

# Optimalisatiemogelijkheden voor toepassing bovenbouw met UHSB-rijdek op bestaande pijlers

Reconstructie van de Prins Hendrikbrug te Dordrecht

## **AFSTUDEERSCRIPTIE**

|                |   |                                                                               |
|----------------|---|-------------------------------------------------------------------------------|
| Versie         | : | Definitief 1.0                                                                |
| Datum          | : | 13 juni 2017                                                                  |
| Opdrachtgevers | : | Ingenieursbureau Gemeentewerken Rotterdam (IBR)<br>Hogeschool Rotterdam (HRO) |
| Opsteller      | : | T. Oorschot                                                                   |
| Opleiding      | : | Civiele Techniek                                                              |
| Begeleiders    | : | Ing. M. Attahiri MSEng RC (IBR)<br>Ing. S.G. van Rosmalen (HRO)               |





## TITELPAGINA

---

**Titel**

Optimalisatiemogelijkheden voor toepassing bovenbouw met UHSB-rijdek op bestaande pijlers

**Ondertitel**

Reconstructie van de Prins Hendrikbrug te Dordrecht

**Versie**

Definitief

**Datum**

13 juni 2017

**Auteur**

T. (Tom) Oorschot

**Contact**

t\_oorschot@hotmail.com

**Studentnummer**

0875954

**Begeleiders**

Ing. M. (Mustapha) Attahiri MSEng RC  
Ing. S.G. (Sven) van Rosmalen

**Contact**

m.attahiri@rotterdam.nl  
s.g.van.rosmalen@hr.nl

**Instelling**

IBR  
HRO

Rotterdam, 13 juni 2017

**Ingenieursbureau Gemeentewerken Rotterdam (IBR)**

Cluster Stadsontwikkeling  
Afdeling Infra Constructies  
Wilhelminakade 179  
3002 AN Rotterdam



**Hogeschool Rotterdam (HRO)**

Instituut voor de Gebouwde Omgeving  
Opleiding Civiele Techniek  
G.J. de Jonghweg 4-6  
3015 GG Rotterdam



*Niets uit deze uitgave mag worden gekopieerd, verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt worden door middel van druk, fotokopie of welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Ingenieursbureau Gemeentewerken Rotterdam.*

**Titel**

Haalbaarheidsstudie hergebruik bestaande  
waterpijlers bij optimalisatie UHSB-rijdek

**Versie**

Definitief 1.0

**Datum**

13 juni 2017



**Titel**

Haalbaarheidsstudie hergebruik bestaande  
waterpijlers bij optimalisatie UHSB-rijdek

**Versie**

Definitief 1.0

**Datum**

13 juni 2017

## SAMENVATTING

---

De gemeente Dordrecht is voornemens één van de belangrijkste hoofdontsluitingsroutes van de stad te reconstrueren: het traject Merwedestaat – Oranjelaan. Binnen dit traject ligt de Prins Hendrikbrug (PH-brug), die eveneens gereconstrueerd dient te worden. Bij de reconstructie van deze brug zullen de pijlers indien mogelijk behouden worden en slechts de bovenbouw vervangen.

Uit een reeds gemaakte haalbaarheidsstudie door het Ingenieursbureau Drechtsteden is gebleken dat de pijlers van de PH-brug constructief hergebruikt kunnen worden. Aandachtspunt hierbij is het paal draagvermogen van de noordelijke pijler. Twee bovenbouwvarianten met een ander type rijdek zijn onderzocht in de genoemde studie: een orthotroop stalen rijdek en een rijdek van ultrahogesterktebeton (UHSB). Een globale berekening wijst uit dat de belastingen van de eerste variant opgenomen kunnen worden door de bestaande fundering van de noordelijke pijler, maar die van de tweede variant niet. Opdrachtgever gemeente Dordrecht wenst een onderzoek naar de mogelijkheden om de maatgevende paalbelasting onder de noordelijke pijler te reduceren met ten minste 8,3% en zo de variant met een UHSB-rijdek toch te kunnen realiseren.

De mogelijkheden om de belastingen van de UHSB-variant op te kunnen nemen worden gezocht in funderings- en ontwerpoptimalisaties. De meest relevante onderzoeksmogelijkheden op dit moment zijn het beschouwen van de huidige fundering als een paal-plaatfundering, het aanbrengen van steenbestorting en het reduceren van de rijdekdikte bij gehanteerd of aangepast balkrooster.

Een beschouwing van de noordelijke pijlerfundering als paal-plaatfundering is onderzocht, echter levert deze mogelijkheid niet het verwachtte resultaat op. De maatgevende paalbelasting onder de noordelijke pijler wordt niet gereduceerd door deze beschouwing.

De toepassing van steenbestorting rondom de noordelijke pijlerfundering blijkt een extra belasting op de palen te leveren. Deze extra belasting is afkomstig van het gewicht van de bestorting en negatieve kleeft op de funderingspalen.

Een reductie van de UHSB-rijdekdikte bij het gehanteerde balkrooster blijkt mogelijk ten opzichte van de gehanteerde dikte in de genoemde haalbaarheidsstudie. Dit levert een vermindering van de maatgevende paalbelasting van 6,0% op.

De reductie van het UHSB-rijdek is onderzocht bij een aangepast balkrooster, bestaande uit meer hoofdliggers en dwarsdragers, waardoor de overspanningen van het rijdek kleiner worden. Het rijdek kan gereduceerd worden en levert een vermindering van de paalbelasting van 7,9% op, rekening houdend met het extra staalgewicht van de toegevoegde liggers van het aangepaste rooster.

Aan het einde van het onderzoek kan geconcludeerd worden dat de toepassing van één optimalisatiemogelijkheid niet zal leiden tot de minimaal benodigde belastingafname. Een combinatie van de onderzochte funderings- en ontwerpoptimalisaties blijkt mogelijk, echter zal dit eveneens niet resulteren in de mogelijkheid de bovenbouwvariant met UHSB-rijdek toe te passen bij de reconstructie van de PH-brug.

Geadviseerd wordt om een vervolgonderzoek uit te voeren naar de mogelijkheid om mogelijk een andere ontwerpoptimalisatie toe te passen. Mogelijkheden hiervoor zijn het verplaatsen van de remkrachten van de noordelijke pijler naar het landhoofd en het voorzegen van de bovenbouwconstructie.

## SUMMARY

---

The intention of the municipality of Dordrecht is to reconstruct one of the most important main routes of the city: Merwedestraat – Oranjelaan. The Prins Hendrikbrug (PH-bridge) is located within this route and needs to be reconstructed as well. The foundation of this bridge should be retained if possible during the reconstruction process. Only the superstructure will be replaced.

Ingenieursbureau Drechtsteden has investigated the possibility of reusing the existing piers of the PH-bridge. This study shows that the piers can constructively be reused. A point of attention is the pile bearing capacity of the northern pier. Two superstructure options with a different type of vehicle deck are examined in the study of Ingenieursbureau Drechtsteden: an orthotropic steel vehicle deck and a vehicle deck of ultra-high performance fibre-reinforced concrete (UHPFRC). A calculation shows that the piles of the northern pier are able to take the loads of the first option, but fail at the second. The initiator's wish is an investigation to the possibilities to reduce the design load of the piles of the northern pier by at least 8,3%, so that the UHPFRC-option can be realised.

Optimizations in the foundation and the design of the vehicle deck are investigated to find if the piles are able to take the load of the UHPFRC-option. The most relevant research possibilities to examine at the moment are: considering the current foundation as a pile-footing foundation, placing fill on the river bed around the northern pier and reducing the thickness of the UHPFRC-vehicle deck on the proposed or a customized beam grid.

Considering the foundation of the northern pier as a pile-footing foundation has been investigated, however, this optimization did not lead to the expected result. The design load of the piles will not be reduced by this optimization.

Placing fill on the river bed turns out in an extra load on the piles. This extra load originates from the weight of the rocks on the foundation and the negative skin friction.

Reducing the thickness of the UHPFRC-vehicle deck on the proposed beam grid is possible compared to the thickness used in the study of Ingenieursbureau Drechtsteden. This optimization results in a reduction of the design load by 6,0%.

A reduction of the UHPFRC-vehicle deck has been investigated on a customized beam grid, which exists of more main beams and cross beams. This results in a reduction of the spans. The vehicle deck can be reduced, which decreased the design load by 7,9%, taking in consideration the extra weight of the added beams.

At the end of this research there can be concluded that applying one optimization will not lead to the minimum required reduction of the loads on the piles. A combination of the foundation and design optimizations that are investigated in this research is possible, but will not result in the possibility of using a superstructure with UHPFRC-vehicle deck in the reconstruction of the PH-bridge.

A follow-up research to the possibility of using another design optimization is recommended. Possibilities are shifting the braking forces from the northern pier to the abutment and building the superstructure in arch-form.

## INHOUDSOPGAVE

|                                                            |           |
|------------------------------------------------------------|-----------|
| Titelpagina .....                                          | 1         |
| Samenvatting.....                                          |           |
| Summary .....                                              |           |
| Voorwoord .....                                            |           |
| <b>1 Inleiding .....</b>                                   | <b>1</b>  |
| 1.1 Project .....                                          | 1         |
| 1.2 Aanleiding.....                                        | 1         |
| 1.3 Doelstelling.....                                      | 2         |
| 1.4 Opdrachtgever.....                                     | 2         |
| 1.5 Leeswijzer .....                                       | 2         |
| <b>2 Probleemanalyse .....</b>                             | <b>3</b>  |
| 2.1 Bestaande haalbaarheidsstudie .....                    | 3         |
| 2.1.1 Huidig en beoogd ontwerp.....                        | 3         |
| 2.1.2 Bovenbouwvarianten .....                             | 5         |
| 2.1.3 Afmetingen .....                                     | 5         |
| 2.1.4 Belastingen, belastingcombinaties en –factoren ..... | 6         |
| 2.1.5 Paalbelasting en paal draagvermogen .....            | 6         |
| 2.1.6 Conclusie haalbaarheidsstudie .....                  | 6         |
| 2.2 Reactie opdrachtgever .....                            | 7         |
| 2.3 Optimalisatiemogelijkheden .....                       | 7         |
| 2.3.1 Funderingsoptimalisatie .....                        | 7         |
| 2.3.2 Ontwerptoptimalisatie.....                           | 8         |
| 2.3.3 Te onderzoeken optimalisatiemogelijkheden .....      | 8         |
| <b>3 Funderingsvarianten.....</b>                          | <b>9</b>  |
| 3.1 Paal-plaatfundering .....                              | 10        |
| 3.2 Steenbestorting .....                                  | 14        |
| 3.3 Bodeminjectie.....                                     | 16        |
| 3.4 Conclusie .....                                        | 17        |
| <b>4 Theoretisch kader .....</b>                           | <b>18</b> |
| 4.1 Plaxis model.....                                      | 18        |
| 4.2 Plaxis parameters .....                                | 19        |
| 4.2.1 Grondparameters .....                                | 19        |
| 4.2.2 Materiaalparameters.....                             | 20        |
| 4.2.3 Plaatparameters .....                                | 21        |

|       |                                                        |    |
|-------|--------------------------------------------------------|----|
| 4.2.4 | Veerparameters.....                                    | 22 |
| 4.2.5 | Steenbestortingparameters .....                        | 23 |
| 4.2.6 | Onder- en bovengrens stijfheidsparameters .....        | 23 |
| 5     | Onderzoeksvragen.....                                  | 24 |
| 6     | Onderzoeksaanpak.....                                  | 25 |
| 7     | Resultaten optimalisaties .....                        | 27 |
| 7.1   | Paal-plaatfundering.....                               | 27 |
| 7.1.1 | Uitgangspunten .....                                   | 27 |
| 7.1.2 | Resultaten handberekening 1 .....                      | 30 |
| 7.1.3 | Resultaten handberekening 2 .....                      | 31 |
| 7.1.4 | Resultaten Plaxis Classic Model.....                   | 31 |
| 7.1.5 | Conclusie deelvraag 1a.....                            | 32 |
| 7.2   | Steenbestorting.....                                   | 33 |
| 7.2.1 | Uitgangspunten .....                                   | 33 |
| 7.2.2 | Resultaten Plaxis model steenbestorting.....           | 34 |
| 7.2.3 | Conclusie deelvraag 1b.....                            | 34 |
| 8     | Ontwerptoptimalisaties .....                           | 36 |
| 8.1   | Optimalisatie rijdekdicke gehanteerd balkrooster ..... | 36 |
| 8.2   | Optimalisatie rijdekdicke aangepast balkrooster .....  | 36 |
| 8.3   | Conclusie ontwerptoptimalisaties .....                 | 36 |
| 9     | Combinatiemogelijk optimalisatiemogelijkheden.....     | 37 |
|       | Conclusies en aanbevelingen .....                      | 38 |
|       | Conclusies.....                                        | 38 |
|       | Aanbevelingen.....                                     | 40 |
|       | Literatuurlijst .....                                  | 41 |
|       | Bijlagen .....                                         | 43 |
|       | Bijlage A. Literatuurstudie .....                      | 43 |
|       | Bijlage B. Handberekeningen .....                      | 44 |
|       | Bijlage C. Plaxis berekeningen .....                   | 45 |

## VOORWOORD

---

Dit rapport betreft mijn afstudeerscriptie uitgevoerd bij het Ingenieursbureau Rotterdam. Dit is het laatste deel van de opleiding Civiele Techniek aan de Hogeschool Rotterdam.

Het afstuderen is uitgevoerd in samenwerking met studiegenoot William Benard. Het huidige collegejaar is het laatste jaar waarin duo-afstuderen binnen de opleiding toegestaan wordt, waardoor er gewijzigde eisen en voorwaarden gelden ten opzichte van voorgaande jaren. Zo dienen beide studenten een aparte afstudeerscriptie in te leveren, zodat de scheiding tussen de studenten inzichtelijker is.

Gezien het feit dat de opdracht in een tweetal is uitgevoerd, zijn de inleiding en probleemanalyse gelijk voor beide studenten. Na het uitvoeren van de probleemanalyse zijn de afstudeeronderzoeken gescheiden van elkaar uitgevoerd, met uitzondering van het laatste gedeelte. In dit gedeelte zijn beide onderzoeken aan elkaar gekoppeld en wordt een gezamenlijke conclusie en aanbeveling gegeven ten aanzien van de doelstelling.

Bij deze wil ik mijn dank uitspreken naar iedereen die mij geholpen heeft dit resultaat neer te zetten. In het bijzonder wil ik mijn twee begeleiders noemen.

Als eerste de heer Attahiri die mijn directe begeleider en aanspreekpunt was binnen het Ingenieursbureau Rotterdam. Mede door diens begeleiding en de wekelijkse voortgangsgesprekken is deze scriptie tot stand gekomen.

Als tweede dhr. S. van. Rosmalen die de rol van begeleider op zich nam vanuit de Hogeschool Rotterdam. Mede door diens ervaring met afstudeerscripties heeft hij mij van goed commentaar kunnen voorzien.

Rotterdam, 13 juni 2017

Tom (T.) Oorschot



# 1 INLEIDING

Om inzicht te krijgen in de achtergrond van het afstudeeronderzoek, wordt in dit hoofdstuk ingegaan op het bijbehorende project, de aanleiding van het onderzoek en de opdrachtgever.

## 1.1 PROJECT

De gemeente Dordrecht is voornemens één van de belangrijkste hoofdontsluitingsroutes van de stad te reconstrueren, om zo een stedenbouwkundige en verkeerskundige verbetering te realiseren. Deze ontsluitingsroute betreft het traject Merwedestaat – Oranjelaan. Binnen dit traject ligt de Prins Hendrikbrug (PH-brug), die eveneens gereconstrueerd dient te worden. De locatie van deze brug is weergegeven in figuur 1.1. De reconstructie van de PH-brug wordt binnen het gehele project als een apart project gezien.



*Figuur 1.1. Locatie Prins Hendrikbrug in Dordrecht.  
Bron: Google Maps (15-03-2017).*

## 1.2 AANLEIDING

Uit de haalbaarheidsstudie van het Ingenieursbureau Drechtsteden (Ingenieursbureau Drechtsteden, 2016) komt naar voren dat de pijlers van de PH-

brug constructief hergebruikt kunnen worden voor de geplande uitbreiding. Voorwaarde voor hergebruik is dat er aangetoond dient te worden dat de belastingen van het nieuwe ontwerp opgenomen kunnen worden door de bestaande fundering. Het brugdek introduceert een verticale belasting op de fundering ten gevolge van de zwaartekracht en de verkeersbelasting. Tevens wordt er via het rijdek een horizontale kracht geïntroduceerd en een moment ten gevolge van de remkrachten veroorzaakt door het verkeer. Het krachten- en momentenspel is in de nieuwe situatie hetzelfde als in de oude situatie, zij het dat de belastingen groter worden ten gevolge van meer verkeersafwikkeling.

De bovenbouw van de brug dient volledig vervangen te worden. De vervanging van het rijdek van de bovenbouw is in de genoemde haalbaarheidsstudie uitgegaan van twee varianten:

- Een variant met toepassing van een orthotroop stalen rijdek;
- Een variant met een rijdek van ultra-hogesterktebeton (UHSB).

Deze tweede variant heeft de voorkeur vanwege de lagere kosten op lange termijn en het minder vereiste onderhoud ten opzichte van de eerste variant. Uit de berekeningen van de paalbelasting in de genoemde haalbaarheidsstudie komt echter naar voren dat de geprefereerde UHSB-variant niet toe te passen is op de bestaande pijlers. De paalbelasting van deze variant is groter dan het paal draagvermogen. De opdrachtgever wenst een onderzoek om deze variant toch te kunnen realiseren.

### 1.3 DOELSTELLING

De doelstelling van dit onderzoek betreft het aantonen dat de bestaande noordelijke pijler in de huidige staat te hergebruiken is bij toepassing van een bovenbouw met een UHSB-rijdek. In andere woorden: het aantonen dat de maatgevende paalbelasting bij de UHSB-variant voldoet aan het paaldraagvermogen van de funderingspalen onder de noordelijke pijler.

### 1.4 OPDRACHTGEVER

De opdrachtgever van het reconstructieproject is de gemeente Dordrecht. Zij heeft Ingenieursbureau Drechtsteden de opdracht gegeven om een reconstructieontwerp van de PH-brug te maken.

Ingenieursbureau Drechtsteden heeft voor deze opdracht Ingenieursbureau Rotterdam ingeschakeld. Het ingenieursbureau van de gemeente Rotterdam heeft meer kennis en ervaring met dergelijke projecten. Het afstudeeronderzoek is uitgevoerd in opdracht van het Ingenieursbureau Rotterdam.

### 1.5 LEESWIJZER

In deze paragraaf is beschreven wat er in ieder hoofdstuk terug te vinden is inclusief het doel van het desbetreffende hoofdstuk. Achtereenvolgens komt het volgende aan de orde:

In dit rapport komen achtereenvolgens de volgende:

- Hoofdstuk 1: Achtergrondinformatie betreffende de afstudeeropdracht. Hierin worden het project, de aanleiding, de doelstelling en de opdrachtgever benoemd.
- Hoofdstuk 2: Om meer inzicht te krijgen in de problematiek wordt ingegaan op de probleemstelling die naar voren komt in een gemaakte haalbaarheidsstudie, de reactie van de opdrachtgever hierop en mogelijke optimalisaties.
- Hoofdstuk 3: Mogelijke optimalisaties ten aanzien van de noordelijke pijlerfundering worden onderzocht, waarna de afweging wordt gemaakt welke optimalisatie op dit moment het meest relevant is. Deze mogelijkheid zal verder onderzocht worden.
- Hoofdstuk 4: Theoretische achtergrond van de meest relevante ontwerpoptimalisatie wordt beschreven.
- Hoofdstuk 5: De te onderzoeken hoofd- en deelvragen worden hierin weergegeven. Daarnaast wordt in verband met duo-afstuderen de scheiding in afstudeeronderzoeken toegelicht.
- Hoofdstuk 6: Een toelichting is gegeven op de aanpak die gehanteerd is bij dit onderzoek.
- Hoofdstuk 7: De resultaten van de twee onderzochte en meest relevant bevonden funderingsoptimalisaties worden weergegeven.
- Hoofdstuk 8: De resultaten van de twee onderzochte en meest relevant bevonden ontwerpoptimalisaties worden benoemd. Dit betreft niet zelf verricht onderzoek, echter is deze informatie benodigd om een overkoepelende conclusie te kunnen trekken ten aanzien van twee afstudeeronderzoeken met dezelfde doelstelling.
- Hoofdstuk 9: Een mogelijke combinatie van de onderzochte funderings- en ontwerpoptimalisaties wordt toegelicht.
- Conclusie en aanbevelingen: Aan het einde van het onderzoek worden de conclusies en aanbevelingen ten aanzien van het gehele afstudeeronderzoek weergegeven.

## 2 PROBLEEMANALYSE

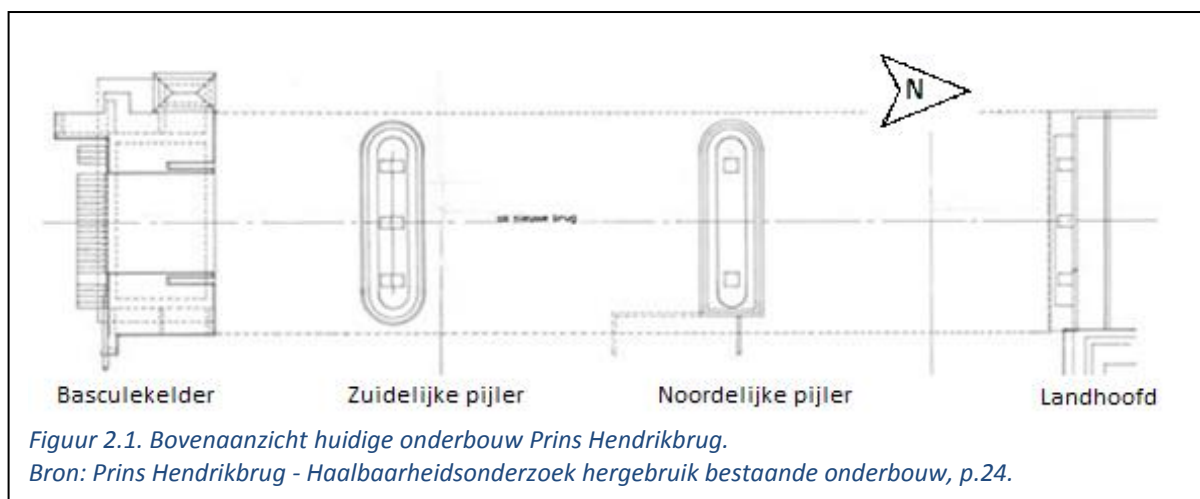
In dit hoofdstuk wordt het probleem geanalyseerd dat naar voren komt uit een reeds uitgevoerde haalbaarheidsstudie door Ingenieursbureau Drechtsteden (IBD) in samenwerking met Ingenieursbureau Gemeentewerken Rotterdam (IBR) (*Ingenieursbureau Drechtsteden, 2016*). Aan de hand van deze analyse komen de doelstelling en de optimalisatiemogelijkheden naar voren.

### 2.1 BESTAANDE HAALBAARHEIDSSSTUDIE

De Prins Hendrikbrug (PH-brug) zal in opdracht van de gemeente Dordrecht gereconstrueerd worden. Voordat dit onderzoek uitgevoerd wordt, is het van belang de huidige situatie te kennen, evenals de beoogde situatie.

#### 2.1.1 Huidig en beoogd ontwerp

De PH-brug bestaat uit een tweetal vaste brugdelen, te weten die tussen het landhoofd en de noordelijke pijler en die tussen de noordelijke en zuidelijke pijler, en een basculedeel tussen de zuidelijke pijler en de basculekelder. In totaal maakt de brug drie overspanningen, zie figuur 2.1 en figuur 2.2.



De bovenbouw is gefundeerd op de onderbouw, bestaande uit (in volgorde van links naar rechts conform figuur 2.1):

- Basculekelder;
- Zuidelijke pijler;
- Noordelijke pijler;
- Landhoofd.



*Figuur 2.2. Aanzicht huidige ontwerp Prins Hendrikbrug, gezien vanaf de zuidelijke oever.  
Foto door William Benard (09-02-2017).*

De huidige noordelijke en zuidelijke pijler zullen zonder enige aanpassing hergebruikt kunnen worden, terwijl het landhoofd en de basculekelder hergebruikt kunnen worden na uitbreiding hiervan. Het beoogde ontwerp van de onderbouw van de PH-brug zal vrijwel geen wijzingen hebben.

#### **Huidig bovenbouwontwerp**

Het huidige ontwerp van de onderbouw conform de haalbaarheidsstudie is circa 18,30 meter breed, met de volgende indeling:

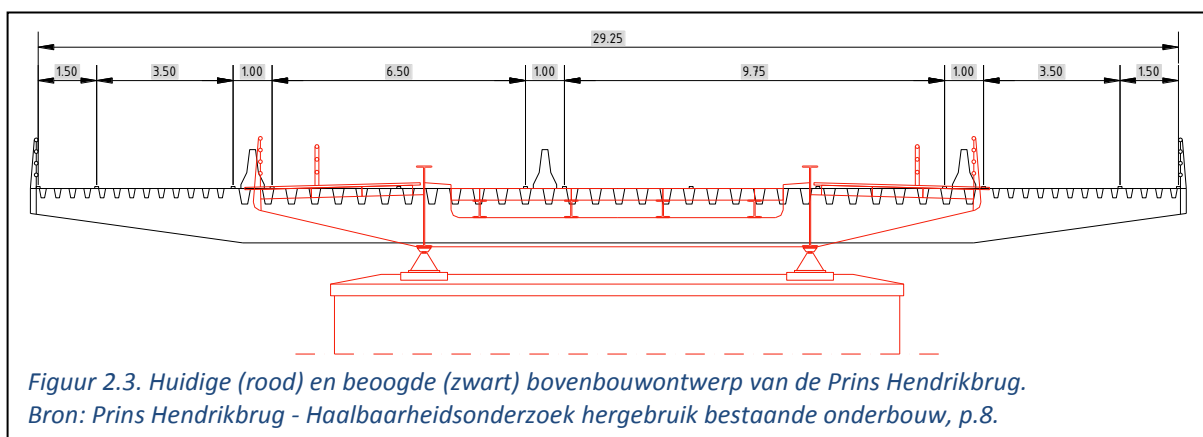
- Drie rijstroken, waarvan één wisselstrook;
- Twee enkele fietspaden;
- Twee voetpaden.

#### **Beoogd bovenbouwontwerp**

Het beoogde ontwerp van de bovenbouw conform de haalbaarheidsstudie is circa 29,25 meter breed, met de volgende indeling:

- Vijf rijstroken, waarvan één opstelstrook naar Stadswerven;
- Twee dubbele fietspaden;
- Twee voetpaden.

Een weergave van het huidige en beoogde bovenbouwontwerp is gegeven in figuur 2.3.



*Figuur 2.3. Huidige (rood) en beoogde (zwart) bovenbouwontwerp van de Prins Hendrikbrug.  
Bron: Prins Hendrikbrug - Haalbaarheidsonderzoek hergebruik bestaande onderbouw, p.8.*

### 2.1.2 Bovenbouwvarianten

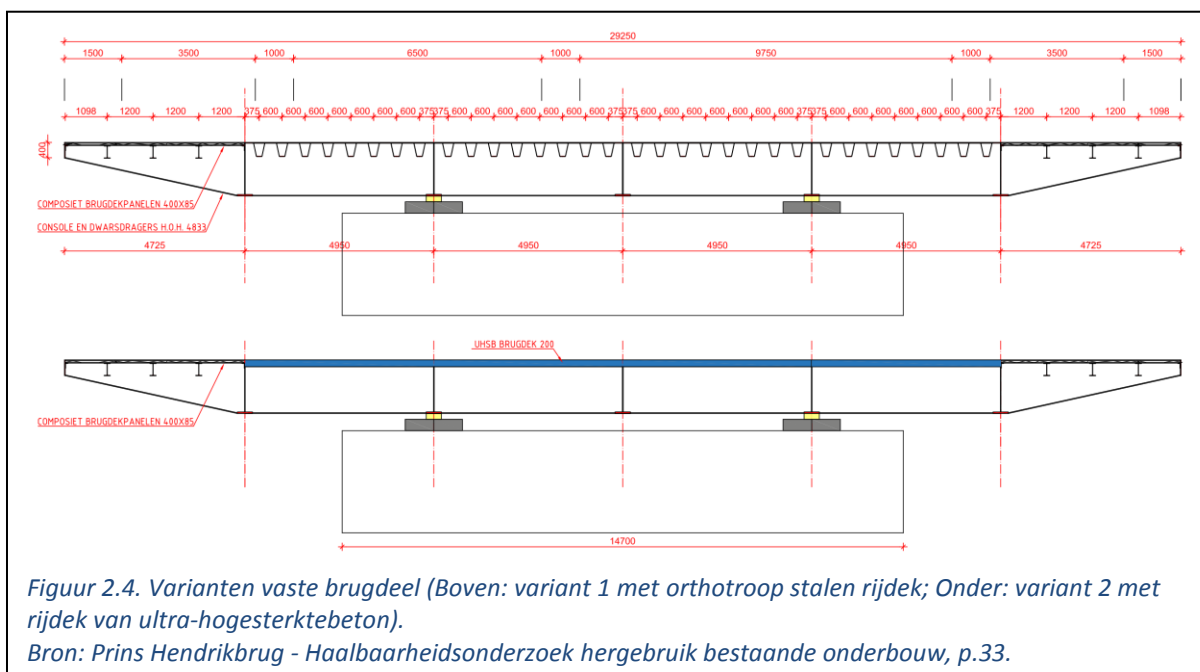
In de haalbaarheidsstudie is uitgegaan van een tweetal varianten voor de bovenbouw van het vaste brugdeel. Een beschrijving is gegeven in tabel 2.1 en een weergave in figuur 2.4.

**Tabel 2.1. Bovenbouwvarianten vaste brugdeel**

*Bron: Prins Hendrikbrug – Haalbaarheidsonderzoek hergebruik bestaande onderbouw, p.32.*

| Varianten | Beschrijving                                                                                                                             |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Variant 1 | Stalen balkrooster met orthotroop stalen rijdek en VVK-halffabricaat voor langzaam verkeer (troghoogte 350 millimeter).                  |
| Variant 2 | Stalen balkrooster met rijdek van ultra-hogesterktebeton (UHSB) en VVK-halffabricaat voor langzaam verkeer (rijdekdikte 200 millimeter). |

De voorgestelde varianten zijn gebaseerd op het volgende uitgangspunt: het eigen gewicht van de nieuwe dekconstructie dient ongeveer gelijk te zijn aan die van de huidige dekconstructie. Indien aan dit uitgangspunt voldaan wordt, lijkt hergebruik van de huidige onderbouw aannemelijk.



### 2.1.3 Afmetingen

Bij het opstellen van dit onderzoek zijn de afmetingen gehanteerd conform het overzicht in tabel 2.2. In overleg met projectadviseur Attahiri van IBR zijn deze afmetingen in de afstudeeropdracht overgenomen, evenals de resultaten die gebaseerd zijn op deze waarden.

**Tabel 2.2. Afmetingen van de reconstructie van de PH-brug**

*Bron: Prins Hendrikbrug – Haalbaarheidsonderzoek hergebruik bestaande onderbouw, p.53.*

| Onderdeel                                           | Afmetingen [m] | Afmeting op basis van |
|-----------------------------------------------------|----------------|-----------------------|
| Lengte totale bovenbouw                             | 73,60          | Bestaande onderbouw   |
| Lengte bouwbouw vaste deel                          | 58,00          | Bestaande onderbouw   |
| Breedte totale bovenbouw                            | 29,25          | Beoogd profiel        |
| Overspanning landhoofd – noordelijke pijler         | 29,00          | Bestaande onderbouw   |
| Overspanning noordelijke pijler – zuidelijke pijler | 29,00          | Bestaande onderbouw   |
| Overspanning zuidelijke pijler – basculekelder      | 15,60          | Bestaande onderbouw   |

#### 2.1.4 Belastingen, belastingcombinaties en –factoren

De belastingen die zijn toegepast in de door Ingenieursbureau Drechtsteden uitgevoerde haalbaarheidsstudie worden overgenomen in dit onderzoek. De combinaties die in deze studie zijn gemaakt, met elk één belastingtype als dominante belasting, zijn weergegeven in tabel 2.3.

**Tabel 2.3. Verantwoording van groepsaanduiding en bijbehorende dominante belasting**

*Bron: Prins Hendrikbrug – Haalbaarheidsonderzoek hergebruik bestaande onderbouw, p.55.*

| Groepsaanduiding | Dominante belasting                             |
|------------------|-------------------------------------------------|
| Gr1a             | Verkeersbelasting en voetgangers- of fietspaden |
| Gr2              | Horizontale krachten                            |
| Gr3              | Voetgangersbelastingen                          |
| Gr4              | Mensenmenigte                                   |
| Gr5              | Speciale voertuigen                             |
| W                | Wind                                            |
| T                | Thermische belasting                            |

#### 2.1.5 Paalbelasting en paal draagvermogen

De gemiddelde paal draagvermogens van het landhoofd, de noordelijke en zuidelijke pijler zijn berekend op basis van nieuwe sonderingen rondom elk van deze onderdelen (*Ingenieursbureau Rotterdam, 2016*). De maatgevende paalbelastingen voor beide varianten zijn berekend met behulp van een modellering in Scia Engineer, gemodelleerd door de heer Attahiri (2016).

De waarden van de paalbelasting en het paal draagvermogen zijn weergegeven in tabel 2.4.

**Tabel 2.4. Paalbelasting en paal draagvermogen onderbouwonderdelen vaste brugdeel**

*Bronnen: Prins Hendrikbrug – Haalbaarheidsonderzoek hergebruik bestaande onderbouw, p.54–58 & Prins Hendrikbrug – Rapportage veldwerkonderzoek, bijlage B.*

|                                                                  | T.p.v. landhoofd<br>[kN] | T.p.v. noordelijke<br>pijler [kN] | T.p.v. zuidelijke<br>pijler [kN] |
|------------------------------------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| Maatgevende paalbelasting variant 1;<br>orthotroop stalen rijdek | 373                      | 747                               | 582                              |
| Maatgevende paalbelasting variant 2;<br>UHSB-rijdek              | 415                      | 818                               | 610                              |
| Gemiddeld paal draagvermogen                                     | ± 925                    | ± 750                             | ± 900                            |

Bij de gegeven maatgevende paalbelastingen is uitgegaan dat de noordelijke pijlerfundering de horizontale belasting opneemt, zoals de rembelasting. Als deze kracht niet door de noordelijke pijlerfundering opgenomen dient te worden, wordt de maatgevende paalbelasting 697 kilonewton (kN). De fundering onder de noordelijke pijler voldoet in dit geval.

#### 2.1.6 Conclusie haalbaarheidsstudie

In de gemaakte haalbaarheidsstudie is geconcludeerd dat de bovenbouwvariant met een rijdek van ultra-hogesterktebeton (UHSB) bij de noordelijke pijler niet voldoet: de maatgevende paalbelasting geeft een relatief geringe overschrijding van het paal draagvermogen (818 kN > 750 kN; 8,3%).

Op basis van deze constatering is de variant met het orthotroop stalen rijdek door het Ingenieursbureau Drechtsteden, op advies van Ingenieursbureau Rotterdam, aan de opdrachtgever gemeente Dordrecht aangedragen als toepassingsmogelijkheid om de huidige pijlers te hergebruiken.

## 2.2 REACTIE OPDRACHTGEVER

In reactie op de aangedragen variant met een orthotroop stalen rijdek, heeft de gemeente Dordrecht aangegeven dat zij een rijdek prefereert dat onderhoudsarm en naar verwachting over lange termijn goedkoper is. De variant met het UHSB-rijdek komt hierbij weer als mogelijkheid naar voren, aangezien deze variant voldoet aan de gestelde wensen van de opdrachtgever.

Het probleem dat naar voren is gekomen uit de haalbaarheidsstudie, zie paragraaf 2.1, is dat de variant met het geprefereerde UHSB-rijdek resulteert in een te grote paalbelasting. Echter, in de haalbaarheidsstudie is geconcludeerd dat de oplossing met het UHSB-rijdek resulteert in een overschrijding van de maximaal toelaatbare drukkracht in de palen van de noordelijke pijler met maximaal 10%. Gezien deze geringe overschrijding wil het Ingenieursbureau Dordrecht nader onderzoeken of er mogelijkheden zijn om de drukkrachten te verlagen zonder dat de pijlers aangepast dienen te worden.

Op basis van de reactie van de opdrachtgever zal verder worden ingegaan op de optimalisatiemogelijkheden die zouden kunnen resulteren in het behalen van deze doelstelling.

## 2.3 OPTIMALISATIEMOGELIJKHEDEN

Te onderzoeken optimalisatiemogelijkheden zijn gerelateerd aan de noordelijke pijler, zie figuur 2.5. De zuidelijke pijler en het landhoofd hebben beiden een capaciteitsoverschot, zoals blijkt uit de gemaakte haalbaarheidsstudie, waardoor dit onderzoek zich toespitst op de noordelijke pijler.

Mogelijke optimalisaties kunnen gevonden worden in de fundering van de noordelijke pijler en het bovenbouwontwerp van de PH-brug. De twee mogelijke opties zijn:

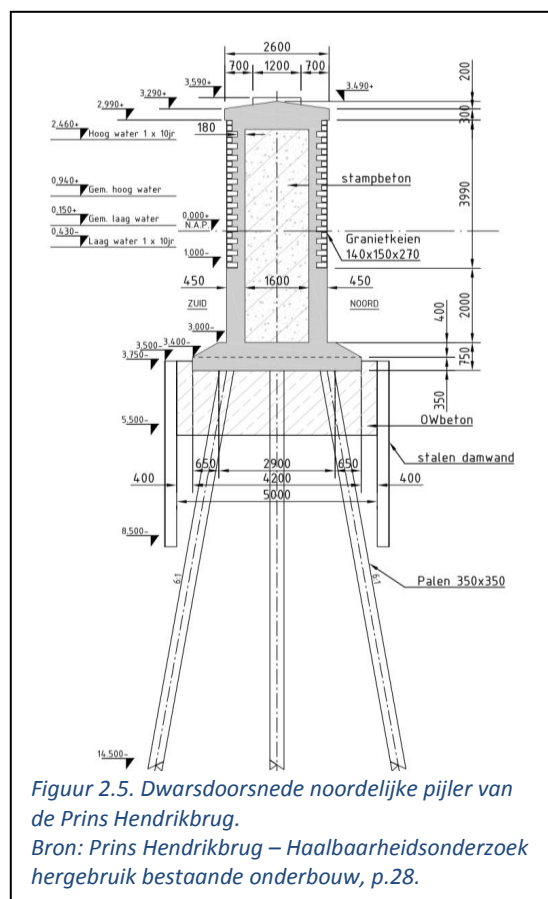
- Volledige benutting funderingscapaciteit;
- Ontwerptimalisatie.

Beide mogelijkheden dienen ten minste te resulteren in een belastingafname van 8,3% ten opzichte van de maatgevende paalbelasting. Deze paalbelasting komt voort uit de modellering in Scia Engineer, gemodelleerd door de heer Attahiri (2016).

### 2.3.1 Funderingsoptimalisatie

Een onderzoek naar het gebruik van de volledige capaciteit van de fundering is van belang vanwege de volgende redeneringen:

- Het gehanteerde UHSB-rijdek resulteert in te grote paalbelasting, zo blijkt uit de berekeningen van de funderingscapaciteit in de eerder gemaakte haalbaarheidsstudie. De verwachting van geotechnicus Spruit van Ingenieursbureau Rotterdam is dat er winst te behalen is bij het maken van een gedetailleerde berekening van de capaciteit, zodat deze volledig benut wordt.



- Het UHSB-rijdek zou bij een dikte van 100 mm voldoen qua paalbelasting (zie tabel 2.5), echter lijkt dit geen realistische waarde volgens de vuistregel dat de dikte ongeveer gelijk is aan 1/25 van de maatgevende overspanning (circa 5000 mm). Het lijkt dat een betere benutting van de funderingscapaciteit behaald dient te worden om een UHSB-rijdek mogelijk te maken bij een dergelijke overspanning, aangezien een rijdek van 100 mm niet haalbaar lijkt.

| <b>Tabel 2.5. Paalbelastingen bij diverse diktes massief UHSB-rijdek</b><br><i>Bron: Prins Hendrikbrug – Haalbaarheidsonderzoek hergebruik<br/>bestaande onderbouw, p.54–58</i> |                                                                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Rijdekdikte [mm]                                                                                                                                                                | Maatgevende paalbelasting [kN]<br>(paal draagvermogen $\pm$ 750 kN) |
| 200                                                                                                                                                                             | 818                                                                 |
| 110                                                                                                                                                                             | 753                                                                 |
| 100                                                                                                                                                                             | 746                                                                 |

### 2.3.2 Ontwerptimalisatie

Een onderzoek naar het optimaliseren ten opzichte van het ontwerp zoals in de haalbaarheidsstudie is toegepast, is van belang vanwege de volgende redeneringen:

- De paalbelasting voldoet niet bij de huidige variant met UHSB-rijdek, zoals toegepast in de door IBR uitgevoerde haalbaarheidsstudie. Het aanpassen van de krachtswerking in het bovenbouwconstructie kan mogelijk resulteren in een afname van de paalbelasting.
- Aantonen dat de gehanteerde afmetingen van de bovenbouwconstructie daadwerkelijk benodigd zijn. Indien een reductie van bepaalde afmetingen in het ontwerp behaald kan worden, kan mogelijk een afname van de paalbelasting worden gerealiseerd.

### 2.3.3 Te onderzoeken optimalisatiemogelijkheden

Uit bovenstaand relevantie-onderzoek naar beide optimalisatiemogelijkheden komt naar voren dat zowel een onderzoek naar de volledige benutting van de funderingscapaciteit als een onderzoek naar een ontwerptimalisatie relevant is. Een onderzoek naar beide opties kan gelijktijdig en onafhankelijk van elkaar plaatsvinden, aangezien deze elkaar niet beïnvloeden. Na afronding van beide onderzoeken, kunnen deze mogelijk gecombineerd worden. Op deze wijze kan een overkoepelende conclusie getrokken worden of aan de doelstelling kan worden voldaan.

#### **Scheiding in onderzoeksrichting**

Dit afstudeeronderzoek wordt uitgevoerd door een tweetal studenten, met ieder een eigen opdracht. Om deze reden is het van belang om een scheiding in onderzoeksrichting te hanteren. Deze scheiding wordt gemaakt nadat naar voren is gekomen dat een onderzoek naar zowel funderings- als ontwerptimalisaties relevant blijkt.

Het onderzoek dat in deze rapportage uitgewerkt is, betreft het onderzoek naar optimalisaties van het gehanteerde bovenbouwontwerp in de haalbaarheidsstudie.

Het onderzoek naar de volledige benutting van de funderingscapaciteit wordt gelijktijdig uitgevoerd. De conclusies van dat onderzoek zijn in dit rapport vermeld, zodat een gezamenlijke conclusie getrokken kan worden ten aanzien van de doelstelling.

### 3 FUNDERINGSVARIANTEN

---

In dit hoofdstuk worden de verschillende funderingsoptimalisaties beschreven. Zo wordt duidelijk hoe de desbetreffende optimalisatie werkt en wordt de toepasbaarheid ten aanzien van de gegeven locatie toegelicht. De optimalisaties met de meeste kans van slagen ten aanzien van het ontlasten van de funderingspalen zijn verder uitgewerkt. Deze keuze is tevens in deze paragraaf gegeven.

#### **Mogelijkheden**

Door middel van optimalisatiemogelijkheden kan de volledige benutting van de funderingscapaciteit bepaald worden. Zo dienen deze optimalisaties het doel om de funderingspalen onder de noordelijke pijler van de Prins Hendrikbrug te ontlasten qua drukbelasting. De opdrachtgever acht de begrippen 'kosten' en 'uitvoeringswijze' van groot belang bij de keuze voor de funderingsoptimalisaties.

Uit de gegeven haalbaarheidsstudie (*Ingenieursbureau Drechtsteden, 2016*) komen verschillende mogelijke optimalisaties naar voren om de funderingscapaciteit maximaal te gebruiken. Zo is de wens van het Ingenieursbureau Rotterdam dat er onderzocht wordt tot in hoeverre de bestaande fundering geschikt is voor de variant met een ultra-hogesterktebeton. Hiertoe dienen de volgende zaken onderzocht te worden:

- In het haalbaarheidsonderzoek is een "traditionele" berekening uitgevoerd, waarin niet is gerekend met de invloed van de passieve gronddruk op de fundering vanuit de aanname dat de gronddruk aan weerszijde van de palen gelijk is en derhalve netto nul is. Aangezien de palen relatief dicht bij elkaar staan, kan verondersteld worden dat het grondpakket is opgesloten tussen de palen waardoor er wel drukverschillen kunnen zijn. Zo bestaat de gedachten dat het effect van ondergrond mogelijk invloed uitoefent op de uiteindelijke belasting van de palen. Dit effect van de ondergrond kan in een nieuw rekenmodel benaderd worden. Dit rekenmodel dient voort te komen uit een modellering in het computerprogramma Plaxis.
- In hoeverre het mogelijk is om door middel van grondverbetering tussen de palen hetgeen hierboven beschreven effect zou kunnen versterken.

Uit de gegeven haalbaarheidsstudie (*Ingenieursbureau Drechtsteden, 2016*) komen twee optimalisatiemogelijkheden naar voren betreffende het optimaal gebruiken van de funderingscapaciteit van de noordelijke pijler, namelijk het beschouwen van de fundering als een paal-plaatfundering en het toepassen van een steenbestorting rond de pijler. Naast deze twee funderingsoptimalisaties wordt nog een derde mogelijkheid onderzocht, namelijk een bodeminjectie.

#### **Motivatie keuze funderingsoptimalisaties**

Niet alle optimalisatiemogelijkheden zullen even effectief zijn. Zo dient er een keuze gemaakt te worden tussen de optimalisatiemogelijkheden kijkend naar de kans van slagen. Deze keuze wordt gemaakt aan de hand van de volgende beweegredenen:

- Kosten;
- Uitvoeringswijze;
- Toepasbaarheid locatie.

Hierbij zullen de kosten niet daadwerkelijk in kaart gebracht worden, maar is in overeenstemming met de opdrachtgever afgestemd om logisch te beredeneren qua uitgaven.

### 3.1 PAAL-PLAATFUNDERING

In deze paragraaf zijn de volgende aspecten van de paal-plaatfunderingsoptimalisatie theoretisch toegelicht:

- Hypothese Ingenieursbureau Rotterdam;
- Voor- en nadelen;
- Voorbeeldprojecten;
- Toepasbaarheid;
- Verwachting.

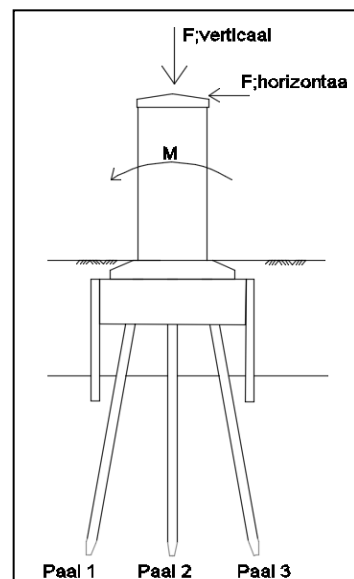
#### Hypothese Ingenieursbureau Rotterdam

Het brugdek introduceert een verticale belasting op de fundering ten gevolge van de zwaartekracht en de verkeersbelasting. Tevens wordt er via het rijdek een horizontale kracht geïntroduceerd en een moment ten gevolge van de remkrachten veroorzaakt door het verkeer. Het krachten- en momentenspel is in de nieuwe situatie hetzelfde als in de oude situatie, zij het dat de belastingen groter worden ten gevolge van meer verkeersafwikkeling. Voor dit krachten- en momentenspel, zie figuur 3.1.

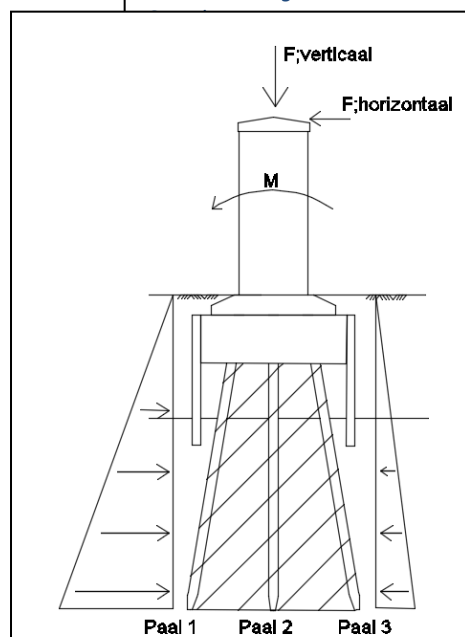
Uit de haalbaarheidsstudie van het Ingenieursbureau Drechtsteden (*Ingenieursbureau Drechtsteden, 2016*) blijkt dat het Ingenieursbureau de volgende twee aannames gemaakt heeft voor de werking van deze funderingsoptimalisatie.

1. De hart op hart afstand van de heipalen betreft 1,3 meter. Deze hart op hart afstand is dermate klein dat deze als wand beschouwd mag worden. Zo is de aanname van het Ingenieursbureau Rotterdam dat het grondpakket opgesloten is tussen de palen, zie figuur 3.2. Zo zijn er mogelijk drukverschillen in de grond aanwezig tussen de grond binnen de palen en buiten de palen.
2. Daarnaast oefent de grond in reactie op de horizontale belasting een tegendruk. De fundering is als het ware ingeklemd en kan zo mogelijk de belasting op de palen verlagen. Het krachten- en momentenspel rekening houdend met bovenstaande is weergegeven in figuur 3.2.

Het ingenieursbureau verwacht het effect van deze ondergrond te kunnen simuleren met een rekenmethode die nog niet toegepast is voor deze constructie. Deze rekenmethode betreft een modellering in het computerprogramma Plaxis. Hier kan het effect van de grond in gesimuleerd worden. Aangezien de paalbelasting slechts in orde van 10% overschreden wordt, lijkt een kleine ontlasting van deze paalkrachten niet onhaalbaar.



*Figuur 3.1: Schematisering van de krachtwerving op de noordelijke pijler.  
Schematisering door Tom*



*Figuur 3.2: Schematisering krachtwerving grondpakket.  
Bron: Schematisering door Tom Oorschot*

## Beschouwing

In deze beschouwing zullen de volgende onderdelen toegelicht worden: Voor- en nadelen, de toepasbaarheid, voorbeeldprojecten, ondergrond en een verwachting.

### *Voor- en nadelen*

De voor- en nadelen betreffende de paal-plaatfundering zijn opgenomen in tabel 3.1.

**Tabel 3.1. Voor- en nadelen paal-plaatfundering**

*Bron: Vree, J. de (2017): Plaatfundering.*

| <i>Voordelen</i>                                                                                                                                             | <i>Nadelen</i>                                                                                                                                                                         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Combineert de paalkracht van een paalfundering en de werking van de gronddruk. De grond neemt mogelijk een deel van de kortdurende horizontale belasting op. | Indien het Wantij in de toekomst uitgediept moet worden, houdt men mogelijk door onwetendheid geen rekening met de noodzaak dat de onderliggende grond zijn positie dient te behouden. |
| Gezien de pijler met de onderwaterbetonnen vloer al bestaat kost dit voor de huidige situatie geen geld.                                                     |                                                                                                                                                                                        |

### *Toepasbaarheid*

Uit de haalbaarheidsstudie van het Ingenieursbureau Drechtsteden (*Ingenieursbureau Drechtsteden, 2016*) blijkt dat beide pijlers gezien kunnen worden als een paal-plaatfundering. In het haalbaarheidsonderzoek is een traditionele berekening uitgevoerd, waarin niet gerekend is met de invloed van de passieve gronddruk op de fundering. Het Ingenieursbureau Rotterdam heeft sterk het vermoeden dat er winst te behalen valt op de paalbelasting door het effect van de gronddruk mee te nemen in de berekening van de paalbelastingen.

### *Voorbeeldprojecten*

Om een goed beeld te krijgen van de kans van slagen van deze funderingsoptimalisatie, is gekeken naar voorbeeldprojecten waarbij een soortgelijke beschouwing is gehanteerd.

#### *Bestuurscentrum Rabobank te Utrecht*

De eerste paal-plaatfundering in Nederland is toegepast bij het bestuurscentrum Rabobank in Utrecht en is medio 2010 opgeleverd (*Geotechniek, 2008*).

Medio 2010 is in Utrecht aan de nieuwbouw gebouwd van het bestuurscentrum van de Rabobank. Het plan omvatte een kantoortoren van 105 meter hoog en ondergrondse parkeergarage. De hoogbouw zou op staal gefundeerd kunnen worden, maar de bijbehorende zettingen waren niet acceptabel. Een fundering op palen was sterkte technisch niet nodig. Zodoende is er gekozen voor een oplossing die de voordelen van beide systemen combineert: een paal-plaatfundering.

Uit de gemaakte analyse volgt dat de palen nog altijd het merendeel van de belasting dragen. Afhankelijk van de stijfheidsverhoudingen dragen de palen 62% tot 98% van de belasting. Dit betekent dat de grond onder de constructie een deel van de belasting op kan nemen.

#### *Sint Sebastiaanbrug te Delft*

De reconstructie van de Sint Sebastiaanbrug is een project dat uitgevoerd is door het Ingenieursbureau Rotterdam. De heer Spruit is de geotechnisch expert in dit project en heeft hier informatie over verschaft, waarvan een samenvatting hieronder gegeven is.

De situatie van de Prins Hendrikbrug is vergelijkbaar met de situatie van de Sint Sebastiaanbrug in Delft. De huidige brug in Delft is in slechte staat en vertoont scheuren in het beton. De brug is daardoor niet meer geschikt voor de aanleg van de geplande trambaan. De nieuwe brug wordt een basculebrug op dezelfde locatie als de huidige brug, passend binnen het bestemmingsplan. Om tot een economisch ontwerp te komen worden zoveel mogelijk elementen van de huidige brug hergebruikt in de nieuwe brug. De Sint Sebastiaanbrug kent, net als de Prins Hendrikbrug, drie overspanningen, namelijk:

- Basculekelder – Kolommen;
- Kolommen – Pijler 2;
- Pijler 2 – landhoofd.

Eén van de her te gebruiken elementen, die voor de financiële haalbaarheid van de aanpassing van groot belang is, is de middenpijler. De aanvaarbelasting moet opgenomen kunnen worden door de fundering van de middenpijler. Deze is gefundeerd op betonnen heipalen die in staat moeten zijn om de belastingen op te nemen. Uit onderzoek is gebleken dat de aanvaarbelasting opgenomen kan worden door de pijler. De berekende verwachte verplaatsingen liggen in de orde van grootte van 5 tot 10 cm. Vanwege het kortdurende karakter van de aanvaarbelasting en de dan optredende effecten van de traagheid van de constructie en hogere stijfheid van de grond, wordt een reële verplaatsing van 2 tot 5 cm verwacht.

Geconcludeerd kan worden dat er bij een vergelijkbaar voorgaand project van het Ingenieursbureau Rotterdam een Plaxis-model opgesteld is, waaruit voortgekomen is dat de grond in staat is kort durende horizontale belasting op te nemen.

#### *Toepasbaarheid qua diepere ondergrond*

Uit de twee voorbeeldprojecten kan niet geconcludeerd worden dat de grond onder de noordelijke pijler de palen zal ontlasten. Ook kan er niet geconcludeerd worden dat de palen niet ontlast worden. Uit de twee voorbeeldprojecten blijkt dat de ondergrond rond de fundering wel degelijk de paalbelastingen kan doen reduceren. Om te controleren of de situatie van deze voorbeeldprojecten enigszins vergelijkbaar is met de situatie van de Prins Hendrikbrug te Dordrecht zijn de grondprofielen met elkaar vergeleken. De grondprofielen, en hoe deze bepaald zijn, zijn terug te vinden in bijlage A.

De volgende grondprofielen zijn gegeven:

- Prins Hendrikbrug te Dordrecht, zie tabel 3.2;
- Bestuurscentrum te Utrecht, zie tabel 3.3;
- Sint Sebastiaanbrug te Delft, zie tabel 3.4.

| <b>Tabel 3.2. Samengesteld en gemiddeld grondprofiel, Prins Hendrikbrug, Dordrecht</b> |              |                                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------|---------------------------------|
| <i>Bron: Prins Hendrikbrug – Rapportage veldwerkonderzoek, p.9-12.</i>                 |              |                                 |
| Diepte [m]                                                                             | Grondtype    | Grondlagen [kN/m <sup>3</sup> ] |
| 0,0 t/m -4,0                                                                           | Water        | 10,0                            |
| -4,0 t/m -8,5                                                                          | Klei, matig  | 15,0                            |
| -8,5 t/m -13,0                                                                         | Zand, siltig | 18,5                            |
| -13,0 t/m -18,0                                                                        | Zand         | 20,0                            |
| -18,0 t/m -30,0                                                                        | Klei, vast   | 20,0                            |

**Tabel 3.3. Samengesteld en gemiddeld grondprofiel,  
Bestuurscentrum Rabobank, Utrecht***Bron: [www.dinoloket.nl](http://www.dinoloket.nl)*

| Diepte [m]      | Grondtype    | Grondlagen<br>[kN/m <sup>3</sup> ] |
|-----------------|--------------|------------------------------------|
| 0,0 t/m -16,5   | Zand, kleiig | 18                                 |
| -16,5 t/m -21   | Zand         | 20                                 |
| -21 t/m -24     | Zand, kleiig | 18                                 |
| -24 t/m -28,5   | Zand         | 20,0                               |
| -28,5 t/m -30,0 | Zand, kleiig | 18                                 |

**Tabel 3.4. Samengesteld en gemiddeld grondprofiel,  
Sint Sebastiaanbrug, Delft***Bron: [www.dinoloket.nl](http://www.dinoloket.nl)*

| Diepte [m]      | Grondtype   | Grondlagen<br>[kN/m <sup>3</sup> ] |
|-----------------|-------------|------------------------------------|
| 0,0 t/m -7,0    | Klei, slap  | 14                                 |
| -7,0 t/m -12,0  | Klei, matig | 18                                 |
| -12,0 t/m -19,0 | Zand        | 20,0                               |
| -19,0 t/m -30,0 | Zand, grof  | 21,0                               |

#### *Vergelijking situatie Prins Hendrikbrug en het Bestuurscentrum Rabobank*

In tegenstelling tot de situatie bij de Prins Hendrikbrug is de grond in Utrecht onder de Rabobank veel draagkrachtiger. Hier bevindt zich hoofdzakelijk zand en geen klei. Zo is de ondergrond hier in staat om in verticale richting terug te duwen waardoor de constructie (deels) op staal gefundeerd is. Dit zal bij de Prins Hendrikbrug niet mogelijk zijn omdat de ondergrond hier voor een groot deel uit samendrukbare klei bestaat. Het voorbeeldproject toont wel aan dat de ondergrond paalbelastingen kan doen verlagen. (*Geotechniek, 2008*).

#### *Vergelijking situatie Prins Hendrikbrug en de Sint Sebastiaanbrug*

In tegenstelling tot de situatie bij de Prins Hendrikbrug is de grond in Delft onder de pijler van de Sint Sebastiaanbrug draagkrachtiger, omdat deze na 12 meter diepte uit zand bestaat. Hier bevindt zich geen kleilaag op grotere diepte, waardoor de grond een grotere draagkracht biedt. De funderingspalen in de situatie bij de Prins Hendrikbrug te Dordrecht reiken echter niet tot de diepliggende kleilaag. Zo lijkt de situatie in Delft redelijk overeen te komen met die van de Prins Hendrikbrug. Ook uit dit voorbeeldproject blijkt de ondergrond een rol te spelen in de fundering.

#### *Verwachting*

In de twee voorbeeldprojecten is er winst behaald op het paal draagvermogen door de constructie te modelleren als een paal-plaatfundering.

Kijkend naar de minder draagkrachtige grondlaag van de Prins Hendrikbrug in vergelijking met de twee voorbeeldprojecten is de verwachting dat de grond onder de noordelijke pijler een minder grote kortdurende horizontale belasting op zal nemen dan in de twee voorbeeldprojecten. Ondanks de verwachting dat de ondergrond in Dordrecht de funderingspalen van de Prins Hendrikbrug minder zal ontlasten lijkt in overleg met geotechnisch expert de heer Spruit, deze methode om de paalbelastingen te reduceren een goede kans van slagen te hebben. Het Ingenieursbureau Rotterdam heeft vertrouwen in deze optimalisatie.

## 3.2 STEENBESTORTING

In deze paragraaf wordt de “steenbestortingsoptimalisatie” toegelicht. Zo komt het volgende in deze paragraaf naar voren:

- Werking;
- Voor- en nadelen;
- Toepasbaarheid.

### Werking

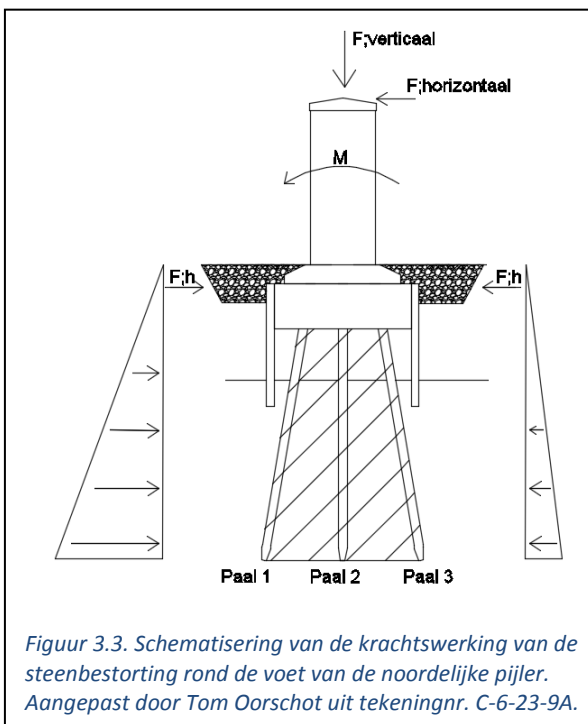
Het aanbrengen van een steenbestorting rond de voet van een pijler is niet ongebruikelijk en biedt de volgende twee eigenschappen, zie tabel 3.5.

**Tabel 3.5. Eigenschappen door toepassing steenbestorting.**

Bronnen: CROW (2010): *Kust en oeverwerken & Overleg met geotechnisch expert de heer Spruit.*

| Nr. | Eigenschap        | Toelichting                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.  | Bodembescherming  | Door de toepassing van een steenbestorting rond de voet van de pijler wordt de onderliggende grond beschermd tegen uitspoeling door bijvoorbeeld de schroeven van schepen. Ook kan deze verstevigde laag minder eenvoudig gebaggerd worden.                                                                                                                                                    |
| 2.  | Grotere stijfheid | Een steenbestorting heeft een grotere stijfheid dan de grond die hier aanvankelijk aanwezig is (klei). Dit betekent dat een steenbestorting beter in staat zal zijn om de pijler als het ware in te klemmen. Dit doet vermoeden dat de steenbestorting ook beter in staat zal zijn om de kortdurende horizontale belasting beter op te nemen. Mogelijk ontlast dit de palen qua drukbelasting. |

Een schematische weergave van hoe de steenbestorting de voet van de noordelijke pijler in kan klemmen en zo een horizontale reactiekracht kan bieden ten opzichte van de kortdurende horizontale rembelasting, is gegeven in figuur 3.3. De steenbestorting klemt de pijler in, waardoor er meer stabiliteit verkregen wordt. In overleg met geotechnisch expert de heer Spruit is besloten dat het exacte materiaal waar de steenbestorting uit bestaat niet van belang is zolang hier een grindachtig materiaal voor aangehouden wordt. Verschillende grindachtige materialen hebben volgens NEN 9997-1:2011 2.4.5.2 – tabel 2.b – p.50 nagenoeg dezelfde eigenschappen, ofwel parameters, hebben. Zo wordt er gekozen voor sterk siltig grind met een nat soortelijk gewicht van  $21 \text{ kN/m}^3$ .



### Voor- en nadelen

De voor- en nadelen betreffende de steenbestorting zijn opgenomen in tabel 3.6.

| <b>Tabel 3.6. Voor- en nadelen steenbestorting</b>                                                                  |                                                                                                                           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Bronnen: CROW (2010): Kust en oeverwerken &amp; overleg met geotechnisch expert de heer Spruit.</i>              |                                                                                                                           |
| <i>Voordelen</i>                                                                                                    | <i>Nadelen</i>                                                                                                            |
| Door een toename in de stijfheid kan een grotere horizontale reactiekracht geleverd worden. Dit klemt de pijler in. | De bestaande sliblaag dient gebaggerd te worden. Dit financieel nadelig.                                                  |
| De bestorting zorgt ervoor dat de onderliggende grondlagen niet weg kunnen spoelen door de schroeven van schepen.   | Afhankelijk van de locatie waarop de bestorting wordt aangebracht wordt er een extra belasting op de fundering geplaatst. |
| De steenbestorting is uitvoeringstechnisch eenvoudig aan te brengen.                                                |                                                                                                                           |

### Toepasbaarheid Prins Hendrikbrug

De wens van de opdrachtgever is onder andere het behouden van de huidige doorvaartdiepte- en breedte tussen de pijlers. Dit betekent dat de steenbestorting niet in de hoogte toegepast mag worden. Zo dient een deel van de sliblaag gebaggerd te worden, waarna de steenbestorting aangebracht kan worden. Dit is uitvoeringstechnisch goed mogelijk in de gegeven situatie. Uit een gesprek met geotechnisch expert de heer Spruit blijkt dat een steenbestorting prijstechnisch geen probleem zou moeten zijn en verwacht het Ingenieursbureau Rotterdam dat er via deze methode een optimalisatie wordt bereikt.

### Verwachting

Aangezien de steenbestorting hogere stijfheidsparameters heeft dan de aanwezige klei, zou de ondergrond beter in staat moeten zijn om de kortdurende horizontale belastingen op te nemen. De steenbestorting zorgt voor een 'grondlaag met een hogere stijfheid'. Dit zorgt voor meer stabiliteit, gezien er op een hogere hoogte een grotere passieve horizontale korrelspanning ontstaat. Dit komt de stabiliteit van de constructie ten goede.

### 3.3 BODEMINJECTIE

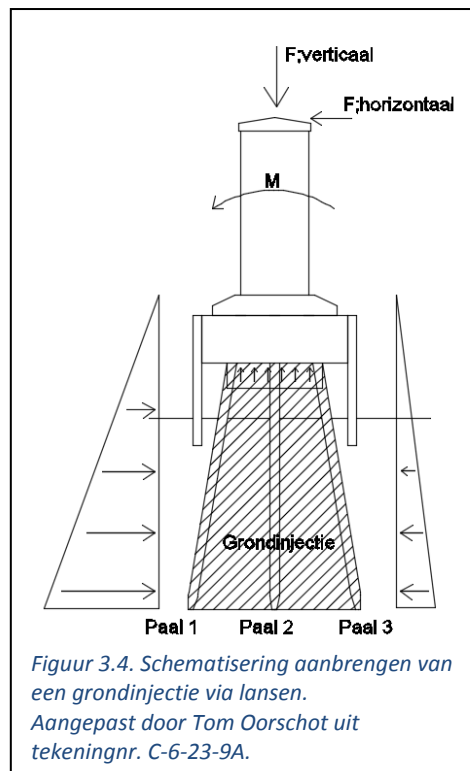
De laatste funderingsoptimalisatie betreft een bodeminjectie. In deze paragraaf zijn de volgende aspecten van de “bodeminjectie-optimalisatie” toegelicht:

- Werking;
- Voor- en nadelen;
- Toepasbaarheid.

#### Werking

Een bodeminjectie betreft het verstevigen van de ondergrond tussen de palen. Dit resulteert mogelijk in stijvere, ofwel sterkere, eigenschappen van de ondergrond. Zo is de ondergrond mogelijk in staat om de paalbelastingen te reduceren omdat deze meer tegenkracht levert, zie figuur 3.4.

Een bodeminjectie wordt als een water afsluitende laag aangebracht. Zo wordt een dergelijke bodeminjectie vaak toegepast onder een vloer van een bouwkuip. De bouwkuip blijft op deze manier droog en stroomt dus niet vol met grondwater. Naast de waterkerende functie van de grondinjection kan deze ook dienen als grondstabilisering. Door de grondinjection verkrijgt de onderliggende grond een hogere stijfheid, waardoor deze draagkrachtiger wordt. Zo wordt deze techniek toegepast om funderingen te verstevigen, paalpunten te versterken of bodem onder een constructie te versterken, zodat er bijvoorbeeld een uitbreiding op de constructie gebouwd kan worden. De bodeminjectie kan via lansen onder de bestaande constructie geïnjecteerd worden. Zo hoeft de bestaande constructie niet verplaatst te worden. De bodeminjectie is een geleïachtige substantie die de eigenschappen bezit om zandkorrels aan elkaar te verlijmen waardoor de poriën opgevuld worden. Dit betekent echter ook dat een bodeminjectie alleen toegepast wordt in een bodem bestaande uit zand. (Kornuyt, 2017)



#### Voor- en nadelen

De voor- en nadelen betreffende de bodeminjectie zijn opgenomen in tabel 3.7.

**Tabel 3.7. Voor- en nadelen bodeminjectie**

*Bronnen: Balm (1962): Grondinjection voor horizontale of verticale stabilisatie van grond en funderingen & Overleg met geotechnisch expert de heer Van Dalen.*

| Voordelen                                                                                                                                                     | Nadelen                                                                                                                              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Door een toename in de stijfheid van de onderliggende grondlagen krijgt de grond een hogere draagkracht, waardoor de funderingspalen mogelijk ontlast worden. | Een bodeminjectie wordt toegepast in een zandlaag. De ondergrond van de Prins Hendrikbrug betreft klei en pas op groter diepte zand. |
|                                                                                                                                                               | Door de diepte waarop de injectie aangebracht moet worden, kan de werking hiervan moeilijk worden ingeschat.                         |
|                                                                                                                                                               | Door de diepte waarop de injectie moet worden aangebracht, is dit uitvoeringstechnisch ongewenst.                                    |

### Toepasbaarheid Prins Hendrikbrug

Een bodeminjectie onder de Prins Hendrikbrug kan toegepast worden met het doel om te voorkomen dat de fundering gaat zakken. De fundering zou zo versterkt kunnen worden, waardoor het gewenste paal draagvermogen mogelijk toch gehaald wordt.

Het grote nadeel van deze techniek is dat deze alleen toepasbaar is in een zanderige ondergrond. Dit komt omdat een injectie laag hoofdzakelijk de zandkorrels verlijmt en zo een stevigere ondergrond creëert. Zo is dit alleen mogelijk als er ook daadwerkelijk een zandlaag onder de fundering aanwezig is. De zandlaag waar de Prins Hendrikbrug op gefundeerd is, bevindt zich echter tussen de -8m en de -22m diepte. De directe draagkracht van de grond, om de kortdurende rembelasting te kunnen compenseren, dient direct onder en naast de fundering aan te grijpen. Dit is in het geval van de Prins Hendrikbrug niet het geval aangezien deze ondergrond uit klei bestaat. Zo is de bodeminjectie geen goede funderingsoptimalisatie, gegeven de situatie van de Prins Hendrikbrug.

## 3.4 CONCLUSIE

Nu de verschillende funderingsoptimalisaties zijn toegelicht, wordt er gekozen welke van deze optimalisaties verder te onderzoeken, zie tabel 3.8.

**Tabel 3.8. Keuze funderingsoptimalisaties**

*Bron: Overleg met geotechnisch expert de heer Spruit.*

| <i>Optimalisatie</i>                    | <i>Wel/niet</i> | <i>Toelichting</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Paal-plaatfundering (effect ondergrond) | Wel             | <ul style="list-style-type: none"><li>- Reële kans op het ontlasten van de funderingspalen;</li><li>- De optimalisatie heeft het vertrouwen het Ingenieursbureau Rotterdam;</li><li>- De optimalisatie is reeds aanwezig;</li><li>- Geen uitgaven benodigd.</li></ul>                                                                                        |
| Steenbestorting                         | Wel             | <ul style="list-style-type: none"><li>- Reële kans op het ontlasten van de funderingspalen;</li><li>- De optimalisatie heeft het vertrouwen het Ingenieursbureau Rotterdam;</li><li>- Bodem beschermende functie voor de onderliggende grondlagen;</li><li>- Uitvoeringstechnisch goed mogelijk;</li><li>- Kan qua kosten beperkt gehouden worden.</li></ul> |
| Bodeminjectie                           | Niet            | <ul style="list-style-type: none"><li>- Alleen goed toepasbaar in zandlagen die te diep liggen in de gegeven situatie;</li><li>- Onduidelijkheid over de werking onder water;</li><li>- Door de grote diepte waarop de injectie laag aangebracht dient te worden, wordt de uitvoering ingewikkeld en mogelijk duur.</li></ul>                                |

Al met al kan er geconcludeerd worden dat de eerste twee funderingsoptimalisaties de grootste kans van slagen hebben om de funderingspalen te ontlasten. Zo zullen deze twee funderingsoptimalisaties, betreffende de nauwkeurigere berekening van de paal-plaatfundering en het aanbrengen van de steenbestorting, verder uitgewerkt worden. In het volgende hoofdstuk is de theoretische achtergrond gegeven van de gekozen optimalisaties.

## 4 THEORETISCH KADER

De twee verschillende te onderzoeken optimalisaties behoeven de nodige theorie. In het computerprogramma genaamd “Plaxis Classic” kan het effect van de grond en daarmee de paalbelasting zeer nauwkeurig gemodelleerd worden. Op welke wijze dit Plaxis model gemodelleerd dient te worden en welke parameters hierin een belangrijke rol spelen is terug te vinden in dit hoofdstuk.

#### 4.1 PLAXIS MODEL

Aan de hand van een handberekening kunnen de paalbelastingen, onder de noordelijke pijler van de Prins Hendrikbrug, berekend worden. In handberekeningen kan echter moeilijk rekening gehouden worden met het effect dat de grond op de constructie uitoefent in reactie op de kortdurende horizontale rembelasting. Om hier een goed beeld van te krijgen dient de noordelijke pijler van de Prins Hendrikbrug, zie figuur 4.1. 2D-gemodelleerd te worden in Plaxis. In overleg met geotechnisch expert de heer Van Dalen kunnen de heipalen als “plates”, ofwel platen, gemodelleerd worden, omdat deze hart op hart dicht op elkaar staan, namelijk 1,3 meter.

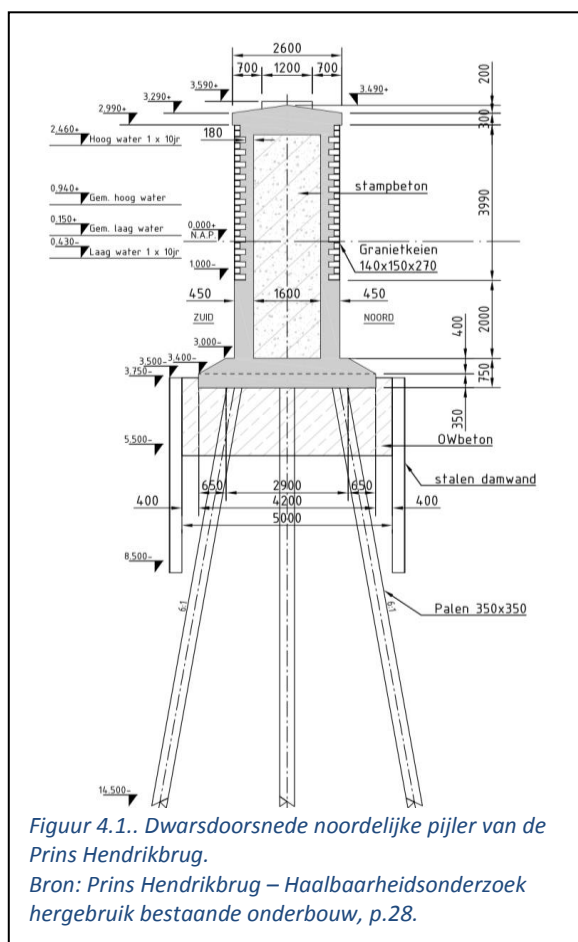
## Materiaal model

De grondlagen die gemodelleerd dienen te worden, zie tabel 4.1, worden gemodelleerd in het “materiaal model” genaamd “Hardening Soil”. Hardening soil is gezien de gegeven situatie een geschikt model, omdat hier het gedrag van de grond goed in gesimuleerd kan worden. De stijfheden van de grond worden in dit model aanzienlijk nauwkeuriger ingevuld in vergelijking met het Mohr-Coulomb model waar alleen de hoek van inwendige wrijving, cohesie en de dilatatiehoek een rol spelen (*Plaxis Manual, 2012*).

### Drained of Undrained

Het is zeer cruciaal voor de uitkomsten van het Plaxis model of de grondlagen en materialen gemodelleerd worden als “drained” of “undrained”. Plaxis onderscheidt deze twee situaties om niet alleen doordringbare zandlagen te kunnen modelleren, maar ook bijna ondoordringbare kleilagen. Overmatige poriedruk wordt berekend gedurende plastische berekeningen, terwijl “undrained soils” toegewezen zijn voor veranderlijke belastingen (*Plaxis Manual*, 2012).

De aanwezige grondlagen dienen als “drained” gemodelleerd te worden totdat de belastingen toegevoegd worden. Na deze toevoeging dient de grond als “undrained” gemodelleerd te worden.



*Figuur 4.1.. Dwarsdoorsnede noordelijke pijler van de Prins Hendrikbrug.*

Bron: Prins Hendrikbrug – Haalbaarheidsonderzoek  
hergebruik bestaande onderbouw, p.28.

## 4.2 PLAXIS PARAMETERS

In het programma Plaxis kunnen grondmechanica- modellen gemodelleerd worden. Zo vereist Plaxis de nodige parameters die ingevoerd dienen te worden om een zo reëel mogelijk model neer te zetten van de ondergrond zodat de paalbelastingen berekend kunnen worden. In dit hoofdstuk zijn de ingevoerde parameters verantwoord.

### 4.2.1 Grondparameters

Uit de analyse van de ondergrond, terug te vinden in bijlage A, blijkt dat de ondergrond voor de invoering in Plaxis Classic vereenvoudigd kan worden tot drie grondlagen, zie tabel 4.1.

**Tabel 4.1: Samengesteld en gemiddeld grondprofiel, Prins Hendrikbrug, te Dordrecht.**

*Bron: Prins Hendrikbrug – Rapportage veldwerkonderzoek, p.9-12.*

| Diepte [m]      | Grondtype   | Gemiddelde<br>conusweerstand<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | Grondprofiel [kN/m <sup>2</sup> ] |
|-----------------|-------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| 0,0 t/m -3,0    | Water       | -                                                    | 10,0                              |
| -3,0 t/m -7,5   | Klei, matig | 0,7                                                  | 15,0                              |
| -7,5 t/m -22,0  | Zand        | 7,5                                                  | 20,0                              |
| -22,0 t/m -30,0 | Klei, vast  | 5,0                                                  | 20,0                              |

De betekenis voor de parameters die ingevuld dienen te worden voor verschillende grondlagen is hieronder weergegeven, zie tabel 4.2.

**Tabel 4.2. Toelichting grondparameters**

*Bron: Plaxis (2012): Material Models Manual*

| Parameter                                                                                   | Toelichting                                                                                          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\gamma_{\text{unsat}}$                                                                     | Droog soortelijk gewicht [kN/m <sup>3</sup> ]                                                        |
| $\gamma_{\text{sat}}$                                                                       | Nat soortelijk gewicht [kN/m <sup>3</sup> ]                                                          |
| <i>Mohr-Coulomb parameters (failure), ook voor Hardening Soil.</i>                          |                                                                                                      |
| $c'^{\text{Ref}}$                                                                           | Effectieve cohesie [kN/m <sup>2</sup> ]                                                              |
| $\phi'$ [phi]                                                                               | Hoek van inwendige wrijving [°]                                                                      |
| $\psi$ [psi]                                                                                | Dilatatiehoek [°]                                                                                    |
| <i>Basis parameters voor stijfheid grondlagen</i>                                           |                                                                                                      |
| $E_{50}^{\text{Ref}}$                                                                       | Stijfheid in de standaard gedraineerde triaxiale test [kN/m <sup>2</sup> ]                           |
| $E_{\text{oed}}^{\text{Ref}}$                                                               | Stijfheid voor de primaire oedometer [kN/m <sup>2</sup> ]                                            |
| $E_{\text{ur}}^{\text{Ref}}$                                                                | Belasten/ontlasten stijfheid [kN/m <sup>2</sup> ]                                                    |
| $m$                                                                                         | Kracht van druk-niveau afhankelijk van stijfheid [standaard instelling $m = 0,5$ ]                   |
| <i>Geavanceerde parameters [handleiding raadt aan de standaard instelling te gebruiken]</i> |                                                                                                      |
| $\nu_{\text{ur}}$ [nu]                                                                      | Poisson's ratio voor belasten-ontlasten [standaard instelling $\nu_{\text{ur}} = 0,2$ ]              |
| $p^{\text{Ref}}$                                                                            | Referentie stress voor de stijfheid [standaard instelling $p^{\text{Ref}} = 100$ kN/m <sup>2</sup> ] |
| $K_0^{\text{nc}}$                                                                           | $K_0$ -waarde voor normale consolidatie [standaard instelling $K_0^{\text{nc}} = 1 - \sin\phi$ ]     |
| $R_f$                                                                                       | Faaltroef $q_f / q_a$ [standaard instelling $R_f = 0,9$ ]                                            |
| $\sigma_{\text{spanning}}$                                                                  | Treksterkte [standaard instelling $\sigma_{\text{spanning}} = 0$ stress units]                       |
| $C_{\text{inc}}$                                                                            | Zoals in Mohr-Coulomb model [standaard instelling $C_{\text{inc}} = 0$ ]                             |

Nu bekend is wat alle verschillende parameters betekenen dienen de waardes van deze parameters voor de verschillende grondlagen bepaald te worden, zie tabel 4.3. Hierin worden de standaard instellingen van Plaxis gehandhaafd zoals weergegeven in tabel 4.2 en dus achterwegen gelaten.

**Tabel 4.3. Verantwoording waarde grondparameter klei matig.**
*Bron: Zie 'verantwoording' in deze tabel.*

| Parameter                                             | Klei<br>[-3,0 t/m -7,5] | Zand<br>[-7,5 t/m -22,0] | Klei<br>[-22,0 t/m -30,0] | Verantwoording                                                                                              |
|-------------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\gamma_{\text{unsat}}$<br>[kN/m <sup>3</sup> ]       | 15                      | 17                       | 20                        | NEN 9997-1:2011 2.4.5.2 – tabel 2.b – p.50 [t.o.v. conusweerstand]                                          |
| $\gamma_{\text{sat}}$<br>[kN/m <sup>3</sup> ]         | 15                      | 19                       | 20                        | NEN 9997-1:2011 2.4.5.2 – tabel 2.b – p.50 [t.o.v. conusweerstand]                                          |
| $C^{\text{Ref}}$<br>[kN/m <sup>2</sup> ]              | 0,0                     | 0,0                      | 1,0                       | NEN 9997-1:2011 2.4.5.2 – tabel 2.b – p.50 [t.o.v. conusweerstand]                                          |
| $\phi'$ [phi]<br>[Graden]                             | 22,50                   | 30                       | 27,50                     | NEN 9997-1:2011 2.4.5.2 – tabel 2.b – p.50 [t.o.v. conusweerstand]                                          |
| $\psi$ [psi]<br>[Graden]                              | 0                       | 0,1                      | 0                         | Plaxis, Material Models Manual, 2012 – P.39                                                                 |
| $E_{50}^{\text{Ref}}$<br>[kN/m <sup>2</sup> ]         | 1500                    | 15000                    | 5000                      | NEN 9997-1:2011 2.4.5.2 – tabel 2.b – p.50 [t.o.v. conusweerstand]                                          |
| $E_{\text{oed}}^{\text{Ref}}$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | 1500                    | 15000                    | 5000                      | Plaxis, Material Models Manual, 2012 – P.7 [ $E_{\text{oed}}^{\text{Ref}} \approx E_{50}^{\text{Ref}}$ ]    |
| $E_{\text{ur}}^{\text{Ref}}$<br>[kN/m <sup>2</sup> ]  | 4500                    | 45000                    | 15000                     | Plaxis, Material Models Manual, 2012 – P.7 [ $E_{\text{ur}}^{\text{Ref}} \approx 3 * E_{50}^{\text{Ref}}$ ] |

#### 4.2.2 Materiaalparameters

De betekenis voor de parameters die ingevuld dienen te worden voor verschillende materialen is hieronder weergegeven in tabel 4.4. De informatie in deze tabel komt voort uit de Plaxis Material Models Manual, 2012.

**Tabel 4.4. Toelichting materiaalparameters**
*Bron: Plaxis (2012): Material Models Manual*

| Parameter              | Toelichting                                                                                       |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\gamma$               | Soortelijk gewicht [kN/m <sup>3</sup> ]                                                           |
| $E'$                   | Young's modulus, ofwel elasticiteitsmodulus [kN/m <sup>2</sup> ]                                  |
| $\nu_{\text{ur}}$ [nu] | Poisson's ratio voor belasten-ontlasten [standaard instelling $\nu_{\text{ur}} = 0,2$ ]           |
| $G$                    | Afschuifmodulus [kN/m <sup>2</sup> ] – Handleiding raadt aan automatische instelling te handhaven |
| $E_{\text{oed}}$       | Oedometer [kN/m <sup>2</sup> ] – Handleiding raadt aan automatische instelling te handhaven       |
| $V_s$                  | Samendrukkingsgolfsnelheid [m/s] - Handleiding raadt aan automatische instelling te handhaven     |
| $V_p$                  | Afschuifgolfsnelheid [m/s] - Handleiding raadt aan automatische instelling te handhaven           |

Nu bekend is wat alle verschillende parameters betekenen dienen de waardes van deze parameters voor de verschillende materialen, beton (pijler) en onderwaterbeton, bepaald te worden. Hierin worden de automatische instellingen gehandhaafd, zie tabel 4.4.

### Beton pijler & onderwaterbeton

Voor het beton waar de pijler uit bestaat en het onderwaterbeton worden de volgende parameters ingevuld, zie tabel 4.5.

| Tabel 4.5. Verantwoording waarde materiaalparameter – beton pijler & onderwaterbeton |        |                                                                                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bron: Zie 'verantwoording' in deze tabel.                                            |        |                                                                                              |
| Parameter                                                                            | Waarde | Verantwoording                                                                               |
| $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]                                                        | 23,5   | Prins Hendrikbrug – <i>haalbaarheidsonderzoek hergebruik bestaande onderbouw</i> , p.42      |
| $E'$ [kN/m <sup>2</sup> ]                                                            | 50.000 | In overleg met geotechnisch expert de heer Spruit                                            |
| $G$ [kN/m <sup>2</sup> ]                                                             | 20.830 | Automatische instelling Plaxis handhaven, in overleg met geotechnisch expert de heer Spruit. |
| $E_{oed}$ [kN/m <sup>2</sup> ]                                                       | 55.560 | Automatische instelling Plaxis handhaven, in overleg met geotechnisch expert de heer Spruit. |
| $V_s$ [m/s]                                                                          | 93,21  | Automatische instelling Plaxis handhaven, $V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$                      |
| $V_p$ [m/s]                                                                          | 152,2  | Automatische instelling Plaxis handhaven, $V_p = \sqrt{\frac{E_{oed}}{\rho}}$                |

### 4.2.3 Plaatparameters

In Plaxis zullen verscheidene materialen als een plaat (plate) gemodelleerd worden. Dit betreft de betonnen heipalen en de stalen damwanden. De benodigde parameters voor de platen voor het computerprogramma Plaxis Classic staan hieronder weergegeven, zie tabel 4.6.

| Tabel 4.6 Toelichting plaatparameters              |                                                                                                                               |
|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bron: Plaxis (2012): <i>Material Models Manual</i> |                                                                                                                               |
| Parameter                                          | Toelichting                                                                                                                   |
| EA                                                 | Stijfheid [kN/m]                                                                                                              |
| EI                                                 | Buigstijfheid [kNm <sup>2</sup> /m]                                                                                           |
| d                                                  | Dikte [m] – Handleiding raadt aan automatische instelling te handhaven                                                        |
| $\nu$ [nu]                                         | Poisson's ratio [-] – Parameter voor samendrukbaarheid materiaal - Handleiding raadt aan automatische instelling te handhaven |

Nu bekend is wat alle verschillende parameters betekenen dienen de waardes van deze parameters voor de verschillende platen bepaald te worden. Hierin worden de automatische instellingen gehandhaafd, zie tabel 4.6.

### Betonnen heipalen

Voor de betonnen heipalen worden de volgende parameters ingevuld, zie tabel 4.7.

| Tabel 4.7. Verantwoording waarde plaatparameter – betonnen heipalen |                     |                                                                                                           |
|---------------------------------------------------------------------|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bron: Zie 'verantwoording' in deze tabel.                           |                     |                                                                                                           |
| Parameter                                                           | Waarde              | Verantwoording                                                                                            |
| A [m <sup>2</sup> ]                                                 | 0,35 <sup>2</sup>   | Prins Hendrikbrug – haalbaarheidsonderzoek hergebruik bestaande onderbouw, Ingenieursbureau Drechtsteden. |
| H.o.h [m]                                                           | 1,3                 | Prins Hendrikbrug – haalbaarheidsonderzoek hergebruik bestaande onderbouw, Ingenieursbureau Drechtsteden. |
| EA [kN/m]                                                           | 2,827 <sup>E6</sup> | $E = 30 \text{ kN/mm}^2 \quad A = 0,35^2 / 1,3$                                                           |
| EI [kNm <sup>2</sup> /m]                                            | 28,86 <sup>E3</sup> | $E = 30 \text{ kN/mm}^2 \quad I = 1/12 * 0,35 * 0,35^3 / 1,3$                                             |
| D [m]                                                               | 0,35                | Prins Hendrikbrug – haalbaarheidsonderzoek hergebruik bestaande onderbouw, Ingenieursbureau Drechtsteden. |
| v [nu]                                                              | 0,5                 | In overleg met geotechnisch expert de heer Spruit                                                         |

### Stalen damwanden

Voor de stalen damwanden worden de volgende parameters ingevuld, zie tabel 4.8.

| Tabel 4.8. Verantwoording waarde plaatparameter – stalen damwanden |                     |                            |
|--------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------|
| Bron: Zie 'verantwoording' in deze tabel.                          |                     |                            |
| Parameter                                                          | Waarde              | Verantwoording             |
| EA [kN/m]                                                          | 2,923 <sup>E6</sup> | Damwandprofiel AZ 18-700   |
| EI [kNm <sup>2</sup> /m]                                           | 79,38 <sup>E3</sup> | Damwandprofiel AZ 18-700   |
| D [m]                                                              | 0,5708              | Automatische waarde Plaxis |
| v [nu]                                                             | 0,2                 | Automatische waarde Plaxis |

#### 4.2.4 Veerparameters

In Plaxis zullen veren gemodelleerd moeten worden onderaan de betonnen heipalen. De benodigde parameters voor deze veren en wat de waarden van deze parameters zijn staat hieronder weergegeven, zie tabel 4.9.

| Tabel 4.9. Toelichting veerparameters                                                |                          |                   |                                                                                                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bronnen: Plaxis (2012): Material Models Manual & Zie 'verantwoording' in deze tabel. |                          |                   |                                                                                                           |
| Parameter                                                                            | Toelichting              | Waarde            | Verantwoording                                                                                            |
| EA [kN]                                                                              | Stijfheid [kN]           | 1,0 <sup>E6</sup> | $EA = \frac{Fn * l}{w} = \frac{1000 * 1}{0,001}$                                                          |
| L <sub>spacing</sub> [m]                                                             | Hart op hart afstand [m] | 1,3               | Prins Hendrikbrug – haalbaarheidsonderzoek hergebruik bestaande onderbouw, Ingenieursbureau Drechtsteden. |

#### 4.2.5 Steenbestortingparameters

De steenbestorting wordt in Plaxis als een grondlaag gemodelleerd. Dit betekent dat hier dezelfde parameters ingevuld dienen te worden als voor de grondlagen, zie paragraaf 4.2.1. De waarden voor deze parameters staan hieronder weergegeven, zie tabel 4.10.

| <b>Tabel 4.10. Verantwoording waarde grondparameter steenbestorting (grind)</b> |                                            |                                                                                                                |
|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Bron: Zie 'verantwoording' in deze tabel.</i>                                |                                            |                                                                                                                |
| <b>Parameter</b>                                                                | <b>Steenbestorting<br/>[-3,0 t/m -4,3]</b> | <b>Verantwoording</b>                                                                                          |
| $\gamma_{\text{unsat}}$ [kN/m <sup>3</sup> ]                                    | 19                                         | NEN 9997-1:2011 2.4.5.2 – tabel 2.b – p.50<br>[t.o.v. conusweerstand]                                          |
| $\gamma_{\text{sat}}$ [kN/m <sup>3</sup> ]                                      | 21                                         | NEN 9997-1:2011 2.4.5.2 – tabel 2.b – p.50<br>[t.o.v. conusweerstand]                                          |
| $C^{\text{Ref}}$ [kN/m <sup>2</sup> ]                                           | 0                                          | NEN 9997-1:2011 2.4.5.2 – tabel 2.b – p.50<br>[t.o.v. conusweerstand]                                          |
| $\phi'$ [phi]<br>[Graden]                                                       | 32,5                                       | NEN 9997-1:2011 2.4.5.2 – tabel 2.b – p.50<br>[t.o.v. conusweerstand]                                          |
| $\psi$ [psi]<br>[Graden]                                                        | 0                                          | In overleg met geotechnisch expert de heer Spruit                                                              |
| $E_{50}^{\text{Ref}}$ [kN/m <sup>2</sup> ]                                      | 45.000                                     | NEN 9997-1:2011 2.4.5.2 – tabel 2.b – p.50<br>[t.o.v. conusweerstand]                                          |
| $E_{\text{oed}}^{\text{Ref}}$ [kN/m <sup>2</sup> ]                              | 45.000                                     | Plaxis, Material Models Manual, 2012 – P.7<br>[ $E_{\text{oed}}^{\text{Ref}} \approx E_{50}^{\text{Ref}}$ ]    |
| $E_{\text{ur}}^{\text{Ref}}$ [kN/m <sup>2</sup> ]                               | 135.000                                    | Plaxis, Material Models Manual, 2012 – P.7<br>[ $E_{\text{ur}}^{\text{Ref}} \approx 3 * E_{50}^{\text{Ref}}$ ] |

#### 4.2.6 Onder- en bovengrens stijfheidsparameters

Aangezien de grondparameters van de aanwezige grondlagen alleen exact bepaald kunnen worden door middel van grondig bodemonderzoek en dit nog niet gebeurd is, is de uitkomst van het Plaxis model niet exact. In overleg met geotechnisch expert de heer Spruit is besloten een onder- en bovengrens aan te houden voor de stijfheidsparameters van 20% lager en 20% hoger dan de gevonden middenwaarde. Deze onder en bovengrens is weergegeven in tabel 4.11.

| <b>Tabel 4.11. Onder- en bovengrens grondparameters.</b> |                                            |                                                    |                                                   |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| <i>Bron: Geotechnisch expert de heer Spruit.</i>         |                                            |                                                    |                                                   |
| <b>Grondlaag</b>                                         | $E_{50}^{\text{Ref}}$ [kN/m <sup>2</sup> ] | $E_{\text{oed}}^{\text{Ref}}$ [kN/m <sup>2</sup> ] | $E_{\text{ur}}^{\text{Ref}}$ [kN/m <sup>2</sup> ] |
| <b>Ondergrens</b>                                        |                                            |                                                    |                                                   |
| Bovenliggende kleilaag                                   | 1200                                       | 1200                                               | 3600                                              |
| Zand                                                     | 12000                                      | 12000                                              | 36000                                             |
| Onderliggende kleilaag                                   | 4000                                       | 4000                                               | 12000                                             |
| <b>Middenwaarde</b>                                      |                                            |                                                    |                                                   |
| Bovenliggende kleilaag                                   | 1500                                       | 1500                                               | 4500                                              |
| Zand                                                     | 15000                                      | 15000                                              | 45000                                             |
| Onderliggende kleilaag                                   | 5000                                       | 5000                                               | 15000                                             |
| <b>Bovengrens</b>                                        |                                            |                                                    |                                                   |
| Bovenliggende kleilaag                                   | 1800                                       | 1800                                               | 5400                                              |
| Zand                                                     | 18000                                      | 18000                                              | 54000                                             |
| Onderliggende kleilaag                                   | 6000                                       | 6000                                               | 18000                                             |

## 5 ONDERZOEKSVRAGEN

---

In het afstudeerproces wordt één hoofdvraag beantwoord aan de hand van een aantal deelvragen. Deze deelvragen worden afzonderlijk door een tweetal studenten beantwoord, waarbij een gezamenlijke conclusie getrokken wordt betreffende de hoofdvraag.

### Hoofdvraag

*“In hoeverre is het door toepassing van funderings- en ontwerptimalisaties mogelijk om de bestaande pijlers in de huidige staat te hergebruiken bij toepassing van een bovenbouwconstructie met een rijdek van ultra-hogesterktebeton?”*

### Deelvragen

Om antwoord te kunnen geven op de hoofdvraag, zijn deelvragen geformuleerd die ieder een deel van de hoofdvraag beantwoorden. De deelvragen waar dit onderzoeksrapport antwoord op geeft betreffen:

1. “In hoeverre is het mogelijk om de maatgevende paalbelasting van de noordelijke pijler te reduceren door toepassing van de meest relevante funderingsoptimalisaties?”
  - a. Toepassing paal-plaatfundering
  - b. Toepassing steenbestorting
2. “In hoeverre is het mogelijk om de maatgevende paalbelasting van de noordelijke pijler te reduceren door toepassing van de meest relevante ontwerptimalisatie?”
  - a. UHSB-rijdek op gehanteerd balkrooster
  - b. UHSB-rijdek op aangepast balkrooster
3. “In hoeverre is het mogelijk om een combinatie van funderings- en ontwerptimalisaties toe te passen om hergebruik van de huidige pijlers in de huidige staat mogelijk te maken?”

### Taakverdeling

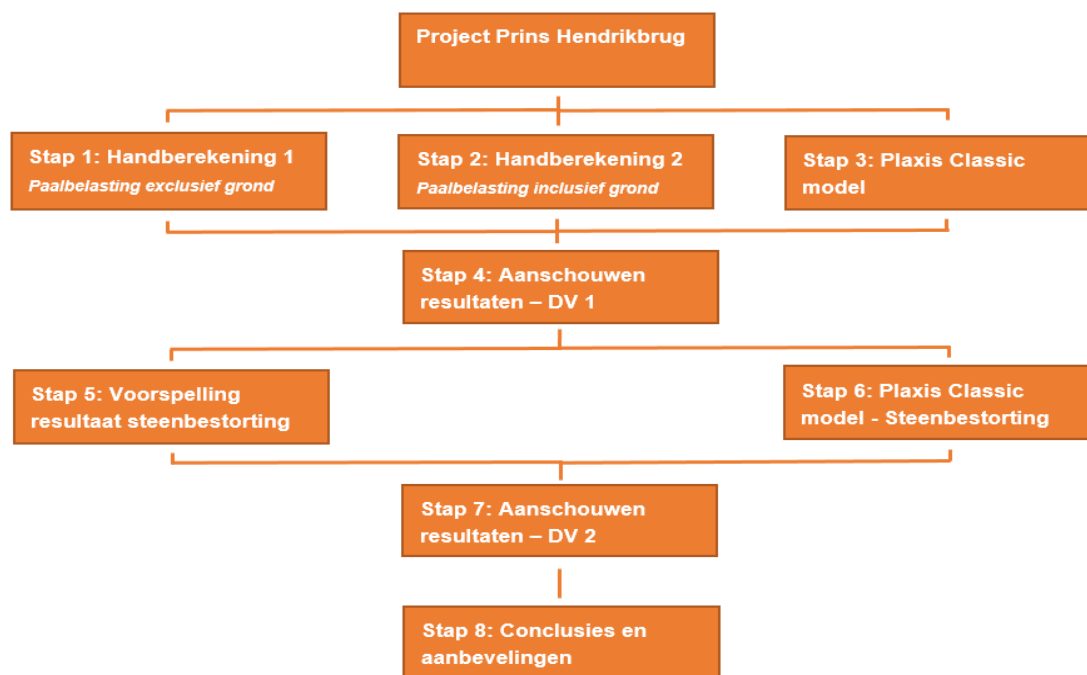
Om de deelvragen te beantwoorden, zullen de deelvragen over de funderings- en ontwerptimalisaties verdeeld worden over twee onderzoeken, zie paragraaf 1.3.3. De deelvragen zijn als volgt verdeeld:

- Deelvraag 1 : Tom Oorschot
- Deelvraag 2 : William Benard
- Deelvraag 3 : William Benard en Tom Oorschot

De afstudeeropdracht en taakverdeling zijn voorgelegd en geschikt bevonden als afstudeeropdracht door het Ingenieursbureau Rotterdam en de Hogeschool Rotterdam.

## 6 ONDERZOEKSAANPAK

Om antwoord te kunnen geven op de gestelde deelvragen, die de hoofdvraag van dit onderzoek beantwoorden, wordt er onderzoek gedaan ten aanzien van handberekeningen en computermodellerings in Plaxis. In onderstaand schema is globaal weergegeven waar het onderzoek uit zal bestaan. Tevens wordt er per blok een korte toelichting gegeven, waardoor er een duidelijk beeld ontstaat wat er tijdens dit onderzoek uitgevoerd wordt.



### Toelichting schema

#### Project Prins Hendrikbrug

Het project waar het onderzoek voor uitgevoerd wordt (beschreven in de aanleiding en hoofdstuk 1: Probleemanalyse).

Voorafgaand aan dit onderzoek is een 3D-model van de noordelijke pijler van de Prins Hendrikbrug gemodelleerd in het programma Scia Engineer door de heer Attahiri. In dit Scia Engineer model zijn alle verschillende belastingcombinaties en belastingen ingevoerd. Dit model berekent iedere paalbelasting apart.

Zo houdt het Scia Engineer model ook rekening met andere factoren die de pijler in drie richtingen doen draaien. Zo kan er uit de resultaten van Scia Engineer geconcludeerd worden dat de paalbelastingen aan de westzijde hoger zijn dan de paalbelastingen aan de oostzijde van de noordelijke pijler. Ook blijkt uit Scia Engineer dat de rembelasting de reden is dat de paalbelasting te hoog uitvalt. In dit onderzoek wordt de noordelijke pijler 2-dimensionaal gemodelleerd. Zo wordt er slechts rekening gehouden met de draaiing van de pijler in één richting, ofwel de richting die de pijler op dreigt te draaien door de horizontale rembelasting. Zo kan de paalreductie door de grond ten gevolge van de rembelasting beschouwd worden. Na afloop wordt een vergelijking gemaakt met de resultaten van het Scia Engineer model.

#### Stap 1: Handberekening 1, paalbelasting exclusief effect grond

De eerste handberekening is een berekening betreffende de paalbelastingen van het 2D-aanzicht, zoals weergegeven in paragraaf 2.3, figuur 2.6. Deze paalbelastingen worden statisch onbepaald berekend aan de hand van de verplaatsingsmethode. Zo wordt hier berekend wat de paalbelastingen per strook van 1,3 meter, ofwel de hart-op-hart afstand van de palen, zijn. Op deze pijler komen twee krachten te staan, namelijk een verticale kracht en een kortdurende horizontale kracht (rembelasting), beide voortkomend uit het geleverde Scia Engineer model. Aangezien het Scia Engineer model geen rekening houdt met het effect van de ondergrond, wordt dit effect in deze handberekening ook achterwege gelaten. Aangezien verwacht wordt dat de grond de heipalen deels ontlast qua drukbelasting, kan deze handberekening als bovengrens beschouwd worden.

#### Stap 2: Handberekening 2, paalbelasting inclusief effect grond

Nadat uit stap 1 naar voren gekomen is wat de pijlerstrook per 1,3 meter aan paalbelasting krijgt als de gronddruk verwaarloosd wordt, wordt een tweede handberekening uitgevoerd waarin deze wel meegenomen is. Deze paalbelastingen worden statisch onbepaald berekend aan de hand van de verplaatsingsmethode. In deze handberekening wordt er vanuit gegaan dat de grond maximaal functioneert en de heipalen maximaal ontlast worden. Aangezien dit in de praktijk niet het geval zal zijn kan deze berekening als ondergrens voor de paalbelasting gezien worden.

#### Stap 3: Plaxis Classic - Model

In deze stap wordt een 2D Plaxis-model gebouwd van de pijler zoals weergegeven in paragraaf 2.3, figuur 2.6. De verschillende parameters die ingevuld zullen worden voor de grondlagen, materialen en dergelijke zijn verantwoord in paragraaf 4.2. Uit dit nieuwe rekenmodel zal een reële paalbelasting naar voren komen die alle factoren betreffende grond en water tot in detail meeneemt. De resultaten van dit Plaxis-model zullen rond de resultaten van de twee gemaakte handberekeningen liggen.

#### Stap 4: Aanschouwen resultaten – Deelvraag 1

Nu de resultaten van deelvraag 1 bekend zijn dienen deze vergeleken te worden. Zo worden de uitkomsten van het Plaxis-model vergeleken met de uitkomsten van de twee handberekeningen. Hieruit blijkt of het Plaxis-model een reële uitkomst gegeven heeft. Hierna worden de uitkomsten van de eerste handberekening vergeleken met de uitkomsten van het Plaxis-model waarna een conclusie getrokken kan worden betreffende deelvraag 1.

#### Stap 5: Verwachting steenbestorting

Voorafgaand aan het tweede deel van deelvraag 1 wordt een verwachting uitgesproken over het effect van het aanbrengen van een steenbestorting op de paalbelasting.

#### Stap 6: Plaxis-Classic – model - Steenbestorting

Een steenbestorting, waarvan de parameters zijn verantwoord in paragraaf 4.2.5, wordt toegevoegd aan het Plaxis-model uit stap 3.

#### Stap 7: Aanschouwen resultaten – Deelvraag 2

Nadat de resultaten van deelvraag 2 bekend zijn dienen deze vergeleken te worden met de resultaten van deelvraag 1. Hieruit zal blijken of de steenbestorting de heipalen nog verder zal ontlasten door een deel van de kortdurende horizontale rembelasting op te nemen.

#### Stap 8: Conclusies en aanbevelingen

Aan de hand van de gevonden resultaten uit 'stap 4' en 'stap 7' wordt een conclusie getrokken waaruit een aanbeveling naar voren komt.

## 7 RESULTATEN OPTIMALISATIES

In dit hoofdstuk komen de resultaten naar voren betreffende de optimalisaties van deelvraag 1.

### 7.1 PAAL-PLAATFUNDERING

In dit hoofdstuk komen de resultaten naar voren uit het onderzoek voor deelvraag 1a. In dit hoofdstuk komen de volgende resultaten naar voren:

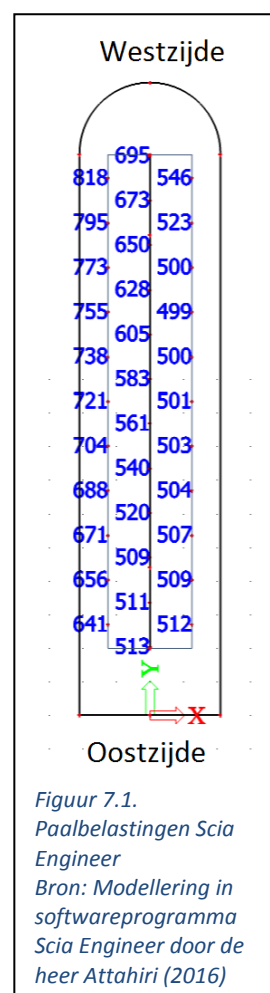
- Handberekening 1 (paalbelastingen exclusief: gronddruk en waterdruk);
- Handberekening 2 (paalbelastingen inclusief: gronddruk en waterdruk);
- Resultaten Plaxis Model.

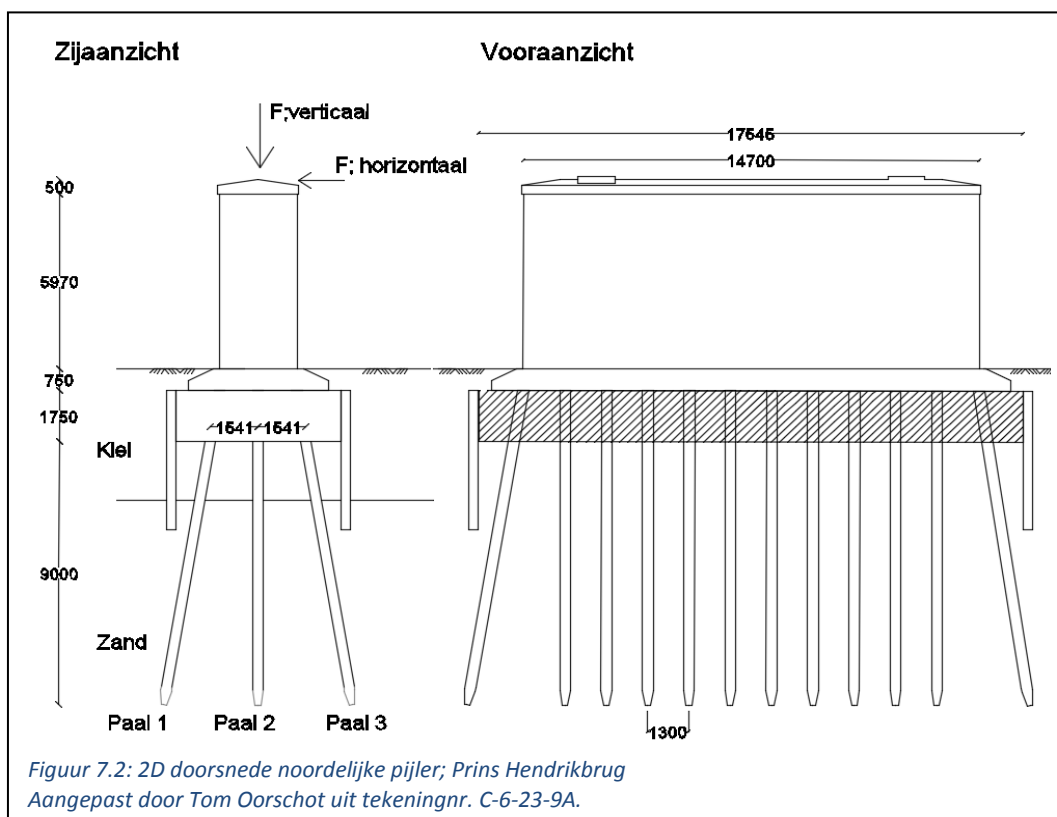
#### 7.1.1 Uitgangspunten

Voorafgaand aan dit onderzoek heeft het Ingenieursbureau Rotterdam een Scia Engineer model gebouwd van het ultra-hogesterktebetonnen rijdek met daarin alle belastingen verwerkt. Dit Scia Engineer model rekent alle palen onder de gehele constructie uit, maar houdt geen rekening met de reacties die de ondergrond levert in reactie op de kortdurende horizontale rembelastingen, zie figuur 7.1.

Uit dit figuur blijkt dat de palen onder de westzijde van de pijler zwaarder belast worden dan de oostzijde. Dit komt omdat de pijler formeel gezien ook in lengte richting 'beweegt'. Hier wordt in dit onderzoek geen rekening mee gehouden, omdat in dit onderzoek onderzocht wordt wat de paalreductie is, per strook van 1,3 meter, voortkomend uit de kortdurende horizontale rembelasting.

Van de situatie die in dit onderzoek aanschouwd wordt is het zijaanzicht weergegeven in figuur 7.2. Zoals uit het vooraanzicht blijkt betreft dit een strook van 1,3 meter gezien de palen deze afstand hart op hart staan. In totaal zijn er twee oplegpunten op de noordelijke pijler, zie het vooraanzicht figuur 7.2. De verticale en horizontale krachten die hier op komen te staan worden door de pijler gelijkmatig verdeeld over de onderkant van de pijler. Om deze krachten op het zijaanzicht te mogen zeggen dienen deze vertaald te worden naar een strook van 1,3 meter omdat dit de hart op hart afstand van de palengroepen is.





### Belastingen

In het Scia Engineer model zijn verscheidene belastingcombinaties ingevoerd. Hierbij is één belastingcombinatie maatgevend voor de verticale kracht en een andere belastingcombinatie is maatgevend voor de horizontale kracht. De krachten die gelden voor F;verticaal en F;horizontaal over een strook van 1,3 meter zijn terug te vinden in tabel 7.1. Een schematisering van de krachtswerking is terug te vinden in figuur 7.1.

**Tabel 7.1. Belastingwaardes**

*Bron: Modelling in softwareprogramma Scia Engineer door de heer Attahiri (2016)*

| Groep                 | Dominante belasting                   | F,verticaal (kN) | F,horizontaal (kN) |
|-----------------------|---------------------------------------|------------------|--------------------|
| <b>Gr. 1a (6.10b)</b> | Verkeer en voetgangers- of fietspaden | <u>1990</u>      | 17,2               |
| <b>Gr. 2 (6.10b)</b>  | Horizontale krachten                  | 1931,4           | <u>21,4</u>        |

## Gronddruk

In reactie op de belastingen is de verwachting dat de grond rondom de fundering van de noordelijke pijler van de Prins Hendrikbrug te Dordrecht een deel van de kortdurende horizontale rembelasting opneemt. De grond veert als het ware enigszins terug en oefent een passieve en actieve horizontale korrelspanning uit op de fundering onder de noordelijke pijler in reactie op de kortdurende horizontale rembelasting, zie figuur 7.3.

Volgens geotechnisch expert de heer Van Dalen mogen de palen, volgens CUR commissie 228, als een plaat aanschouwd mogen worden, omdat deze dicht op elkaar staan. Uit een handberekening blijkt dat de passieve horizontale korrelspanning een druk kan uitoefenen van 193,2 kN/m<sup>2</sup> onderaan de heipalen. Tevens oefent de actieve horizontale korrelspanning een druk van 20,42 kN/m<sup>2</sup> in tegengestelde richting uit. Zie voor deze berekeningen hoofdstuk 2 van bijlage B.

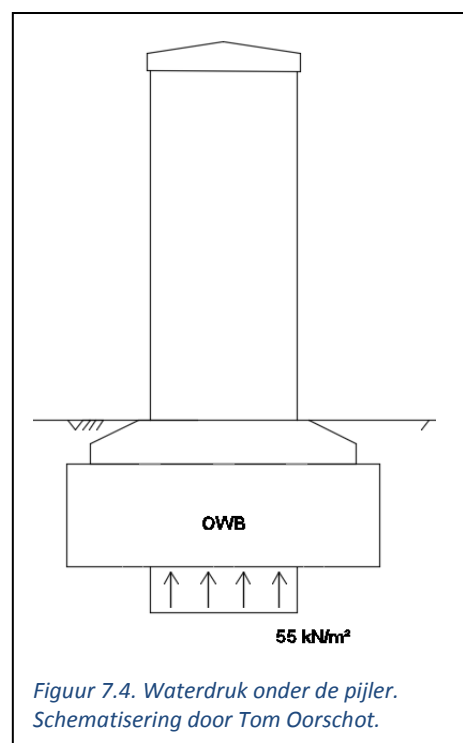
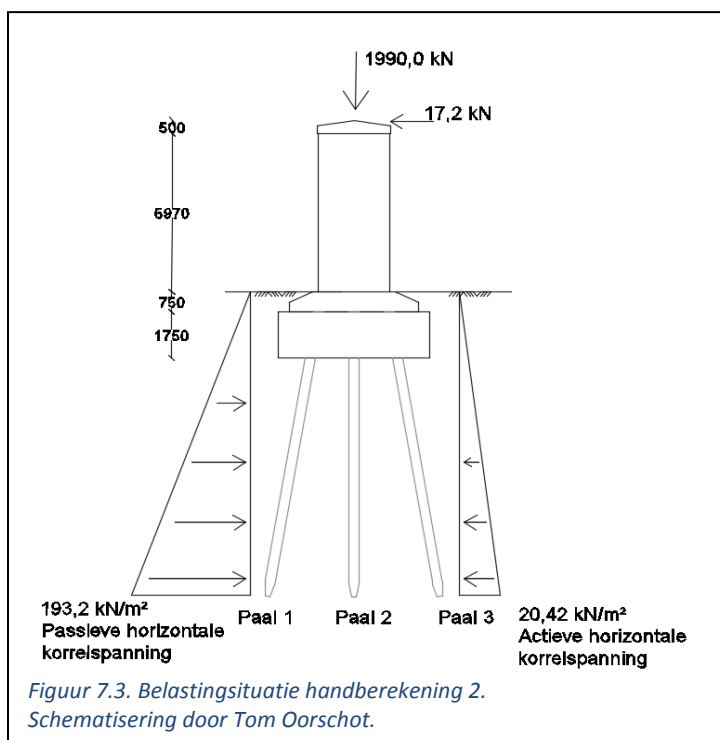
## Waterdruk

In het midden onder de pijler bevindt zich een resulterende waterdruk naar boven toe, zie figuur 7.4. Deze waterdruk ontlast de palen net als de grond voor een deel. Deze waterdruk onder de pijler blijkt gelijk te zijn aan:

$$10 * 5,5 * 1,3 * 2,5 = 178,75 \text{ kN}$$

Zie voor deze berekening ook paragraaf 3.2.2. uit bijlage B.

Aangezien de waterdruk positief werkt voor het ontlasten van de palen wordt hier een belastingfactor van 0,9 toegepast. Dit betekent dat iedere paal met nog ongeveer 54 kN gereduceerd kan worden.



### Verwachting resultaten

In handberekening 1 zullen de paalbelastingen berekend worden zonder dat het effect van de ondergrond meegenomen wordt. Aangezien verwacht wordt dat deze ondergrond de paalbelastingen iets zal reduceren kunnen deze resultaten gezien worden als een bovengrens voor de paalbelastingen.

In handberekening 2 zullen de paalbelastingen berekend worden ervanuit gaande dat de grond maximaal functioneert. Aangezien niet verwacht wordt dat de grond zo zal reageren, kunnen deze resultaten gezien worden als een ondergrens voor de paalbelastingen.

De resultaten voortkomend uit het Plaxis model dienen verklaard te worden. De voorspelling van de resultaten is als volgt:

|                                   |                                                                                                                                                                                       |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Resultaat paalbelasting “paal 1”: | Waarde ligt tussen de twee handberekeningen in. De paal zal niet volledig belast of ontlast worden waardoor deze waarde tussen de twee waarden van de handberekeningen in zal liggen. |
| Resultaat paalbelasting “paal 2”: | Ligt rond dezelfde waarde als de twee handberekeningen. Mogelijk komt deze nog iets hoger uit door factoren als “negatieve kleeft” die Plaxis meerekent.                              |
| Resultaat paalbelasting “paal 3”: | Waarde ligt tussen de twee handberekeningen in. De paal zal niet volledig belast of ontlast worden waardoor deze waarde tussen de twee waarden van de handberekeningen in zal liggen. |

#### 7.1.2 Resultaten handberekening 1

De gemaakte handberekening, waarvan de resultaten voor de paalbelasting in deze paragraaf terug te vinden zijn, dient vergelijkbaar te zijn met het gemaakte Scia-model. Zo wordt in deze berekening geen rekening gehouden met gronddruk. De totale handberekening is terug te vinden in hoofdstuk 1 van bijlage B.

De handberekening voor de paalbelastingen wordt uitgevoerd op een 2D-doorsnede van het zijaanzicht van de noordelijke pijler van de Prins Hendrikbrug, weergegeven in figuur 7.2. De paalbelastingen worden voor beide maatgevende belastingcombinaties uitgerekend, zie tabel 7.1. De paalbelastingen die uit de gemaakte belastingcombinaties naar voren komen zijn terug te vinden in tabel 7.2.

**Tabel 7.2. Vergelijking maatgevende belastingcombinaties**

*Bron: Bijlage B - Handberekeningen*

| Belastingcombinatie   | Paal 1 (kN)          | Paal 2 (kN)   | Paal 3 (kN)   |
|-----------------------|----------------------|---------------|---------------|
| <b>Gr. 1a (6.10b)</b> | <b>-663,8 (druk)</b> | -621,5 (druk) | -560,9 (druk) |
| <b>Gr. 2 (6.10b)</b>  | -656,7 (druk)        | -601,6 (druk) | -528,7 (druk) |

Uit bovenstaande tabel blijkt dat de belastingcombinatie genaamd “Gr. 1a (6.10b)” de maatgevende belastingcombinatie is aangezien hier en maximale paalbelasting van 663,8 kN uit naar voren komt.

### 7.1.3 Resultaten handberekening 2

In de tweede handberekening wordt de eerste handberekening voor de maatgevende belastingcombinatie, genaamd 'Gr. 1a (6.10b)', nogmaals gemaakt, maar dan met het effect van de onderliggende grondlagen meegenomen.

Uit paragraaf 7.1.1 blijkt dat de passieve horizontale korrelspanning onder aan de palen gelijk is aan 193,2 kN/m<sup>2</sup>. De reactiekracht die de grond kan leveren is gelijk aan 1291,5 kN en daarmee gemakkelijk in staat om de horizontale remkracht volledig op te nemen. De grond oefent deze druk pas uit wanneer er een deformatie in de paal ontstaat waardoor een volledige ontlasting van de palen in de praktijk niet voor zal komen. Dit betekent dat paal 1 altijd meer druk zal ondervinden dan paal 3, zie figuur 7.1.

Om een indicatie te krijgen van de uitkomsten van Plaxis wordt er tegen de verwachting in vanuit gegaan dat de palen volledig ontlast worden van de horizontale remkracht en het bijbehorende moment. De paalbelastingen zijn dan als volgt, zie tabel 7.3.

**Tabel 7.3. Paalbelastingen handberekening 2.**

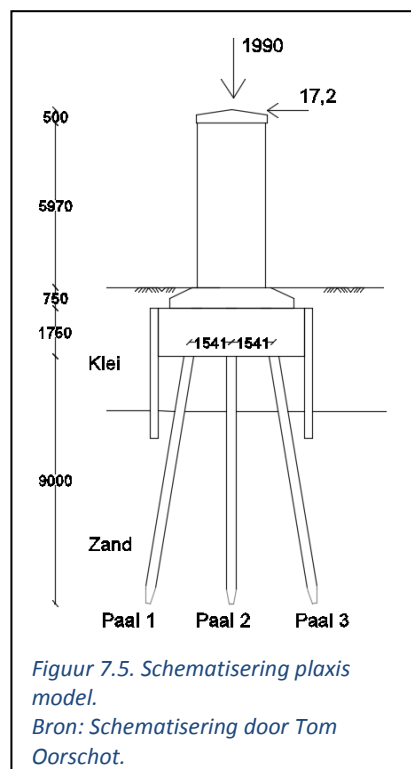
*Bron: Bijlage B - Handberekeningen*

| Handberekening   | Paal 1           | Paal 2           | Paal 3           |
|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Handberekening 2 | -606,3 kN (druk) | -615,5 kN (druk) | -606,3 kN (druk) |

### 7.1.4 Resultaten Plaxis Classic Model

Het noordelijke pijler van de Prins Hendrikbrug is 2-dimensionaal in Plaxis gemodelleerd. Een schematisering van deze modellering is weergegeven in figuur 7.5. De exacte invoer van de modellering is terug te vinden in het rapport bijgevoegd in bijlage C.

De resultaten, betreffende de paalbelastingen onder de noordelijke pijler van de Prins Hendrikbrug, voortkomend uit het Plaxis-model zijn weergegeven in tabel 7.4.



**Tabel 7.4. Plaxis model – Paalbelastingen**
*Bron: Bijlage C – Plaxis invoer en resultaten*

| Grens         | Paal 1           | Paal 2           | Paal 3           |
|---------------|------------------|------------------|------------------|
| Ondergrens    | -656,9 kN (druk) | -661,7 kN (druk) | -554,6 kN (druk) |
| Midden waarde | -652,5 kN (druk) | -660,5 kN (druk) | -553,4 kN (druk) |
| Bovengrens    | -649,1 kN (druk) | -659,4kN (druk)  | -551,6 kN (druk) |

#### 7.1.5 Conclusie deelvraag 1a

Ter controle voor de waarde van het Plaxis model is een bovengrens (handberekening 1) en een ondergrens (handberekening 2) opgesteld waar Plaxis tussen in dient te liggen, zie tabel 7.5.

**Tabel 7.5. Vergelijking uitkomsten handberekening 2 met resultaten Plaxis-model.**
*Bronnen: Bijlage B – Handberekeningen & Bijlage C – Plaxis invoer en resultaten*

| Resultaten             | Paal 1           | Paal 2           | Paal 3           |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Handberekening 1       | -663,8 (druk)    | -621,5 (druk)    | -560,9 (druk)    |
| Handberekening 2       | -606,3 kN (druk) | -615,5 kN (druk) | -606,3 kN (druk) |
| Plaxis (midden waarde) | -652,5 kN (druk) | -660,5 kN (druk) | -553,4 kN (druk) |

De waardes voortkomend uit het Plaxis-model liggen tussen de resultaten van de eerste en tweede handberekening in. Zoals voorspelt neemt de grond in de praktijk niet alle horizontale kracht op, wat betekent dat paal 1 een hogere drukkracht ondervindt dan paal 3.

Nu aangetoond is dat het Plaxis model de realiteit evenaart komt er een resultaat naar voren uit de vergelijking tussen de Plaxis resultaten en de resultaten van handberekening 1, zie tabel 7.6.

**Tabel 7.6. Vergelijking uitkomsten handberekening 1 met resultaten plaxis model.**
*Bronnen: Bijlage B – Handberekeningen & Bijlage C – Plaxis invoer en resultaten*

| Resultaten          | Paal 1           | Paal 2           | Paal 3            |
|---------------------|------------------|------------------|-------------------|
| Handberekening 1    | -663,8 (druk)    | -621,5 (druk)    | -560,9 (druk)     |
| Plaxis (ondergrens) | -656,9 kN (druk) | -661,7 kN (druk) | - 554,6 kN (druk) |
| Procentuele afname  | 1,03%            | -6,50%           | 1,12%             |

De grootste paalbelasting die naar voren is gekomen uit het Scia Engineer model is gelijk 818 kN en qua locatie vergelijkbaar met de locatie van paal 1. Deze paalkracht neemt met een percentage van ongeveer 1,03% af door het effect van de ondergrond. De horizontale kortdurende remkracht belast paal 1 met maximaal 50 kN extra en ontlast paal 3 met maximaal 50 kN minder waarmee het verschil tussen deze twee palen maximaal 100 kN bedraagt. Uit Plaxis blijkt dat het verschil tussen paal 1 en paal 3 nog steeds deze 100 kN bedraagt. Dit betekent dat er geen reductie van de paalbelasting optreedt als gevolg van de horizontale kortdurende remkracht. Het programma Plaxis suggereert dat de grond een tegenkracht uitoefent in verticale richting. Gezien samenstelling van de ondergrond zal

deze in de praktijk geen verticale kracht uitoefenen en is dit een nauwkeurigheid van Plaxis. Zo kan er geconcludeerd worden dat de reductie van de paalbelasting 0% bedraagt waarmee de minimale reductie van de maatgevende paalbelasting niet behaald wordt ( $0\% < 8,3\%$ )

## 7.2 STEENBESTORTING

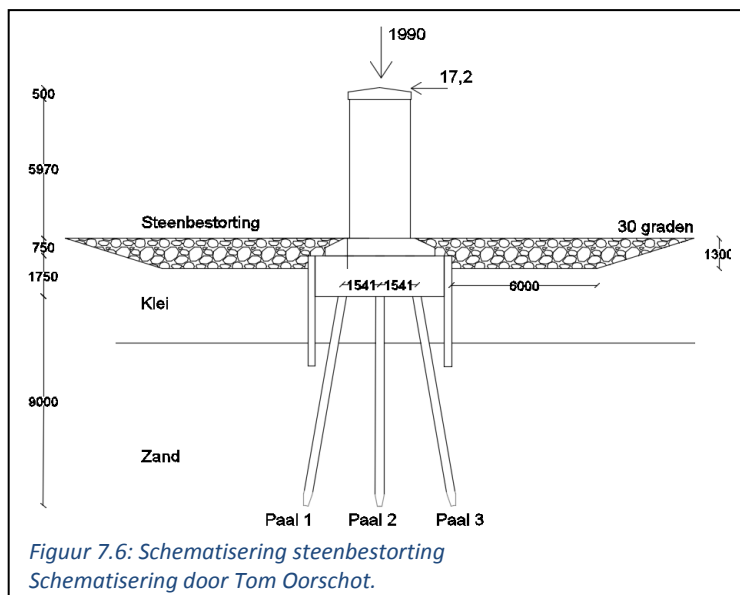
In dit hoofdstuk komen de resultaten naar voren die gevonden zijn in betrekking tot het onderzoek voor deelvraag 1b. In dit hoofdstuk komen de volgende resultaten naar voren:

- Aanpassing verwachting van het effect van de steenbestorting op de paalbelasting;
- Plaxis model resultaten

### 7.2.1 Uitgangspunten

In de te bekijken situatie wordt hetzelfde model aangehouden als bij het Plaxis-model van deelvraag 1a. Dit betekent dat dezelfde belastinggevallen toegepast zullen worden. Het verschil is dat er een steenbestorting toegepast wordt in deze situatie. Deze steenbestorting zal bestaan uit grind waarvan de parameters verantwoord zijn in paragraaf 4.2.5.

In overleg met geotechnisch expert de heer Van Dalen wordt de steenbestorting tot 6 meter buiten de voet van de noordelijke pijler aangebracht waarna deze onder een maximale hoek van 30 graden afloopt met een dikte van 1,3 meter. Deze afmetingen van een steenbestorting geven een indicatie van een echte toepassing. Daarnaast wordt voor het soortelijk gewicht van de steenbestorting in natte toestand  $20 \text{ kN/m}^3$  aangehouden. Een schematisering van de situatie is weergegeven in figuur 7.6.



### Verwachting

In paragraaf 3.2. is een verwachting uitgesproken over het effect van een steenbestorting op de reductie van de paalbelasting. Nu de resultaten van deelvraag 1a bekend zijn wordt hier een lichte aanpassing in gemaakt.

Uit deelvraag 1a blijkt dat de ondergrond onder de noordelijke pijler van de Prins Hendrikbrug in staat is de horizontale kracht totaal op te nemen. Dit betekent dat een steenbestorting overbodig lijkt. De palen zullen mogelijk iets meer belast worden, gezien een deel van de steenbestorting boven de fundering wordt aangebracht, zie figuur 7.6. Door de locatie van de steenbestorting vindt er dicht bij het NAP een hogere horizontale korrelspanning plaats. Dit komt de stabiliteit van de constructie ten goede.

De verwachting qua drukbelasting op de palen bij toepassing van een steenbestorting is dat deze niet het vermogen heeft de palen te ontlasten. Mogelijk worden de palen zelfs extra belast.

### 7.2.2 Resultaten Plaxis model steenbestorting

De noordelijke pijler van de Prins Hendrikbrug is 2-dimensionaal in Plaxis gemodelleerd. Een schematisering van deze modellering is weergegeven in figuur 7.6. De exacte invoer van de modellering is terug te vinden in het rapport bijgevoegd in bijlage C.

De resultaten, betreffende de paalbelastingen onder de noordelijke pijler van de Prins Hendrikbrug, voortkomend uit het Plaxis-model voor de steenbestorting zijn weergegeven in tabel 7.8.

**Tabel 7.8. Plaxis model – Paalbelastingen inclusief steenbestorting**

*Bron: Bijlage C – Plaxis invoer en resultaten*

| Grens         | Paal 1           | Paal 2           | Paal 3           |
|---------------|------------------|------------------|------------------|
| Ondergrens    | -679,6 kN (druk) | -668,6 kN (druk) | -582,3 kN (druk) |
| Midden waarde | -679,4 kN (druk) | -667,3 kN (druk) | -585,3 kN (druk) |
| Bovengrens    | -675,9 kN (druk) | -668,9 kN (druk) | -583,2 kN (druk) |

Het deel van de steenbestorting dat zich boven de fundering bevindt oefent een belasting uit op de palen. Zo is het niet ondenkbaar dat de paalbelasting iets toe zal nemen. Het totale gewicht van de steenbestorting die bovenop de bestaande fundering komt te liggen is gelijk aan 34 kN. Dit betekent dat de buitenste twee palen mogelijk met zo'n 17 kN verzwaaard worden.

### 7.2.3 Conclusie deelvraag 1b

Om een goed beeld te krijgen van het effect van de steenbestorting worden de resultaten van het Plaxis model zonder steenbestorting vergeleken met het Plaxis model met een steenbestorting. De resultaten zijn terug te vinden in tabel 6.2.

**Tabel 6.2. Vergelijking Plaxis modellen**

*Bron: Bijlage C – Plaxis invoer en resultaten*

| Grens                                         | Paal 1           | Paal 2           | Paal 3           |
|-----------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Plaxis zonder steenbestorting (midden waarde) | -652,5 kN (druk) | -660,5 kN (druk) | -553,4 kN (druk) |
| Plaxis met steenbestorting (midden waarde)    | -679,4 kN (druk) | -667,3 kN (druk) | -585,3 kN (druk) |
| Toename paalbelasting                         | -26,9 kN (druk)  | -6,8 kN (druk)   | -31,9 kN (druk)  |

Uit bovenstaande tabel blijkt dat de voorspelling redelijk uitgekomen is. Paal 1 en paal 3 ondervinden meer druk van de steenbestorting dan aanvankelijk verwacht. Dit is waarschijnlijk een gevolg de steenbestorting die enigszins wegzakt in de onderliggende kleilaag. Zo drukt deze grond op de twee hoekpalen waardoor deze meer belast worden, dan de middelste paal, ofwel negatieve kleeft.

Al met al kan er geconcludeerd worden dat er geen steenbestorting toegepast hoeft te worden wat betreft het ontlasten van de heipalen qua drukbelasting. Het enige effect dat de steenbestorting tot gevolg heeft is dat de ondergrond naast de voet van de pijler beschermt wordt tegen de schroeven van schepen. Daarnaast zal de grond rondom de pijler in de komende jaren niet uitgediept worden bij toepassing van een steenbestorting.

Desalniettemin biedt de steenbestorting constructief geen meerwaarde voor de pijlerconstructie.

## 8 ONTWERPOPTIMALISATIES

---

In dit hoofdstuk worden de conclusies van de ontwerptimalisaties gegeven. Dit onderzoek is beschreven in de afstudeerscriptie van de student waarmee dit duo-afstudeerproject wordt uitgevoerd (*W.J. Benard, 2017*).

Op basis van een theoretische benadering kan er geconcludeerd worden dat de volgende ontwerptimalisaties het meest relevant zijn om op dit moment te onderzoeken:

- UHSB-rijdek op gehanteerd balkrooster;
- UHSB-rijdek op aangepast balkrooster.

Bij deze ontwerptimalisaties wordt onderzocht of er gewicht bespaard kan worden door het UHSB-rijdek dunner uit te voeren.

### 8.1 OPTIMALISATIE RIJDEKDIKTE GEHANTEERD BALKROOSTER

De optimale dikte van het rijdek van ultra-hogesterktebeton bij het gehanteerde stalen balkrooster betreft 140 millimeter. De maatgevende paalbelasting van een UHSB-rijdek van deze dikte betreft 769kN. Dit resulteert in een besparing van 49 kN, ofwel 6,0%.

### 8.2 OPTIMALISATIE RIJDEKDIKTE AANGEPAST BALKROOSTER

De optimale dikte van het rijdek van ultra-hogesterktebeton bij het aangepaste stalen balkrooster betreft 85 millimeter. De maatgevende paalbelasting van een UHSB-rijdek van deze dikte betreft 753 kN. Dit resulteert in een besparing van 65 kN, ofwel 7,9 %.

### 8.3 CONCLUSIE ONTWERPOPTIMALISATIES

Geconcludeerd wordt dat de op dit moment meest relevante ontwerptimalisatie een optimalisatie van het UHSB-rijdek is. Een reductie van de rijdekdikte ten opzichte van het uitgangspunt kan toegepast worden bij zowel het hanteren van het huidige balkrooster, als het toepassen van een aangepast balkrooster.

Bij toepassing van het gehanteerde balkrooster kan de maatgevende paalbelasting met circa 6,0% gereduceerd worden, terwijl dit bij toepassing van het aangepaste balkrooster zelfs met circa 7,9% verminderd kan worden. Aandachtspunt hierbij is het nog niet opgenomen zijn van bijvoorbeeld plooi-schotten, kipsteunen en staalplaten. Zo wordt een geringe toename van de paalbelasting verwacht na het maken van gedetailleerde berekeningen van het stalen balkrooster.

Ondanks dat de paalbelasting meer gereduceerd kan worden bij het aangepaste balkrooster, resulteren beide ontwerptimalisaties niet om de noordelijke pijler her te gebruiken bij toepassing van een bovenbouw met UHSB-rijdek. Afhankelijk van eventuele andere toe te passen optimalisaties wordt de toepassing van het gehanteerde balkrooster aanbevolen, aangezien de maatgevende paalbelasting niet veel verschilt ten opzichte van deze paalbelasting bij aangepast balkrooster. Toepassing van het aangepaste balkrooster resulteert naar verwachting in meer uitvoeringstijd en –kosten, waardoor deze mogelijkheid niet geadviseerd wordt indien noodzakelijk.

## 9 COMBINATIEMOGELIJK OPTIMALISATIEMOGELIJKHEDEN

---

In dit hoofdstuk wordt het resultaat betreffende een mogelijke combinatiemogelijkheid tussen de funderings- en ontwerptoptimalisatie weergegeven. Een combinatie van beide optimalisaties zal mogelijk resulteren in het voldoen aan de doelstelling.

### **Funderingsoptimalisaties**

In het onderzoek naar de funderingsoptimalisaties zijn twee verschillende optimalisatiemogelijkheden onderzocht. Hieruit is echter naar voren gekomen dat de funderingsoptimalisaties in de praktijk niet het gewenste resultaat leveren, aangezien er geen reductie van de paalbelasting zal plaatsvinden.

### **Ontwerptoptimalisaties**

In het onderzoek naar de ontwerptoptimalisaties zijn twee verschillende situaties bekeken. Hieruit komt naar voren dat beide optimalisaties resulteren in een afname van de maatgevende paalbelasting, echter niet voldoen aan de te behalen reductie van de paalbelasting. Zo kan een belastingreductie van 6,0% en 7,9% behaald worden bij een reductie van de UHSB-rijdekdikte bij respectievelijk het gehanteerde balkrooster en een aanpast balkrooster. Geadviseerd wordt om het gehanteerde balkrooster toe te passen, zij het dat dit afhankelijk is van een eventueel andere toe te passen optimalisatie.

### **Combinatie optimalisaties**

De verwachting voorafgaande aan het onderzoek betrof dat een combinatie van een funderings- en ontwerptoptimalisatie zou kunnen resulteren in een minimaal benodigde afname van de maatgevende paalbelasting van 8,3%. Dit zou met name van belang zijn indien in beide onderzoeken naar voren komt dat de te behalen reductie van 8,3% niet te behalen is door toepassing van slechts één optimalisatie.

De twee meest relevante optimalisaties die naar voren zijn gekomen uit beide onderzoeken betreffen een beschouwing van de huidige fundering als paal-plaatfundering en een reductie van de UHSB-rijdekdikte bij het gehanteerde balkrooster.

De reductie van de UHSB-dikte heeft geen invloed op de beschouwing van de huidige fundering als paal-plaatfundering, aangezien dit onderzoek ingaat op het mogelijk opnemen van horizontale belasting, waarbij specifiek de rembelasting. Het is niet aannemelijk dat verticale krachten opgenomen zullen worden, aangezien de grond reeds ingeklonken is door de huidige PH-brug. Een reductie van de UHSB-rijdekdikte heeft echter geen invloed op de horizontale krachtswerking.

Een beschouwing van de noordelijke pijlerfundering heeft geen invloed op een reductie van de rijdekdikte van de PH-brug, ongeacht of dit uitgevoerd wordt met gehanteerd of aangepast balkrooster. De rijdekdikte wordt bepaald met de krachtswerking die optreedt op de bovenbouwconstructie en wordt niet beïnvloed door de krachtsafdracht aan de ondergrond. Een beschouwing van de fundering als paal-plaatfundering heeft dus geen invloed op het rijdek.

Beide optimalisatiemogelijkheden in ogenschouw nemen, kan geconcludeerd worden dat een combinatie van de meeste relevante en onderzochte optimalisaties mogelijk is. Een combinatie van deze optimalisaties zal echter niet resulteren in de minimaal benodigde belastingafname van 8,3%.

## CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

---

In dit hoofdstuk worden de conclusies getrokken betreffende dit afstudeeronderzoek. Daarnaast worden aanbevelingen gegeven die zouden kunnen leiden tot mogelijk vervolgonderzoek.

De doelstelling van dit onderzoek betreft:

*“Het aantonen dat de bestaande noordelijke pijler in de huidige staat te hergebruiken is bij toepassing van een bovenbouw met een rijdek van ultra-hogesterktebeton (UHSB).”*

Om aan deze doelstelling te voldoen, is de volgende hoofdvraag opgesteld:

*“In hoeverre is het door toepassing van funderings- en ontwerpoptimalisaties mogelijk om de bestaande pijlers in de huidige staat te hergebruiken bij toepassing van een bovenbouwconstructie met een rijdek van UHSB?”*

### CONCLUSIES

Om een conclusie betreffende de hoofdvraag te kunnen stellen, zijn een drietal deelvragen opgesteld. De conclusie per deelvraag is hieronder weergegeven, waarna een overkoepelende conclusie wordt getrokken aangaande de hoofdvraag.

#### **Funderingsoptimalisaties**

In het onderzoek naar de funderingsoptimalisaties zijn de volgende twee optimalisaties onderzocht:

- Beschouwing van de fundering als een paal-plaatfundering;
- Toepassing van een steenbestorting.

Voorafgaande aan het onderzoek is de verwachting uitgesproken dat de grond de maatgevende paalreactie kan reduceren bij een beschouwing van de noordelijke pijlerfundering als een paal-plaatfundering. De dat de grond in staat is een deel van de kortdurende horizontale remkracht op te nemen. Uit het onderzoek lijkt naar voren te komen dat de grond de paalbelasting alleen in verticale richting ontlast, echter is dit op basis van de grondsamenstelling niet mogelijk. Zo kan geconcludeerd worden dat er geen reductie van de paalreactie plaatsvindt als gevolg van deze optimalisatie.

Door toepassing van een steenbestorting zou de pijler beter ingeklemd wordt ten opzichte van de huidige situatie. De maatgevende paalbelasting zou hierdoor mogelijk verlaagd kunnen worden, doordat deze een deel van de kortdurende horizontale remkracht opneemt. Uit onderzoek blijkt dat toepassing van een steenbestorting de palen juist meer zal belasten. Dit komt voort uit extra gewicht en negatieve kleeft. Zo kan geconcludeerd worden dat de steenbestorting geen constructieve meerwaarde biedt voor de fundering en de palen niet zal ontlasten.

Na afronden van het onderzoek kan geconcludeerd worden dat de maatgevende paalbelasting niet ontlast kan worden door toepassing van een funderingsoptimalisatie. Dit betekent dat de funderingscapaciteit reeds volledig benut wordt.

#### **Ontwerptoptimalisaties**

In het onderzoek naar de ontwerptoptimalisaties zijn de volgende twee optimalisaties onderzocht:

- Reductie van de UHSB-rijdekdicke bij gehanteerd balkrooster;
- Reductie van de UHSB-rijdekdicke bij aangepast balkrooster.

Voorafgaande aan het onderzoek is de verwachting uitgesproken dat het rijdek van UHSB gereduceerd kan worden bij een gedetailleerde berekening. De rijdekdikte zoals aangehouden in de haalbaarheidsstudie van Ingenieursbureau Drechtsteden (*Ingenieursbureau Drechtsteden, 2016*) is bepaald aan de hand van een conservatieve vuistregel van de UHSB-rijdekdikte.

Uit het onderzoek blijkt dat de UHSB-rijdekdikte bij het gehanteerde balkrooster (*Ingenieursbureau Drechtsteden, 2016*) gereduceerd kan worden van 200 mm naar 140 mm. Na een globale optimalisatie van de staalprofielen van het balkrooster, is bepaald dat de maatgevende paalbelasting onder de noordelijk pijlerfundering met 6,0% gereduceerd kan worden.

Uit het onderzoek blijkt dat de UHSB-rijdekdikte bij een aangepast balkrooster gereduceerd kan worden tot 85 mm. Na een globale optimalisatie van de staalprofielen van het balkrooster, is bepaald dat de maatgevende paalbelasting onder de noordelijke pijlerfundering met 7,9% gereduceerd kan worden, rekening houdend met het extra gewicht van de toegevoegde liggers.

Na afronden van het onderzoek kan geconcludeerd worden dat beide optimalisatiemogelijkheden de maatgevende paalbelasting niet dusdanig kunnen ontlasten zodat de maatgevende paalbelasting voldoet aan het paaldraagvermogen. Om dit te realiseren dient een belastingafname van ten minste 8,3% behaald te worden.

### **Combinatiemogelijkheid**

In het onderzoek naar de combinatiemogelijkheid zijn de volgende twee optimalisaties onderzocht:

- Beschouwing van de fundering als een paal-plaatfundering;
- Reductie van de UHSB-rijdekdikte.

Voorafgaande aan het onderzoek is de verwachting dat een combinatie van een funderings- en ontwerptoptimalisatie zou kunnen resulteren in een minimaal benodigde afname van de maatgevende paalbelasting. Het toepassen van een combinatiemogelijkheid is met name van belang indien in beide onderzoeken naar voren komt dat de benodigde reductie van de paalbelasting niet met één optimalisatiemogelijkheid behaald kan worden.

Uit onderzoek blijkt dat de mogelijk te combineren optimalisatiemogelijkheden elkaar niet beïnvloeden, waardoor de resultaten te combineren zijn. Zo zou een mogelijke combinatie kunnen resulteren in het voldoen van de maatgevende paalbelasting ten aanzien van het paaldraagvermogen. De minimaal benodigde belastingafname van 8,3% kan echter niet behaald worden door toepassing van een combinatie van de onderzochte funderings- en ontwerptoptimalisaties.

### **Overkoepelende conclusie**

Uit de optimalisatieonderzoeken betreffende de onderzochte funderings- en ontwerptoptimalisaties blijkt dat de minimaal benodigde belastingafname van 8,3% niet behaald kan worden door één optimalisatie. Een combinatie tussen de onderzochte funderings- en ontwerptoptimalisaties is mogelijk, maar resulteert eveneens niet in de minimaal benodigde belastingafname. Dit betekent dat hergebruik van de bestaande pijlers in de huidige staat bij toepassing van een bovenbouwconstructie met een rijdek van UHSB niet mogelijk is door toepassing van de onderzochte funderings- en ontwerptoptimalisaties of een combinatie hiervan.

## AANBEVELINGEN

In dit hoofdstuk worden aanbevelingen gegeven over het overkoepelende onderzoek en over het uitgevoerde optimalisatieonderzoek naar het bovenbouwontwerp.

### Overkoepelende aanbevelingen

Geconcludeerd is dat de onderzochte funderings- en ontwerpoptimalisaties niet resulteren in het behalen van de doelstelling. Om toch aan deze doelstelling te kunnen voldoen, worden hieronder een aantal aanbevelingen gegeven.

Aanbevolen wordt een vervolgonderzoek uit te voeren. Dit onderzoek zal ingaan op één van de niet onderzochte ontwerpoptimalisaties: verplaatsen van de remkrachten of voorzegen van de bovenbouwconstructie. Beiden zullen, indien toegepast, resulteren in de minimaal benodigde belastingafname om hergebruik van de bestaande pijlers mogelijk te maken toepassing van een bovenbouwconstructie met UHSB-rijdek. Een toelichting op beide is hieronder gegeven.

De verplaatsing van de remkrachten van de noordelijke pijler naar het landhoofd. De noordelijke pijlerfundering is op dit moment overbelast en de landhoofd fundering heeft op dit moment een capaciteitsoverschot. Daarnaast dient het landhoofd uitgebreid te worden, zoals blijkt uit de gemaakte haalbaarheidsstudie (*Ingenieursbureau Drechtsteden, 2016*), waardoor er bij het berekenen hiervan rekening gehouden kan worden met deze eventuele extra horizontale krachten.

Het voorzegen van de bovenbouwconstructie, waardoor een gelijkmatige verdeling van het eigen gewicht van deze constructie zal optreden. De krachtsafdracht op het landhoofd, de noordelijke en zuidelijke pijler in de huidige situatie is respectievelijk 3/16, 10/16 en 3/16. Na het voorzegen wordt de belastingverhouding 1/3, 1/3 en 1/3.

Indien één van genoemde ontwerpoptimalisaties toegepast wordt, kan de in dit onderzoek bepaalde UHSB-rijdekdikte toegepast worden. Voor het dek dienen gedetailleerde berekeningen uitgevoerd te worden. Hierbij kan gedacht worden aan het bepalen van las- en verankeringslengtes en een diameterbepaling van het wapeningsnet. Dit laatste geldt met name in de breedterichting, aangezien in lengterichting de maatgevende diameter reeds bepaald is op basis van dit onderzoek. Daarnaast dient het berekende rijdek proefondervindelijk getoetst te worden op vermoeiing.

### Uitgevoerde funderingsoptimalisatieonderzoek

In het uitgevoerde onderzoek naar de funderingsoptimalisaties is de noordelijke pijler gemodelleerd in het computerprogramma Plaxis. In dit model zijn de nodige parameters aangehouden die alle materialen en diens eigenschappen definiëren. Aangezien er geen grondig bodemonderzoek verricht is zijn er voor deze grondsoorten aannames gemaakt op basis van NEN9997 betreffende sommige eigenschappen. Dit blijven vanzelfsprekend aannames zouden exact bepaald moeten worden om resultaten uit het model te verkrijgen die meer nauwkeurig zijn.

## LITERATUURLIJST

---

### Artikelen, documenten en boeken

Attahiri, M., Geffen, L. van, Reusink, J.H., Spruit, R., Verduyn, R., Mugge, F., Westerhuis, A.L.R.R. (2016). *Prins Hendrikbrug – Haalbaarheidsonderzoek hergebruik bestaande onderbouw*. Dordrecht: Ingenieursbureau Drechtsteden.

Benard, W.J. (2017). *Optimalisatiemogelijkheden voor toepassing bovenbouw met UHSB-rijdek op bestaande pijlers*. Rotterdam: Ingenieursbureau Rotterdam.

Beurze, R.S., Feddema, A. (2010). *CUR; Ontwerprichtlijnen 'Door grond horizontaal belaste palen'*. Geotechniek artikel.

Blok, R. (2014). *Tabellen voor de bouw- en waterbouwkunde*. Utrecht: ThiemeMeulenhoff.

Everts, H.J., Jeltjes, R.L.T., Tol, A.F. van. (1996). *Paal-plaatfundering in Nederland*. Cement artikel.

Galjaard, J., Kimenai, M.C.W. (2008). *Nieuwbouw bestuurscentrum Rabobank Utrecht krijgt uitgebalanceerde fundering*. Geotechniek artikel.

Kreischer, M., Konings, M.P.M. (2016). *Prins Hendrikbrug – Rapportage veldwerkonderzoek*. Rotterdam: Ingenieursbureau Gemeentewerken Rotterdam.

Plaxis (2012). *Material Models Manual*. Plaxis 2D.

Prevost, J.H. (1976). Undrained stress-strain-time behaviour of clays. Journal of the Geotechnical Engineering Division.

### Internetpagina's

BALM betonreparaties sinds 1962. Grondinjectie voor horizontale of verticale stabilisatie van grond en funderingen, Geraadpleegd op 19-04-2017

[http://ivacon.eu/bestanden/Webfile5\\_18-3-2014@13-5-8\\_1.pdf](http://ivacon.eu/bestanden/Webfile5_18-3-2014@13-5-8_1.pdf)

Bodemrichtlijn. *Richtlijn herstel en beheer (water)bodemkwaliteit*, Geraadpleegd op 17-04-2017

<https://www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bouwstoffen-en-afvalstoffen/bodemassen-en-slakken/bouwstoffase-bodemassen-en105505/bouwstoffase-staalslak>

CROW. Hoofdstuk 52 – Kust en oeverwerken, Geraadpleegd op 18-04-2017

[https://www.crow.nl/getmedia/30a5193c-f185-4aa8-8506-8a501a794a6f/Ter-visie-gelegde-tekst-\(4\)-Hfdst\\_523.aspx](https://www.crow.nl/getmedia/30a5193c-f185-4aa8-8506-8a501a794a6f/Ter-visie-gelegde-tekst-(4)-Hfdst_523.aspx)

Gemeente Delft. *Ontwerp Sebastiaanbrug klaar*, Geraadpleegd op 07-04-2017

[https://www.delft.nl/inwoners/Nieuws\\_2017/Ontwerp\\_Sebastiaansbrug\\_klaar](https://www.delft.nl/inwoners/Nieuws_2017/Ontwerp_Sebastiaansbrug_klaar)

Injection Nederland BV. *Constructieve bodeminjectie heeft toekomst*, Geraadpleegd op 20-04-2017  
<http://www.injection.nl/bodeminjectie.html>

Kornuyt. C. BV. *Grondinjectie*, Geraadpleegd op 20-04-2017  
<https://www.kornuyt.nl/bodeminjectie/grondinjectie/>

Prevent-vochtwering. *Een trillingvrije en kostenbesparende techniek*, Geraadpleegd op 20-04-2017  
<https://www.prevent-vochtwering.nl/diensten/bouwkundige-injectiesystemen/grondstabilisatie-en-grondinjectie/>

Solid ID bouwkundige bodeminjecties. *Stabiliserende grondinjecties*, Geraadpleegd op 19-04-2017  
[http://www.soilid.nl/stabiliserende-injecties/?gclid=CJj0Lva\\_dICFckaGwodscEEBw](http://www.soilid.nl/stabiliserende-injecties/?gclid=CJj0Lva_dICFckaGwodscEEBw)

Upcommons. *Hardening Soil*, Geraadpleegd 10-05-2017.  
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3423/4005513.pdf?sequence=13&isAllowed=y>

Volker Staal en Funderingen (VSF). *Horizontale Bodeminjecties*, Geraadpleegd op 19-04-2017  
<http://www.vsf.nl/nl/funderingen/grondverbetering/horizontale-bodeminjecties>

Volker Staal en Funderingen (VSF). *Stabiliserende Bodeminjecties*, Geraadpleegd op 19-04-2017  
<http://www.vsf.nl/nl/funderingen/grondverbetering/stabiliserende-bodeminjecties>

Vree. J. de. *Plaatfundering*, Geraadpleegd op 03-04-2017  
<http://www.joostdevree.nl/shtmls/plaatfundering.shtml>

## BIJLAGEN

---

### BIJLAGE A. LITERATUURSTUDIE

Deze bijlage betreft een op zichzelf staand document (*Oorschot (2017): Literatuuronderzoek optimalisatiemogelijkheden funderingscapaciteit*), zoals hierna opgenomen. Een samenvatting hiervan is weergegeven in hoofdstuk 3.

Bijlage A is terug te vinden in de bijlagenmap, zie tab 1.

## BIJLAGE B. HANDBEREKENINGEN

Deze bijlage betreft een opzichzelfstaand document (*Oorschot (2017): Handberekeningen paalreacties*), zoals hierna opgenomen. Een samenvatting hiervan is weergegeven in hoofdstuk 7.

Bijlage B is terug te vinden in de bijlagenmap, zie tab 2.

## BIJLAGE C. PLAXIS BEREKENINGEN

Deze bijlage betreft een opzichzelfstaand document (*Oorschot (2017): Plaxis berekeningen*), zoals hierna opgenomen. Een samenvatting hiervan is weergegeven in hoofdstuk 4.

Bijlage C is terug te vinden in de bijlagedmap, zie tab 3.