



Ontwerp afmeervoorziening Voorhavendam IJmuiden

Modellering van risico op zettingsvloeiingen

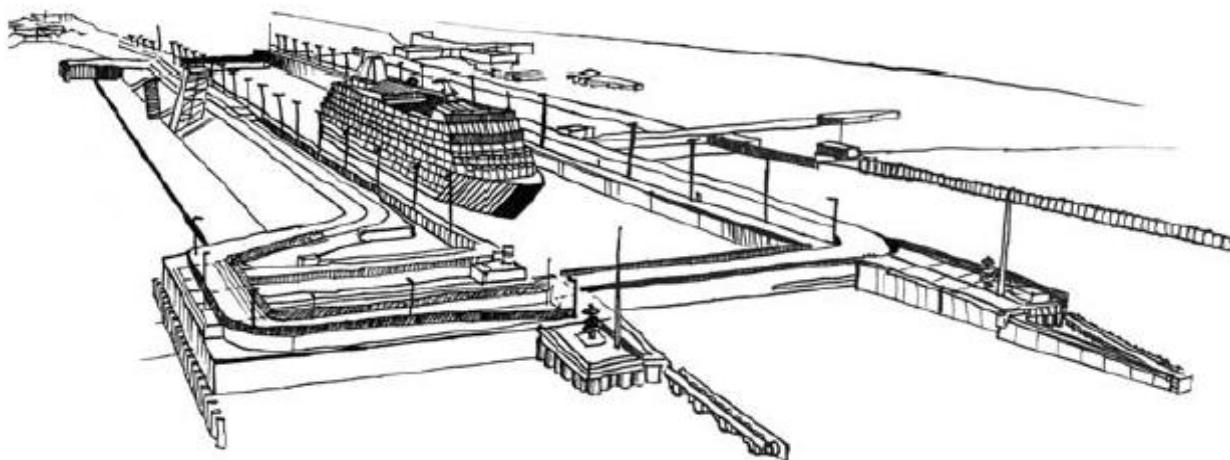
Auteurs:

Nick Jackson
Bas Speelman



Ontwerp afmeervoorziening voorhavendam IJmuiden

Eindrapport



Documenttype : Eindrapport
Versie : 2.0
Datum : 10-6-2016
Status : DEFINITIEF
Opmerking : **VERTROUWELIJK**

Opdrachtgever : Volker Staal en Funderingen
: Hogeschool Rotterdam

Akkoord	Naam	Functie	Datum	Paraaf
Opgesteld	Bas Speelman Nick Jackson	Afstudeerder (0859182) Afstudeerder (0863374)	10-6-2016	
Gecontroleerd	L.A. (Leendert) van Gelder	Schoolbegeleider		
Vrijgegeven	Bas Speelman Nick Jackson	Afstudeerder (0859182) Afstudeerder (0863374)		
Geaccepteerd	B.J. (Bartho) Admiraal	Begeleider		



COLOFON

Algemene informatie

Titel afstudeeronderzoek:

Ontwerp afmeervoorziening Voorhavendam IJmuiden

Subtitel afstudeeronderzoek:

Modellering van risico op zettingsvloeiingen bij intrillen van stalen buispalen

Auteurs:

Bas Speelman

Nick Jackson

Studentnummers:

0859182

0863374

Studie:

Civiele Techniek

Minor:

Waterbouw

Studiejaar:

2015 - 2016

Onderwijsinstelling:

Hogeschool Rotterdam

Schoolbegeleider (1^{ste} lezer):

Ir. L.A. (Leendert) van Gelder

2^{de} lezer:

Ir. A.A. (Awni) Sedra

Afstudeerbedrijf:

Volker Staal en Funderingen

Bedrijfsbegeleider:

A. (Antoine) Feddema;

sr. Specialist geotechniek, Volker Infra Design

Externe beoordelaar:

Dhr. E. Noordam

Referentieproject:

Nieuwe zeesluis IJmuiden, OpenIJ

Wijzigingen beheer

Revisie	Omschrijving	Datum
0	Opzet	03-05-2016
1	Concept	24-05-2016
2	Definitief	30-05-2016

**Ontwerp afmeervoorziening voorhavendam IJmuiden
Eindrapport**

VOORWOORD

Dit eindrapport is geschreven in kader van de afstudeeropdracht van Bas Speelman en Nick Jackson, studenten van de opleiding Civiele Techniek aan de Hogeschool Rotterdam, in opdracht van Volker Staal en Funderingen bv, vertegenwoordigd door dhr. A. (Antoine) Feddema, sr. specialist Geotechniek namens Volker Infra Design.

De afstudeeropdracht omvat een verdiepend onderzoek naar de risico's op optredende zettingsvloeiingen tijdens het aanbrengen van stalen buispalen nabij onderwatertaluds.

De auteurs willen graag via deze weg het afstudeerbedrijf, Volker Staal en Funderingen, hartelijk danken voor de mogelijkheid van dit afstudeeronderzoek. In het bijzonder willen de auteurs daarbij de volgende personen bedanken voor hun begeleiding, kennis en behulpzaamheid:

- A. (Antoine) Feddema voor zijn input en dagelijkse begeleiding tijdens het gehele onderzoek;
- B. (Bartho) Admiraal voor zijn input en begeleiding tijdens het gehele onderzoek;
- A. (Aïssa) Yahyaoui voor zijn behulpzaamheid bij het modelleren met D-sheet piling;
- H. (Hans) van der Meijs voor zijn behulpzaamheid bij het construeren van het ontwerp;
- P. (Peter) van der Werff voor het mogelijk maken van het locatiebezoek tijdens de praktijkproeven;
- S (Sander) Steeneken voor zijn behulpzaamheid bij de berekeningsmethodieken voor de zettingsvloeiingen

Naast de behulpzaamheid en input vanuit Volker Staal en Funderingen willen de auteurs graag nog de volgende bedrijven bedanken voor het vrijgeven van informatie:

- Volker Infra Design
- Fugro GeoServices B.V

Tot slot een dankwoord voor de begeleiding vanuit de Hogeschool Rotterdam, dhr. L.A. (Leendert) van Gelder, voor de begeleiding, adviezen en feedback tijdens de gehele onderzoeksperiode.

Rotterdam, mei 2016

Bas Speelman
Nick Jackson

Ontwerp afmeervoorziening voorhavendam IJmuiden
Eindrapport**SAMENVATTING**

Dit afstudeeronderzoek, in opdracht van Volker Staal en Funderingen, richt zich op het risico op het ontstaan van zettingsvloeiingen met daarin expliciet de gevolgen van het intrillen van buispalen op de stabiliteit van nabij gelegen onderwatertaluds. Ter uitwerking daarvan is een fictieve afmeervoorziening ontworpen voor project OpenIJ ter IJmuiden om zo de gevolgen van de installatietechnieken in beeld te brengen en daarmee maatregelen op te kunnen stellen die de mogelijke risico's verkleinen.

Binnen het project OpenIJ is van enkele gebieden bekend dat deze gevoelig zijn voor zettingsvloeiingen. Om meer inzicht te verkrijgen betreffende dit verschijnsel, is dit onderzoek opgesteld en zijn er verschillende proeven uitgevoerd tijdens project OpenIJ. Deze proeven betreffen het testen van de gevoeligheid voor zettingsvloeiingen van de verschillende onderwatertaluds. Hiervoor zijn meerdere buispalen de grond ingetrild en geheel waarbij er binnen de taluds de trillingssnelheden en waterspanningen gemeten zijn. Met deze gegevens is de gevoeligheid voor zettingsvloeiingen voor dit project verduidelijkt.

Deze gevoeligheid voor zettingsvloeiingen is bepaald met behulp van verschillende rekenmethoden en vergelijkingen. De rekenmethoden geven antwoord op de vraag of er wel of geen zettingsvloeiingen op zullen treden waarna deze uitkomsten vergeleken zijn met de uitkomsten van de proeven. Dit is gedaan ter validatie van de berekeningen en zo doende deze toepasbaar te kunnen maken voor het eigen ontwerp. Ook is er een vergelijking gemaakt met een eerder uitgevoerd project waarbij vergelijkbare werkzaamheden zijn verricht maar dan in andere omstandigheden. Dit is gedaan om zo meer inzicht te verkrijgen in de mate waarin de verschillende parameters invloed hebben op het ontstaan van zettingsvloeiingen.

Nadat de verschillende invloeden en voorwaardes voor zettingsvloeiingen bekend zijn en de gevolgen van de optredende trillingen beter in kaart zijn gebracht, is een fictief ontwerp gemaakt voor een afmeervoorziening gelegen bij de nieuwe zeesluis van project OpenIJ. Dit fictieve ontwerp dient als een voorbeeldontwerp waarbij de uitvoering is aangepast op het reduceren van de kans op zettingsvloeiingen.

De nieuwe afmeervoorziening zal dienen als een wachtplaats voor de grotere schepen die de zeesluis zullen passeren en wordt aan de zeezijde van de sluis worden geplaatst. Voor het ontwerp zullen verschillende belastingscenario's worden uitgerekend om de afmeervoorziening voldoende resistent te maken tegen de afmerende scheepsklasse.

De belastingen dienen te worden opgevangen door de aanwezige bolders en fenders op de dukdalf en door de paal zelf. Deze zijn dan ook apart gedimensioneerd waarmee met verschillenden belastingsvarianten zijn gerekend. Bij de verschillende belastingvarianten is er gevarieerd in waterstanden en aanvaarhoeken van de schepen. Op deze belastingen zijn de bolders en fenders daarna gecontroleerd.

Vervolgens is ook de inheidiepte van het ontwerp bepaald. Hiervoor is het computerprogramma 'D-SHEET PILING' toegepast. Met dit programma kan de situatie geschematiseerd worden waarmee de inheidiepte wordt bepaald op de maximale verplaatsing van zowel de bovenkant als onderin de buispaal. Hiermee wordt doormiddel van iteratie de diepte van de paal zodanig ingesteld dat de vervorming binnen de toelaatbare eisen blijft maar de paal geen overbodige inheidiepte heeft.

Na het volledig uitwerken van de afmeervoorziening zijn er ontwerptekeningen gemaakt om daarmee een beeld te geven aan de constructie. Hiervoor zijn de programma's 'AUTOCAD' en 'Sketchup' gebruikt.

Om bij overige trilwerkzaamheden bij OpenIJ de kansen op zettingsvloeiingen zo min mogelijk te houden is er een advies geleverd voor het intrillen van de verschillende elementen. Hierin worden enkele maatregelen voorgeschreven die een bijdrage zouden moeten leveren aan het verminderen van de kans op zettingsvloeiingen om zo doende mogelijke kosten te kunnen besparen. Verder wordt in de aanbeveling toegelicht in hoeverre de zettingsvloeiingsberekeningen in de toekomst nog specifiekere kunnen worden uitgewerkt.

Ontwerp afmeervoorziening voorhavendam IJmuiden
Eindrapport**SUMMARY**

This graduation project, commissioned by Volker Staal en Funderingen, contains the research to the risk of soil liquefactions with the emphasis on the consequences of vibrations on nearby submerged slopes due to the installation of steel piles using a high frequency pile driver. For the technical elaboration, a fictional design of a mooring pile is made for the project OpenIJ near IJmuiden. This has been done in order to get a better understanding of the consequences when using these methods of pile installations and thereby be able to provide possible measures for reducing the possibility of soil liquefactions.

Within the project OpenIJ there are several known areas which may contain a high vulnerability for soil liquefactions. To acquire more knowledge about this phenomenon, some field tests have been taken place during the project. These tests relate to the measuring of the sensitivity of soil liquefactions of the concerned submerged slopes. Hereby some piles were installed by using high frequency pile drivers and hammered pile drivers. During these installations the vibrations and water pressures within the nearby slopes were measured. Using these measurements, the sensitivity of liquefactions within this project can be made more clearly.

The sensitivity of the slopes for liquefactions are determined by using multiple calculations and references. These calculations qualify whether there may or may not occur any form of liquefaction. The answers have been compared with the results of the field tests on the project site. The comparisons have been done in order to validate the calculation methods and to make these applicable for the new design. Next to that a reference has been made with a previously executed project which is similar to the tests of OpenIJ. These two projects are mostly equal in the execution but diverge in environmental conditions and used materials. The reason for this reference is to determine the degree of influence of the multiple parameters causing soil liquefactions.

After the influences and the necessary requirements for liquefactions have been determined and the consequences of the pile driving methods have been made more clear, a fictional design is made for a new mooring pile at OpenIJ. This new fictional design is an example design whereby the execution has been adjusted to reduce the chances of soil liquefactions.

The new design shall provide a mooring provision for the bigger ships which will pass the new lock of IJmuiden. This newly designed mooring pile will be positioned at the seaside of the lock and will be used as a mooring provision for the ships to wait until they are allowed to enter the lock. The design has been tested on multiple load cases to ensure that the mooring pile will be resistant against the acting forces due to the mooring of the ships.

These loads must be absorbed by the bollards and fenders as well as the pile itself. These components are therefore calculated each individually. When calculating these components the load cases vary in water levels and in different mooring angles. After that the fenders and bollards were checked on these acting loads to ensure that they are sustainable enough.

Subsequently, the depth of the piles had to be determined. In order to do this, the computer simulation programme 'D-SHEE PILING' has been used. With this programme it is able to make a schematic sketch of the situation whereby the depth of the pile can be determined according to the maximum displacement of both the top and bottom of the pile. Therefore an iteration has to be made whereby the depth of the pile will be configured so the topside's displacement will still be tolerable, but the pile shall not have an unnecessary extra depth.

After fully designing the mooring pile, design drawings were made. Therefore the computer programmes 'AUTOCAD' and 'Sketchup' were used.

To reduce the chances of liquefactions during other pile driving activities at OpenIJ an advisory rapport for the execution has been made. This rapport contains some possible measures which contribute in a reduction of the risk for liquefactions and thereby able to save some extra costs. In advance, the recommendation information on how to further develop any of the calculations on liquefaction in the future.



INHOUDSOPGAVE	PAG.
0. INLEIDING	1
0.1 Aanleiding van de afstudeeropdracht	1
0.2 Praktische relevantie	1
0.3 Doel van het onderzoek	1
0.4 Probleemstelling	2
0.4.1 Hoofdvraag/ onderzoeksvraag	2
0.4.2 Deelvragen	2
0.5 Projectgrenzen	2
0.5.1 Berekeningen	2
0.5.2 Belastingen	2
0.5.3 Referentieproject algemeen	3
0.5.4 Referentieproject praktijkproeven	3
0.5.5 Ontwerp afmeervoorziening	3
0.6 Leeswijzer	3
1. ZETTINGSVLOEIING	4
1.1 Wat is zettingsvloeiing	4
1.2 Gevolgen en risico's bij optredende zettingsvloeiingen	5
1.3 Invloed van trillingen op onderwatertaluds	6
1.3.1 Trillingsbron	6
1.3.2 Invloedsgebied trillingen	6
1.4 Praktijkproeven en verrichte metingen	7
1.4.1 Algemeen	7
1.4.2 Praktijkproeven project OpenIJ	7
1.4.3 Verrichte metingen tijdens uitvoering Calandkanaal	8
1.4.4 Relatie tussen metingen van OpenIJ en Calandkanaal	8
1.4.5 Resultaten	9
2. BEREKENINGSMETHODIEK ZETTINGSVLOEIINGEN	12
2.1 Idriss & Boulanger (2014)	12
2.1.1 Grondopbouw en parameters	13
2.1.2 Optredende versnellingen door trillen/heien	14
2.1.3 Bepalen optreden verweking	16
2.1.4 Resultaten	17
2.2 Robertson (2009)	19
2.3 State parameter (ψ) volgens Robertson(2009)	22
2.4 Validatie berekeningsmethoden	23
2.4.1 Vergelijking berekeningsmethoden	23
2.4.2 Relatieve dichtheid benadering	24
2.4.3 Vergelijking met uitkomsten Boskalis	24
3. ONTWERP DUKDALF	25
3.1 Algemeen	25
3.2 Berekeningsmethodiek	26
3.3 Gebruikseisen	26
3.3.1 Functie	26
3.3.2 Vaarwegklasse	26
3.3.3 Afmetingen maatgevend schip	26
3.3.4 Levensduur	26
3.3.5 Installatiemethode stalen buispalen	26
3.4 Functioneel en geometrie	27
3.4.1 Bodemniveaus en waterstanden	27
3.4.2 Waterstanden	27
3.4.3 Sondering	28
3.5 Ontwerpeisen	29


 Ontwerp afmeervoorziening voorhavendam IJmuiden
Eindrapport

3.5.1	Materiaal	29
3.5.2	Buisprofielen	29
3.6	Optredende belastingen	29
3.6.1	Permanente belastingen	29
3.6.2	Gronddruk	29
3.6.3	Veranderlijke belastingen	30
3.6.4	Trosbelasting	30
3.6.5	Scheepsbelastingen	31
3.6.6	Schroefstraalbelasting	31
3.6.7	Belastingfactoren	32
3.7	Stabiliteitsberekeningen m.b.v. D-sheet piling	32
3.7.1	verplaatsing	33
3.7.2	Fenderconstructie	33
3.8	Kopbolder	34
3.9	Plaatsbepaling a.h.v. mogelijk optredende zettingsvloeiing	35
3.10	Toepassingen trilbloktypes	36
3.11	Terugkoppeling naar proefuitkomsten OpenIJ	37
4.	CONCLUSIE	38
4.1	Vooronderzoek zettingsvloeiingen	38
4.2	Berekeningsmethodiek zettingsvloeiingen	38
4.2.1	Idriss & Boulanger	38
4.2.2	Robertson(2009)	38
4.2.3	Toepassing van de berekeningsmethodieken op het ontwerp	38
4.2.4	Validatie	39
4.3	Data analyse	39
4.3.1	OpenIJ	39
4.3.2	Calandkanaal	39
4.4	Ontwerp	39
5.	AANBEVELINGEN	40
5.1	Validatie berekeningsmethodieken	40
5.1.1	Praktijkproeven en veldmetingen	40
5.1.2	Methode Been & Jefferies	40
5.1.3	Bepalen van de grenswaardes van de geometrie	40
5.1.4	Veiligheidsfactor op de verwekingsgevoeligheid (FSliq)	40
5.1.5	Stabiliteitsanalyse met behulp van D-Geostability	41
5.2	Optimalisatie uitvoering dukdalf	41
5.2.1	Toepassing trilbloktype	41
5.2.2	Signalering en interventie waardes	41
6.	TERUGKOPPELING DEEL- EN HOOFDVRAAG	42
6.1	Deelvragen	42
6.2	Hoofdvraag	43
7.	EVALUATIE EN REFLECTIE	VIII
7.1	Terugkoppeling naar plan van aanpak	VIII
7.2	Individuele reflectie	VIII
8.	VERKLARENDE WOORDENLIJST	IX
9.	FIGURENLIJST	XII
10.	TABELLENLIJST	XIII
11.	BIBLIOGRAFIE	XIV
12.	BIJLAGEN	MAP



0. INLEIDING

0.1 Aanleiding van de afstudeeropdracht

Opdrachtnemer

De aanleiding voor het aannemen van deze afstudeeropdracht is het afronden van de studie Civiele Techniek aan de Hogeschool Rotterdam.

Opdrachtgever

In het kader van risicobeheersing van het project OpenIJ worden enkele beproevingen uitgevoerd rond het aanbrengen van funderingselementen en zettingsvloeiingen. In de tenderfase van dit project zijn een groot aantal risico's geïnventariseerd die verband houden met het aanbrengen van funderingselementen en zettingsvloeiingen. Deze risico's kunnen worden gecategoriseerd naar de volgende aspecten:

- Beschikbaarheid van de vaarwegen
- Trillingen en vervormingen van bestaande objecten
- Kwaliteit/uitvoerbaarheid van de aan te brengen funderingsconstructies
- Productiegevoeligheid van het aanbrengen van funderingselementen

Aan de hand van de verzameling aan risico's die met de bovenstaande aspecten verband houden is er besloten om een beproevingen uit te voeren omtrent de invloeden van het aanbrengen van funderingselementen en zettingsvloeiingen. Hiermee wilt men meer kennis verkrijgen over de effecten van deze zettingsvloeiingen.

Dezelfde soort metingen zijn uitgevoerd tijdens het project Calandkanaal 2015. Hierbij zijn bij vergelijkbare uitvoeringen dezelfde metingen gemaakt omtrent de invloeden van de zettingsvloeiingen. Tijdens het afstudeeronderzoek zal een afmeervoorziening worden ontworpen. Aan de hand van de proeven kan worden voorspeld wat de effecten op de omliggende onderwatertaluds zullen worden zodra deze afmeervoorzieningen worden aangebracht. Trillingen afkomstig van het aanbrengen van dergelijke afmeerconstructies worden geanalyseerd en verwerkt om in de toekomst voorspellingen te kunnen doen over eventuele zettingsvloeiingen.

0.2 Praktische relevantie

Het belang van de opdrachtgever bij dit afstudeeronderzoek is om meer inzicht te krijgen in het risico op het mogelijk optreden van zettingsvloeiingen bij het aanbrengen van funderingselementen nabij (steile) taluds. Met de uitkomsten van het onderzoek kan de opdrachtgever in de toekomst vroegtijdig analyseren of het omliggende talud zijn sterkte en stabiliteit behoudt tijdens de werkzaamheden.

0.3 Doel van het onderzoek

De gewenste eindresultaten zijn als volgt:

- Een ontwerp van een afmeervoorziening ter hoogte van de Voorhavendam op het project nieuwe zeeluis IJmuiden (OpenIJ), met daarbij sterkte- en stabiliteitsberekeningen van de constructie en ontwerptekeningen inclusief detailtekeningen.
- Modelleren van zettingsvloeiingen aan de hand van voorspellingsmethodieken en vergelijkingen tussen proeven van OpenIJ en reeds uitgevoerde proeven.
- Aanbeveling voor de uitvoeringsmethode van de afmeervoorziening als gevolg van mogelijk optredende zettingsvloeiingen.

Ontwerp afmeervoorziening voorhavendam IJmuiden
Eindrapport**0.4 Probleemstelling****0.4.1 Hoofdvraag/ onderzoeksvraag**

In overleg met dhr. B. Admiraal (Volker Staal en Funderingen) en dhr. A. Feddema (Volker Infra Design) is de volgende onderzoeksvraag opgesteld met betrekking tot het onderzoek naar taludstabiliteit voor het ontwerpen van een afmeervoorziening op project OpenIJ, nieuwe zeesluis IJmuiden:

“Wat zijn de effecten van het aanbrengen van stalen afmeervoorzieningen op de omgeving en hoe kunnen deze in de toekomst worden gekwantificeerd in de ontwerpfase?”

0.4.2 Deelvragen

Om de praktijkvraag te kunnen beantwoorden zijn er deelvragen opgesteld om zo stap voor stap naar het antwoord toe te kunnen werken. De deelvragen zijn als volgt:

Wat zijn de effecten van trillingen die veroorzaakt worden bij het aanbrengen van funderingselementen op verschillende diepten en afstanden van de bron (taluds van Spisula- en aanvulzanden)?

Hoe ontstaan zettingsvloeiingen?

Welke eigenschappen zijn van belang voor het verloop van trillingen?

Hoe kan de gevoeligheid voor zettingsvloeiingen binnen een bepaald gebied worden bepaald?

Wat is de impact van de aanvaarsnelheden van schepen op een afmeervoorziening?

Welke troskrachten komen er op een afmeervoorziening te staan?

Hoe kan de uitvoeringsmethode worden geoptimaliseerd?

0.5 Projectgrenzen

Tijdens het onderzoek worden enkele aspecten beperkt of buiten beschouwing gelaten. Dit wordt gedaan om het onderzoek zich enkel te laten richten op de meest essentiële vlakken van het onderwerp en daarmee de kwaliteit te waarborgen.

0.5.1 Berekeningen

Voor de berekeningen zijn enkel twee methoden uitgewerkt. Dit betreft de methode van Idriss & Boulanger en de methode van Robertson(2009). Beide methodieken geven antwoord op de vraag of er wel of geen zettingvloeiingen optreden. Er bestaan meerdere methodieken voor dit vaagstuk maar vanwege de beschikbare tijd en het gebrek aan toegevoegde waarden van meerdere methodieken, worden enkel de 2 bovengenoemde behandeld. Verder worden de uitkomsten van de berekeningen ook vergeleken met uitkomsten afkomstig van een onderzoek verricht door Boskalis. Verder zijn de relatieve dichtheden per zandlaag berekend aan de hand van de conusweerstand.

0.5.2 Belastingen

Bij het ontwerpen van de afmeervoorziening worden enkele belastingen buiten beschouwing gelaten. Dit wordt gedaan omdat van deze belastingen met zekerheid van kan worden uitgegaan dat deze niet maatgevend zijn. De belastingen die niet behandeld worden zijn: golfbelasting direct werkend op de constructie, windbelasting direct werkende op de constructie, impact van ijsvormingen, schroefstraalbelasting en belastingen ter gevolgen van thermische vervormingen. Belastingen die wel worden berekend zijn: aanvaarbelastingen, aanvaarbelastingen met scheepsrotatie, troskrachten en belastingen die ontstaan door windbelastingen op de afgemeerde schepen.

Ontwerp afmeervoorziening voorhavendam IJmuiden
Eindrapport**0.5.3 Referentieproject algemeen**

Tijdens dit onderzoek is als referentieproject het project nieuwe zeesluis IJmuiden, OpenIJ aangehouden. Binnen het projectgebied worden voor de berekeningen alleen de locaties in de buurt van de praktijkproeven en rond de voorhavendam behandeld. Andere locaties rondom het project OpenIJ zijn binnen dit onderzoek niet relevant en worden daarom buiten beschouwing gelaten. Alle gemaakte berekeningen zijn verbonden aan dit project.

0.5.4 Referentieproject praktijkproeven

Voor de data analyse van de meetgegevens met betrekking tot trillingen en wateroverspanningen zijn twee referentieprojecten van toepassing, namelijk: Ligplaatsen Calandkanaal 2015 en Nieuwe zeesluis IJmuiden, OpenIJ. Bij het project 'Calandkanaal' zullen de meetuitkomsten enkel gebruikt worden ter vergelijking met die van het OpenIJ. Hierbij wordt gekeken naar de trilsnelheden, de wateroverspanningen en de grondopbouw/geometrie. Verdere berekeningen op dit project zullen niet worden uitgevoerd.

0.5.5 Ontwerp afmeervoorziening

Voor het ontwerp van de afmeervoorziening zijn de buispaal, de kopbolder en de fendercones gedimensioneerd. Overige bekleding van deze afmeervoorziening worden buiten beschouwing gelaten omdat dit enkel een fictief ontwerp betreft. Bij het ontwerpen van de benoemde onderdelen worden de berekeningen wel tot aan de verbindingen toe uitgewerkt, dit geldt voor zowel bout- als lasverbindingen.

0.6 Leeswijzer**Hoofdstuk 1 - Zettingsvloeiingen**

In dit hoofdstuk wordt een korte uitleg gegeven over het fenomeen zettingsvloeiingen, wat dit precies inhoudt en hoe deze ontstaan.

Hoofdstuk 2 - praktijk proeven OpenIJ

Het tweede hoofdstuk geeft een beschrijving van de praktijkproeven van OpenIJ, hierin worden de proeven omschreven, de uitkomsten getoond en wordt er een vergelijking gemaakt met het project 'Ligplaatsen Calandkanaal 2015'.

Hoofdstuk 3 - Berekeningsmethode zettingsvloeiingen

Dit hoofdstuk betreft de verschillende berekeningsmethodieken voor het bepalen van eventueel optredende zettingsvloeiingen. Hierin worden de verschillende methodieken omschreven, uitgewerkt en worden de uitkomsten vergeleken met die van praktijkproeven en overige uitkomsten.

Hoofdstuk 4 – ontwerp afmeervoorziening

Hoofdstuk vier betreft het volledige ontwerp van de afmeervoorziening inclusief het bepalen van de belastingen, de berekeningen en de tekeningen.

Hoofdstuk 5 – conclusie

In dit hoofdstuk zal een conclusie worden gegeven betreffende het ontstaan van trillingen bij het installeren van een buispaal en daarmee de mogelijk gevolgen van deze trillingen. Hierbij wordt gekeken naar de verschillende uitvoeringstechnieken en de daarbij horende kans op zettingsvloeiingen.

Hoofdstuk 6 – Aanbeveling

In de aanbeveling komt een voorstel waarin enkele maatregelen zijn genomen om de kans van het ontstaan van zettingsvloeiingen te verminderen. Ook komen hier adviezen betreffende de berekeningen van de zettingsvloeiingen.



1. ZETTINGSVLOEIING

In dit hoofdstuk wordt een beknopte samenvatting gegeven van de informatie uit Bijlage 1 'Vooronderzoek zettingsvloeiingen'.

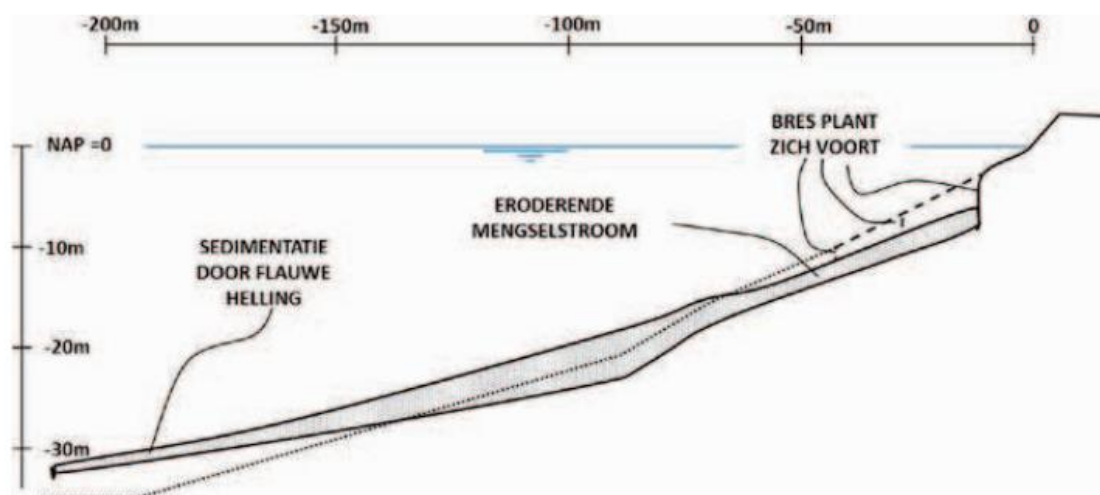
1.1 Wat is zettingsvloeiing

Zettingsvloeiing is een mechanisme waarbij zand in een onderwatertalud spontaan vervloeit en vervolgens over een grote afstand verplaatst kan worden. Met als gevolg vaak boven water zichtbare komvormige inscharingen in de oever met veelal grote schade als gevolg. Door een specifieke opbouw van de ondergrond kunnen zettingsvloeiingen op natuurlijke wijze plaatsvinden. Aanleiding hiervan is vrijwel altijd het steiler of hoger worden van het onderwatertalud ten gevolge van erosie aan de teen of sedimentatie. Daarnaast kunnen zettingsvloeiingen ook ontstaan door invloeden van buitenaf zoals trillingen in de ondergrond. Er worden twee verschillende mechanismes onderscheiden binnen de zettingsvloeiingen die qua proces van elkaar verschillen namelijk,

- Verwekingsvloeiingen
- Bresvloeiingen

Bij verwekingsvloeiingen gaat het om een losgepakte zandlaag onder water dat zich plotseling vloeibaar gaat gedragen. Hierbij wordt het onderlinge contact tussen de zandkorrels plots drastisch verminderd waardoor de schuifsterkte van het zandlichaam afneemt. Als dit zandpakket zich in een tamelijk steile helling bevindt zal de verweekte massa naar beneden vloeien en pas weer onder een zeer flauwe helling tot rust komen. Een oorzaak van het plotseling verweken kunnen trillingen zijn afkomstig van het aanbrengen van funderingselementen met behulp van een tril- of heiblok. De trillingen veroorzaken een verhoogde waterspanning, hierdoor neemt de korrelspanning af waardoor verweking kan optreden. Het proces wordt stapsgewijs behandeld in hoofdstuk 1.3.

Een bresvloeiing in een onderwatertalud is een gestaag terugschrijdend erosieproces dat beschouwd kan worden als een onbeheerste vorm van het bresproces. Het bresproces is het proces waarbij door baggerwerkzaamheden een talud dusdanig steil wordt dat dit talud onstabiel wordt met vloeiingen als gevolg. Voorwaardes voor beide soorten vloeiingen is de aanwezigheid van een voldoende hoog en steil onderwatertalud bestaande uit zand- en/of siltlagen van voldoende dikte. Verder is er bij verwekingsvloeiingen een zeer los gepakt zandpakket nodig terwijl bij bresvloeiingen ook bij vast gepakte grondlagen instabiel gedrag kan optreden. Bij opgetreden vloeiingen is achteraf vaak niet te zeggen van welke soort vloeiing sprake is geweest.



Figuur 1: Mogelijk verloop van zettingsvloeiing



1.2 Gevolgen en risico's bij optredende zettingsvloeiingen

Blokkeren van de vaarweg

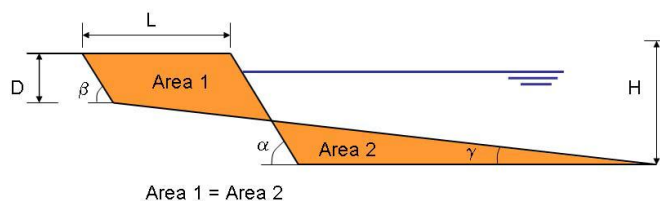
Op het moment dat zettingsvloeiing optreedt in de taluds als gevolg van de werkzaamheden, brengt dit een aantal gevolgen met zich mee. Om te beginnen kan het afgeschoven talud de huidige vaarweg blokkeren wat automatisch leidt tot een hoop problemen, zo is het mogelijk dat de schepen hun weg niet kunnen vervolgen of erger een schip loopt vast door een te kleine waterdiepte. Omdat zettingsvloeiing plots optreedt hoeft het niet zo te zijn dat men dit meteen zal opmerken en daarom zijn de risico's behoorlijk groot.

Schade aan constructies

Een tweede risico is het afvloeien van de taluds nabij de bestaande sluizen. Door een afnemende gronddruk tegen de sluiswanden, neemt de stabiliteit af en dit kan leiden tot grote problemen wanneer hier geen maatregelen voor worden genomen.

Inscharing van het talud

Wanneer zettingsvloeiing optreedt nabij dijken en oevers, kan inscharing optreden. Dit is in feite het binnenwaarts afkalven van een oever of dijk. Hieronder staat weergegeven hoe de grond zich ongeveer zal verplaatsen.



Figuur 2 Inscharringslengte

Om een beeld te krijgen bij de ernst van dit fenomeen, is onderstaande figuur weergegeven. Hier is een ernstig geval van opgetreden inscharing van toepassing. Het zogehete project 'zandwinning Hooidijk' heeft als gevolg van plaatselijke zandwinning last gehad van zo'n inscharing waarbij tientallen meters aan dijk is verzakt.



Figuur 3 Inscharing Hooidijk

1.3 Invloed van trillingen op onderwatertaluds

Door het aanbrengen van, in dit geval, stalen buispalen komen trillingen vrij welke nadelige invloeden kunnen hebben op de omliggende taluds onder water. De trillingen worden veroorzaakt door het trilblok welke met een bepaalde frequentie de palen in de bodem aanbrengt. Afhankelijk van het type trilblok dat gebruikt wordt, de grootte van de buispaal en de opbouw van de ondergrond, ontstaan er trillingen in de ondergrond die kunnen leiden tot zettingsvloeiingen.

Dit proces gaat als volgt:

1. Door de grote trillingen in de ondergrond zullen de korrels gaan verschuiven.
2. Daarvoor moet water worden weggedrukt. Wanneer er onvoldoende tijd is voor het water om weg te stromen zal dit leiden tot een verhoogde waterspanning. Dit is het geval bij hoge frequenties.
3. Hogere waterspanning betekend lagere korrelspanning. In gevoelige lagen komen de korrels zodanig los van elkaar dat er sprake is van gedeeltelijke of zelfs volledige verweking
4. Wanneer dit pakket zich dan in een helling bevindt zal het daarbij naar beneden stromen.

1.3.1 Trillingsbron

Zoals gezegd zijn de veroorzaakte trillingen afkomstig van het heien of trillen van de funderingselementen. Grote trilblokken welke aan een kraan hangen, worden op de buispaal of damwand geplaatst om deze te kunnen intrillen. In het onderstaande figuur staat dit afgebeeld.

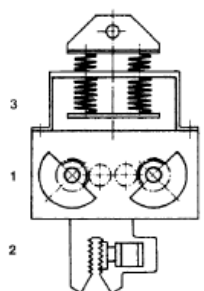


Fig. 2.13 Vibrator components.
1) Eccentric masses. 2) Clamp.
3) Springs. (Massarsch 2000).

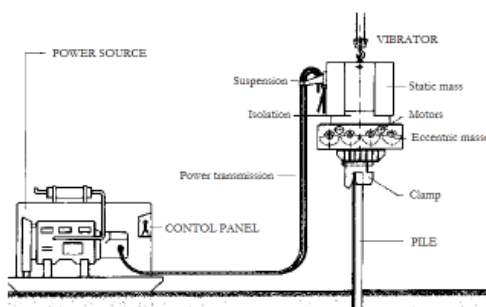


Fig. 2.14 Principles of the vibratory driving machinery.
Modified after Massarsch (2000).

Figuur 4: Schematisering van een trilblok en de opstelling van het intrillen

Het effect op de wateroverspanningen en daarmee op zettingsvloeiing is niet eenduidig. De frequentie van de PVE2335VM en PVE2350VM ($f=38,3$ Hz) ligt buiten de eigenfrequentie van losgepakte zanden. De frequenties van deze zanden zijn gevonden literatuur [13]. Hierdoor wordt met deze trilblokken een kleiner risico op omgevingseffecten, zoals overschrijding van trillingswaardes en zettingsvloeiing, verwacht.

De frequentie van de PVE105M ($f=22,5$ Hz) ligt binnen de eigenfrequentie van losgepakte zanden (10-25 Hz). Zodra de beide frequenties op hetzelfde punt komen, worden de trillingen versterkt. Hierdoor is het invloedsgebied van trillingen groter, dit heet resonantie. Resonantie is een natuurkundig verschijnsel wat voorkomt bij trillingen, in dit geval afkomstig van trilwerkzaamheden.

1.3.2 Invloedsgebied trillingen

Over het daadwerkelijke invloedsgebied van de trillingen met betrekking tot zettingen kan vooraf niet heel veel gezegd worden. Er kan wel worden aangenomen dat het invloedsgebied bij dichtgepakte zanden op een afstand van $0,5 \cdot$ inheidiepte verwaarloosbaar wordt. Echter bij losgepakte zanden, aanvulzanden en spulazanden in dit geval, zal het invloedsgebied groter zijn. Aan de hand van metingen en berekeningen kunnen daardoor betere uitspraken over worden gedaan.



1.4 Praktijkproeven en verrichte metingen

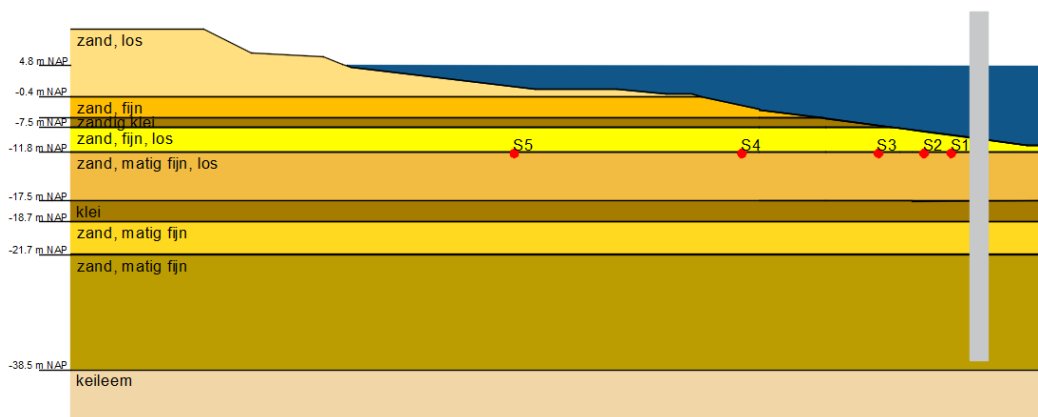
In dit hoofdstuk wordt een beknopte samenvatting gegeven van de informatie uit Bijlage 2 'Data analyse praktijkproeven OpenIJ en Caland'.

1.4.1 Algemeen

Om een beter inzicht te verkrijgen in het ontstaan van zettingsvloeiingen, zijn er tijdens project OpenIJ verschillende proeven uitgevoerd. Een onderdeel hiervan is het meten van trilsnelheden en waterspanningen tijdens het intrillen van buispalen. Bij project OpenIJ zijn van enkele gebieden bekend dat deze gevoelig zijn voor het ontstaan van zettingsvloeiingen. Dit komt door de aanwezigheid van veel los gepakte zandlagen. Deze proeven zouden meer duidelijkheid moeten geven op het verloop van trillingen in de ondergrond en hoe deze verband houden met een toenemende waterspanningen en daarmee een verhoogde kans op zettingsvloeiingen.

1.4.2 Praktijkproeven project OpenIJ

Voor de proeven van OpenIJ zijn 3 buispalen in het water in de grond aangebracht. Deze buispalen zijn in een talud geplaatst waarbij tijdens de uitvoering de waterspanning (WSM) en de trilsnelheid (TDS) door verschillende meters zijn gemeten. De 3 verschillende palen zijn tot verschillende diepten aangebracht. Er zijn vijf meters achter elkaar geplaatst op een afstand van 2, 5, 10, 25 en 50 meter vanaf de buispalen. Van de waterspanningsmeters zijn er echter maar vier gebruikt die tot een afstand van 25 meter vanaf de paal zijn geplaatst. De uitvoeringen zijn gedaan vanaf het kraanschip 'Dyna M' met twee drijvende pontons ter assistentie en opslag van de buispalen. Het werkschip bevat een kraan met trilblok (trilblok PVE2350 VM). Naast het trillen is er ook eenmalig nageheid om de verschillen tussen het heien en het trillen in kaart te brengen. Op de volgende pagina is een foto te zien van de proefopstelling van het intrillen van buispaal 1 op 9 maart 2016.

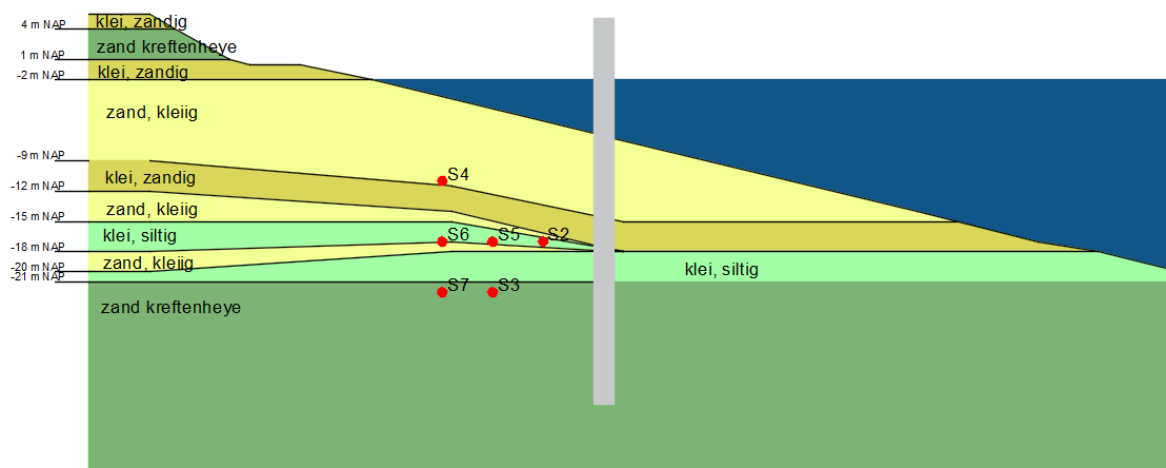


Figuur 5: Proefopstelling OpenIJ



1.4.3 Verrichte metingen tijdens uitvoering Calandkanaal

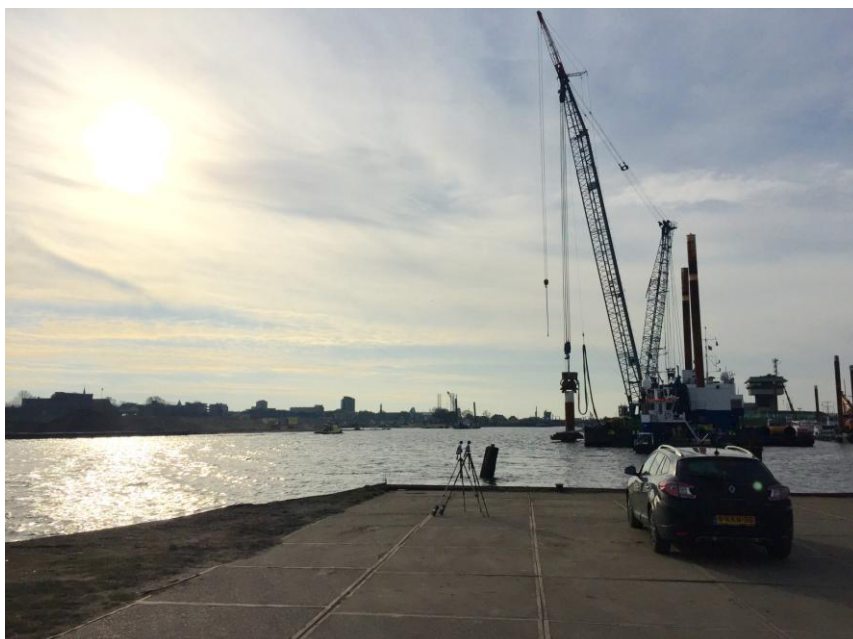
In 2015 zijn er door VSF vergelijkbare uitvoeringen verricht. Hierbij ging het om het realiseren van nieuwe afmeervoorzieningen voor project Caland. Voor dit project werden, net als bij OpenIJ gaat gebeuren, buispalen in de grond aangebracht door middel van een trilbok. Ook hier was dit in de buurt van een onderwatertalud. Om de stabiliteit van de omliggende dijken veilig te kunnen stellen werden verschillende waterspanning- en trillingsmeter geplaatst. Dit om het risico voor zettingsvloeiingen in het oog te kunnen houden en bij dreiging van het overschrijden van de waarde, het werk stil te kunnen leggen. De meetpunten zijn op verschillende dieptes aangebracht en variëren in een afstand vanaf de paal van 5, 10 tot 15 meter.



Figuur 6: Proefopstelling Caland

1.4.4 Relatie tussen metingen van OpenIJ en Calandkanaal

Zowel bij OpenIJ als bij Caland zijn de waterspanningen en trilsnelheden gemeten. Aangezien beide uitvoeringen zo goed identiek zijn is dit dus een mooie gelegenheid om de beide meetuitkomsten met elkaar te vergelijken. Hiermee kan er gekeken worden naar welke aspecten er voor een mogelijke variatie zorgen en daarmee een conclusie geven voor welke parameters het meeste bepalend zijn voor het verloop van de trillingen en daarmee de kans op zettingsvloeiingen.



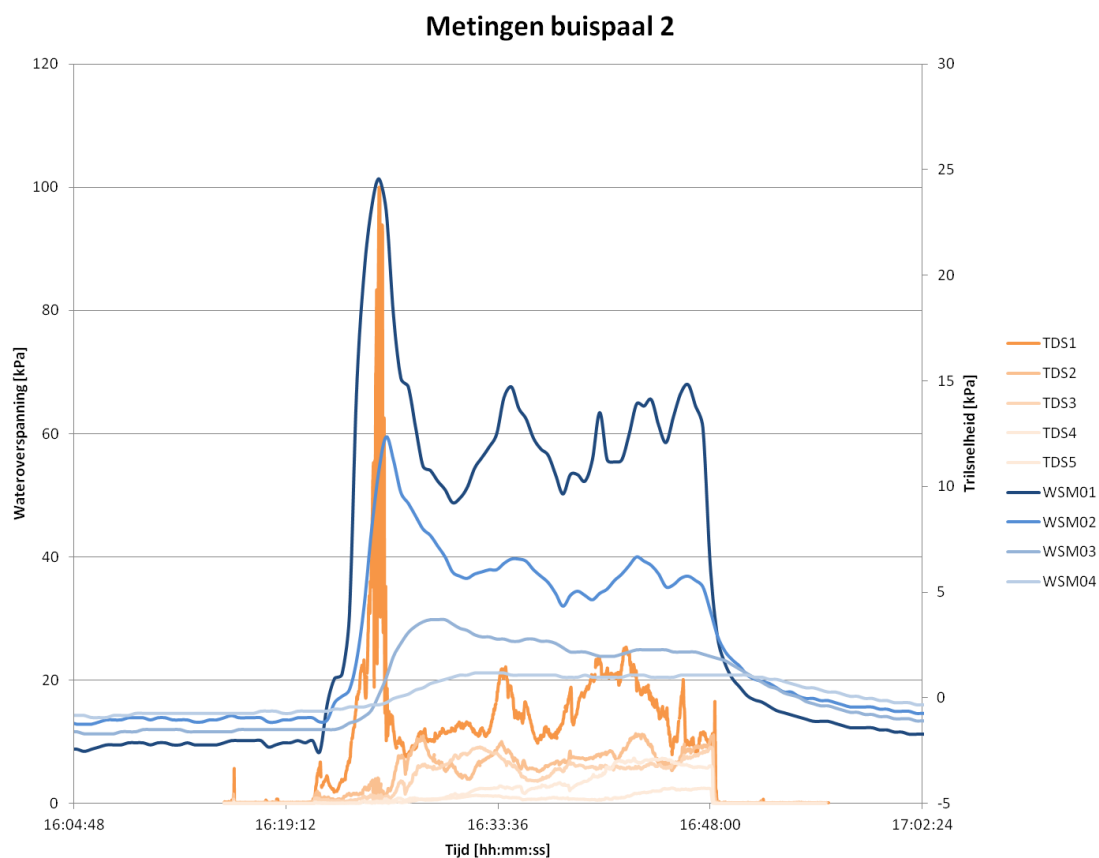
Figuur 7: Proefopstelling intrillen buispaal1 09-03-16

1.4.5 Resultaten

OpenIJ

In de grafiek hieronder zijn de meetuitkomsten weergegeven van het intrillen van buispaal 2 bij project OpenIJ. De reden dat alleen deze in dit rapport is opgenomen is omdat deze het dichtst bij de meters was geplaatst en tot de grootste diepte in aangebracht. Daarmee zou de buispaal de meeste invloed hebben gehad op het talud.

In de grafiek is het verloop te zien van hoe de trilsnelheden (met oranje aangegeven) en wateroverspanningen (met blauw aangegeven) zich voor doen tijdens het proces. Verder zijn ook de maximum meetwaarden per meetpunt weergegeven.



Figuur 8: Uitkomst intrillen buispaal 2

Tabel 1: Maximale waarde per meetpunt

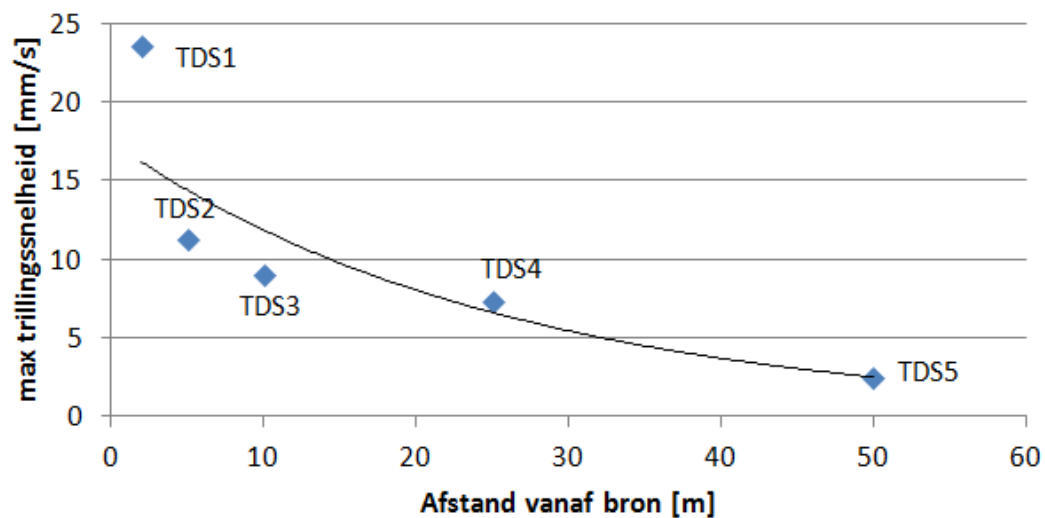
Meetpunt	Max. trillingsmeter [mm/s]	Max. wateroverspanning [kPa]
1	100	24.580
2	11.35	12.346
3	9.114	3.693
4	7.365	1.18
5	2.498	-

Wat opvalt is dat de wateroverspanningen en trilsnelheden redelijk evenwijdig aan elkaar lopen. Daarnaast zijn de onderlinge verschillen tussen de meetpunten vrij fors. Dit duidt dus op een redelijk snelle afname van de trilsnelheid naarmate de afstand met de bron toeneemt. De waarden die uit deze metingen zijn gekomen zullen later gebruikt worden bij de vergelijkingen en berekeningen.



In de grafiek hieronder is de trillingsafname over de afstand vanaf de buispaal weergegeven. Te zien is dat deze exponentieel afneemt naarmate de afstand groter wordt. Dit komt overeen met de voorspelde waarde en zal later ook vergeleken worden met de handberekeningen.

trillingsafname BP2



Figuur 9: Trillingsafname tijdens uitvoering intrillen buispaal 2

Verdere uitwerkingen van de meetgegevens zijn terug te vinden in bijlage 2

Vergelijking Caland

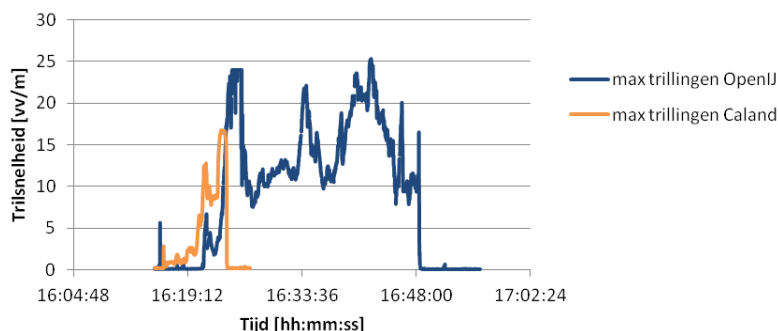
In de verschillende grafieken hieronder zijn de verschillen in uitkomsten van Caland en OpenIJ met elkaar in vergelijking gebracht. Hier uit op te merken is dat de waarden bij OpenIJ hoger oplopen.

De voornaamste reden hiervoor is het verschil in grondeigenschappen. Bij Caland zijn er veel kleiachtige grondlagen aanwezig. Bij OpenIJ zijn er voornamelijk zandlagen aanwezig die ook nog los gepakt zijn. Door de korrelige opbouw van het zand bij OpenIJ zal bij deze grondsoort eerder gaan vervormen dan het klei, oftewel de cohesieve grondlagen, wat qua structuur bestaat uit dichtgepakte plakken. Dit zorgt ervoor dat de korrels nog meer bewegingsruimte hebben en daarmee nog gevoeliger zijn voor trillingen. Ook heeft het klei nog een absorberende werking op de trillingen. Doordat klei slecht waterdoorlatend is en erg dicht gepakt, zullen trillingen en wateroverspanning zo goed als gesmoord worden. Dit komt mede door de fysische binding tussen water en de kleideeltjes, oftewel het vermogen om water vast te houden. Grondpakketten die dus achter deze kleilagen liggen zullen hierdoor al een stuk minder trillingen ervaren. Uit de meetgegevens van Caland is gebleken dat de uitvoeringen zo goed als geen effect hadden op de waterspanning (deze zijn daarom ook niet in vergelijking gebracht). Dit valt ook te verklaren door de dicht gepakte grondlagen. Door deze hogere dichtheid kan het water moeilijk infiltreren. Bij OpenIJ kan het water gemakkelijk tussen de korrels stromen. Tijdens het trillen worden de poriën vergroot wat extra ruimte geeft voor het water. Hierdoor neemt de onderlinge spanning van de korrels af wat resulteert in toenemende waterspanningen. Bij Caland heeft dit dus niet plaats gevonden door de slechtere doorlaadbaarheid van de grondsoorten.

Naast de grondopbouw heeft het verschil in gebruikt materieel ook nog een kleine invloed in het verschil van uitkomsten. Bij Caland is gebruikt gemaakt van een kleiner trilblok dan bij OpenIJ. Door een kleiner trilblok toe te passen ontstaan er ook kleinere trillingen. Ook is de buispaal bij OpenIJ tot een grotere diepte aangebracht dan bij Caland. Hierdoor is er meer werkdruk vereist wat weer resulteert in hogere trillingen.

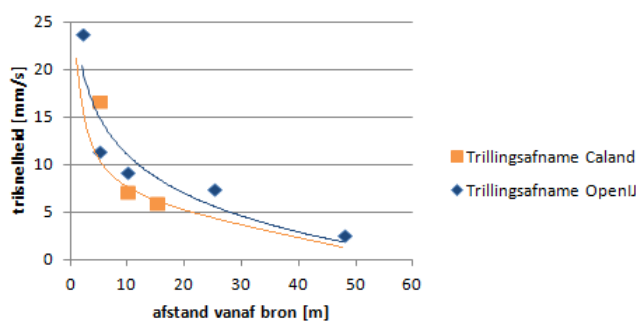
In bijlage 2 zijn de uitwerkingen van deze vergelijkingen terug te vinden.

Max trilsnelheid Caland vs. OpenIJ



Figuur 10: Vergelijking trilsnelheden Caland & OpenIJ

Trillingsafname Caland vs. OpenIJ



Figuur 11: Vergelijking trillingsafname Caland & OpenIJ



2. BEREKENINGSMETHODIEK ZETTINGSVLOEIINGEN

In dit hoofdstuk wordt een beknopte samenvatting gegeven van de informatie uit Bijlage 3 'Berekeningsmethodiek zettingsvloeiingen'.

Om zonder monitoring of praktijkproeven te bepalen of er zettingsvloeiing op kan treden zijn diverse berekeningen gemaakt. In de volgende hoofdstukken worden deze berekeningen gedeeltelijk behandeld. Het eerste hoofdstuk is de methode van Idriss en Boulanger welke is gebaseerd op aardbevingsliteratuur. De tweede methode is het bepalen van de state parameter volgens Robertson(2009) waarmee je uit een gecorrigeerde conusweerstand de gevoeligheid van verweking kan bepalen. Vervolgens is aan de hand van verkregen uitkomsten van Boskalis, een vergelijking gemaakt van de uitkomsten van de state parameter. Alle uitkomsten van de verschillende berekeningen zijn met elkaar vergeleken ter validatie van de rekenmethodes.

2.1 Idriss & Boulanger (2014)

Bij het ontstaan van aardbevingen kan de veiligheid tegen verweking worden bepaald, aan de hand van de gemeten conusweerstand (sonderingen), de heersende verticale korrelspanning en de grootte van de te verwachten trillingen. Hiervoor is de methode gebruikt volgens Idriss & Boulanger conform literatuurstudie 'CPT and SPT based liquefaction triggering procedures', CUR166 en overige literatuur welke staan opgenomen in bijlage 3.

De berekeningen zijn voor drie locaties uitgevoerd, namelijk twee ter hoogte van de Werkhaven (praktijkproef) en een ter hoogte van de Voorhavendam (ongeveer de ontwerplocatie). Bij alle drie de locaties zullen stalen buispalen worden aangebracht door middel van trillen dan wel heien. Over het algemeen kan worden gesteld dat trillen, met name voor verweking, ongunstiger is voor de taludstabiliteit dan heien. Toch is voor beide scenario's de berekening uitgevoerd. Voor het bepalen van de eventueel optredende verweking zijn de volgende stappen aangehouden.

Tabel 2: Aanpak analyse Idriss & Boulanger

Stap	Beschrijving	Methode
1	Bepaal de benodigde grondparameters aan de hand van grondonderzoek (sonderingen): conusweerstand, soortelijk gewicht, laagdiktes etc.	Sondering DKMP17/ DKMP21/VH3
2	Bepaal de methode van inbrengen (de zogehete 'trigger' voor verweking) : Type hei- en trilblok, inheidiepte etc.	CUR166
3	Uitvoeren van trillingsprognose ter bepaling van de bronsterkte en de afname van het trillingsniveau met de afstand.	Projectspecifieke eisen OpenIJ
4	Aan de hand van verkregen trillingsniveau's bepalen van de versnellingen (a_{max}) tbv de CSR (Cyclic Stress Ratio).	CUR166
5	Bepaal de verwekingsgevoeligheid voor de diverse zandlagen ($FS_{liq} = CSR / CRR$)	Idriss & Boulanger (2014)
6	Vergelijken met proefuitkomsten OpenIJ ter verificatie van de verkregen waarden voor FS_{liq} .	

2.1.1 Grondopbouw en parameters

Project OpenIJ heeft diverse sonderingen beschikbaar gesteld. Zo is het nodige aan grondonderzoek uitgevoerd op de projectlocatie. Het bestaat uit een grote verzameling aan onderzoeken die de laatste 50 jaar zijn verricht in de omgeving van het sluissterrein. De locaties zijn zoals eerder vermeld twee bij de Werkhaven en een bij de Voorhavendam. Er is nog een sondering(DKMP09) welke wordt gebruikt, deze wordt toegepast bij het ontwerp van de dukdalf. De volgende sonderingen zijn hier maatgevend en zijn dan ook gebruikt voor de benodigde grondgegevens:

Tabel 3: Locatie vs. sondering

Locatie	Sondering
Werkhaven 1(proeflocatie)	DKMP17
Werkhaven 2	DKMP21
Voorhavendam	VH3
Voorhavendam	DKMP09

Op onderstaande figuur staan de locaties van de sonderingen aangegeven in een plattegrond van de projectlocatie OpenIJ



Figuur 12: Locaties sonderingen

Aangezien de grondopbouw van de sonderingen van elkaar verschillen, worden deze niet in dit rapport beschreven. Voor de exacte grondopbouw wordt verwezen naar bijlage 2 en 3, hier staan de sonderingen in opgenomen. Uit onderzoek is gebleken dat over het algemeen kan worden uitgegaan van de aanwezigheid van de volgende grondsoorten. De volgorde van opbouw verschilt per sondering.

Tabel 4: Aanwezige grondsoorten OpenIJ

Grondlaag	γ_{droog} [kN/m ³]	γ_{nat} [kN/m ³]
Antropogeen / ophoogzanden en/of stortzanden (los gepakt).	16	20
Strand- en vooroeverzanden: matig fijn zand met schelpfragmenten	18	21
Overgangslaag: zand/klei, veendetritus, gelaagd	18	18
Schelphoudende zanden, Spisulazand 1	17	21
Hoofdzakelijk schelphoudende zanden, Spisulazand 2	18	21
Klei, humeus, compact	18	18
Dekzanden, fijne tot matig fijne zanden	17	20
Formatie van Boxtel, matig fijne zanden	18	21
Eem formatie en formatie van Drente; Eem klei en keileem	17	20
Formatie van Urk / Rivierzanden: bont, matig fijn tot uiterst grof	18	21



2.1.2 Optredende versnellingen door trillen/heien

Met behulp van de methode, zoals deze in CUR166 staat beschreven, is een prognose gemaakt van de trillingen die door het intrillen/heien van de buispalen worden opgewekt. De CUR166 hanteert voor Nederland karakteristieke bodemprofielen, hier zitten vaste waarden aan voor de bronintensiteit ($V_{0, corr}$) en de dempingsconstante (α) als gevolg van materiaaldemping op een referentieafstand van 5 meter

Voor dit geval is het bodemprofiel 'Amsterdam' aangehouden. In de CUR166 zijn voor dit profiel ook betrouwbaarheidsgevallen genoteerd. Over het algemeen kan deze op 95% worden aangenomen voor heiwerkzaamheden. Voor de trillingen afkomstig van het trillen is 50% aangehouden, aangezien uit ervaringen bij het verwerken van trillingsmetingen is gebleken dat 50% een reëlere inschatting is voor de trillingsintensiteit. De uiteindelijk gekozen waarden voor de parameters staan wederom in het Excel sheet opgenomen in bijlage 3.

De bronsterkte van het inbrengen van stalen buispalen kan worden bepaald met empirische relaties, deze relaties zijn gebaseerd op eerder metingen en veldonderzoeken. De formules zijn als volgt:

$$\text{Trillen: } V_{0, corr} (x=5m) = V_0 + C_{vel}(F - 350)$$

$$\text{Heien: } V_{0, corr} (x=5m) = V_0 * \sqrt{(0,8 * E_h)}$$

Met de uitkomsten voor de gecorrigeerde trillingsnelheid is voor een aantal afstanden bepaald wat de trillingssnelheden worden in mm/s. De formule die hier voor wordt gehanteerd komt uit CUR166 en staat hieronder vermeld:

$$V_x = V_0 * \sqrt{\frac{x_0}{x}} * e^{-a*(x-x_0)}.$$

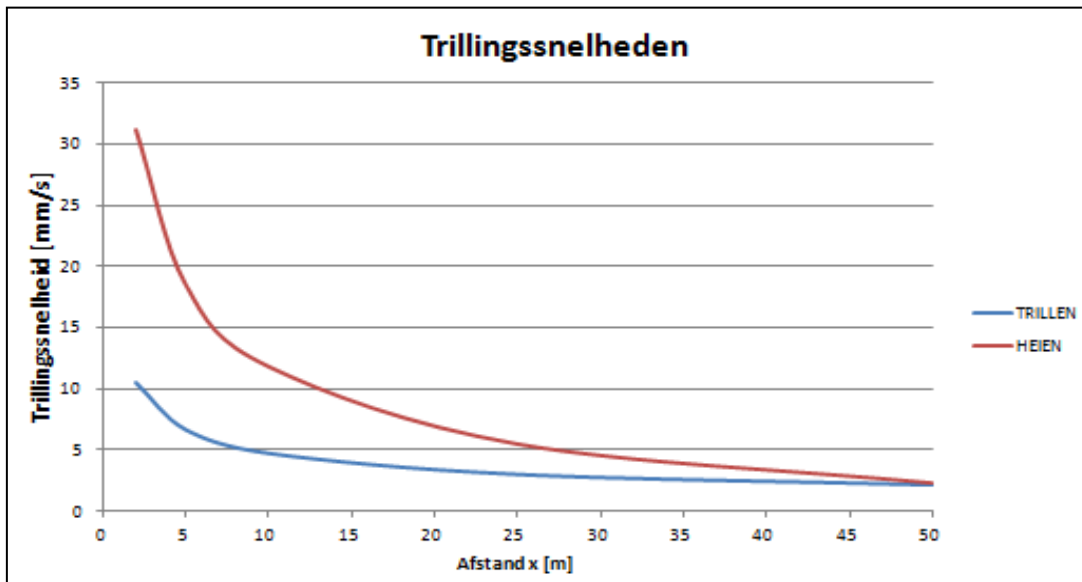
Versnellingen

Nadat alle trillingssnelheden zijn berekend, zijn de maximale horizontale versnellingen bepaald waar uiteindelijk mee is gerekend. De versnelling is afhankelijk van de frequentie (f) van het hei- en trilblok en de optredende trillingssnelheden. Om de versnelling (a_{max}) te bepalen wordt gebruik gemaakt van de volgende formule:

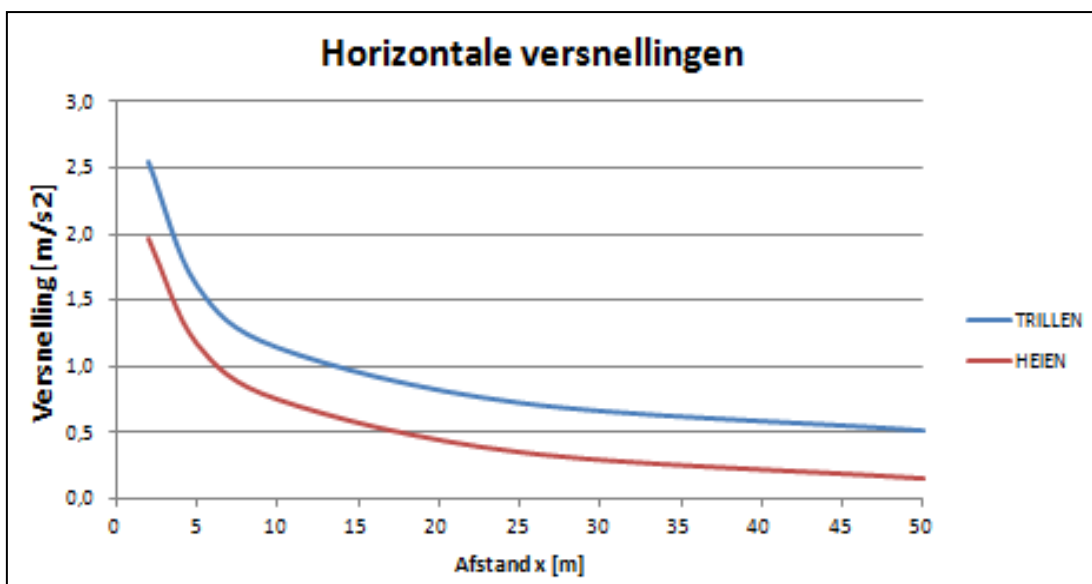
$$a_{max} = V_x * 2 * \pi * f / 1000$$

**Resultaten**

Op onderstaande grafieken staan de trillingssnelheden en de versnellingen vermeld bij een trilblok PVE2350VM en een heiblok IHC S120.



Figuur 13: Trillingssnelheden PVE2350 - IHC S120



Figuur 14: Maximale versnellingen PVE2350 - IHC S120

Alle exacte uitkomsten, onderbouwingen en gehanteerde formules staan omschreven in Bijlage 3 van dit rapport.



2.1.3 Bepalen optreden verweking

Om te bepalen of er wel of geen verweking zal optreden, is voor elke grondlaag bepaald wat voor veiligheid tegen verweking deze heeft (FSliq). Aan de hand van de uitkomst van deze parameter kan worden bepaald of er wel of geen verweking optreedt. Er kan namelijk worden gesteld dat er verweking optreedt zodra FSliq < 1,0. Automatisch geldt wanneer FSliq > 1,0 de laag niet zal verweken. De veiligheid tegen verweking (FSliq) is gedefinieerd als het quotiënt van de cyclic resistance ratio en de cyclic stress ratio, volgens: I.M. Idriss & R.W. Boulanger, *CPT and SPT based liquefaction triggering procedures*, 2014. De verhouding is als volgt:

$$FSliq = \frac{CRR_{7,5}}{CSR}$$

Cyclic Stress Ratio (CSR)

Het bepalen van deze twee variabele is benodigd om de weerstand tegen verweking (liquefaction) te bepalen per grondlaag. Dit geldt overigens alleen voor de zandlagen, aangezien klei/veen niet verwekingsgevoelig is. De CSR is een variabele waarde voor de grootte van de optredende krachten afkomstig van bewegingen in de ondergrond als gevolg van de trillingen tijdens het aanbrengen van de stalen buispalen. De CSR wordt als volgt berekend:

$$CSR = 0,65 * \frac{a_{max}}{g} * \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} * \frac{r_d}{MSF} * \frac{1}{K_\sigma}$$

Cyclic Resistance Ratio (CRR_{7,5})

De CRR is om aan te geven in hoeverre de ondergrond het vermogen heeft om weerstand te bieden tegen verweking. Er kan worden gesteld dat er geen verweking zal optreden wanneer FSliq > 1,0. Alle waarden onder 1,0 betekent automatisch voor de verwekingsgevoelige lagen dat er verweking zal optreden. Deze waarde geldt voor een 'aardbeving' met een magnitude van 7,5. De CRR wordt als volgt berekend:

$$CRR_{7,5} = \exp\left(\frac{q_{c1Ncs}}{113} + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{1000}\right)^2 - \left(\frac{q_{c1Ncs}}{140}\right)^3 + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{137}\right)^4 - 2,8\right) \quad [\text{kN/m}^2]$$

Waarbij de genormaliseerde conusweerstand (qc1Ncs) per laag wordt bepaald door middel van de volgende formule, C_N^* (qc / Pa) volgens Idriss & Boulanger. C_N is een correctiefactor op de verhouding tussen de conusweerstand qc en de atmosferische druk Pa (100 kPa). Voor alle berekeningen, formules en uitkomsten voor alle parameters en de CSR en CRR wordt verwezen naar Bijlage 3

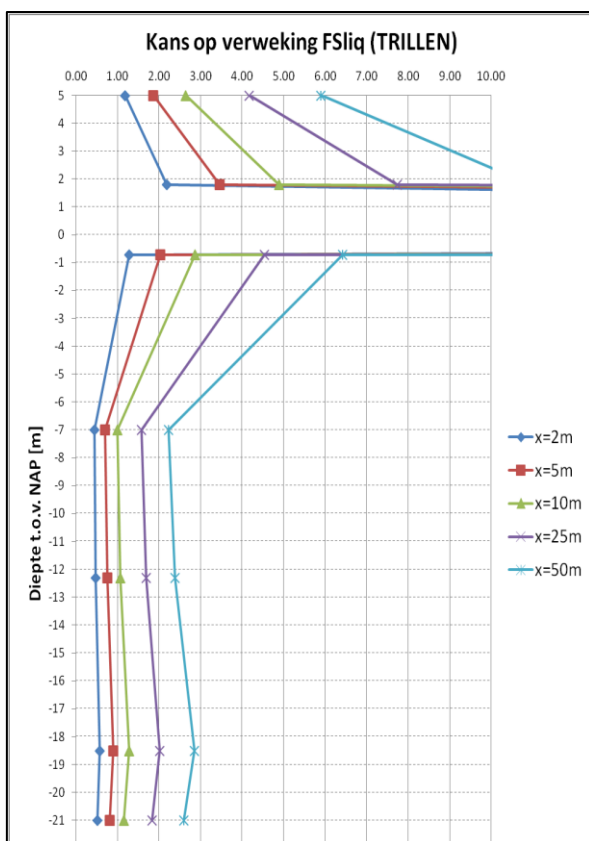
Ontwerp afmeervoorziening voorhavendam IJmuiden
Eindrapport

2.1.4 Resultaten

De kans op verweking is voor drie locaties bepaald, een bij de Voorhavendam en twee bij de Werkhaven (3 sonderingen) op verschillende afstand van de bron (buispaal). Nogmaals, er zal wel verweking optreden wanneer $FS_{liq} < 1,0$ en zodra aan de voorwaardes wordt voldaan zodanig dat verweking op kan treden. De verwekingsgevoelige lagen zijn met een rood kader aangegeven. Voor alle sonderingen zijn zowel voor het heien als het trillen de waardes voor FS_{liq} bepaald, echter staat hieronder voor één sondering (VH3) alle uitkomsten omdat deze het meest refereert met het ontwerp. De overige uitkomsten zijn opgenomen in bijlage 3. Er is gekozen om de resultaten van sondering DKMP09 weer te geven, aangezien deze wordt toegepast bij het ontwerp.

Tabel 5: FS_{liq} Voorhavendam trillen

Grondlaag/Afstand x	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
Afstand [m]	2	5	10	25	50
a.max [m/s ²]	2.5516	1.6137	1.1411	0.7217	0.5103
AO: Antropogene laag (aanvulzand)	1.18	1.87	2.64	4.17	5.90
Dz: dekzand	2.19	3.46	4.89	7.74	10.94
Stz: Strand- en vooroeverzand	91.37	144.47	204.31	323.05	456.86
Stz: Strand- en vooroeverzand nat	1.29	2.03	2.87	4.54	6.43
Scz1: Spisulazand 1	0.45	0.71	1.00	1.58	2.24
Scz2: Spisulazand 2	0.48	0.76	1.07	1.69	2.39
Dz: dekzand	0.57	0.90	1.28	2.02	2.86
Bx: formatie van Bortel	0.52	0.82	1.16	1.84	2.60



Figuur 15: FS_{liq} Voorhavendam trillen

Ontwerp afmeervoorziening voorhavendam IJmuiden
Eindrapport

Hieronder staan voor de drie overige sonderingen de uitkomsten van de **verwekingsgevoelige lagen**, er is gekozen om de uitkomsten van het trillen te gebruiken als vergelijkingsmateriaal aangezien deze maatgevend zijn. De lagen die zullen worden vergeleken zijn de volgende:

- Stz: Strand- en vooroeverzand
- Scz1: Spisulazand 1
- Scz2: Spisulazand 2

Tabel 6: Vergelijking uitkomsten Idriss & Boulanger

Grondlaag/Afstand x	x1	x2	x3	x4	x5			
Afstand [m]	2	5	10	25	50			
a.max [m/s ²]	2.5515334	1.6137314	1.14108043	0.72168263	0.51030668			
	FSliq					qc	qc1Ncs	owater
Stz DKMP17	0.57	0.90	1.27	2.01	2.85	14320	82	71
Stz DKMP21	0.60	0.96	1.35	2.14	3.02	10920	100	45
Stz VH3	1.39	2.21	3.12	4.93	6.98	26310	151	61
Scz1 DKMP17	0.43	0.68	0.97	1.53	2.16	8760	40	114
Scz1 DKMP21	0.37	0.59	0.83	1.31	1.86	6860	34	124
Scz1 VH3	0.43	0.68	0.96	1.51	2.14	8030	34	125
Scz2 DKMP17	0.48	0.75	1.07	1.69	2.38	12490	46	171
Scz2 DKMP21	0.42	0.67	0.95	1.50	2.12	10920	47	160
Scz2 VH3	0.46	0.73	1.03	1.64	2.31	10620	38	176

Conclusie

Voorafgaand aan de berekeningen is door VolkerInfraDesign al het een en ander uitgesproken over de mogelijke kans op verweking. Uit de berekeningen blijkt dat over het algemeen geldt dat de aanwezige schelphoudende – en aanvulzanden zullen gaan verweken tot ongeveer 10 meter van de bron (buispaal). Dit was al deels voorspelt, daarom kan nu door middel van deze uitkomsten worden geconcludeerd dat de uitspraken juist waren. Voor de bodemopbouw van de drie locaties wordt verwezen naar bijlage 3 van dit rapport, hierin staan de tekeningen en sonderingen opgenomen.

Benadering relatieve dichtheid

Voorafgaand aan de betekeningen is er een benadering gedaan met de relatieve dichtheid, hieronder staan de conclusies per sondering vermeld.

- DKMP17

Uit de bepaling van de relatieve dichtheid voor deze sondering is gebleken dat de meest gevoelige laag op -0,4m tot -4 m NAP ligt. De zandlaag die hier van toepassing is is Antropogeen / ophoogzanden en/of stortzanden (los gepakt). Uit de uitkomsten van Idriss & Boulanger komt ook diezelfde zandlaag als meest verwekingsgevoelig uit de berekening. De benadering is hier juist

- DKMP21

Uit de bepaling van de relatieve dichtheid voor deze sondering is gebleken dat de meest gevoelige laag op -5 m tot -12 m NAP zit. Deze zandlaag is een laag van *spisulazand1* welke al bekend staat om de verwekingsgevoeligheid. Uit de uitkomsten van Idriss & Boulanger komt ook diezelfde zandlaag als meest verwekingsgevoelig uit de berekening. De benadering is hier juist.

- VH3

Uit de bepaling van de relatieve dichtheid voor deze sondering is gebleken de meest gevoelige laag op ongeveer -8 m tot -13 m NAP zit. Deze zandlaag is ook een laag van *spisulazand*. Uit de uitkomsten van Idriss & Boulanger komt ook diezelfde zandlaag als meest verwekingsgevoelig uit de berekening. De benadering is hier juist.



2.2 Robertson (2009)

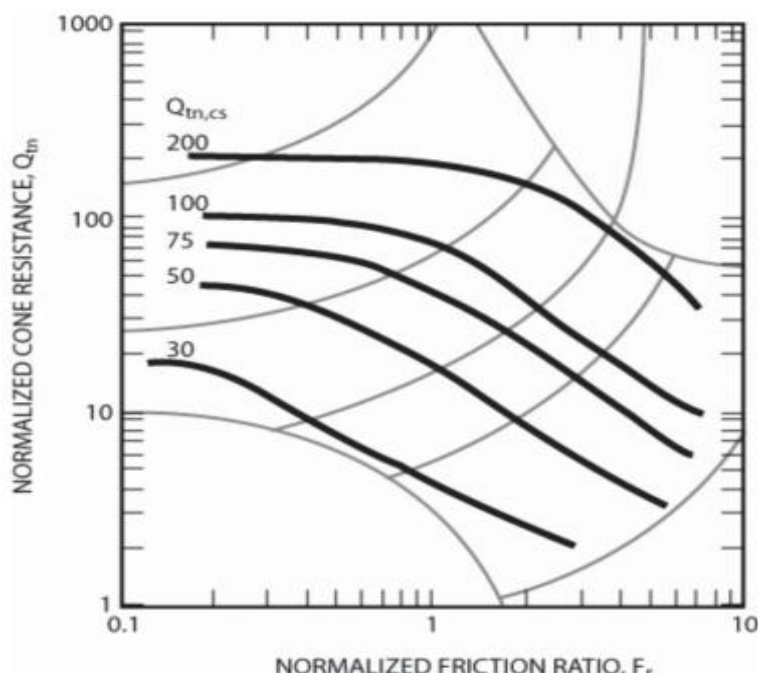
De methode van Robertson(2009) is het bepalen van de state parameter (ψ) van de 'schone zandlagen' waarmee je uit de gecorrigeerde conusweerstand de gevoeligheid van verweking kan bepalen. Aan de hand hiervan kan worden bepaald of dilatant gedrag optreedt, wat kan leiden tot verweking. Dilatant gedrag houdt in dat er een volumevergroting tussen de zanddeeltjes ontstaat. Eerder is al vermeld dat deze holle ruimtes worden opgevuld met water en hierdoor de korrelspanning zal afnemen. Als de state parameter van de zandlaag kleiner is dan -0.1, dan treedt geen verweking op. Uit de berekeningen zou dus ook moeten blijken welke zandlagen het meest verwekingsgevoelig zijn.

Robertson(1990) heeft een diagram ontwikkeld (Figuur 16: Qt-Fr chart) om het gedrag van de grond te identificeren aan de hand van genormaliseerde waarden voor de conusweerstand (q_{c1Ncs}) en het wrijvingsgetal (F_r) uit sonderingen. Deze parameters worden genormaliseerd door de effectieve verticale korrelspanning om zo dimensie loze parameters te produceren. De formules die hier voor gebruikt worden zijn als volgt:

$$q_{c1Ncs} = C_N^* (q_c / \text{Pa})$$

$$F_r = [f_s / (q_c - \sigma_{vo})] * 100\%$$

Alle overige formules en uitkomsten van bovengenoemde parameters staan in het excel sheet in bijlage 3 'Berekeningsmethodiek zettingsvloeiingen'.

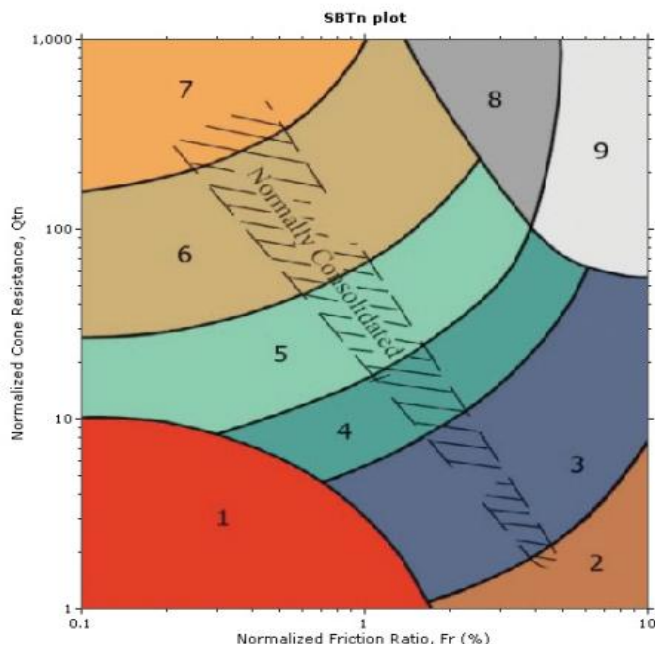


Figuur 16: Qt-Fr chart

Met behulp van bovenstaande grafiek van Robertson(1990) is dus af te leiden in welke categorie een bepaalde zandlaag valt. Op de x-as staat het genormaliseerd wrijvingsgetal uitgezet en op de y-as de genormaliseerde conusweerstand. Op de volgende pagina staan de verschillende zondes vermeld met bijbehorende categorie.

Gedragstype grondsoorten (I_c)

Elke grondsoort heeft een bepaald gedragstype, deze wordt aangegeven met I_c . In 1993 hebben twee onderzoekers, Jefferies en Davies, ontdekt dat met de waarden voor I_c de zones voor de zogehete Soil Behaviour Type Index kan worden aangegeven in het diagram van Robertson(1990). Robertson en Wride(1998) hebben deze zo aangepast dat het daadwerkelijk kan worden toegepast in het diagram. Dit diagram staat hieronder weergegeven met de bijbehorende gedragstypes, met daarbij de genormaliseerde conusweerstand (Q_{tn}) in kPa omgezet naar logaritmische schaal:



Figuur 17: Qt-Fr chart SBT

SBT zone	Proposed common SBT description
1	<i>Sensitive fine-grained</i>
2	<i>Clay - organic soil</i>
3	<i>Clays: clay to silty clay</i>
4	<i>Silt mixtures: clayey silt & silty clay</i>
5	<i>Sand mixtures: silty sand to sandy silt</i>
6	<i>Sands: clean sands to silty sands</i>
7	<i>Dense sand to gravelly sand</i>
8	<i>Stiff sand to clayey sand*</i>
9	<i>Stiff fine-grained*</i>

* Overconsolidated or cemented

Figuur 18: SBT zones

Om de index van het gedragstype te bepalen, wordt gebruik gemaakt van de volgende formule volgens Robertson en Wride(1998):

$$I_c = [(3,47 - \log q_{c1Ncs})^2 + (\log F_r + 1,22)^2]^{0,5}$$

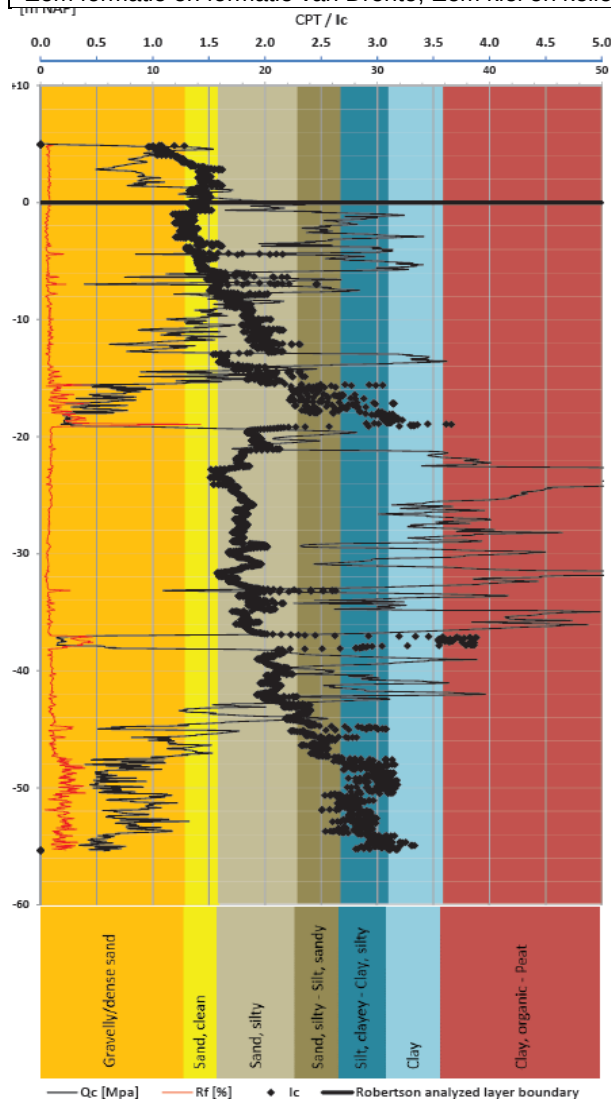
Met: daarin:

q_{c1Ncs} = Genormaliseerde conusweerstand [kPa]
 F_r = Genormaliseerd wrijvingsgetal volgens Robertson [kPa]

Via Volker Infra Design is een uitwerking verkregen voor de waarden van I_c uit dezelfde sondering welke door ons is gebruikt om zo een beeld te krijgen van de verschillen tussen de grondlagen. De sondering die hier van toepassing is, is DKMP09. Hieronder staat als eerste de grondopbouw weergegeven gevolgd door de uitkomsten van VID. Het volledige diagram is in bijlage 3 opgenomen.

Tabel 7: Grondopbouw DKMP09

Grondlaag	Van [NAP +m]	Tot [NAP +m]
Antropogeen / ophoogzanden en/of stortzanden (los gepakt).	5	1,8
Dekzanden, fijne tot matig fijne zanden	1,8	-0,2
Strand- en vooroeverzanden: matig fijn zand met schelpfragmenten	-0,2	-0,72
Strand- en vooroeverzanden: matig fijn zand met schelpfragmenten. (nat)	-0,72	-6
Overgangslaag: zand/klei, veendetritus, gelaagd	-6	-7
Spisulazand 1	-7	-12,3
Spisulazand 2	-12,3	-17
Klei, humeus, compact	-17	-18,5
Dekzanden, fijne tot matig fijne zanden	-18,5	-21
Formatie van Bostel, matig fijne zanden	-21	-43
Eem formatie en formatie van Drente; Eem klei en keileem	-43	-58



Figuur 19: I_c , DKMP09 (VID)

Op de figuur links staan de uitkomsten van het gedragstype per grondlaag. De dikgedrukte zwarte stippen geven de I_c aan. Om aan te geven welke I_c waarden welk type grondsoort aangeeft is hier een tabel voor opgesteld aan de hand van de figuur.

Tabel 8: Categorie gedragstype index I_c

Categorie grondsoort	Gedragstype index (I_c)
Dense sand to gravelly sand	0 - 1.3
Clean sand	1.3 - 1.64
Silty sand	1.64 - 2.3
Silty sand to sandy silt	2.3 - 2.7
Clayey silt, silty clay	2.7 - 3.1
Clay	3.1 - 3.65
Clay, organic - peat	3.65 - 5.0

Ontwerp afmeervoorziening voorhavendam IJmuiden
Eindrapport

Aan de hand van vroegere studies naar verweking hebben Robertson en Wride(1998) voorgesteld om een correctiefactor (K_c) toe te kennen aan de genormaliseerde conusweerstand van de siltige zandlagen. Deze wordt als volgt:

$$q_{c1Ncs+Kc} = K_c * q_{c1Ncs}$$

De waarde voor K_c is een functie van de samenstelling van de zandlaag welke kan worden bepaald in relatie met I_c .

Uit tabel 6 is op te maken dat alle lagen met een $I_c \leq 1,64$ schone zandlagen zijn, hierdoor wordt de correctiefactor 1.0 en daarmee blijft de genormaliseerde conusweerstand hetzelfde. Voor waarden van I_c hoger dan 1.64 geldt een andere formule welke in bijlage 3 staat weergegeven. De uitkomsten voor de waarden van het gedragstype index staan hier onder weergegeven en komen nagenoeg overeen met de waarden verkregen van VolkerInfraDesign, door het aflezen van de sondering kunnen kleine verschillen worden waargenomen met betrekking tot wrijvingsgetallen en de conusweerstand per grondlaag.

Tabel 9: I_c categorisering per grondlaag

Grondlaag	I_c Berekend	Categorie
Antropogeen / ophoogzanden en/of stortzanden (los gepakt).	1.79	Siltig zand
Dekzanden, fijne tot matig fijne zanden.	1.70	Siltig zand
Strand- en vooroeverzanden: matig fijn zand met schelpfragmenten.	1.55	Schoon zand
Schelphoudende zanden: fijn tot matig fijn zand, los gepakt	2.26	Siltig zand tot zandig silt
Hoofdzakelijk schelphoudende zanden: fijn tot matig fijn zand	2.20	Siltig zand
Dekzanden, fijne tot matig fijne zanden.	2.03	Siltig zand
Formatie van Bortel, matig fijne zanden	2.09	Siltig zand

2.3 State parameter (ψ) volgens Robertson(2009)

Zoals gezegd kan aan de hand van de genormaliseerde conusweerstand en het wrijvingsgetal worden bepaald wat de state parameter van de schone zandlagen is. Hieruit kan worden opgemaakt of de laag wel of geen dilatant gedrag vertoont. Er geldt het volgende:

Als $\psi < -0,1 \rightarrow$ Contractant gedrag

Als $\psi \geq -0,1 \rightarrow$ Dilatant gedrag

De formule die gehanteerd wordt bij het bepalen van de state parameter (ψ) is als volgt:

$$\Psi = 0,485 - 0,314 * \log q_{c1Ncs+Kc} \quad [-]$$

De berekening van de state parameter per zandlaag is uitgevoerd voor sondering DKMP09, hieronder staan de uitkomsten weergegeven met aangegeven of de laag wel of niet zal verweken.

Tabel 10: Zettingsvloeiing-gevoelige lagen volgens Robertson (sondering DKMP09)

Grondlaag	Ψ	WEL/NIET
Antropogeen / ophoogzanden en/of stortzanden (los gepakt).	-0.185047734	NIET
Dekzanden, fijne tot matig fijne zanden.	-0.204035813	NIET
Strand- en vooroeverzanden: matig fijn zand met schelpfragmenten.	-0.196958106	NIET
Strand- en vooroeverzanden: matig fijn zand met schelpfragmenten. (nat)	-0.106863835	NIET
Schelphoudende zanden: fijn tot matig fijn zand, los gepakt	-0.105475101	NIET
Hoofdzakelijk schelphoudende zanden: fijn tot matig fijn zand	-0.1288344	NIET
Dekzanden, fijne tot matig fijne zanden.	-0.126131359	NIET
Formatie van Bortel, matig fijne zanden	-0.185047734	NIET



2.4 Validatie berekeningsmethoden

Nu de verschillende methodieken voor het bepalen van zettingsvloeiingen zijn behandeld, is het van belang om deze te valideren aan de hand van vergelijkingen van zowel de methodieken als proefuitkomsten van het project OpenIJ.

2.4.1 Vergelijking berekeningsmethoden

Om te kijken of de uitkomsten van de verschillende methodes overeenkomen, zijn deze vergeleken met elkaar. Hierbij is gekeken welke lagen volgens de berekeningen het meest verwekingsgevoelig zijn en of dit met elkaar overeen komt. De uitkomsten zijn van sondering DKMP09, welke tevens wordt toegepast bij het ontwerp van de dukdalf. De lagen zijn genummerd van 1 t/m 8, met 8 is meest verwekingsgevoelig.

Tabel 11: Vergelijking uitkomsten Idriss & Boulanger en Robertson

Grondlaag	Idriss & Boulanger	Robertson (2009)
Antropogeen / ophoogzanden en/of stortzanden (los gepakt).	5	5
Dekzanden, fijne tot matig fijne zanden	7	7
Strand- en vooroeverzanden: matig fijn zand met schelpfragmenten	8	8
Strand- en vooroeverzanden: matig fijn zand met schelpfragmenten. (nat)	6	6
Spisulazand 1	1	1
Spisulazand 2	2	2
Dekzanden, fijne tot matig fijne zanden	4	4
Formatie van Boxtel, matig fijne zanden	3	3

Bij bovenstaande vergelijking zijn alle zandlagen meegenomen, echter is het van belang om daadwerkelijk te kijken naar de verwekingsgevoelige lagen aangezien bij de overige lagen verweking geen rol zal spelen in de praktijk. Aan de hand van de doorsnede ter plaatse en de grondopbouw is bepaald dat de verwekingsgevoelige lagen zijn: Strand- en vooroeverzanden(Stz,nat), Spisulazand 1 en Spisulazand 2.

Als hierin een vergelijking wordt gemaakt, wordt deze als volgt:

Tabel 12: Vergelijking uitkomsten meest verwekingsgevoelige lagen

Grondlaag	Idriss & Boulanger	Robertson(2009)
Strand- en vooroeverzanden: matig fijn zand met schelpfragmenten. (nat)	3	3
Spisulazand 1	1	1
Spisulazand 2	2	2

Uit de bovenstaande vergelijking is op te maken dat de uitkomsten van de berekeningen met elkaar overeenkomen.

Ontwerp afmeervoorziening voorhavendam IJmuiden
Eindrapport

2.4.2 Relatieve dichtheid benadering

Voorafgaand aan de berekeningen voor de verwekingsgevoeligheid, is met behulp van de relatieve dichtheid een benadering gedaan voor de zandlagen. Hoe lager de relatieve dichtheid, des te meer de laag gevoelig is voor verweking. Deze uitkomsten zijn ook vergeleken met de uitkomsten van de berekeningsmethodes.

Tabel 13: Vergelijking van de verschillende methodes

Grondlaag	Idriss & Boulanger	Robertson(2009)	Relatieve dichtheid
Strand- en vooroeverzanden: matig fijn zand met schelpfragmenten. (nat)	1.29	-0.196958106	75%
Spisulazand 1	0.45	-0.106863835	32%
Spisulazand 2	0.48	-0.105475101	34%

Tabel 14: Vergelijking volgorde van meest verwekinggevoeligheid volgens de verschillende methodes

Grondlaag	Idriss & Boulanger	Robertson(2009)	Relatieve dichtheid
Strand- en vooroeverzanden: matig fijn zand met schelpfragmenten. (nat)	3	3	3
Spisulazand 1	1	2	1
Spisulazand 2	2	1	2

2.4.3 Vergelijking met uitkomsten Boskalis

Er is een vergelijking gemaakt met uitkomsten van Boskalis van de verkregen waardes ter validatie van de rekenmethode die gehanteerd is. Wanneer deze berekening kloppend blijkt, kan worden gesteld dat, met behulp van Robertson(2009), een goede indicatie kan worden gegeven welke grondlagen verwekingsgevoelig zullen zijn. Hier kan dan extra rekening mee worden gehouden wanneer er trillingen ontstaan tijdens werkzaamheden nabij deze grondlagen.

Boskalis heeft de state parameter uitgezet in de sondering zelf, hier hebben wij de waardes uit gehaald en in een tabel weergegeven om zo goed met de berekende waardes te kunnen vergelijken. Hieronder staan de uitkomsten van zowel onze berekeningen als de bevindingen van Boskalis. De state parameter staat uitgezet in de sondering welke staat opgenomen in bijlage 'State parameter DKMP09' volgens Boskalis'. De state parameter wordt alleen voor de 'schone' zandlagen berekend aangezien klei/veen geen dilatant gedrag zal vertonen.

Tabel 15: Vergelijking uitkomsten Robertson & Boskalis

Grondlaag	Ψ Robertson(2009)	Ψ Boskalis
Antropogeen / ophoogzanden en/of stortzanden (los gepakt).	-0.185047734	-0,221
Dekzanden, fijne tot matig fijne zanden	-0.204035813	-0.224
Strand- en vooroeverzanden: matig fijn zand met schelpfragmenten	-0.196958106	-0.237
Spisulazand 1	-0.106863835	-0,117
Spisulazand 2	-0.105475101	-0,045
Dekzanden, fijne tot matig fijne zanden	-0.1288344	-0,121
Formatie van Bortel, matig fijne zanden	-0.126131359	N.V.D.

Tabel 16: Vergelijking volgorde van meest verwekinggevoeligheid volgens Robertson & Boskalis

Grondlaag	Ψ Robertson(2009)	Ψ Boskalis
Antropogeen / ophoogzanden en/of stortzanden (los gepakt).	4	4
Dekzanden, fijne tot matig fijne zanden	6	5
Strand- en vooroeverzanden: matig fijn zand met schelpfragmenten	5	6
Spisulazand 1	2	2
Spisulazand 2	1	1
Dekzanden, fijne tot matig fijne zanden	3	3
Formatie van Bortel, matig fijne zanden	-	N.V.D.



3. ONTWERP DUKDALF

In dit hoofdstuk wordt een beknopte samenvatting gegeven van de informatie uit Bijlage 4 'Ontwerpdokument dukdalf'.

3.1 Algemeen

Dit document betreft de ontwerputgangspunten en uitkomsten van de afmeervoorziening voor de voorhavendam bij project OpenIJ. Deze voorziening zal in de vorm van een dukdalf worden gerealiseerd. Dukdalven bestaan vaak uit een stalen buispaal die voor een deel boven water zal uitsteken. Aan deze buispalen worden vervolgens fenders en bolders bevestigd die de mogelijk aan de schepen geven om af te meren. Bij de installatie van deze buispalen worden vaak trilblokken gebruikt om de buispaal op diepte te brengen. De afbeelding hieronder geeft een beeld van deze constructie.

Aan de hand van de gegevens van het projectgebied en van de normen en richtlijnen zijn er berekeningen uitgevoerd en keuzes gemaakt voor het ontwerp van de dukdalf. Deze keuzes en uitkomsten zijn in dit document vermeldt. De onderbouwing van deze keuzes zijn terug te vinden in de berekeningen. In de bijlage zijn zowel de berekeningen als de definitieve ontwerp tekeningen van de dukdalf te vinden. Voor het ontwerp is gekeken naar de soorten belastingen die het ontwerp zou moeten kunnen verdragen. Ook zijn, aan de hand van de functionaliteit, keuzes gemaakt betreffende de vorm en materiaal keuzes voor dit ontwerp. Op onderstaande figuur staat een 3D tekening ter illustratie van de ontworpen afmeervoorziening.

Voor alle uitwerkingen van de berekeningen, de ontwerptekeningen en overige gegevens met betrekking tot het ontwerp dukdalf wordt verwezen naar bijlage 4 'Ontwerpdokument dukdalf'.



Figuur 20: 3D illustratie afmeervoorziening



3.2 Berekeningsmethodiek

De berekeningen van de dukdalf zijn zowel deels met de hand uitgevoerd als met behulp van computersoftware. Hierbij wordt de stabiliteit en sterkte van de dukdalf berekend ten gevolge van de verschillende belastingen conform NEN-EN 1993-1-1. Deze berekeningen zijn omgeschreven in de bijlage 4 'Ontwerpdokument dukdalf'. De gebruikte software is D-sheet. Hiermee is de inheidiepte van de buispaal bepaald en is de maximale vervorming gecontroleerd. Voor het bepalen van optredende zettingsvloeiingen zijn handberekeningen uitgevoerd aan de hand van diverse literatuur, deze staan ook omschreven in bijlage 4 en in de spreadsheets uit diezelfde bijlage.

3.3 Gebruikseisen

3.3.1 Functie

Bij de nieuw te realiseren zeesluis te IJmuiden, zullen afmeervoorzieningen moeten worden geplaatst om zo schepen te kunnen laten afmeren gedurende de wachttijd. Afhankelijk van het scheepstype kunnen krachten worden bepaald. Hieronder staan de uitgangspunten betreffende de scheepsklasse en bijbehorende afmetingen etc.

3.3.2 Vaarwegklasse

In de eis vanuit OpenIJ worden de schepen die de nieuwe sluis zouden kunnen passeren beschreven.

Schepen die de Nieuwe Sluis kunnen passeren zijn:

- binnenvaart CEMT III en alle CEMT klassen daarboven;
- alle zeescheepvaart tot en met maximale schepen:
 - cruiseschip (lengte 361 meter, breedte 47 meter, diepte 9,3 meter in zout water met soortelijk gewicht van 1025 kg/m³);
 - bulkschip (lengte 342 meter, breedte 63,5 meter, diepte 13,75 meter in zout water met soortelijk gewicht van 1025 kg/m³);
 - containerschip (lengte 398 meter, breedte 56,4 meter, diepte 13,75 meter in zout water met soortelijk gewicht van 1025 kg/m³);
 - tanker (lengte 342 meter, breedte 63,5 meter, diepte 13,75 meter in zout water met soortelijk gewicht van 1025 kg/m³).

3.3.3 Afmetingen maatgevend schip

De maatgevende afmetingen van het schip waar de afmeervoorziening op is gedimensioneerd staan weergegeven in de volgende tabel.

Tabel 17: Scheepsafmetingen

Scheepstype	Lengte [m]	Breedte [m]	Diepgang [m] (bij zoutwater)	Massa [ton]
Container	399	59	14	260.000

3.3.4 Levensduur

Conform de Richtlijnen Ontwerpen Kunstwerken – projectspecifieke aanpassingen geeft een ontwerplevensduur voor geleidewerken van 50 jaar. Voor een dukdalf zal dezelfde levensduur worden aangehouden.

3.3.5 Installatiemethode stalen buispalen

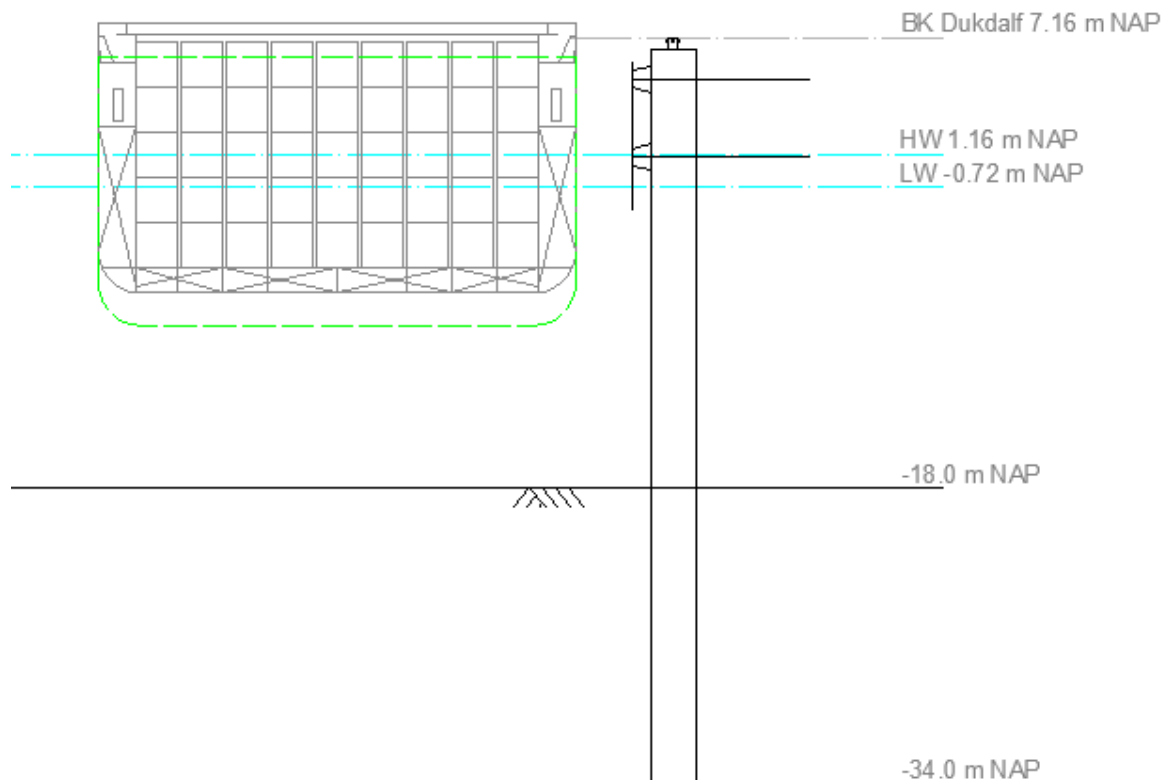
De buispalen zullen door triltechnieken in de grond worden geplaatst. Dit zal door middel van een trilblok (2350 VM) vanaf een barge worden uitgevoerd. Vervolgens zal het kopstuk op de buispaal worden gelast waarna als laatst de fenderconstructie zal worden bevestigd.



3.4 Functioneel en geometrie

3.4.1 Bodemniveaus en waterstanden

Op de locatie van de reeds te realiseren dukdalf is de bodemdiepte -18 m NAP. Hieronder staat de situatie zoals deze is ontworpen weergegeven in een overzichtstekening met bijbehorende hoogtematen.



Figuur 21: Dukdalf overzicht

3.4.2 Waterstanden

De waterstanden zijn conform de hydraulische randvoorwaarden van het OpenIJ

Tabel 18: Ontwerpwaterstanden geleidewerken

	Hoogwater	Laagwater
Zeezijde	NAP +1,16 m	NAP – 0,72 m
Kanaalzijde	NAP +0,10 m	NAP - 0,74 m

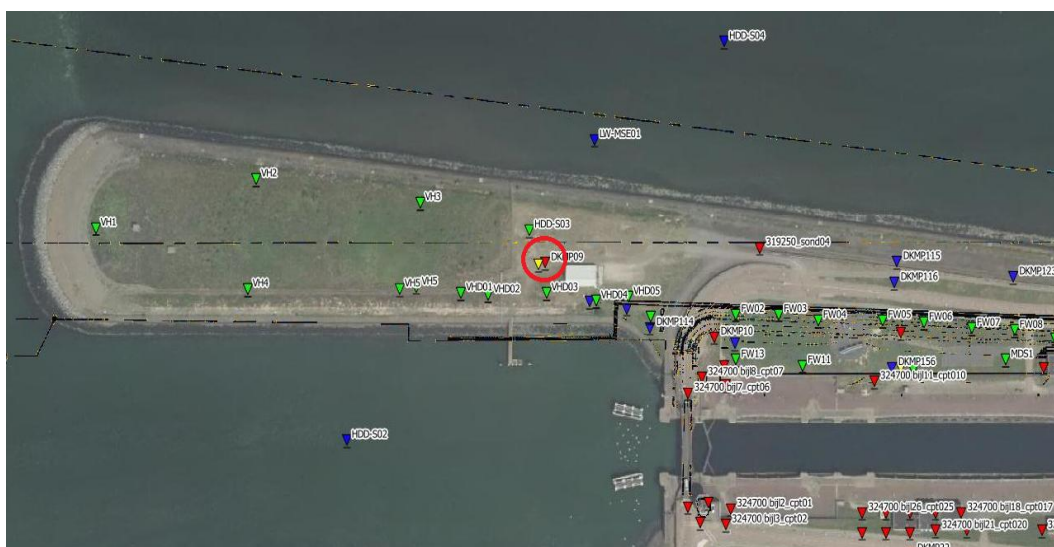
De maatgevende waterstand voor de sterkte berekeningen is de hoogwaterstand aan de zeezijde aangezien aan die kant de afmeervoorziening wordt gerealiseerd. Deze is ook terug te vinden in de overzichtstekening opgenomen in bijlage 4.

Ontwerp afmeervoorziening voorhavendam IJmuiden

Eindrapport

3.4.3 Sondering

Vanuit het project OpenIJ zijn sonderingen gemaakt ter plaatse van de te realiseren afmeervoorzieningen. De locatie is ter hoogte van de Voorhavendam. Hieronder staat op de plattegrond aangegeven de locatie van de gebruikte sondering tijdens berekeningen. De exacte locatie van de dukdalf wordt in hoofdstuk 9 behandeld.



Figuur 22: Plattegrond sonderingen Voorhavendam IJmuiden

Zoals aangegeven zal de gebruikte en tevens meest maatgevende sondering zijn:

- DKMP09

De totale sondering is in bijlage 2 en 3 opgenomen. Hieronder staat in een tabel beschreven welke grondlagen hier aanwezig zijn met bijbehorende eigenschappen.

Tabel 19: Bodemprofiel 1 Voorhavendam

Grondlaag	Van [NAP +m]	Tot [NAP +m]	Dikte [m]	γ_{droog} [kN/m ³]	γ_{nat} [kN/m ³]
AO: Antropogene laag (aanvulzand)	5	1,8	2,2	16	20
Dz: dekzand	1,8	-0,2	2	17	20
Stz: Strand- en vooroeverzand	-0,2	-6	5,8	18	21
Ol: Overgangslaag	-6	-7	1	18	18
Scz1: Spisulazand 1	-7	-12,3	5,3	17	21
Scz2: Spisulazand 2	-12,3	-17	4,7	18	21
Vk/Bv: Laagpakket van Velsen / Basisveen	-17	-18,5	1,5	18	18
Dz: dekzand	-18,5	-21	2,5	17	20
Bx: formatie van Bostel	-21	-43	22	18	21
Ee/Dr: Formatie van Eem / Drenthe	-43	-58	15	17	20



3.5 Ontwerpeisen

3.5.1 Materiaal

Buizen

Voor buispalen onder de waterlijn wordt het materiaal X70 toegepast de belangrijkste eigenschappen van deze staalsoort staan hieronder vermeld.

Vloeigrens [f_y]	= 483	N/mm ²
Treksterkte [f_u]	= 565	N/mm ²
Elasticiteitsmodulus [E]	= 210000	N/mm ²

Constructieonderdelen

Hieronder staan de nominale waarden van de vloeigrens f_y en de treksterkte f_u voor warmgewalst constructiestaal. Voor de kopbolder en de fenderconstructie wordt S355H toegepast. Ook hier staan de belangrijkste eigenschappen vermeld, deze zijn conform tabel 3.1 uit de NEN-EN 1993-1-1+C2:2011.

Vloeigrens [f_y]	= 355	N/mm ²
Treksterkte [f_u]	= 510	N/mm ²
Elasticiteitsmodulus [E]	= 210000	N/mm ²

3.5.2 Buisprofielen

De afmeervoorzieningen zullen worden uitgevoerd in ronde stalen buispalen. Nadat de installatie-effecten uitvoerig zijn behandeld kan er eventueel een wijziging qua profiel worden doorgevoerd. Dit is afhankelijk van de oplossingsrichting. Voor nu wordt uitgegaan van een ronde stalen buispaal.

3.6 Optredende belastingen

3.6.1 Permanente belastingen

Eigen gewicht

onder de permanente belastingen valt enkel het eigen gewicht van de constructie. Dat valt te bepalen aan de hand van het ontwerp en het gekozen materiaal welke hier boven staan vermeld.

In de berekening is het volgende soortelijk gewicht aangehouden:

Tabel 20: Soortelijk gewicht staal

Materiaal	Soortelijk gewicht [kN/m ³]
Staal	78,5

3.6.2 Gronddruk

De gronddruk is afhankelijk van de bodemopbouw, grondwaterstand en bovenbelasting. De in horizontale richting werkende gronddruk is afhankelijk van de richting van de belasting:

- actieve gronddruk: de constructie wijkt t.o.v. de grond
- passieve gronddruk: de constructie drukt tegen de grond.


 Ontwerp afmeervoorziening voorhavendam IJmuiden
Eindrapport
3.6.3 Veranderlijke belastingen
Stroming, golf en windbelasting

Aangezien de constructie zich in het water bevindt, werken ook krachten op afkomstig van golven en stroming. Deze belastingen worden buiten beschouwing gehouden. Wel wordt de windbelasting meegenomen, welke een kracht op het schip uitoefent. Deze kracht zal moeten worden opgenomen door de dukdalf. De windbelasting wordt berekend conform de EAU 2012 en de NEN-EN 1991-1-4. Dit geldt voor de zowel de formules als de factoren/coëfficiënten. De coëfficiënten en windsnelheden zijn afhankelijk van het windgebied. Het gebied betreft "Windgebied II" – onbebouwd gebied.

Tijdens de berekeningen wordt uitgegaan van de meest ongunstige windrichting. Dat houdt in dat voor de windhoek α , 90 graden wordt aangehouden. Dit resulteert in de volgende waarde voor de windbelasting op de afmeerpalen.

$$F_w = 1412 \text{ kN}$$

De volledige berekeningen voor alle waardes zijn aan de hand van een excell sheet bepaald. Deze is als bijlage bijgevoegd aan het rapport 'Ontwerpdokument dukdalf'.

3.6.4 Trosbelasting

De trosbelasting ontstaat door de schepen die aan de dukdalf worden vastgelegd. Hiermee zullen de stroming, golf en windbelasting die op het schip werken wel van belang zijn omdat deze zorgen voor het afdrijven van het schip. De grootte van deze trosbelasting wordt bepaald aan de hand van tabel 3.2 uit CUR 116. Deze is hieronder opgenomen.

Tabel 21: Karakteristieke waardes van de bolderkrachten voor zeeschepen

WATERVERPLAATSING IN kN		BOLDERKRACHT IN kN
<	20.000	100
<	100.000	300
<	200.000	600
<	500.000	800
<	1.000.000	1.000
<	2.000.000	1.500
>	2.000.000	2.000

Uit berekeningen is gebleken dat de waarde voor de waterverplaatsing afkomstig van het ontwerpschip zal worden:

$$\text{Waterverplaatsing} = 2996280 \text{ kN} > 2000000 \text{ kN}$$

De troskracht wordt hierdoor:

$$F_{\text{tros}} = 2000 \text{ kN}$$

Voor de uitgebreide berekeningen wordt verwezen naar bijlage 4.

Ontwerp afmeervoorziening voorhavendam IJmuiden
Eindrapport**3.6.5 Scheepsbelastingen****Aanvaarbelasting**

Deze belasting ontstaat bij het contact tussen een aanvarend schip en de dukdalf. De grote van deze belasting zal bepaald worden aan de hand van de scheepsklasse. Er zal onderscheid worden gemaakt in afmeerenergie met en zonder scheepsrotatie. De maatgevende waarde zal worden gebruikt.

Afmeerenergie op dukdalf (zonder scheepsrotatie)

De dukdalf kan flexibel worden uitgevoerd. In dat geval moet een energiebeschouwing worden gehanteerd waarbij, bij manoeuvreren, de dukdalf niet plastisch mag vervorming. In § 15.5.2 van "Ontwerp van schutsluizen" wordt ingegaan op de normale en extreme aanvaarsnelheden. De energie die het schip op flexibele constructie levert wordt bepaald met de volgende vereenvoudigde formule, conform de EAU 2012 en het sluizenboek:

De waarde voor de afmeerenergie wordt beschouwd met een afmeerhoeken van 6°. De waarde voor de afmeerenergie komt uit op:

$$E_{z,6^\circ} = 1019 \text{ kNm}$$

De volledige berekeningen voor alle waardes zijn aan de hand van een excell sheet bepaald. Deze is als bijlage bijgevoegd. Verder zijn de betekenissen van de verschillende gebruikte coëfficiënten ook terug te vinden in de bijlage.

Afmeerenergie (met scheepsrotatie) op dukdalf

Als extra methode zal de scheepsrotatie worden meegenomen in het bepalen van de afmeerenergie. Hierbij wordt de situatie uitgewerkt waarbij het schip tijdens het afmeren zelf nog om zijn eigen as draait. Hierdoor komt het schip met een draaiende beweging tegen de dukdalf wat een andere energie oplevert dan wanneer een schip afmeert zonder rotatie. Vooraf kan voorspeld worden dat deze waarde lager uit zal komen dan de methode zonder scheepsrotatie, toch wordt deze methode behandeld. De volgende formule is van toepassing voor dit type belasting (EAU 2012).

De waarde voor de afmeerenergie met scheepsrotatie wordt als volgt:

$$E_{z,6^\circ,\omega} = 998 \text{ kN}$$

De volledige berekeningen voor alle waardes zijn aan de hand van een excell sheet bepaald. Deze is als bijlage bijgevoegd.

3.6.6 Schroefstraalbelasting

Bij het manoeuvreren van schepen zal de schroef van deze schepen impact hebben op de constructies. Omdat dit enkel bepalend is voor de bodembescherming van de constructie wordt dit buiten beschouwing gelaten omdat er geen bodembescherming wordt ontworpen.

3.6.7 Belastingfactoren

Gekeken naar de functie van de dukdalf zal de constructie worden ingedeeld in de gevolgklasse CC2. De kans op slachtoffers is relatief klein, daar in tegen zijn de economische schade relatief hoog. Hier komen de volgende belastingfactoren in de uiterste grenstoestand van toepassing:

$$\gamma_G = 1.2$$

$$\gamma_Q = 1.5$$

Voor de aanvaarbelasting wordt geen belastingsfactor gebruikt omdat de kracht afhankelijk is van de bepaalde energie conform EAU2012 en de representatieve stijfheid van de dukdalf.

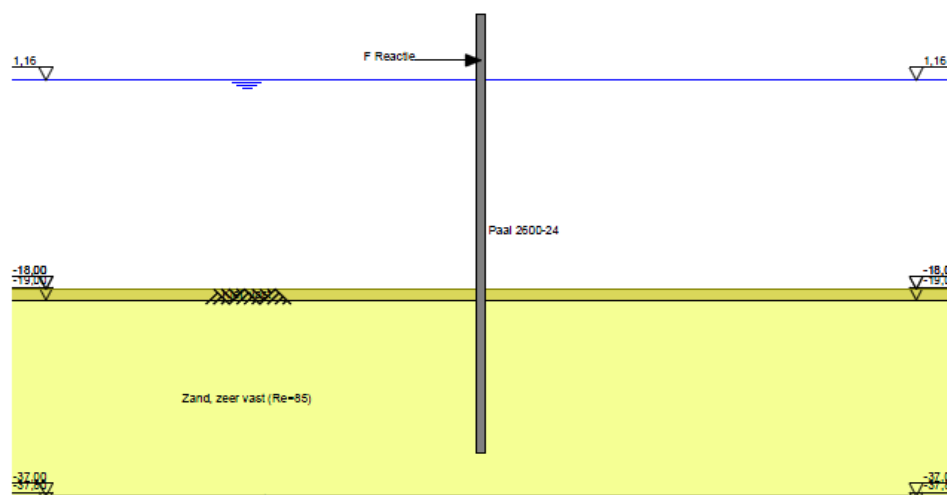
3.7 Stabiliteitsberekeningen m.b.v. D-sheet piling

De inheidiepte is door middel van D-sheet vastgesteld. Bij deze berekeningen horen de volgende uitgangspunten:

- Bovenkant kopbolder = +7,16 m NAP
- D_{buis} (buitendiameter) = 2600 mm
- t (wanddikte) = 24 mm
- EI (Stijfheid) = $3,38E+7 \text{ kNm}^2$
- F_E reactiekracht (+3m NAP) = 2476 kN
- Verplaatsing teen buispaal = Max. 5 – 10 cm
- Ontwerpwaterstand (HW) = +1,16 m NAP
- Inheidiepte = -33,0 m NAP

De gegevens met betrekking tot de grondopbouw worden behandeld in hoofdstuk 3.4.3. De overige invoergegevens zoals deze in D-sheet staan ingevoerd zijn terug te vinden in het rapport in bijlage 4.

Hieronder staat de situatie zoals deze in D-sheet is ingevoerd weergegeven.



Figuur 23: Situatieschets D-sheet

Met behulp van D-sheet is de check gedaan of de verplaatsing aan de top onder het maximum van 1,5 meter zou eindigen. Dit geldt hetzelfde voor de verplaatsing onder aan de buispaal, deze moet binnen de 5 – 10 cm vallen. In beide gevallen zijn ze kloppend. Alle uitvoergegevens staan ook in bijlage 4 in het D-sheet rapport.

3.7.1 verplaatsing

De maximale verplaatsing aan de top van de buispaal is vastgesteld conform de EAU 2012. Deze waarde mag maximaal 1,5 meter worden. Voor de onderkant, ookwel het kwispeleffect genoemd, staat de maximale verplaatsing vastgesteld op 5-10 cm. Beide controles vallen binnen de toleranties.

3.7.2 Fenderconstructie

De energie afkomstig van het afmeren van het schip moet worden omgezet in een reactiekracht op de combinatie van de fenderconstructie en de buispaal. De vrijgekomen energie wordt deels door de paal opgenomen en deels door de fenderconstructie. De stabiliteit van de dukdalf wordt bepaald met behulp van D-sheet. Voorafgaand aan de berekening zijn de volgende uitgangspunten vastgesteld:

- Maximale vervorming top buispaal = 1,5 m
- $E_{d,a} / E_{\text{totaal}} < 1,0 \rightarrow$ dit betekent dat de totale energie wat het systeem (buispaal + fenderconstructie) kan opnemen, groter moet zijn dan de energie afkomstig van het afmeren van het schip
- $E_{d,a} = \text{max. afmeerenergie} = 1528 \text{ kNm}$
- Aangrijpingspunt reactiekracht $R_F = +3 \text{ m NAP}$
- D_{buis} (buitendiameter) = 2600 mm
- t (wanddikte) = 24 mm

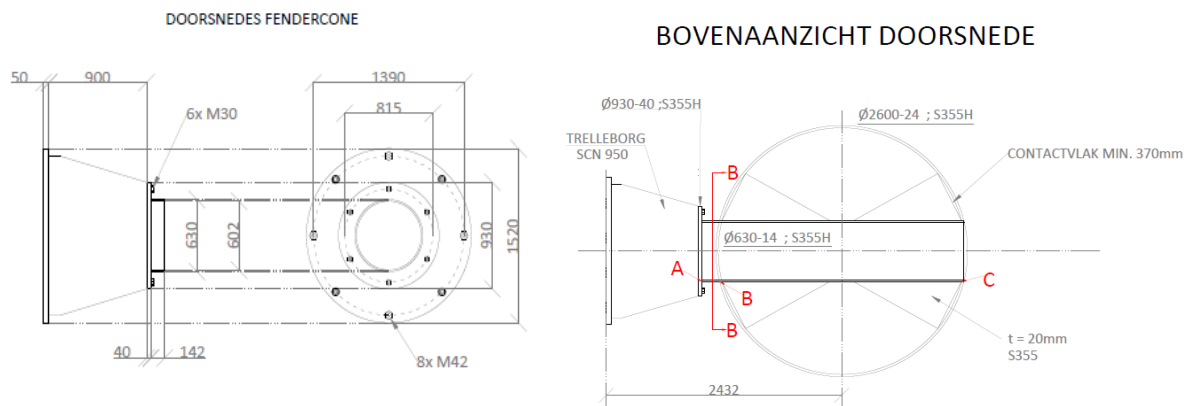
Na het bepalen van de afmeerenergie kan met behulp van de gegevens van de leverancier 'Trelleborg' het type fender verder worden vastgesteld. Aan de hand van deze uitgangspunten zijn verschillende controles uitgevoerd. Hieruit bleek de gekozen fender te voldoen aan de gestelde eisen. Er is gekozen voor het volgend fendertype.

- Supercone fender SCN 950 E3.0

Aan de hand van de bijbehorende reactie energie van dit type fender (Trelleborg marine systems [6]) komt een reactiekracht tot stand, hieruit volgen de rekenwaarden voor het ontwerp. De uiteindelijke rekenwaarde voor de afmeerbelasting is geworden:

$$F_E = 2475 \text{ kN}$$

In bijlage 4 'Ontwerpdokument dukdalf' zijn alle gegevens terug te vinden met betrekking tot berekeningen, afmetingen en detailtekeningen.. Hieronder staan twee tekeningen weergegeven van de uiteindelijk ontworpen fenderconstructie.



Figuur 24: ACAD tekeningen fenderconstructie

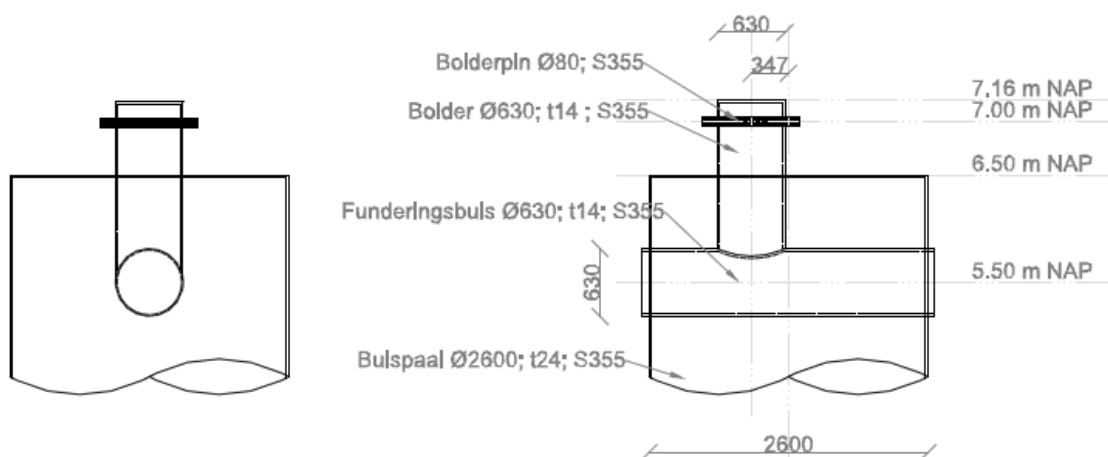


3.8 Kopbolder

Om de schepen vast te kunnen leggen worden bolders op de afmeervoorzieningen geplaatst. Deze bolders geven de mogelijkheid om doormiddel van trossen de schepen vast te kunnen leggen. Hiervoor moeten de bolders wel resistent genoeg zijn om de optredende trekkrachten die door de afdrijvende schepen wordt veroorzaakt op te kunnen nemen. Aan de hand van deze kracht wordt de kopbolder met verschillende belastingsvarianten berekend.. De bolder wordt bevestigd aan de topplaat van de buispaal en aan een funderingsbuis die zich in de buispaal bevindt. Voor het berekenen van de kopbolder zijn de volgende uitgangspunten toegepast:

- Diameter bolder = 630 mm
- Wanddikte bolder = 14 mm
- Hoogte bolder = + 7.16 m NAP
- Troskracht = 2000 kN
- Hoogte aangrijpingspunt = + 7.00 m NAP
- Hoogte verbinding met topplaat = + 6.50 m NAP
- Hoogte funderingsbuis = + 5.50 m NAP
- Diameter funderingsbuis = 630 mm
- Wanddikte funderingsbuis = 14 mm

Aan de hand van deze uitgangspunten zijn verschillende controles uitgevoerd. Aan de hand van deze controles bleek de bolder te voldoen aan de gestelde eisen. Voor de berekeningen wordt verwezen naar bijlage 4 'Ontwerpdokument dukdalf',



Figuur 25: ACAD tekeningen kopbolder

3.9 Plaatsbepaling a.h.v. mogelijk optredende zettingsvloeiing

Het is van belang om zeker te zijn van mogelijk optredende zettingsvloeiingen wanneer een exacte locatie wordt gekozen voor het ontwerp. Met behulp van de berekeningsmethodieken kan deze locatie worden bepaald. Er is bepaald of er wel of geen verweking zal gaan optreden tijdens het aanbrengen van de dukdalf. De methode die hier voor is gebruikt is die van Idriss & Boulanger, gebaseerd op aardbevingsliteratuur. De berekeningen zijn uitgevoerd met behulp van de volgende uitgangspunten:

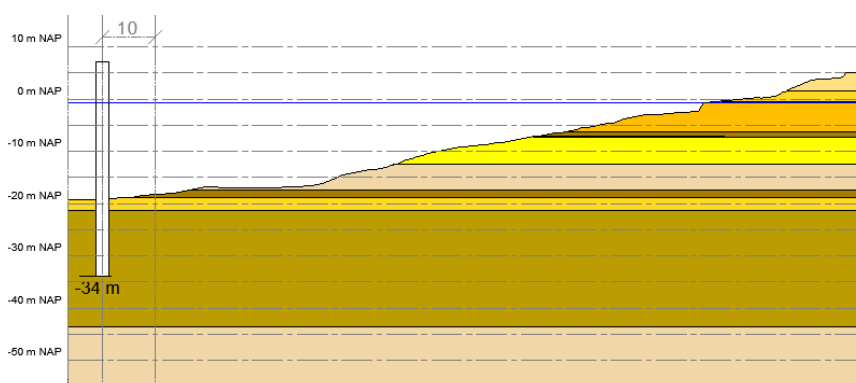
Sondering : DKMP 09
Grondwaterstand : -0,72 m NAP
Trilblok : PVE2350VM
Waterdiepte thv dukdalf : -18 m NAP

Hieronder staan voor alle zandlagen de uitkomsten van FS_{liq} bij een afstand van 10 meter van de buispaal. Gesteld kan worden dat verweking op zal treden zodra FS_{liq} < 1,0, daarom is een minimum vastgesteld op 10 meter. Alles wat binnen deze afstand valt, zal verweken zodra aan de voorwaardes wordt voldaan.

Tabel 22: FS_{liq} voor x=10

Grondlaag/Afstand x	x
Afstand [m]	10
a.max [m/s ²]	1.1411
Antropogeen / ophoogzanden en/of stortzanden (los gepakt).	2.64
Dekzanden, fijne tot matig fijne zanden.	4.89
Strand- en vooroeverzanden: matig fijn zand met schelpfragmenten.	204.31
Strand- en vooroeverzanden: matig fijn zand met schelpfragmenten. (nat)	2.87
Schelhoudende zanden: fijn tot matig fijn zand, los gepakt	1.00
Hoofdzakelijk schelhoudende zanden: fijn tot matig fijn zand	1.07
Dekzanden, fijne tot matig fijne zanden.	1.28
Formatie van Bortel, matig fijne zanden	1.16

Gezien de situatie kan worden uitgesloten dat dit zal optreden omdat hier simpelweg het talud niet steil genoeg is en de afstand tot de verwekingsgevoelige lagen is te groot. Hieronder staat de situatie weergegeven.



Figuur 26: 'gevarezone' DKMP09

Afhankelijk van het gewenste eindresultaat kan er voor worden gekozen om de dukdalf meer richting het land te plaatsen. Dit komt doordat de verwekingsgevoelige lagen nog ver genoeg zitten ten opzichte van de bron (buispaal). Wel zal een deel van de aanwezige lagen moeten worden afgegraven om zo aan de gewenste diepte van -18 m NAP te komen. Deze berekeningen zijn ook uitgevoerd en staan opgenomen in bijlage 3.



3.10 Toepassingen trilbloktypes

Voorafgaand aan de berekeningen is gekozen om gebruik te maken van het trilblok 2350VM. Dit omdat uit ervaringen is gebleken dat met dit type de gewenste inheidiepte zal worden gehaald. Hiernaast is ook dit type toegepast tijdens de praktijkproeven bij OpenIJ, wat de vergelijking inzichtelijker maakt.

Het bepalen van de toepasbare trilblokken kan vooraf worden gedaan met modelleringsprogramma's, echter zijn deze voor dit onderzoek niet beschikbaar. Daarom is, ongeacht het resultaat, een berekening gemaakt van drie type trilblokken om een vergelijking te kunnen maken.

De volgende trilblokken met bijbehorende specificaties zijn door gerekend:

Tabel 23: Eigenschappen trilblokken

Type trilblok	Slagkracht [kN]	Toerental [tpm]	frequentie [Hz]	VSF
PVE 105 M	2150	1350	22.5	Ja
PVE 2070	3070	2000	33.33	Nee
PVE 2350 VM	2900	2300	38.33	Nee
ICE 36 rf	2030	2300	38.33	Ja

Als referentie afstand zal 10 meter worden aangehouden voor de verschillende trilblokken om te kijken wat de verschillen zijn. De uitkomsten zijn als volgt:

Tabel 24: Bepaling trilsnelheid op 10 meter afstand per zandsort en trilblok

Type trilblok	2350VM	PVE 105M	PVE2070	ICE 36 rf
Afstand [m]	10	10	10	10
a.max [m/s ²]	1.14	0.52	1.04	0.84
Antropogeen / ophoogzanden en/of stortzanden (los gepakt).	2.64	5.79	2.89	3.56
Dekzanden, fijne tot matig fijne zanden.	4.89	10.74	5.36	6.61
Strand- en vooroeverzanden: matig fijn zand met schelpfragmenten.	204.31	448.49	223.61	275.98
Strand- en vooroeverzanden: matig fijn zand met schelpfragmenten. (nat)	2.87	6.31	3.15	3.88
Schelphoudende zanden: fijn tot matig fijn zand, los gepakt	1.00	2.20	1.10	1.35
Hoofdzakelijk schelphoudende zanden: fijn tot matig fijn zand	1.07	2.34	1.17	1.44
Dekzanden, fijne tot matig fijne zanden.	1.28	2.80	1.40	1.73
Formatie van Bostel, matig fijne zanden	1.16	2.55	1.27	1.57

Er kan dus worden gesteld dat de verwekingsgevoeligheid, zoals verwacht, afhankelijk is van het gekozen trilblok. Afhankelijk van de haalbaarheid van het type trilblok kan worden bepaald welke per situatie het beste toepasbaar is met betrekking tot de taludstabiliteit. In dit geval zal het type ICE 36 rf het best toepasbaar zijn, aangezien deze minder snel verweking zal doen laten optreden en uit eerder haalbaarheidsanalyses is gebleken dat dit type de inheidiepte kan bereiken. De overige types komen niet in aanmerking aangezien deze of te licht zijn of gewoonweg te veel trillingen opwekken tijdens de werkzaamheden.



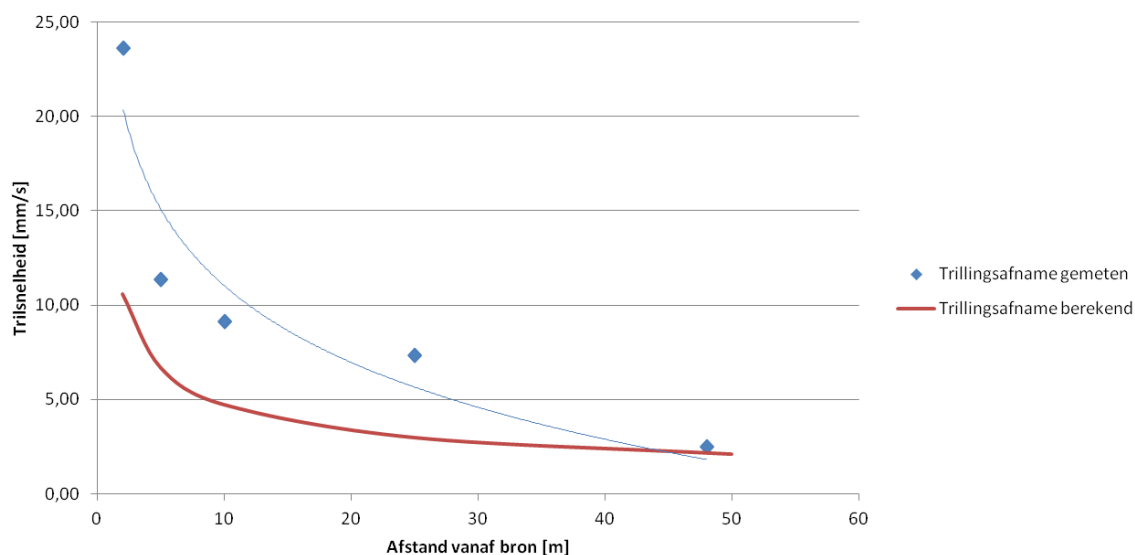
3.11 Terugkoppeling naar proefuitkomsten OpenIJ

Na het voltooien van de berekeningen zijn de uitkomsten vergeleken met de uitkomsten van de praktijkproeven. Hieruit viel te concluderen dat de rekenmethode vaak niet overeen komen met de realiteit. In de grafiek hieronder zijn zowel de berekende als de gemeten trillingsafname weergegeven. Wat opvalt is dat de gemeten waardes veel hoger liggen dan de berekende. Ook bij het bepalen van het wel of niet vloeïngen zouden er volgens de berekeningen enkele zettingsvloeiingen moeten optreden terwijl dit in praktijk niet heeft plaatsgevonden. Wel gaven de rekenmethode een goede indicatie van de meest gevoelige lagen. Met de verschillende methodieken waren de zandlagen waarvan al bekend was dat deze het meest gevoeligst waren, ook in de berekeningen het meest kwetsbaar zijn voor het vloeien.

Het verschil tussen gemeten trillingsafname en de berekende trillingsafname kan worden verklaard doordat er bij de berekeningen geen rekening wordt gehouden met de grondparameters. Doordat er bij OpenIJ er alleen maar losse gronden aanwezig zijn kan er van te voren al worden voorspeld dat de trillingen groter zullen zijn dan normaal. Bij het berekenen wordt hier dus geen rekening mee gehouden en gaat men van een normaal gepakte grondlaag uit.

De afwijking in het wel of niet vloeïen bij de berekeningen en de realiteit kan worden verklaard door een tekortkoming in de berekeningen. In deze wordt er niet gekeken naar de geometrie van het talud. Het is bekend dat er enkel zettingsvloeiingen op zullen treden wanneer het talud ongunstig genoeg is. Uit de dwarsdoorsneden van OpenIJ blijkt dat de hellingen redelijk flauw zijn. Dit zou dus als verklaring kunnen worden gezien waarom er in realiteit geen zettingsvloeiingen zijn opgetreden terwijl deze volgens de berekeningen wel zouden ontstaan.

Afname trillingen; gemeten vs berekend



Figuur 27: Trillingsafname berekend en gemeten



4. CONCLUSIE

4.1 Vooronderzoek zettingsvloeiingen

Uit het vooronderzoek is gebleken dat voor het ontstaan van zettingsvloeiingen enkele specifieke grondeigenschappen noodzakelijk zijn. Ten eerste zullen zettingsvloeiingen alleen ontstaan in zandlagen. Klei of veen houdende grondlagen zullen niet gevoelig zijn voor het verweken vanwege de structuur van deze grondsoorten. Doordat de structuren van het klei en veen dicht gepakt zijn en een hogere cohesie bevatten, zullen de gronddeeltjes minder snel in beweging komen tijdens de trilwerkzaamheden en zal door deze cohesie de onderlinge samenhang worden behouden. Zand bestaat uit een veel korreligere opbouw wat sneller in beweging kan komen. Verder is ook gebleken dat hoe losser het zand gepakt is, hoe groter de kans op verweken zal zijn. Dit komt doordat bij deze los gepakte lagen, de korrels makkelijker in beweging zullen komen en de onderlinge spanning minder is. Wanneer deze korrels in beweging komen zal het water weggedrukt worden. Als het water onvoldoende tijd heeft om weg te stromen zal de waterspanning toenemen, dit is het geval bij hoge frequenties. Een hogere waterspanning betekend een lagere korrelspanning. In de gevoelige lagen komen de korrels zodanig los van elkaar dat er sprake is van gedeeltelijke of zelfs volledige verweking.

4.2 Berekeningsmethodiek zettingsvloeiingen

4.2.1 Idriss & Boulanger

De berekeningen laten zien dat de verwekingsgevoeligheid van de grondlagen sterk afhankelijk is van de conusweerstand, korrelspanning en waterspanning. Bij het OpenIJ zijn zeer losgepakte zanden aanwezig welke, zoals voorspeld, een hoge verwekingsgevoeligheid hebben door een lage conusweerstand in combinatie met de aanwezige waterspanning. Uit de berekeningen blijkt dat over het algemeen geldt dat de aanwezige schelphoudende – en aanvulzanden zullen gaan verweken tot ongeveer 10 meter van de bron (buispaal). Dit was al deels voorspelt, daarom kan nu door middel van deze uitkomsten worden geconcludeerd dat de uitspraken juist waren.

4.2.2 Robertson(2009)

Voorafgaand aan de berekeningen is door VolkerInfraDesign al het een en ander uitgesproken over de mogelijke kans op verweking. Deze uitspraken zijn gebaseerd op eerder voorvallen van zettingsvloeiingen nabij de sluizen in IJmuiden. In het document 'Vooronderzoek zettingsvloeiingen' wordt toegelicht waar deze zettingsvloeiingen hebben plaatsgevonden. Zij konden al deels vaststellen dat de natuurlijke ondergrond een gevoelige laag bevat tussen -6m en -12m NAP (Spisulazanden). Deze laag is erg variabel. De aanvulzanden zijn afkomstig van de bouw van de Midden- en Noordersluis. Tijdens deze werkzaamheden zijn de bouwputten opgevuld met aanvulzand wat deels onverdicht is. Hierdoor is deze laag erg los gepakt waardoor de korrelspanning vrij laag is. De uitkomsten van de berekeningen laten duidelijk zien dat deze uitspraken juist zijn. Tussen -6 en -12 meter NAP is inderdaad een laag van spisulazand aanwezig welke een hoge waarschijnlijkheid heeft tot verweken. Onder deze laag is echter nog een laag spisulazand aanwezig, deze is minder schelphoudend maar wordt ook gezien als verwekingsgevoelige laag. Deze laag reikt ongeveer tot -17 meter NAP.

4.2.3 Toepassing van de berekeningsmethodieken op het ontwerp

Met de verschillende rekenmethodieken kan onder andere het invloedsgebied van de trillingen worden bepaald. Door een voorspelling te kunnen maken van hoe ver de trillingen invloed hebben ten opzichten van de afstand van de bron kan het ontwerp (de afmeervoorziening) zodanig geplaatst worden dat er tijdens de uitvoering geen trillingen in het talud zullen ontstaan. Hiermee kan bij het kiezen van de locatie voor de afmeervoorziening de kans op het ontstaan van zettingsvloeiingen worden verkleind.



4.2.4 Validatie

Om te kunnen aantonen dat de verschillende berekeningsmethodieken overeenkomen met de praktijk moeten deze worden gevalideerd. Daarom zijn de uitkomsten van de berekeningen met elkaar vergeleken. Hierbij zijn de twee berekeningsmethodieken, Idriss & Boulanger en Robertson(2009), met elkaar vergeleken. Ook is met behulp van de relatieve dichtheid een benadering gedaan van de verwekingsgevoeligheid. Tot slot is via Boskalis een uitwerking vrijgegeven van de state parameter van de grondlagen, deze zijn meegenomen in de vergelijking. In de onderstaande tabel zijn de uitkomsten van de vier methodieken van grondopbouw DKMP09 weergegeven. De vier methodieken geven dezelfde mate van verwekingsgevoeligheid aan. Alleen de zandlagen worden hier in meegenomen.

Grondlaag	Ψ Robertson(2009)	Ψ Boskalis	Relatieve dichtheid	Idriss Boulanger
Antropogeen / ophoogzanden en/of stortzanden (los gepakt).	-0.185047734	-0,221	71%	1.18
Dekzanden, fijne tot matig fijne zanden	-0.204035813	-0.224	79%	2.19
Strand- en vooroeverzanden: matig fijn zand met schelpfragmenten	-0.196958106	-0.237	75%	1.29
Spisulazand 1	-0.106863835	-0,117	32%	0.45
Spisulazand 2	-0.105475101	-0,045	34%	0.48
Dekzanden, fijne tot matig fijne zanden	-0.1288344	-0,114	47%	0.57
Formatie van Bostel, matig fijne zanden	-0.126131359	N.V.D.	43%	0.52

Met daarin:

Robertson (2009)	: State parameter	[-]
Boskalis	: State parameter	[-]
Idriss&Boulanger	: Veiligheid tegen verweking	[FSliq]

4.3 Data analyse

4.3.1 OpenIJ

Uit de meetgegevens van OpenIJ valt op dat zowel de trilsnelheden als de waterspanningen snel en hoog oplopen tijdens het trilproces. Tijdens het heien bereiken deze metingen veel minder hoge waarden. Gekeken naar de trillingsafname over de afstand vanaf de bron is te zien dat deze exponentieel afneemt en dat bij het laatste meetpunt (50 meter afstand) de trillingen zo goed als 0 zijn. Tijdens de proeven zijn er geen benoemingswaardige zettingsvloeiingen opgetreden terwijl de trillingen hoog genoeg zouden moeten zijn. De reden dat deze zettingvloeiingen niet hebben plaats gevonden is omdat het talud in het proefgebied niet steil genoeg was voor het zand om naar beneden te vloeien.

4.3.2 Calandkanaal

Bij het vergelijken van de gegevens van het Calandkanaal met OpenIJ valt op dat de maximum waterspanningen en trilsnelheden bij Caland veel lager liggen dan bij OpenIJ. Dit wordt verklaart door het verschil in grondopbouw. Bij Caland zijn veel klei lagen en kleiige zanden aanwezig. Zoals bekend zijn deze een stuk minder trillingsgevoelig dan de zandlagen bij OpenIJ. Dit resulteert dus ook in veel lager uitkomende trilsnelheden en waterspanningen.

4.4 Ontwerp

Voor het ontwerp zijn eerste de belastingen conform NEN-EN 1993-1-1 bepaald. Hiervoor zijn de aanvaarbelastingen, de troskrachten en de afmeerenergie bepaald. Vervolgens zijn conform NEN-EN 1993-1-8+C2:2011 en NEN-EN 1993-5:2008 de berekeningen uitgevoerd om de spanningen in het ontwerp te berekenen. Hierna zijn de unity checks uitgevoerd waaruit bleek dat het ontwerp voldoet en toepasbaar is voor het aangewezen gebied.



5. AANBEVELINGEN

5.1 Validatie berekeningsmethodieken

5.1.1 Praktijkproeven en veldmetingen

Om een nauwkeurigere uitspraak te kunnen doen met betrekking tot proefuitkomsten, kan gekozen worden om nogmaals proeven en metingen uit te voeren waarbij stalen buispalen de grond in worden gebracht door middel van trillen en/of heien. De uitkomsten hiervan kunnen weer vergeleken worden met de uitkomsten van het OpenIJ en Calandkanaal wat automatisch leidt tot een beter inzicht in de verschillen tussen de geometrie van het talud en de bijbehorende parameters van de aanwezige grondlagen.

5.1.2 Methode Been & Jefferies

De methode van Been and Jefferies is nog een variant waarmee de state parameter van de aanwezige grondlagen kan worden bepaald. Ook de uitkomsten van deze methode zullen aantonen of de laag dilatant gedrag zal vertonen of niet. Echter is hier van belang dat er zowel voor de werkzaamheden als er na gesondeerd wordt om het verschil in poriëngehalte te vergelijken. Er zijn zandsoorten waarvan het poriëngehalte voor en na de sondering al bekend zijn, echter is dit lang niet voor alle soorten zo en daarom zal deze methode niet zo zeer geschikt zijn om vooraf het gedrag van de ondergrond te bepalen. Deze methode kan dus wel worden gebruikt ter validatie van de reeds uitgevoerde methodiek volgens Robertson(2009) om zo beter aan te kunnen tonen dat deze benadering juist is.

5.1.3 Bepalen van de grenswaardes van de geometrie

Met behulp van methode Robertson(2009) kan de state parameter worden bepaald per aanwezige zandlaag. Echter wordt hier geen specifiek talud aan toegekend, maar alleen gemeten conusweerstanden en wrijvingsgetallen uit sonderingen. De geometrie speelt een zeer belangrijke rol bij het wel of niet optreden van zettingsvloeiingen, daarom wordt aanbevolen om hier een combinatie in te maken zodat er gerichter kan worden berekend. Dit geldt ook voor de methode Idriss & Boulanger. Met deze methode kan je wel een zekere afstand tot verweking bepalen, echter wordt er niks gedaan met taludsteilheid of laagdiktes. Deze zijn met behulp van tekeningen wel in te schatten, maar dit kan nog nauwkeuriger. Door middel van het uitvoeren van proeven waarbij een talud in fases wordt afgegraven, kan per grondsoort worden bepaald wat de grenswaardes tegen afschuiving zijn. Hiermee kunnen de randvoorwaardes voor zettingsvloeiing worden aangescherpt.

5.1.4 Veiligheidsfactor op de verwekingsgevoeligheid (FSliq)

De praktijkproeven en metingen aan het OpenIJ hebben laten blijken dat verweking nauwelijks is opgetreden, hooguit tot 2 meter afstand van de buispaal. Uit de berekeningen volgens Idriss & Boulanger is weer gebleken dat verweking tot 10 meter wel degelijk zal optreden in de verwekingsgevoelige lagen. Er wordt aangeraden om met behulp van meerdere metingen en berekeningen van andere sonderingen te kijken of er een veiligheidsfactor aanwezig is welke de uitkomsten meer overeen kunnen laten komen met de werkelijkheid.

De versnellingen in de ondergrond zullen in werkelijkheid anders zijn dan de berekende waardes aangezien er aan de extreem losse zandlagen geen dempingsconstante wordt toegekend en deze daarom als een reguliere zandlaag wordt gezien. Er wordt wel een dempingsconstante toegekend aan een bepaalde grondopbouw, maar dit is zeer globaal genomen. Hier zal ook een zeker verschil in uitkomsten in zitten aangezien de trillingen in losgepakte zandlagen zich beter kunnen voortplanten en daarmee brengt het automatisch hogere versnellingen met zich mee. Er wordt aanbevolen om uit te zoeken in hoeverre de trillingen worden gedempt in de losgepakte zandlagen.



5.1.5 Stabiliteitsanalyse met behulp van D-Geostability

Als vervolg op de berekeningsmethodiek van Idriss & Boulanger, kan door middel van een stabiliteitsanalyse een nog betere benadering worden gedaan van de werkelijkheid. Door middel van de veiligheid tegen verweking (FSliq) kan een indicatie worden gekregen van de wateroverspanningen met behulp van een empirische relatie volgens Marcuson and Hynes* (Niet behandeld). Deze wateroverspanningen kunnen dan als reductiefactor aan de sterkteparameters in D-Geostability worden toegekend om zo de realiteit na te bootsen. Hieruit is dan beter op te maken wat de optredende trillingen doen met de stabiliteit van het talud.

**Marcuson, W.F. III, Hynes, M.E. and Franklin, A.G., Evaluation and use of residual strength in seismic safety analysis of embankments, earthquake spectra, Vol. 6(3), pp. 529-572, 1990.*

5.2 Optimalisatie uitvoering dukdalf

5.2.1 Toepassing trilbloktype

In dit onderzoek is gekeken naar de effecten op mogelijk optredende zettingsvloeiingen. Veelal wordt op basis van ervaringen een keuze gemaakt voor het type tril- en/of heiblok. Wanneer dit nauwkeuriger wordt bepaald kunnen de effecten worden geminimaliseerd. Zo kan een intrilanalyse worden uitgevoerd met computersoftware, bijvoorbeeld GRLWEAP, waarbij het verloop van een schokgolf door een paal – als gevolg van de impact van het trilblok – wordt geanalyseerd en zo een gedetailleerde inschatting kan worden gemaakt van de intrilbaarheid. Als dit voor een aantal trilblokken wordt uitgevoerd kunnen deze worden toegepast in de methode Idriss & Boulanger om zo te kijken welke de minste impact op de omgeving zal geven. Dit geldt overigens ook voor het heien. Hierin is duidelijk geworden dat de verwekingsgevoeligheid sterk afhankelijk is van het gekozen trilblok. Afhankelijk van de haalbaarheid van het type trilblok kan worden bepaald welke per situatie het beste toepasbaar is met betrekking tot de taludstabiliteit. Om hier een optimalisatie in te kunnen doen wordt aanbevolen om vooraf nauwkeurig te bepalen welk type trilblok toepasbaar is op de situatie.

5.2.2 Signalering en interventie waardes

Wateroverspanning speelt een hele grote rol bij het optreden van zettingsvloeiingen, wanneer deze een zekere waarde bereiken kan het talud haar stabiliteit verliezen. Voorafgaand aan de werkzaamheden kan een voorspelling worden gedaan van de optredende wateroverspanningen, maar deze zullen nooit overeenkomen met de werkelijkheid. Om hier de veiligheid te waarborgen wordt aanbevolen om zogeheten signalering en interventie waardes toe te kennen tijdens de werkzaamheden. Dit betekent dat er tijdens de uitvoering constante monitoring plaatsvindt waardoor de wateroverspanning altijd kan worden gemeten.

Het concept van signaal- en interventiewaardes werkt op gelijke wijze als verkeerslichten: Er is sprake van groen, oranje en rood, waarbij groen en oranje worden gescheiden door de signaalwaarde: zodra die wordt bereikt moet rekening worden gehouden met stoppen, er wordt overgeschakeld op een verhoogde staat van paraatheid / alertheid. Bij bereiken van de interventiewaarde moet acuut worden gestopt. Zodra deze waardes dusdanig zijn gezakt kunnen de werkzaamheden weer worden hervat.



6. TERUGKOPPELING DEEL- EN HOOFDVRAAG

In dit hoofdstuk wordt er een terugkoppeling gemaakt naar de deelvragen en hoofdvraag zoals deze zijn opgesteld voorafgaand aan het onderzoek.

6.1 Deelvragen

Wat zijn de effecten van trillingen die veroorzaakt worden bij het aanbrengen van funderingselementen op verschillende diepten en afstanden van de bron (taluds van Spisula- en aanvulzanden)?

Beantwoording uit document '*Vooronderzoek zettingsvloeiingen*'.

Door de trillingen in de grond zullen de zanddelen zich van elkaar gaan afzetten. Hierdoor zal er volume vergroting plaatsvinden waarmee de vergrote poriën opgevuld zullen worden met water. Door dit vergroten van het volume neemt de onderlinge spanning tussen de zandkorrels af waardoor de korrelspanning lager zal worden terwijl de waterspanning juist toeneemt. Naarmate de onderlinge spanning van de korrels dusdanig laag is zal het zandpakket zich vloeibaar gaan gedragen en vervolgens, wanneer deze onder een helling aanwezig is, gaan vloeien.

Hoe ontstaan zettingsvloeiingen?

Beantwoording uit document '*Vooronderzoek zettingsvloeiingen*'.

Zettingsvloeiing is een mechanisme waarbij zand in een onderwatertalud spontaan vervloeit en vervolgens over een grote afstand verplaatst kan worden. Met als gevolg vaak boven water zichtbare komvormige inscharingen in de oever met veelal grote schade als gevolg. Door een specifieke opbouw van de ondergrond kunnen zettingsvloeiingen op natuurlijke wijze plaatsvinden. Aanleiding hiervan is vrijwel altijd het steiler of hoger worden van het onderwatertalud ten gevolge van erosie aan de teen of sedimentatie. Daarnaast kunnen zettingsvloeiingen ook ontstaan door invloeden van buitenaf zoals trillingen in de ondergrond.

Welke eigenschappen zijn van belang voor het verloop van trillingen?

Beantwoording uit document '*Data analyse praktijkproeven OpenIJ en Calandkanaal*' en '*Berekeningsmethodiek zettingsvloeiingen*'.

Het verloop van optredende trillingen tijdens de werkzaamheden is afhankelijk van zowel het type tril- en/of heiblok als de eigenschappen van de nabij gelegen grond. Bij de berekeningen van het trilblok wordt gerekend met de slagkracht (kN) en de frequentie (Hz) van het blok. Voor het heiblok geldt dat de frequentie (Hz) en de afkomstige energie (kNm) bepalend zijn voor de optredende trillingen. In het document '*Data analyse praktijkproeven OpenIJ en Calandkanaal*' en '*Berekeningsmethodiek zettingsvloeiingen*' staan de trillingen uitgezet tegen de afstand in grafieken. Hier wordt dieper ingegaan op het bepalen van de trillingen.

Naast het materieel zijn ook de grondeigenschappen van belang tijdens het verloop van trillingen. In de losgepakte zandlagen zullen de trillingen zich beter kunnen voortplanten dan in bijvoorbeeld klei- en veenlagen. Dit heeft dan automatisch als gevolg dat zettingsvloeiing bij losse zanden eerder zal optreden.

Hoe kan de gevoeligheid voor zettingsvloeiingen binnen een bepaald gebied worden bepaald?

Beantwoording uit document '*Berekeningsmethodiek zettingsvloeiingen*'.

Met behulp van methode Robertson(2009) kan de verwekingsgevoeligheid worden bepaald aan de hand van de state parameter. De waarden van de state parameter per zandlaag geven de gevoeligheid voor verweking aan.

Ontwerp afmeervoorziening voorhavendam IJmuiden
Eindrapport

Met behulp van methode Idriss & Robertson kan de veiligheid tegen verweking (FSliq) worden bepaald. De veiligheid tegen verweking is gedefinieerd als het quotiënt van de cyclic resistance ratio en de cyclic stress ratio. Ook uit deze uitkomsten kan worden bepaald wat de verwekingsgevoeligheid is per zandlaag.

Wat is de impact afkomstig van het afmeren van schepen op een afmeervoorziening?

Beantwoording uit document '*Ontwerpdokument dukdalf*'.

Tijdens het afmeren van schepen op een afmeervoorziening, in dit geval een dukdalf, worden er krachten op de constructie overgebracht. Deze krachten zijn afhankelijk van de grootte van het schip, de snelheid van het schip en de hoek waarin het schip aan komt varen. Op het moment van aanvaren zal de dukdalf een zekere belasting moeten opnemen. Aangezien de stalen buispaal een maximale vervorming toe zal laten, neemt de fenderconstructie ook een groot deel van de belasting op. Deze optredende belastingen zijn berekend en staan nader toegelicht in document '*Ontwerpdokument dukdalf*'.

Welke troskrachten komen er op een afmeervoorziening te staan?

Beantwoording uit document '*Ontwerpdokument dukdalf*'.

Schepen liggen d.m.v. trossen vast aan de afmeervoorziening tijdens de wachtperiode. Deze trossen worden vastgemaakt aan de bovenzijde van de dukdalf aan een zogeheten kopbolder. De troskrachten zijn afhankelijk van de waterverplaatsing van het schip. Deze waterverplaatsing wordt bepaald aan de hand van de afmetingen van het schip. De stroming, golf en windbelasting die op het schip werken, zorgen voor het afdrijven van het schip en daarmee ontstaat deze kracht. De grootte van deze trosbelasting wordt bepaald aan de hand van tabel 3.2 uit CUR 116.

Hoe kan de uitvoeringsmethode worden geoptimaliseerd?

Beantwoording uit document '*Berekeningsmethodiek zettingsvloeiingen*' en hoofdstuk 5.2. *Optimalisatie uitvoering dukdalf*.

Wanneer met veel nauwkeurigheid wordt bepaald welk trilbloktype het beste kan worden toegepast bij bepaalde werkzaamheden, kan met behulp van de rekenmethode Idriss & Boulanger een betere indicatie worden gegeven van de verwekingsgevoeligheid. Hiernaast kan ook constante monitoring worden toegepast waarbij de wateroverspanning altijd kan worden gemeten. Zodra hier zogeheten signalerings- en interventie waarden aan toe worden gekend tijdens de werkzaamheden kan de veiligheid worden gewaarborgd.

6.2 Hoofdvraag

De hoofdvraag luidt:

“Wat zijn de effecten van het aanbrengen van stalen afmeervoorzieningen op de omgeving en hoe kunnen deze in de toekomst worden gekwantificeerd in de ontwerpfase?”

Tijdens het aanbrengen van stalen afmeervoorziening met behulp van een tril- of heiblok, ontstaan trillingen in de ondergrond. Deze optredende trillingen zorgen voor een volumevergroting van de grondlagen waardoor holle ruimtes tussen de deeltjes ontstaan. Deze holle ruimtes kunnen zich vullen met water, wat leidt tot een spanningsverlaging tussen de zanddeeltjes wat uiteindelijk kan leiden tot verweking van de zandlagen. Verweking kan optreden mits er aan bepaalde voorwaarden wordt voldaan, zoals: minimale laagdiktes, taludsteilheid en niet-klei/veenhoudend materiaal. De verwekingsgevoeligheid van de zandlagen kunnen met behulp van diverse berekeningsmethodieken worden bepaald, namelijk door middel van Idriss & Boulanger en de state parameter volgens Robertson (2009).



7. EVALUATIE EN REFLECTIE

Dit hoofdstuk omvat een reflectie en evaluatie van de afgelopen afstudeerperiode. Hierin wordt teruggekoppeld naar de vooraf vastgestelde verwachtingen in het plan van aanpak, of deze zijn aangehouden en of dat hier van af is gegaan. Verder worden eventuele complicaties tijdens het onderzoek vermeld en toegelicht hoe hier mee om is gegaan.

7.1 Terugkoppeling naar plan van aanpak

De doelstellingen die vooraf zijn opgesteld in het plan van aanpak zijn nagenoeg allemaal voltooid. Tijdens het onderzoek is er wel het een en ander veranderd en/of aangepast. De volgende aspecten zijn gedurende het onderzoek gewijzigd:

- Alternatieve verbinding tussen kopstuk- en paalverbinding niet behandeld;
- De optredende plooi tijdens hijswerkzaamheden is niet behandeld;
- De fenderconstructie en de kopbolder zijn helemaal berekend inclusief las- en boutverbindingen en ontwerptekeningen;
- Validatie berekeningsmethodieken voor zettingsvloeiing mbv relatieve dichtheid en state parameter volgens Boskalis;
- Vergelijking van verkregen data tussen OpenIJ en Calandkanaal

Wat betreft de planning, is het merendeel gelopen zoals verwacht. De berekeningen van de scheepskrachten, dimensionering van de buispaal zijn volgens planning goed verlopen. Dit geldt ook voor het voorlopig en definitief ontwerp. Wel zijn er complicaties geweest welke het onderzoek wat vertraagt hebben, namelijk:

- Het verwerken van de praktijkproeven is een aantal weken uitgelopen door het laat ontvangen van de meetgegevens.

Dit heeft geen directe invloed gehad op het eindresultaat, echter hadden wij hier graag gezien dat dit anders was gelopen. De verlating heeft alleen invloed gehad op het behalen van de mijlpalen die beschreven staan in het plan van aanpak. de planning is hierdoor wat om gegooid.

- Aflezen van sonderingen

Tijdens dit onderzoek zijn er een hoop verschillende waardes bepaald aan de hand van verkregen sonderingen. Het juist aflezen van die waardes blijft lastig en deze moeten voor elke sondering hetzelfde worden gedaan. Er wordt aanbevolen om uit te zoeken op welke manier hier het beste mee om kan worden gegaan om er zo zeker van te zijn dat de juiste waardes voor de conusweerstand en de wrijvingsgetallen worden gehanteerd in de berekeningen.

7.2 Individuele reflectie

Door het invullen van het competentieformulier wordt schriftelijk aangetoond door de afstudeerders dat zij aan de competenties hebben gewerkt en voldoen. De competentieformulieren zijn terug te vinden in Bijlage 7 'Competentieverantwoording'.



8. VERKLARENDE WOORDENLIJST

Term	Definitie
Afmeervoorziening	Aanlegplaats voor schepen
Afmeerhoek	De hoek waaronder een schip komt aan varen wanneer deze gaat afmeren
Afschuiven	Het verschijnsel waarbij de weerstand tegen het tegengaan van het glijvlak in het talud en de grond afneemt
Antropogeen zand	ophoogzanden en/of stortzanden (los gepakt)
Anisotroop	Materiaaleigenschappen zijn niet in alle richtingen gelijk
Atmosferische druk	Luchtdruk onder normale omstandigheden
Axiaal	In de richting van de as
Bezwijk mechanismen	Manier van bezwijken van een dijk of andere constructie
Bolder	Onderdeel van een dukdalf waar schip zich aan kan vastleggen
Bronsterkte	Maximale sterkte van de trillingen thv de bron
Bresvloeiing	Het proces waarbij door baggerwerkzaamheden een talud dusdanig steil wordt dat dit talud onstabiel wordt met vloeiingen als gevolg.
Buigend moment	Het moment dat optreedt ten behoeven van het buigen door de belasting op de constructie.
Buigsterkte	De kracht die nodig is om het voorwerp een bepaalde afstand te laten vervormen in de richting lood recht op zijn lange as.
Buispaal	Holle stalen buis
Coating	Een laag die door spuiten, gieten of verven kan worden aangebracht, bedoeld om het materiaal te beschermen en weerstand te bieden tegen verschillende milieus
Cohesie	De wederzijdse aantrekking tussen de fijne gronddeeltjes, waardoor deze bij elkaar worden gehouden tot een vaste massa
Correlatie	Manier waarop twee dingen met elkaar samenhangen
Conusweerstand	De weerstand die de kop van de conus ondervindt tijdens het uitvoeren van een sondering
Dekzand	Fijn tot matig fijne zandsort
Dilatant	Toenemen van volume
D-sheet piling	Modellerings software voor damwanden/palen
Dukdalf	Afmeervoorziening voor schepen
Dwarsdoorsnede	Een doorsnede in de dwarsrichting
Dwarskracht	Een kracht die dwars op het materiaal werkt
Dwarsprofiel	Denkbeeldige doorsnede van een constructie met een verticaal vlak, loodrecht op de as.
Eigenfrequentie	Een van de frequenties waarmee een systeem zal gaan trillen als het vanuit een evenwichtspositie wordt bewogen en vervolgens wordt losgelaten.
Eigen gewicht	Het gewicht dat de constructie van zichzelf heeft.
Empirische relatie	Gebaseerd op veldonderzoek/experimenten
Erosie	Afslijting door wind en/of water
Fender	Stootkussen of stootwiel
Formatie van Bontel	Matig fijne zanden
Formatie van Drenthe	Eem klei en keileem
Frequentie	Aantal keren per tijdseenheid
Gecorrigeerde conusweerstand	Aangepaste conusweerstand voor het berekenen van bepaalde grondeigenschappen



Term	Definitie
Gecorrigeerd wrijvingsgetal	Aangepast wrijvingsgetal voor het berekenen van bepaalde grondeigenschappen
Grondopbouw	Opbouw van verschillende grondlagen
Grondwater	Al het water dat zich in de verzadigde zone van het bodemoppervlak bevindt en direct contact maakt met de bodem of ondergrond.
Humeus	Organisch
Inscharing	Afbrokkelen van een oever door bijvoorbeeld zettingsvloeiingen
Inheidiepte	Afstand van de bodem tot onderkant de ingebrachte paal
In situ	Ter plaatsen, in het werk zelf
Iteratie	Berekeningsmethode waarbij een algoritme herhaald wordt toegepast
Invloedsgebied	Het gebied tot waar een trilling in zowel de grond als lucht invloed heeft en eventuele schade zou aan kunnen richten
Invoerparameters	Parameters die ingevoerd dienen te worden voor het te kunnen betrekken van modellen
Isotroop	Materiaaleigenschappen in alle richtingen gelijk
Kwispeleffect	Verplaatsing onderkant ingebrachte paal
Korrelspanning	De spanning die uitsluitend door de korrels wordt verdragen
Lengteprofielen	De verticale doorsnede in lengterichting van de figuur
Maaiveld	Het grondniveau, vaak aangegeven ten opzichten van het nationale nulniveau in een land
Maximale horizontale versnellingen	De maximale waarde voor de verandering van de snelheid in horizontale richting
Magnitude	Mate van vrijkomende energie bij aardbevingen
Normaalkracht	De kracht die loodrecht op het vlak van een doorsnede werkt
Ondoorlatende laag	Een ondoorlatende laag is een grondlaag waar het grondwater zeer moeizaam en langzaam verticaal stroomt, een kleilaag is een voorbeeld van een ondoorlatende laag.
Ontgrondingkuilen	Door erosie ontstane gaten in de bodem nabij waterbouwkundige constructies
Ontwerpschip	Referentie schip waar mee gerekend wordt
Overgangslaag:	zand/klei, veendetritus, gelaagd
Permanente belastingen	Blijvende belasting, bijv: Eigen gewicht
Plastisch vervormen	Permanente vervorming, blijvend
Poriëngehalte	Volume tussen zandkorrels
Raai	Een denkbeeldige lijn dwars op een rivier of dijk
Relatieve dichtheid	Waarde voor de verdichtingsmaat van een bepaalde grondsoort
Resonantie	Weerkaatsen van trillingen waardoor deze worden versterkt
Sedimentatie	Aanzanding door wind en/of water
Silt	Sediment dat qua grootte tussen lutum en zand wordt ingedeeld
Spisulazand	Schelphoudende zandsoort
S355H	Type constructiestaal



Term	Definitie
Schuifspanningsweerstand	Een weerstand die ontstaat doordat twee objecten langs elkaar willen schuiven
Schuifweerstand	De weerstand die optreedt in een afschuifvlak.
Statische belasting	Een mechanische belasting die de constructie niet in beweging brengt
Stijve constructie	Een constructie die bij een belasting geen waarneembare vervormingen laat zien
Talud	Het schuine vlak van een dijk of het schuine vlak langs een weg of watergang
Taludstabiliteit	De stabiliteit van een talud
Trekkracht	Een kracht die zodanig op het materiaal werkt dat de kracht het materiaal wil uitrekken.
Trillingsintensiteit	De mate van voorkomen van trillingen
Trillingsnelheid	De snelheid van voortplanting van trillingen
Trosbelasting	Belasting afkomstig van trossen van schepen
Waterspanning	Spanning door optredende waterdruk
Wateronderspanning	Afname van waterspanning
Wateroverspanning	Toename van waterspanning
Waterverplaatsing	Het verplaatste water door de boeg van een schip
Windbelasting	Belasting op een constructie door de kracht van de wind
Wrijvingsgetal	Het quotiënt van de plaatselijke wrijving en de conusweerstand, uitgedrukt in een percentage
Uiterste grenstoestand	Berekenen onder extreme omstandigheden
Veendetritus	Veen met organisch materiaal
Verweken	Het verzadigd raken van grond door water, voorbeeld hiervan is het ontstaan van drijfzand bij een verzadiging van zandgrond.
Volumiek gewicht	De hoeveelheid massa van een stof per eenheid van volume
X70	Type constructiestaal
Zettingsvloeiing	Bezwijkmechanisme waarbij zand zich plots vloeibaar gedraagt.

Ontwerp afmeervoorziening voorhavendam IJmuiden
Eindrapport**9. FIGURENLIJST**

Figuur 1: Mogelijk verloop van zettingsvloeiing	4
Figuur 2 Inscharingslengte	5
Figuur 3 Inscharing Hooidijk	5
Figuur 4: Schematisering van een trilblok en de opstelling van het intrillen.....	6
Figuur 5: Proefopstelling OpenIJ	7
Figuur 6: Proefopstelling Caland	8
Figuur 7: Proefopstelling intrillen buispaal1 09-03-16	8
Figuur 8: Uitkomst intrillen buispaal 2.....	9
Figuur 9: Trillingsafname tijdens uitvoering intrillen buispaal 2	10
Figuur 10: Vergelijking trilsnelheden Caland & OpenIJ.....	11
Figuur 11: Vergelijking trillingsafname Caland & OpenIJ	11
Figuur 12: Locaties sonderingen	13
Figuur 13: Trillingssnelheden PVE2350 - IHC S120	15
Figuur 14: Maximale versnellingen PVE2350 - IHC S120.....	15
Figuur 15: FSliq Voorhavendam trillen	17
Figuur 16: Qt-Fr chart	19
Figuur 17: Qt-Fr chart SBT	20
Figuur 19: SBT zones	20
Figuur 19: Ic, DKMP09 (VID)	21
Figuur 20: 3D illustratie afmeervoorziening	25
Figuur 21: Dukdalf overzicht.....	27
Figuur 22: Plattegrond sonderingen Voorhavendam IJmuiden	28
Figuur 23: Situatieschets D-sheet	32
Figuur 24: ACAD tekeningen fenderconstructie	33
Figuur 25: ACAD tekeningen kopbolder	34
Figuur 26: 'gevaarzone' DKMP09.....	35
Figuur 27: Trillingsafname berekend en gemeten	37

Ontwerp afmeervoorziening voorhavendam IJmuiden
Eindrapport**10. TABELLENLIJST**

Tabel 1: Maximale waarde per meetpunt	9
Tabel 2: Aanpak analyse Idriss & Boulanger	12
Tabel 3: Locatie vs. sondering	13
Tabel 4: Aanwezige grondsoorten OpenIJ	13
Tabel 5: FSliq Voorhavendam trillen	17
Tabel 6: Vergelijking uitkomsten Idriss & Boulanger	18
Tabel 7: Grondopbouw DKMP09	21
Tabel 8: Categorie gedragstype index Ic	21
Tabel 9: Ic categorisering per grondlaag	22
Tabel 10: Zettingsvloeiing-gevoelige lagen volgens Robertson (sondering DKMP09)	22
Tabel 11: Vergelijking uitkomsten Idriss & Boulanger en Robertson	23
Tabel 12: Vergelijking uitkomsten meest verwekinggevoelige lagen	23
Tabel 13: Vergelijking van de verschillende methodes	24
Tabel 14: Vergelijking volgorde van meest verwekinggevoeligheid volgens de verschillende methodes	24
Tabel 15: Vergelijking uitkomsten Robertson & Boskalis	24
Tabel 16: Vergelijking volgorde van meest verwekinggevoeligheid volgens Robertson & Boskalis	24
Tabel 17: Scheepsafmetingen	26
Tabel 18: Ontwerpwaterstanden geleidewerken	27
Tabel 19: Bodemprofiel 1 Voorhavendam	28
Tabel 20: Soortelijk gewicht staal	29
Tabel 21: Karakteristieke waardes van de bolderkrachten voor zeeschepen	30
Tabel 22: FSliq voor x=10	35
Tabel 23: Eigenschappen trilblokken	36
Tabel 24: Bepaling trilsnelheid op 10 meter afstand per zandsoort en trilblok	36



11. BIBLIOGRAFIE

- [1] I.M. Idriss & R.W. Boulanger, CPT and SPT based liquefaction triggering procedures, 2014;
- [2] Scott M. Olson and Timothy D. Stark, Liquefied strength ratio from liquefaction flow failure case histories, 2002;
- [3] P.K. Robertson, Estimating in-situ state parameter and friction angle in sandy soils from CPT, 2010;
- [4] Deltarers, Aardbevingsbestendigheid kades noordzijde Eemskanaal 'Beoordeling van toetsing en ontwerp, inclusief indicatie van benodigde aanpassing', 2014;
- [5] dr.ir. P. Meijers, Deltares, Effecten aardbevingen op kritische infrastructuur 'Verwekingstudie', 2014;
- [6] Trelleborg marine system, fender systems;
- [7] Delft cluster, Oeverstabiliteit bij verdieping waterbodems , september 2009
- [8] Wiertsema & Partners, Geotechnische stabiliteitsanalyse uitbreiding zandwinning Vos te Ellertshaar, september 2012;
- [9] Rijkswaterstaat, Handreiking toetsen Voorland Zettingsvloeiing t.b.v. het opstellen van het beheerdersoordeel (BO) in de verlengde derde toetsronde, oktober 2012;
- [10] Arnold Verruijt, Technische Universiteit Delft , GRONDMECHANICA, 2001;
- [11] dr.ir. P. Meijers, Deltares Effect dichtheid zandaanvulling op geotechnische parameters bij tunnel Swalmen en Roermond, 2002;
- [12] Vakblad Geotechniek, verdichten van zand voor boortunnels Randstadrail, jaargang 15, nummer 3,juli 2011;
- [13] Märta Lidén, Ground Vibrations due to Vibratory Sheet Pile Driving_MsC, 2012;
- [14] P. Meijers, Settlement during vibratory sheet piling, 2007;