

Bachelor Eindwerk ct-3000

Zwakke plekken in beton

Technische Universiteit Delft
Faculteit: Civiele Techniek
Afdeling: Mechanica, Materialen en Constructies

Begeleiders:
dr. ir. S.A.A.M Fennis
dr. ir. P.C.J Hoogenboom

Antonio Paskvalin
4039696

I: Voorwoord

Dit rapport is bedoeld als verslag voor mijn bachelor eindwerk waarin is onderzocht, of de bestaande normen en EEM -programma's een goede voorspelling kunnen maken van de bezwijkkracht van een plaat. Dit rapport dient ook als ondersteuning voor het lopende hoofdonderzoek naar effecten van zwakke plekken in betonnen plaat. Dit eindwerk vond plaats in het kader van de studie Civiele Techniek aan de TU Delft, waar dit eindwerk de afsluiting vormt van de bachelor.

Ik zou graag mijn begeleiders dr. ir. S.A.A.M Fennis en dr. ir. P.C.J Hoogenboom willen bedanken voor hun bijdrage en hun expertise bij het maken van dit rapport. Ook zou ik graag Yuguang Yang willen bedanken die me vaak heeft geholpen tijdens het maken van dit eindwerk. En verder wil ik ook de overige deelnemers van het hoofdonderzoek bedanken, dat ik mee mocht kijken bij de proeven.

Ik hoop dat u dit rapport met belangstelling zult lezen.

Delft, juni 2012

Antonio Paskvalin

II: Samenvatting

Er is onderzoek gedaan naar de geschiktheid voor het voorspellen van een bezwijkkracht met behulp van de bestaande normen (Eurocode, NEN en Rafla) en met behulp van een eindige elementen programma gebaseerd op lineaire berekeningen (Scia Engineer).

De doelstelling was om te kijken hoe nauwkeurig de normen de bezwijkkracht kunnen voorspellen, die uit de proefresultaten van het hoofdonderzoek verkregen zijn. Daarnaast werd er ook gekeken of er uit inwendig evenwicht in het beton ook een bezwijkkracht kan worden voorspeld. Ook is er gekeken hoe goed een EEM programma de bezwijkkracht kan voorspellen.

Alles werd onderzocht voor drie typen platen: Een lage sterkte beton plaat, een hoge sterkte beton plaat en een plaat met verschillende sterktes. Voor de handberekeningen is er alleen gerekend voor de lage en hoge sterke platen. De gemixte plaat is alleen in de simulatie gebruikt met uiteraard ook de andere twee typen platen.

Voor de normen zijn er handberekeningen gemaakt. Hiervoor zijn de formules gebruikt waarmee de dwarskrachtcapaciteit van beton kan worden uitgerekend. Omdat deze formules uit een aantal veiligheidsfactoren bestaan, werden deze zoverre mogelijk geëlimineerd, om een beter resultaat te krijgen. Vervolgens werd er vanuit de berekende dwarskrachtcapaciteiten teruggerekend naar de bijbehorende bezwijkkracht. Voordat dit kon worden gedaan werden er nog eerst een aantal algemene berekeningen gemaakt, onder andere voor het dwarskrachtenverloop.

Verder werd er ook een bezwijkkracht berekend met veronderstelling dat er in het beton evenwicht plaatsvindt tussen de werkende krachten.

Het blijkt dat de normen geen goede voorspeller zijn voor de bezwijkkracht. De verkregen resultaten wijken behoorlijk af van de proefresultaten. De norm die het dichtst bij de werkelijke waarde komt is de formule van Rafla en deze wijkt rond de 25% af van de werkelijke bezwijkkracht. Voor de handberekeningen is de berekening via inwendig evenwicht het nauwkeurigst met maximaal 17% afwijking naar boven vergeleken met de proefresultaten.

Ook de waarden verkregen uit het EEM programma wijken best veel af van de proefresultaten. Deze zijn echter wel nauwkeuriger dan de handberekeningen. De waarden zijn 10 tot 15% hoger dan de werkelijke waarden.

Kortom de normen en de EEM programma geven geen nauwkeurige waarden voor de bezwijkkracht. Deze kunnen beter niet worden gebruikt voor een betrouwbare bezwijkkracht voorspelling. Als er moet worden gekozen, is het aanbevolen om de EEM programma te gebruiken. Voor de rest moeten de normen gewoon worden gebruikt waarvoor ze dienen en dat is voor ontwerpen. En dit laatste geldt het meest voor de Eurocode.

III: Inhoudsopgave

I: Voorwoord.....	i
II: Samenvatting.....	ii
1: Inleiding.....	1
2: Probleembeschrijving en doelstelling	2
3: Systeembeschrijving.....	3
4: Resultaten proeven.	6
5: Handberekeningen	7
5.1 Algemeen.....	7
5.2 Dwarskrachtcapaciteiten.....	9
5.2.1 Eurocode 2.....	9
5.2.2 NEN 6720	11
5.2.3 Rafla.....	14
5.3 Berekening van bezwijkkracht via evenwicht	16
6: Scia Engineer	19
6.1 plaat met lage sterkte beton, C20.....	20
6.1.1Uitkomst bezwijkkracht.....	20
6.1.2 Bijzonderheden bij C20-plaat	20
6.2 Plaat met hoge sterkte beton, C80.....	21
6.2.1 Uitkomst bezwijkkracht.....	21
6.2.2 Bijzonderheden C80-plaat	22
6.3 Plaat met gemixte sterkten beton, C20 en C80	23
6.3.1 Uitkomst bezwijkkracht.....	23
6.2.2 Bijzonderheden gemixte plaat.	23
6.4 Samenvatting Scia	24
7: Analyse	25
7.1 Analyse handberekeningen	25
7.2 Analyse Scia Engineer	26
8: Conclusie en aanbeveling	27
9: Literatuurlijst	28
10: Bijlagen	29
A: Handberekeningen.....	29
A.1 Algemene berekeningen.	29
A.2 Berekeningen voor Dwarskrachtcapaciteit	35

A.2.1 Eurocode-2	35
A.2.2 NEN-code	37
A.2.3 Rafla.....	41
A.3 Berekening van bezwijkkracht via evenwicht	43
B: Matlabscripten	47
B.1 Scripten voor Algemene berekeningen	47
B.1.1 Script beginwaarden en dwarskracht definiëren	47
B.1.2 Script voor grafieken dwarskracht,schuifspanning etc.	47
B.1.5 Script voor grafiek Momenten.	48
B.1.4 Script voor berekenen symbolische waarden grootheden.	49
B.2 Scripten voor Dwarskrachtcapaciteit	49
B.2.1 Scripten voor Eurocode-2.....	49
B.2.2 Scripten voor NEN	50
B.2.3 Scripten voor Rafla	52
B.3 Scripten voor Evenwichtsberekening.....	53
C: Scia Engineer	55
C.1 plaat met lage sterkte beton, C20.....	55
C.2 Plaat met hoge sterkte beton, C80.....	57
C.3 Plaat met gemixte sterkten beton, C20 en C80	59

1: Inleiding

Beton is een bros materiaal. Dit betekent dat beton ook bros kan bezwijken. Gebaseerd op deze aanname is de sterkte in de meeste normen de 5% fractiel waarde van de betondruksterkte. Dit voldoet voor vers gestort beton, omdat dit beton geen grote variatie heeft in een sterkteklasse. Maar dit geldt niet voor oud beton. De variatiecoëfficiënt van oud beton is dubbel zo hoog als die van jong beton (*Yang & Den Uijl, 2011*). Dit betekent dat de f_{ck} waarde van jong beton 10% hoger is dan van oud beton. Dit verschil is er vanwege de aanname dat de laagste betonsterkte de capaciteit van een constructie bepaald. Echter voor een perfecte buigzame materiaal geldt dat niet.

Dan ontstaat er een probleem als het gaat om dwarskrachtcapaciteit. Vanwege de ingewikkelde verdeling van de schuifspanningen, zal het algemene gedrag van de schuifspanningen ergens liggen tussen dat van een brosse of taaie materiaal. Daarom zullen er experimenten moeten worden gedaan om dit op de proef te nemen.

Deze experimenten worden gedaan door een promovendus samen met een master student. Tijdens de experimenten wordt er gekeken, wat er gebeurt met de dwarskrachten en schuifspanningen in een betonnen plaat met verschillende sterkten. Om het verschil in betonsterktes groot te maken worden er twee soorten sterktes gebruikt: C20 en C80.

Er zijn drie verschillende platen gemaakt. Een plaat met betonsterkte C20; een plaat met betonsterkte C80; en een plaat met strips van zowel C20, als C80. Deze worden dan beproefd met een lijnlast, die dicht bij de oplegging geplaatst wordt.

De platen zijn al eerder gesimuleerd in een EEM programma gebaseerd op niet lineaire berekeningen. De experimenten zelf zijn op moment van schrijven in volle gang.

Dit eindwerk is ingedeeld in een aantal delen. Als eerst wordt het probleem en de doelstelling omschreven. Daarna volgt een systeembeschrijving, waarin onder andere de dimensies van de platen worden aangeven en nog enkele details van de experimenten.

Vervolgens volgen de handberekeningen, waarin met verschillende normen de dwarskrachtcapaciteit wordt uitgerekend. En daarbij wordt ook met inwendig evenwicht naar een capaciteit gezocht.

Na de handberekeningen volgen de uitkomsten van de simulatie in EEM programma Scia Engineering.

Als laatst zullen nog alle resultaten worden vergeleken, om vervolgens tot een conclusie te komen.

2: Probleembeschrijving en doelstelling

In de inleiding is uiteengezet wat het algemene probleem is van het hoofdonderzoek. Maar waar dient dit Bachelor eindwerk voor, als alle belangrijke proeven worden gedaan door promovendi?

Er bestaan verschillende formules, zowel nieuwe als oude formules om de dwarskrachtcapaciteit uit te rekenen. Maar hoe goed voorspellen al deze formules de werkelijkheid. In veel van de bestaande formules zijn er veel veiligheidsfactoren geïmplementeerd, met als doel dat constructies veilig ontworpen kunnen worden. Is er een mogelijkheid om deze veiligheidsfactoren weg te laten om zo tot een zo nauwkeurig mogelijke waarde te komen als de werkelijke bezwijkkracht. In dit eindwerk is onderzocht, of er een mogelijkheid is. Verder ontstaan er nog veel inwendige krachten in het beton zelf. Kan er een waarde voor de bezwijkkracht wellicht worden gehaald uit het evenwicht van al de inwendige krachten?

In het hoofdonderzoek wordt gebruik gemaakt van een EEM programma die niet-lineaire berekeningen uitvoert. Een niet lineaire berekening is voor beton veel nauwkeuriger dan een lineaire berekening. Dit voornamelijk vanwege het gedrag van het beton zelf.

Maar hoeverre komen de uitkomsten van een lineaire berekening in de buurt van de werkelijkheid. Kan zo'n berekening nog steeds een indicatie geven van het werkelijk gedrag van de schuifspanningen en dwarskrachten en ook eventueel een bezwijkkracht voorspellen? Dit zal worden onderzocht met behulp van het EEM programma Scia Engineering.

Wanneer alle proeven in het hoofdonderzoek zijn voltooid, moeten de resultaten worden vergeleken met de handberekeningen en de simulatie in Scia. Zo kan worden gekeken, in hoeverre al deze waarden met elkaar in overeenstemming zijn.

Kortom de doelen van dit onderzoek zijn:

1. Onderzoeken in hoeverre de huidige normen voor dwarskrachtcapaciteit de werkelijke capaciteit van een betonnen plaat voorspellen.
2. Onderzoeken in hoeverre de dwarskrachtcapaciteit, berekend in Scia Engineering, overeenstemt met de werkelijke capaciteit.

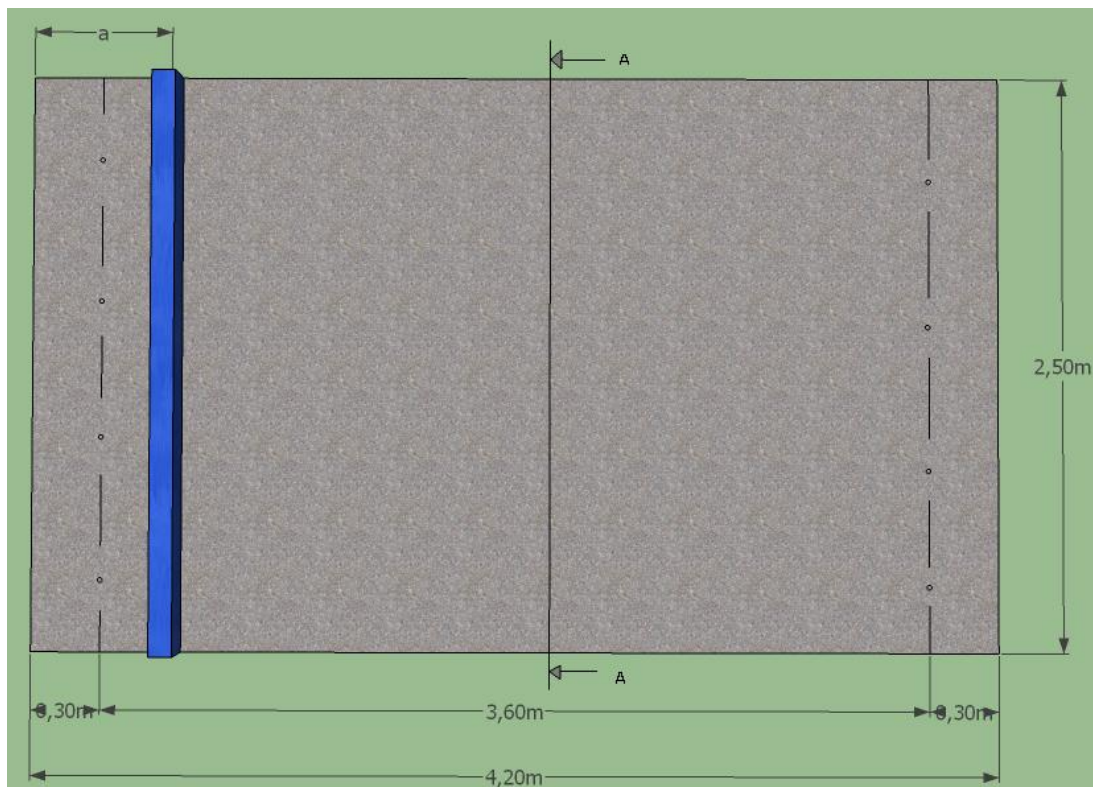
3: Systeembeschrijving

De betonnen platen die worden gebruikt hebben een afmeting van 4200x2500x300 mm. Aan de onderkant wordt in de x-richting voor wapening 21 staven van $\phi 20$ mm gebruikt en in y-richting 34 staven van $\phi 10$ mm.

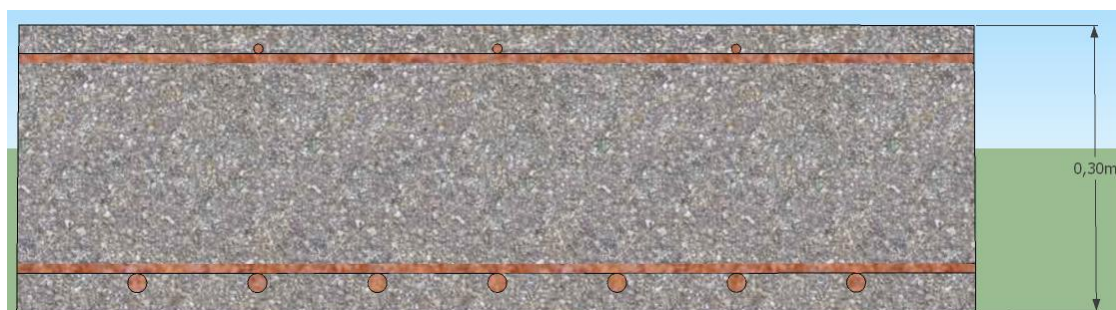
Aan de bovenkant wordt een mesh gebruikt met in de x-richting 15 staven van $\phi 12$ mm en in de y-richting 9 staven van $\phi 12$ mm. De dekking c is 20 mm.

In figuur 3.1 en 3.2 zijn respectievelijk het bovenaanzicht en de dwarsdoorsnede per meter weergegeven van de plaat. De blauwe balk in figuur 3.1 stelt de lijnlast voor op een afstand a van de rechter oplegging. De hartlijnen van de opleggingen zijn de gestippelde lijnen in figuur 3.1.

Voor de effectieve hoogte is in het hoofdonderzoek gerekend met $d=265$ mm. Deze waarde wordt ook aangehouden in dit eindwerk.



Figuur 3.1: Bovenaanzicht plaat

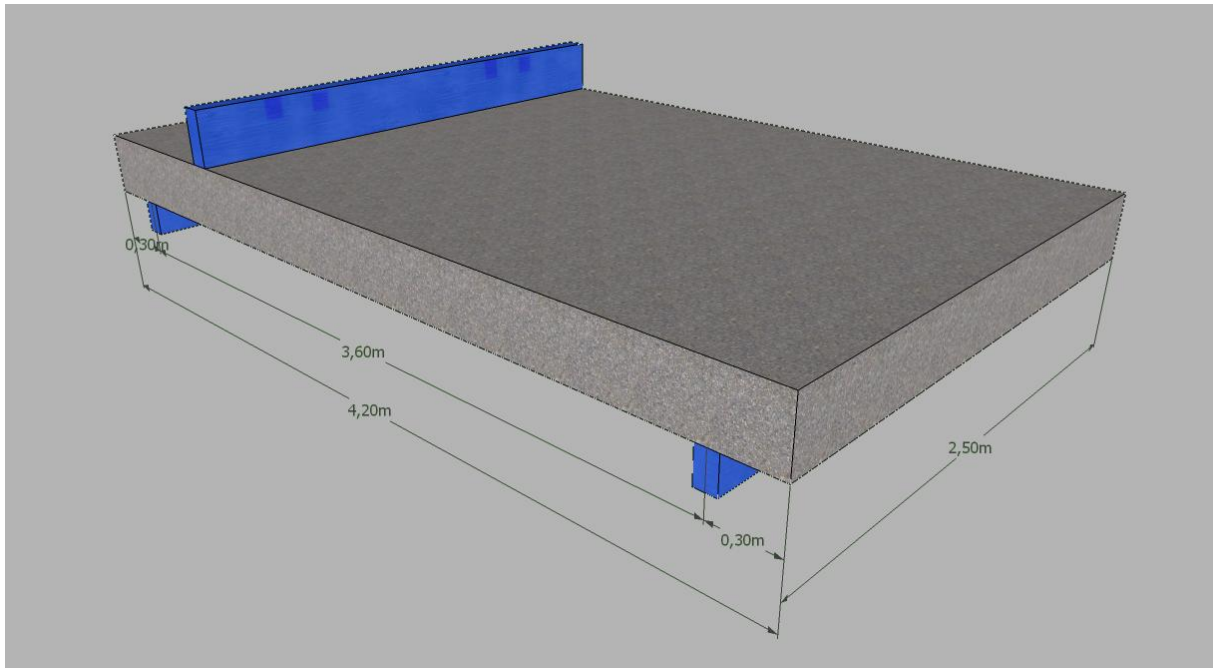


Figuur 3.1: Dwarsdoorsnede plaat per strekkende meter (locatie A-A)

Zoals in de inleiding genoemd is, zijn er drie soorten platen gebruikt. Een plaat met alleen een sterkte van C20, een plaat met alleen C80 en een plaat met de sterktes C20 en C80.

De getallen 20 en 80 staan voor de gemiddelde betonsterkten f_{cm} . De karakteristieke sterkte, f_{ck} voor C20 is 12 MPa. Voor C80 is f_{ck} 72MPa. Met deze f_{cm} en f_{ck} waarden zal in het verloop worden gerekend.

In figuur 4.3 is ook nog een 3D beeld te zien van de plaat.



Figuur 4.3 drie dimensionaal beeld van de plaat

Tijdens de proeven zal de lijnlast stapsgewijs worden opgevoerd per stappen van 200.

De lijnlasten worden de eerste serie van proeven geplaatst op $a = 600$ mm van de oplegging en de tweede serie op $a = 800$ mm. Alle drie de soorten platen worden op beide afstanden getest.

Voor de proeven zijn er in totaal vier platen gestort. Elke plaat wordt twee keer getest. Eerst de ene kant (A) dan de andere kant (B) Er volgt nu een lijst van de platen met hun benamingen. Deze benamingen komen van het hoofdonderzoek. Deze termen zullen in het vervolg ook worden gebruikt om de proefstukken te benamen.

L016A	L staat voor low strength en de 6 voor $a=600$ mm
L018B	L staat voor low strength en de 8 voor $a=800$ mm
H026A	H staat voor high strength en de 6 voor $a=600$ mm
H028B	H staat voor high strength en de 8 voor $a=600$ mm
M036A	M staat voor mixed strengths en de 6 voor $a=600$ mm
M038B	M staat voor mixed strengths en de 8 voor $a=800$ mm
M046A	M staat voor mixed strengths en de 6 voor $a=600$ mm
M048B	M staat voor mixed strengths en de 8 voor $a=800$ mm

Er volgt nu een lijst van vaak voorkomende termen. In het rapport komen uiteraard meer termen voor, maar die worden in de loop van de tekst en voornamelijk in de bijlage gedefinieerd. Deze termen komen in ieder geval vaak voor, zodat ze hier al worden gedefinieerd.

f_{cm} =Gemiddelde betondruksterkte

f_{ck} =karakteristieke cilinderdruksterkte

f_{sm} = gemiddelde staalspanning

f_b = beton treksterkte (NEN)

f_{brep} = representatieve waarde van de treksterkte van beton

τ_1 = Schuifspanningscapaciteit (NEN)

$V(\tau_1)$ =Dwarskrachtencapaciteit (NEN)

$V_{Rd,c}$ = Dwarskrachtencapaciteit (EC-2)

$V_{u,m}$ = Dwarskrachtencapaciteit (Rafla)

a = Afstand van lijnlast tot (linker) oplegging

d = effectieve hoogte van de plaat

b =breedte van de plaat.

N_c = Normaalkracht van beton in betondrukzone

N_s = Normaalkracht in wapeningsstaal

x = hoogte van de drukzone in de betonnen doorsnede

z = afstand tussen N_c en N_s

4: Resultaten proeven.

Er volgt een overzicht van de resultaten van de proeven. Deze staan in tabel 4.1. Weergegeven zijn het plaatnummer, de sterkte van de plaat, de afstand a en de kracht wanneer de plaat is bezwiken. De originele planning van het hoofdonderzoek was dat er elke 2 weken 3 platen zouden worden getest. Dus aan het einde van de periode moesten alle platen getest zijn. Echter er ontstonden complicaties met de opstelling waardoor een aantal weken geen enkele plaat is getest. Daarom was het niet mogelijk dat in de loop van de maak van dit eindwerk alle platen werden getest. Dus de helft van de testresultaten, namelijk de resultaten van $a=800$ mm ontbreken. Tijdens het vergelijken met de handberekeningen zal hier rekening mee worden gehouden.

Tabel 4.1: Proefresultaten van alle platen

Plaat	Plaat #	Sterkte	a [mm]	Bezwijkkracht F [kN]
L016A	1	C20	600	1450
L018B	1	C20	800	
H026A	2	C80	600	1650*
H028B	2	C80	800	
M036A	3	C20 en C80	600	1850
M038B	3	C20 en C80	800	
M046A	4	C20 en C80	600	1700
M048B	4	C20 en C80	800	

De proeven verliepen prima. Echter tijdens het testen van H026A, moest het belasten voortijdig worden afgebroken, omdat onderdelen van de opleggingen begonnen weg te schieten. Dit kan een verklaring zijn waarom de gemixte platen hogere bezwijkkrachten hebben. Door de promovendus Y. Yang is beweerd dat de hoge sterkte plaat ook tot rond de 1800 kan worden belast.

Wat opvalt, is dat de platen met de gemixte sterkten wat betreft de bezwijkkracht dichterbij de hoge sterkte platen vallen, dan de lage sterkte plaat.

De verkregen resultaten zullen later worden vergeleken met de handberekeningen en de Scia berekeningen.

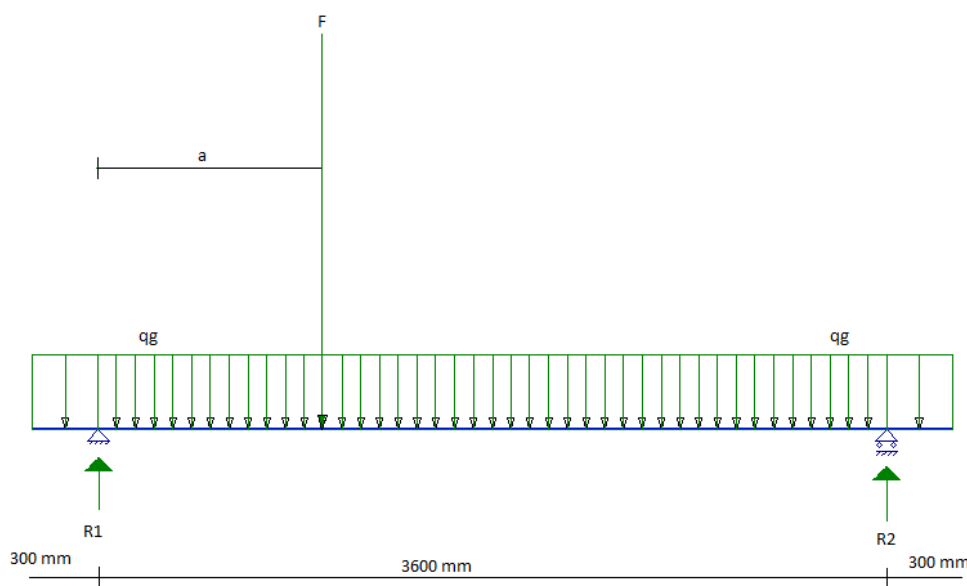
5: Handberekeningen

5.1 Algemeen

Om vergelijkingsmateriaal te hebben met de proefresultaten zijn er handberekeningen gemaakt voor de dwarskracht. Daarna zijn er voor een aantal normen de dwarskrachtcapaciteit uitgerekend. Met deze capaciteiten zal er worden teruggerekend naar een bezwijkkracht F . Ten slotte wordt ook via evenwicht in het beton een bezwijkkracht uitgerekend. Al deze waarden worden later met elkaar vergeleken in het Analyse hoofdstuk.

In dit hoofdstuk worden geen uitgebreide berekeningen gegeven. Alleen formules en resultaten die relevant zijn voor het onderzoek. Verder worden waarden van een bepaalde norm onderling ook nog met elkaar vergeleken. Voor alle berekeningen en resultaten van zowel de handberekeningen, als de berekeningen van de capaciteiten en ook de evenwichtsberekeningen, wordt verwezen naar bijlage A.

Voordat de dwarskrachtcapaciteiten worden uitgerekend, moeten eerst de maatgevende dwarskrachten en momenten worden uitgerekend ten gevolge van de lijnlast. Voor deze waarden worden analytische waarden uitgerekend met nog onbekende F . Deze kunnen later dan gebruikt worden om terug te rekenen naar een bezwijkkracht. De constructie wordt als volgt geschematiseerd (figuur 5.1):



Figuur 5.1: mechanica schema plaat

De puntlast representeert de lijnlast F en de q -last is ten gevolge van het eigen gewicht. Afstand a is de afstand van de kracht F ten opzichte van de rechter oplegging. Via momentenevenwicht worden de oplegreacties $R_{1,2}$ uitgerekend. Met de oplegreacties kunnen weer de dwarskrachten en het moment worden uitgerekend. De algemene waarden voor de oplegreacties zijn te zien in tabel 5.1. De grootste oplegreactie is altijd de R die zich het dichtst bij de puntlast begint. In het onderzoek waar voor a , 600mm en 800mm wordt gebruikt, is dat de rechter oplegreactie R_1 .

Tabel 5.1: Waarden oplegreactie

R1 (BGT)	$F * (1 - (a / 3.6)) + 41.25$
R2 (BGT)	$(F * a) / 3.6 + 41.25$

In tabel 5.2 staan een aantal algemene, analytische waarden weergegeven voor a met als nog onbekende F. Deze waarden zijn met behulp van de eerder berekende oplegreacties uitgerekend. Alleen de waarden voor a=0,6m en a=0,8m zijn weergegeven. Deze waarden zijn als enige relevant voor het onderzoek. Ook zijn er waarden gegeven voor a=1,8m. Dit is gedaan ter controle voor het verloop van de grootheden. Er is expres gekozen voor a=1,8, omdat dit precies het midden van de plaat is.

Tabel 5.2: Waarden voor dwarskracht, schuifspanning en moment.

a[m]	0,60	0,80	1,80
V1 (oplegging 1)	$5F / 6 + 33,75$	$7F / 9 + 33,75$	$F / 2 + 33,75$
V2 (oplegging 2)	$F / 6 + 33,75$	$2F / 9 + 33,75$	$F / 2 + 33,75$
V_{Ed}	$5F / 4 + 40,5$	$7F / 6 + 40,5$	$3F / 4 + 40,5$
v_{Ed}	$F / 212 + 81 / 530$	$7F / 1590 + 81 / 530$	$3F / 1060 + 81 / 1325$
M_{Ed}	$3F / 4 + 1539 / 80$	$14F / 15 + 387 / 16$	$27F / 20 + 567 / 16$

Voor het berekenen van de bezwijkkrachten vanuit de normen zijn straks de volgende formules relevant:

$$V1(a=0.6) = 5F / 6 + 33,75 \quad (5.1.1a)$$

$$V1(a=0.8) = 7F / 9 + 33,75 \quad (5.1.1b)$$

$$V1(a=1.8) = F / 2 + 33,75 \quad (5.1.1c)$$

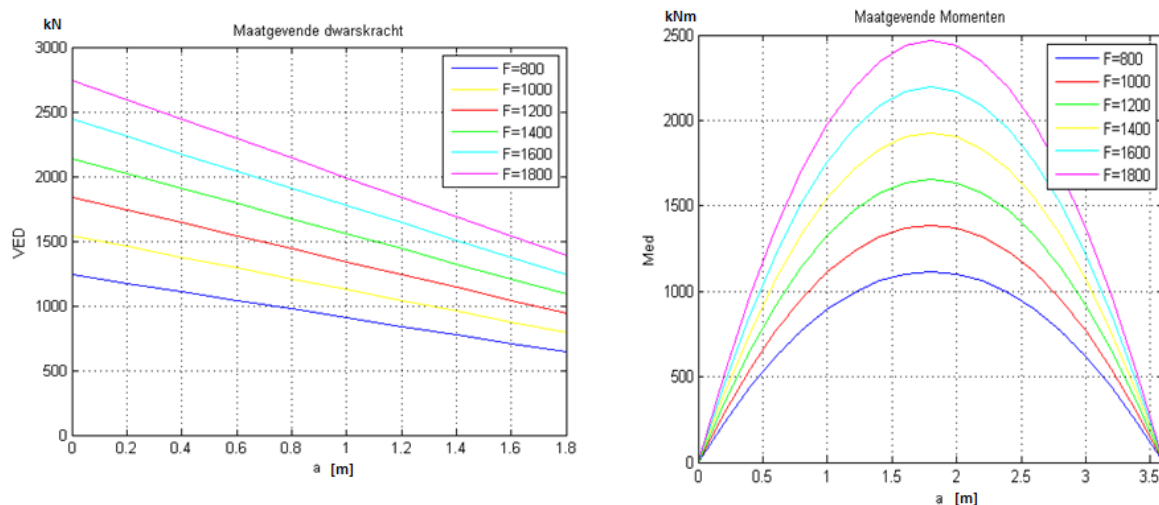
$$V_{Ed}(a=0.6) = F / 6 + 40,5 \quad (5.1.2a)$$

$$V_{Ed}(a=0.8) = 7F / 6 + 40,5 \quad (5.1.2b)$$

$$V_{Ed}(a=1.8) = 3F / 4 + 40,5 \quad (5.1.2c)$$

Waarom alleen V1 en V_{Ed} relevant zijn, wordt uitgelegd wanneer de dwarskrachtcapaciteiten worden uitgerekend in de volgende paragraaf. Het verschil tussen V1 en V_{Ed} is dat in V_{Ed} de factoren $\gamma_g=1.2$ en $\gamma_q=1.5$ zijn verwerkt.

Ter illustratie zijn in figuur 5.2 het dwarskrachtverloop (V_{Ed}) en het momentenverloop (M_{Ed}) weergegeven voor een aantal waarden van F. Dit verloop moet de verandering van de grootheden voorstellen over a. Voor de dwarskracht geldt hoe groter a hoe kleiner de dwarskracht. Vanaf a=1,8m stijgt de dwarskracht weer. Vanaf dat moment is R2 de grootste oplegreactie en V2 dus de maatgevende dwarskracht. Van 1,8 m < a ≤ 3,6 m is de lijn gespiegeld ten opzichte van die in figuur 5.1. Voor het moment geldt hoe groter a, hoe groter het moment. Dit heeft te maken dat met een toenemende a, de arm ook stijgt dus het moment wordt ook groter. Na a=1,8m daalt het moment weer, om dezelfde redenen waarom de dwarskracht na a=1,8m stijgt.



Figuur 5.2: Verloop V_{Ed} en M_{Ed}

5.2 Dwarskrachtcapaciteiten

Na het uitrekenen van analytische waarden in paragraaf 5.1, zal nu in deze paragraaf de dwarskrachtcapaciteit worden uitgerekend, volgens een aantal normen. Dit zijn de Eurocode, de NEN-code en met de formules van Rafla. De waarden die worden uitgerekend, worden, zoverre mogelijk, weergegeven voor $a=600$ mm, $a=800$ mm en $a=1800$ mm. Omdat in de proeven van het hoofdonderzoek wordt gewerkt met $a=600$ en 800 , worden alleen deze resultaten weergegeven.

Naast het uitrekenen van de dwarskrachtcapaciteit met de standaard gegeven formule, zullen ook aanpassingen aan deze formules worden gebracht. Veel van de formules uit de normen hebben veiligheidsfactoren. Deze dienen voor extra veiligheid tijdens ontwerpen. Maar om een zo goed mogelijke voorspelling te krijgen van de buigkracht moeten deze factoren worden geëlimineerd uit de formules. Tijdens de proeven zijn er immers ook geen veiligheidsfactoren.

5.2.1 Eurocode 2

Tegenwoordig wordt in het grootste gedeelte van Europa en dus ook in Nederland de Eurocode gebruikt, voor het ontwerpen van constructies. Voor betonconstructies is er de Eurocode 2 (ec-2). Hierin staat een formule vermeld voor de dwarskrachtencapaciteit $V_{Rd,c}$:

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} * k * 100 * \rho_l * f_{ck}]^{(1/3)} * b_w * d \quad (5.2.1.1)$$

Als men kijkt naar formule (5.2.1.1), dan is er te zien dat de dwarskrachtcapaciteit alleen wordt beïnvloedt door de sterkte en verhoudingen van de plaat. Er is dus geen invloed vanuit de krachten die erop werken of hun positie op de plaat. Dit betekent dat er voor een bepaalde sterkte voor elke a maar één waarde is voor $V_{Rd,c}$.

Verder zitten in formule (5.2.1.1) een aantal veiligheidsfactoren verstoppt. Deze moeten worden weggehaald, zodat er een nieuwe formule kan worden gebruikt. Ec-2 geeft dat $C_{Rd,c} = 0,18 / \gamma_c$. γ_c is een factor die 1.5 bedraagt. Deze zorgt voor een lagere waarde voor $C_{Rd,c}$ (0,12) en zo ook voor $V_{Rd,c}$. Als deze factor wordt weggehaald, dan ontstaat er meteen een nieuwe hogere waarde voor $C_{Rd,c}$ (0,18).

In deze formule zitten een aantal veiligheidsfactoren die nodig zijn, zodat constructies zo veilig mogelijk blijven. Deze factoren zullen ervoor zorgen dat de waarde van $V_{Rd,c}$ lager uitvalt dan in werkelijkheid het geval is. De sterkte f_{ck} is ook een veiligheidsfactor op zich. In plaats van f_{ck} kan ook f_{cm} worden gebruikt, die hoger is, want $f_{cm} = f_{ck} + 8$. Door deze nieuwe grootheden in (5.2.1.1) in te vullen, krijgt men een nieuwe formule:

$$V_{Rd,c} = [0,18 * k * 100 * \rho_l * f_{cm}]^{(1/3)} * b_w * d \quad (5.2.1.2)$$

Met deze twee formules kan nu een capaciteit worden uitgerekend voor C20 en C80. De uitkomsten zijn weergegeven in tabel 5.3. Links staan de uitkomsten uit formule (5.2.1.1) met veiligheidsfactoren en rechts uit formule (5.2.1.1) zonder veiligheidsfactoren.

Tabel 5.3: Uitkomsten $V_{Rd,c}$ volgens EC-2

Met veiligheidsfactoren			Zonder veiligheidsfactoren		
	C20	C80		C20	C80
$V_{Rd,c}$ [kN]	336,6935	611,8127		598,7914	950,5221

Te zien is dat de waarde van V_{Rdc} bij C20 met een factor 1.77 groter en bij C80 een factor 1.55 groter is, wanneer de veiligheidsfactoren worden geëlimineerd. Nu de dwarskrachtcapaciteiten bekend zijn, kan met behulp van formules (5.1.1a-c) en (5.1.2a-c) de bezwijkkracht F worden berekend. De formules (5.1.1a-c) worden gebruikt in combinatie met de $V_{Rd,c}$ waarden zonder veiligheidsfactoren. Dit omdat er in V_1 geen extra factoren zitten die in V_{Ed} wel zitten ($\gamma_g=1,2$ en $\gamma_q=1,5$). De formules (5.1.2a-c) worden gebruikt in combinatie met de $V_{Rd,c}$ waarden met veiligheidsfactoren. De uitkomsten voor F die hieruit volgen zijn weergegeven in tabel 5.4. Voor elke a is er een verschillende waarde van F . Dit komt omdat de dwarskracht verandert over a .

Er valt op dat de verhoudingen met/zonder veiligheidsfactoren bij een bepaalde sterkte voor F veranderen vergeleken met $V_{Rd,c}$. De verhoudingen worden bij F groter. Dit gebeurt ook bij de andere twee normen. Dit komt door de formules die worden gebruikt bij het omrekenen naar F . En het komt ook door de invloed van het eigengewicht die in de formules is verwerkt (33,75 in 5.1.1a-c en 40,5 in 5.1.2a-c). Het gebruik van twee verschillende formules en het invloed van het eigengewicht zorgt dus voor verschil in verhoudingen tussen met en zonder veiligheidsfactoren voor een bepaalde betonsterkte.

Tabel 5.4: Uitkomsten F gerekend met $V_{Rd,c}$

	F Bij V_{Rdc} EC-2			
	Met veiligheidsfactoren		zonder veiligheidsfactoren	
a	C20	C80	C20	C80
0,6	236,9548	457,0502	678,0497	1100,127
0,8	253,8801	489,6966	726,4818	1178,707
1,8	394,9247	761,7503	1130,083	1833,544

Verder mag men volgens Eurocode 2 een reductiefactor (β) aanbrengen bij de maatgevende dwarskracht V_{Ed} : Wanneer een kracht dicht bij een oplegging wordt geplaatst, zal een gedeelte van de kracht direct via de drukdiagonaal worden overgedragen.

De reductiefactor β wordt gebruikt voor $0,5d \leq a \leq 2,0d$. $\beta = a/2d$. Met $d=0,265$ m (de effectieve hoogte) geldt dat vanaf $a=0,6$ de factor niet meer mag worden gebruikt. Voor V_{Ed} tot $a=0,53$ m geldt dan $V = \beta \cdot V_{Ed}$. Voor het onderzoek heeft deze factor geen invloed, omdat tijdens de proeven niet met een a -waarde lager dan 0.6 m wordt getest. Deze wordt daarom verder niet meer gebruikt.

5.2.2 NEN 6720

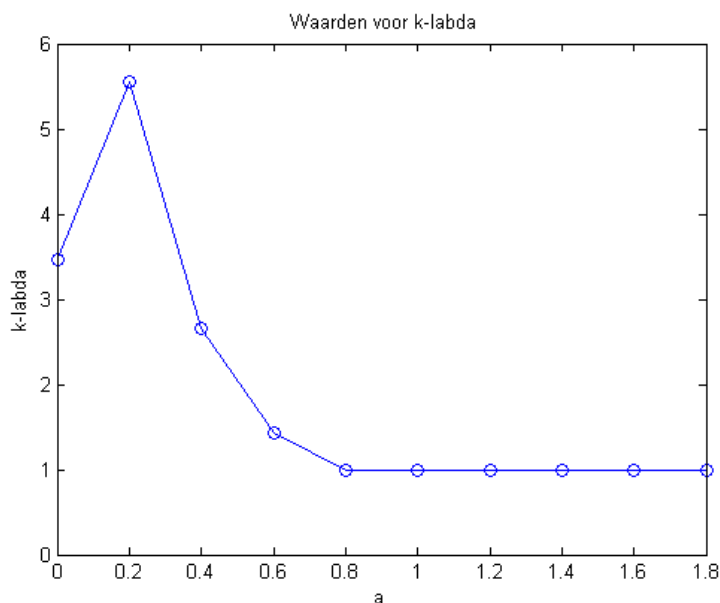
Voordat de eurocode 2 in gebruik werd genomen, werd in Nederland de NEN norm gebruikt. Voor beton constructies was er specifiek de NEN 6720. De formule voor de dwarskrachtcapaciteit die hierin staat aangegeven, is niet hetzelfde als die van de Eurocode. Eigenlijk staat er geen formule voor de dwarskrachtcapaciteit, maar voor de schuifspanningscapaciteit. De formule gegeven in NEN 6720 is:

$$\tau_1 = 0,4 \cdot f_b \cdot k_\lambda \cdot k_h \cdot \omega^{(1/3)} \quad (5.2.2.1)$$

Men krijgt de dwarskrachtcapaciteit $V(\tau_1)$ door nog τ_1 met $b \cdot d$ te vermenigvuldigen. Volgens NEN geldt er namelijk dat $\tau = V/(b \cdot d)$. In formule (5.2.2.1) bevindt zich de formule k_λ . Deze is afhankelijk van het moment en de dwarskracht (dit komt eigenlijk door factor λ_v , die in k_λ verstopt zit), die op hun beurt weer van a afhankelijk zijn. Dit zal er voor zorgen dat, in tegenstelling tot $V_{Rd,c}$ bij EC-2, elke a -waarde een andere dwarskrachtcapaciteit zal hebben. Er geldt niet dat er bij een verschillende krachtswaarde ook een andere $V(\tau_1)$ is, want de verhoudingen bij een gelijke a tussen moment en dwarskracht blijven bij elke F hetzelfde.

Ter illustratie is in figuur 5.3 te zien hoe k_λ verloopt over a . Het verloop van τ_1 en dus ook $V(\tau_1)$, zal er uiteindelijk ook zo uitzien.

NB. De gehele berekening van λ_v en k_λ is te vinden in bijlage A.2.2



Figuur 5.3: Verloop k_λ

Formule (5.2.2.1) bestaat ook net als formule (5.2.1.1) uit een aantal veiligheidsfactoren. Deze moeten ook weer worden weggewerkt om een nauwkeurigere voorspelling te krijgen van de bezwijkkracht. De grootste invloeden zijn k_λ en de treksterkte f_b . In k_λ zitten er geen veiligheidsfactoren. Echter in f_b wel. En wel op dezelfde manier eigenlijk als f_{ck} in formule (5.2.1.1). Om de treksterkte te berekenen is er een formule in de NEN gegeven:

$$f_b = f_{brep} / \gamma_m \quad (5.2.2.2a)$$

Met

$$f_{brep} = 0,7(1,05 + 0,07 \cdot f_{ck}) \quad (5.2.2.2b)$$

In f_b zit er dus een factor $\gamma_m (=1.4)$ en in f_{brep} zit f_{ck} . In plaats van f_b , kan men f_{bm} gebruiken. Dit is de gemiddelde treksterkte van het beton.

$$f_{bm} = 1,4 * f_{brep} \quad (5.2.2.2c)$$

Op deze manier wordt meteen de γ_m geëlimineerd. f_{ck} mag niet worden veranderd in f_{cm} , omdat er al een gemiddelde treksterkte wordt gebruikt. Dus om ook met f_{cm} te rekenen betekent dubbel op rekenen. De nieuwe formule voor de schuifspanningscapaciteit wordt nu:

$$\tau_1 = 0,4 * f_{bm} * k_\lambda * k_h * \omega^{(1/3)} \quad (5.2.2.3)$$

De uitkomsten vanuit de formule (5.2.2.1) en (5.2.2.3) worden met $b*d$ vermenigvuldigd en dit zorgt voor de resultaten van de dwarskrachtcapaciteiten volgens de NEN-code. Deze zijn in tabel 5.5 voor de maatgevende a -waarden weergegeven. De waarden gelden voor een willekeurige F .

Tabel 5.5: Uitkomsten $V(\tau_1)$ volgens NEN

$V(\tau_1)$ voor NEN 6720.				
	Met veiligheidsfactoren		Zonder veiligheidsfactoren	
a [m]	C20	C80	C20	C80
0,6	402,6166	1134,647	789,1285	2223,907
0,8	281,3415	792,8714	551,4293	1554,028
1,8	281,3415	792,8714	551,4293	1554,028

In de tabel is te zien dat $V(\tau_1)$ daalt bij een toenemende a . Verder zijn de waarden bij $a=0,8m$ en $a=1,8m$ zijn gelijk aan elkaar. Beide gevallen zijn veroorzaakt door het verloop van k_λ . Die was in figuur 5.3 te zien. Daar kan men zien dat vanaf $a=0,8m$ de waarde constant blijft. Dit geldt dan ook voor de dwarskrachtcapaciteit.

De waarden van $V(\tau_1)$ worden zowel bij C20, als bij C80 met een factor 1.96 groter, wanneer de veiligheidsfactoren worden weggelaten. Dit is een grotere factor dan bij de waarden verkregen met de formule van EC-2.

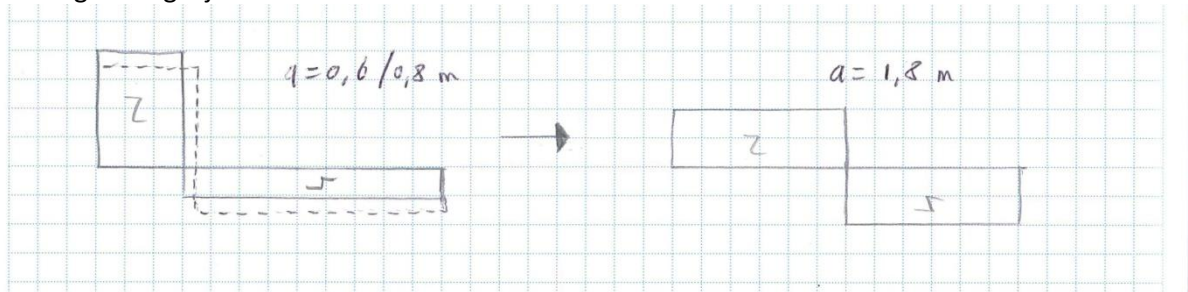
Nu de capaciteiten zijn uitgerekend kan er met behulp van de formules (5.1.1a-c) en (5.1.2a-c) worden uitgerekend, bij welke kracht de plaat bezwijkt. Er zijn nu wel verschillende $V(\tau_1)$ waarden voor elke a , dus de juiste waarde moet met de juiste formule worden gebruikt, behorend bij een a . De resultaten zijn te zien in tabel 5.6.

Tabel 5.6: Uitkomsten F gerekend met $V(\tau_1)$

F Bij $V(\tau_1)$ NEN-6720				
	Met veiligheid		zonder veiligheid	
a	C20	C80	C20	C80
0,6	289,6933	875,3176	906,4542	2628,188
0,8	206,4356	644,8898	665,5877	1954,643
1,8	321,122	1003,162	1035,359	3040,556

Als er in tabel 5.6 wordt gekeken naar de waarden valt er op dat de waarden van $a=0,6m$ en $a=0,8m$ kleiner zijn dan de waarden van $a=1,8m$, terwijl de dwarskrachtcapaciteiten gelijk aan elkaar zijn. In eerste instantie is er invloed vanuit k_λ . Maar er is ook invloed vanuit de dwarskrachtverdeling over de plaat. Het verschil is te zien in de schets in figuur 5.4.

Te zien is, zoals ook te zien was in figuur 5.1 (paragraaf 5.1), dat wanneer de kracht verschuift, weg van de oplegging, de dwarskracht kleiner wordt. Dit betekent dus dat bij een gelijk F bij $a=1.8\text{m}$ de dwarskracht kleiner is. Dus het zal langer duren voordat de dwarskrachtcapaciteit wordt bereikt. Dit verklaart ook waarom de bezwijkkracht groter is bij $a=1.8\text{m}$ dan bij $a=0.8\text{m}$. En blijktbaar is de invloed van de krachtpositie groter dan de invloed van k_v , waardoor F bij $a=1.8\text{m}$ ook groter is dan die bij $a=0.6\text{m}$. Dit fenomeen is dan natuurlijk ook te zien door bijvoorbeeld de formules (5.1.1a-c) onderling te vergelijken.



Figuur 5.4: Schets verloop dwarskracht over a

5.2.3 Rafla

Naast de Eurocode en de NEN is er nog een formule namelijk de formule van Rafla. Dit is tevens de laatste formule waarvoor de dwarskrachtcapaciteit wordt uitgerekend.

Door Rafla is er een empirische formule ontwikkeld, om het afschuifdraagvermogen te berekenen:

$$V_{u,m} = \alpha_u \cdot d^{(-0,25)} \cdot f_{cm}^{0,5} \cdot (\rho_l \cdot 100)^{(1/3)} \cdot b \cdot d. \quad (5.2.3.1)$$

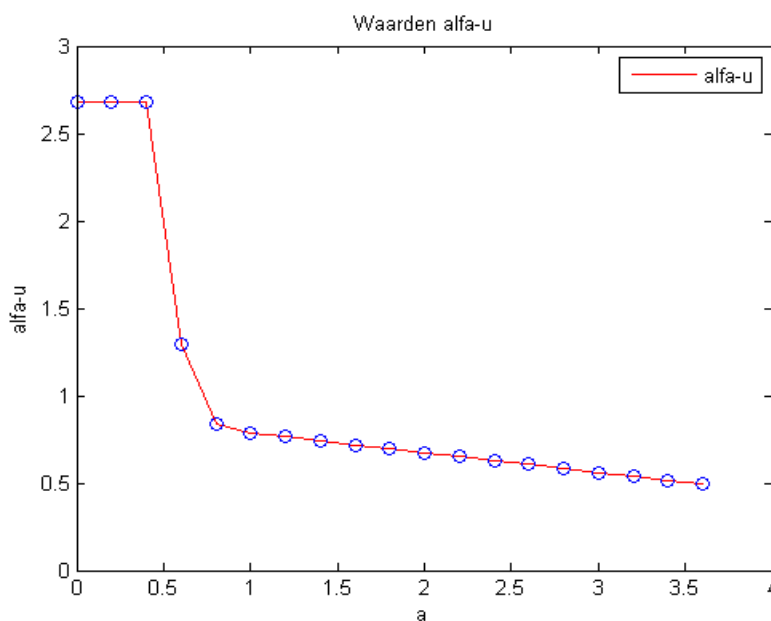
Net als $V(\tau_1)$ is $V_{u,m}$ ook afhankelijk van de afstand van F ten opzichte van de oplegging. De a -waarde zit verstopt in de factor α_u . Deze waarde verandert dus bij een veranderende a . Voordat de dwarskrachtcapaciteit wordt uitgerekend, moet dus eerst α_u worden uitgerekend. Voor α_u zijn er drie verschillende formules:

$$\alpha_u = 6 - 2,2 \cdot a/d \quad \text{voor} \quad d < a < 2d \quad (5.2.3.2a)$$

$$\alpha_u = 0,795 + 0,293 \cdot (3,5 - a/d)^{(2,5)} \quad \text{voor} \quad 2d < a < 3,5d \quad (5.2.3.2b)$$

$$\alpha_u = 0,9 - 0,03 \cdot a/d \quad \text{voor} \quad a > 3,5d \quad (5.2.3.2c)$$

In figuur 5.5 is het verloop te zien van α_u . Het blijkt dus dat de waarde van α_u daalt, wanneer de waarde van a stijgt. Dus dit betekent ook dat de waarde van $V_{u,m}$ ook zal dalen bij een stijgende a . α_u is namelijk de enige variabele die verandert in formule (5.2.3.1). Daarom ziet het verloop van $V_{u,m}$ hetzelfde eruit als het verloop in figuur 5.5.



Figuur 5.5: Verloop α_u

Bij formule (5.2.3.1) is het niet mogelijk om veiligheidsfactoren te elimineren, omdat deze er niet zijn. Ook wordt al een gemiddelde waarde voor de betonsterkte gebruikt, dus hier kan ook geen verandering in worden gebracht. Dus de uitgerekende waarde voor $V_{u,m}$ is dan ook de enige voorspelde waarde. In de tabel 5.7 zijn de belangrijkste waarden te zien voor $V_{u,m}$.

Tabel 5.7: Uitkomsten $V_{u,m}$

a	$V_{u,m}$ bij C20	$V_{u,m}$ bij C80
0,6	939,5199	1879,04
0,8	612,0912	1224,182
1,8	506,0932	1012,186

Met de uitgerekenen capaciteiten kan weer met behulp van formules (5.1.1a-c) en (5.1.2a-c) de bezwijkkrachten worden uitgerekend. In tabel 5.8 zijn de F waarden weergegeven voor de uitgerekenen $V_{u,m}$ -en.

Tabel 5.8: Uitkomsten F gerekend met $V_{u,m}$

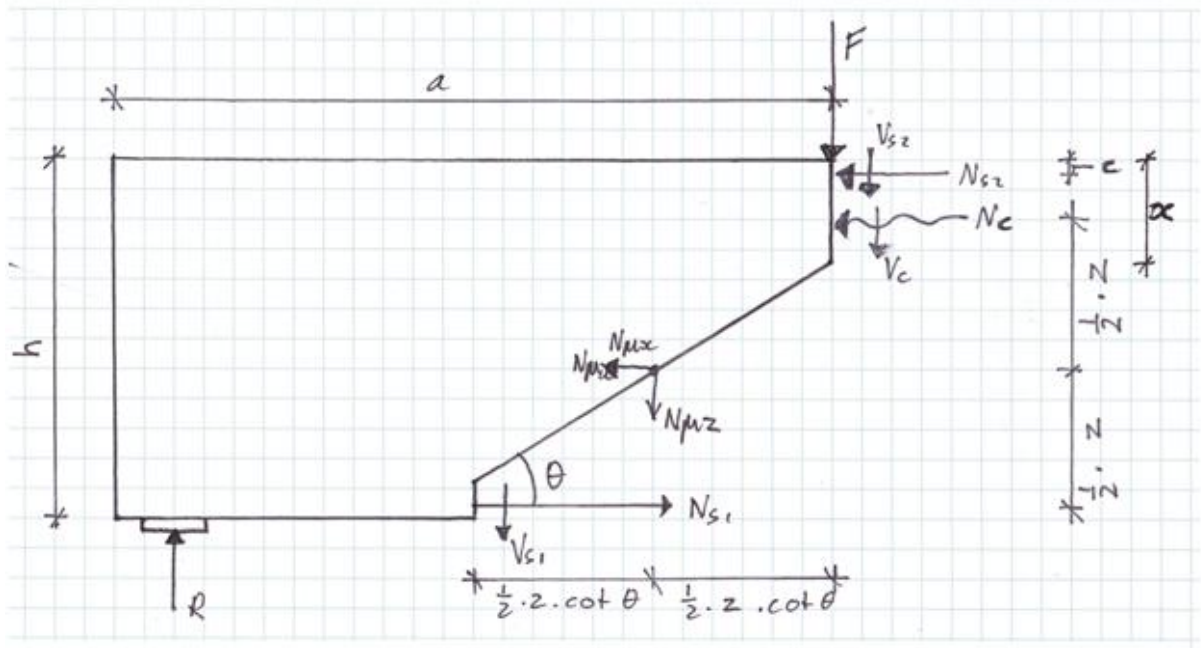
F Bij V_{Rdc} Rafla		
a	$f_{cm}=20$	$f_{cm}=80$
0,6	1086,924	2214,348
0,8	743,5815	1530,555
1,8	944,6864	1956,872

Ook hier weer zijn de waarden opvallend net als bij de waarden uit de NEN. En ook hier ligt het weer aan het dwarskrachtenverloop, dat de waarden bij $a=1,8m$ groter zijn dan bij $a=0,8m$. Echter de invloed van α_u is dit keer groter dan de invloed van het dwarskrachtenverloop: α_u is bij $a=0,6m$ dusdanig hoger dan bij $a=1,8m$, dat hierdoor de invloed van de dwarskrachtenverloop kleiner is, als er wordt vergeleken tussen $0,6m$ en $1,8m$. Dus de bezwijkkracht bij $a=0,6m$ is groter dan die van $a=1,8m$ en ook dan die van $a=0,8m$.

5.3 Berekening van bezwijkkracht via evenwicht

In de voorgaande paragrafen zijn de dwarskrachtcapaciteiten volgens verschillende normen uitgerekend, om vervolgens een voorspelling te maken voor een bezwijkkracht. Maar dit zijn niet de enige manieren om dit te doen. Naast het gebruiken van de normen, om terug te rekenen naar een bezwijkkracht, kan er ook een bezwijkkracht worden voorspeld via inwendig evenwicht in beton. Het uitrekenen via evenwicht is een lang proces die een lange berekening kent. Deze gehele berekening (vergelijkingen iteraties, etc.) zal niet in het hoofdrapport worden gezet. Deze is te vinden in bijlage A.3.

In figuur 5.6 is het gebied weergegeven waar evenwicht hoort plaats te vinden. Er wordt gekeken naar een doorsnede direct onder F. De schuine lijn stelt een scheur voor.



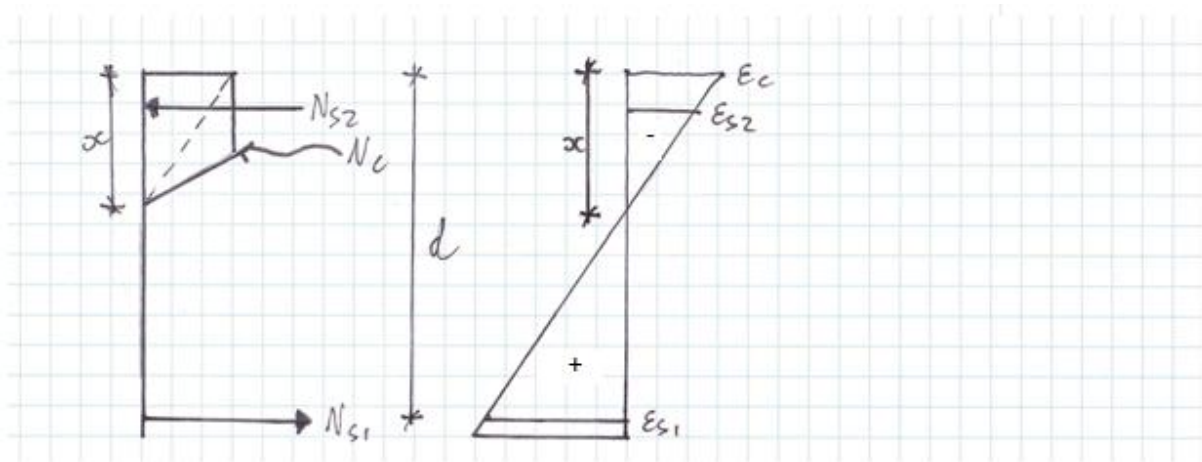
Figuur 5.6: Evenwicht in doorsnede plaat.

Er zijn, zoals in de figuur is te zien, een hoop krachten die werken in het beton. Al deze krachten in de doorsnede moeten evenwicht met elkaar maken. Er kunnen in deze situatie drie evenwichtsvergelijkingen worden opgesteld. Een vergelijking voor horizontaal evenwicht, een vergelijking voor verticaal evenwicht en als laatste een vergelijking voor momenten evenwicht. Hoe kan nu de bezwijkkracht worden uitgerekend in deze situatie? In paragraaf 5.1 zijn de oplegreacties uitgerekend als functie van F. In figuur 5.6 is te zien dat R (R1 om precies te zijn) ook evenwicht moet maken met alle werkende krachten. Als men een waarde kan vinden voor de oplegreactie bij bezwijken, dan kan via de waarde uit paragraaf 5.1 tabel 5.1, worden teruggerekend naar een bezwijkkracht. De beste manier om R1 uit te rekenen is via momenten evenwicht:

$\sum T \text{ (om aangrijpingspunt } N_c) = 0 \rightarrow$

$$R \cdot a - N_{s1} \cdot z + N_{2s} \cdot (c - \beta x) + N_{\mu x} \cdot 0.5z - V_{s1} \cdot z \cdot \cot(\theta) - N_{\mu z} \cdot 0.5z \cdot \cot(\theta) = 0 \quad (5.3.1)$$

Er zijn veel variabelen in formule (5.3.1). Voordat R kan worden uitgerekend, moeten eerst deze waarden worden gevonden. Ten eerste moet de hoogte van de drukzone x worden uitgerekend. Dit wordt gedaan door te veronderstellen dat er evenwicht is direct onder de kracht F in de doorsnede. De evenwichtssituatie met het bijbehorende rekdiagram is te vinden in figuur 5.7.



Figuur 5.7: Evenwicht in doorsnede onder F.

In de figuur is te zien dat de kracht in het beton evenwicht moet maken met de krachten in het staal. Verder is ook te zien dat de onderste wapening zich in de trekzone bevindt en de wapening bovenin in de drukzone. Dit betekent dat N_c en N_{s2} evenwicht moeten maken met N_{s1} :

$$N_{s1} = N_c + N_{s2} \quad (5.3.2)$$

Om evenwicht te maken, moet er een x worden gevonden, waar vergelijking (5.3.2) geldt. Dit kan worden gedaan door te itereren.

Eerst worden er enkele aannames gemaakt om de iteratie proces te vereenvoudigen. Wel moet worden opgemerkt dat dit wel invloed zou kunnen hebben op de uiteindelijke resultaten. Als eerst wordt er aangenomen dat het staal onderin het beton net begint te vloeien. Dus de spanning in het staal is maximaal ($f_{sm} = 600 \text{ N/mm}^2$). Ook wordt er aangenomen dat de rek in het beton in eerste instantie kleiner is dan 1,75‰ (rek waar druksterkte net maximaal). Verder geldt er:

$$N_c = \alpha \cdot b \cdot \epsilon_c \cdot E_c \cdot x \quad (5.3.3a)$$

$$N_s = A \cdot \epsilon_s \cdot E_s \quad (5.3.3b)$$

Voor α wordt in eerste instantie 0.5 genomen. Als tijdens de iteratie blijkt dat $\epsilon_c > 1.75\text{‰}$, dan moet voor α een andere waarde worden gebruikt. Deze kan met formule (A.3.6) worden uitgerekend (Bijlage). Ook voor β moet hier rekening mee worden gehouden, die in formule (5.3.1) staat. In eerste instantie $\beta = 1/3$. Maar als $\epsilon_c > 1.75\text{‰}$, dan moet formule (A.3.7) worden gebruikt (Bijlage).

De iteratie begint door een startwaarde voor x te nemen. Hiermee wordt de rek in het beton ϵ_c uitgerekend, via geometrie. Hiervoor wordt het rekdiagram gebruikt uit figuur 5.7. Daarna kan de waarde van de rek in bovenste wapening worden uitgerekend ϵ_{s2} . Vervolgens worden N_c en N_{s2} uitgerekend. Deze twee worden met elkaar opgeteld en vervolgens met N_{s1} vergeleken. De iteratie gaat net zo lang door totdat (5.3.2) geldt.

In tabel 5.9 zijn de uitkomsten weergegeven voor de drukzone hoogten voor C20 en C80.

Met deze waarden zal verder worden gerekend en gebruikt om R uit te rekenen.

Tabel 5.9: x voor C20 en C80

	x [mm]
C20	111,51
C80	68,18

Nogmaals formule (5.3.1):

$$R \cdot a - N_{s1} \cdot z + N_{2s} \cdot (c - \beta x) + N_{\mu x} \cdot 0.5z - V_{s1} \cdot z \cdot \cot(\theta) - N_{\mu z} \cdot 0.5z \cdot \cot(\theta) = 0$$

Er wordt nu aangenomen dat de wrijvingskrachten nul zijn. c is de dekking; deze bedraagt 20mm. In deze formule is V_{s1} nog onbekend. Er geldt:

$$V_s = \tau_s \cdot b \cdot l_y / S_y \quad (5.3.4a)$$

De schuifspanning τ_s kan worden uitgerekend met de formule voor vloeicriterium van Huber-Hencky. Omgezet in eigen termen geldt er:

$$f_{sm} = (\sigma_s^2 + 3 \cdot \tau_s^2)^{0.5} \quad (5.3.4b)$$

Er werd aangenomen dat het staal vloeit, dus $\sigma_s = f_{sm}$. Dit betekent dat $\tau_s = 0$. Dus V_{s1} is ook nul. Nu alle waarden bekend zijn (waarde van θ is onbelangrijk, omdat nu V_{s1} en $N_{\mu x, z}$ nul zijn, deze niet meer nodig is), kan alles in formule (5.3.1) worden ingevuld. Met de bekende R kan de bezwijkkracht worden uitgerekend:

$$F = (R - 41.25) / (1 - a/3,6) \quad (5.3.5)$$

In tabel 5.10 zijn de waarden gegeven voor R en de uiteindelijke bezwijkkracht F .

Tabel 5.10: Waarden R en F

a [m]	C20		C80	
	R [kN]	F [kN]	R [kN]	F [kN]
0.6	1494.77	1744.22	1599.43	1869.81
0.8	1121.07	1388.35	1199.57	1489.27
1.8	487.89	893.28	533.14	983.78

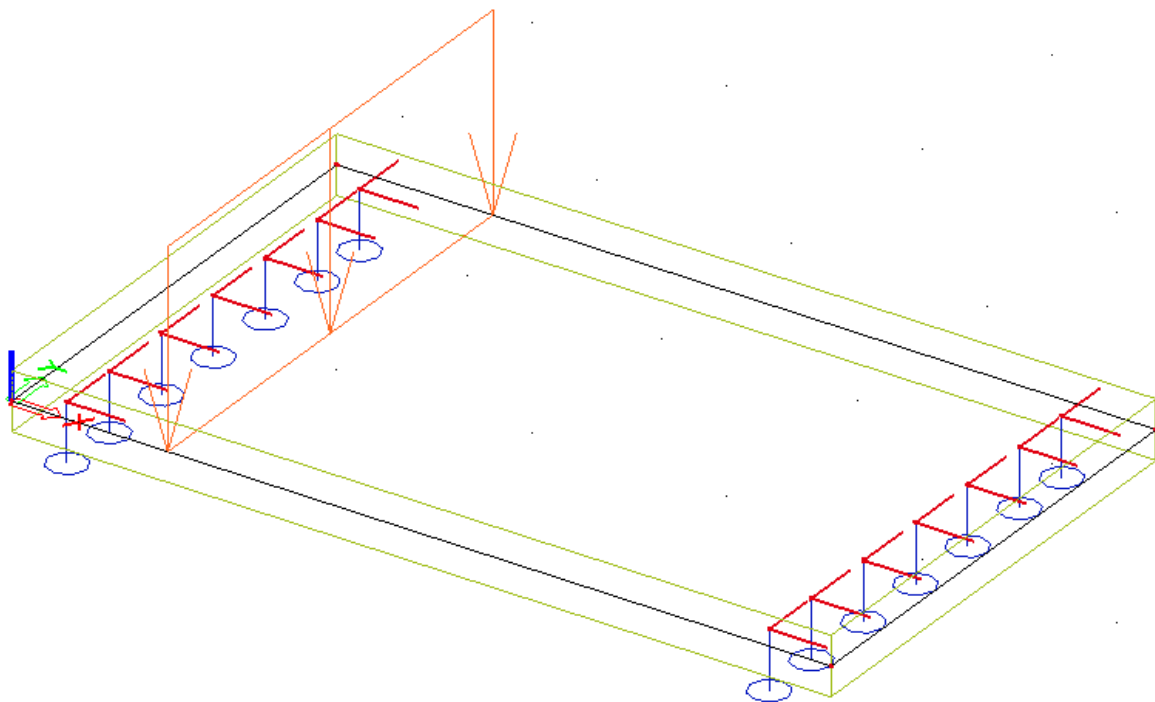
6: Scia Engineer

Om nog meer vergelijkingsmateriaal te hebben met de proeven, wordt de plaat ook gesimuleerd in een Eindige Elementen Methode programma met de naam Scia Engineering. Dit is een programma die lineaire berekeningen maakt. Omdat het lineaire berekeningen zijn, zullen de uitkomsten wellicht niet zo nauwkeurig zijn als dat van niet-lineaire berekeningen, zoals die in het hoofdonderzoek zijn gebruikt. Maar deze simulatie wordt toch gedaan om te kijken hoe ver de resultaten hiervan in de buurt komen van de resultaten van de proef.

Er zijn drie simulaties uitgevoerd, voor elke plaat één. De platen zijn zo geconstrueerd, dat ze kunnen worden vergeleken met de werkelijke opstelling. Bij alle platen zijn er aan elke kant in de breedte zeven opleggingen geplaatst. In het echte onderzoek zijn er aan elke kant in feite ook zeven opleggingen in plaats van een lijnoplegging. Verder worden ook alle platen getest met een lijnlast die op $a=600\text{mm}$ en $a=800\text{mm}$ van de oplegging is verwijderd.

De plaat heeft een oppervlakte van 4,2 bij 2,5 meter. Op 14 punten zijn interne knopen geplaatst. Bij deze knopen worden de opleggingen geplaatst. Dit is gedaan bij elke plaat.

De opstelling in Scia ziet eruit zoals te zien is in figuur 6.1. Wat betreft het net, er is een elementgrootte gebruikt van 0.2m. Verder is er een verfijning gebruikt rond de opleggingen, voor een nauwkeuriger resultaat.



Figuur 6.1: Opstelling in Scia

Het is helaas niet mogelijk om met Scia direct een bezwijkscenario te creëren of direct uit te rekenen wanneer de plaat zal bezwijken. Er is echter wel een andere indirecte manier om uit te vinden wanneer de plaat bezwijkt volgens Scia, namelijk via de wapeningsberekening. Scia geeft namelijk foutmeldingen, wanneer er in een bepaalde netelement geen wapening kan worden uitgerekend. Dit betekent dan dat het maximale wapeningspercentage is overschreden. Dus de plaat zal dan bezwijken op moment

Er moet echter ook rekening worden gehouden met de hoeveelheid wapening die werkelijk in de plaat zit. Er is ongeveer 6597 mm^2 aan hoofdwapening in de plaat. Als deze waarde wordt overschreden, dan zal de plaat moeten bezwijken. Ook al geeft Scia geen foutmelding. In de platen in het programma zijn dezelfde diameters van de staven gebruikt als in de echte plaat. Deze manier is weliswaar geen nauwkeurige weergave van de bezwijkkracht, maar het geeft toch enig inzicht in het gedrag van de plaat.

6.1 plaat met lage sterkte beton, C20

6.1.1 Uitkomst bezwijkkracht

Voor de simulatie van de lage sterkteplaat is een betonsterkte gebruikt van C25/30. Dit komt niet precies overeen met C20, maar voor de proef zelf is ook deze sterkte gebruikt en om de simulatie zo gelijk mogelijk te laten zijn met de werkelijke proef is in plaats van C12/15, C25/30 gebruikt. Zoals hiervoor vermeld, is er geen standaard functie in het programma die de bezwijkkracht kan uitrekenen of een dwarskrachtcapaciteit. Dus de bezwijkkracht moet via de uitgerekende wapening worden gevonden. Dit wordt gedaan door bij een geplaatste kracht te kijken hoeveel wapening er nodig is.

De bezwijkkracht is gevonden door het telkens proberen van verschillende waarden van F . Uiteindelijk is er een waarde gevonden van **$F=1600 \text{ kN}$** . Bij deze F is het maximale wapeningspercentage net niet overschreden.

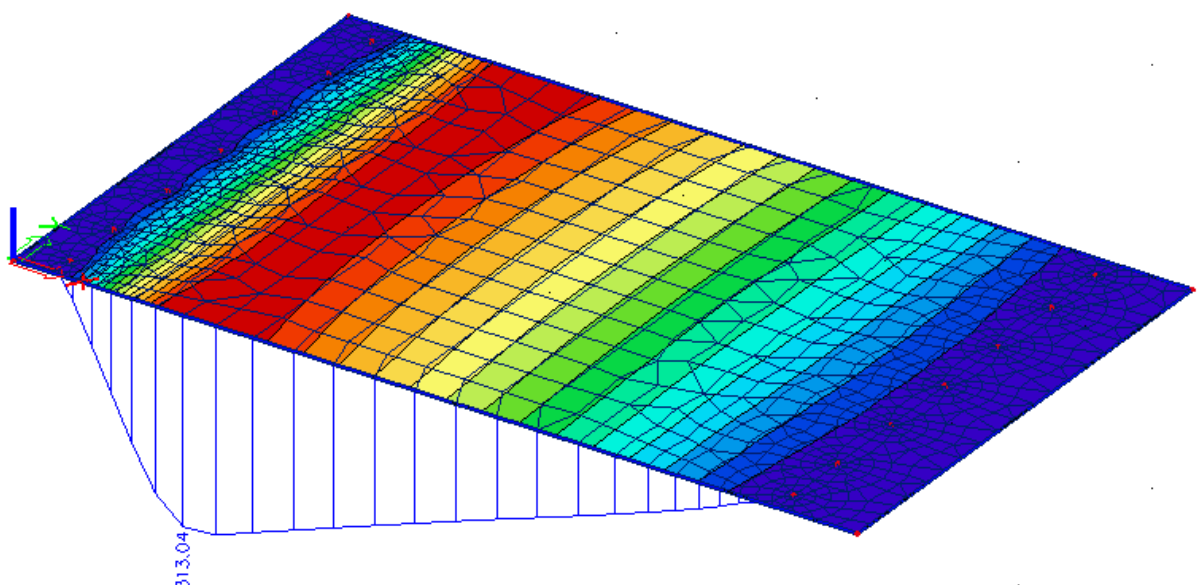
6.1.2 Bijzonderheden bij C20-plaat

In figuren 6.2 en 6.3 zijn respectievelijk de momenten m_{xx} en m_{xy} weergegeven. Dit zijn de momenten optredend bij de bezwijkkracht. De momenten zijn veroorzaakt door de kracht F en het eigen gewicht.

Het grootste moment m_{xx} in de plaat is $313,04 \text{ kNm/m}$

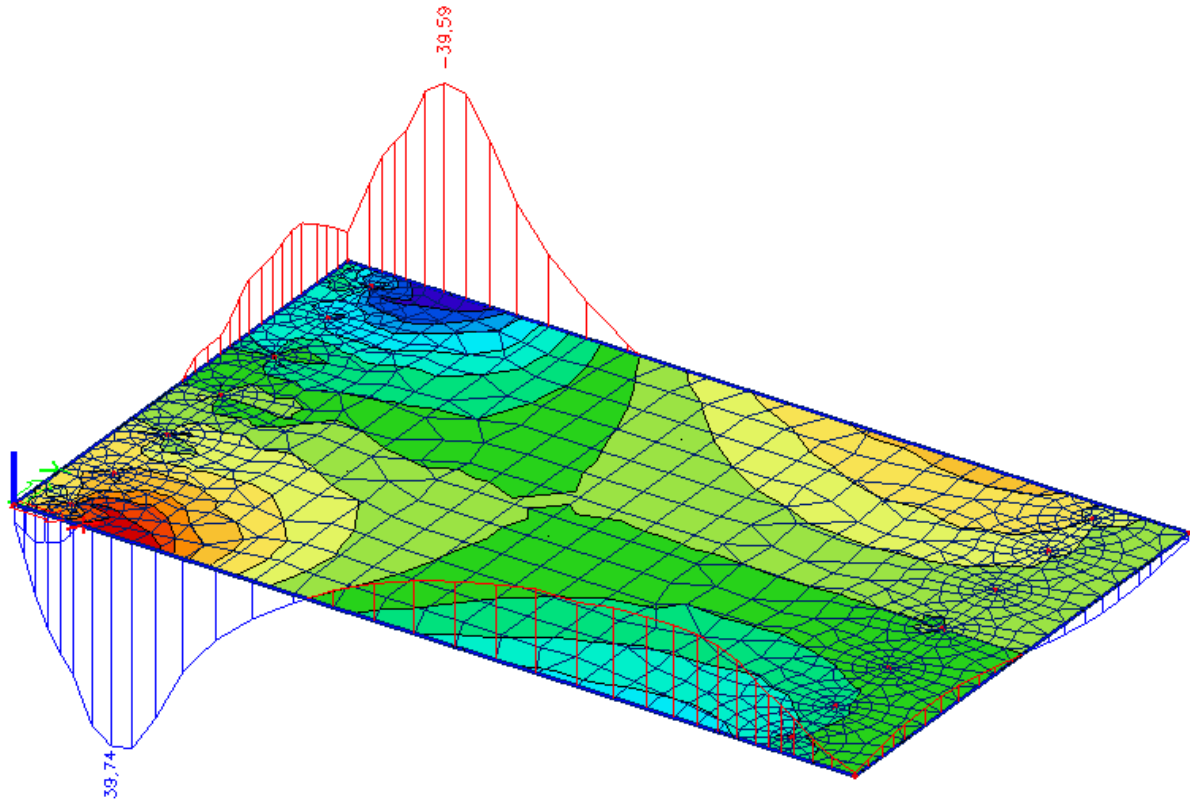
Het grootste moment m_{xy} in de plaat is $-39,59 \text{ kNm/m}$ als minimum en $39,74 \text{ kNm/m}$ als maximum.

De momenten gedragen zich zoals verwacht. In figuur 6.2 is te zien dat onder de puntlast het moment het grootst is. Dit is ook het geval bij de handberekeningen.



Figuur 6.2: Momentenverloop m_{xx} in zwakke plaat

Het verschil met de handberekeningen is dat bij Scia het wringend moment ook wordt meegerekend. In de handberekeningen werd hier geen rekening mee gehouden. Het wringend moment m_{xy} is een factor 10 kleiner dan het moment m_{xx} . Dus het wringend moment zal geen grote invloeden hebben op de uiteindelijke uitkomsten van de bezwijkkracht. Het grootste wringende moment vindt plaats aan de randen dicht bij de puntlast.



Figuur 6.3: Momentenverloop m_{xy} in zwakke plaat

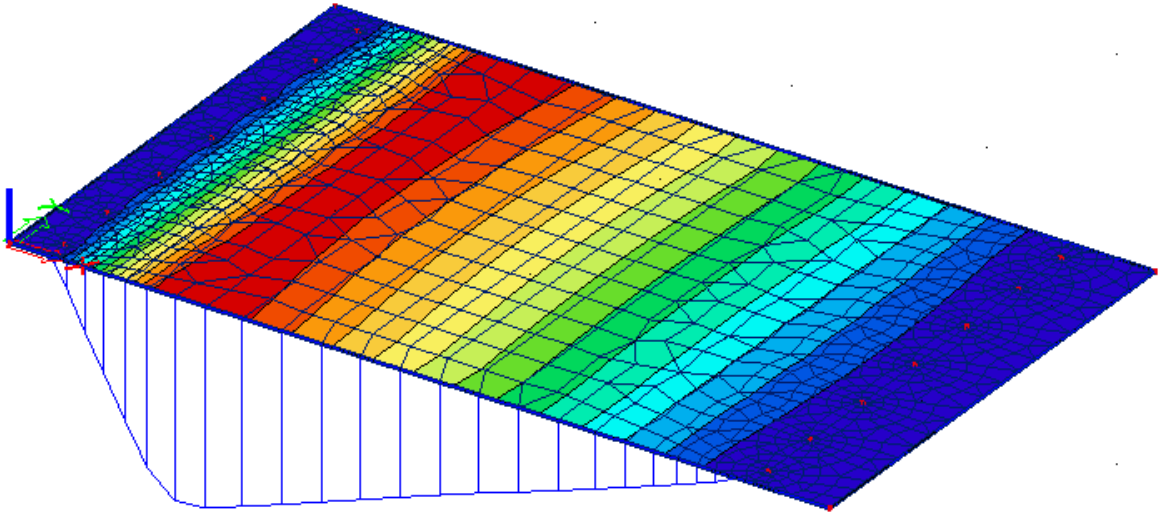
6.2 Plaat met hoge sterkte beton, C80

6.2.1 Uitkomst bezwijkkracht

Voor de simulatie van de hoge sterkteplaat is een betondruksterkte gebruikt van C55/67. Deze sterkte is ook gebruikt in de werkelijke plaat. Voor de rest is uiteraard dezelfde methodiek gebruikt als bij paragraaf 6.1. In Scia is een waarde van **F=2050 kN** gevonden voor de uiteindelijke bezwijkkracht. Het programma gaf aan dat de plaat nog meer kracht kon hebben. Alleen daarvoor was wel meer wapening voor nodig. Feitelijk gezien kan dit niet, dus de F-waarde die genomen is, is de waarde waar de uitgerekende wapening net onder 6597 mm^2 is.

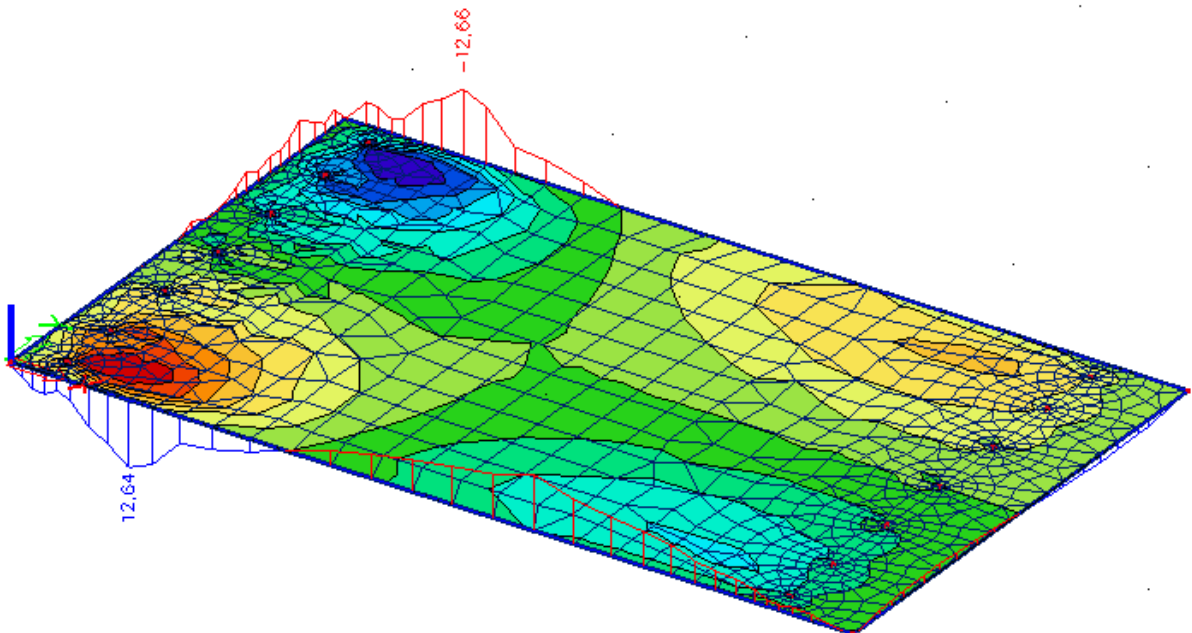
6.2.2 Bijzonderheden C80-plaat

In figuren 6.4 en 6.5 zijn weer de momenten m_{xx} en m_{xy} weergegeven. Alleen dit keer voor C80. Dit zijn de momenten optredend bij de bezwijkkracht. Het grootste moment m_{xx} in de plaat is 396,22 kNm/m. Het grootste moment m_{xy} in de plaat is -39,35 kNm/m als minimum en als maximum 39,27 kNm/m. Ook hier is, net als bij de zwakke plaat het maximale moment m_{xx} rond de puntlast.



Figuur 6.4: Momentenverloop m_{xx} in sterke plaat

Het maximale wringend moment in de hoge sterkte plaat is ongeveer net zo hoog als in de lage sterkte plaat. Om verwarring te voorkomen, in figuur 6.5 zijn de getallen de wringende momenten aan de rand. Scia engineer geeft alleen waarden aan de rand aan. Het maximale wringend moment is wat van de rand af. Ook bij deze plaat is het maximale wringend moment dicht bij de puntlast.

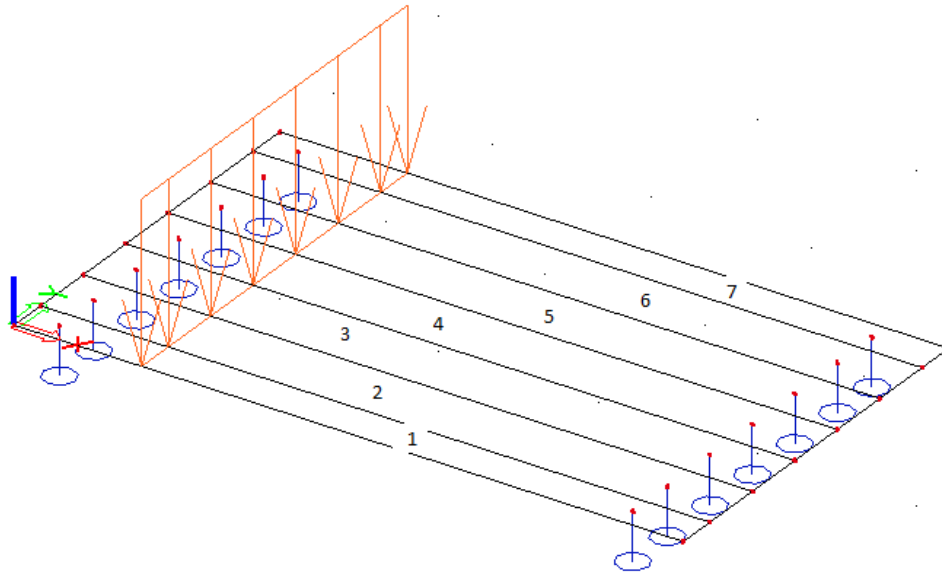


Figuur 6.5: Momentenverloop m_{xy} in sterke plaat

6.3 Plaat met gemixte sterkten beton, C20 en C80

6.3.1 Uitkomst bezwijkkracht

Voor de gemixte plaat is een andere manier aangepakt om de plaat te creëren. Feitelijk gezien bestaat deze plaat uit 7 strippen zoals in de werkelijkheid ook het geval is. Daarom is de opstelling van deze plaat anders. Alle strippen moesten apart worden ingevoerd, omdat ze uit verschillende sterkten bestaan. In figuur 6.6 is de opstelling van de gemixte plaat te zien. Nummer 1, 3, 5 en 7 zijn de sterke strips met C80. De overige nummers zijn de zwakke strip met C20.



Figuur 6.6: Opstelling gemixte plaat in Scia

Ondanks een andere manier van het maken van de plaat, kan er nog steeds via de wapeningsberekening de bezwijkkracht worden gevonden. Als resultaat geeft Scia dat de bezwijkkracht op **F=1900 kN** is. Hier geldt ook dat volgens Scia er meer wapening in de plaat kan, dus dat de plaat het nog langer volhoudt. Maar meer wapening dan 6597 mm^2 is niet toegestaan vanwege het werkelijke wapeningspercentage.

6.2.2 Bijzonderheden gemixte plaat.

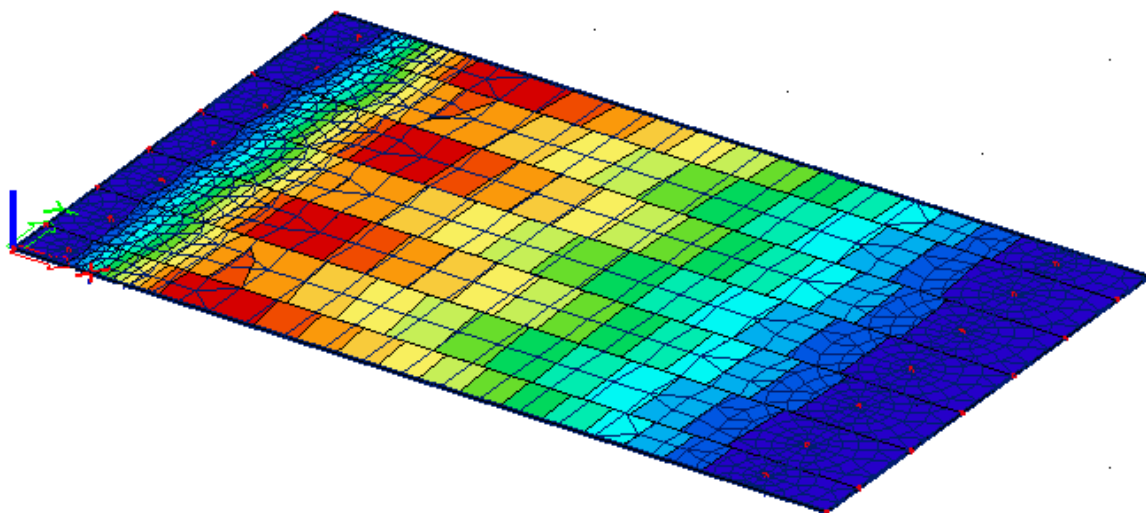
In figuren 6.7 en 6.8 zijn de momenten m_{xx} en m_{xy} weergegeven. Het grootste moment m_{xx} in de plaat is $400,28 \text{ kNm/m}$ in de sterke strips en ongeveer 360 kNm/m in zwakke strips.

Het grootste moment m_{xy} in de plaat is $-36,68 \text{ kNm/m}$ als minimum en als maximum $36,66 \text{ kNm/m}$. Wat er meteen opvalt in figuur 6.7 zijn de verschillende kleuren rond het gebied van de puntlast. Dit houdt in dat er in de sterke strips een ander hoger moment m_{xx} hebben dan de zwakke strips.

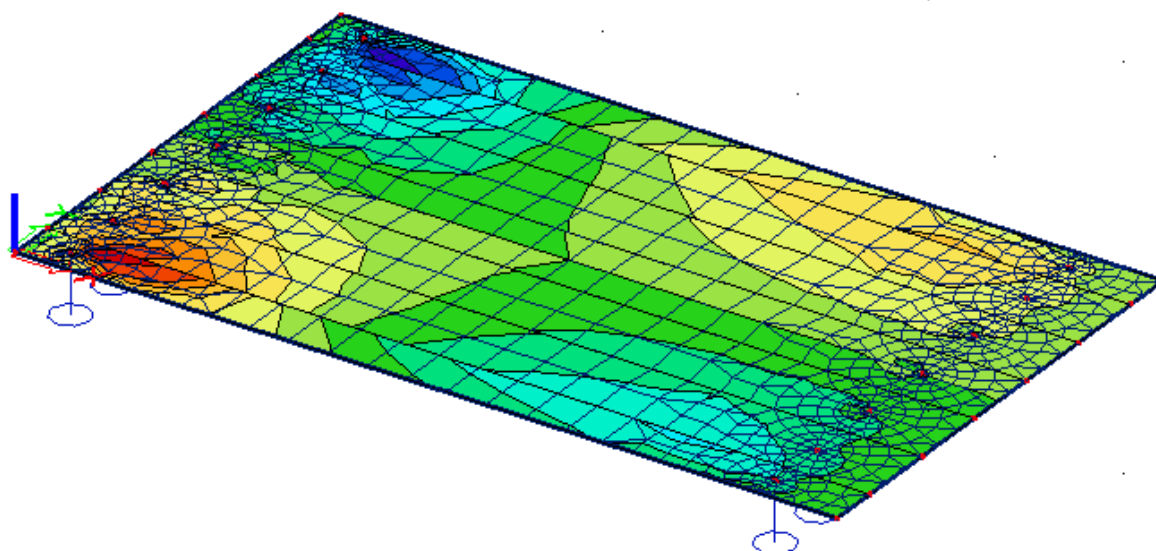
Dit betekent, dat de sterke strips meer kracht opnemen dan de zwakke strips.

Het kan ook zijn dat de gemixte plaat meer een gedrag van een hoge sterkte beton heeft dan een lage sterkte beton. Dit is ook weer terug te zien aan de uitgerekende bezwijkkracht (1900) die dichterbij zit bij de hoge sterkte waarde (2050) dan bij de lage sterkte waarde (1900).

Wat betreft de wringende momenten, deze vertonen geen afwijkend gedrag ten opzichte van de andere twee platen. De maximale waarden zijn iets lager dan bij de vorige twee platen.



Figuur 6.7: Momentenverloop m_{xx} in gemixte plaat



Figuur 6.8: Momentenverloop m_{xy} in gemixte plaat

6.4 Samenvatting Scia

Samenvattend worden in tabel 6.1 nog alle berekende waarden weergegeven.

Tabel 6.1: Resultaten Scia Engineer

Plaat	Bezwijkkracht F [kN]	Max m_{xx} [kNm/m]	Min m_{xy} [kNm/m]	Max m_{xy} [kNm/m]	m_{xx}/m_{xy}
C20	1600	313,04	-39,59	39,74	7,9
C80	2050	396,22	-39,35	39,27	10,1
gemixt	1900	360	-36,68	36,66	9,8

7: Analyse

In de voorgaande paragrafen zijn er op drie manieren bezwijkkrachten uitgerekend. Ten eerste met resultaten uit de proeven, ten tweede met handberekeningen vanuit de normen en als laatste nog via Scia Engineer. In deze paragraaf worden alle berekende waarden met elkaar vergeleken. Met als aandachtspunt het vergelijken van de handberekeningen en de berekeningen uit Scia met de proefresultaten. Als eerst worden de uitkomsten uit de normen uit paragraaf 5.2.1 t/m 5.2.3 met elkaar vergeleken. Daarna worden deze waarden met de proefresultaten vergeleken. Daarbij worden ook de evenwichtsresultaten uit 5.3 met de proefresultaten vergeleken.

Ten slotte worden de resultaten uit Scia Engineer met de proefresultaten vergeleken. In hoofdstuk 8 zal dan een conclusie volgen, gebaseerd op de analyse die nu gaat plaatsvinden.

Helaas konden gedurende dit eindwerk niet alle platen getest worden. Daarom zijn er alleen resultaten van platen, getest op $a=0,6\text{m}$ en zullen alleen de resultaten van $a=0,6\text{m}$ met elkaar worden vergeleken.

Ook moet weer worden opgemerkt dat de proef van de hoge sterkte plaat vroegtijdig moest worden afgekap, vanwege problemen met de opstelling. Voorspeld was dat de hoge sterkte beton C80 rond 1800 kN had moeten bezwijken.

7.1 Analyse handberekeningen

In tabel 7.1 zijn alle uitgerekende waarden van de bezwijkkracht naast elkaar gezet. Alleen de resultaten verkregen met de formules zonder veiligheidsfactoren worden meegenomen, omdat deze veel dichterbij de werkelijkheid komen dan de resultaten met veiligheidsfactoren.

Tabel 7.1: Alle resultaten van bezwijkkracht F

a [m]	F voor EC-2 [kN]		F voor NEN [kN]		F voor Rafla [kN]	
	C20	C80	C20	C80	C20	C80
0,6	678,049	1100,127	906,454	2628,188	1086,924	2214,348
0,8	726,482	1178,707	665,588	1954,643	743,582	1530,555
1,8	1130,083	1833,544	1035,359	3040,556	944,686	1956,872

Als er gekeken wordt naar de waarden onderling dan is te zien dat de laagste waarden voor F te vinden zijn bij de Eurocode-2. De hoogste waarden zijn te vinden bij de NEN. In tabel 7.2 zijn de waarden van NEN vergeleken met de andere twee normen qua verschil in grootte. Er is te zien dat er veel verschillen zijn. Er zijn niet alleen verschillen tussen de a-waarden maar ook tussen de sterkten. Zo zijn de NEN resultaten over het algemeen groter dan de resultaten van de andere normen, maar bij bijvoorbeeld $a=0,8\text{m}$ voor C20 is de waarde vanuit de Eurocode weer groter.

Tabel 7.2: Verschillen tussen resultaten vergeleken met NEN in factoren

a	NEN		EC verg met NEN		Rafla verg met NEN	
0,6	1	1	1,34	2,39	0,84	1,19
0,8	1	1	0,92	1,66	0,90	1,28
1,8	1	1	0,92	1,66	1,10	1,55

Als de resultaten van de proeven erbij worden gehaald en deze naast de waarden uit de normen worden gezet (tabel 7.3), dan is er gelijk te zien dat geen enkele F uit de normen overeenkomt met de werkelijke bezwijkkrachten.

Als er gekeken wordt naar de factorverschillen (tabel 7.4) dan is er voor de Eurocode te zien dat het een flinke onderschatting geeft.

Vooraf bij sterkte C20. De bezwijkkracht is daar ruim twee keer zo klein als bij de werkelijke bezwijkkracht. Dit betekent dat de formule van de eurocode nog steeds te veilig is, om een bezwijkkracht te voorspellen, mogelijk door achterliggende veiligheidsoverwegingen in de componenten van de formule.

De NEN geeft voor C20 een onderschatting voor F, maar voor C80 een grote overschatting van bijna 60%. Rafla geeft net als de NEN een onderschatting bij C20 en een overschatting voor C80. De resultaten uit de Rafla echter zitten het dichtst bij de werkelijke bezwijkkrachten, als er gekeken wordt naar de factorverschillen.

Het feit dat de waarden voor C20 onderschattingen zijn, kan te maken hebben met de gekozen waarden voor f_{ck} . Er is namelijk verondersteld dat $f_{ck}=f_{cm}-8$. Deze 8 heeft een grotere invloed bij een lage sterkte beton dan bij hoge sterkte beton. Voor deze 8 zou eigenlijk een andere waarde moeten worden uitgerekend met behulp van de standaard deviatie verkregen vanuit de geteste proef kubussen.

In tabel 7.3 staan ook de waarden weergegeven van de bezwijkkracht verkregen uit het evenwicht. Als er weer gekeken wordt naar de verhoudingen in tabel 7.4, dan is te zien dat deze waarden dichter bij de werkelijkheid zijn dan de bezwijkkrachten uit de normen. Als in rekening wordt genomen dat C80 eigenlijk op 1800 kN zou kunnen bezwijken, dan kan er worden gezegd dat voor C80 de waarde vanuit het evenwicht een goede voorspeller is. Wel is de waarde voor F bij C20 een overschatting in tegenstelling tot de waarden uit de normen.

Tabel 7.3: Resultaten handberekeningen en proef in kN

	F uit proef	F voor EC-2	F voor NEN	F voor Rafla	F uit evenwicht
C20	1450	678,049	906,454	1086,92388	1744,22
C80	1650	1100,127	2628,188	2214,348	1869,81

Tabel 7.4: Factor verhoudingen proef/handberekeningen

	F uit proef	F voor EC-2	F voor NEN	F voor Rafla	F uit evenwicht
C20	1	2,138	1,59	1,33	0,83
C80	1	1,45	0,63	0,75	0,88

7.2 Analyse Scia Engineer

In tabel 7.5 zijn de resultaten uit Scia en de proefresultaten voor F naast elkaar gezet en ook het verschil tussen de twee waarden. Voor de gemixte plaat is het gemiddelde genomen van de twee resultaten. Er is direct te zien dat Scia overschattingen geeft voor de bezwijkkrachten vergeleken met de proefresultaten. Dit zou te maken kunnen hebben met de manier waarop de bezwijkkrachten zijn uitgerekend. En ook met het feit dat Scia een lineaire berekening heeft gebruikt. Maar toch geeft Scia een betere voorspelling dan de handberekeningen. Vooral voor C20. Alleen de evenwichtsberekening voor C80 geeft een beter voorspelling dan Scia voor dezelfde sterkte. Over het algemeen zou Scia Engineer redelijk goed kunnen worden gebruikt om een voorspelling te maken van de bezwijkkracht.

Tabel 7.5: Resultaten Scia Engineer en proef in kN

	F uit proef	F uit Scia	Proef : Scia
C20	1450	1600	0,906
C80	1650	2050	0,805
Gemixt	Gem. 1775	1900	0,934

8: Conclusie en aanbeveling

Gebaseerd op de voorgaande analyses in 7.1 en 7.2, wordt er een conclusie getrokken. Wat betreft de handberekeningen komen geen enkele resultaten in de buurt van de werkelijke waarde. De resultaten uit de eurocode-2 waren allemaal onderschattingen. Deze hadden ook het grootste verschil ten opzichte van de proefresultaten. Daarom moet de Eurocode alleen als ontwerpnorm worden gebruikt, want als een voorspeller van een bezwijkkracht is het te onnauwkeurig en te veilig. Na de Eurocode is de NEN code de meest onnauwkeurige. Voor C20 levert de NEN een te veilige waarde voor F en voor C80 een veels te onveilige waarde die zelfs boven de 2500 kN komt. Wat betreft de normen zijn de resultaten uit Rafla nog het dichtst bij de werkelijke bezwijkkrachten. Als er een keuze uit de drie normen moet worden gemaakt om een bezwijkkracht te voorspellen, dan is Rafla de beste optie.

Hoewel het blijft beter om de geen enkele norm te gebruiken, want ook Rafla is geen uitstekende voorspeller. De beste maar ook de lastigste methode die nog kan worden gebruikt is het rekenen via evenwicht. Deze waarden kwamen dichterbij de werkelijkheid dan de normen. Vooral de waarde voor C80. Als de proef van de hoge sterkte plaat niet was afgekapt en een bezwijkkracht had kunnen bereiken van rond de 1800 kN dan geeft de bezwijkkracht uit het evenwicht een behoorlijke goede voorspelling. Voor C20 geeft het niet een net zo nauwkeurig resultaat als voor C80, maar nog steeds beter dan de normen.

Kortom als er een handberekening moet worden gemaakt van een bezwijkkracht, kan dat het beste worden gedaan via een evenwichtsberekening.

Beter dan de handberekeningen zijn de resultaten vanuit Scia Engineer. Ook al zijn het allemaal overschattingen, deze resultaten zijn dichterbij de werkelijke waarden dan die bij de handberekeningen. Ondanks dat er indirect via de wapeningsberekening een bezwijkkracht is bepaald in Scia en ook het feit dat Scia een lineaire berekening gebruikt, zijn de resultaten toch aan de goede kant. Dus Scia is toch best een goede voorspeller voor een bezwijkkracht.

Al met al kan worden gesteld, dat geen enkele manier van rekenen, dus handberekeningen en simulaties via een EEM-programma, echte een zeer nauwkeurige waarde kan geven. Het beste is om een EEM-programma te gebruiken, omdat deze het dichtst bij de werkelijkheid komt. Als er geen beschikking is tot een computerberekening, dan kan het beste een evenwichtsberekening met de hand worden gebruikt. Dit geldt in ieder geval bij $a=0,6\text{m}$. Vanwege gebrek aan proefresultaten voor $a=0,8\text{m}$ konden de uitgerekende waarden bij deze a niet worden geanalyseerd. Dit zou misschien in een nieuw onderzoek wel weer kunnen worden uitgezocht, mocht het noodzakelijk zijn. Maar verwacht wordt dat ook voor $a=0,8\text{m}$ zal gelden dat de rekenmethoden niet erg geschikt zijn voor het voorspellen van een bezwijkkracht.

9: Literatuurlijst

Walraven, J.C. (2011). *Dictaat ct2052/3150, Gewapend Beton*.
Delft: TU delft

Abspoel, R. & Bijlaard, F.S.K. (2010). *Dictaat ct2052, Staalconstructies*.
Delft: TU delft

NEN 6720 (1990). *Voorschriften beton*.
Delft: Nederlands Normalisatie – Instituut

NEN-EN-1992-1-1 (2005). *Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies - Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen*.
Delft: Nederlands Normalisatie – Instituut

Yang, Y. & Den Uijl, J.A. (2011). *Reports of Experimental Research on Shear Capacity of Beams Close to Intermediate Supports*.
Delft: Delft University of Technology

Einde Hoofdrapport

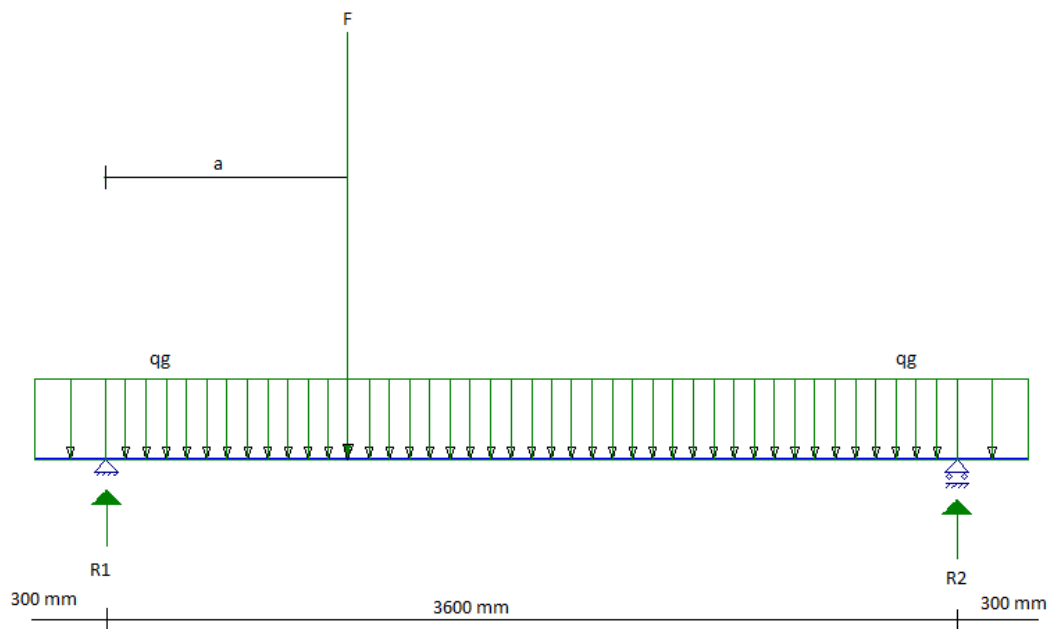
10: Bijlagen

A: Handberekeningen

A.1 Algemene berekeningen.

De betonnen plaat, met zijn opstelling, kan worden geschematiseerd zoals in figuur A.1. De plaat wordt geplaatst op twee opleggingen. Verder wordt er een kracht F , in werkelijkheid een lijnlast geplaatst op een afstand a van de linker oplegging. Naast de kracht F werkt ook het eigen gewicht q_g op de plaat:

$$q_g = b \cdot h \cdot \gamma.$$
$$\gamma = 25 \text{ kN/m}^3, q_g = 2.5 \cdot 0.3 \cdot 25 = 18.75 \text{ kN/m}$$



Figuur A.1: Mechanica schema plaat

De constructie is statisch bepaald, dus via evenwicht kunnen eenvoudig de oplegreacties worden bepaald. Bij de berekeningen wordt er gewerkt met een onbekende F en a , maar met de bekende q_g , omdat deze laatste altijd het zelfde zal zijn.

$$\text{Oplegreactie R1 t.g.v. } q_g: \sum T|_2 = 0 \rightarrow (18.75 \cdot 0.3 \cdot 3.75 + 18.75 \cdot 3.6^2 \cdot 0.5 - 18.75 \cdot 0.4^2 \cdot 0.5) / 3.6 = 39.375.$$

In dit geval $R1 = R2$.

$$\text{Oplegreactie R1 t.g.v. } F: \sum T|_2 = 0 \rightarrow F \cdot (a - 3.6) / 3.6 = F \cdot (1 - a / 3.6)$$

$$R2 = F - R1 = F \cdot a / 3.6$$

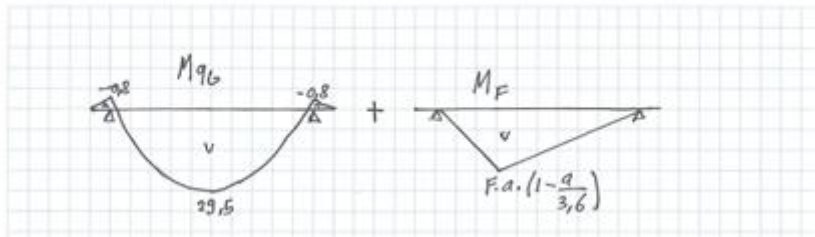
Door de gevonden waarden voor $R1$ en $R2$ op te tellen komt er een getal uit voor de totale oplegreacties. Deze staan in tabel A.1.

Tabel A.1: Waarden oplegreacties

R1 (BGT)	$F \cdot (1 - (a / 3.6)) + 39.375$
R2 (BGT)	$(F \cdot a) / 3.6 + 39.375$

Met de gevonden oplegreacties kunnen de dwarskracht en het moment worden uitgerekend.
De normaalkrachten zijn overal nul, omdat er geen horizontale krachten zijn.

De momentenlijn kan als volgt worden geschematiseerd.(figuur A.2)



Figuur A.2: Momentenlijn

Met deze figuren is er een formule te ontwikkelen voor het grootste moment.
Het grootste moment is te vinden onder de puntlast. Voor deze waarde geldt voor elke F en a:

$$M = F \cdot a \cdot (1 - a / 3.6) + (39.375 \cdot a - 18.75 \cdot 0.3 \cdot (0.15 + a) - 18.75 \cdot a^2 \cdot 0.5) \quad (A.1.1)$$

Voor het maatgevende moment moet het gedeelte veroorzaakt door F met 1.5 vermenigvuldigd worden en het gedeelte van het eigen gewicht met 1.2.

$$M_{Ed} = 1.5 \cdot F \cdot a \cdot (1 - a / 3.6) + 1.2 \cdot (39.375 \cdot a - 18.75 \cdot 0.3 \cdot (0.15 + a) - 18.75 \cdot a^2 \cdot 0.5) \quad (A.1.2)$$

Door in deze laatste formule a en F in te vullen kan er een verloop worden geschetst van het moment over verschillende lengtes van a bij een bepaalde F. In tabel A.3 zijn er een aantal waarden gegeven voor het moment bij verschillende F en a-waarden.

De blauw gemarkeerde waarden zijn van toepassing op het lopende experiment. De waarde 1.8 dient ter vergelijking met a=0.6 en a=0.8. Tijdens het experiment worden er geen proeven gedaan met a=1.8. Deze markeringen zijn ook gedaan in overige tabellen met waarden.

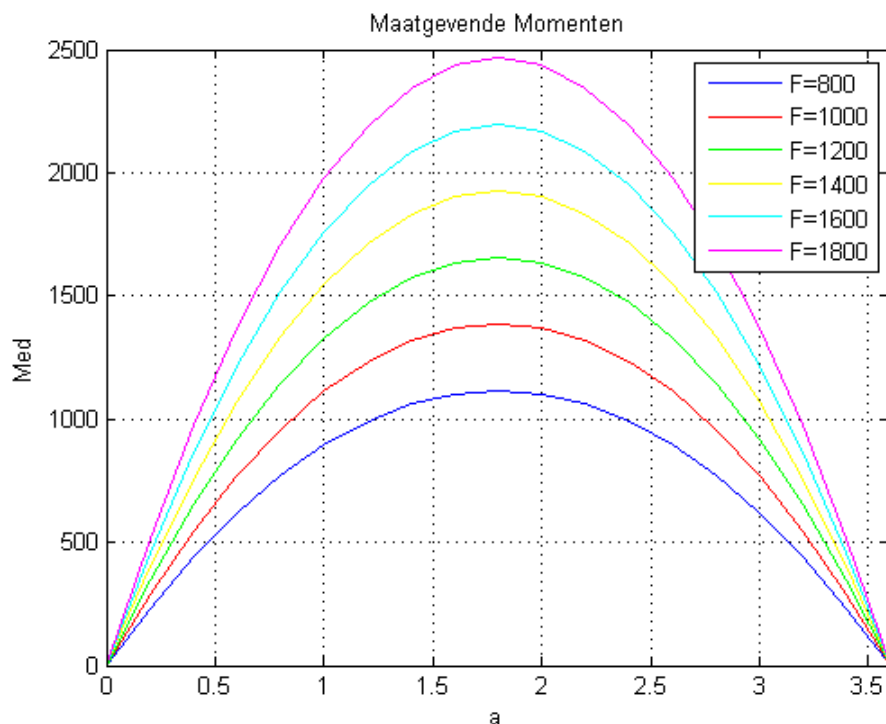
Tabel A.3: M_{Ed} waarden

Med [kNm]										
a[m]	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8
F=200	-1,0125	63,30417	120,0542	169,2375	210,8542	244,9042	271,3875	290,3042	301,6542	305,4375
F=400	-1,0125	119,9708	226,7208	319,2375	397,5208	461,5708	511,3875	546,9708	568,3208	575,4375
F=600	-1,0125	176,6375	333,3875	469,2375	584,1875	678,2375	751,3875	803,6375	834,9875	845,4375
F=800	-1,0125	233,3042	440,0542	619,2375	770,8542	894,9042	991,3875	1060,304	1101,654	1115,438
F=1000	-1,0125	289,9708	546,7208	769,2375	957,5208	1111,571	1231,388	1316,971	1368,321	1385,438
F=1200	-1,0125	346,6375	653,3875	919,2375	1144,188	1328,238	1471,388	1573,638	1634,988	1655,438
F=1400	-1,0125	403,3042	760,0542	1069,238	1330,854	1544,904	1711,388	1830,304	1901,654	1925,438
F=1600	-1,0125	459,9708	866,7208	1219,238	1517,521	1761,571	1951,388	2086,971	2168,321	2195,438
F=1800	-1,0125	516,6375	973,3875	1369,238	1704,188	1978,238	2191,388	2343,638	2434,988	2465,438

In figuur A.3 is dit verloop te zien, voor een aantal F-waarden.

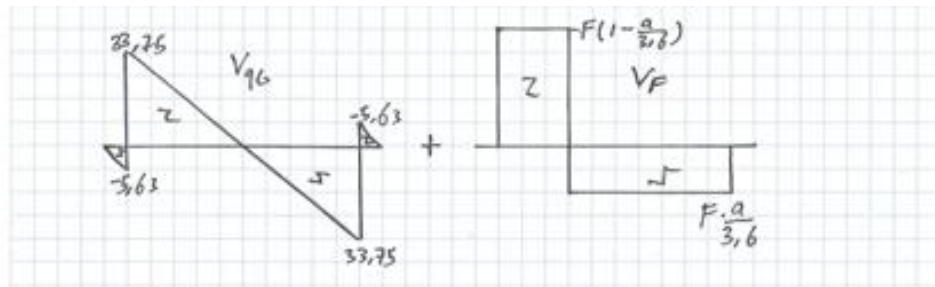
Zoals te zien, stijgt het moment, wanneer a stijgt, wat vanzelfsprekend is.

Ook is te zien dat het moment het grootst is wanneer de kracht precies in het midden van de plaat wordt geplaatst.



Figuur A.3: Verloop M_{Ed}

Met behulp van het moment en de oplegreactie kan de dwarskracht worden uitgerekend. De dwarskracht kan worden weergegeven zoals in figuur A.4 te zien is.



Figuur A.4: Dwarskrachtenlijn

De grootste dwarskracht treedt op in oplegging 1, zolang a kleiner is dan 1.8 meter. Voor waarden boven de 1.8 is de grootste dwarskracht in oplegging 2.

Met figuur A.4 kan ook een formule worden ontwikkeld voor de dwarskrachten in oplegging 1 en 2.

$$V_1 = F * (1 - (a / 3.6)) + 33.75; \quad (A.1.3)$$

$$V_2 = F * a / 3.6 + 33.75; \quad (A.1.4)$$

Voor de maatgevende dwarskracht V_{Ed} moet, net zoals bij het maatgevende moment het gedeelte van F in de formule met 1.5 worden vermenigvuldigd en het eigengewicht gedeelte met 1.2.

$$V_{Ed} = 1.5 * (F * (1 - (a / 3.6))) + 1.2 * 33.75 \quad 0 \leq a \leq 1.8 \quad (A.1.5a)$$

$$V_{Ed} = 1.5 * F * a / 3.6 + 1.2 * 33.75 \quad 1.8 < a \leq 3.6 \quad (A.1.5b)$$

In tabellen A.4 en A.5 zijn waarden gegeven voor V_1 en V_{Ed} .

Tabel A.4: V_1 waarden

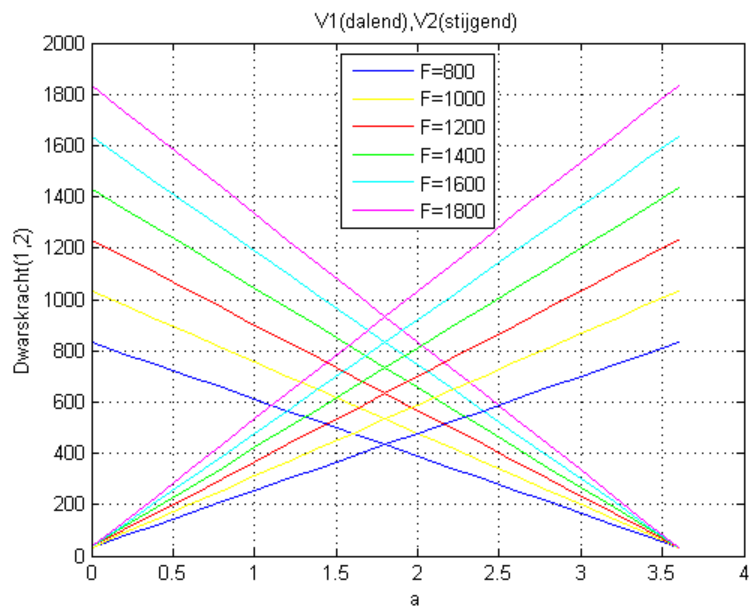
V_1 [kN]										
a[m]	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8
F=200	233,75	222,6389	211,5278	200,4167	189,3056	178,1944	167,0833	155,9722	144,8611	133,75
F=400	433,75	411,5278	389,3056	367,0833	344,8611	322,6389	300,4167	278,1944	255,9722	233,75
F=600	633,75	600,4167	567,0833	533,75	500,4167	467,0833	433,75	400,4167	367,0833	333,75
F=800	833,75	789,3056	744,8611	700,4167	655,9722	611,5278	567,0833	522,6389	478,1944	433,75
F=1000	1033,75	978,1944	922,6389	867,0833	811,5278	755,9722	700,4167	644,8611	589,3056	533,75
F=1200	1233,75	1167,083	1100,417	1033,75	967,0833	900,4167	833,75	767,0833	700,4167	633,75
F=1400	1433,75	1355,972	1278,194	1200,417	1122,639	1044,861	967,0833	889,3056	811,5278	733,75
F=1600	1633,75	1544,861	1455,972	1367,083	1278,194	1189,306	1100,417	1011,528	922,6389	833,75
F=1800	1833,75	1733,75	1633,75	1533,75	1433,75	1333,75	1233,75	1133,75	1033,75	933,75

Tabel A.5: V_{Ed} waarden

V_{Ed} [kN]										
a[m]	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8
F=200	122,2013	122,2013	231,8239	290,5	273,8333	257,1667	240,5	223,8333	207,1667	190,5
F=400	229,1195	229,1195	433,0818	540,5	507,1667	473,8333	440,5	407,1667	373,8333	340,5
F=600	336,0377	336,0377	634,3396	790,5	740,5	690,5	640,5	590,5	540,5	490,5
F=800	442,956	442,956	835,5975	1040,5	973,8333	907,1667	840,5	773,8333	707,1667	640,5
F=1000	549,8742	549,8742	1036,855	1290,5	1207,167	1123,833	1040,5	957,1667	873,8333	790,5
F=1200	656,7925	656,7925	1238,113	1540,5	1440,5	1340,5	1240,5	1140,5	1040,5	940,5
F=1400	763,7107	763,7107	1439,371	1790,5	1673,833	1557,167	1440,5	1323,833	1207,167	1090,5
F=1600	870,6289	870,6289	1640,629	2040,5	1907,167	1773,833	1640,5	1507,167	1373,833	1240,5
F=1800	977,5472	977,5472	1841,887	2290,5	2140,5	1990,5	1840,5	1690,5	1540,5	1390,5

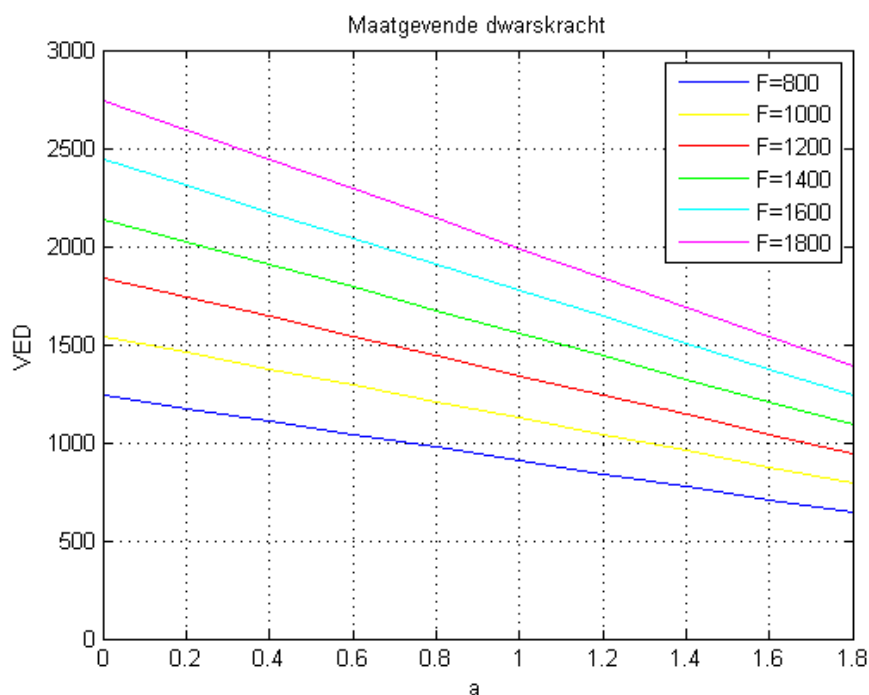
De waarden voor V_2 zijn hetzelfde als V_1 , alleen V_1 begint bij $a=0$ op zijn hoogste waarde en V_2 begint bij zijn laagste waarde op $a=0$.

In figuur A.5 is dit verloop van V_1 en V_2 te zien en in figuur A.6 is het verloop van V_{Ed} van $a=0$ t/m $a=1.8$ te zien. Het verloop van 1.8 t/m 3.6 ziet er hetzelfde uit alleen gespiegeld.



Figuur A.5: Verloop dwarskrachten

In figuur A.5 is te zien dat V1, zoals eerder opgemerkt, de maatgevende dwarskracht is tot $a=1.8$. Op $a=1.8$ m zijn V1 en V2 even groot. Wanneer a groter wordt dan 1.8 m, dan wordt V2 de maatgevende dwarskracht. Verder is ook te zien dat hoe groter F is hoe groter de dwarskracht. Ook is er een lineaire verandering te zien in de lijnen, wanneer a verandert, in tegenstelling tot de parabolische verandering bij het moment in figuur A.3.



Figuur A.6 Verloop Maatgevende Dwarskracht V_{Ed}

Verder kan ook het verloop van de schuifspanning worden weergegeven. De schuifspanning kan worden uitgerekend met de volgende formule:

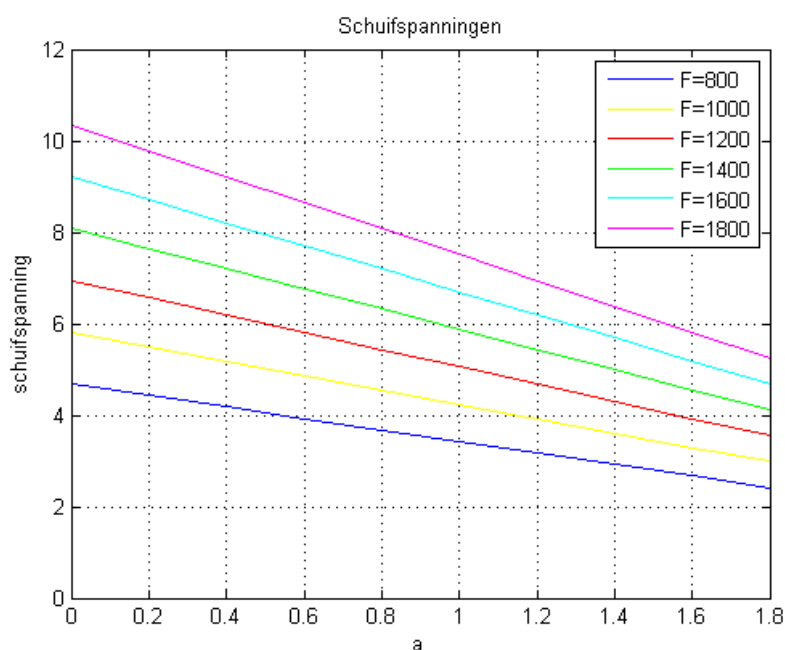
$$v_{Ed} = V_{Ed} / (b \cdot d) \quad (A.1.6)$$

In tabel A.6 zijn een aantal waarden gegeven voor de schuifspanning v_{Ed} .

Tabel A.6: Waarden Schuifspanningen

ved[kN/m²]										
a[m]	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8
F=200	0,461137	0,461137	0,874807	1,096226	1,033333	0,97044	0,907547	0,844654	0,781761	0,718868
F=400	0,864602	0,864602	1,634271	2,039623	1,913836	1,78805	1,662264	1,536478	1,410692	1,284906
F=600	1,268067	1,268067	2,393734	2,983019	2,79434	2,60566	2,416981	2,228302	2,039623	1,850943
F=800	1,671532	1,671532	3,153198	3,926415	3,674843	3,42327	3,171698	2,920126	2,668553	2,416981
F=1000	2,074997	2,074997	3,912662	4,869811	4,555346	4,240881	3,926415	3,61195	3,297484	2,983019
F=1200	2,478462	2,478462	4,672125	5,813208	5,435849	5,058491	4,681132	4,303774	3,926415	3,549057
F=1400	2,881927	2,881927	5,431589	6,756604	6,316352	5,876101	5,435849	4,995597	4,555346	4,115094
F=1600	3,285392	3,285392	6,191053	7,7	7,196855	6,693711	6,190566	5,687421	5,184277	4,681132
F=1800	3,688857	3,688857	6,950516	8,643396	8,077358	7,511321	6,945283	6,379245	5,813208	5,24717

In figuur A.7 is het verloop weergegeven voor de schuifspanningen over a.



Figuur A.7 Verloop schuifspanning v_{Ed}

Net als de dwarskracht heeft de schuifspanning ook een lineair verloop. Ook geldt er dat hoe kleiner a en groter F is, des te hoger v_{Ed} is.

In tabel A.7 is zijn nog een aantal analytische waarden voor de berekende grootheden gegeven. Alleen de waarden voor de maatgevende a's zijn gebruikt. Deze waarden zullen later nog worden gebruikt voor een aantal berekeningen.

Tabel A.7: Analytische waarden voor dwarskracht, schuifspanning en moment.

a[m]	0,60	0,80	1,80
V1	5F /6 + 33,75	7F /9 + 33,75	F /2 + 33,75
V2	F /6 + 33,75	2F /9 + 33,75	F /2 + 33,75
V _{Ed}	5F /4 + 40,5	7F /6 + 40,5	3F /4 + 40,5
v _{Ed}	F /212 + 81 / 530	7F /1590 + 81 / 530	3F /1060 + 81 / 1325
M _{Ed}	3F /4 + 1539 / 80	14F /15 + 387 / 16	27F /20 + 567 / 16

A.2 Berekeningen voor Dwarskrachtcapaciteit

In A.1 zijn de belangrijkste snedekrachten uitgerekend. Zo ook de dwarskrachten. In dit gedeelte zullen de dwarskrachtcapaciteiten worden uitgerekend volgens verschillende normen.

A.2.1 Eurocode-2

De Eurocoden zijn de nieuwe, Europese normen en richtlijnen voor de bouwwereld, die vanaf heden worden gebruikt voor het ontwerpen. Voor betonnen constructies is de Eurocode-2 beschikbaar. Deze bestaat ook weer uit een aantal subdelen.

In de eurocode 2 is er een formule gegeven voor de dwarskrachtencapaciteit $V_{Rd,c}$. Die gaat als volgt:

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} * k * 100 * \rho_l * f_{ck}]^{1/3} + k_1 * \sigma_{cp} * b_w * d \quad (A.2.1)$$

Met:

f_{ck} is de karakteristieke druksterkte van beton in Mpa. $f_{ck} = f_{cm} - 8$

f_{cm} = Gemiddelde betondruksterkte.

d is de effectieve hoogte van het beton. $d = 265 \text{ mm}$

b_w is de kleinste breedte van de betondoorsnede. $b_w = 2500 \text{ mm}$

$C_{Rd,c} = 0,18 / \gamma_c$ met $\gamma_c = 1,5$.

$k = 1 + (200/d)^{0,5}$

ρ_l is het wapeningspercentage. $\rho_l = 0,97\%$

σ_{cp} is de normaalkrachten spanning in Mpa.

$k_1 = 0,15$

Omdat de Normaalkrachten nul zijn, is er ook geen normaalkrachten spanning.

$f_{cm} = [20 \text{ } 80]$. (Er wordt een waarde uitgerekend voor zowel C20 als C80)

$f_{ck} = [12 \text{ } 72]$

$k = 1 + (200/265)^{0,5} = 1,868$

$C_{Rd,c} = 0,18 / 1,5 = 0,12$

$$V_{Rd,c} = [0,12 * 1,868 * 100 * 0,0097 * [12 \text{ } 72]]^{1/3} + 0,15 * 0 * 2500 * 265$$

Er kan ook een hogere waarde worden gevonden voor $V_{Rd,c}$, door een aantal veiligheidsfactoren weg te halen. Tijdens het beproeven van een betonnen plaat zijn er ook geen veiligheidsfactoren. Dus daarom moet er een $V_{Rd,c}$ worden uitgerekend die zo dicht mogelijk bij de werkelijkheid komt.

Voor een nieuwe waarde wordt in plaats van f_{ck} de f_{cm} -waarden gebruikt. Ook wordt voor $C_{Rd,c}$ 0,18 aangehouden. De factor $\gamma_c = 1,5$ wordt weggelaten.

$$V_{Rd,c} = [0,18 * 1,868 * 100 * 0,0097 * [20 \text{ } 80]]^{1/3} + 0,15 * 0 * 2500 * 265$$

In tabel A.8 zijn de waarden gegeven voor $V_{Rd,c}$, voor zowel met veiligheidsfactoren- als zonder veiligheidsfactoren.

Tabel A.8: Waarden $V_{Rd,c}$ volgens EC-2

Met veiligheidsfactoren			Zonder veiligheidsfactoren		
	$f_{cm}=20$ ($f_{ck}=12$)	$f_{cm}=80$ ($f_{ck}=72$)		$f_{cm}=20$	$f_{cm}=80$
V_{Rdc}=	336,6935	611,8127	V_{Rdc}=	598,7914	950,5221

Met behulp van de waarden uit tabel A.8, kan via de verkregen V_{Rdc} terug worden gerekend om een F-waarde te krijgen, wanneer de constructie zal bezwijken. Voor de F-waarden met veiligheidsfactoren is gerekend met de formule voor V_{Ed} . Voor de F-waarden zonder veiligheidsfactoren is er gerekend met de formule van V1. Men krijgt dan:

F voor $f_{cm}=20$ zonder met veiligheid	F voor $f_{cm}=20$ zonder veiligheid
$F=(336.6935-40.5)*4/5$	$F=(598.7914-33.75)*6/5$
$F=(336.6935-40.5)*12/13$	$F=(598.7914-33.75)*9/7$
$F=(336.6935-40.5)*4/3$	$F=(598.7914-33.75)*2/1$
F voor $f_{cm}=80$ met veiligheid	F voor $f_{cm}=80$ zonder veiligheid
$F=(611.8127-40.5)*4/5$	$F=(950.5221-33.75)*6/5$
$F=(611.8127-40.5)*12/13$	$F=(950.5221-33.75)*9/7$
$F=(611.8127-40.5)*4/3$	$F=(950.5221-33.75)*2/1$

In tabel A.9 staan de berekende waarden voor F.

Tabel A.9: Uitkomsten F gerekend met V_{Rdc}

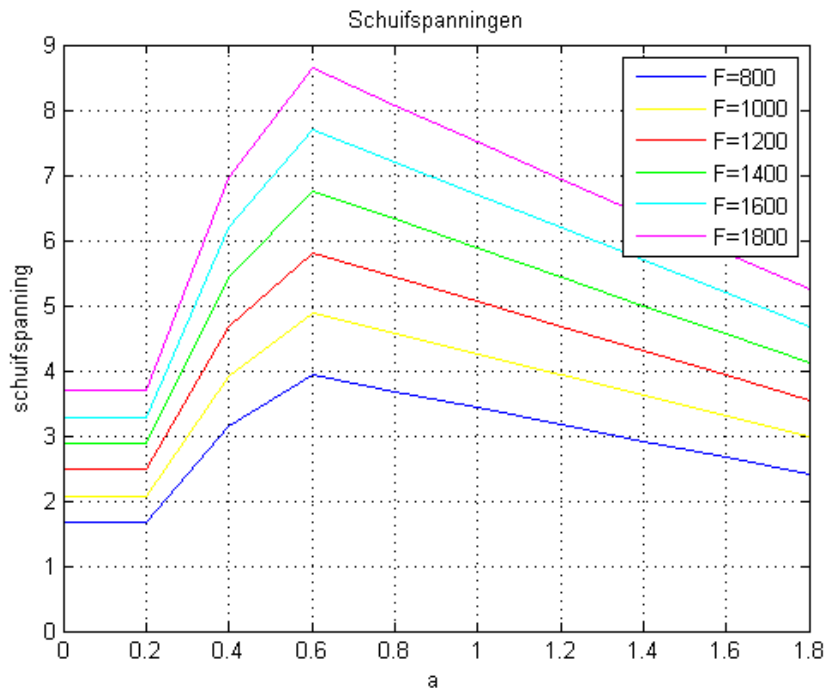
	F Bij V_{Rdc} ec-2			
	Met veiligheid		zonder veiligheid	
a[m]	$f_{cm}=20$	$f_{cm}=80$	$f_{cm}=20$	$f_{cm}=80$
0,6	236,9548	457,0502	678,0497	1100,127
0,8	253,8801	489,6966	726,4818	1178,707
1,8	394,9247	761,7503	1130,083	1833,544

Deze waarden worden vergeleken met de werkelijke bezwijkkracht, die ontstaan is bij de proef zelf. De vergelijking is te vinden in het hoofdrapport

Verder mag men volgens Eurocode 2 een reductiefactor (β) aanbrengen bij de maatgevende dwarskracht V_{Ed} . Wanneer een kracht dicht bij een oplegging wordt geplaatst, zal een gedeelte van de kracht direct om de drukboog worden overgedragen.

De reductiefactor β wordt gebruikt voor $0,5d \leq a \leq 2,0d$. $\beta = a/2d$. Met $d=0,265$ m geldt dat vanaf $a=0,6$ de factor niet meer mag worden gebruikt. Voor V_{Ed} tot $a=0,6$ m geldt dan $V = \beta * V_{Ed}$.

Het nieuwe verloop is te zien in figuur A.8.



Figuur A.8: Verloop V_{Ed} met reductiefactor β

A.2.2 NEN-code

Voordat de Eurocode officieel werd ingevoerd, werd in Nederland gewerkt met de NEN-code. Voor betonnen constructies werd de NEN 6270 gebruikt. Hierin staat een formule gegeven voor de schuifspanningscapaciteit. Er is geen specifieke formule voor de dwarskrachtcapaciteit, maar via de schuifspanning kan eenvoudig worden teruggerekend naar de dwarskracht. De formule voor de schuifspanningscapaciteit is gegeven in de NEN luidt als volgt:

$$\tau_1 = 0,4 * f_b * k_\lambda * k_h * \omega^{(1/3)} \quad (A.2.2)$$

Met

f_b is de treksterkte van het beton.

ω is het wapeningspercentage in procenten maal honderd ($= 0,97\% * 100$).

$k_h = 1,6 - h$ met h in meters.

$k_\lambda = (12/g_\lambda) * (A_0/(b*d))^{(1/3)} \geq 1$

A_0 is de effectieve oppervlakte van de belasting. Dat is dan de lijnlast. Deze heeft een breedte van 100mm en werkt over de gehele breedte van het beton. Dus $A_0 = 100 * 2500$.

b is de breedte van de plaat.

d is de effectieve hoogte.

$g_\lambda = 1 + \lambda_v^2$ voor $\lambda_v \geq 0,6$ en $2,5 + 3,5\lambda_v$ voor $\lambda_v < 0,6$.

$\lambda_v = M_{dmax}/(d * V_{dmax})$. λ_v is de dwarskrachtslankheid.

Voordat τ_1 kan worden uitgerekend, moet eerst k_λ worden uitgerekend. Hiervoor moet met eerst g_λ en λ_v uitrekenen. Met de gevonden waarden in tabel A.3 en A.5 kan λ_v worden uitgerekend. Omdat bij elke F-waarde de verhouding M:V voor een gelijkblijvende a hetzelfde is, voldoet het om een moment- en een dwarskrachtwaarde van één F te gebruiken. Wel moeten voor elke a andere waarden worden gebruikt. Dus λ_v is afhankelijk van a, waardoor uiteindelijk τ_1 ook afhankelijk is van a. Dit zal dus voor meerdere waarden voor τ_1 zorgen. Verder geldt er nog dat k_λ niet kleiner mag zijn dan 1. Is dit wel het geval dan wordt er een k_λ van 1 aangehouden. In tabel A.10 zijn de waarden te zien van k_λ voor elke a.

Tabel A.10: Waarden k_λ

a[m]	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8
k_λ	3,4583	5,5449	2,664	1,4311	1	1	1	1	1	1

Met de gevonden uitkomsten voor k_λ kan τ_1 worden uitgerekend. In de formule van τ_1 zitten er veiligheidsfactoren. Om uiteindelijk een nauwkeurigere waarde te krijgen voor de capaciteit, moeten deze factoren worden verwijderd. Dit kan alleen bij f_b . Om deze treksterkte te berekenen is er ook een formule in de NEN gegeven.

$$f_b = f_{brep} / \gamma_m \quad (A.2.3)$$

$$\text{met } f_{brep} = 0,7(1,05 + 0,05 * f_{ck})$$

Maar om dan in plaats van f_b te gebruiken, kan men f_{bm} gebruiken: $f_{bm} = 1,4 * f_{brep}$.

Op deze manier wordt meteen de γ_m geëlimineerd. Zo wordt er meteen een hogere treksterkte gebruikt dan eerst. Dit zal dan weer leiden tot een hogere capaciteitswaarde.

In tabel A.11 zijn de waarden voor treksterkte gegeven. Zowel voor met veiligheidsfactoren, als zonder.

Tabel A.11: Waarden treksterkte beton

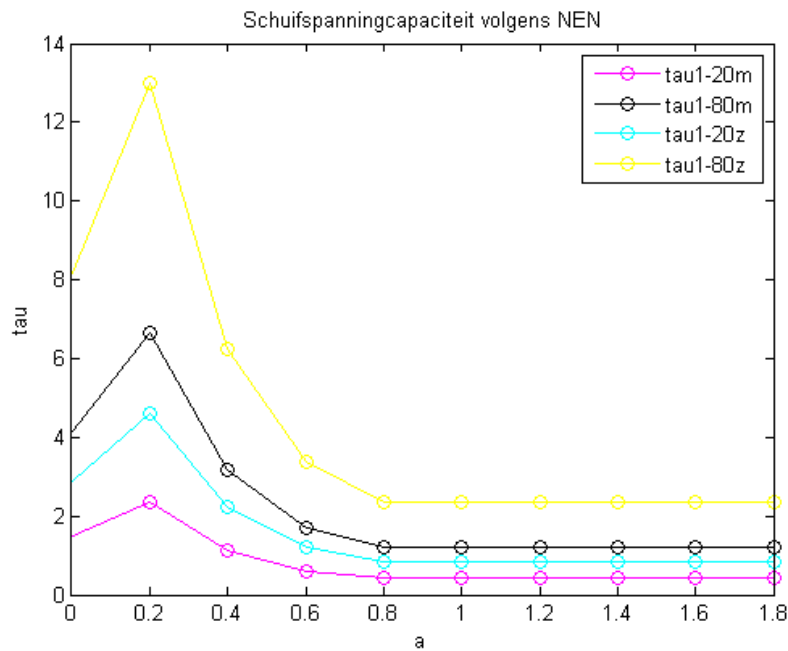
	C20/m	C20/z	C80/m	C80/z
f_b/f_{bm}	0,825	1,617	2,235	4,557

Nu alle waarden bekend zijn kan τ_1 worden uitgerekend. De uitkomsten ervan zijn weergegeven in tabel A.12. Het verloop van τ_1 is te zien in figuur A.9.

Tabel A.12: Uitkomsten τ_1 volgens NEN

τ_1 voor nen 6720 voor elke F				
	Met factoren		Zonder factoren	
a[m]	fcm=20	fcm=80	fcm=20	fcm=80
0	1,468644	4,138906	2,878542	8,112255
0,2	2,354721	6,636033	4,615254	13,00662
0,4	1,131303	3,188218	2,217354	6,248907
0,6	0,607723	1,712674	1,191137	3,356841
0,8	0,424666	1,196787	0,832346	2,345703
1	0,424666	1,196787	0,832346	2,345703
1,2	0,424666	1,196787	0,832346	2,345703
1,4	0,424666	1,196787	0,832346	2,345703
1,6	0,424666	1,196787	0,832346	2,345703
1,8	0,424666	1,196787	0,832346	2,345703

Er is duidelijk te zien dat vanaf $a=0.8$ de schuifspanning gelijk blijft. Dit komt doordat k_λ vanaf $a=0.8m$ gelijk is aan 1 en dit blijft zo, wanneer de kracht vanaf $a=0.8m$ steeds verder van de oplegging wordt geplaatst.



Figuur A.9: Verloop τ_1

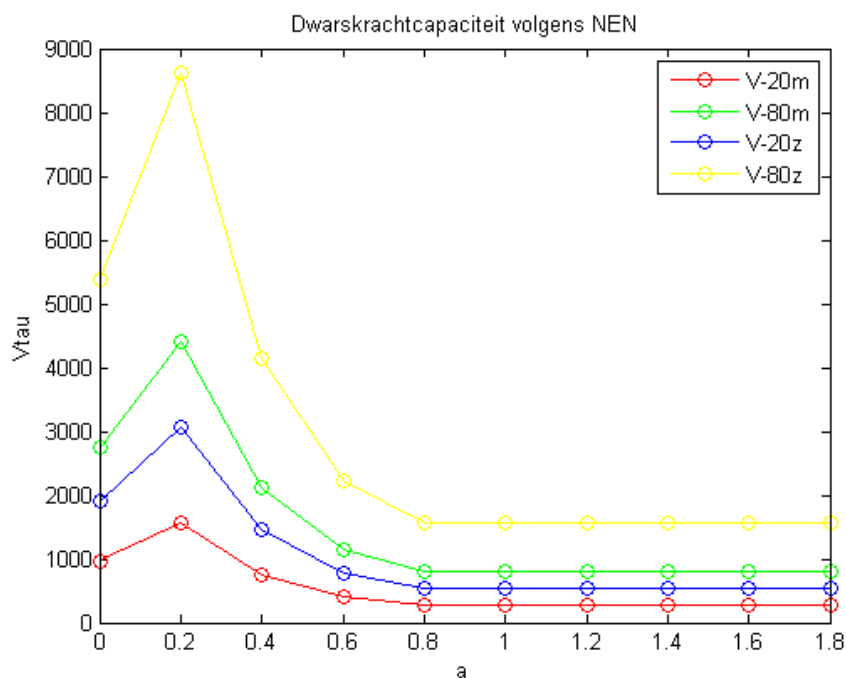
Met de uitgerekende τ_1 kan een dwarskrachtcapaciteit worden uitgerekend. Volgens NEN geldt er:

$$\tau = V/bd \rightarrow V(\tau_1) = \tau_1 * b * d \quad (A.2.4)$$

De uitkomsten voor $V(\tau_1)$ zijn gegeven in tabel A.13. En in figuur A.10 het verloop ervan, wat hetzelfde verloop heeft als de schuifspanningscapaciteit.

Tabel A.13: Uitkomsten $V(\tau_1)$

$V(\tau_1)$ voor NEN 6720 voor elke F				
	met		zonder	
a	fc_m=20	fc_m=80	fc_m=20	fc_m=80
0	972,9766	2742,025	1907,034	5374,369
0,2	1560,003	4396,372	3057,606	8616,888
0,4	749,4883	2112,194	1468,997	4139,901
0,6	402,6166	1134,647	789,1285	2223,907
0,8	281,3415	792,8714	551,4293	1554,028
1	281,3415	792,8714	551,4293	1554,028
1,2	281,3415	792,8714	551,4293	1554,028
1,4	281,3415	792,8714	551,4293	1554,028
1,6	281,3415	792,8714	551,4293	1554,028
1,8	281,3415	792,8714	551,4293	1554,028



Figuur A.10: Verloop $V(\tau_1)$

Met de gevonden waarden voor $V(\tau_1)$ kan ook hier weer een bezwijkkracht F worden uitgerekend met de waarden van tabel A.13.

F voor $f_{cm}=20$ zonder met veiligheid	F voor $f_{cm}=20$ zonder veiligheid
$F=(402.6166-40.5)*4/5;$	$F=(789.1285-33.75)*6/5;$
$F=(281.3415-40.5)*6/7;$	$F=(551.4293-33.75)*9/7;$
$F=(281.3415-40.5)*4/3;$	$F=(551.4293-33.75)*2/1;$
F voor $f_{cm}=80$ met veiligheid	F voor $f_{cm}=80$ zonder veiligheid
$F=(1134.647-40.5)*4/5;$	$F=(2223.907-33.75)*6/5;$
$F=(792.8714-40.5)*6/7;$	$F=(1554.028-33.75)*9/7;$
$F=(792.8714-40.5)*4/3;$	$F=(1554.028-33.75)*2/1;$

De waarden van F zijn gegeven in tabel A.14.

Tabel A.14: Uitkomsten F

a	F Bij VRDc NEN-6720			
	Met veiligheid		zonder veiligheid	
	$f_{cm}=20$	$f_{cm}=80$	$f_{cm}=20$	$f_{cm}=80$
0,6	289,6933	875,3176	906,4542	2628,188
0,8	206,4356	644,8898	665,5877	1954,643
1,8	321,122	1003,162	1035,359	3040,556

Deze waarden worden vergeleken met de werkelijke bezwijkkracht, die ontstaan is bij de proef zelf. De vergelijking is te vinden in het hoofdrapport.

A.2.3 Rafla

Door Rafla is er een empirische formule ontwikkeld, om het afschuifdraagvermogen te berekenen. De formule luidt als volgt:

$$V_{u,m} = \alpha_u \cdot d^{(-0,25)} \cdot f_{cm}^{0,5} \cdot (\rho_l \cdot 100)^{(1/3)} \cdot b \cdot d. \quad (A.3.1)$$

Met

$V_{u,m}$ het gemiddeld te verwachten bezwijkkracht, oftewel $V_{Rd,c}$.

α_u is een factor afhankelijk van a/d .

f_{cm} is de gemiddelde betondruksterkte.

ρ_l is het wapeningspercentage. Deze bedraagt 0.97%

b is de breedte van de plaat.

d is de effectieve hoogte van de plaat.

Uit deze formule zijn er geen veiligheidsfactoren die kunnen worden verwaarloosd. Ook wordt de gemiddelde betondruksterkte al in de formule gebruikt, dus een hogere sterkte dan f_{cm} kan niet worden gebruikt.

Voordat $V_{u,m}$ kan worden uitgerekend moet eerst α_u worden uitgerekend. Doordat deze factor afhankelijk is van a , zal er voor elke a een andere α_u zijn. Volgens Rafla geldt er:

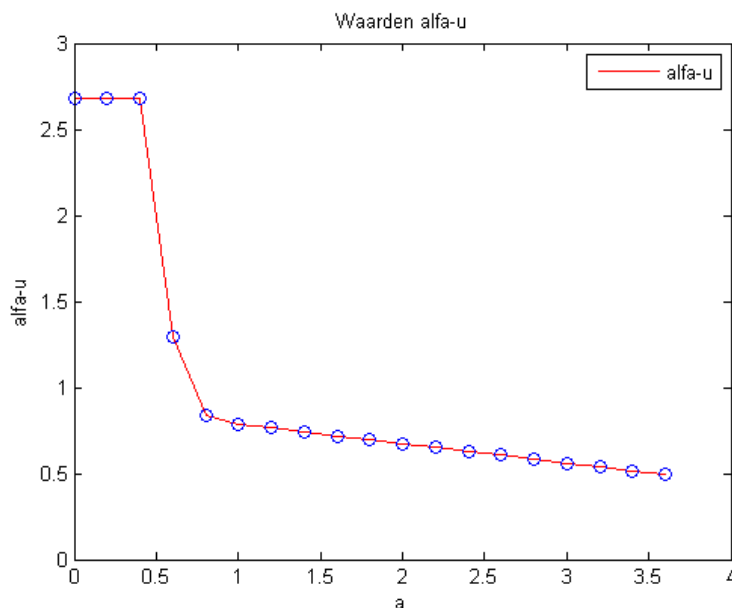
$$\alpha_u = 6 - 2,2 \cdot a/d \quad \text{voor} \quad d < a < 2d \quad (A.3.2a)$$

$$\alpha_u = 0,795 + 0,293 \cdot (3,5 - a/d)^{(2,5)} \quad \text{voor} \quad 2d < a < 3,5d \quad (A.3.2b)$$

$$\alpha_u = 0,9 - 0,03 \cdot a/d \quad \text{voor} \quad a > 3,5d \quad (A.3.2c)$$

$b=2500$, $d=265$ en $f_{cm}=[20 \ 80]$.

Het verloop van α_u kan in een grafiek worden weergegeven. Deze is te zien in figuur A.11. Er is te zien dat hoe verder de kracht verwijderd is van de oplegging (de linker oplegging) hoe kleiner α_u . De α_u waarden voor $a < d$ zijn het zelfde genomen als de van $a=0.4$. Dit omdat voor de waarden voor $a < d$ er geen formule is en deze α_u waarden kunnen niet kleiner zijn dan de α_u van $a=0.4$ maar het is ook niet bekend of die groter zijn.

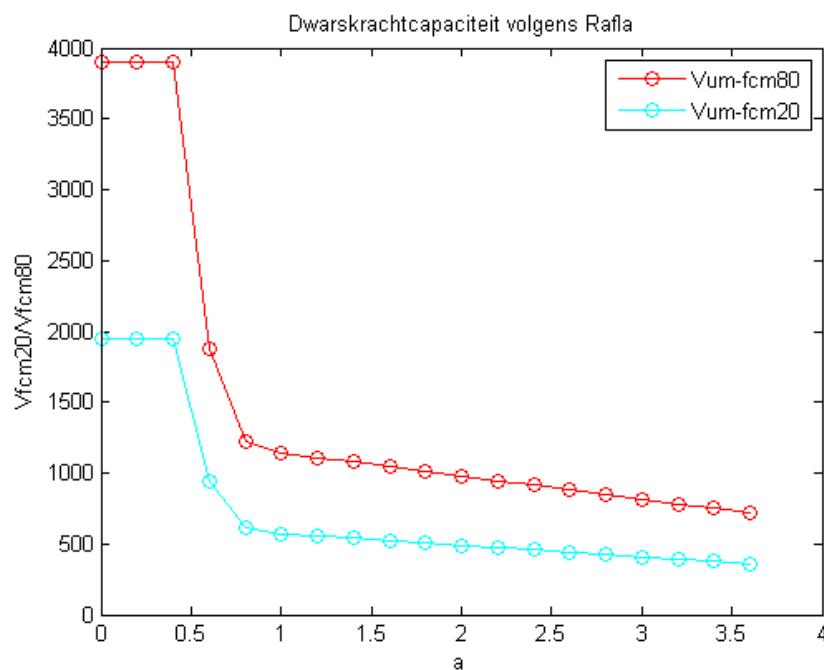


Figuur A.11: Waarden α_u

Met de berekende waarden van α_u kan $V_{u,m}$ worden uitgerekend. In tabel A.15 zijn de waarden gegeven van $V_{u,m}$, inclusief de numerieke waarden van α_u . En in figuur A.12 is het verloop te zien van $V_{u,m}$. Omdat α_u kleiner wordt bij een toenemende a , zal $V_{u,m}$ ook kleiner worden

Tabel A.15: Waarden $V_{u,m}$

$a[m]$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8
α_u	2,679245	2,679245	2,679245	1,292486	0,842047	0,786792	0,764151	0,741509	0,718868	0,696226
$V_{u,m}$										
fcm=20	1947,567	1947,567	1947,567	939,5199	612,0912	571,9264	555,4681	539,0098	522,5515	506,0932
fcm=80	3895,135	3895,135	3895,135	1879,04	1224,182	1143,853	1110,936	1078,02	1045,103	1012,186



Figuur A.12: Verloop $V_{u,m}$ voor fcm =[20 80]

Met de uitkomsten van de $V_{u,m}$ kan er met de waarden uit tabel A.15 weer terug worden gerekend om een bezwijkkracht F te bepalen. Omdat er verschillende waarden zijn voor $V_{u,m}$ moet de juiste $V_{u,m}$ bij de juiste a worden gebruikt. Alleen de F -waarden van de maatgevende a 's zijn uitgerekend.

F voor f_{cm}=20
$F=(939.5199-33.75)*6/5;$
$F=(612.0912-33.75)*9/7;$
$F=(506.0932-33.75)*2/1;$
F voor f_{cm}=80
$F=(1879.04-33.75)*6/5;$
$F=(1224.182-33.75)*9/7;$
$F=(1012.186-33.75)*2/1;$

In tabel A.16 zijn de F waarden weergegeven voor de uitgerekende $V_{u,m}$ -en.

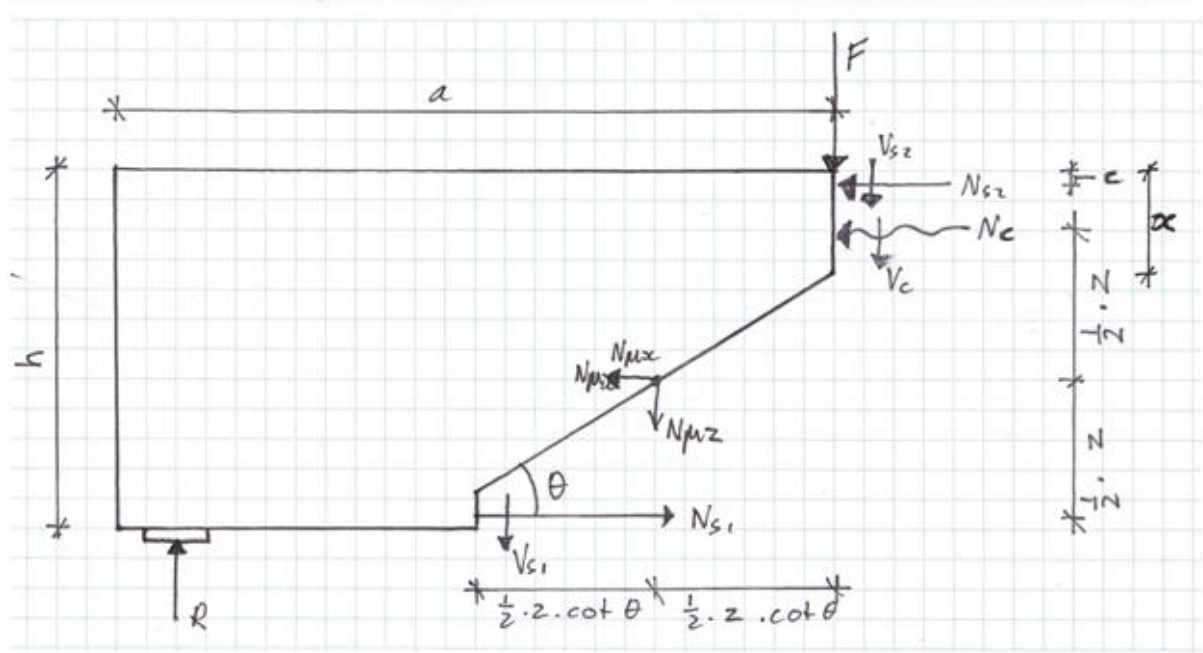
Tabel A.16: Uitkomsten F gerekend met $V_{u,m}$

F Bij $V_{u,m}$ Rafla		
a[m]	$f_{cm}=20$	$f_{cm}=80$
0,6	1086,924	2214,348
0,8	743,5815	1530,555
1,8	944,6864	1956,872

Deze waarden worden vergeleken met de werkelijke bezwijkkracht, die ontstaan is bij de proef zelf. De vergelijking is te vinden in het hoofdrapport

A.3 Berekening van bezwijkkracht via evenwicht

Naast het gebruiken van de normen, om terug te rekenen naar een bezwijkkracht, kan er ook een bezwijkkracht worden voorspeld via inwendige evenwicht in beton. In figuur A.13 is het gebied weergegeven waar evenwicht hoort plaats te vinden. Er wordt gekeken naar een doorsnede direct onder F. De schuine lijn stelt een scheur voor. Alle werkende krachten in de doorsnede moeten evenwicht met elkaar maken.



Figuur A.13: Evenwicht in doorsnede plaat.

F = de werkende lijnlast op de plaat.

R =de oplegreactie ten gevolge van de werkende krachten, dus ook het eigengewicht.

$N_{s1,2}$ = De normaalkrachten in de wapening.

$V_{s1,2}$ =De dwarskrachten in de wapening.

N_c =Normaalkracht in het beton.

V_c =Inwendige Dwarskracht in het beton.

$N_{\mu x,z}$ = Wrijvingskrachten in de scheur.

a = De afstand van F tot de oplegging.
 x = hoogte drukzone
 h = De hoogte betonplaat.
 z = De afstand tussen N_s en N_c .
 θ = De hoek van de scheur.
 c = De dekking.

Voor deze situatie kunnen er drie evenwichtsvergelijkingen worden opgesteld:

1. Horizontaal evenwicht: Alle horizontale krachten moeten met elkaar in evenwicht zijn.

$$\Sigma F_x = 0 \rightarrow N_{s1} - N_{2s} - N_c - N_{\mu x} = 0 \quad (\text{A.3.1})$$

2. Verticaal evenwicht: Alle verticaal werkende krachten moeten evenwicht met elkaar maken.

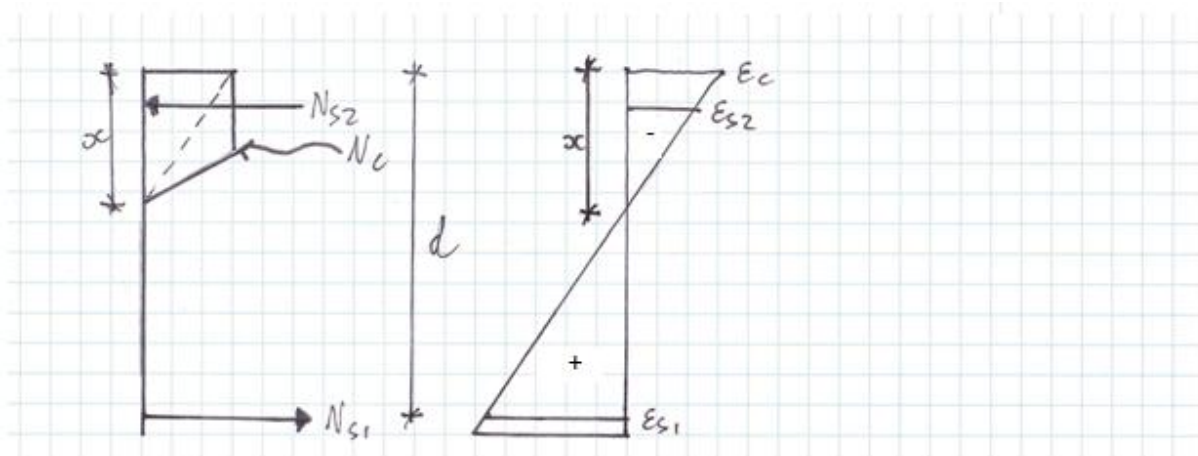
$$\Sigma F_y = 0 \rightarrow R - V_{s1} - V_{2s} - V_c - N_{\mu z} = 0 \quad (\text{A.3.2})$$

3. Momenten evenwicht: Om elk willekeurig punt moeten alle krachten momenten evenwicht vormen.

$$\Sigma |T \text{ (om aangrijpingspunt } N_c) = 0 \rightarrow R \cdot a - N_{s1} \cdot z + N_{2s} \cdot (c - \beta x) + N_{\mu x} \cdot 0.5z - V_{s1} \cdot z \cdot \cot(\theta) - N_{\mu z} \cdot 0.5z \cdot \cot(\theta) = 0 \quad (\text{A.3.3})$$

Met behulp van formule (A.3.3) kan de oplegreactie worden uitgerekend bij bezwijken. En met de eerste formule uit tabel A.1, kan dan met de uitgerekende R een bezwijkkracht F worden uitgerekend.

Voordat de oplegreactie kan worden uitgerekend moet eerst de drukzone-hoogte x worden uitgerekend. Dit wordt gedaan met behulp van evenwicht direct onder de kracht F . het evenwicht ziet er als volgt uit, zoals in figuur A.14 weergegeven.



Figuur A.14: Evenwicht in doorsnede onder F .

Uit de figuur volgt dat de onderste wapening zich in de trekzone bevindt en de wapening bovenin in de drukzone. Dit betekent dat N_c en N_{s2} evenwicht moeten maken met N_{s1} :

$$N_{s1} = N_c + N_{s2} \quad (\text{A.3.4})$$

Dit betekent dat er een x moet komen, waar (A.3.4) geldt. Dit kan worden gedaan door te itereren. Eerst worden er enkele aannames gemaakt en de bekende variabelen gegeven. Als eerst wordt er aangenomen dat het staal onderin het beton net begint te vloeien.

Dit betekent dat de spanning in het staal maximaal is ($f_{sm}=600$). Verder is de rek in dit staal, $\epsilon_{s1}=f_{sm}/E_s=600/210000=2.857\text{‰}$ en dat blijft onveranderd. $N_{s1}=f_{sm} \cdot A_{s1}=600 \cdot 6597.345=3958507 \text{ N}$. Er wordt verder aangenomen dat in eerste instantie de rek in het beton kleiner is dan 1.75‰ . Er geldt:

$$N_c = \alpha \cdot b \cdot \epsilon_c \cdot E_c \cdot x \quad (\text{A.3.5})$$

Voor α wordt in eerste instantie 0.5 genomen. Als tijdens de iteratie blijkt dat $\epsilon_c > 1.75\text{‰}$, dan moet voor α worden gebruikt:

$$\alpha = 1 - (0.875 / \epsilon_c) \quad (\text{in } \text{‰}) \quad (\text{A.3.6})$$

Ook voor β moet hier rekening mee worden gehouden, die in formule (A.3.3) staat. In eerste instantie $\beta=1/3$. Maar als $\epsilon_c > 1.75\text{‰}$ dan,

$$\beta = (0.5 \cdot (\epsilon_c \cdot 1000 - 1.75)^2 + 0.875 \cdot (\epsilon_c \cdot 1000 - 1.75)) / (((\epsilon_c \cdot 1000)^2) \cdot (1 - 0.875 / (\epsilon_c \cdot 1000))) \quad (\text{A.3.7})$$

De iteratie begint door een startwaarde voor x te nemen. Hiermee wordt de rek in het beton ϵ_c uitgerekend, via geometrie. Hiervoor wordt het rekdiagram gebruikt uit figuur A.14. Daarna kan de waarde van de rek in bovenste wapening (ϵ_{s2}) worden uitgerekend. Vervolgens worden N_c en $N_{s2}(=A_{s2} \cdot \epsilon_{s2} \cdot E_s)$ uitgerekend. Deze twee worden met elkaar opgeteld en vervolgens met N_{s1} vergeleken. De iteratie gaat net zo lang door totdat (A.3.4) geldt.

In tabel A.17 is het iteratieproces voor C20 weergegeven. In de tabellen zijn de belangrijke vergelijkingswaarden weergegeven. Er geldt uiteindelijk dat $x=111,51$. Opgemerkt moet worden dat hier ϵ_c altijd boven 1.75‰ was, waardoor een aangepaste α en β moesten worden gebruikt.

Tabel A.17: Iteratieproces voor x voor C20

x	N_c	N_{s2}	$N_{s2}+N_c$	N_{s1}	ϵ_c
100	2447433,213	123378,9818	2570812	3958407	1,731602
110	3622613,109	131338,9161	3753952	3958407	2,02765
120	5106966,286	140396,7724	5247363	3958407	2,364532
112	3892809,971	133055,7647	4025866	3958407	2,091503
111	3756141,858	132191,7662	3888334	3958407	2,059369
111,5	3824079,659	132622,3583	3956702	3958407	2,075384
111,5124	3825773,872	132633,0683	3958407	3958407	2,075782

In tabel A.18 is het iteratieproces voor C80 weergegeven. Er geldt uiteindelijk dat $x=68,18$.

Tabel A.18: Iteratieproces voor x voor C80

x	N_c	N_{s2}	$N_{s2}+N_c$	N_{s1}	ϵ_c
40	1160634,921	90477,92	1251113	3958407	0,507937
60	2866202,091	99305,03415	2965507	3958407	0,836237
70	4101282,051	104397,6	4205680	3958407	1,025641
69	3964608,236	103864,9592	4068473	3958407	1,005831
68	3830978,97	103337,7259	3934317	3958407	0,986222
68,1	3844206,214	103390,2082	3947596	3958407	0,988174
68,18124	3854974,53	103432,8857	3958407	3958407	0,989761

Met de berekende waarden voor de drukzone-hoogte, kan nu de oplegreactie R worden uitgerekend en hiermee weer de bezwijkkracht F. Nogmaals formule (A.3.3):

$$R \cdot a - N_{s1} \cdot z + N_{s2} \cdot (c - \beta x) + N_{\mu x} \cdot 0.5z - V_{s1} \cdot z \cdot \cot(\theta) - N_{\mu z} \cdot 0.5z \cdot \cot(\theta) = 0$$

Er wordt aangenomen dat de wrijvingskrachten nul zijn. c is de dekking, die bedraagt 20mm. In deze formule is V_{s1} nog onbekend. Er geldt:

$$V_s = \tau_s \cdot b \cdot I_y / S_y \quad (\text{A.3.8})$$

Met

B=breedte doorsnede

τ_s = Schuifspanning in staal

I_y = Traagheidsmoment van de staaf ($0.25 \cdot n \cdot r^4$)

S_y = Statisch moment staaf ($n \cdot r^3$)

De schuifspanning τ_s kan worden uitgerekend met de formule voor vloeicriterium van Huber-Hencky. Omgezet in eigen termen geldt er:

$$f_{sm} = (\sigma_s^2 + 3 \cdot \tau_s^2)^{0.5} \quad (\text{A.3.9})$$

Met

f_{sm} = Vloeispanning in het staal

σ_s = werkelijke spanning in het staal

Er werd aangenomen dat het staal vloeit, dus $\sigma_s = 600 \text{ N/mm}^2$. f_{sm} is ook 600 N/mm^2

Als alles in (A.3.9) wordt ingevuld, komt er voor $\tau_s = 0$.

Dit betekent dat V_{s1} ook nul is.

Terug naar formule (A.3.3). Alles is bekend. De waarde van θ is niet noodzakelijk meer.

Nu kan R worden uitgerekend voor $a=0.6\text{m}$ en $a=0.8\text{m}$. Als formule (A.3.3) wordt omgeschreven om R uit te rekenen krijgt men:

$$R = (N_{s1} \cdot z + N_{s2} \cdot (c - \beta x)) / a \quad (\text{A.3.10})$$

Voor F geldt:

$$F = (R - 41.25) / (1 - a/3,6) \quad (\text{A.3.11})$$

In tabel A.19 zijn de waarden gegeven voor R en de uiteindelijke bezwijkkracht F.

Tabel A.19: Waarden R en F

	C20		C80	
a [m]	R [kN]	F [kN]	R [kN]	F [kN]
0.6	1494.77	1744.22	1599.43	1869.81
0.8	1121.07	1388.35	1199.57	1489.27
1.8	487.89	893.28	533.14	983.78

B: Matlabscripten

In dit gedeelte van de bijlage komen de matlabscripten die zijn gebruikt voor de berekeningen in bijlage A.

B.1 Scripten voor Algemene berekeningen

B.1.1 Script *beginwaarden en dwarskracht definiëren*

```
% Uitrekenen dwarskracht voor overige cellen + beginwaarden
%F1=200;F2=400;F3=600;F4=800;F5=1000;F6=1200;
F1=800;F2=1000;F3=1200;F4=1400;F5=1600;F6=1800;
a=[0.200 0.400 0.600 0.800 1.000];
b=linspace(0,3.6,19);
V2=(F5.*a)./3.6+13.5.*2.5;
V1=F5.*(1-(a./3.6))+13.5.*2.5;
VD=1.5*(F5.*(1-(a./3.6)))+16.2.*2.5;
```

B.1.2 Script voor grafieken dwarskracht,schuifspanning etc.

```
% grafieken voor V1,V2 en Ved en ved voor elke F en alle a's
close all
% dwarskracht 2 voor F1...F6
V2bf1=(F1.*b)./3.6+13.5.*2.5; V2bf2=(F2.*b)./3.6+13.5.*2.5;
V2bf3=(F3.*b)./3.6+13.5.*2.5;
V2bf4=(F4.*b)./3.6+13.5.*2.5; V2bf5=(F5.*b)./3.6+13.5.*2.5;
V2bf6=(F6.*b)./3.6+13.5.*2.5;

% dwarskracht 1 voor F1...F6
V1bf1=F1.*(1-(b./3.6))+13.5.*2.5; V1bf2=F2.*(1-(b./3.6))+13.5.*2.5;
V1bf3=F3.*(1-(b./3.6))+13.5.*2.5;
V1bf4=F4.*(1-(b./3.6))+13.5.*2.5; V1bf5=F5.*(1-(b./3.6))+13.5.*2.5;
V1bf6=F6.*(1-(b./3.6))+13.5.*2.5;

% Maatgevende dwarskracht voor F1...F6
VEDbf1=1.5*(F1.*(1-(b./3.6)))+16.2.*2.5; VEDbf2=1.5*(F2.*(1-
(b./3.6)))+16.2.*2.5; VEDbf3=1.5*(F3.*(1-(b./3.6)))+16.2.*2.5;
VEDbf4=1.5*(F4.*(1-(b./3.6)))+16.2.*2.5; VEDbf5=1.5*(F5.*(1-
(b./3.6)))+16.2.*2.5; VEDbf6=1.5*(F6.*(1-(b./3.6)))+16.2.*2.5;

%De factor beta meerekenen voor eerste paar a's
d=0.265;
m=length(b);
for p=1:m
    if b(p)>=0.5*d & b(p)<=2*d
        VEDbf1(p)=(b(p)/(2*d))*VEDbf1(p); VEDbf2(p)=(b(p)/(2*d))*VEDbf2(p);
VEDbf3(p)=(b(p)/(2*d))*VEDbf3(p); ...
        VEDbf4(p)=(b(p)/(2*d))*VEDbf4(p);
VEDbf5(p)=(b(p)/(2*d))*VEDbf5(p); VEDbf6(p)=(b(p)/(2*d))*VEDbf6(p);
    elseif b(p)==0
        VEDbf1(p)=(b(2)/(2*d))*VEDbf1(2);
VEDbf2(p)=(b(2)/(2*d))*VEDbf2(2); VEDbf3(p)=(b(2)/(2*d))*VEDbf3(2); ...
        VEDbf4(p)=(b(2)/(2*d))*VEDbf4(2);
VEDbf5(p)=(b(2)/(2*d))*VEDbf5(2); VEDbf6(p)=(b(2)/(2*d))*VEDbf6(2);
    end
end
VEDD=[VEDbf1; VEDbf2; VEDbf3; VEDbf4; VEDbf5; VEDbf6];
```

```

% Maatgevende schuifspanning voor F1...F6
vedbf1=VEDbf1./265; vedbf2=VEDbf2./265; vedbf3=VEDbf3./265;
vedbf4=VEDbf4./265;
vedbf5=VEDbf5./265; vedbf6=VEDbf6./265;

%grafiek waar wordt weergegeven de dwarskrachten V1(dalend) en V2(stijgend)
voor
%F1...F6
plot(b,V1bf1,b,V1bf2,'y',b,V1bf3,'r',b,V1bf4,'g',b,V1bf5,'c',b,V1bf6,'m'),
title('V1(dalend),V2(stijgend)'),xlabel('a'),ylabel('Dwarskracht(1,2)'),
...

%legend('F=200','F=400','F=600','F=800','F=1000','F=1200','location','North
'),grid on
legend('F=800','F=1000','F=1200','F=1400','F=1600','F=1800','location','Nor
th'),grid on
hold on
plot(b,V2bf1,b,V2bf2,'y',b,V2bf3,'r',b,V2bf4,'g',b,V2bf5,'c',b,V2bf6,'m'),g
rid on
hold off

%grafiek waar wordt weergegeven de schuifspanning vedbfn voor F1...F6
figure
plot(b,vedbf1,b,vedbf2,'y',b,vedbf3,'r',b,vedbf4,'g',b,vedbf5,'c',b,vedbf6,
'm'),title('Schuifspanningen'),xlabel('a'),ylabel('schuifspanning'), ...

%legend('F=200','F=400','F=600','F=800','F=1000','F=1200','location','North
East'),axis([0 1.8 0 7]),grid on
legend('F=800','F=1000','F=1200','F=1400','F=1600','F=1800','location','Nor
thEast'),axis([0 1.8 0 9]),grid on
%grafiek waar VED wordt getoond voor F1...F6; [0 1.8]
figure
plot(b,VEDbf1,b,
VEDbf2,'y',b,VEDbf3,'r',b,VEDbf4,'g',b,VEDbf5,'c',b,VEDbf6,'m'),title('Maat
gevende dwarskracht'),xlabel('a'),ylabel('VED'), ...

%legend('F=200','F=400','F=600','F=800','F=1000','F=1200','location','North
East'), axis([0 1.8 0 2000]),grid on
legend('F=800','F=1000','F=1200','F=1400','F=1600','F=1800','location','Nor
thEast'),axis([0 1.8 0 2500]),grid on

```

B.1.5 Script voor grafiek Momenten.

```

%% Maatgevende moment
c=linspace(0,3.6,19)
Medf1=1.5.*F1.*c.*(1-c./3.6)+1.2.*(39.375.*c-(0.84375+5.625.*c)-
18.75.*c.^2.*0.5);
Medf2=1.5.*F2.*c.*(1-c./3.6)+1.2.*(39.375.*c-(0.84375+5.625.*c)-
18.75.*c.^2.*0.5);
Medf3=1.5.*F3.*c.*(1-c./3.6)+1.2.*(39.375.*c-(0.84375+5.625.*c)-
18.75.*c.^2.*0.5);
Medf4=1.5.*F4.*c.*(1-c./3.6)+1.2.*(39.375.*c-(0.84375+5.625.*c)-
18.75.*c.^2.*0.5);
Medf5=1.5.*F5.*c.*(1-c./3.6)+1.2.*(39.375.*c-(0.84375+5.625.*c)-
18.75.*c.^2.*0.5);
Medf6=1.5.*F6.*c.*(1-c./3.6)+1.2.*(39.375.*c-(0.84375+5.625.*c)-
18.75.*c.^2.*0.5);

figure

```

```

plot(c,Medf1,'b',c,Medf2,'r',c,Medf3,'g',c,Medf4,'y',c,Medf5,'c',c,Medf6,'m'),axis([0 3.6 0 2500]),title('Maatgevende Momenten'),xlabel('a'),ylabel('Med')
%legend('F=200','F=400','F=600','F=800','F=1000','F=1200','location','North East'),grid on
legend('F=800','F=1000','F=1200','F=1400','F=1600','F=1800','location','NorthEast'),grid on

excMed=[Medf1; Medf2; Medf3; Medf4; Medf5; Medf6];
%xlswrite('waarde',excMed,'A24:S29');
xlswrite('waarde',excMed,'groteF','A24:S29');

figure
plot(b,Medf3,'b',b,VEDbf3,'r'), axis([0 1.8 0 2000]),title('Verloop VEd en MEed'),xlabel('a'),ylabel('Ved in kN Med in kNm')
legend('Med','Ved','location','NorthEast')

```

B.1.4 Script voor berekenen symbolische waarden grootheden.

```

syms F;
a=[0.200 0.400 0.600 0.800 1.000 1.800];
V2=(F.*a)./3.6+13.5.*2.5;
V1=F.*(1-(a./3.6))+13.5.*2.5;
VD=1.5*(F.*(1-(a./3.6)))+16.2.*2.5;
ved=VD./265;
Med=1.5.*F.*a.*(1-a./3.6)+1.2.*(39.375.*a-(0.84375+5.625.*a)-18.75.*a.^2.*0.5)
format short
at=[transpose(a)];
Vt=[transpose(V1) transpose(V2)];
Vd=[transpose(VD) transpose(ved)];
T=[at Vt Vd]
transpose(VD);
transpose(Med)

```

B.2 Scripten voor Dwarskrachtcapaciteit

B.2.1 Scripten voor Eurocode-2

B.2.1.1 script voor uitrekenen VRdc

```

%% Dwarskrachtcapaciteit eurocode 2
yc=1.5; d=265; fcm=[20 80]; b=2500;
CRdc=0.18/yc;
CRdcz=0.18;
k=1+sqrt(200/d); rho=0.0097; fck=fcm-8;
VRdc=CRdc.*k.*((100.*rho.*fck).^(1/3)).*b.*d./1000 %met veiligheid
VRdcz=CRdcz.*k.*((100.*rho.*fcm).^(1/3)).*b.*d./1000 %zonder veiligheid
xlswrite('waarde',VRdc,'A32:B32');
xlswrite('waarde',VRdcz,'A34:B34');
%% Voor excel
excV1=[V1bf1; V1bf2; V1bf3; V1bf4; V1bf5; V1bf6];
excVED=[VEDbf1; VEDbf2; VEDbf3; VEDbf4; VEDbf5; VEDbf6];
excved=[vedbf1; vedbf2; vedbf3; vedbf4; vedbf5; vedbf6];

```

B.2.1.2 script voor uitrekenen F behorend bij VRdc

```
%% eurocode 2 vrdc vergelijken met VD voor een F waarde
Vrdc20m=336.6935;Vrdc80m=611.8127;Vrdc20z=598.7914;Vrdc80z=950.5221;
F1ec20m=(Vrdc20m-40.5)*12/17;
F2ec20m=(Vrdc20m-40.5)*3/4;
F3ec20m=(Vrdc20m-40.5)*4/5;
F4ec20m=(Vrdc20m-40.5)*6/7;
F5ec20m=(Vrdc20m-40.5)*12/13;
F6ec20m=(Vrdc20m-40.5)*4/3;
Fec20m=[F1ec20m; F2ec20m; F3ec20m; F4ec20m; F5ec20m; F6ec20m];

F1ec80m=(Vrdc80m-40.5)*12/17;
F2ec80m=(Vrdc80m-40.5)*3/4;
F3ec80m=(Vrdc80m-40.5)*4/5;
F4ec80m=(Vrdc80m-40.5)*6/7;
F5ec80m=(Vrdc80m-40.5)*12/13;
F6ec80m=(Vrdc80m-40.5)*4/3;
Fec80m=[F1ec80m; F2ec80m; F3ec80m; F4ec80m; F5ec80m; F6ec80m];

F1ec20z=(Vrdc20z-33.75)*18/17;
F2ec20z=(Vrdc20z-33.75)*9/8;
F3ec20z=(Vrdc20z-33.75)*6/5;
F4ec20z=(Vrdc20z-33.75)*9/7;
F5ec20z=(Vrdc20z-33.75)*18/13;
F6ec20z=(Vrdc20z-33.75)*2/1;
Fec20z=[F1ec20z; F2ec20z; F3ec20z; F4ec20z; F5ec20z; F6ec20z];

F1ec80z=(Vrdc80z-33.75)*18/17;
F2ec80z=(Vrdc80z-33.75)*9/8;
F3ec80z=(Vrdc80z-33.75)*6/5;
F4ec80z=(Vrdc80z-33.75)*9/7;
F5ec80z=(Vrdc80z-33.75)*18/13;
F6ec80z=(Vrdc80z-33.75)*2/1;
Fec80z=[F1ec80z; F2ec80z; F3ec80z; F4ec80z; F5ec80z; F6ec80z];

Fec=[Fec20m Fec80m Fec20z Fec80z]
xlswrite('waarde',Fec,'A47:D52');
```

B.2.2 Scripten voor NEN

B.2.2.1 Script voor berekenen tau1, V(tau1)

```
%% nen
F=1000;
c=0:0.2:1.8;
br=2500;
d=265;
A0=br.*100;
A=br*d;
Medf1=(1.5.*F.*c.*(1-c./3.6)+1.2.*(39.375.*c-(0.84375+5.625.*c)-
18.75.*c.^2.*0.5)).*1000000;
VD=(1.5*(F.*(1-(c./3.6)))+16.2.*2.5).*1000;
lambda=Medf1./(VD.*d);
n=length(c);
for k=1:n;
    if lambda(k)>=0.6
        gl(k)=1+(lambda(k))^2;
    elseif lambda(k)<0.6
        gl(k)=2.5-3*lambda(k);
    end
end
```

```

        end;
    end
    gl;
    kl=(12./gl).*(A0/A)^(1/3);
    for j=1:n
        if kl(j)<1
            kla(j)=1;
        else
            kla(j)=kl(j);
        end
    end
    kla
    kh=1.3;
    rho=0.97;
    fb20m=0.825; fb80m=2.325; fb20z=1.617; fb80z=4.557;
    Vtau20m=0.4.*kla.*kh.*fb20m.*(rho)^(1/3).*2.500.*265;
    Vtau80m=0.4.*kla.*kh.*fb80m.*(rho)^(1/3).*2.500.*265;
    Vtau20z=0.4.*kla.*kh.*fb20z.*(rho)^(1/3).*2.500.*265;
    Vtau80z=0.4.*kla.*kh.*fb80z.*(rho)^(1/3).*2.500.*265;
    tau20m=0.4.*kla.*kh.*fb20m.*(rho)^(1/3);
    tau80m=0.4.*kla.*kh.*fb80m.*(rho)^(1/3);
    tau20z=0.4.*kla.*kh.*fb20z.*(rho)^(1/3);
    tau80z=0.4.*kla.*kh.*fb80z.*(rho)^(1/3);
    figure
    plot(c,Vtau20m,'-ro',c,Vtau80m,'-go',c,Vtau20z,'-bo',c,Vtau80z,'-
yo'),title('Dwarskrachtcapaciteit volgens NEN'),xlabel('a'),ylabel('Vtau')
    legend('V-20m','V-80m','V-20z','V-80z','location','NorthEast')
    figure
    plot(c,tau20m,'-mo',c,tau80m,'-ko',c,tau20z,'-co',c,tau80z,'-
yo'),title('Schuifspanningcapaciteit volgens
NEN'),xlabel('a'),ylabel('tau')
    legend('tau1-20m','tau1-80m','tau1-20z','tau1-80z','location','NorthEast')
    Vtau=[Vtau20m' Vtau80m' Vtau20z' Vtau80z'];
    tau=[tau20m' tau80m' tau20z' tau80z'];
    xlswrite('waarde',Vtau,'Vtau');
    xlswrite('waarde',tau,'tau');
    xlswrite('waarde',kla,'tau','A12:A21')

```

B.2.2.2 Script voor berekenen van F behorend bij V(tau1)

```

%% F voor nen vrdc verg met VD
Vrdc20m_06=402.6166; Vrdc80m_06=1134.647; Vrdc20z_06=789.1285;
Vrdc80z_06=2223.907;
Vrdc20m_08=281.3415; Vrdc80m_08=792.8714; Vrdc20z_08=551.4293;
Vrdc80z_08=1554.028;
Vrdc20m_18=281.3415; Vrdc80m_18=792.8714; Vrdc20z_18=551.4293;
Vrdc80z_18=1554.028;

F3nen20m=(Vrdc20m_06-40.5)*4/5;
F4nen20m=(Vrdc20m_08-40.5)*6/7;
F6nen20m=(Vrdc20m_18-40.5)*4/3;
Fnen20m=[F3nen20m; F4nen20m; F6nen20m];

F3nen80m=(Vrdc80m_06-40.5)*4/5;
F4nen80m=(Vrdc80m_08-40.5)*6/7;
F6nen80m=(Vrdc80m_18-40.5)*4/3;
Fnen80m=[F3nen80m; F4nen80m; F6nen80m];

F3nen20z=(Vrdc20z_06-33.75)*6/5;
F4nen20z=(Vrdc20z_08-33.75)*9/7;

```

```
F6nen20z=(Vrdc20z_18-33.75)*2/1;
Fnen20z=[F3nen20z; F4nen20z; F6nen20z];
```

```
F3nen80z=(Vrdc80z_06-33.75)*6/5;
F4nen80z=(Vrdc80z_08-33.75)*9/7;
F6nen80z=(Vrdc80z_18-33.75)*2/1;
Fnen80z=[F3nen80z; F4nen80z; F6nen80z];
```

```
Fnen=[Fnen20m Fnen80m Fnen20z Fnen80z]
xlswrite('waarde',Fnen,'F47:I49');
```

B.2.3 Scripten voor Rafla

B.2.3.1 Script voor berekenen alfa-u en Vu,m

```
%% rafla
a=0:0.2:3.6;
d=0.265;
n=length(a);
alfu = [ones(1,2)*2.6792 zeros(1,17)];
alfu1=6-2.2*a(a>d&a<2*d)./d;
alfu2=0.795+0.293*(3.5-a(a>2*d&a<3.5*d)/d).^(2.5);
alfu3=0.9-0.03*a(a>3.5*d)./d;
alfaa=alfu + [0 0 alfu1 alfu2 alfu3] % met de loop zijn alle alfa's voor
elke a uitgerekend.

figure
plot(a,alfaa,'-r',a,alfaa,'ob'),title('Waarden alfa-
u'),xlabel('a'),ylabel('alfa-u')
legend('alfa-u','location','NorthEast')
V80=alfaa.*265.^(-0.25).*80.^(0.5).*(0.97)^(1/3).*2500.*265/1000; %Vu,m bij
fcm=80
V20=alfaa.*265.^(-0.25).*20.^(0.5).*(0.97)^(1/3).*2500.*265/1000; %Vu,m bij
fcm=20
figure
plot(a,V80,'-ro',a,V20,'-co'),title('Dwarskrachtcapaciteit volgens
Rafla'),xlabel('a'),ylabel('Vfcm20/Vfcm80')
legend('Vum-fcm80','Vum-fcm20','location','NorthEast')
xlswrite('waarde',alfaa,'A41:S41');
xlswrite('waarde',V20,'A43:S43');
xlswrite('waarde',V80,'A45:S45');
```

B.2.3.2 Script voor berekenen F behorend bij Vu,m

```
%% F bij rafla verg VD
Vrdcraf20_06=939.5199; Vrdcraf20_08=612.0912; Vrdcraf20_18=506.0932;
Vrdcraf80_06=1879.04; Vrdcraf80_08=1224.182; Vrdcraf80_18=1012.186;

F3raf20=(Vrdcraf20_06-33.75)*6/5;
F4raf20=(Vrdcraf20_08-33.75)*9/7;
F6raf20=(Vrdcraf20_18-33.75)*2/1;
Fraf20=[F3raf20; F4raf20; F6raf20];

F3raf80=(Vrdcraf80_06-33.75)*6/5;
F4raf80=(Vrdcraf80_08-33.75)*9/7;
F6raf80=(Vrdcraf80_18-33.75)*2/1;
Fraf80=[F3raf80; F4raf80; F6raf80];

Fnen=[Fraf20 Fraf80]
xlswrite('waarde',Fnen,'K47:L49');
```

B.3 Scripten voor Evenwichtsberekening

```
%%voor fcm=80
clc, close all
d=265;
fsm=600; Es=2.1*10^5; As1=6597.345; As2=1696.461;
Ns1=fsm*As1;
es1=fsm/Es;
fcm=80;
x=68.181243;
ec=x*es1/(d-x);
es2=ec*20/x;
disp('ec='),disp(ec*1000)
disp('es2='),disp(es2*1000)
Nc=x*0.5*2500*ec*45700;
disp('Nc='),disp(Nc)
Ns2=es2*Es*As2;
disp('Ns2='),disp(Ns2)
Ns1
format long e
tot=Ns2+Nc
format short

a=600;
beta=0.33; %(0.5*(ec-1.75)^2+0.875*(ec-1.17))/((ec^2)*(1-0.875/ec));
z=265-beta*x;

cottheta=1;
Vs1=0; Nux=0; Nuz=Nux;
R=(Ns1*z+Ns2*(20-beta*x)+Vs1.*z.*cottheta-
Nuz.*(0.5.*z.*cottheta)+Nux*0.5*z)./a;
F=(R./1000-41.25)./(1-a./3600);
fprintf('R= %6.2f kN and F= %6.2f kN\n',R/1000,F)
xlswrite('waarde',x,'evenwicht','A2');
xlswrite('waarde',Nc,'evenwicht','B2');
xlswrite('waarde',Ns2,'evenwicht','C2');
xlswrite('waarde',tot,'evenwicht','D2');
xlswrite('waarde',ec,'evenwicht','F2');
xlswrite('waarde',Ns1,'evenwicht','E2');

%% fcm =20
d=265;
fsm=600; Es=2.1*10^5; As1=6597.345; As2=1696.461;
Ns1=fsm*As1;
es1=fsm/Es;
fcm=20;
x=120.57811;
ec=x*es1/(d-x);
alfa=1-0.875/(ec*1000)
es2=ec*20/x;
disp('ec='),disp(ec*1000)
disp('es2='),disp(es2*1000)
Nc=x*alfa*2500*fcm;
disp('Nc='),disp(Nc)
Ns2=es2*Es*As2;
disp('Ns2='),disp(Ns2)
Ns1
format long e
Ns2+Nc
format short
```

```

a=600;
beta=(0.5*(ec*1000-1.75)^2+0.875*(ec*1000-1.17))/(((ec*1000)^2)*(1-
0.875/(ec*1000)))
z=265-beta*x;

cottheta=1;
Vs1=0; Nux=0; Nuz=Nux;
R=(Ns1*z+Ns2*(20-beta*x)+Vs1.*z.*cottheta-
Nuz.*(0.5.*z.*cottheta)+Nux*0.5*z)./a;
F=(R./1000-41.25)./(1-a./3600);
fprintf('R= %6.2f kN and F= %6.2f kN\n',R/1000,F)

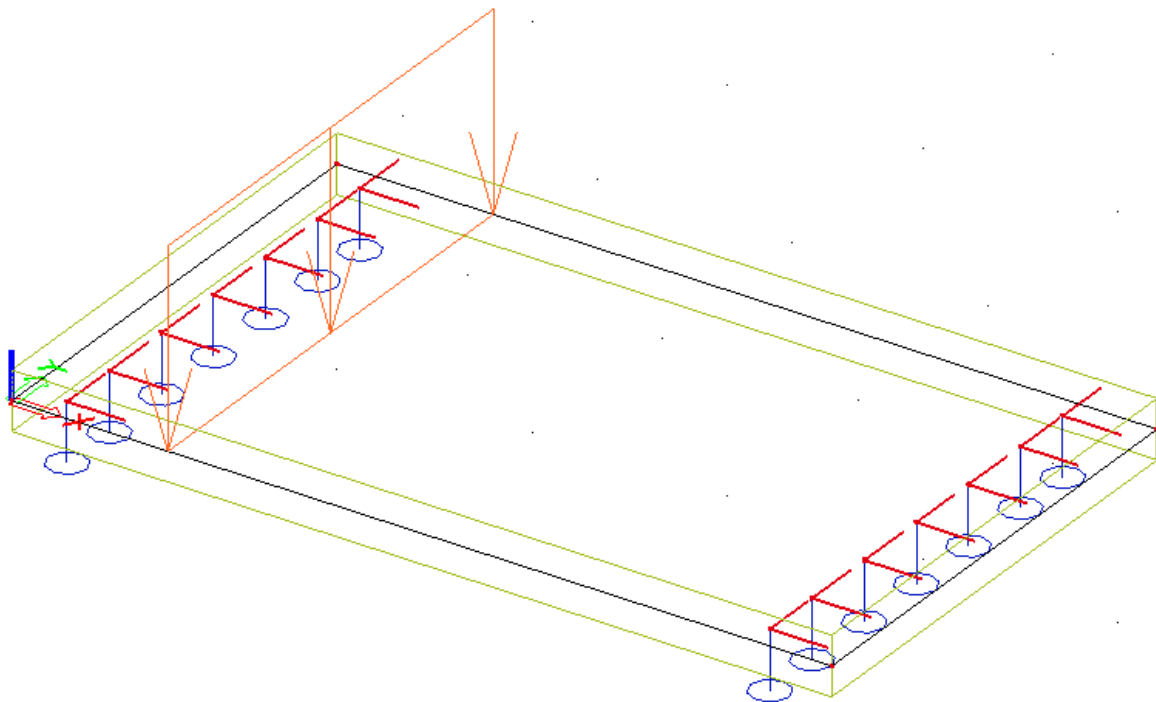
xlswrite('waarde',x,'evenwicht','A4');
xlswrite('waarde',Nc,'evenwicht','B4');
xlswrite('waarde',Ns2,'evenwicht','C4');
xlswrite('waarde',tot,'evenwicht','D4');
xlswrite('waarde',ec,'evenwicht','F4');
xlswrite('waarde',Ns1,'evenwicht','E4');

```

C: Scia Engineer

In Scia zijn er drie simulaties uitgevoerd, voor elke plaat één. De platen zijn zo geconstrueerd, dat het kan worden vergeleken met de werkelijke opstelling. Bij alle platen zijn er aan elke kant in de breedte zeven opleggingen geplaatst. In het echte onderzoek zijn er aan elke kant in feite ook zeven opleggingen in plaats van een lijnoplegging. Verder worden ook alle platen getest met een lijnlast die op $a=600\text{mm}$ en $a=800\text{mm}$ van de oplegging is verwijderd.

De opstelling in Scia ziet eruit zoals te zien is in figuur C.1. Wat betreft het net. Er is een elementgrootte gebruikt van 0.2m . Verder is er een verfijning gebruikt rond de opleggingen, voor een nauwkeuriger resultaat.



Figuur C.1: Opstelling in Scia

C.1 plaat met lage sterkte beton, C20

Voor de simulatie van de lage sterkteplaat is een betonsterkte gebruikt van C25/30. Dit komt overeen met C20. De plaat heeft een oppervlakte van $4,2$ bij $2,5$ meter. Op 14 punten zijn interne knopen geplaatst. Bij deze knopen worden opleggingen geplaatst. In tabel C.1 zijn de coördinaten gegeven van de opleggingen. Deze coördinaten gelden ook voor de overige platen.

Tabel C.1: Coördinaten opleggingen in meters en soort oplegging.

x	y	soort oplegging		x	y	soort oplegging
0,3	0,125	rol		3,7	0,125	scharnierend
0,3	0,45	scharnierend		3,7	0,45	scharnierend
0,3	0,85	scharnierend		3,7	0,85	scharnierend
0,3	1,25	scharnierend		3,7	1,25	scharnierend
0,3	1,65	scharnierend		3,7	1,65	scharnierend
0,3	2,05	scharnierend		3,7	2,05	scharnierend
0,3	2,375	scharnierend		3,7	2,375	scharnierend

Er is geen standaard functie in het programma die de bezwijkkracht kan uitrekenen of een dwarskrachtcapaciteit. Dus de bezwijkkracht moet op een andere manier worden gevonden. Dit wordt gedaan door bij een geplaatste kracht te kijken hoeveel wapening er nodig is. Dit kan Scia wel uitrekenen.

De werkelijke wapening in de platen is 6597,345. Dus als het programma een wapening uitrekent boven deze waarde is de plaat eigenlijk al bezweken.

Ook geeft Scia soms foutmeldingen tijdens het uitrekenen van de wapening. Dit kan duiden op het feit dat er geen wapening meer kan worden uitgerekend. De plaat is dan bezweken. Soms komen er fouten precies bij de knopen. Deze zullen worden verwaarloosd, omdat deze fouten liggen aan singulariteiten. Alleen duidelijke foutmeldingen worden meegenomen.

De bezwijkkracht is gevonden door het telkens proberen van verschillende waarden van F . In tabel C.2 is dit proces getoond met ook de uiteindelijke bezwijkkracht. Bij de plaat met sterkte C20 is dat bij $F=1600$ kN.

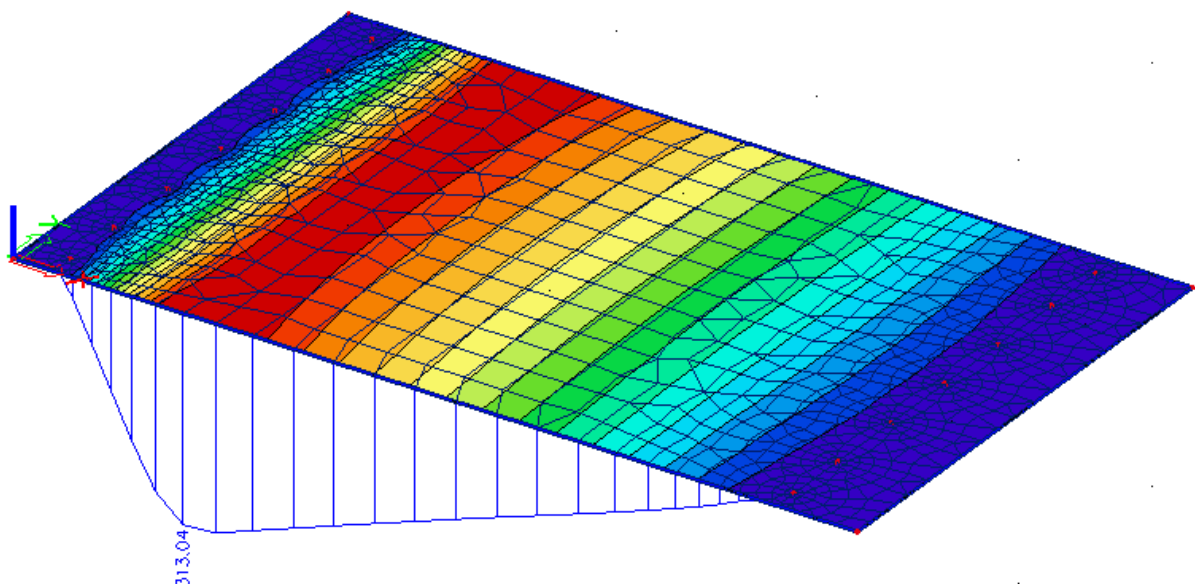
Tabel C.2: Bezwijkkracht C20

F	A_s	max A_s	foutmeldingen
1200	4511	6597,345	0
1400	5464	6597,345	0
1600	6520	6597,345	0
1650	6805	6597,345	0

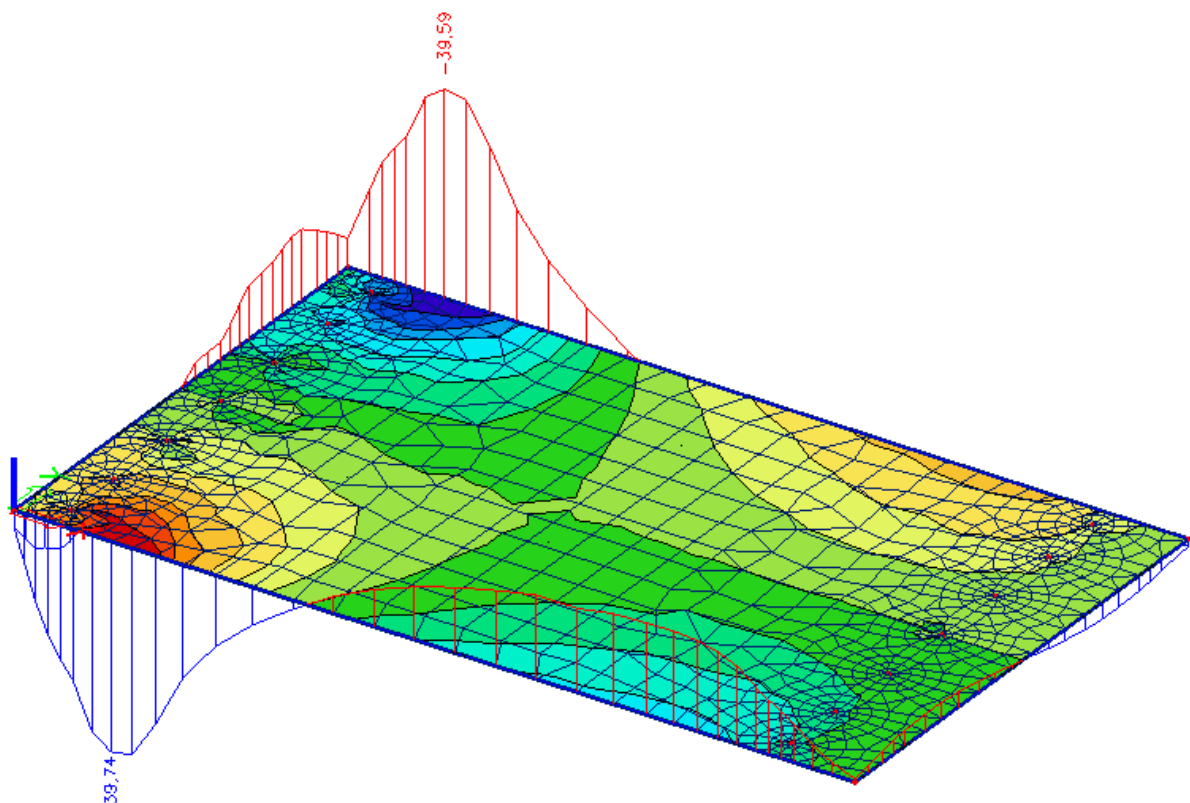
Verder zijn in figuren C.2 en C.3 nog de momenten m_{xx} en m_{xy} weergegeven. Dit zijn de momenten optredend bij de bezwijkkracht.

Het grootste moment m_{xx} in de plaat is 313,04 kNm/m

Het grootste moment m_{xy} in de plaat is -39,59 kNm/m als minimum en 39,74 kNm/m als maximum.



Figuur C.2: Momentenverloop m_{xx} in zwakke plaat



Figuur C.3: Momentenverloop m_{xy} in zwakke plaat

C.2 Plaat met hoge sterkte beton, C80

Voor de simulatie van de hoge sterkteplaat is een betondruksterkte gebruikt van C55/67.

Voor de rest is dezelfde methodiek gebruikt als in paragraaf C.1

In tabel C.3 zijn de resultaten weergegeven voor de bezwijkkracht. Volgens Scia zal de plaat bezwijken bij $F=2050$ kN

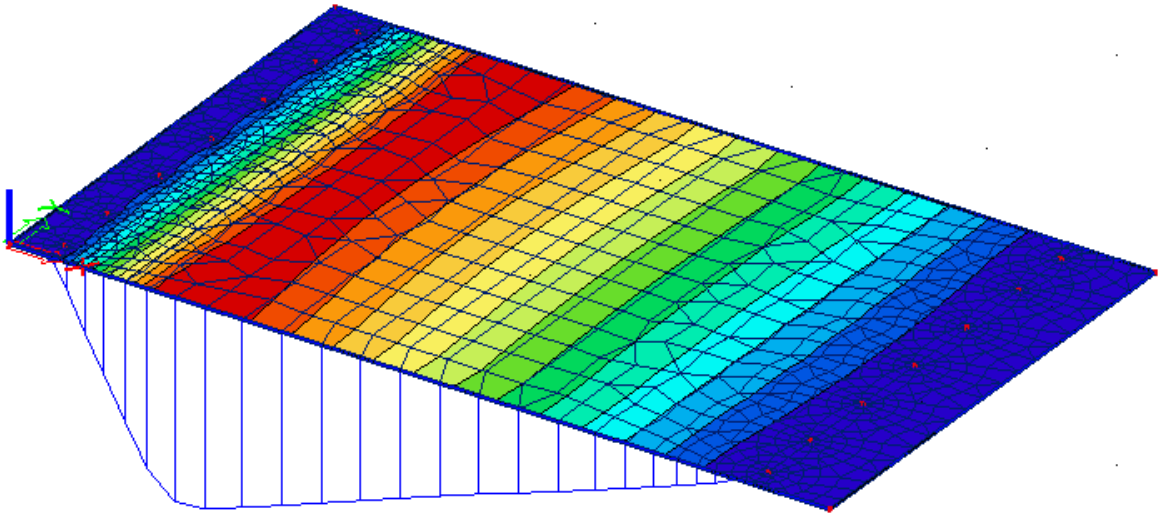
Tabel C.3: Bezwijkkracht C80

F	As	max As	foutmeldingen
1650	5091	6597,345	0
1850	5809	6597,345	0
2050	6556	6597,345	0
2100	6748	6597,345	0

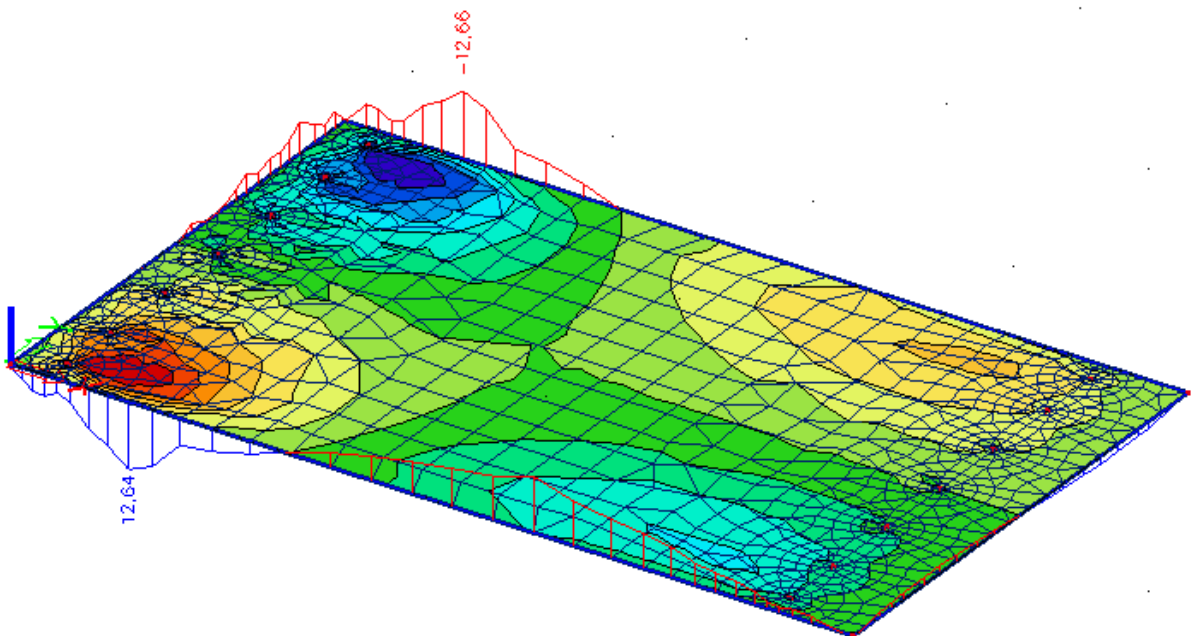
In figuren C.4 en C.5 zijn de momenten m_{xx} en m_{xy} weergegeven. Dit zijn de momenten optredend bij de bezwijkkracht.

Het grootste moment m_{xx} in de plaat is 396,22 kNm/m.

Het grootste moment m_{xy} in de plaat is -39,35 kNm/m als minimum en als maximum 39,27 kNm/m.



Figuur C.4: Momentenverloop m_{xx} in sterke plaat



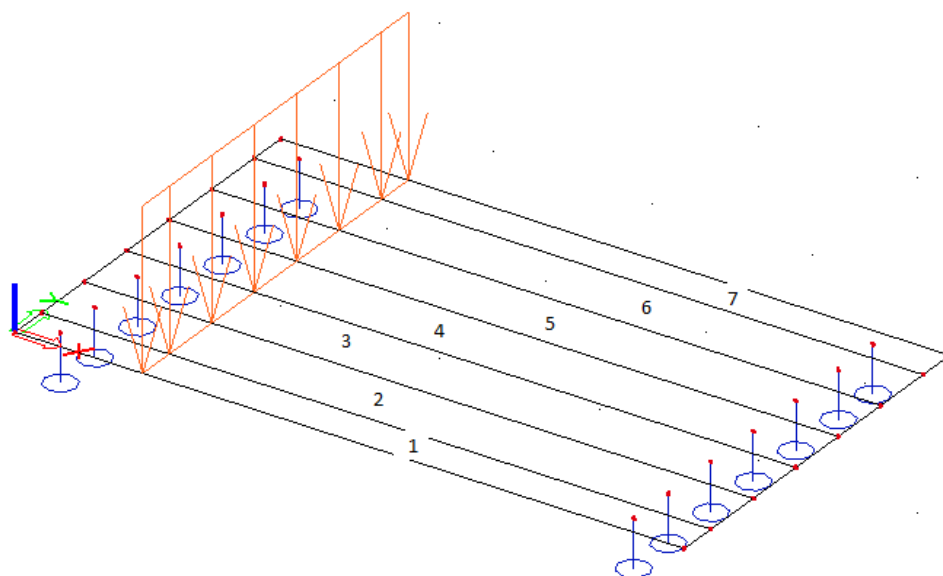
Figuur C.5: Momentenverloop m_{xy} in sterke plaat

C.3 Plaat met gemixte sterkten beton, C20 en C80

Voor de gemixte plaat is een andere manier aangepakt om de plaat te creëren. Feitelijk gezien bestaat deze plaat uit 7 strippen zoals in de werkelijkheid ook het geval is. In tabel C.4 is te zien hoe groot elke strip is in de plaat. In figuur C.6 is de complete plaat te zien.

Tabel C.4: Stripmaten

Strip	lengte	breedte
1	4,2	0,25
2	4,2	0,4
3	4,2	0,4
4	4,2	0,4
5	4,2	0,4
6	4,2	0,4
7	4,2	0,25



Figuur C.6: Opstelling gemixt plaat in Scia

Ondanks een andere manier van het maken van de plaat, kan er nog steeds via de wapeningsberekening de bezwijkkracht worden gevonden. De resultaten staan weergegeven in tabel C.5. De bezwijkkracht is 1900 kN.

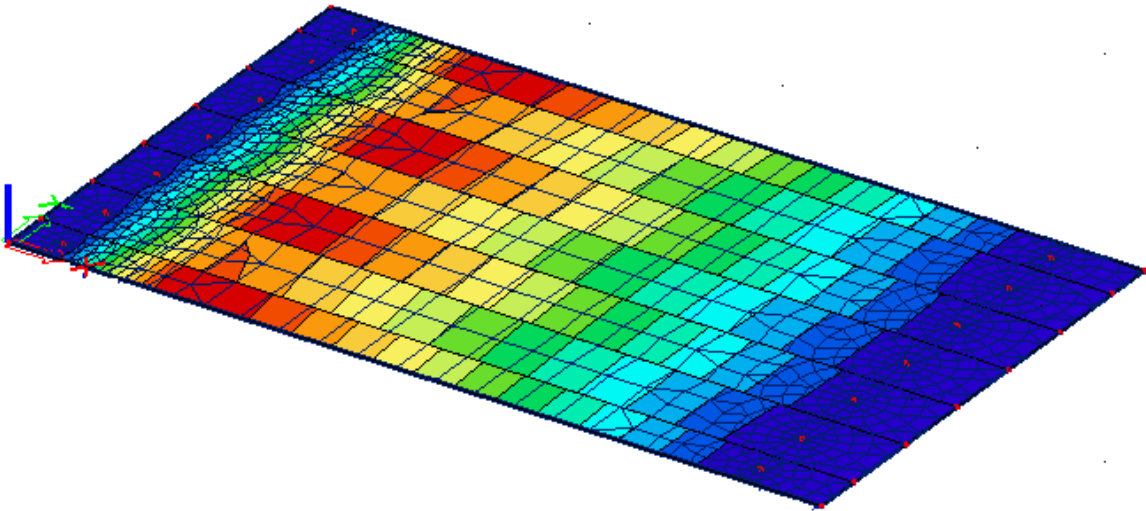
Tabel C.5: Bezwijkkracht gemixte plaat

F	As	max As	foutmeldingen
1650	5567	6597,345	0
1750	5959	6597,345	0
1850	6358	6597,345	0
1900	6561	6597,345	0
1950	6766	6597,345	0

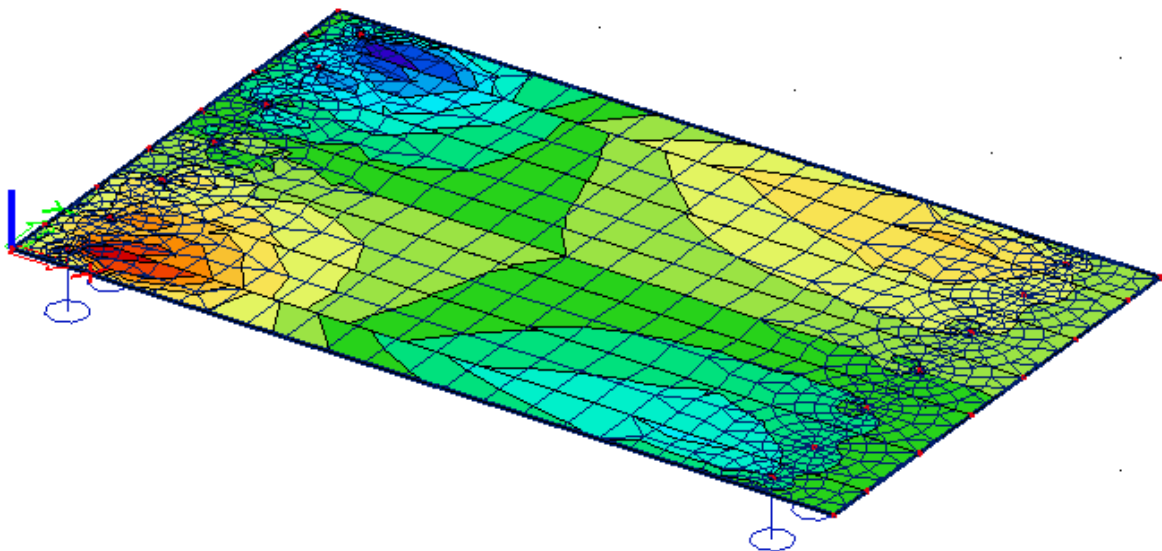
In figuren C.7 en C.8 zijn de momenten m_{xx} en m_{xy} weergegeven. Dit zijn de momenten optredend bij de bezwijkkracht.

Het grootste moment m_{xx} in de plaat is 400,28 kNm/m in de sterke strips en ongeveer 360 kNm/m in zwakke strips.

Het grootste moment m_{xy} in de plaat is -36,68 kNm/m als minimum en als maximum 36,66 kNm/m.



Figuur C.7: Momentenverloop m_{xx} in gemixte plaat



Figuur C.8: Momentenverloop m_{xy} in gemixte plaat

Einde Bijlage