

Bachelor Eindwerk

Optimalisatietool voor 4-paals blokpoeren op kosten en
duurzaamheid



Auteur: Friso van Spengler
Begeleiders: Ir. M. Schuurman, Dr. Ir. P. Hoogenboom

Oktober 2020

Voorwoord

Dit rapport is een Bachelor Eind Project van het Bachelor Programma van Civiele Techniek aan de TU Delft. Het doel is het maken van een optimalisatietool voor het ontwerpen van 4-paals blokpoeren en bevat hiervan een beschrijving, discussie, conclusie en aanbevelingen.

Ik zou graag Ir. Marco Schuurman en Dr. Ir. Pierre Hoogenboom willen bedanken voor de ondersteuning, feedback en achtergrondinformatie die zij hebben geboden gedurende dit project.

Delft, oktober 2020
Friso van Spengler

Abstract

Het ontwerpen van een efficiënt constructie-element kan tijdrovend en complex zijn. In het geval van 4-paals blokpoeren kunnen er verschillende keuzes gemaakt worden in het ontwerpproces. In dit rapport is een optimalisatietool ontworpen voor 4-paals blokpoeren. De optimalisatietool bepaalt op basis van een gegeven belastingsituatie een poerontwerp dat kostenefficiënt en duurzaam is. Aan de hand van een voorbeeldberekening is de berekening van een poer geautomatiseerd in een Python script. Door het uitvoeren van een parameterstudie zijn de belangrijkste variabelen voor de optimalisatie bepaald. Met het variëren van deze optimalisatievariabelen werden verschillende varianten voor de poeren verkregen. In de optimalisatie werden de kosten en milieubelasting van de verschillende varianten berekend om vervolgens de de goedkoopste en duurzaamste configuratie te kiezen. Uiteindelijk is met de optimalisatietool een significante kostenbesparing en reductie van de milieubelasting bereikt ten opzichte van een voorbeeldberekening. De tool is echter nog eenvoudig en niet toe te passen als definitieve berekening, in vervolgstudies zou de detaillering van de poer verder in de tool verwerkt kunnen worden.

Inhoudsopgave

Voorwoord	i
Abstract	ii
1 Introductie	2
1.1 Probleemstelling	2
1.2 Doel	2
1.3 Aanpak	3
1.4 Definities en symbolenlijst	4
1.4.1 Definities	4
1.4.2 Symbolen	9
2 Parameterstudie	11
2.1 Wat zijn de belangrijkste parameters voor het ontwerpen van een poer?	11
2.1.1 Parameters	12
2.1.2 Conclusie	16
2.2 Hoe zijn de kosten van een poer opgebouwd?	17
2.3 Hoe wordt de duurzaamheid van een poer berekend?	18
2.4 Hoe beïnvloeden de parameters de kosten en de duurzaamheid van een poer? .	20
2.5 Conclusie	22
3 Optimalisatie	23
3.1 De tool	23
3.2 Resultaten	25
4 Discussie	31
4.1 Verklaring van de resultaten	31
4.2 Keuzes ten aanzien van de invoer van de tool	33
4.3 Toepassing van de optimalisatietool	33
5 Conclusie en aanbevelingen	35
A Kostenberekening	38
B Python code: Tool	39

C	Python code: Berekening	44
D	Python code: Optimalisatie	55
E	Uitkomst optimalisatie	57
F	Validatie berekening	62

Hoofdstuk 1

Introductie

1.1 Probleemstelling

Poeren zijn betonnen funderingselementen die gebruikt worden om funderingspalen te verbinden met de rest van de constructie van een bouwwerk. Daarbij dienen ze de belastingen vanuit bijvoorbeeld kolommen over te dragen op de palen.

De poer wordt getoetst op sterkte en duurzaamheid. Er zijn verschillende parameters die invloed hebben op deze aspecten, bijvoorbeeld de afmetingen van de poer, de hoeveelheid wapening en de configuratie van de wapening. Het vinden van een kostenefficiënte en duurzame verhouding tussen al deze aspecten is een tijdrovende opgave wanneer dit handmatig wordt uitgevoerd. Daarom is het nuttig een tool te ontwikkelen die op een eenvoudige manier kan ondersteunen bij het ontwerpen van efficiënte poeren.

1.2 Doel

Het doel van dit project is het ontwikkelen van een optimalisatie tool voor betonnen 4-paals blokpoeren. Deze tool moet op basis van een gegeven krachtenverdeling de afmetingen en de hoeveelheid wapening van de poer bepalen. Het doel is hiermee een ontwerp voor een poer te bepalen dat ofwel zo goedkoop mogelijk is ofwel een zo laag mogelijke milieubelasting heeft.

Om deze tool te ontwikkelen zullen de belangrijkste aspecten van de optimalisatietool bepaald moeten worden. Dit zal gebeuren aan de hand van een vooronderzoek. Dit vooronderzoek zal gestructureerd worden met de hulp van de volgende deelvragen:

1. Wat zijn de belangrijkste parameters voor het ontwerpen van een poer?
2. Hoe zijn de kosten van een poer opgebouwd?
3. Hoe wordt de milieubelasting van een poer berekend?
4. Hoe beïnvloeden de parameters de kosten en de duurzaamheid van een poer?

1.3 Aanpak

Om deze tool te ontwikkelen zal dit project opgedeeld worden in twee delen. Het eerste deel zal bestaan uit een vooronderzoek. Hierin zal aan de hand van deelvragen bepaald worden wat de belangrijkste aspecten van de optimalisatie tool zijn. Het tweede deel zal bestaan uit het schrijven van de optimalisatie tool in de vorm van een Python programma. Voor de basis van het ontwerpen van een poer zullen Eurocode 2 [EC2, 2004] en de daarvan afgeleide voorbeeldberekening uit het boek 'EC2 in de praktijk; voorbeeldberekeningen' [Betonvereniging, 2014] gebruikt worden. De poer zal berekend en getoets worden volgens een berekening met het staafwerkmodel.

Vooronderzoek

Met het vooronderzoek zullen de belangrijkste aspecten van de optimalisatietool bepaald moeten worden. Dit zal gebeuren aan de hand van deelvragen. Deze deelvragen zullen hieronder toegelicht worden.

1) Het doel van de eerste deelvraag is het achterhalen van de belangrijkste parameters van een poer. Dit zal gebeuren met een parameterstudie op basis van een voorbeeldberekening uit 'EC2 in de praktijk; voorbeeldberekeningen' gebaseerd op Eurocode 2 [Betonvereniging, 2014]. Belangrijke onderdelen die behandeld zullen worden zijn de eigenschappen van het beton en de wapening. De verschillende ontwerpopties zullen worden toegelicht. Er zal ook gekeken worden naar de interactie tussen deze variabelen. Hiermee zal worden bepaald wat de verschillende keuzemogelijkheden zijn die invloed kunnen hebben op het uiteindelijke ontwerp van de poer.

2) Het doel van de tweede deelvraag is te achterhalen hoe de kosten van een poer zijn opgebouwd. Met de hulp van een rekentool voor vier-paals blokpoeren zullen de verschillende aspecten van de kosten van een poer worden toegelicht. Uiteindelijk kan hiermee het belang van van verschillende variabelen voor de kosten van een poer bepaald worden.

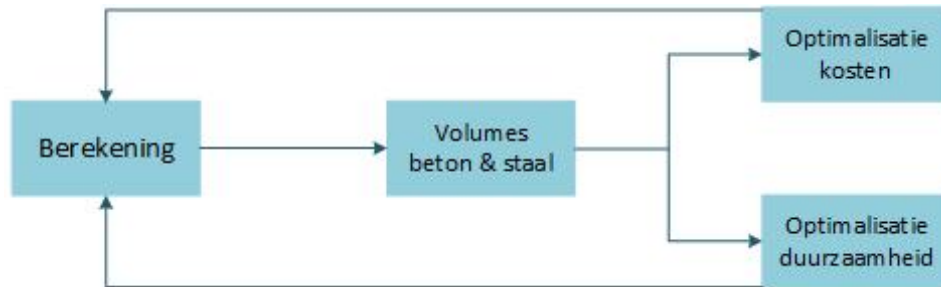
3) Het doel van de derde deelvraag is te achterhalen hoe de milieubelasting van een poer wordt berekend. Aan de hand van beschikbare literatuur zal bekeken worden waarvan de milieubelasting van de poer afhankelijk is. Uiteindelijk kan hiermee het belang van van verschillende variabelen voor de duurzaamheid van een poer bepaald worden.

4) Het doel van de vierde deelvraag is het zoeken van een verband tussen de verschillende variabelen en de kosten en duurzaamheid van een poer. Dit zal onderzocht worden door het toepassen van de kostenberekening en de berekening van de milieubelasting op de berekening van de poer. Het effect van de verschillende optimalisatievariabelen op de kosten en duurzaamheid van de poer zal onderzocht worden.

programmeren

Met de verzamelde informatie zal een Python programma geschreven worden. Het doel van dit programma zal zijn om bij verschillende belastingsituaties de optimale configuratie van de poer te bepalen. De optimale configuratie zal afhankelijk zijn van de kosten en de duurzaamheid.

In figuur 1.1 is te zien hoe het proces voor het programmeren gestructureerd zal worden. Eerst zal de voorbeeldberekening geprogrammeerd worden. Hierna zal het betonvolume en de massa van het toegepaste staal berekend worden. Daarna zullen de parameters achtereenvolgens op kosten en duurzaamheid geoptimaliseerd worden. De uitkomst van de optimalisatie zal vervolgens ter controle in de berekening ingevoerd worden.



Figuur 1.1: Structurering voor het programmeren van de optimalisatie tool

1.4 Definities en symbolenlijst

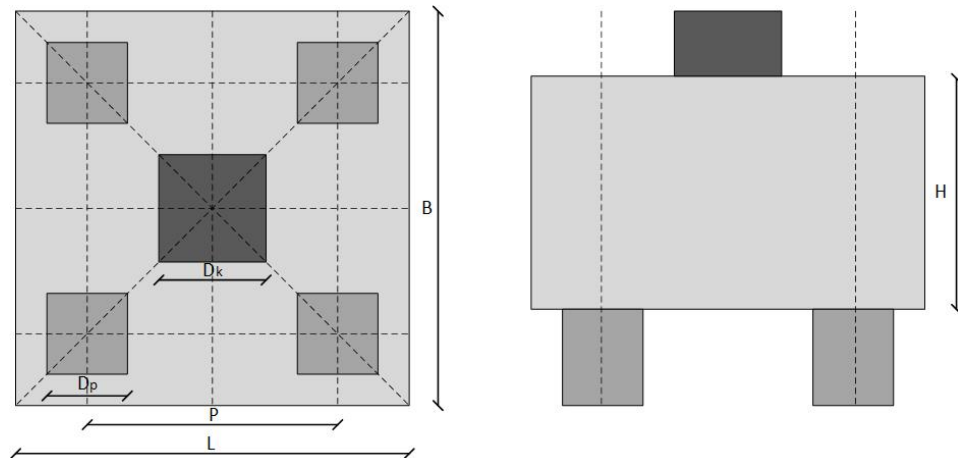
In deze sectie zal de relevante technische achtergrond voor het project toegelicht worden. De belangrijke definities en theorie zullen behandeld worden. Daarbij is er een symbolenlijst opgesteld ter verduidelijking van de rest van het rapport.

1.4.1 Definities

Eerst zullen de belangrijkste kenmerken van de poer en de wapening behandeld worden, vervolgens zal er een toelichting volgen op de begrippen kosten en duurzaamheid en als laatste zal het staafwerkmodel beschreven worden.

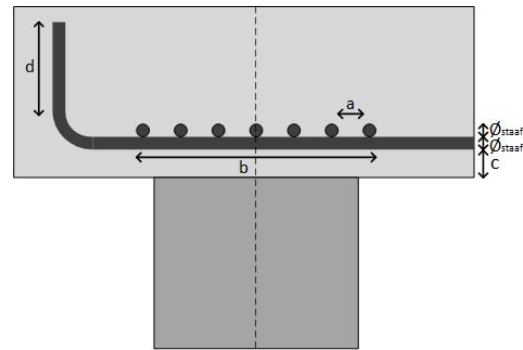
Basiskenmerken

In figuur 1.2 is een schematische weergave van een 4-paals blokpoer te zien, er is zowel een bovenaanzicht als een zijaanzicht gegeven. Te onderscheiden zijn de kolom, de funderingspalen en de poer. De kolom is onderdeel van de constructie van het bouwwerk en wordt belast door deze constructie. De kolom brengt op zijn beurt de belasting over op de poer. De poer is een gedrongen constructie-element dat zich bevindt tussen de kolom en de funderingspalen, deze vangt de belasting van de kolom op en brengt deze over op de funderingspalen. De funderingspalen onder de poer reiken tot in een draagkrachtige grondlaag en brengen de belastingen uit de constructie over op de laag.



Figuur 1.2: Schematische weergave 4-paals blokpoer

In de poer bevindt zich ook wapening. De wapening zit voornamelijk onderin de poer, deze wapening vormt de trekwapening en heeft als doel de trekkrachten onderin de poer op te vangen. De trekwapening wordt geplaatst in vier trekbanden die zich boven de funderingspalen bevinden. In figuur 1.3 is een schematische weergave van de doorsnede van een wapeningsband boven een funderingspaal weergegeven. Naast de trekwapening bevindt zich ook nog flank- en bovenwapening in de poer, dit dient voor het opsluiten van beton en heeft daarnaast een praktische toepassing.



Figuur 1.3: Schematische weergave van de wapeningsband in een poer

Kosten en duurzaamheid

Eerder is genoemd dat de poer geoptimaliseerd zal worden op kosten en duurzaamheid. Hiermee wordt bedoeld dat de tool ontwikkeld zal worden om de poer zo te ontwerpen dat deze kostenefficiënt en duurzaam is. Hoe de kosten van de poer zijn opgebouwd zal in paragraaf 2.2 onderzocht worden. De duurzaamheid van de poer valt op te delen in twee betekenissen. De eerste betekenis is de verwachte levensduur van de poer. De tweede betekenis is de milieubelasting van de poer.

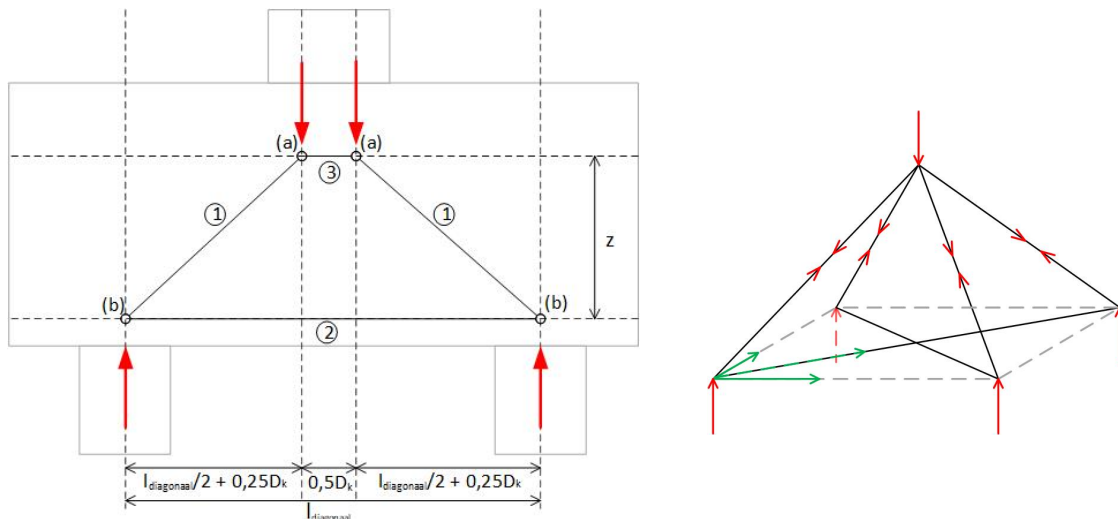
Een poer wordt zo ontworpen dat deze de volledige ontwerplevensduur van de constructie blijft functioneren. De voornaamste bedreiging voor de levensduur van de poer is het scheuren van het beton. Door het ontstaan van scheuren kan de wapening blootgesteld worden aan water en lucht. Dit kan corrosie van de wapening tot gevolg hebben. De eisen voor de poer op basis van de levensduur van de constructie zijn vastgelegd in de Eurocode. Volgens EC2 artikel 4.1 is een duurzame constructie een constructie die voldoet aan de eisen voor bruikbaarheid, sterkte en stabiliteit gedurende zijn ontwerplevensduur zonder significant verlies van bruikbaarheid of groot onvoorzien onderhoud. Dit houdt in dat de duurzaamheid in de vorm van de levensduur

ook getoetst wordt in de berekening. Derhalve wordt de toetsing op duurzaamheid in deze betekenis automatisch meegenomen in de optimalisatie.

De milieubelasting van de poer wordt niet automatisch meegenomen in de berekening. Hoe de milieubelasting van een poer bepaalt kan worden wordt in paragraaf 2.3 behandeld. De milieubelasting is dus nog wel interessant om mee te nemen in de optimalisatie. Waar in de context van de optimalisatie over duurzaamheid gesproken wordt wordt in dit rapport dus de milieubelasting bedoeld.

Staafwerkmodel

De krachtwerking in de poer kan gemodelleerd worden als een staafwerk. Het staafwerk bestaat uit twee driehoeken die diagonaal door de poer lopen en elkaar snijden onder de kolom, dit is schematisch weergegeven rechts in figuur 1.4. Links in figuur 1.4 is een van deze driehoeken weergegeven, in deze figuur is ook te zien hoe het staafwerk in de poer gepositioneerd is.



Figuur 1.4: Staafwerkmodel

De kolom belast de poer bij knooppunt a. Deze kracht wordt via de diagonale drukstaaf (1) doorgegeven naar knooppunt b. Knooppunt b draagt de drukkrachten over op de funderingspalen. Hierbij ontstaan trekkrachten in staaf 2, deze trekkrachten in de diagonale staaf worden ontbonden naar de orthogonale structuur en opgenomen door de wapeningsbanden boven de funderingspalen, dit is aangegeven met de groene pijlen in figuur 1.4.

Ter versimpeling wordt verondersteld dat de kolom loodrecht op de staafwerken staat, hierdoor werkt op elk knooppunt a een kracht die gelijk is aan een kwart van de totale belasting van de kolom. In figuur 1.5a is de krachtwerking in knoop a weergegeven, knoop a is een C-C-C-knoop (drukknoop). De verschillende parameters worden als volgt berekend:

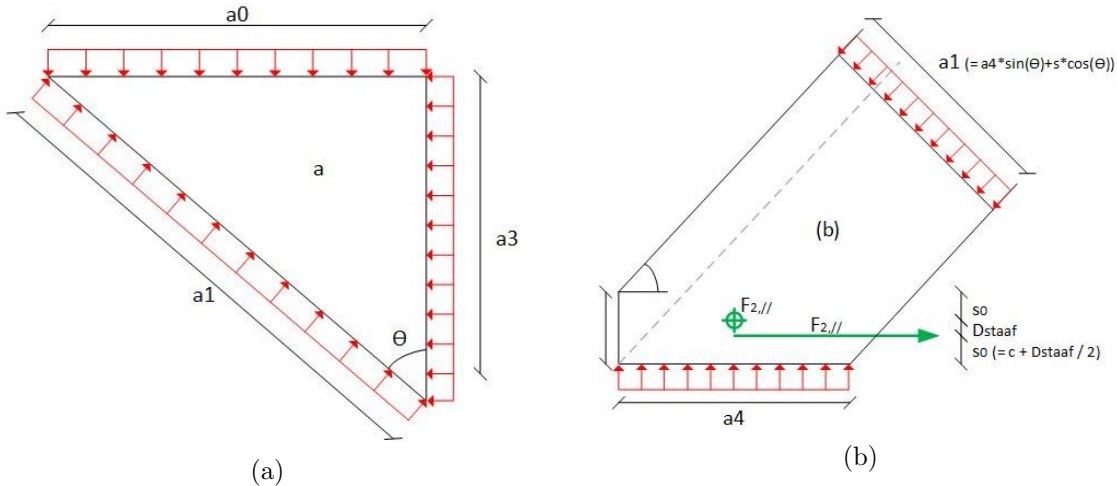
$$\begin{aligned}
a_0 &= 0.5 \cdot D_k \text{ en } F_0 = 0.25 \cdot F_{Ed,k} \\
a_3 &= a_0 / \tan(\theta) \text{ en } F_3 = F_0 / \tan(\theta) \\
a_{1,a} &= a_0 / \sin(\theta) \text{ en } F_1 = F_0 / \sin(\theta) \\
\sigma_{Ed,x} &= F_x / (a_x \cdot D_k)
\end{aligned}$$

Knoop a is een hydrostatische knoop, hierdoor zijn $\sigma_{Ed,0}$, $\sigma_{Ed,1}$ en $\sigma_{Ed,3}$ aan elkaar gelijk. De spanning in knoop a kan dus bepaald worden door alleen het uitrekenen van $\sigma_{Ed,0}$. Omdat de vier drukgebieden bovenin het staafwerk overlappen is de optredende drukspanning in het beton het dubbele van de berekende waarde van $\sigma_{Ed,0}$. Hierdoor komt het snel voor dat de drukspanning de toelaatbare drukspanning overschrijdt. Volgens EC2 art. 6.5.4(6) geldt echter voor triaxiaal belaste drukknopen dat de toelaatbare drukspanning mag worden verhoogd. Dit is toegepast in de berekening voor de poer.

Knoop B wordt berekend als een C-T-T-knoop volgens EC2 art. 6.5.4(4b). Deze berekening gaat uit van de aanwezigheid van één trekstang, hoewel er in werkelijkheid twee trekstangen zijn. De berekende kracht in deze stang zal vervolgens ontbonden worden in twee gelijke orthogonale componenten ($F_{2, //}$). De berekening van de verschillende componenten in knoop b is als volgt:

$$\begin{aligned}
\sigma_{Ed,4} &= F_4 / (a_4 \cdot b_4) = 0.25 \cdot F_{Ed,k} / (D_p \cdot D_p) \\
\sigma_{Ed,1b} &= F_{1,b} / (a_{1,b} \cdot b_{1,b}) = (F_0 / \sin(\theta)) / ((a_4 \cdot \sin(\theta) + s \cdot \cos(\theta)) \cdot (D_p + s)) \\
\text{met } s &= 2 \cdot (c + D_{staaf}) + D_{staaf} \\
F_{2, //} &= F_2 / \sqrt{2} = \sqrt{F_1^2 - F_4^2} / \sqrt{2}
\end{aligned}$$

De hoogte van de drukdiagonaal wordt vergroot met s, dit is om rekening te houden met uitwaaiing van drukspanning.



Figuur 1.5: Krachtwerking in knoop a en knoop b

De maatgevende spanning drukschoor (1) is automatisch berekend in de berekening bij knooppunt a, deze is gelijk aan $\sigma_{Ed,1a}$. Dus rest alleen nog de controle voor de trekstang (2). De trekkrachten in staaf 2 worden volledig opgenomen door de wapening. De volgende vergelijkingen wordt gebruikt om de spanning en het benodigde wapeningsoppervlak te berekenen:

$$\sigma_{s,d} = F_{2, //} / A_s$$

$$A_{s, req} = F_{2, //} / (f_{sk} / \gamma_s)$$

De toetsing van de krachtwerking in de poer is onderdeel van de berekening die is uitgevoerd in de Python code, deze is te vinden in bijlage C. De poer wordt daarnaast ook getest op scheurwijdte, staafafstand en verankering. De gebruikte formules zijn afkomstig uit de eurocode en gebruikt met de hulp van het rekenvoorbeeld uit 'EC2 in de praktijk'.

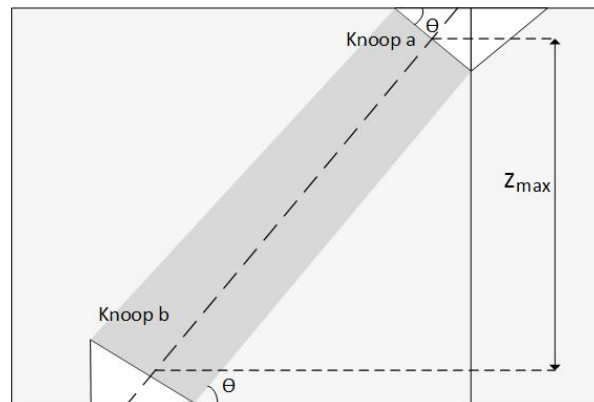
Naast de standaard toetsing van de berekening zijn er ook randvoorwaarden voor het ontwerp van de poer die in de berekening opgenomen moeten worden. De twee belangrijkste zijn de eis dat de poer een gedrongen constructie-element is en de eis dat het staafwerk in de hoogte van de poer past.

De eerste eis is een simpele controle. De eis waaraan de poer moet voldoen om als gedrongen ligger gedefinieerd te worden is de volgende:

$$l_{diagonaal} / h = < 3$$

De tweede eis ligt iets ingewikkelder. In figuur 1.6 is schematisch weergegeven wat wordt bedoeld met dat het hele staafwerk in de hoogte van de poer moet passen. Te zien is dat de drukschoor over de volledige doorsnede in de poer ingebed moet zijn. Dit heeft tot gevolg dat er een maximale waarde voor de inwendige hefboomsarm ontstaat bij een gegeven hoogte. De relatie waarop de poer getoetst moet worden is af te leiden uit figuur 1.5. De relatie is als volgt:

$$z_{max} = h - 0.5a_{1,a} \cos(\theta) - 0.5a_{1,b} \cos(\theta)$$



Figuur 1.6: z_{max} als gevolg van de eis dat de drukschoor in de poer moet passen

1.4.2 Symbolen

Variabelen

Grootheid	Eenheid	
G_k	kN	constante belasting
Q_k	kN	variabele belasting
L	mm	lengte poer
B	mm	breedte poer
h	mm	hoogte poer
z	mm	inwendige hefboomsarm
$h.o.h_{palen}$	mm	hart-op-hart afstand tussen de palen
$l_{diagonaal}$	mm	lengte diagonale trekstaaf 2
θ	<i>graden</i>	inwendige hoek staafwerk
D_p	mm	breedte funderingspaal
D_k	mm	breedte kolom
D_{staaf}	mm	staafdiameter van de hoofdwapening
$D_{verdeel}$	mm	staafdiameter van de verdeelwapening
n	-	aantal wapeningsstaven per trekstang
c	mm	betondekking
c_{nom}	mm	nominale dekking
$c_{min,dur}$	mm	minimaal benodigde dekking voor omgevingsfactoren
b	mm	breedte trekstang
a	mm	tussenafstand wapeningsstaven
d	mm	extra verankeringslengte na ombuiging
V_b	m^3	volume beton
m_s	kg	massa staal
F_x	kN	kracht op een drukvlak of in de trekstang (vb. zie fig. 1.5)
a_x	mm	breedte drukvlak (vb. zie fig. 1.5)
b_x	mm	lengte drukvlak
f_{ck}	N/mm^2	druksterkte beton
f_{ctm}	N/mm^2	treksterkte beton
E_{cm}	GPa	elasticiteitsmodulus beton
f_{sk}	N/mm^2	treksterkte staal
σ_{Ed}	N/mm^2	rekenwaarde spanning
σ_{Rd}	N/mm^2	toelaatbare spanning
$A_{s,req}$	mm^2	minimaal benodigde oppervlak wapeningsstaal
$A_{s,toe}$	mm^2	toegepast oppervlak wapeningsstaal
w_k	mm	optredende scheurwijdte
w_{max}	mm	maximale toegestane scheurwijdte
$l_{b,d}$	mm	basisverankeringslengte
l_v	mm	verankeringslengte

Constantes

Constante	Waarde	Eenheid
γ_K	1.2	-
γ_Q	1.5	-
γ_c	1.5	-
γ_s	1.15	-
α_{cc}	1	-
k_4	3	-
k_3	0.75	-
k_{s1}	0.8	-
k_{s2}	1	-
k_{s3}	3.4	-
k_{s4}	0.425	-
k_t	0.4	-
k_{1t}	1	-
k_{2t}	5	-
n_1	1	-
α_1	1	-
α_2	1	-
α_3	1	-
α_4	1	-
α_5	1	-
ρ_s	8000	kg/m^3
ρ_b	2500	kg/m^3

Hoofdstuk 2

Parameterstudie

In dit hoofdstuk wordt onderzoek gedaan naar de parameters die van belang kunnen zijn bij het optimaliseren van de kosten en duurzaamheid van een poer. Eerst worden de parameters een voor een behandeld om hun invloed in de berekening te achterhalen. Daarna wordt onderzocht hoe de kosten van een poer opgebouwd zijn en hoe de duurzaamheid van een poer bepaald kan worden. Vervolgens wordt er gekeken naar de invloed van de belangrijkste parameters op de kosten en duurzaamheid van de poer. Tot slot volgt een conclusie van de parameterstudie met betrekking tot de optimalisatie.

2.1 Wat zijn de belangrijkste parameters voor het ontwerpen van een poer?

In deze paragraaf wordt gekeken naar de variabelen in de berekening van de poer die de eigenschappen en prestaties van de poer beïnvloeden. Met het in kaart brengen van de variabelen kan in het vervolg van dit rapport gekeken worden naar hun invloed op de kosten en duurzaamheid van de poer. Variabelen die behandeld worden zijn de dekking, de hoogte, de betonsterkteklasse, de hart-op-hart afstand van de palen en de configuratie van de wapening. Met de hulp van de voorbeeldberekening [Betonvereniging, 2014] en toegepaste formules wordt voor de verschillende variabelen onderzocht wat hun invloed is in de berekening. Deze voorbeeldberekening is geautomatiseerd in de vorm van een Python script. Dit script is te vinden in bijlage C.

Bij het analyseren van de variabelen is gebruikt gemaakt van grafieken waarin de variabelen zijn uitgezet tegen uitkomsten van de berekening. voor deze grafieken wordt steeds één variabele gevarieerd, terwijl de rest is vastgezet op een basiswaarde. Deze basiswaarden zijn gebaseerd op de uitgangspunten van de voorbeeldberekening. De waarden waarop de variabelen zijn vastgezet zijn te vinden in bijlage F.

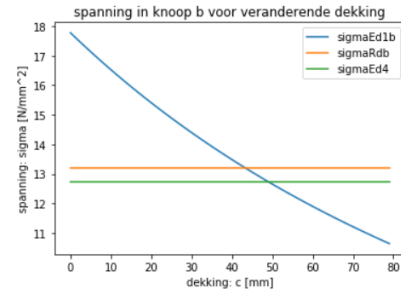
2.1.1 Parameters

Dekking

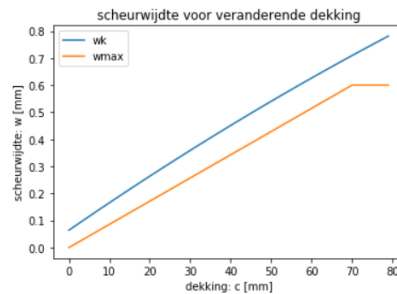
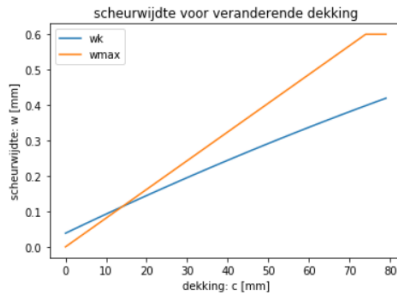
De dekking (c) van de poer is de dikte van de laag beton die de wapening bedekt. Het voornaamste doel van de dekking is het beschermen van de wapening tegen omgevingsinvloeden. De verhoging van de dekking kan echter ook constructieve voordelen met zich meebrengen. In figuur 1.5b in paragraaf 1.4.1 is te zien dat de doorsnede van de drukschoor groter wordt als de dekking toeneemt. Hierdoor neemt de optredende spanning in de drukschoor ($\sigma_{Ed,1b}$) af. De optredende spanningen ($\sigma_{Ed,1b}$ en $\sigma_{Ed,4}$) en de maximaal toelaatbare spanning ($\sigma_{Rd,b}$) zijn tegen elkaar uitgezet in figuur 2.1. Links in figuur 2.2 is te zien dat extra dekking ook kan zorgen voor een afname van de scheurwijdte (w_k) ten opzichte van de maximaal toegestane scheurwijdte (w_{max}). Dit geldt echter niet meer als er wapening met een kleinere staafdiameter wordt toegepast, zoals valt te zien rechts in figuur 2.2. Deze figuur suggereert dat de scheurwijdte bij een kleinere staafdiameter nooit zal voldoen, dit kan echter nog opgevangen door het variëren van andere parameters die voor deze grafiek zijn vastgezet.

Een verhoging van de dekking wordt bereikt door de wapening hoger in de poer aan te brengen en leidt dus niet direct tot een toename van het gebruikte materiaal. De minimale waarde van de dekking (c_{nom}) is voornamelijk afhankelijk van de diameter van de wapeningsstaven en de het milieu waarin de poer wordt gemaakt, de berekening van de nominale dekking is te vinden in bijlage C. Er is ook een maximale waarde voor de dekking waarbij de gunstige invloed nog in rekening mag worden gebracht, deze waarde bedraagt twee keer de diameter van de wapeningsstaven.

De dekking heeft dus geen groot bereik, hierdoor is de invloed op de uiteindelijke configuratie van de poer klein. Daarbij heeft het variëren van de dekking, voornamelijk bij kleinere staafdiameters, niet altijd een eenduidig positief resultaat. Om deze redenen wordt ervoor gekozen om de dekking niet mee te nemen in de optimalisatie, maar deze vooraf te bepalen. In de praktijk is het gebruikelijk om een dekking van 50 mm toe te passen bij poeren. Daarom wordt de dekking in de berekening vastgezet op een waarde van 50 mm.



Figuur 2.1: Spanning in knoop b uitgezet tegen de dekking



Figuur 2.2: Dekking uitgezet tegen de scheurwijdte; l: $D_{staa} = 32mm$, r: $D_{staa} = 25mm$

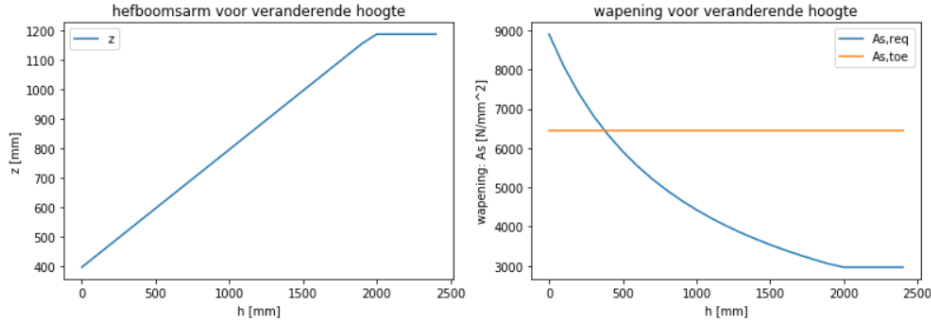
Hoogte

Een toename van de hoogte leidt tot verschillende veranderingen in de uitkomst van de berekening en tot een directe verandering van het betonvolume. Daarbij leidt het veranderen van de hoogte (h) van de poer tot een verandering van de inwendige hefboomsarm (z) en de inwendige hoek van het staafwerk(θ). Daarmee beïnvloedt het de krachtwerking in de poer. De hefboomsarm wordt volgens de volgende formule berekend:

$$z = \min(0.2l_{diagonaal} + 0.4h ; 0.6l_{diagonaal}) \quad \text{met} \quad l_{diagonaal} = \sqrt{2 \cdot h \cdot o \cdot h_{palen}^2}$$

Het verband tussen de hoogte en de hefboomsarm is links in figuur 2.3 te zien. De maximale waarde van de hefboomsarm die te bereiken is met een verhoging van de poer is gelijk aan $0.6l_{diagonaal}$.

Een verandering van de hoogte leidt tot een omgekeerde verandering van het benodigde wapeningsoppervlak ($A_{s,req}$), dit verband is rechts in figuur 2.3 gevisualiseerd aan de hand van de voorbeelberekening in het Python script (zie bijlage C). Daarnaast leidt het tot een afname van de spanning in knoop b en de scheurwijdte. De drukspanning in knoop a verandert echter niet met het veranderen van de hefboomsarm, omdat zowel a_1 als F_1 in gelijke mate afhankelijk zijn van θ (zie paragraaf 1.4.1).



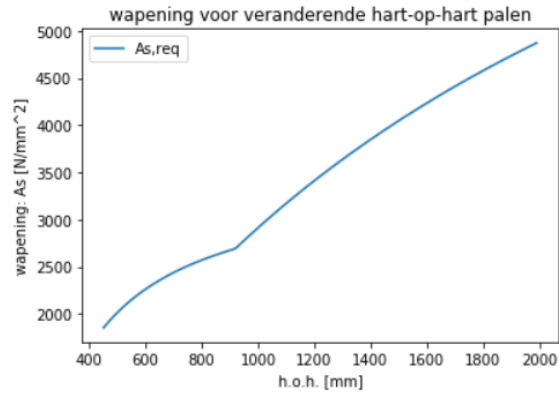
Figuur 2.3: Hefboomsarm en benodigde wapening uitgezet tegen de hoogte van de poer

Een toename van de hoogte van de poer leidt er dus toe dat de spanningen in knoop b kleiner worden en dat de scheurwijdte afneemt. Een grotere hoogte geeft echter ook direct een verandering in het betonvolume. Daarnaast is vooral het afnemen van de benodigde wapening bij een grotere hoogte interessant. Dit geeft namelijk een directe wisselwerking tussen het toepassen van ofwel meer beton ofwel meer staal. Deze keuze zal verder onderzocht worden in paragraaf 2.4.

Als laatste is er naar aanleiding van de berekening van de hefboomsarm nog een kanttekening te plaatsen, de grootte van de hefboomsarm wordt namelijk mede bepaald door de hart-op-hart afstand van de funderingspalen. Het kan dus zijn dat dat een grotere hart-op-hart afstand gunstiger is dan het verhogen van de poer, dit zal hierna onderzocht worden.

Hart-op-hart afstand palen

De hart-op-hart afstand van de palen ($h.o.h_{palen}$) is de afstand tussen de hartlijnen van de funderingspalen. Een toename van de hart-op-hart afstand van de palen resulteert in een directe toename van de lengte en breedte van de poer. Uit de berekening blijkt daarnaast dat, hoewel de hefboomsarm toeneemt bij een toenemende hart-op-hart afstand, de benodigde wapening en de spanningen in het beton ook toenemen. In figuur 2.4 is de relatie tussen de hart-op-hart afstand en de benodigde wapening weergegeven. Aangezien zowel een toenemende hart-op-hart afstand als een toename van de benodigde wapening een toename in materiaal betekent is het aan te raden de hart-op-hart afstand van de palen zo klein mogelijk te kiezen. Er geldt een minimum afstand tussen de palen, dit omdat ze anders in elkaars invloedsgebied komen te staan. Volgens EC2 art. 5.1.2(5) mag de interactie tussen verschillende palen genegeerd worden als de vrije ruimte tussen de palen meer dan twee keer de paaldiameter bedraagt. Dit zorgt ervoor dat de hart-op-hart afstand tussen de palen meer dan drie keer de paaldiameter moet zijn. Er wordt voor dit project een hart-op-hart afstand tussen de palen gekozen van drie maal de paaldiameter plus een marge van 50 mm ($h.o.h_{palen} = 3 \cdot D_p + 50$). Op deze manier komt de hart-op-hart afstand bij een paaldiameter van 450 mm overeen met de voorbeeldberekening. Hierdoor is het resultaat van de optimalisatie goed te vergelijken met de voorbeeldsituatie. Deze parameter wordt verder niet meegenomen in de optimalisatie.



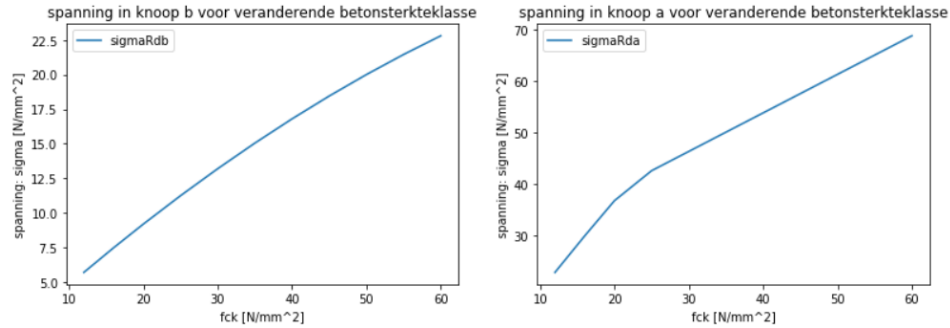
Figuur 2.4: Benodigde wapening uitgezet tegen de hart-op-hart afstand van de palen

Betonsterkteklasse

De betonsterkteklasse duidt op de sterkte van het toegepaste beton. Van de betonsterkteklasse zijn meerdere variabelen voor het beton af te leiden, drie van deze variabelen zijn relevant voor de berekening van de poer, dit zijn f_{ck} , f_{ctm} en E_{cm} . Een keuze voor een hogere sterkteklasse kan een benodigde toename van het betonvolume beperken, het is echter wel zo dat een hogere sterkteklasse duurder zou kunnen zijn en misschien meer belastend is voor het milieu. Deze verhouding zal onderzocht worden in paragraaf 2.2 en 2.3.

Een hogere betonsterkteklasse zorgt ervoor dat de maximaal toegestane spanningen (σ_{Rd}) in de drukknopen toeneemt, zie figuur 2.5. Daarnaast zorgt het er ook voor dat de optredende scheurwijdte kleiner wordt. Omdat de hoogte geen invloed heeft op de spanningen in knoop a, is de betonsterkteklasse hier interessant. Mocht de spanning in knoop a niet voldoen, dan is het verhogen van de betonsterkteklasse de enige optie om dit te compenseren. Waar een grotere hoogte de krachten in knoop b reduceert heeft de betonsterkteklasse een positief effect op de sterkte van de poer, daarmee heeft het dezelfde toepassing. Het verhogen van de betonsterkteklasse heeft echter geen invloed op de benodigde hoeveelheid wapening. Dit

is omdat de wapening de volledige trekkracht onderin de poer opneemt. En aangezien de sterkteklasse geen invloed heeft op optredende spanningen bij gedrongen constructie-elementen heeft deze ook geen invloed op de toe te passen wapening. De belangrijkste vraag bij de betonsterkteklasse gaat daarom over de verhouding tussen de hoogte van de poer en de gekozen sterkteklasse. In de volgende hoofdstukken zal onderzocht worden of er een optimum te vinden is in deze verhouding.



Figuur 2.5: Maximaal toegestane spanningen in knoop a en b uitgezet tegen de betonsterkteklasse

Wapening

De wapening heeft verschillende aspecten. Dit zijn de doorsnede van de hoofdwapening, de plaatsing van de hoofdwapening, de verankering en het toepassen van overige wapening. De staafdiameter (D_{staaf}) en het aantal wapeningsstaven per trekstang (n) vormen samen de doorsnede van de toegepaste hoofdwapening ($A_{s,toe}$). De breedte van de treksstang (b) en de tussenstaafafstand (a) die daarmee samenhangt bepalen de plaatsing van de wapeningsstaven. De lengte van de wapening voorbij de hartlijn van de funderingspaal is de verankeringslengte (l_v). En als laatste worden flankwapening en boven- en onderwapening toegepast in de poer, deze overige wapening zorgt voor opsluiting van het beton en voor het tegengaan van uitpuilen van het beton.

De doorsnede van de wapening wordt bepaald door de diameter van de staven en het aantal staven in een trekstang. Een grotere staafdiameter en een groter aantal staven zorgt voor een grotere hoeveelheid toegepaste wapening en dus ook tot een directe toename van de hoeveelheid staal. Door een toename van de doorsnede van de wapening worden bij een gelijkblijvende kracht op de poer de spanningen in de trekstang lager. Een toename van de staafdiameter zorgt er daarnaast ook nog voor dat de spanningen in knoop b afnemen. Hier is een combinatie te vinden met andere variabelen. Bij onvoldoende sterkte in knoop b of in staaf 2 moet hier dus een keuze gemaakt worden tussen het verhogen van de staafdiameter, en dus meer staal, of bijvoorbeeld het vergroten van de hoogte van de poer, en dus het toepassen van meer beton. Voor de scheurwijdte geldt dat een toename van de doorsnede van het wapeningsstaal gunstig is voor de scheurwijdte, mits dit wordt bereikt een toename van het aantal staven en niet door een toename van de staafdiameter. Een groter aantal staven zorgt namelijk voor een kleinere staafafstand.

De breedte van de trekstang heeft vooral gevolgen voor de hoeveelheid verankering en overige wapening. Het verdient voorkeur om de breedte van de trekstang klein te houden, als de trekstang breder wordt zullen er meer staven buiten de funderingspalen komen te liggen, en dat vraagt om extra verankering en verdeelwapening. Daarnaast zal de benodigde hoeveelheid overige wapening toenemen naarmate de trekstang breder wordt. Voor de breedte van de trekstang kan een vaste waarde worden gekozen, de waarde die hiervoor wordt gekozen is: $b = D_p + 2 * 175mm$. De verankeringslengte na de ombuiging wordt om praktische redenen op een vaste waarde gekozen ($d = 400mm$).

2.1.2 Conclusie

Uit dit hoofdstuk blijkt dat er een aantal belangrijke parameters zijn die invloed hebben op de prestatie van de poer. Deze variabelen zijn relevant voor de optimalisatie om ze elkaar beïnvloeden. Een toename van de toepassing van een variabele kan leiden tot een afname van de benodigde toepassing van een andere variabele, dit geeft de mogelijkheid voor afwegingen tussen het toepassen van beton en staal. In de volgende hoofdstukken zullen de gevolgen van deze keuzes voor kosten en duurzaamheid onderzocht worden. De parameters die belangrijk zijn voor het vervolg van de optimalisatie zijn de volgende:

- Hoogte (h): De hoogte van de poer is de belangrijkste variabele. De hoogte heeft een interactie met alle drie de andere variabelen. Vooral de relatie met benodigde wapening is interessant, omdat deze een directe afweging tussen het toepassen van beton en staal geeft.
- Betonsterkteklasse: De betonsterkteklasse is interessant omdat het invloed heeft op de maximaal toegestane belasting. Een toename van de toegestane spanning zorgt ervoor dat de hoogte van de poer beperkt kan worden. De betonsterkteklasse heeft geen invloed op de benodigde wapening. Hoewel een hogere betonsterkteklasse kan leiden tot een reductie van het betonvolume, kan het ook leiden tot hogere kosten en milieubelasting.
- Staafdiameter (D_{staaf}): Een toename van de staafdiameter leidt tot een afname van de spanning in knoop b. Daarmee zorgt het voor een reductie van benodigde hoogte. Daarnaast heeft een toename van de staafdiameter als gevolg dat er een grotere spanning kan worden opgenomen onderin de poer. Een grotere staafdiameter leidt vanzelfsprekend tot een toename van de massa van het gebruikte staal.
- Aantal wapeningsstaven (n): Een toename van het aantal wapeningsstaven in een trekstang zorgt er samen met de staafdiameter voor dat de doorsnede van de hoofdwapening toeneemt. Daarmee reduceert het de benodigde hoogte van de poer. Het aantal wapeningsstaven heeft geen gevolgen voor de drukspanningen in knoop b. Een toename van het aantal wapeningsstaven heeft echter wel een positieve invloed op de scheurwijdte.

2.2 Hoe zijn de kosten van een poer opgebouwd?

In deze paragraaf wordt onderzoek gedaan naar de kostenbepalende factoren van de poer. Eerst wordt gekeken hoe de kosten van een poer zijn opgebouwd. Hiermee kan vervolgens in paragraaf 2.4 onderzocht worden hoe de variabelen de kosten van de poer beïnvloeden.

Allereerst wordt er gekeken naar de opbouw van de kosten. Een berekening van de directe kosten van een poer wordt gedaan met de hulp van een rekentool die wordt getoond in bijlage A [ABT, 2016]. In deze berekening zijn de kosten van de poer afhankelijk van de afmetingen van het beton en de massa van het toegepaste wapeningsstaal.

Volgens deze berekening bedragen de kosten voor wapeningsstaal 1.49 euro per kilo. De rest van de kosten zijn afhankelijk van het betonvolume. Het berekenen van de kosten van het beton is iets uitgebreider want de kosten voor voorbereiding en arbeid moeten hierin meegenomen worden. Ook de kosten voor arbeid en voorbereiding zijn afhankelijk van de afmetingen van de poer. Het grootste deel van de kosten voor het beton bestaat uit de kosten voor de randkist en het volume van het gebruikte beton. De kosten voor het beton inclusief voorbereiding en arbeid worden voor dit onderzoek aangehouden op 250 euro per kubieke meter.

Omdat elk project anders is en er eindeloos gevarieerd kan worden met de betonmix kunnen de kosten tijdens een project preciezer berekend worden. Om deze reden worden de kosten per kilo staal en per kubieke meter beton invoer waarden in de optimalisatie.

De kosten variëren ook voor verschillende betonsterkteklassen. Betonverwerker mebin heeft een prijslijst waarin de prijs geleidelijk toeneemt met de betonsterkteklasse [Mebin, 2019]. Voor de veelvoorkomende betonsterktes geldt dat de prijs van het beton per kubieke meter met enkele euro's toeneemt naarmate de betonkwaliteit toeneemt. Deze toename is te klein om veel invloed uit te oefenen op de uiteindelijke kostprijs van 250 euro per kubieke meter. Daarom is besloten de betonsterkteklasse niet mee te nemen in de optimalisatie. Het kan echter voorkomen dat de poer onder geen enkele omstandigheid voldoet, omdat de funderingspalen te smal zijn. In dat geval wordt geadviseerd om een hogere betonsterkteklasse te kiezen. De hogere kosten als gevolg van een toenemende betonsterkteklasse kunnen eventueel doorberekend worden in de waarde voor de kosten van het beton.

2.3 Hoe wordt de duurzaamheid van een poer berekend?

In deze paragraaf wordt onderzoek gedaan naar de berekening van de duurzaamheid van een poer. Eerst wordt onderzocht hoe de duurzaamheid van een poer gequantificeerd kan worden. Vervolgens wordt gekeken hoe de milieubelasting van een poer is opgebouwd. Hiermee kan uiteindelijk onderzocht worden hoe de variabelen de duurzaamheid van een poer beïnvloeden.

Bij het bepalen van de milieubelasting van een constructie-element wordt vaak gebruik gemaakt van de equivalente CO_2 uitstoot. In het engels wordt dit 'embodied carbon' genoemd. Het gaat hierbij om de uitstoot die wordt toegeschreven aan de grondstofwinning, de constructie, het transport en het gebruik van het element [Cao, 2017]. De equivalente CO_2 uitstoot wordt uitgedrukt in de eenheid $kgCO_2e$, de uitstoot van één $kgCO_2e$ is de uitstoot van stoffen die een milieubelasting opleveren die gelijk is aan de milieubelasting van de uitstoot van één kilo CO_2 .

De milieubelasting van een constructie of constructie-element wordt doorgaans berekend door de hoeveelheid materiaal te vermenigvuldigen met een zogenaamde 'koolstof factor' [Orr et al., 2020].

$$Embodied\ carbon = quantity\ [kg] \cdot carbon\ factor\ [kgCO_2e/kg]$$

Evenals bij de kosten geldt dus bij de duurzaamheid dat de milieubelasting van een poer valt te bepalen op basis van de gebruikte materialen. In dit geval gaat het dus om het toegepaste betonvolume en de massa van het gebruikte staal. Dan is het nog nodig om de waarde van de koolstof factoren van het beton en staal te bepalen. Dit is echter niet eenvoudig, de koolstof factoren zijn op hun beurt namelijk ook afhankelijk van meerdere factoren.

Voor staal is de koolstof factor van nieuw materiaal goed onderzocht. Deze waarde bedraagt $2.8\ kgCO_2e/kg$ [Purnell, 2015]. De variatie voor staal zit hem echter in de graad van recycleren van het materiaal. In wapeningsstaven is het percentage gerecycled materiaal doorgaans hoog (90/100%). Gerecycled staal heeft een koolstof factor van $0.43\ kgCO_2e/kg$ [Purnell, 2015]. Uitgaande van een recycle graad van 90% komt dit op een koolstof factor van:

$$0.9 \cdot 0.43 + 0.1 \cdot 2.8 = 0.667\ kgCO_2e/kg$$

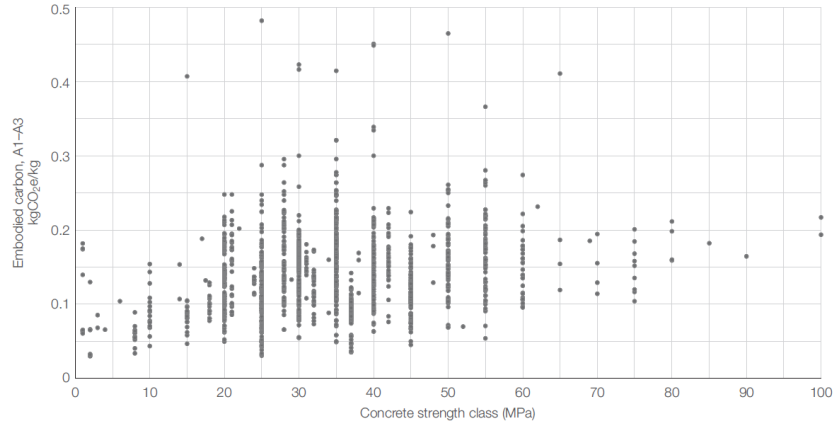
[Orr et al., 2020] noemen een gemiddelde waarde van $0.684\ kgCO_2e/kg$ voor wapeningsstaven. Dit is een klein verschil van ongeveer 2.5%. In de berekening wordt daarom het gemiddelde van deze twee genomen en wordt een koolstof factor van $0.675\ kgCO_2e/kg$ gebruikt.

Voor beton ligt het bepalen van de koolstof factor nog ingewikkelder. De factor is afhankelijk van meerdere aspecten, waaronder de betonsterkteklasse, de samenstelling van de mix en daarin met name het gebruik van cement. Voor het samenstellen van een betonmix zijn heel veel mogelijkheden. Het kiezen van een vaste waarde voor de milieubelasting van het beton leidt tot een grove oversimplificatie [Purnell, 2015]. Om deze reden moet de koolstof factor van het gebruikte beton per keer bepaald worden. Hiervoor zijn meerdere onderzoeken en tabellen met indicaties beschikbaar.

Voor de optimalisatie in dit project wordt de koolstof factor bepaald voor gemiddeld beton met een sterkteklasse van C30/37. De gemiddelde koolstof factor voor kant en klaar gemixt beton met een sterkteklasse van C30/37 in het Verenigd Koninkrijk is $0.103\ kgCO_2e/kg$

[Orr et al., 2020]. Een afstudeeronderzoek naar 4-paals poeren gaat uit van een CO_2 voetafdruk van 5%-13% van het totale gewicht van het beton voor beton met een druksterkte van 30 MPa [Asefa, 2020]. Dit komt neer op een factor van $0.05 - 0.13 \text{ kgCO}_2e/kg$.

Er is in dit geval dus een verband tussen de toepassing van een betonsterkteklasse en de milieubelasting van het beton. Dit verband is te zien in figuur 2.6 [Orr and Gibbons, 2020]. Hoewel de betonsterkteklasse dus invloed heeft op de milieubelasting is er geen duidelijk verband te bepalen. Hiervoor is de milieubelasting teveel afhankelijk van andere eigenschappen van de beton mix. Om deze reden wordt nogmaals vastgesteld dat het niet bevordelijk is om de betonsterkteklasse mee te nemen in de optimalisatie. Het is echter wel belangrijk om van tevoren te bepalen wat de milieubelasting van een betonsamenstelling is.



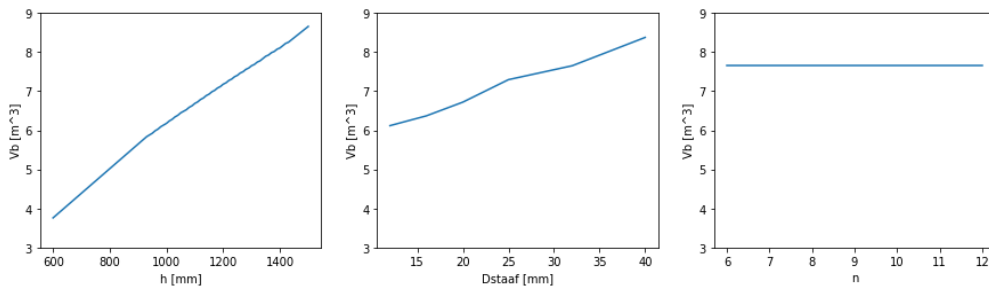
Figuur 2.6: Verband tussen sterkteklasse en milieubelasting [Orr and Gibbons, 2020]

Omdat de waarde van de koolstof factor nog meer afhankelijk is van de gebruikte materialen dan de kosten wordt ook de koolstof factor van het gebruikte materiaal een invoerwaarde in de optimalisatie. Deze waarde dienen berekend te worden alvorens de optimalisatie voor de poerconfiguratie uitgevoerd wordt.

2.4 Hoe beïnvloeden de parameters de kosten en de duurzaamheid van een poer?

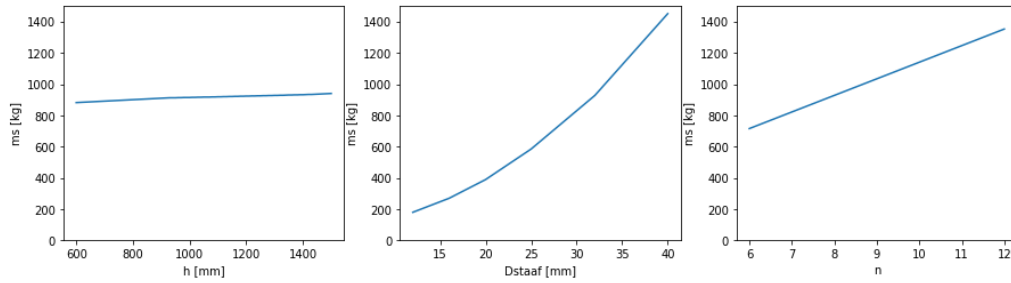
In deze paragraaf wordt de invloed van de verschillende parameters op de kosten en milieubelasting van de poer onderzocht. Omdat de kosten en milieubelasting afhankelijk zijn van het betonvolume en de massa van het wapeningsstaal, wordt het verband tussen de variabelen en de gebruikte materiaal onderzocht. Daarnaast wordt ook de directe relatie tussen de optimalisatievariabelen en de kosten en milieubelasting van de poer behandeld.

Het betonvolume lijkt op het eerste gezicht voornamelijk afhankelijk van de hoogte van de poer. Deze heeft immers een direct effect op de inhoud van de poer. De staafdiameter heeft echter ook een significante invloed op het volume. Een toenemende staafdiameter zorgt er namelijk voor dat er meer afstand nodig is na de palen om de wapening om te kunnen buigen en vergroot daarmee de lengte en breedte van de poer. Het aantal wapeningsstaven heeft geen invloed op het beton volume. Deze verbanden zijn zichtbaar in figuur 2.7. Voor deze figuren wordt steeds een van de optimalisatievariabelen gevarieerd, de andere twee variabelen worden gekozen op een vaste waarde. Deze waarden zijn respectievelijk, 1300 mm, 32 mm en 8. Hetzelfde is gedaan in de rest van deze paragraaf.



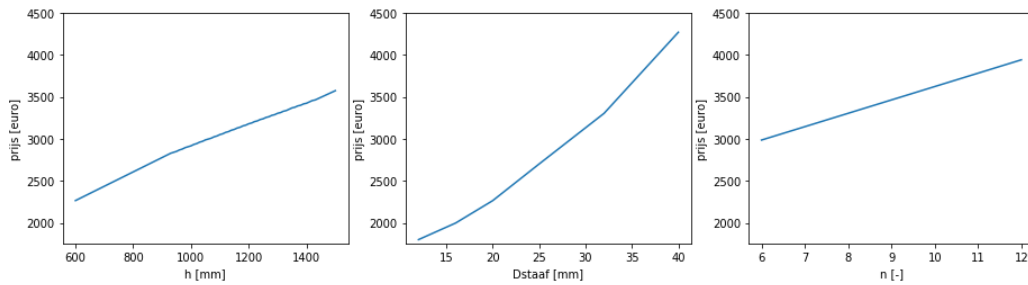
Figuur 2.7: Betonvolume voor variërende hoogte, staafdiameter en aantal staven

De massa van het wapeningsstaal wordt vanzelfsprekend bepaald door de hoeveelheid toegepaste wapening. Zowel de staafdiameter als het aantal staven hebben een direct effect op de totale hoeveelheid staal. Ook de bovenwapening is nog afhankelijk van de staafdiameter van de hoofdwapening en het aantal staven. Het verband tussen de staafdiameter en de massa van het wapeningsstaal is kwadratisch. Het aantal staven heeft een recht evenredig verband met de massa van het staal. De flank- en onderwapening zijn afhankelijk van de breedte van de trekstang, de trekstang wordt in principe zo smal mogelijk gekozen, maar het kan noodzakelijk deze groter te kiezen omwille van de staafafstand, in dit geval leidt een groter aantal staven tot een toename van de flank- en onderwapening. De hoogte van de poer heeft slechts een minimale invloed op de massa van het gebruikte staal. Deze verbanden zijn te zien in figuur 2.8.

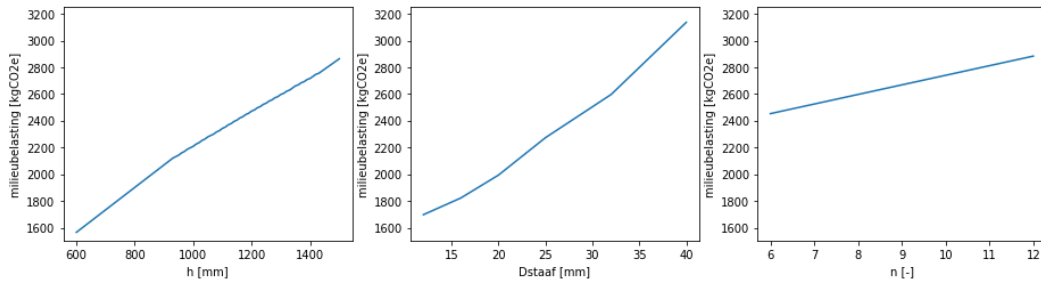


Figuur 2.8: Staalmassa voor variërende hoogte, staafdiameter en aantal staven

In figuur 2.9 en 2.10 zijn de variabelen uitgezet tegen respectievelijk de kosten en de milieubelasting. De hoogte en het aantal staven hebben een lineair verband met de kosten en duurzaamheid, net als bij het betonvolume en de staalmassa. De staafdiameter heeft een kwadratisch verband. Verder is opvallend dat de grafiek van de hoogte tegenover de milieubelasting steiler is dan de hoogte tegenover de kosten, terwijl de grafieken voor staafdiameter en het aantal staven nagenoeg gelijk zijn.



Figuur 2.9: Kosten voor variërende hoogte, staafdiameter en aantal staven



Figuur 2.10: Milieubelasting voor variërende hoogte, staafdiameter en aantal staven

2.5 Conclusie

Uit de parameterstudie volgt dat de hoogte(h), de staafdiameter(D_{staaf}) en het aantal staven(n) de meest interessante parameters zijn voor de optimalisatie. Deze variabelen hebben een onderlinge wisselwerking die ervoor zorgt dat er keuzes gemaakt kunnen worden tussen het toepassen van ofwel meer beton of een grotere hoeveelheid wapeningsstaal. Dit is relevant omdat de kosten en de milieubelasting van een poer wordt bepaald op basis van het toegepaste betonvolume en de massa van het wapeningsstaal. De vastgestelde waarden voor de kosten en duurzaamheid in dit project zijn als volgt:

- Kosten:
 - Beton: $Prijs = 250 \text{ euro}/m^3$
 - Staal: $Prijs = 1.49 \text{ euro}/kg$
- : Milieubelasting:
 - Beton: $Koolstof\ factor = 0.103 \text{ kgCO}_2\text{e}/kg$
 - Staal: $Koolstof\ factor = 0.675 \text{ kgCO}_2\text{e}/kg$

Voor de kosten en met name voor de koolstof factoren geldt dat deze waarden zijn gekozen omdat ze bij deze specifieke poer en belastingsituatie passen. Als er speciale betonsoorten of andere samenstellingen van het beton worden gebruikt zullen deze waarden eerst voor die specifieke situatie bepaald moeten worden. Om deze reden zullen de materiaalkosten en de koolstof factoren ook als invoer in de optimalisatie geprogrammeerd worden.

Andere variabelen bleken minder geschikt voor een optimalisatie, deze factoren zijn vastgesteld op een vaste waarde of een waarde die direct afhankelijk is van de belastingsituatie of optimalisatievariabelen. De betonsterkteklasse verdient hier nog speciale aandacht. De reden om deze niet mee te nemen in de optimalisatie is de geringe invloed op de kosten en het ontbreken van een rechtstreeks verband bij de duurzaamheid. De standaard betonsterkteklasse die wordt gebruikt in de optimalisatie is C30/37. Mocht het voorkomen dat het beton onder geen enkele variatie voldoet bij een gegeven belastingsituatie dan zal dit opgelost moeten worden door de betonsterkteklasse te verhogen.

Hoofdstuk 3

Optimalisatie

In dit hoofdstuk wordt het optimalisatieproces besproken. Eerst zal de optimalisatietool besproken worden. Daarna zullen de resultaten van de optimalisatie gepresenteerd worden en toegelicht worden. De verklaring van de resultaten volgt in Hoofdstuk 4.

3.1 De tool

De tool is gemaakt in de vorm van een Python script. Dit script bestaat uit 3 delen. Het eerste deel is de berekening van een poer, deze berekening is uitgevoerd volgens de staafwerkmethode en is te vinden in bijlage C. Bij het opstellen van de berekening is de voorbeeldberekening gebruikt [Betonvereniging, 2014], in bijlage F is de uitkomst van de berekening vergeleken met de getallen uit het rekenvoorbeeld. Het tweede deel van het script is de optimalisatie, hoe deze in elkaar zit wordt in het vervolg van deze paragraaf uitgelegd, het script van de optimalisatie is te vinden in bijlage D. Het derde deel van het script is de daadwerkelijke tool waarmee de optimalisatie uitgevoerd kan worden. De berekening en de optimalisatie worden in dit script aangeroepen. Hierin kan vervolgens de input gegeven worden en wordt er een resultaat gegenereerd. Dit script is te vinden in bijlage B.

De input in dit Python script bestaat uit een gegeven belastingsituatie, de gekozen betonsterkteklasse en de kosten en koolstof factoren van de materialen. Daarnaast gebruikt de functie nog een aantal zogenoemde 'keyword arguments'. Dit zijn variabelen die niet uit een berekening volgen maar ook niet geoptimaliseerd worden met de hulp van de tool. Deze waarden worden vastgezet in de optimalisatie. De waarden van deze variabelen staan in tabel 3.1.

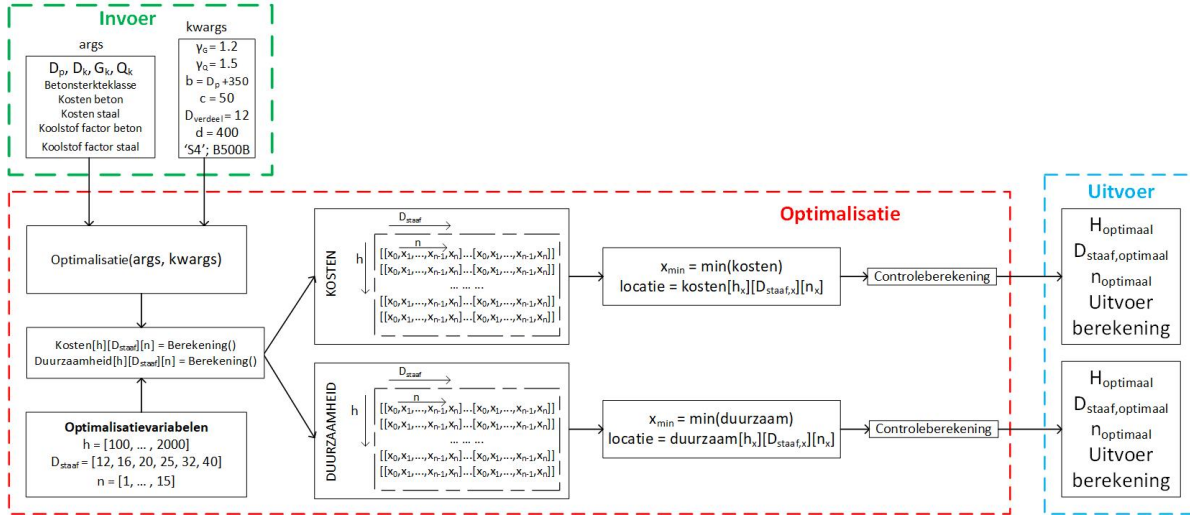
γ_G	γ_Q	Staalklasse	$D_{verdeel}$	d	Constructieklasse	b	c
1.2	1.5	B500B	12 mm	400 mm	S4	$D_p + 350 \text{ mm}$	50 mm

Tabel 3.1: Variabelen die vastgezet worden voor de optimalisatie

De uitgangspositie van de optimalisatie is de berekening van de poer. In de berekening wordt het betonvolume van de poer en de massa van het toegepaste wapeningsstaal berekend.

Aan de hand van deze waarden worden de kosten en de milieubelasting van de poer berekend. Deze berekening wordt ook aangeroepen tijdens de optimalisatie. Voor de optimalisatie worden de optimalisatievariabelen gevarieerd. De optimalisatievariabelen zijn de hoogte, de staafdiameter en het aantal staven per trekband.

In het script wordt een loop opgezet, hierin wordt voor elke combinatie van de optimalisatievariabelen berekend of de poer in die configuratie voldoet en wat de kosten en milieubelasting van de betreffende poerconfiguratie is. Mocht de poer niet voldoen dan is het resultaat van de berekening 'NaN'. Dit resulteert in twee lijsten met daarin de kosten en milieubelasting van alle poerconfiguraties die voldoen volgens de eurocode, de eerste lijst bevat de kosten en de tweede lijst is gevuld met waarden voor de duurzaamheid. In de volgende stap wordt de minimale waarde uit die lijst gezocht. Daarbij wordt ook de locatie van dat minimum bepaald, met de bijbehorende optimalisatievariabelen. De output van de optimalisatie bestaat daarmee uit twee sets van vier resultaten. De eerste set bestaat uit de optimale poerconfiguratie voor de kosten en de tweede set is de optimale poerconfiguratie voor de duurzaamheid. Beide sets bevatten de uitvoer van de controleberekening van de poer en daarbij de combinatie van hoogte, staafdiameter en aantal staven waaruit deze configuratie bestaat. De resultaten van de optimalisatie en de uitkomst van de controleberekening worden geprint in het Python script. Het optimalisatieproces is schematisch weergegeven in figuur 3.1.



Figuur 3.1: Schematische weergave van optimalisatieproces

3.2 Resultaten

In deze paragraaf worden de resultaten van de optimalisatie besproken. Eerst worden de resultaten van de optimalisatie vergeleken met de uitkomst van de voorbeeldberekening. Vervolgens zullen de resultaten van de optimalisatie voor verschillende belastingen bekeken worden.

Vergelijking optimalisatie met voorbeeldberekening

Om te onderzoeken of de optimalisatie daadwerkelijk voordelig is ten opzichte van de voorbeeldberekening is het nodig om de resultaten van de optimalisatie vergelijken met de poerconfiguratie die resulteert uit de voorbeeldberekening. De belastingsituatie uit de voorbeeldberekening is te zien in tabel 3.2. In de voorbeeldberekening is uiteindelijk een hoogte van 1300 mm gekozen en voor de wapening is een staafdiameter van 32 mm gekozen en zijn er 8 staven per trekband toegepast. De resultaten voor het materiaalgebruik, de kosten en de milieubelasting van een poer die volgen uit de berekening zijn opgenomen in tabel 3.3.

Belastingsituatie		Materiaal	
Parameter	Waarde	Parameter	waarde
D_p	450 mm	Betonsterkte	C30/37
D_k	600 mm	Kosten beton	250 euro/m ³
G_k	5600 kN	Kosten staal	1.5 euro/kg
Q_k	2400 kN	Koolstof factor beton	0.103 kgCO _{2e}
		Koolstof factor staal	0.675 kgCO _{2e}

Tabel 3.2: Belastingsituatie uit voorbeeldberekening

Vervolgens wordt de optimalisatie uitgevoerd voor de belastingsituatie uit tabel 3.2. Deze resultaten zijn eveneens opgenomen in tabel 3.3. De waarden zijn direct afkomstig uit het Python script. De complete uitvoer van de optimalisatie, inclusief de uitkomst van de controleberekening, is te zien in bijlage E.

Wat opvalt is dat de uitkomst van de optimalisatie op kosten gelijk is aan de uitkomst van de optimalisatie op duurzaamheid. De optimalisatie geeft een poerconfiguratie met een grotere hoogte, een kleinere staafdiameter en een toename van het aantal wapeningsstaven per trekband. Het betonvolume is iets lager en de massa van het toegepaste wapeningsstaal is relatief sterk afgenomen. Dit leidt tot een reductie van de kosten van 339 euro en een reductie van de milieubelasting van 160 kgCO_{2e} ten opzichte van de poer uit de voorbeeldberekening, dit zijn afnames van respectievelijk 9.8% en 5.9%.

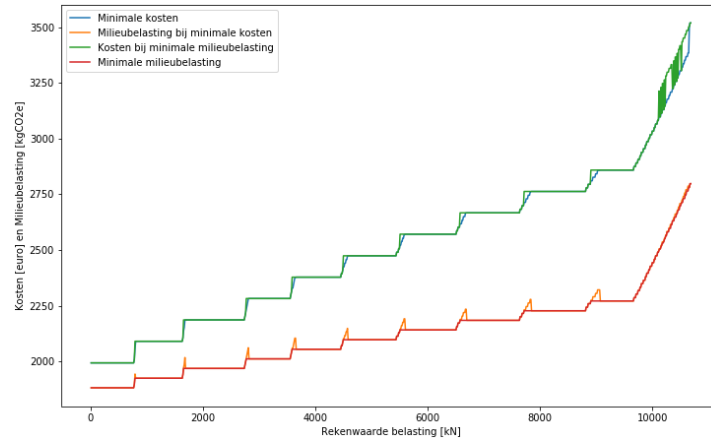
	h mm	D_{staaf} mm	n -	V_b m ³	m_s kg	Kosten euro	Milieubelasting kgCO _{2e}
Voorbeeldberekening	1300	32	8	8.125	947	3452	2732
Goedkoopste	1380	25	10	8.075	729	3113	2572
Duurzaamste	1380	25	10	8.075	729	3113	2572

Tabel 3.3: Uitkomst van de optimalisatie bij de voorbeeldbelasting

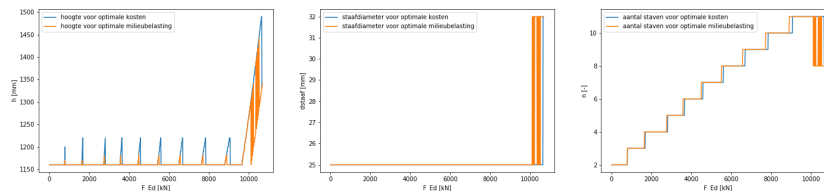
Verschillende belastingen

Om een beter beeld te krijgen van de uitkomst van de optimalisatie bij verschillende belastingssituaties zijn er grafieken geplot met de uitkomst van de optimalisatie van de poer bij verschillende belastingen. Deze grafiek is te zien in figuur 3.2. De bijbehorende waarden voor de hoogte, staafdiameter en het aantal staven zijn te zien in figuur 3.3. Op de verticale as van de grafiek in figuur 3.2 zijn de kosten en milieubelasting uitgezet, op de horizontale as staat de rekenwaarde van de bovenbelasting. In de figuur zijn vier lijnen geplot. Twee lijnen zijn de resultaten de kosten en de milieubelasting bij verschillende belastingen voor de optimale kosten. De twee resterende lijnen zijn de kosten en milieubelasting die resulteren uit de duurzaamheidsoptimalisatie.

Het eerste dat opvalt aan de grafieken is dat niet voor elke belastingssituatie geldt dat de goedkoopste en duurzaamste configuratie hetzelfde zijn. In het begin gaan de kosten en milieubelasting stapsgewijs omhoog, bij elk stapje wijken de goedkoopste en duurzaamste configuratie even uit elkaar om daarna weer samen te komen. Bij hogere belastingen valt te zien dat de verschillen bij deze sprongetjes groter worden. Bij belastingen die de maximale belasting naderen valt op dat de duurzaamste optie verspringt tussen een staafdiameter van 32 mm in combinatie met een kleinere hoogte en de configuratie van de kostenoptimalisatie met een grotere hoogte en een staafdiameter van 25 mm. In figuur 3.3 is te zien dat in eerste instantie voornamelijk het aantal staven toeneemt, terwijl de hoogte en staafdiameter lang nagenoeg gelijk blijven.



Figuur 3.2: Optimalisatie: C30/37, $D_p = 450mm$, $D_k = 600mm$



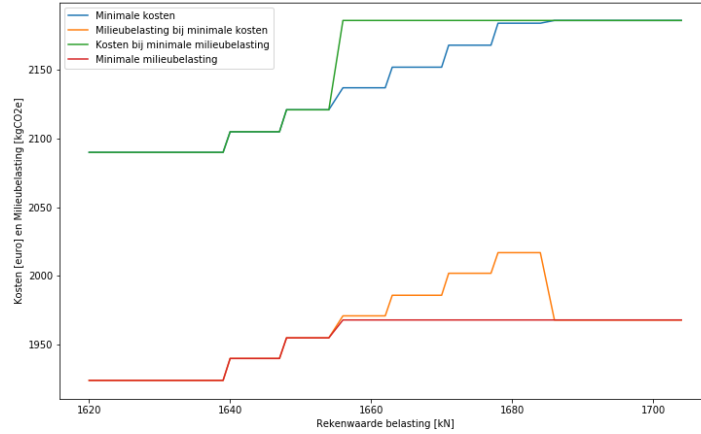
Figuur 3.3: Optimalisatie: C30/37, $D_p = 450mm$, $D_k = 600mm$

Sprong

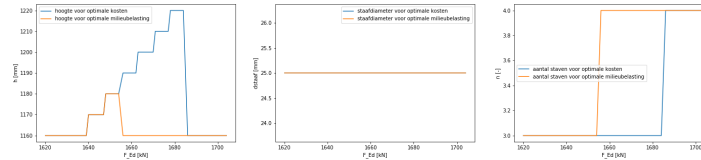
Om te zien wat er gebeurt Op het moment dat de goedkoopste en duurzaamste optie uit elkaar wijken bij een sprong wordt er gekeken naar de situatie bij een rekenwaarde van de belasting van 1620 tot 1692 kN. In tabel 3.4 zijn de uitkomsten van de optimalisatie in dit deel te zien. Te zien is dat voor de goedkoopste configuratie een toename van de hoogte langer wordt doorgezet en dat bij de duurzaamste configuratie het aantal staven eerder wordt verhoogd. De uitkomsten van de optimalisatie uit de tabel zijn geplot in figuur 3.4 en figuur 3.5. Hierin is te zien dat de duurzaamste en goedkoopste configuratie vóór en na de sprong gelijk zijn, maar in de omslag de duurzaamheid eerder overschakelt naar een groter aantal staven dan de kosten. Dit verschijnsel zal verklaard worden in de discussie.

$F_{E,d}$ kN	h [mm]	D_{staa} [mm]	n [-]	kosten [euro]	milieubelasting [kgCO ₂ e]	h [mm]	D_{staa} [mm]	n [-]	kosten [euro]	milieubelasting [kgCO ₂ e]
1620	1160	25	3	2090	1925	1160	25	3	2090	1925
1632	1160	25	3	2090	1925	1160	25	3	2090	1925
1644	1170	25	3	2106	1940	1170	25	3	2106	1940
1656	1190	25	3	2137	1971	1160	25	4	2186	1968
1668	1200	25	3	2153	1987	1160	25	4	2186	1968
1680	1220	25	3	2184	2018	1160	25	4	2186	1968
1692	1160	25	4	2186	1986	1160	25	4	2186	1968

Tabel 3.4: Uitkomst optimalisatie bij verschillende belastingen



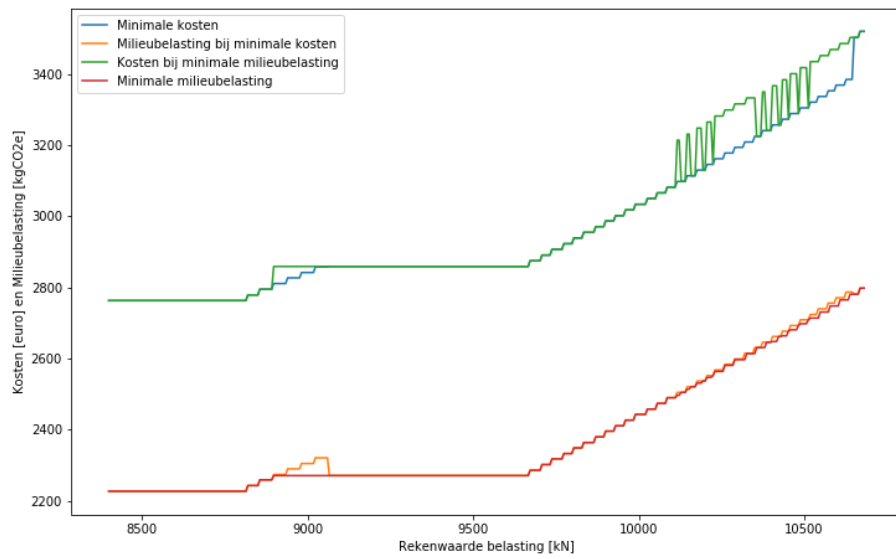
Figuur 3.4: Optimalisatie: C30/37, $D_p = 450mm$, $D_k = 600mm$, $F_{Ed} = 1620 - 1704kN$



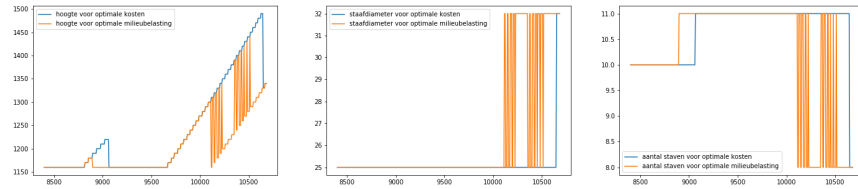
Figuur 3.5: Optimalisatie: C30/37, $D_p = 450mm$, $D_k = 600mm$, $F_{Ed} = 1620 - 1704kN$

Hoge belasting

Vervolgens is er nog de situatie bij hogere belastingen. In figuur 3.2 is te zien dat in de sprongen de goedkoopste en de duurzaamste optie verder uit elkaar komen te liggen bij belastingen die de dichterbij de maximale belasting liggen. Om dit te verduidelijken is er in figuur 3.6 ingezoomd op de hogere belastingen. In figuur 3.7 is te zien hoe de optimalisatievariabelen variëren. Er is te zien dat de hoogte in beide optimalisatie steeds groter wordt. Wat opvalt is dat de uitkomst van de duurzaamheidsopimalisatie afwisselt tussen grotere hoogte en een grotere staafdiameter. Helemaal richting de maximale belasting blijft de duurzaamste optie bij de staafdiameter van 32 mm, uiteindelijk voegt de goedkoopste optie zich hierbij.



Figuur 3.6: Optimalisatie: C30/37, $D_p = 450mm$, $D_k = 600mm$, $F_{Ed} \geq 8500kN$

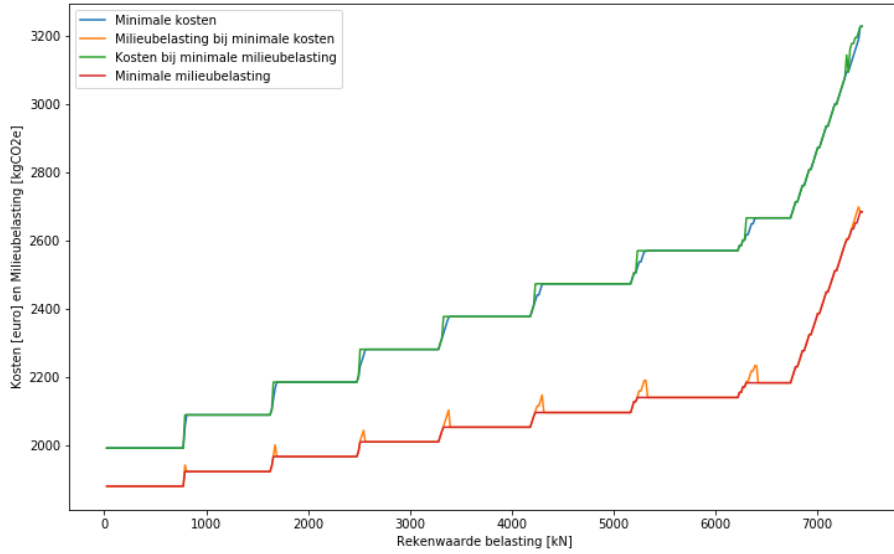


Figuur 3.7: Optimalisatie: C30/37, $D_p = 450mm$, $D_k = 600mm$, $F_{Ed} \geq 8500kN$

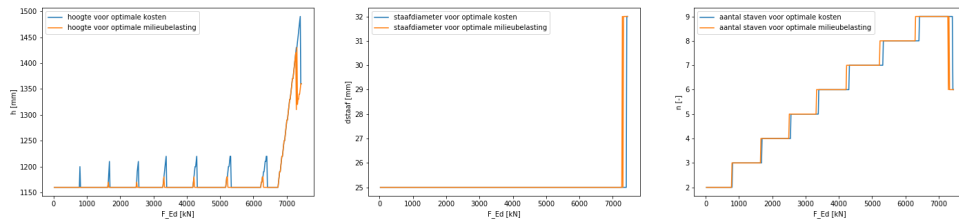
Lagere betonkwaliteit

Daarnaast is er nog gekeken naar de uitkomst van de optimalisatie bij een lagere betonsterkteklasse. Dit is te zien in figuur 3.8 en figuur 3.9. Hier is de betonsterkte verlaagd van 'C30/37' naar 'C20/25'

Wat opvalt is dat voor lage belastingen de grafiek grotendeels eenzelfde soort verloop heeft als de grafiek van een hogere betonsterkteklasse. Pas bij hogere belastingen verandert het patroon enigszins. Waar bij een hogere sterkteklasse de kostenoptimalisatie volledig los komt van de duurzaamheidsoptimalisatie, gaat bij een lagere sterkteklasse het patroon van lagere belastingen door. De goedkoopste configuratie is dus op meer punten gelijk is aan de duurzaamste configuratie dan in figuur 3.2. Ook is het maximaal gebruikte aantal wapeningsstaven in alle mogelijke configuraties lager.



Figuur 3.8: Optimalisatie: C20/25, $D_p = 450mm$, $D_k = 600mm$



Figuur 3.9: Optimalisatie: C20/25, $D_p = 450mm$, $D_k = 600mm$

Foutmelding

Tot slot bestaat er nog de mogelijkheid dat de belasting zo hoog is dat de spanning direct boven de funderingspalen of direct onder de kolom hoger is dan de maximale betonspanning. Dit is niet op te lossen door de poerconfiguratie aan te passen. Als dit het geval is zal de optimalisatie tool de foutmelding geven die is te zien in 3.10. Dit betekent dat ofwel de betonsterkteklasse verhoogt moet worden of de kolom of palen breder gekozen moeten worden.

```
C:\Users\Friso van Spengler\Anaconda3\lib\site-packages\IPython\core\interactiveshell.py:2963:
RuntimeWarning: Betonspanning is altijd hoger dan maximale betonspanning, kies hogere betonste
rkteklasse of smallere kolom en/of funderingspalen
  exec(code_obj, self.user_global_ns, self.user_ns)
C:\Users\Friso van Spengler\Anaconda3\lib\site-packages\ipykernel_launcher.py:18: RuntimeWarni
ng: All-NaN slice encountered
C:\Users\Friso van Spengler\Anaconda3\lib\site-packages\ipykernel_launcher.py:21: RuntimeWarni
ng: All-NaN slice encountered

-----
IndexError                                Traceback (most recent call last)
<ipython-input-9-71800316f91a> in <module>()
      1 #Optimalisatie
----> 2 res = optimalisatie(Dp, Dk, Gk, Qk, beton, kb, ks, db, ds)

<ipython-input-1-d18a3e87b1f4> in optimalisatie(Dp, Dk, Gk, Qk, beton, kb, ks, db, ds, GammaG,
GammaQ, staal, dverdeel, d, constructieklasse)
     22     loc1 = np.argwhere(duurzaamheid == duurzaamst)
     23
--> 24     H1 = H[loc[0][0]]
     25     dstaaf1 = dstaaf[loc[0][1]]
     26     n1 = n[loc[0][2]]

IndexError: index 0 is out of bounds for axis 0 with size 0
```

Figuur 3.10: Foutmelding bij te hoge belasting

Hoofdstuk 4

Discussie

In dit hoofdstuk wordt een verklaring gezocht voor de resultaten van de optimalisatie. Opvallende resultaten zullen besproken worden. Daarnaast zullen de consequenties van verschillende keuzes in de berekening en optimalisatie bekeken en besproken worden.

4.1 Verklaring van de resultaten

De optimalisatie levert een poerconfiguratie die aanzienlijk goedkoper en duurzamer is dan de poerconfiguratie die volgt uit de voorbeeldberekening. Hoewel de hoogte toeneemt is er nog steeds een kleine afname van het betonvolume. Dit wordt veroorzaakt door de afname van de staafdiameter van de hoofdwapening. De kleinere staafdiameter zorgt ervoor dat de poer minder lang hoeft te zijn. Daarbij zorgt de afname van de staafdiameter er, ondanks de toename van het aantal staven, voor dat de massa van het toegepaste wapeningsstaal afneemt.

De optimalisatie had handmatig berekend kunnen worden door het herhaaldelijk uitvoeren van de berekening, dit zou echter tijdrovend geweest zijn en zou daarbij geen uitsluitsel geven over de optimale combinatie van hoogte en wapening. De optimalisatietool is in dit geval dus een bruikbare manier om de hoogte en wapeningsconfiguratie van de poer te optimaliseren.

In figuur 3.2 is, met name bij lagere belastingen, goed te zien dat het verloop van de optimale kosten en duurzaamheid stapsgewijs verloopt. Dit valt te verklaren op basis van de optimalisatie. Waar de hoogte redelijk geleidelijk kan toenemen, zit er wel een aanzienlijke stapgrootte in het variëren van de hoeveelheid wapeningsstaal. Door de keuze voor het variëren tussen de doorgaans gebruikelijk staafdiameters (12mm, 16mm, 20mm, 25mm, 32mm, 40mm) is het niet mogelijk om de massa van het toegepaste wapeningsstaal geleidelijk te laten toenemen. De sprongen in combinatie met rechte stukken ontstaan in dit geval omdat de hoogte de minimale waarde heeft. Als op dat moment het aantal staven groeit zal de sterkte van de poer met een relatief grote sprong toenemen. In dat geval kan de belasting weer een stuk toenemen, zonder dat er meer materiaal in de poer toegepast hoeft te worden. De kosten en milieubelasting zijn na de sprong hoger, omdat het aantal staven is toegenomen. Het gebruiken van tussenliggende staafdiameters zou dus voor andere resultaten kunnen zorgen, dit is echter niet gedaan, omdat dit ten koste zou kunnen gaan van de bruikbaarheid van de tool. Mocht

de mogelijkheid om tussenliggende diameters te gebruiken wel bestaan is dit op te lossen door een simpele aanpassing in het Python script.

Daarnaast valt op dat bij een sprong in de grafiek de goedkoopste en duurzaamste configuratie even uit elkaar gaan. In paragraaf 3.2 is getoond dat dit komt omdat bij de goedkoopste optie de toename van de hoogte langer wordt doorgezet en dat de duurzaamste optie eerder over gaat op een grotere hoeveelheid wapening. Dit valt te verklaren aan de hand van figuur 2.9 en figuur 2.10 uit paragraaf 2.4. Hier valt te zien dat de grafiek waarin de hoogte tegen de prijs wordt uitgezet minder steil is dan de grafiek waarin de hoogte tegen de duurzaamheid wordt uitgezet. Aan de hand hiervan valt te verwachten dat in een optimalisatie van de duurzaamheid eerder overgeschakeld moet worden op een toename van de wapeningsdoorsnede dan bij een optimalisatie van de kosten. Uiteindelijk vallen de goedkoopste optie en de duurzaamste optie weer samen omdat op dat punt ook voor de kosten geldt dat het beter is om over te schakelen op een grotere hoeveelheid wapening.

Vervolgens is er in paragraaf 3.2 opgemerkt dat het verschil tussen de duurzaamste en goedkoopste configuratie voor het eerst echt verschil vertoont wanneer de belasting de maximaal toelaatbare belasting benadert. Als er naar figuur 3.6 en figuur 3.7 wordt gekeken valt op dat dit samenvalt met de eerste keer dat de staafdiameter toeneemt voor een van de optimalisaties. Tot dan toe is de staafdiameter gelijk gebleven op een waarde van 25 mm. Het toenemen van de staafdiameter heeft een kwadratisch verband met de doorsnede van het wapeningsstaal en heeft daarom direct een grote invloed op de hoeveelheid staal. Dit veroorzaakt de grotere sprongen in de optimalisatie en de verschillen tussen de goedkoopste en de duurzaamste poerconfiguratie. Het aantal staven kan zelfs afnemen van 11 naar 8 op het moment dat de staafdiameter van 25 mm naar 32 mm gaat, de doorsnede van de wapening is namelijk groter bij 8 staven van 32 mm dan bij 11 staven van 25 mm.

Het kwadratische verband tussen de staafdiameter en de massa van het toegepaste staal verklaart ook waarom de staafdiameter lang gelijk blijft. Daarbij val tin figuren 2.7 en 2.8 te zien dat een toename van de staafdiameter naast een grote toename in staal massa ook nog een toename in betonvolume tot gevolg heeft. Dit terwijl een toename van het aantal staven slechts leidt tot een lineaire toename van de staal massa. Op basis hiervan valt te verwachten dat naarmate de belasting toeneemt in de optimalisatie eerst het aantal wapeningsstaven toeneemt. Pas als het echt noodzakelijk is zal de staafdiameter van de wapening worden verhoogd.

Uit figuur 3.8 volgt dat het bovenstaande nog steeds opgaat wanneer een lagere betonkwaliteit in combinatie met lagere belastingen wordt toegepast. Een verschil is echter wel dat het aantal wapeningsstaven lager is dan in situaties met een hogere betonkwaliteit. Dit is echter logisch want een lagere betonkwaliteit heeft geen effect op de sterkte van het staal. Omdat de maximale belasting lager is is een kleiner aantal staven in dit geval voldoende.

4.2 Keuzes ten aanzien van de invoer van de tool

Zoals eerder aangegeven bepaalt de optimalisatie tool de optimale poerconfiguratie op basis van een gegeven belastingsituatie. Er zijn gedurende het project echter nog een paar andere waarden toegevoegd aan de invoer van de tool.

De betonsterkteklasse is ondanks zijn invloed op de prestaties van de poer niet meegenomen in de optimalisatie. Hier is voor gekozen om redenen die zijn beschreven in paragraaf 2.2 en 2.3. Een groot verschil in kosten en duurzaamheid bij verschillende variaties binnen een betonsterkte zorgen ervoor dat er geen universeel verband te beschrijven is. De betonsterkteklasse heeft echter wel invloed op de prestaties van de poer. De sterkteklasse van het beton is nu opgenomen als invoer variabele voor de optimalisatie.

Naast de betonsterkteklasse zijn ook de materiaalkosten en koolstof factoren als invoer gedefinieerd in de tool. Dit is vooral van belang voor de koolstof factoren. Door het grote variatie aan mogelijke betonsamenstellingen is het niet mogelijk een universele koolstof factor voor beton te bepalen. Voor staal is de koolstof factor beter bekend, maar de hoeveelheid gerecycled materiaal in het toegepaste staal zorgt hier voor veel variatie. Om deze redenen dienen de materiaalkosten en milieubelastingen van tevoren bepaald om ze vervolgens in te voeren in de optimalisatie.

Daarnaast zijn er nog de 'keyword arguments' in de tool. Dit zijn bijvoorbeeld de dekking en de breedte van de trekstang. Voor deze variabelen is een vaste waarde gekozen, maar deze kunnen indien nodig aangepast worden. De variabelen worden niet geoptimaliseerd. Het kan dus zijn dat er een goedkopere of duurzamere poer samengesteld kan worden als deze variabelen nog verandert worden.

4.3 Toepassing van de optimalisatietool

De tool is een eenvoudige optimalisatie van de drie belangrijkste variabelen. Om deze reden volgt er geen gedetailleerde poerconfiguratie uit de optimalisatie. Voor bijvoorbeeld de verankering, flankwapening en bovenwapening zijn nu vaste verhoudingen berekend, waardoor de uitkomst geen specifieke detaillering geeft. De detaillering van de poer is een complexe opgave en is daarom niet meegenomen in de huidige tool. De tool dient als indicatie voor de optimale configuratie van afmetingen en hoofdwapening. Berekening en toetsing van de detaillering van de poer dient nog te worden uitgevoerd.

Daarnaast zijn op basis van de eurocode nog enkele aanpassingen te doen in de berekening die daar nu nog niet in zijn meegenomen. Hieronder worden daar drie voorbeelden van gegeven.

- In EC2 art. 6.5.4 (4) staat dat onder bepaalde voorwaarden de druksterkte van de knopen met 10% verhoogd mag worden, dit is momenteel nog niet meegenomen in de toetsing van de spanning in de knopen.
- EC2 art. 8.8 stelt dat een staafdiameter als grote staafdiameter gezien moet worden wanneer deze groter is dan 32 mm. Als de staafdiameter groter is dan deze waarde gelden er enkele extra eisen voor de detaillering van de wapening. Aan enkele van deze eisen is in de berekening al voldaan. Het effect van andere eisen zou nog onderzocht

moeten worden wanneer een staafdiameter van 40 mm gekozen wordt. Dit lijkt voor de huidige tool geen probleem aangezien is gebleken dat bij de relatief hoge belastingen waarvoor de optimalisatie is uitgevoerd een staafdiameter van 40 mm nog niet nodig is gebleken.

- In EC2 art. 5.6.4 (4) staat dat de hoogte van de wapening overeen moet komen met de hoogte van de knoop in het staafwerk. Deze controle is niet uitgevoerd in de berekening. Het kan zijn dat de hoogte van de poer daardoor hoger uitvalt dan nu is bepaald.

Hoofdstuk 5

Conclusie en aanbevelingen

Er is een optimalisatietool opgezet die in staat is op basis van een gegeven belastingsituatie de belangrijkste parameters voor een efficiënt poerontwerp te optimaliseren om zo tot een poer te komen die ofwel zo goedkoop mogelijk ofwel zo min mogelijk milieubelastend is.

Uit parametrisch onderzoek is gebleken dat de hoogte, de staafdiameter van de wapening en het aantal wapeningsstaven per trekband de belangrijkste parameters zijn voor de optimalisatie. Door het variëren van deze variabelen kunnen verschillende poerconfiguraties gemaakt worden. In de optimalisatie wordt de berekening voor alle varianten uitgevoerd, vervolgens worden per variant de kosten en de milieubelasting berekend en wordt elke variant getoetst aan de eisen en randvoorwaarden. De varianten die niet voldoen aan de eisen worden eruit gefilterd en voor de resterende resultaten zoekt de tool de goedkoopste en duurzaamste variant.

Op deze manier is een tool ontwikkeld die op een eenvoudige manier een optimale verhouding tussen hoogte en wapeningsconfiguratie berekent. Hiermee zijn een kostenreductie en een afname van de milieubelasting bereikt van respectievelijk 9.8% en 5.9% ten opzichte van een voorbeeldberekening op basis van Eurocode 2 [Betonvereniging, 2014]. De tool vervangt hiermee een tijdrovende berekening.

De kosten en milieubelasting zijn voornamelijk afhankelijk van het materiaalgebruik in de poer. Dit gaat om het betonvolume en de massa van het toegepaste wapeningsstaal. Omdat de kosten en de milieubelasting sterk afhankelijk zijn van de gekozen betonmix en de recyclegraad van het toegepaste wapeningsstaal zullen de kosten en milieubelasting van de materialen vooraf bepaald moeten worden.

De tool is een simpele optimalisatie van de drie belangrijkste variabelen voor het poerontwerp. Dit sluit niet uit dat de efficiëntie van de poer verder verhoogd kan worden door het aanpassen van andere variabelen. De tool dient dus niet als eindberekening van de poer maar kan gebruikt worden om een indicatie te geven voor een efficiënte samenstelling van de belangrijkste parameters.

Aanbevelingen

De optimalisatietool levert een eenvoudige optimalisatie. Om de uitkomst van de optimalisatie te verbeteren, zijn nog een aantal aspecten voor het ontwerpen van een poer die nader onderzoek of verdere detaillering vragen.

Allereerst is er de betonsterkteklasse. De invloed van de betonsterkteklasse op de kosten en duurzaamheid van een poer is niet eenduidig. Dit wordt onder andere veroorzaakt door de grote variatie in betonsamenstellingen. Omdat de betonsterkteklasse wel een significante invloed heeft op de prestaties van de poer is het nuttig om hier verder onderzoek naar te doen met als doel het opnemen van de betonsterkteklasse in de optimalisatie.

Daarbij worden in de huidige tool de optimale resultaten voor kosten en duurzaamheid los berekend. Voor belastingsituaties waar de goedkoopste en duurzaamste optie niet gelijk zijn moet zelf een keuze worden gemaakt tussen kosten en duurzaamheid. Deze keuze zou voorkomen kunnen worden door de kosten en de duurzaamheid in dezelfde eenheid te presenteren. Dit kan bijvoorbeeld door te onderzoeken of de milieubelasting is om te rekenen naar de kosten van een betreffende belasting in euro. Op deze manier zou er een optimalisatie gedaan kunnen worden die in alle gevallen één optimale uitkomst heeft.

De kosten en milieubelasting van beton worden voor een belangrijk deel opgemaakt uit de samenstelling van de betonmix. Aangezien een vaste waarde voor de kosten en milieubelasting lastig te bepalen is zou er onderzoek gedaan kunnen worden naar de invloed van verschillende keuzes van de betonmix voor de kosten en milieubelasting. Hier zou eventueel ook gedacht kunnen worden aan een optimalisatie.

Als laatste zijn de optimalisatietool zijn een aantal dingen versimpeld of niet meegenomen. Op deze aspecten zou de tool verder ontwikkeld kunnen worden.

Een voorbeeld hiervan is artikel 6.5.4 (4) van de eurocode, hierin staan een aantal voorwaarden waaronder de druksterkte in een knoop met 10% verhoogd mag worden. Dit kan vanzelfsprekend leiden tot een aanzienlijk efficiëntere poer. Het meenemen van deze en soortgelijke aanpassingen op de berekening zou verder uitgezocht kunnen worden.

Een voorbeeld van een versimpeling in de tool is bijvoorbeeld het vastzetten van minder belangrijke variabelen als de dekking en de breedte van de trekstang. Omdat deze de prestaties, en daarmee de kosten en milieubelasting, van de poer weldegelijk beïnvloeden zou onderzocht kunnen worden hoe deze variabelen in de optimalisatie opgenomen kunnen worden.

Een ander voorbeeld van een versimpeling is de berekening van de flank- en bovenwapening. Deze zijn nu als geheel berekend. Er zou nog onderzocht moeten worden hoe deze verder gedetailleerd kunnen worden om tot een preciezere berekening van de poer te komen.

Bibliografie

- [ABT, 2016] ABT (2016). Kostendeskundige poeren: Elementspecificatie directe kosten.
- [Asefa, 2020] Asefa, S. G. (2020). Non-linear finite element analysis and parametric study of four-pile pile caps. Master’s thesis, TU-Delft.
- [Betonvereniging, 2014] Betonvereniging (2014). *EC 2 in de praktijk; Rekenvoorbeelden*. betonvereniging.
- [Cao, 2017] Cao, C. (2017). *Advanced high strength natural fibre composites in construction*, chapter 21 Sustainability and life assessment of high strength natural fibre composites in construction. Elsevier.
- [EC2, 2004] EC2 (2004). EN 1992-1-1:2004: Design of concrete structures. (part 1: General rules and rules for buildings).
- [Mebin, 2019] Mebin (2019). Prijslijst 2020 aanvullende verkoopvoorwaarden.
- [Orr and Gibbons, 2020] Orr, J. and Gibbons, O. (2020). How to calculate embodied carbon. Technical report, The Institution of Structural Engineers, London, UK.
- [Orr et al., 2020] Orr, J., Gibbons, O., and Arnold, W. (2020). A brief guide to calculating embodied carbon. Technical report, The Institution of Structural Engineers, London, UK.
- [Purnell, 2015] Purnell, P. (2015). The carbon footprint of reinforced concrete. *Advances in Cement Research*, 25(6).

Bijlage A

Kostenberekening

Bron: [ABT, 2016]

Berekening directe kosten van POEREN

Voer de variabelen aantal lengte breedte en hoogte van de poer in op de daarvoor bestemde **cellen**.

Voer de benodigde hoeveelheid kg wapening in (zonder knipverlies) in de **variabele**.

Hoeveelheden worden berekend aan de hand van de variabelen.

16.13.01	Poeren	berekend	vf	hoev. eenheid	manuur	mat.	o.a.	tot. arbeid	tot. mat.	tot. o.a.	totaal
	Aantal, l x b x h	variabel		1,0 ST	2,50	2,00	1,06				
	bruglat werkvloer en egaliseren		5,00	5,0 m2	0,15	1,00		0,8	5		43
	werkvloer beton C12/15		0,30	0,3 m3	3,00	95,00		0,9	29		74
	randkist		9,54	9,5 m2	0,80	12,00		7,6	114		496
	beton C20/25 incl. 3% stortverl.		5,46	5,5 m3	0,60	95,00		3,3	519		682
	wap.incl. 3% knipverl.	135 kg/ m3	736,97	737,0 kg			1,49			1.100	1.100
	blokjes/olie/draadnagel		6,50	6,5 m2	0,05	5,00		0,3	33		49
	nazorg beton		5,30	5,3 m3	0,02	1,00		0,1	5		11
	in te storten onderdelen		2,00	2,0 st	0,15	6,50		0,3	13		28
16.13.01	Poeren		#####	/e.h	13,29	717,39	1.099,91	13,3	717	1.100	2.482

Bedrag per m3 beton € 454,61

Beton:

$Kosten\ onderdeel = arbeid + materiaal$

$arbeid = 50 \cdot manuur \cdot hoeveelheid$

$materiaal = hoeveelheid \cdot materiaal$

Bijlage B

Python code: Tool

```
# coding: utf-8
```

```
# In[120]:
```

```
from IPython.display import Markdown as md
get_ipython().run_line_magic('run', 'Def_berekening.ipynb')
get_ipython().run_line_magic('run', 'Def_optimalisatie.ipynb')
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
## Optimalisatietool voor 4-paals blokpoeren
```

```
## Invoer
```

```
# In de eerste cel kunnen de invoerwaarden voor de optimalisatie ingevuld worden. Allereerst de belastingsituatie, hiervoor moet de Def_berekening.ipynb cell uitgevoerd worden.
```

```
# In[124]:
```

```
#Belastingsituatie
```

```
D_paal = 450 #mm
```

```
D_kolom = 600 #mm
```

```
G_k = 5600 #kN
```

```
Q_k = 2400 #kN
```

```
#Betonsterkteklasse
```

```
beton = 'C30/37'
```

```
#Kosten
```

```
k_beton = 250 #euro / m3
```

```
k_staal = 1.5 #euro / kg
```

```
#Koolstofactoren
```

```
C_beton = 0.103 #kgCO2e / kg
```

```
C_staal = 0.675 #kgCO2e / kg
```

```
## Optimalisatie
```

```
# Hieronder wordt de optimalisatie uitgevoerd. De uitkomsten van de optimalisatie worden gedefinieerd en vervolgens met de hulpsfuncties geploott.
```

```
# In[125]:
```

```
res = optimalisatie(D_paal, D_kolom, G_k, Q_k, beton, k_beton, k_staal, C_beton, C_staal)
```

```

kost = res[0]
duur = res[1]
h1 = res[2]
dstaaf1 = res[3]
n1 = res[4]
h2 = res[5]
dstaaf2 = res[6]
n2 = res[7]

# # Resultaten

# ## Uitkomst optimalisatie
# Voor zowel kosten als duurzaamheid wordt hier de optimale poerconfiguratie bij de gegeven belastingsituatie gepresenteerd.

# In[126]:

inp = """

$$\begin{aligned} &\text{\&Belastingsituatie:} \\ &\text{\&G}_{\{k\}} = \%0f \text{ \ kN} \\ &\text{\&Q}_{\{k\}} = \%0f \text{ \ kN} \\ &\text{\&D}_{\{p\}} = \%0f \text{ \ mm} \\ &\text{\&D}_{\{k\}} = \%0f \text{ \ mm} \\ &\text{\&Uitkomst \ kostenoptimalisatie:} \\ &\text{\&hoogte: } \&h = \%0f \text{ \ mm} \\ &\text{\&staafdiameter: } \&D_{\{staaf\}} = \%0f \text{ \ mm} \\ &\text{\&aantal \ staven: } \&n = \%0f \\ &\text{\&kosten: } \&\%2f \text{ \ euro} \\ &\text{\&milieubelasting: } \&\%0f \text{ \ kgCO}_{2e} \\ &\text{\&Uitkomst \ duurzaamheidsoptimalisatie:} \\ &\text{\&hoogte: } \&h = \%0f \text{ \ mm} \\ &\text{\&staafdiameter: } \&D_{\{staaf\}} = \%0f \text{ \ mm} \\ &\text{\&aantal \ staven: } \&n = \%0f \\ &\text{\&kosten: } \&\%2f \text{ \ euro} \\ &\text{\&milieubelasting: } \&\%0f \text{ \ kgCO}_{2e} \end{aligned}$$

""%(G_k, Q_k, D_paal, D_kolom, h1, dstaaf1, n1, kost[32], kost[33], h2, dstaaf2, n2, duur[32], duur[33])

md(inp)

# ## Uitkomst controleberekening voor kostenoptimalisatie

# In[127]:

outp = """

$$\begin{aligned} &\text{\&POERGEOMETRIE:} \\ &\text{\&Lengte: } \&L = \text{\&B} = h.o.h_{\{palen\}} + D_p + 20 \& \%0f \text{ \ mm} \\ &\text{\&Hoogte: } \&h \& \%0f \text{ \ mm} \\ &\text{\&Hart-op-hart afstand palen: } \&h.o.h_{\{palen\}} = 3 * D_p \& \%0f \text{ \ mm} \\ &\text{\&Lengte \ poer \ voorbij \ de \ palen: } \&0 \& \%0f \text{ \ mm} \\ &\text{\&Betonvolume: } \&V_{\{b\}} = (h \cdot L \cdot B) \text{ \ / \ } 10^9 \& \%3f \text{ \ m}^3 \\ &\text{\&WAPENINGSCONFIGURATIE:} \\ &\text{\&Staafdiameter: } \&D_{\{staaf\}} \& \%0f \text{ \ mm} \\ &\text{\&Aantal \ staven \ per \ trekband: } \&n \& \%0f \end{aligned}$$

"""

```


md(outp)

Uitkomst controleberekening voor duurzaamheidsoptimalisatie

In[128]:

```
outp = ""

$$\begin{aligned} & \text{\textbackslash begin{align*}} \\ & \text{\textbackslash POERGEOMETRIE:} \\ & \text{\textbackslash Lengte: } L = B + h_{\text{palen}} + D_p + 20 \text{ \textbackslash mm} \\ & \text{\textbackslash Hoogte: } h = 0.0f \text{ \textbackslash mm} \\ & \text{\textbackslash Hart-op-hart afstand palen: } h_{\text{palen}} = 3 * D_p \text{ \textbackslash mm} \\ & \text{\textbackslash Lengte \ poer \ voorbij \ de \ palen: } O = 0.0f \text{ \textbackslash mm} \\ & \text{\textbackslash Betonvolume: } V_b = (h \cdot L \cdot B) \cdot 10^{-9} \text{ \textbackslash m}^3 \\ & \text{\textbackslash WAPENINGSCONFIGURATIE:} \\ & \text{\textbackslash Staafdiameter: } D_{\text{staaf}} = 0.0f \text{ \textbackslash mm} \\ & \text{\textbackslash Aantal \ staven \ per \ trekband: } n = 0.0f \\ & \text{\textbackslash Massa \ staal: } m_s = V_s \cdot \rho_s \text{ \textbackslash kg} \\ & \text{\textbackslash Volume \ Staal: } V_s = V_{s,hw} + V_{s,fw} + V_{s,bw} + V_{s,ow} \text{ \textbackslash m}^3 \\ & \text{\textbackslash } V_{s,hw} = 4(0.25\pi D_{\text{staaf}}^2 \cdot n) \cdot (h_{\text{palen}} + l_v) \text{ \textbackslash m}^3 \\ & \text{\textbackslash } V_{s,fw} = 0.001b \cdot 4h(L - 2c_{\text{nom}}) \text{ \textbackslash m}^3 \\ & \text{\textbackslash } V_{s,bw} = 0.3(0.25\pi D_{\text{staaf}}^2 \cdot n) \cdot 2(L - 2c + h - d - 2c) \text{ \textbackslash m}^3 \\ & \text{\textbackslash } V_{s,ow} = 0.001b \cdot 2(h_{\text{palen}} + l_v)(1 - 2b/L) \text{ \textbackslash m}^3 \\ & \text{\textbackslash Tussenstaafafstand: } a = (b - n \cdot D_{\text{staaf}}) / (n - 1) \text{ \textbackslash mm} \\ & \text{\textbackslash Breedte \ trekband: } b = D_p + bt \text{ \textbackslash mm} \\ & \text{\textbackslash Toegepaste \ dekking: } c = 0.0f \text{ \textbackslash mm} \\ & \text{\textbackslash Lengte \ verankering \ na \ ombuiging: } d = 0.0f \text{ \textbackslash mm} \\ & \text{\textbackslash GEOMETRIE \ STAAFWERK:} \\ & \text{\textbackslash Diagonale \ staaf: } l_{\text{diagonaal}} = h_{\text{palen}} \cdot \sqrt{2} \text{ \textbackslash mm} \\ & \text{\textbackslash Inwendige \ hefboomsarm: } z = \min(0.2l_{\text{diagonaal}} + 0.4h, 0.6l_{\text{diagonaal}}) \text{ \textbackslash mm} \\ & \text{\textbackslash Inwendige \ hoek: } \theta = \tan^{-1}(z / (0.5l_{\text{diagonaal}} - 0.25D_k)) \text{ \textbackslash graden} \\ & \text{\textbackslash BEREKENING:} \\ & \text{\textbackslash BGT: } F = G_k + Q_k \text{ \textbackslash kN} \\ & \text{\textbackslash UGT: } F_{\text{Ed}} = G_k \cdot \gamma_k + Q_k \cdot \gamma_Q \text{ \textbackslash kN} \\ & \text{\textbackslash Dekking: } c_{\text{nom}} = c_{\text{min},b} + \Delta c_{\text{dev}} \text{ \textbackslash mm} \\ & \text{\textbackslash } c_{\text{max}} = 2 \cdot D_{\text{staaf}} \text{ \textbackslash mm} \\ & \text{\textbackslash Staafwerk:} \\ & \text{\textbackslash Knoop \ a: } \sigma_{\text{Ed},1a} = F_1 \cdot 10^3 / (D_k \cdot a_1) \text{ \textbackslash N/mm}^2 \\ & \text{\textbackslash } \sigma_{\text{Ed},0} = 2 \cdot (F_0 \cdot 10^3 / (D_k \cdot a_0)) \text{ \textbackslash N/mm}^2 \\ & \text{\textbackslash } \sigma_{\text{Rd},a} = \min((\alpha_{\text{cc}} \cdot f_{\text{ck},c}) / \gamma_c, k_4 \cdot v' \cdot f_{\text{cd}}) \text{ \textbackslash N/mm}^2 \\ & \text{\textbackslash } f_{\text{ck},c} = f_{\text{ck}} \cdot (1.125 + 2.50 \cdot \sigma_2 / f_{\text{ck}}) \text{ \textbackslash N/mm}^2 \\ & \text{\textbackslash Knoop \ b: } \sigma_{\text{Ed},4} = F_4 \cdot 10^3 / (a_4 \cdot D_p) \text{ \textbackslash N/mm}^2 \\ & \text{\textbackslash } \sigma_{\text{Ed},1b} = F_1 \cdot 10^3 / (a_{1,b} \cdot b_{1,b}) \text{ \textbackslash N/mm}^2 \\ & \text{\textbackslash } \sigma_{\text{Rd},b} = k_3 \cdot v' \cdot f_{\text{cd}} \text{ \textbackslash N/mm}^2 \\ & \text{\textbackslash Staaf \ 1: } \sigma_{\text{Ed},1a} = F_1 \cdot 10^3 / (D_k \cdot a_1) \text{ \textbackslash N/mm}^2 \\ & \text{\textbackslash } \sigma_{\text{Rd},1} = k_1 \cdot v' \cdot f_{\text{cd}} \text{ \textbackslash N/mm}^2 \\ & \text{\textbackslash Staaf \ 2: } F_{2,///} = F_2 \cdot \sqrt{2} \text{ \textbackslash kN} \\ & \text{\textbackslash } A_{s,\text{req}} = F_{2,///} \cdot 10^3 / f_{\text{sd}} \text{ \textbackslash mm}^2 \\ & \text{\textbackslash } A_{s,\text{toe}} = 0.25 \cdot \pi \cdot D_{\text{staaf}}^2 \cdot n \text{ \textbackslash mm}^2 \\ & \text{\textbackslash Scheurwijdte: } w_k = s_{r,\text{max}} \cdot (e_{\text{sm}} - e_{\text{cm}}) \text{ \textbackslash mm} \\ & \text{\textbackslash } w_{\text{max}} = 0.3 \cdot (c / c_{\text{min}}) \text{ \textbackslash mm} \\ & \text{\textbackslash } c / c_{\text{min}} \leq 2 \end{aligned}$$

```

```

&Verankering: &&l_{bd} = \max(l_b; \ l_{b,min}); \ 10D_{staaf}; \ 100) &&= %.0f \ mm \\\
& \&l_v = 2D_p(c + D_{staaf}) + 6 \cdot 0.25 \pi D_{staaf} + d &&= %.0f \ mm \\\
\\
&TOETSING: \\\
&Dekking: &&c_{nom} =< c =< c_{max} && %.0f =< %.0f =< %.0f \\\
&Knoop \ a: &&UC1 = \sigma_{Ed,1a} \ / \ \sigma_{Rd,a} && = %.3f \\\
& \&UC2 = \sigma_{Ed,0} \ / \ \sigma_{Rd,a} &&= %.3f \\\
&Knoop \ b: &&UC1 = \sigma_{Ed,4} \ / \ \sigma_{Rd,b} && = %.3f \\\
& \&UC2 = \sigma_{Ed,1b} \ / \ \sigma_{Rd,b} &&= %.3f \\\
&Staaf \ 1: &&UC = \sigma_{Ed,1a} \ / \ \sigma_{Rd,1} &&= %.3f \\\
&Staaf \ 2: &&UC = A_{s,toe} \ / \ A_{s,req} &&= %.3f \\\
&Scheurwijdte: &&UC = w_k \ / \ w_{max} && = %.3f \\\
&Verankering: &&UC = l_{bd} \ / \ l_v && = %.3f \\\
&Staafafstand: &&a_{min} = \max(k_{1t}D_{staaf}; \ k_{2t} + d_g; \ 20) =< a && %.0f =< %.0f \\\
&Breedte \ trekband: &&b_{max} = 2(0.5D_p + 0 - c - d_{staaf} - d_{verdeel}) >= b && %.0f >= %.0f
\\end{align*}$
""%(duur[0], h2, duur[14], duur[2], duur[1], dstaaf2, n2, duur[7], kost[3] + kost[4] + kost[5] + kost[6], kost[3], kost[4],
kost[6], duur[8], duur[9], duur[10], duur[11], duur[15], duur[16], duur[17]*(360/(2*np.pi)), duur[12], duur[13], duur[18],
2 * dstaaf2, duur[19], duur[20], duur[21], duur[36], duur[22], duur[23], duur[24], duur[19], kost[37], duur[25], duur[26],
duur[29], duur[30], duur[31], duur[18], duur[10], 2*dstaaf2, duur[19]/duur[21], duur[20]/duur[21], duur[22]/duur[24],
duur[23]/duur[24], duur[19]/kost[37], duur[26]/duur[27], duur[28]/duur[29], duur[30]/duur[31], duur[34], duur[8], duur[3]

```

md(outp)

Bijlage C

Python code: Berekening

```
# coding: utf-8

# In[16]:

import numpy as np
from scipy.optimize import minimize_scalar

# ### Python script deel 1: Berekening
# In dit deel van het script wordt de berekening van de poer uitgevoerd. Deze berekening roept verschillende functies aan die o
#
# In het vervolg wordt per functie toegelicht wat die precies doet en hoe die dat uitvoert.

# ##### Betondekking
#
# De betondekking is de dikte van het beton dat de wapening bedekt. De dekking heeft als doel de wapening en daarmee de poer t
#
# In[21]:

def betondekking(dstaaf, constructieklasse):
    CK = ['S1', 'S2', 'S3', 'S4', 'S5', 'S6']
    cmindur = [10, 15, 20, 25, 30, 35]
    ck = CK.index(constructieklasse)
    cmindur = cmindur[ck] #EC2 tabel 4.4N, afhankelijk van de constructieklasse van het beton
    cminb = dstaaf
    dcdev = 5
    cmin = max([cminb, cmindur, 10]) + dcdev #EC2 vgl 4.1 en 4.2
    k1 = cmindur + 10 #minimale extra marge bij storten tegen oneffen oppervlak (EC2 art. 4.4.1.3 (4))
    cnom = max([cmin, k1])
    return cnom

def testdekking(c, cnom, dstaaf):
    if c >= cnom and c <= 2 * dstaaf:
        return True
    else:
        return False

# ##### Staafwerkmodel
#
# De drukschoor en trekstaaf in de poer kunnen worden versimpeld als inwendig staafwerk. De berekeningen op spanning in de po
```

```

##### Knoop a
# Knoop a bevindt zich bovenin de poer direct onder de kolom. De spanningen rond knoop a zijn afhankelijk van de belasting en c

# In[23]:

def knoopA(Dk, ULS, theta):
    a0 = 0.5 * Dk
    F0 = 0.25 * ULS
    a3 = 0.5 * Dk / np.tan(theta)
    F3 = F0 / np.tan(theta)
    a1a = np.sqrt(a0**2 + a3**2)
    F1 = np.sqrt(F0**2 + F3**2)

    sigmaEd1 = F1 * 1000 / (Dk * a1a)          #rekenwaarde enkelassige spanning gebruikt in maxA():
    sigmaEd0 = 2 * F0 * 1000 / (Dk * a0)       #Rekenwaarde spanning, verdubbeld omdat spanningen overlappen.
    return sigmaEd1, sigmaEd0, a1a

def maxA(sigmaEd1, fck):                      #toelaatbare spanning verhoogd voor 3-assige druk volgens Eurocode 2
    alphacc = 1
    sigma2 = sigmaEd1                        #horizontale spanning in knoop die steundruk levert, waardoor de druksterkte s
    fckc = fck * (1.125 + 2.5 * (sigma2 / fck)) #EC2 vgl. 3.25
    gammac = 1.5                            #safety coefficient for concrete
    fc dc = alphacc * fckc / gammac          #EC2 vgl. 3.15
    k4 = 3                                  #recommended value EC2 art. 6.5.4 (6)
    v = 1 - fck / 250
    fcd = fck / gammac
    sigmaRda = min([fc dc, k4 * v * fcd])
    return sigmaRda, fckc

def testA(fck, sigmaRda, sigmaEd0):
    gammac = 1.5
    k4 = 3                                  #recommended value EC2 art. 6.5.4 (6)
    v = 1 - fck / 250
    fcd = fck / gammac
    if k4 * v * fcd >= sigmaRda and sigmaRda >= sigmaEd0:
        return True
    else:
        return False

##### Knoop b
#
# Knoop b bevindt zich boven de funderingspalen. De knoop wordt berekend als een CCT-knoop. De knoop ondervindt druk vanuit de
#
#
# In[3]:

#Knoop b
def knoopB(Dp, ULS, Dia, z, theta, c, dstaaf):
    F0 = 0.25 * ULS
    F3 = ((0.5 * Dia - 150) / z) * F0
    F1 = np.sqrt(F0**2 + F3**2)
    a4 = Dp
    F4 = 0.25 * ULS
    a1b = a4 * np.sin(theta) + (dstaaf + 2 * (c + 0.5 * dstaaf)) * np.cos(theta)
    b1b = Dp + dstaaf + 2 * (c + 0.5 * dstaaf)

    sigmaEd4 = F4 * 1000 / (a4 * Dp)          #rekenwaarde spanning
    sigmaEd1b = F1 * 1000 / (a1b * b1b)

```

```

    return sigmaEd4, sigmaEd1b, a1b

def maxB(fck):
    k3 = 0.75
    v = 1 - fck / 250
    gammac = 1.5
    fcd = fck / gammac
    sigmaRdb = k3 * v * fcd
    return sigmaRdb

def testB(sigmaEd1b, sigmaRdb, sigmaEd4):
    if sigmaRdb >= sigmaEd1b and sigmaRdb >= sigmaEd4:
        return True
    else:
        return False

# ##### Drukstaaf (1)
# De spanning in de drukdiagonaal is automatisch berekend in knoop a. Deze is gelijk aan sigmaEd1a. De maximaal toelaatbare spanning is sigmaEd1a.
# In[38]:

def max1(fck):
    k1 = 1
    v = 1 - fck / 250
    gammac = 1.5
    fcd = fck / gammac
    sigmaRd1 = k1 * v * fcd
    return sigmaRd1

def teststaaf1(sigmaRd1, sigmaEd1):
    if sigmaRd1 >= sigmaEd1:
        return True
    else:
        return False

# ##### Trekstaaf (2)
# De kracht in de trekstaaf wordt volledig opgenomen door de hoofdwapening.
# In[4]:

#Trekstaaf (2)
def staaf2(ULS, Dia, z):
    F0 = 0.25 * ULS
    F3 = ((0.5 * Dia - 150) / z) * F0
    F1 = np.sqrt(F0**2 + F3**2)
    F4 = 0.25 * ULS
    F2 = np.sqrt(F1**2 - F4**2)
    F2par = F2 / np.sqrt(2)
    return F2par

def max2(F2par, fsk):
    gammas = 1.15
    fsd = fsk / gammas
    Asreq = F2par * 1000 / fsd
    return Asreq

def Astoe(As):
    Atoe = As

```

```

    return Atoe

def teststaaf2(Asreq, Atoe):
    if Atoe >= Asreq:
        return True
    else:
        return False

# ##### Scheurvorming
#
# Ondanks dat de wapening de trekkrachten onder in de poer op zich neemt zal de rek er nog steeds voor zorgen dat er scheuren
#
# In[5]:

#scheurvorming
def scheur(c, dstaaf, SLS, ULS, F2par, fsk, b, fctm, Ecm, As):
    #scheurwijdte
    ks1 = 0.8 #EC vgl. 7.8 t/m 7.11
    ks2 = 1
    ks3 = 3.4
    ks4 = 0.425
    hcef = 2.5 * (c + dstaaf / 2)
    Acef = b * hcef
    rho = As / Acef
    srmax = ks3 * c + (ks1 * ks2 * ks4 * dstaaf) / rho

    gammas = 1.15 #veiligheidsfactor staal
    fsd = fsk / gammas
    Asreq = F2par * 1000 / fsd #benodigde oppervlak wapening
    sigmas = (0.25*SLS / (0.25*ULS)) * (Asreq / As) * fsd
    kt = 0.4
    fcteff = fctm
    Es = 2.0 * 10 ** 5
    Em = Ecm * 1000
    alphae = Es / Em
    e1 = (sigmas - kt * (fcteff / rho) * (1 + alphae * rho)) / Es #esm - ecm
    e2 = 0.6 * (sigmas / Es)
    e = max([e1, e2])

    wk = srmax * e
    return wk

def maxscheur(c, cnom):
    kx = min([c / cnom, 2])
    wmax = 0.3 * kx
    return wmax

#toetsing
def scheurtest(wk, wmax, c, cnom):
    kx = c / cnom
    if kx > 2:
        print('dekking is groter dan de waarde waarvoor gunstig effect in rekening mag worden gebracht')

    if wk > wmax:
        return False
    else:
        return True

# ##### Tussenstaafafstand

```

```
#
# De afstand tussen de wapeningsstaven heeft een minimale waarde. Als de staafafstand kleiner wordt dan de minimale staafafstand
# In[6]:
```

```
#tussenstaafafstand
def tussenstaafafstand(Dp, 0, c, dstaaf, n, b, dverdeel):
    a = (b - n * dstaaf) / (n-1)
    bmax = (0.5 * Dp + 0 - c - dstaaf - dverdeel) * 2
    k1t = 1 #EC2 8.2(2)
    k2t = 5 #EC2 8.2(2)
    dg = 32 #max. aggregate size of concrete
    am = np.arange(3)
    am[0] = k1t * dstaaf
    am[1] = k2t + dg
    am[2] = 20
    amin = np.max(am)
    return a, amin, bmax
```

```
#toetsing
def afstandtest(a, b, amin, bmax):
    if a >= amin and bmax > b:
        return True
    else:
        return False
```

```
# #### Verankering
```

```
# In[30]:
```

```
#verankering
def bvl(F2par, fsk, dstaaf, As): #basisverankeringslengte
    gammas = 1.15
    fsd = fsk / gammas
    Asreq = F2par * 1000 / fsd #benodigde oppervlak wapening
    Atoe = As #toegepaste wapening
    sigmasd = (Asreq / Atoe) * fsd #treksterkte wapening
    n1 = 1 #for good bonding conditions
    if dstaaf <= 32:
        n2 = 1
    else:
        n2 = (132 - dstaaf) / 100
    fctd = 1.35 #Treksterkte beton
    fbd = 2.25 * n1 * n2 * fctd #EC2 vgl. 8.2
    lbrqd = 0.25 * dstaaf * (sigmasd / fbd) #EC2 vgl. 8.3
    return lbrqd

def rvl(lbrqd, dstaaf): #rekenwaarde verankeringslengte
    alpha1 = 1
    alpha2 = 1
    alpha3 = 1
    alpha4 = 1
    alpha5 = 1
    lb = alpha1 * alpha2 * alpha3 * alpha4 * alpha5 * lbrqd #EC2 vgl. 8.4
    lbmin = 0.3 * lbrqd
    lbd = max([lb, lbmin, 10*dstaaf, 100])
    return lbd
```

```
#Toegepaste verankeringslengte
```

```

def verankering(c, dstaaf, Dp, d):
    s0 = c + dstaaf
    vl = Dp + 2 * s0 + 0.25 * np.pi * 6 * dstaaf + d
    return vl

def testverankering(lbd, vl, a, dstaaf, b, Dp):
    if b <= Dp:
        lbdtest = lbd
    else:
        lbdtest = lbd + a + dstaaf #de staven die niet boven de poer liggen zijn maatgevend, hun verankering begint op een afs
    if vl >= lbdtest:
        return True
    else:
        return False

#Lengte van de poer voorbij de funderingspalen
def lvl(c, dstaaf, dverdeel, cnom):
    s0 = c + dstaaf
    dm = 5 * dstaaf
    lvl = 2 * s0 + 0.5 * dm + dstaaf + dverdeel + cnom #minimaal benodigde afstand tussen paal en zijvlak poer
    return lvl

# ##### Overige wapening
# Flankwapening, bovenwapening en onderwapening.
# Deze dient toegepast te worden om het beton op te sluiten en uitpuilen van het beton te voorkomen. De berekening van de hoeveel

# In[31]:

def flankwapening(b, H, L, cnom):
    Asdbmin = 0.001 * b
    Vsfbw = Asdbmin * H * 4 * (L - 2 * cnom)
    return Vsfbw / 1000000000

def bovenwapening(dstaaf, As, L, H, d, c):
    Asbw = 0.15 * 2 * As
    Vsbw = Asbw * 2 * (L - 2 * c + H - d - 2 * c)
    return Vsbw / 1000000000

def onderwapening(b, L, hoh, vl):
    Asow = 0.001 * b
    Vsow = Asow * 2 * (hoh + 2 * vl) * (1 - 2 * b / L)
    return Vsow / 1000000000

def hoofdwapening(hoh, vl, As):
    Vshw = (hoh + 2 * vl) * 4 * As
    return Vshw / 1000000000

# ##### Overige functies
# Hieronder worden nog de materiaalhoeveelheden berekend, daarna worden twee randvoorwaarden voor de afmetingen van de poer geto

# In[26]:

def betonvolume(H, L, B):
    Vb = H * L * L / 10**9
    return Vb

def staal massa(Vshw, Vsfbw, Vsbw, Vsow):
    Vs = (Vshw + Vsfbw + Vsbw + Vsow)

```

```

    rhos = 8000
    ms = Vs * rhos
    return ms

# In[10]:

def lengte(H, Dia):
    if Dia / H <= 3:
        return True
    else:
        return False

# In[13]:

def maxhef(h, a1a, a1b, theta):
    return h - 0.5 * a1a * np.cos(theta) - 0.5 * a1b * np.cos(theta)

def testhef(z, zmax):
    if z > zmax:
        return False
    else:
        return True

# In[14]:

def kosten(Vb, ms, kb, ks):
    kosten = kb * Vb + ks * ms
    return kosten

def duurzaamheid(Vb, ms, db, ds):
    rhob = 2500
    duurzaamheid = db * rhob * Vb + ds * ms
    return duurzaamheid

# ##### Berekening
#
# Hieronder zijn alle bovenstaande functies twee keer samengevoegd in één functie. De functies hebben als input al de mogelijke
#
# In[39]:

def berekening(Dp, Dk, H, dstaaf, n, dverdeel, b, Gk, Qk, GammaG, GammaQ, constructieklasse, d, beton, staal, kb, ks, db, ds,
    hoh = 3 * Dp + 50
    Dia = np.sqrt(2 * hoh ** 2)
    z = min([0.2 * Dia + 0.4 * H, 0.6 * Dia])
    theta = np.arctan(z / ((Dia/2)-0.25*Dk))
    As = n * 0.25 * np.pi * dstaaf**2

    SLS = Gk + Qk
    ULS = Gk * GammaG + Qk * GammaQ

    sterkte = ['C12/15', 'C16/20', 'C20/25', 'C25/30', 'C30/37', 'C35/45', 'C40/50', 'C45/55', 'C50/60', 'C55/67', 'C60/75']
    fck = [12, 16, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60]
    fctm = [1.6, 1.9, 2.2, 2.6, 2.9, 3.2, 3.5, 3.8, 4.1, 4.2, 4.4]
    Ecm = [27, 29, 30, 31, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39]

```

```

S = sterkte.index(beton)
fck = fck[S]
fctm = fctm[S]
Ecm = Ecm[S]

staalsterkte = ['B500B']
fsk = [500]
T = staalsterkte.index(staal)
fsk = fsk[T]

cnom = betondekking(dstaaf, constructieklasse) #minimaal benodigde betondekking

sigmaEd1, sigmaEd0, a1a = knoopA(Dk, ULS, theta)
sigmaRda, fckc = maxA(sigmaEd1, fck)
sigmaEd4, sigmaEd1b, a1b = knoopB(Dp, ULS, Dia, z, theta, c, dstaaf)
sigmaRdb = maxB(fck)
zmax = maxhef(H, a1a, a1b, theta)

sigmaRd1 = max1(fck)

F2par = staaf2(ULS, Dia, z)
Asreq = max2(F2par, fsk)
Atoe = Astoe(As)

wk = scheur(c, dstaaf, SLS, ULS, F2par, fsk, b, fctm, Ecm, As)
wmax = maxscheur(c, cnom)

lbrqd = bvl(F2par, fsk, dstaaf, As)
lbd = rvl(lbrqd, dstaaf)
vl = verankering(c, dstaaf, Dp, d)
O = lvl(c, dstaaf, dverdeel, cnom)
a, amin, bmax = tussenstaafafstand(Dp, O, c, dstaaf, n, b, dverdeel)

L = Dp + hoh + 2 * O
B = L

Vsfw = flankwapening(b, H, L, cnom)
Vsbw = bovenwapening(dstaaf, As, L, H, d, c)
Vsow = onderwapening(b, L, hoh, vl)
Vshw = hoofdwapening(hoh, vl, As)

Vb = betonvolume(H, L, L)
ms = staalmassa(Vshw, Vsfw, Vsbw, Vsow)

cost = kosten(Vb, ms, kb, ks)
duur = duurzaamheid(Vb, ms, db, ds)

t = np.zeros(10)
t[0] = testdekking(c, cnom, dstaaf)
t[1] = testA(fck, sigmaRda, sigmaEd0)
t[2] = testB(sigmaEd1b, sigmaRdb, sigmaEd4)
t[3] = teststaaf2(Asreq, Atoe)
t[4] = scheurtest(wk, wmax, c, cnom)
t[5] = afstandtest(a, b, amin, bmax)
t[6] = testverankering(lbd, vl, a, dstaaf, b, Dp)
t[7] = lengte(H, Dia)
t[8] = testhef(z, zmax)
t[9] = teststaaf1(sigmaRd1, sigmaEd1)

if np.all(t == True):
    return cost
else:

```

```

        return np.NaN

def berekening1(Dp, Dk, H, dstaaf, n, dverdeel, b, Gk, Qk, GammaG, GammaQ, constructieklasse, d, beton, staal, kb, ks, db, ds):
    hoh = 3 * Dp + 50
    Dia = np.sqrt(2 * hoh ** 2)
    z = min([0.2 * Dia + 0.4 * H, 0.6 * Dia])
    theta = np.arctan(z / ((Dia/2)-0.25*Dk))
    As = n * 0.25 * np.pi * dstaaf**2

    SLS = Gk + Qk
    ULS = Gk * GammaG + Qk * GammaQ

    sterkte = ['C12/15', 'C16/20', 'C20/25', 'C25/30', 'C30/37', 'C35/45', 'C40/50', 'C45/55', 'C50/60', 'C55/67', 'C60/75']
    fck = [12, 16, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60]
    fctm = [1.6, 1.9, 2.2, 2.6, 2.9, 3.2, 3.5, 3.8, 4.1, 4.2, 4.4]
    Ecm = [27, 29, 30, 31, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39]
    S = sterkte.index(beton)
    fck = fck[S]
    fctm = fctm[S]
    Ecm = Ecm[S]

    staalsterkte = ['B500B']
    fsk = [500]
    T = staalsterkte.index(staal)
    fsk = fsk[T]

    cnom = betondekking(dstaaf, constructieklasse)

    sigmaEd1, sigmaEd0, a1a = knoopA(Dk, ULS, theta)
    sigmaRda, fckc = maxA(sigmaEd1, fck)
    sigmaEd4, sigmaEd1b, a1b = knoopB(Dp, ULS, Dia, z, theta, c, dstaaf)
    sigmaRdb = maxB(fck)
    zmax = maxhef(H, a1a, a1b, theta)

    sigmaRd1 = max1(fck)

    F2par = staaf2(ULS, Dia, z)
    Asreq = max2(F2par, fsk)
    Atoe = Astoe(As)

    wk = scheur(c, dstaaf, SLS, ULS, F2par, fsk, b, fctm, Ecm, As)
    wmax = maxscheur(c, cnom)

    lbrqd = bvl(F2par, fsk, dstaaf, As)
    lbd = rvl(lbrqd, dstaaf)
    vl = verankering(c, dstaaf, Dp, d)
    O = lvl(c, dstaaf, dverdeel, cnom)
    a, amin, bmax = tussenstaafafstand(Dp, O, c, dstaaf, n, b, dverdeel)

    L = Dp + hoh + 2 * O
    B = L

    Vsfcw = flankwapening(b, H, L, cnom)
    Vsbw = bovenwapening(dstaaf, As, L, H, d, c)
    Vsow = onderwapening(b, L, hoh, vl)
    Vshw = hoofdwapening(hoh, vl, As)

    Vb = betonvolume(H, L, L)
    ms = staal massa(Vshw, Vsfcw, Vsbw, Vsow)

    cost = kosten(Vb, ms, kb, ks)
    duur = duurzaamheid(Vb, ms, db, ds)

```

```

t = np.zeros(10)
t[0] = testdekking(c, cnom, dstaaf)
t[1] = testA(fck, sigmaRda, sigmaEd0)
t[2] = testB(sigmaEd1b, sigmaRdb, sigmaEd4)
t[3] = teststaaf2(Asreq, Atoe)
t[4] = scheurtest(wk, wmax, c, cnom)
t[5] = afstandtest(a, b, amin, bmax)
t[6] = testverankering(lbd, vl, a, dstaaf, b, Dp)
t[7] = lengte(H, Dia)
t[8] = testhef(z, zmax)
t[9] = teststaaf1(sigmaRd1, sigmaEd1)

if np.all(t == True):
    return duur
else:
    return np.NaN

# In[40]:

def controleberekening(Dp, Dk, H, dstaaf, n, dverdeel, b, Gk, Qk, GammaG, GammaQ, constructieklasse, d, beton, staal, kb, ks,
    hoh = 3 * Dp + 50
    Dia = np.sqrt(2 * hoh ** 2) #Diagonale h-o-h afstand van de palen (lengte van de trekstaaf in het staafwer
    z = min([0.2 * Dia + 0.4 * H, 0.6 * Dia]) #Hefboomsarm
    theta = np.arctan(z / ((Dia/2)-0.25*Dk))
    As = n * 0.25 * np.pi * dstaaf**2

    SLS = Gk + Qk #service limit state
    ULS = Gk * GammaG + Qk * GammaQ #Ultimate limit state

    sterkte = ['C12/15', 'C16/20', 'C20/25', 'C25/30', 'C30/37', 'C35/45', 'C40/50', 'C45/55', 'C50/60', 'C55/67', 'C60/75']
    fck = [12, 16, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60]
    fctm = [1.6, 1.9, 2.2, 2.6, 2.9, 3.2, 3.5, 3.8, 4.1, 4.2, 4.4]
    Ecm = [27, 29, 30, 31, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39]
    S = sterkte.index(beton)
    fck = fck[S]
    fctm = fctm[S]
    Ecm = Ecm[S]

    staalsterkte = ['B500B']
    fsk = [500]
    T = staalsterkte.index(staal)
    fsk = fsk[T]

    cnom = betondekking(dstaaf, constructieklasse) #minimaal benodigde betondekking

    sigmaEd1, sigmaEd0, a1a = knoopA(Dk, ULS, theta)
    sigmaRda, fckc = maxA(sigmaEd1, fck)
    sigmaEd4, sigmaEd1b, a1b = knoopB(Dp, ULS, Dia, z, theta, c, dstaaf)
    sigmaRdb = maxB(fck)
    zmax = maxhef(H, a1a, a1b, theta)

    sigmaRd1 = max1(fck)

    F2par = staaf2(ULS, Dia, z)
    Asreq = max2(F2par, fsk)
    Atoe = Astoe(As)

    wk = scheur(c, dstaaf, SLS, ULS, F2par, fsk, b, fctm, Ecm, As)
    wmax = maxscheur(c, cnom)

```

```

lbrqd = bvl(F2par, fsk, dstaaf, As)
lbd = rvl(lbrqd, dstaaf)
vl = verankering(c, dstaaf, Dp, d)
O = lvl(c, dstaaf, dverdeel, cnom)
a, amin, bmax = tussenstaafafstand(Dp, O, c, dstaaf, n, b, dverdeel)

L = Dp + hoh + 2 * O
B = L

Vsfw = flankwapening(b, H, L, cnom)
Vsbw = bovenwapening(dstaaf, As, L, H, d, c)
Vsow = onderwapening(b, L, hoh, vl)
Vshw = hoofdwapening(hoh, vl, As)

Vb = betonvolume(H, L, L)
ms = staal massa(Vshw, Vsfw, Vsbw, Vsow)

prijs = kosten(Vb, ms, kb, ks)
milieu = duurzaamheid(Vb, ms, db, ds)

t = np.zeros(10)
t[0] = testdekking(c, cnom, dstaaf)
t[1] = testA(fck, sigmaRda, sigmaEd0)
t[2] = testB(sigmaEd1b, sigmaRdb, sigmaEd4)
t[3] = teststaaf2(Asreq, Atoe)
t[4] = scheurtest(wk, wmax, c, cnom)
t[5] = afstandtest(a, b, amin, bmax)
t[6] = testverankering(lbd, vl, a, dstaaf, b, Dp)
t[7] = lengte(H, Dia)
t[8] = testhef(z, zmax)
t[9] = teststaaf1(sigmaRd1, sigmaEd1)

if np.all(t == True):
    return L, Vb, O, Vshw, Vsfw, Vsbw, Vsow, ms, a, b, c, d, SLS, ULS, hoh, Dia, z, theta, cnom, sigmaEd1, sigmaEd0, sign
elif t[0] == False:
    print('betondekking onvoldoende')
elif t[1] == False:
    print('betonspanning in knoop a voldoet niet')
elif t[2] == False:
    print('betonspanning in knoop b voldoet niet')
elif t[3] == False:
    print('spanning in de wapeningsstaven voldoet niet')
elif t[4] == False:
    print('scheurwijdte voldoet niet')
elif t[5] == False:
    print('staafafstand voldoet niet')
elif t[6] == False:
    print('verankeringslengte voldoet niet')
elif t[7] == False:
    print('hoogte te klein, poer is geen gedrongen element')
elif t[8] == False:
    print('Inwendige hefboomsarm is te groot voor door de hoogte van de poer')
elif t[9] == False:
    print('spanning in drukschoor (1) voldoet niet')

```

Bijlage D

Python code: Optimalisatie

```
# coding: utf-8
```

```
# In[3]:
```

```
import numpy as np
from scipy.optimize import minimize_scalar
import warnings
get_ipython().run_line_magic('run', 'Def_berekening.ipynb')
```

```
##### Optimalisatie
```

```
#
```

```
# Dit script bevat een functie die de optimalisatie van een 4-paals blokpoer uitvoert. In de optimalisatie worden de berekeningen
```

```
# - Paaldiameter
```

```
# - Kolomdiameter
```

```
# - Permanente belasting
```

```
# - Variabele belasting
```

```
# - Kosten beton
```

```
# - Kosten staal
```

```
# - Milieubelasting beton
```

```
# - Milieubelasting staal
```

```
# - Betonsterkteklasse
```

```
#
```

```
# Daarnaast heeft de functie nog een aantal keyword arguments die een vaste waarde hebben, mocht het nodig zijn kunnen deze waarden
```

```
#
```

```
# In de functie worden de drie optimalisatievariabelen gevarieerd. Vervolgens wordt een loop opgezet waarin een berekening wordt uitgevoerd
```

```
#
```

```
# De output van de functie zijn de resultaten van de berekening voor de twee optimale poerconfiguraties en de waarden van de optimale variabelen
```

```
# In[2]:
```

```
def optimalisatie(Dp, Dk, Gk, Qk, beton, kb, ks, db, ds, GammaG = 1.2, GammaQ = 1.5, staal = 'B500B', dverdeel = 12, d = 400,
                 b = Dp + bt,
                 H = np.arange(100, 1500, 10),
                 dstaaf = [12, 16, 20, 25, 32, 40],
                 n = np.arange(2, 15),
                 kosten = np.zeros((len(H), len(dstaaf), len(n))),
                 duurzaamheid = np.zeros((len(H), len(dstaaf), len(n)))):
    for i in range(len(H)):
        for j in range(len(dstaaf)):
            for k in range(len(n)):
                kosten[i,j,k] = berekening(Dp, Dk, H[i], dstaaf[j], n[k], dverdeel, b, Gk, Qk, GammaG, GammaQ, constructieklasse)
```

```

        duurzaamheid[i,j,k] = berekening1(Dp, Dk, H[i], dstaaf[j], n[k], dverdeel, b, Gk, Qk, GammaG, GammaQ, constructieklasse, d, beton, staaf)

    if np.isnan(kosten).all():
        warnings.warn("Betonspanning is altijd hoger dan maximale betonspanning, kies hogere betonsterkteklasse of smallere k

    goedkoopst = np.nanmin(kosten)
    loc = np.argwhere(kosten == goedkoopst)

    duurzaamst = np.nanmin(duurzaamheid)
    loc1 = np.argwhere(duurzaamheid == duurzaamst)

    H1 = H[loc[0][0]]
    dstaaf1 = dstaaf[loc[0][1]]
    n1 = n[loc[0][2]]
    H2 = H[loc1[0][0]]
    dstaaf2 = dstaaf[loc1[0][1]]
    n2 = n[loc1[0][2]]

    out1 = controleberekening(Dp, Dk, H1, dstaaf1, n1, dverdeel, b, Gk, Qk, GammaG, GammaQ, constructieklasse, d, beton, staaf)
    out2 = controleberekening(Dp, Dk, H2, dstaaf2, n2, dverdeel, b, Gk, Qk, GammaG, GammaQ, constructieklasse, d, beton, staaf)

    return out1, out2, H1, dstaaf1, n1, H2, dstaaf2, n2

```

Bijlage E

Uitkomst optimalisatie

Belastingssituatie :

$G_k = 5600\text{ kN}$

$Q_k = 2400\text{ kN}$

$D_p = 450\text{ mm}$

$D_k = 600\text{ mm}$

Uitkomst kostenoptimalisatie :

hoogte : $h = 1380\text{ mm}$

staafdiameter : $D_{staaf} = 25\text{ mm}$

aantal staven : $n = 10$

kosten : 3112.98 euro

milieubelasting : 2572 kgCO_2e

Uitkomst duurzaamheidsoptimalisatie :

hoogte : $h = 1380\text{ mm}$

staafdiameter : $D_{staaf} = 25\text{ mm}$

aantal staven : $n = 10$

kosten : 3112.98 euro

milieubelasting : 2572 kgCO_2e

Uitkomst berekening voor kostenoptimalisatie

POERGEOMETRIE :

Lengte :	$L = B = h \cdot o \cdot h_{palen} + D_p + 2O$	= 2419 mm
Hoogte :	h	= 1380 mm
Hart – op – hartafstandpalen :	$h \cdot o \cdot h_{palen} = 3 * D_p$	= 1400 mm
Lengte poer voorbij de palen :	O	= 284 mm
Betonvolume :	$V_b = (h \cdot L \cdot B) / 10^9$	= 8.075 m ³

WAPENINGSCONFIGURATIE :

Staafdiameter :	D_{staaf}	= 25 mm
Aantal staven per trekband :	n	= 10
Massa staal :	$m_s = V_s * rho_s$	= 729 kg
Volume Staal :	$V_s = V_{s,hw} + V_{s,fw} + V_{s,bw} + V_{s,ow}$	= 0.0912 m ³
	$V_{s,hw} = 4(0.25\pi D_{staaf}^2 \cdot n) \cdot (h \cdot o \cdot h_{palen} + l_v)$	= 0.0714 m ³
	$V_{s,fw} = 0.001b \cdot 4h(L - 2c_{nom})$	= 0.0104 m ³
	$V_{s,bw} = 0.3(0.25\pi D_{staaf}^2 \cdot n) \cdot 2(L - 2c + h - d - 2c)$	= 0.0094 m ³
	$V_{s,ow} = 0.001b \cdot 2(h \cdot o \cdot h_{palen} + l_v)(1 - 2b/L)$	= 0.0000197 m ³
Tussenstaafafstand :	$a = (b - n \cdot D_{staaf}) / (n - 1)$	= 61 mm
Breedte trekband :	$b = D_p + bt$	= 800 mm
Toegepaste dekking :	c	= 50 mm
Lengte verankering na ombuiging :	d	= 400 mm

GEOMETRIE STAAFWERK :

Diagonale staaf :	$l_{diagonaal} = h \cdot o \cdot h_{palen} * \sqrt{2}$	= 1980 mm
Inwendige hefboomsarm :	$z = \min(0.2l_{diagonaal} + 0.4h; 0.6l_{diagonaal})$	= 948 mm
Inwendige hoek :	$theta = \tan^{-1}(z / (0.5l_{diagonaal} - 0.25D_k))$	= 48.5 graden

BEREKENING :

BGT :	$F = G_k + Q_k$	= 8000 kN
UGT :	$F_{Ed} = G_k \cdot \gamma_k + Q_k \cdot \gamma_Q$	= 10320 kN
Dekking :	$c_{nom} = c_{min,b} + \Delta c_{dev}$	= 35 mm
	$c_{max} = 2 * D_{staaf}$	= 50 mm

Staafwerk :

Knoop a :	$\sigma_{Ed,1a} = F_1 \cdot 10^3 / (D_k \cdot a_1)$	= 14.3 N/mm ²
	$\sigma_{Ed,0} = 2 \cdot (F_0 \cdot 10^3 / (D_k \cdot a_0))$	= 28.7 N/mm ²
	$\sigma_{Rd,a} = \min((\alpha_{cc} \cdot f_{ck,c}) / \gamma_c; k_4 \cdot v' \cdot f_{cd})$	= 46.4 N/mm ²
	$f_{ck,c} = f_{ck} \cdot (1.125 + 2.50 \cdot \sigma_2 / f_{ck})$	= 69.6 N/mm ²
Knoop b :	$\sigma_{Ed,4} = F_4 \cdot 10^3 / (a_4 \cdot D_p)$	= 12.74 N/mm ²
	$\sigma_{Ed,1b} = F_1 \cdot 10^3 / (a_{1,b} \cdot b_{1,b})$	= 13.17 N/mm ²
	$\sigma_{Rd,b} = k_3 \cdot v' \cdot f_{cd}$	= 13.20 N/mm ²
Staaf 1 :	$\sigma_{Ed,1a} = F_1 \cdot 10^3 / (D_k \cdot a_1)$	= 14.3 N/mm ²
	$\sigma_{Rd,1} = k_1 \cdot v' \cdot f_{cd}$	= 17.6 N/mm ²
Staaf 2 :	$F_{2,II} = F_2 \cdot \sqrt{2}$	= 1616 kN
	$A_{s,req} = F_{2,II} \cdot 10^3 / f_{sd}$	= 3718 mm ²
	$A_{s,toe} = 0.25 \cdot \pi \cdot D_{staaf}^2 \cdot n$	= 4909 mm ²

Scheurwijdte :

$w_k = s_{r,max} \cdot (e_{sm} - e_{cm})$	= 0.423 mm
$w_{max} = 0.3 \cdot (c / c_{min})$	= 0.429 mm
$c / c_{min} \leq 2$	

Verankering :

$l_{bd} = \max(l_b; l_{b,min}; 10D_{staaf}; 100)$	= 678 mm
$l_v = 2D_p(c + D_{staaf}) + 6 \cdot 0.25\pi D_{staaf} + d$	= 1118 mm

TOETSING :

Dekking :

Knoop a :

Knoop b :

Staafl 1 :

Staafl 2 :

Scheurwijdte :

Verankering :

Staaflafstand :

Breedte trekband :

$$c_{nom} = < c = < c_{max}$$

$$UC1 = \sigma_{Ed,1a} / \sigma_{Rd,a}$$

$$UC2 = \sigma_{Ed,0} / \sigma_{Rd,a}$$

$$UC1 = \sigma_{Ed,A} / \sigma_{Rd,b}$$

$$UC2 = \sigma_{Ed,1b} / \sigma_{Rd,b}$$

$$UC = \sigma_{Ed,1a} / \sigma_{Rd,1}$$

$$UC = A_{s,loc} / A_{s,req}$$

$$UC = w_k / w_{max}$$

$$UC = l_{bd} / l_v$$

$$a_{min} = \max(k_{1l} D_{staafl}; k_{2l} + d_g; 20) = < a$$

$$b_{max} = 2(0.5D_p + O - c - d_{staafl} - d_{verdeel}) >= b$$

$$35 = < 50 = < 50$$

$$= 0.309$$

$$= 0.618$$

$$= 0.965$$

$$= 0.998$$

$$= 0.814$$

$$= 0.757$$

$$= 0.986$$

$$= 0.606$$

$$37 = < 61$$

$$845 >= 800$$

Uitkomst berekening voor duurzaamheidsoptimalisatie

POERGEOMETRIE :

Lengte :	$L = B = h \cdot o \cdot h_{palen} + D_p + 2O$	= 2419 mm
Hoogte :	h	= 1380 mm
Hart – op – hartafstandpalen :	$h \cdot o \cdot h_{palen} = 3 * D_p$	= 1400 mm
Lengte poer voorbij de palen :	O	= 284 mm
Betonvolume :	$V_b = (h \cdot L \cdot B) / 10^9$	= 8.075 m ³

WAPENINGSCONFIGURATIE :

Staafdiameter :	D_{staaf}	= 25 mm
Aantal staven per trekband :	n	= 10
Massa staal :	$m_s = V_s * \rho_{ho_s}$	= 729 kg
Volume Staal :	$V_s = V_{s,hw} + V_{s,fw} + V_{s,bw} + V_{s,ow}$	= 0.0912 m ³
	$V_{s,hw} = 4(0.25\pi D_{staaf}^2 \cdot n) \cdot (h \cdot o \cdot h_{palen} + l_v)$	= 0.0714 m ³
	$V_{s,fw} = 0.001b \cdot 4h(L - 2c_{nom})$	= 0.0104 m ³
	$V_{s,bw} = 0.3(0.25\pi D_{staaf}^2 \cdot n) \cdot 2(L - 2c + h - d - 2c)$	= 0.0094 m ³
	$V_{s,ow} = 0.001b \cdot 2(h \cdot o \cdot h_{palen} + l_v)(1 - 2b/L)$	= 0.0000197 m ³
Tussenstaafafstand :	$a = (b - n \cdot D_{staaf}) / (n - 1)$	= 61 mm
Breedte trekband :	$b = D_p + bt$	= 800 mm
Toegepaste dekking :	c	= 50 mm
Lengte verankering na ombuiging :	d	= 400 mm

GEOMETRIE STAAFWERK :

Diagonale staaf :	$l_{diagonaal} = h \cdot o \cdot h_{palen} * \sqrt{2}$	= 1980 mm
Inwendige hefboomsarm :	$z = \min(0.2l_{diagonaal} + 0.4h; 0.6l_{diagonaal})$	= 948 mm
Inwendige hoek :	$\theta = \tan^{-1}(z / (0.5l_{diagonaal} - 0.25D_k))$	= 48.5 graden

BEREKENING :

BGT :	$F = G_k + Q_k$	= 8000 kN
UGT :	$F_{Ed} = G_k \cdot \gamma_k + Q_k \cdot \gamma_Q$	= 10320 kN
Dekking :	$c_{nom} = c_{min,b} + \Delta c_{dev}$	= 35 mm
	$c_{max} = 2 * D_{staaf}$	= 50 mm

Staafwerk :

Knoop a :	$\sigma_{Ed,1a} = F_1 \cdot 10^3 / (D_k \cdot a_1)$	= 14.3 N/mm ²
	$\sigma_{Ed,0} = 2 \cdot (F_0 \cdot 10^3 / (D_k \cdot a_0))$	= 28.7 N/mm ²
	$\sigma_{Rd,a} = \min((\alpha_{cc} \cdot f_{ck,c}) / \gamma_c; k_4 \cdot v' \cdot f_{cd})$	= 46.4 N/mm ²
	$f_{ck,c} = f_{ck} \cdot (1.125 + 2.50 \cdot \sigma_2 / f_{ck})$	= 69.6 N/mm ²
Knoop b :	$\sigma_{Ed,4} = F_4 \cdot 10^3 / (a_4 \cdot D_p)$	= 12.74 N/mm ²
	$\sigma_{Ed,1b} = F_1 \cdot 10^3 / (a_{1,b} \cdot b_{1,b})$	= 13.17 N/mm ²
	$\sigma_{Rd,b} = k_3 \cdot v' \cdot f_{cd}$	= 13.20 N/mm ²
Staaf 1 :	$\sigma_{Ed,1a} = F_1 \cdot 10^3 / (D_k \cdot a_1)$	= 14.3 N/mm ²
	$\sigma_{Rd,1} = k_1 \cdot v' \cdot f_{cd}$	= 17.6 N/mm ²
Staaf 2 :	$F_{2,II} = F_2 \cdot \sqrt{2}$	= 1616 kN
	$A_{s,req} = F_{2,II} \cdot 10^3 / f_{sd}$	= 3718 mm ²
	$A_{s,toe} = 0.25 \cdot \pi \cdot D_{staaf}^2 \cdot n$	= 4909 mm ²

Scheurwijdte :

$w_k = s_{r,max} \cdot (e_{sm} - e_{cm})$	= 0.423 mm
$w_{max} = 0.3 \cdot (c / c_{min})$	= 0.429 mm
$c / c_{min} \leq 2$	

Verankering :

$l_{bd} = \max(l_b; l_{b,min}; 10D_{staaf}; 100)$	= 678 mm
$l_v = 2D_p(c + D_{staaf}) + 6 \cdot 0.25\pi D_{staaf} + d$	= 1118 mm

TOETSING :

Dekking :

Knoop a :

Knoop b :

Staafl 1 :

Staafl 2 :

Scheurwijdte :

Verankering :

Staaflafstand :

Breedte trekband :

$$c_{nom} = < c = < c_{max}$$

$$UC1 = \sigma_{Ed,1a} / \sigma_{Rd,a}$$

$$UC2 = \sigma_{Ed,0} / \sigma_{Rd,a}$$

$$UC1 = \sigma_{Ed,A} / \sigma_{Rd,b}$$

$$UC2 = \sigma_{Ed,1b} / \sigma_{Rd,b}$$

$$UC = \sigma_{Ed,1a} / \sigma_{Rd,1}$$

$$UC = A_{s,loc} / A_{s,req}$$

$$UC = w_k / w_{max}$$

$$UC = l_{bd} / l_v$$

$$a_{min} = \max(k_{1l} D_{staafl}; k_{2l} + d_g; 20) = < a$$

$$b_{max} = 2(0.5D_p + O - c - d_{staafl} - d_{verdeel}) >= b$$

$$35 = < 50 = < 50$$

$$= 0.309$$

$$= 0.618$$

$$= 0.965$$

$$= 0.998$$

$$= 0.814$$

$$= 0.757$$

$$= 0.986$$

$$= 0.606$$

$$37 = < 61$$

$$845 >= 800$$

Bijlage F

Validatie berekening

In deze bijlage wordt de berekening van de poer vergeleken met de voorbeeldberekening uit EC2 in de praktijk. Op de bladzijde 64 staan de uitkomsten van de berekening in het script uit appendix C. In tabel F.1 staan de waarden van de belastingsituatie en de vast gekozen variabelen uit de voorbeeldberekening en in tabel F.2 staan de uitkomsten zoals die berekend zijn in de voorbeeldberekening [Betonvereniging, 2014].

Grootheid	waarde
h	1300 mm
L	2500 mm
$h.o.h_{palen}$	1400 mm
D_{staaf}	32 mm
n	8
c	50 mm
b	800 mm
d	400 mm
G_k	5600 kN
Q_k	2400 kN
Betonsterkte	'C30/37'

Tabel F.1: Uitgangssituatie voorbeeldberekening

Grootheid	waarde
c_{nom}	37 mm
z	916 mm
θ	47 graden
$l_{diagonaal}$	1980 mm
$\sigma_{Ed,0}$	28.7 N/mm ²
$\sigma_{Ed,1a}$	14.3 N/mm ²
$\sigma_{Rd,a}$	46.3 N/mm ²
$\sigma_{Ed,4}$	12.7 N/mm ²
$\sigma_{Ed,1b}$	12.9 N/mm ²
$\sigma_{Rd,b}$	13.2 N/mm ²
$A_{s,req}$	3846 mm ²
w_k	0.337 mm
w_{max}	0.405 mm
a	54 mm
l_{bd}	685 mm
l_v	1162 mm

Tabel F.2: Uitkomst berekening in Rode Boek

Uitkomst berekening in Python voor de uitgangssituatie uit tabel F.1

<i>Lengte :</i>	$L = B = h. o. h_{palen} + D_p + O$	$= 2500 \text{ mm}$
<i>Hoogte :</i>	h	$= 1300 \text{ mm}$
<i>Hart – op – hartafstandpalen :</i>	$h. o. h_{palen}$	$= 1400 \text{ mm}$
<i>Diagonale staaf :</i>	$l_{diagonaal} = h. o. h_{palen} * \sqrt{2}$	$= 1980 \text{ mm}$
<i>Inwendige hefboomsarm :</i>	$z = \min (0.2l_{diagonaal} + 0.4h ; 0.6l_{diagonaal})$	$= 916 \text{ mm}$
<i>Inwendige hoek :</i>	$theta = \tan^{-1} (z / (0.5l_{diagonaal} - 0.25D_k))$	$= 47.5 \text{ graden}$
<i>Dekking :</i>	$c_{nom} = c_{min,b} + \Delta c_{dev}$	$= 37 \text{ mm}$
<i>Staafterwerk :</i>		
<i>Knoop a :</i>	$\sigma_{Ed,1} = F_1 \cdot 10^3 / (D_k \cdot a_1)$ $\sigma_{Ed,0} = 2 \cdot (F_0 \cdot 10^3 / (D_k \cdot a_0))$ $\sigma_{Rd,a} = (\alpha_{cc} \cdot f_{ck,c}) / \gamma_c$	$= 14.3 \text{ N/mm}^2$ $= 28.7 \text{ N/mm}^2$ $= 46.4 \text{ N/mm}^2$
<i>Knoop b :</i>	$\sigma_{Ed,4} = F_4 \cdot 10^3 / (a_4 \cdot D_p)$ $\sigma_{Ed,1} = F_1 \cdot 10^3 / (a_{1,b} \cdot b_{1,b})$ $\sigma_{Rd,b} = k_3 \cdot v' \cdot f_{cd}$	$= 12.7 \text{ N/mm}^2$ $= 12.9 \text{ N/mm}^2$ $= 13.2 \text{ N/mm}^2$
<i>Staaft 2 :</i>	$F_{2,II} = F_2 / \sqrt{2}$ $A_{s,req} = F_{2,II} \cdot 10^3 / f_{sd}$ $A_{s,toe} = 0.25 \cdot \pi \cdot D_{staaf}^2 \cdot n$	$= 1673 \text{ kN}$ $= 3848 \text{ mm}^2$ $= 6434 \text{ mm}^2$
<i>Scheurwijdte :</i>	$w_k = s_{r,max} \cdot (e_{sm} - e_{cm})$ $w_{max} = 0.3 \cdot (c / c_{min})$	$= 0.336 \text{ mm}$ $= 0.405 \text{ mm}$
<i>Tussenstaaftafstand :</i>	$a = (b - n \cdot D_{staaf}) / (n - 1)$	$= 78 \text{ mm}$
<i>Verankering :</i>	$l_{bd} = \max(l_b ; l_{b,min} ; 10D_{staaf} ; 100)$ $l_v = 2D_p(c + D_{staaf}) + 6 \cdot 0.25\pi D_{staaf} + d$	$= 685 \text{ mm}$ $= 1165 \text{ mm}$