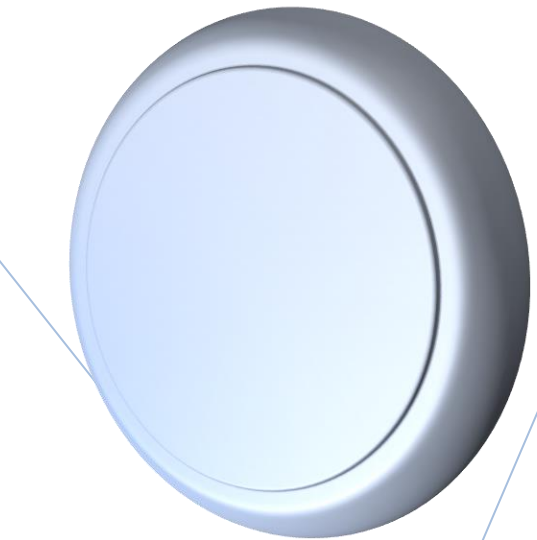


Afwatering piekberging Haarlemmermeer

Beste wijze van afwatering door middel van
een afvoerkanaal

Ruben Baars & Roel Brouwer

2-5-2018



HOGESCHOOL VAN HALL LARENSTEIN

Larensteinselaan 26a
6882 CT Velp

Postbus 9001
6880 GB Velp
Nederland

T (026) 369 56 95
E info@hvhl.nl
W <https://www.hvhl.nl>

HOOGHEEMRAADSCHAP VAN RIJNLAND

Archimedesweg 1
6826 CC Arnhem

Postbus 156
2300 AD Leiden
Nederland

T (071) 306 30 63
E post@rijnland.net
F (071) 512 39 16
W <https://www.rijnland.net>

Titel document:

Beste wijze van de afwatering
piekberging Haarlemmermeer

Ondertitel:

Ontwerp afvoerkanaal

Status:

Concept

Versie:

3.0

Datum:

7 juni 2018

Auteurs:

R. Baars

R. Brouwer

Onderwijsinstelling:

Hogeschool van Hall Larenstein

Onderwijsbegeleider

D. Assendorp

Bedrijf:

Hoogheemraadschap van Rijnland

Bedrijfsbegeleider:

J. Offermans

Datum

17 mei 2018

Voorwoord

Voor u ligt de scriptie “beste wijze van afwatering van de piekberging Haarlemmermeer”. Het onderzoek voor deze scriptie naar de beste wijze van afwatering van de piekberging is uitgevoerd bij het Hoogheemraadschap van Rijnland. Deze scriptie is geschreven in het kader van de afstudeerstage van Roel Brouwer en Ruben Baars, studenten aan de opleiding Land- en watermanagement aan de Hogeschool van Hall Larenstein en in opdracht van het stagebedrijf Hoogheemraadschap van Rijnland. Van februari 2018 tot en met juni 2018 zijn wij bezig geweest met het onderzoek en het schrijven van deze scriptie.

Met behulp van onze afstudeerbegeleider, Johan Offermans, hebben wij de onderzoeksvraag voor deze scriptie bedacht. Door de vele randvoorwaarden is het een complex vraagstuk. Na uitvoerig kwalitatief onderzoek en gesprekken met vakdeskundigen hebben wij de onderzoeksvraag kunnen beantwoorden. Tijdens dit onderzoek stonden Johan Offermans en Dan Assendorp altijd voor ons klaar. Zij hebben ons in goede banen door de procedure van het afstuderen heen geholpen, zowel inhoudelijk als procesmatig.

Bij dezen willen wij graag onze begeleiders bedanken voor de fijne samenwerking en hun ondersteuning tijdens het afstudeertraject. Daarnaast gaat onze dank uit naar de vakdeskundigen voor de effectieve inhoudelijke gesprekken. Dit zijn Arnoud van de Lockant, Arthur Balsters, Jan Jelle Reitsma, Ismail Gozuberk, Jelle Biesma, Sanne Leeuwenburgh en Albert Mulder.

Tot slot willen wij onze dank uiten naar het gehele IPM-team van het Hoogheemraadschap van Rijnland voor de fijne samenwerking. Met het team hebben wij vaak op effectieve wijze kunnen sparren.

Door de omvang en de complexiteit van onze afstudeeropdracht en de fijne samenwerking hebben wij het afgelopen half jaar met veel plezier gewerkt bij het Hoogheemraadschap van Rijnland.

Wij wensen u veel leesplezier toe.

Roel Brouwer
Ruben Baars

Leiden, 16 mei 2018

Samenvatting

Om in de toekomst beter bestand te zijn tegen langere en hevige regenbuien wil het Hoogheemraadschap Rijnland in de zuidwestelijke hoek van de Haarlemmermeerpolder een piekberging realiseren. Veel aspecten van de piekberging zijn uitgewerkt, echter is nog weinig aandacht besteed aan hoe de piekberging geleezd moet worden. Het is vereist dat de piekberging tussen 2 en 5 dagen geleezd is. Ook is het gewenst dat de watersnelheid beperkt wordt tot 0,3 m/s. Daarnaast mag geen opbarsting plaatsvinden als gevolg van het afgraven van het afvoerkanaal, moet erosie voorkomen worden en moet de stabiliteit van de kades gewaarborgd blijven.

Het water in de Haarlemmermeerpolder wordt met behulp van vier gemalen het boezemstelsel in gepompt. Deze gemalen houden het polderpeil op constante hoogte. Het waterpeil rondom de piekberging wordt gehandhaafd op ongeveer -6 m NAP. Vanwege de ligging van de piekberging is het gemaal de Leeghwater belangrijk omdat dit gemaal erg dichtbij ligt.

Voordat de piekberging geleezd mag worden, moet eerst het watersysteem op peil zijn gebracht. Vervolgens zou de uitlaat open kunnen worden gezet en kan het water de polder in stromen. Deze stroming mag niet opnieuw zorgen voor een peilstijging in de polder. Als de piekberging in twee dagen wordt geleezd, dan is een peilstijging niet te voorkomen. Tevens zal het afwateren van de piekberging in twee dagen enkel zorgen voor een verhoogde watersnelheid van 0,2 m/s in de Hoofdvaart.

Een te snelle leging van de piekberging kan instabiliteit van de kades tot gevolg hebben en daarmee afschuiving veroorzaken. Op basis van modellen en berekeningen blijkt dit voor de kades van de piekberging niet het geval te zijn. De macrostabiliteit van de kades voldoet bij de situatie waarbij de piekberging theoretisch binnen één seconde zou legen. Deskundigen vanuit Hoogheemraadschap van Rijnland adviseren echter een maximale waterstandsaling van één meter per dag in verband met microstabiliteit.

De benodigde bodem- en oeverbescherming kan variëren op basis van het debiet vanuit de piekberging. Bij hogere watersnelheden zal meer bodembescherming nodig zijn en sterkere oeverbescherming.

Op de locatie van het afvoerkanaal is een hoog risico op opbarsting. Als het afvoerkanaal wordt uitgegraven wordt te veel neerwaartsedruk verwijderd en zal opbarsting plaatsvinden. Na het realiseren van het afvoerkanaal zal het risico van opbarsting aanwezig blijven. Opbarsting-voorkomende maatregelen zijn hierdoor vereist.

Voor het vinden van een optimale wijze van afwateren zijn varianten gecreëerd en afgewogen. Hieronder valt een variant met een betonnen bak, een variant met meer natuurlijke waarde, een variant waarbij de afwatering plaats vindt met behulp van hevels en een variant met opgehoogde oevers.

Door de varianten te toetsen aan verschillende criteria met behulp van een Multicriteria-analyse blijkt dat de betonnen bak variant de meest optimale wijze van afwatering van de piekberging Haarlemmermeer is. Dit omdat de betonnen bak variant het hoogst scoort op de som van de gestelde criteria.

Inhoudsopgave

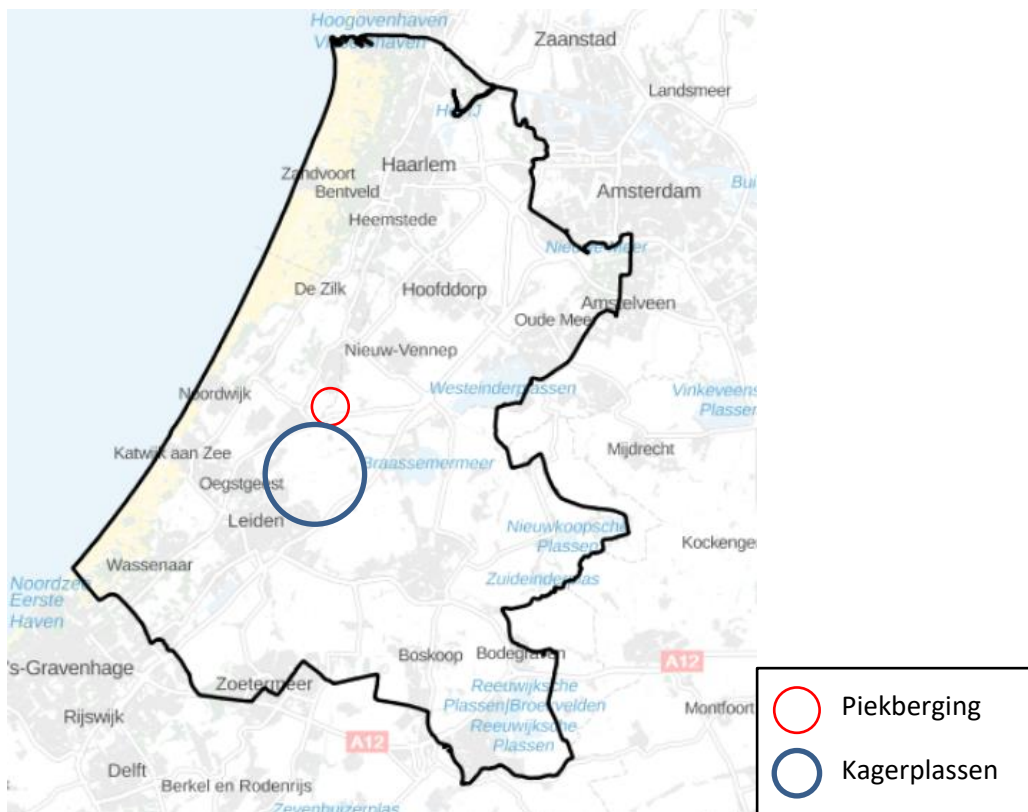
1. Inleiding	6
1.1 Aanleiding.....	6
1.2 Probleembeschrijving	6
1.3 Doel	8
1.4 Hoofd- en deelvragen	8
1.5 Methode	9
1.6 Leeswijzer	11
2. Hydrologische systeemanalyse	12
2.1 Het Rijnlandse watersysteem.....	13
2.2 Watersysteem Haarlemmermeerpolder	14
2.3 Watersysteem Haarlemmermeerpolder in combinatie met piekberging.....	15
3. Minimaal afwateringsdebiet	17
3.1 SOBEK model	17
3.2 Randvoorwaarde	18
3.3 Resultaten.....	19
3.4 Doorlaten.....	21
3.5 Deelconclusie.....	22
4. Maximale waterstandsdeling	23
4.1 Modelleren waterspanningen	24
4.2 D – Geostability	26
4.2.1 Invoerparameters grondsoorten.....	26
4.2.2 Stijghoogtelijnen en belasting	27
4.3 bepalen stabiliteitsfactor.....	27
4.4 D-Geostability model.....	29
4.5 Deelconclusie.....	30
5. Bodem- en oeverbescherming	31
5.1 Bodembescherming.....	31
5.1.1 Afvoerkanaal watert loodrecht af op Hoofdvaart.....	32
5.1.2 Afvoerkanaal watert af op Hoofdvaart onder een hoek	36
5.2 Oeverbescherming	37
5.3 Deelconclusie.....	39
6. Opbarsting afvoerkanaal	40
6.1 Huidige situatie.....	40
6.2 Bouwfase	41
6.3 Rustfase	42
6.4 Opbarsting-voorkomende maatregelen	43
6.5 Deelconclusie.....	44
7. Ontwerp varianten	45
7.1 Betonnen bak variant	45
7.2 Natuurlijke variant.....	48
7.3 Hevel variant	50
7.4 Taludwerkendevariant	53
8. Multicriteria-analyse	55
8.1 Criteria	55

8.2 Wegingsfactoren	56
8.3 Criteria beoordeling.....	57
8.4 Resultaten.....	59
9. Conclusie	60
10. Discussie en aanbeveling.....	61
Nawoord	62
Bibliografie	63
Bijlagen	64
Bijlage 1: Stroomschema, afvoerkanaal watert loodrecht af op Hoofdvaart	64
Bijlage 2: Stroomschema, afvoerkanaal watert in een hoek van 45° af op Hoofdvaart	65
Bijlage 3: Kaart met sonderingen	66
Bijlage 4: Kaart met sonderingen	67
Bijlage 5: Sondering DKM48	68
Bijlage 6: Excel sheet opbarsting met taludwerking	69

1. Inleiding

1.1 Aanleiding

Door de klimaatverandering en de daarbij horende intensere regenbuien, heeft het Hoogheemraadschap van Rijnland te maken met een toenemend risico op wateroverlast. Dit risico bevindt zich in het centrale deel van het Rijnlandse gebied. Met name voor de Kagerplassen omdat deze plassen het verst verwijderd liggen van de vier boezemgemalen die het Rijnlandse gebied leegpompen. Door de combinatie van de verre afstand van de Kagerplassen tot de gemalen en de intensievere piekbuien, kunnen hoge waterstanden ontstaan waarbij de kans bestaat dat watergangen overlopen of boezemkades doorbreken. Om de waterveiligheid te waarborgen is het plan ontstaan om in de zuidelijke punt van de Haarlemmermeerpolder een piekbergingsgebied te realiseren die een mitigerend effect heeft op de hoge waterstanden, zie figuur 1 (Rijnland, sd).



Figuur 1: Locatie Kagerplassen en piekberging Haarlemmermeer

1.2 Probleembeschrijving

Door het vergrote risico op de wateroverlast in het centrale deel van Hoogheemraadschap Rijnland, wordt in de zuidpunt van de Haarlemmermeerpolder een piekberging gerealiseerd. De diepe ligging in de polder betekent dat een kans op opbarsting (een proces waarbij water onder hoge druk door deklaag wordt gedrukt met als gevolg dat deze openbarst) aanwezig is.

De piekberging Haarlemmermeer dient geleegd te worden door middel van een uitlaatsysteem. Om waterveiligheid te waarborgen, tijdens en na de realisatie, zijn vier randvoorwaarden opgesteld door het Hoogheemraadschap van Rijnland waar het uitlaatsysteem aan moet voldoen. Deze randvoorwaarden zijn:

- De piekberging dient afgewaterd te zijn binnen 5 dagen
- De kades dienen, tijdens het afwateren, stabiel te blijven
- Er mag geen opbarsting van de ondergrond plaatsvinden tijdens en na de bouwphase van de uitlaat
- Het water in de Hoofdvaart mag niet buiten zijn oevers treden als gevolg van de afwatering van de piekberging

Het watersysteem dat in de huidige situatie aanwezig is, kan invloed hebben op het functioneren van de toekomstige piekberging. Om een optimale wijze van afwatering voor de piekberging te vinden, moet bekend zijn welke aspecten mee zouden kunnen spelen in de rol van het legen van de piekberging. Hierbij is het belangrijk hoe het watersysteem van de Haarlemmermeerpolder zou kunnen reageren op de piekberging zelf.

De piekberging in de Haarlemmermeerpolder is bedoeld om water op te vangen bij een regenbui die eens in de 15 jaar voor komt ($T=15$ bui). Er is een reële kans dat een $T=15$ bui vlak achterelkaar voorkomt. Hiervoor is het belangrijk dat de piekberging zo snel mogelijk geleegd wordt. Hierbij is gesteld dat de piekberging 5 dagen na de start van het legen, leeg moet zijn en klaar staat om een volgende bui op te vangen.

Daarnaast dient het water dat afgewaterd wordt op de Hoofdvaart vanuit de piekberging binnen de oevers te blijven om waterschade te voorkomen. Door de afwatering van de piekberging dienen de poldergemalen in de Haarlemmermeer niet overbelast te raken.

Een te snelle leging van de piekberging kan zorgen voor instabiele kades. Dit dient ten alle tijde voorkomen te worden.

Het Hoogheemraadschap van Rijnland hanteert een maximale watersnelheid van 0,3m/s in de watergangen die zij beheren. Door het legen van de piekberging stroomt 1.000.000m³ water de Haarlemmermeerpolder in. Dit kan resulteren in verhoogde stroomsnelheden. Het is van belang dat de afwatering van de piekberging niet resulteert in een situatie waarbij de maximale watersnelheid wordt overschreden. Er is nog weinig bekend over het uitlaatsysteem waardoor het water vanuit de piekberging moet afwateren. Ook zijn de effecten van het afwateren zelf nog niet bekend.

De bodem en oever van de Hoofdvaart dient beschermd te worden tegen afkalving door middel van bodem- en oeverbescherming. Het achterwege laten van de oeverbescherming kan, bij hoge watersnelheden, op den duur zorgen voor erosie. Het is vereist dat het eroderen van de bodem en de oevers voorkomen wordt.

De piekberging wordt aangelegd in een laaggelegen polder. In de polder is sprake van een sterk risico op opbarsting. Op de locatie waar het afvoerkanaal verwezenlijkt zal worden, blijkt het opbarstingsgevaar het hoogste te zijn. Het is vereist dat er geen opbarsting zal voorkomen bij het realiseren van het afvoerkanaal.

1.3 Doel

Het doel van dit afstudeeronderzoek is om een goed ontwerp voor de afwatering van de piekberging Haarlemmermeer te maken die binnen 5 dagen afwatert op de Hoofdvaart. Hierbij dient voldaan te worden aan de bovengenoemde geotechnische en hydrologische randvoorwaarden.

1.4 Hoofd- en deelvragen

Hoofdvraag:

Wat is de beste wijze om de piekberging Haarlemmermeer af te laten wateren op de Hoofdvaart door middel van een uitlaatsysteem binnen de geotechnische en hydrologische randvoorwaarden?

Deelvragen:

1. Hoe ziet het hydrologische systeem van de Haarlemmermeerpolder eruit in combinatie met de piekberging Haarlemmermeer?
2. Uitgaande van een afwatering van de piekberging binnen vijf dagen, wat is dan het minimale debiet van het uitlaatsysteem?
3. Wat is het maximale debiet van de afwatering van de piekberging Haarlemmermeer waarbij de stabiliteit van de kades rondom de piekberging gewaarborgd blijft?
4. Bij welke uitstroombelasting en in welke mate is bodem- en oeverbescherming nodig ter hoogte het uitlaatsysteem van de piekberging?
5. Wat zijn de maximale dimensies van een droge bouwput zonder dat opbarsting plaatsvindt tijdens de bouwphase van de uitlaat en wat zijn opbarsting-voorkomende maatregelen?
6. Welke uitlaatsysteemvarianten zijn mogelijk om de piekberging Haarlemmermeer af te laten wateren rekening houdend met de geotechnische en hydrologische randvoorwaarden?

1.5 Methode

Om tot het beoogde resultaat te komen en de hoofdvraag te kunnen beantwoorden, is het nodig om eerst de deelvragen te beantwoorden en daarmee de geotechnische en hydrologische randvoorwaarden in beeld te krijgen.

1. Oriëntatie

Watersysteemanalyse

Ten eerste zal worden onderzocht hoe het watersysteem van het Haarlemmermeer functioneert in combinatie met de piekberging Haarlemmermeer. Om deze situatie in beeld te krijgen zal een hydrologisch systeem analyse worden uitgevoerd. Dit zal door middel van een bureaustudie worden bereikt.

- In kaart brengen van huidige watergangen
- Inzicht krijgen in de waterstanden, stroomrichtingen en stroomsnelheden
- Inventariseren capaciteit gemalen
- Overzichtskaarten ter verduidelijking van het watersysteem van de Haarlemmermeerpolder
- Verduidelijking van het hydrologisch watersysteem in de Haarlemmermeerpolder

2. Onderzoek randvoorwaarde

Hydrologisch onderzoek

Ten tweede zal worden onderzocht wat het minimale debiet is om de piekberging van Haarlemmermeer binnen 5 dagen te laten afwateren in de Hoofdvaart door middel van een uitlaatsysteem. Hiervoor zal gebruik worden gemaakt van hydrologische modellen in SOBEK en zal door middel van een bureaustudie worden uitgevoerd.

- Verkrijgen van hydrologische gegevens en modellen van de Haarlemmermeerpolder met de piekberging
- Testen van afwatering onder verschillende debieten en capaciteiten van de gemalen
- Vinden minimale afwateringsdebiet

Geohydrologisch onderzoek

Ten derde zal worden bepaald wat het maximale debiet van de afwatering van de piekberging Haarlemmermeer is waarbij de stabiliteit van de kades rondom de piekberging gewaarborgd blijven. Er zullen door middel van geotechnisch onderzoek modellen worden getest in het programma D-Geo stability zodat de maximale afwateringssnelheid van de piekberging kan worden bepaald. Hiervoor zal gebruik worden gemaakt van bureau- en literatuurstudie.

- Verkrijgen of ontwerpen model dat overeenkomt met de aan te leggen kade
- Testen van model onder gedraineerde en ongedraineerde toestand
- Vinden van kritiek punt waarbij instabiliteit ontstaat

Geomorfologisch onderzoek

Ten vierde is het van belang om te weten onder welke omstandigheden bodem- en oeverbescherming nodig is. Er zal worden geanalyseerd of en in welke mate bodems en oevers eroderen in bepaalde situaties. Hiervoor zal een geomorfologisch onderzoek worden uitgevoerd door middel van een bureau- en literatuurstudie.

- Bodem- en oeversamenstelling inventariseren op hoogte van de mogelijke uitlaat constructies
- Onderzoeken onder welke omstandigheden bodems en oevers beginnen met eroderen

Variantenstudie

Vervolgens zullen mogelijk uitlaatsysteemvarianten worden ontworpen die mogelijk zijn om de piekberging Haarlemmermeer af te laten wateren in de Hoofdvaart rekening houdend met de geotechnische en hydrologische voorwaarde. Tijdens dit proces zal een variantenstudie worden uitgevoerd waarbij de resultaten per variatie worden berekend.

- Opstellen en ontwerpen uitlaatsysteemvarianten
- Testen varianten in SOBEK
- Documenteren resultaten per variant

Geotechnisch onderzoek

Als vijfde wordt bepaald wat de maximale dimensies van een droge bouwput zijn zonder dat opbarsting plaatsvindt tijdens de bouwphase van de uitlaat. Hiervoor zal een geotechnisch onderzoek worden uitgevoerd waaruit de opbarsting randvoorwaarde voor de locatie rondom de te plaatsen uitlaat bepaald kunnen worden. Dit onderzoek zal door middel van een bureau- en literatuurstudie worden uitgevoerd.

- Onderzoeken bodemsamenstelling op locatie van te plaatsen uitlaatconstructies
- Achterhalen parameters desbetreffende bodem
- Uitvoeren calculatie opbarstberekening
- Bepalen eventuele verticale keerwanden door middel van D-Settlement, rekening houdend met het opbarstingsniveau

3. Afweging varianten

Multicriteria-analyse

Om tot slot de vraag te beantwoorden wat de beste wijze is om de piekberging Haarlemmermeer af te laten wateren op de Hoofdvaart door middel van een uitlaatsysteem binnen de geotechnische en hydrologische randvoorwaarden, worden de resultaten van de deelvragen samengevoegd. Op basis van een Multicriteria-analyse (MCA) worden scores toegekend aan de varianten op basis van de randvoorwaarde. Hieruit zal een optimale variant blijken die verkozen zal worden om als beste wijze de piekberging Haarlemmermeer te laten afwateren.

- Samenvoegen onderzochte randvoorwaarden
- Toekennen scores aan randvoorwaarden
- Opstellen scoretabel van de varianten
- Vaststellen optimale variant op basis van toegekende scores
- Concluderen en beschrijven van hoogst gescoorde variant

1.6 Leeswijzer

In dit rapport worden de resultaten weergegeven over het afwateren van de piekberging. In het eerste hoofdstuk wordt de aanleiding gepresenteerd. Vervolgens wordt in het tweede hoofdstuk het hydrologische systeem weergegeven. In het derde hoofdstuk wordt ingegaan op de effecten van verschillende afwateringsdebieten. In het vierde hoofdstuk wordt maximale afwateringsdebiet op basis van de kades toegelicht. Vervolgens wordt in het vijfde hoofdstuk de nadruk gelegd op de bodem- en oeverbescherming. Het zesde hoofdstuk is toegewijd aan de opbarsting problematiek in het afvoerkanaal. Op basis van de verzamelde gegevens worden in hoofdstuk zeven varianten ontworpen. In hoofdstuk acht wordt een Multicriteria-analyse uitgevoerd op de varianten. In hoofdstuk negen is de conclusie beschreven. Tenslotte wordt in hoofdstuk tien ingegaan op de discussie en de aanbevelingen.

2. Hydrologische systeemanalyse

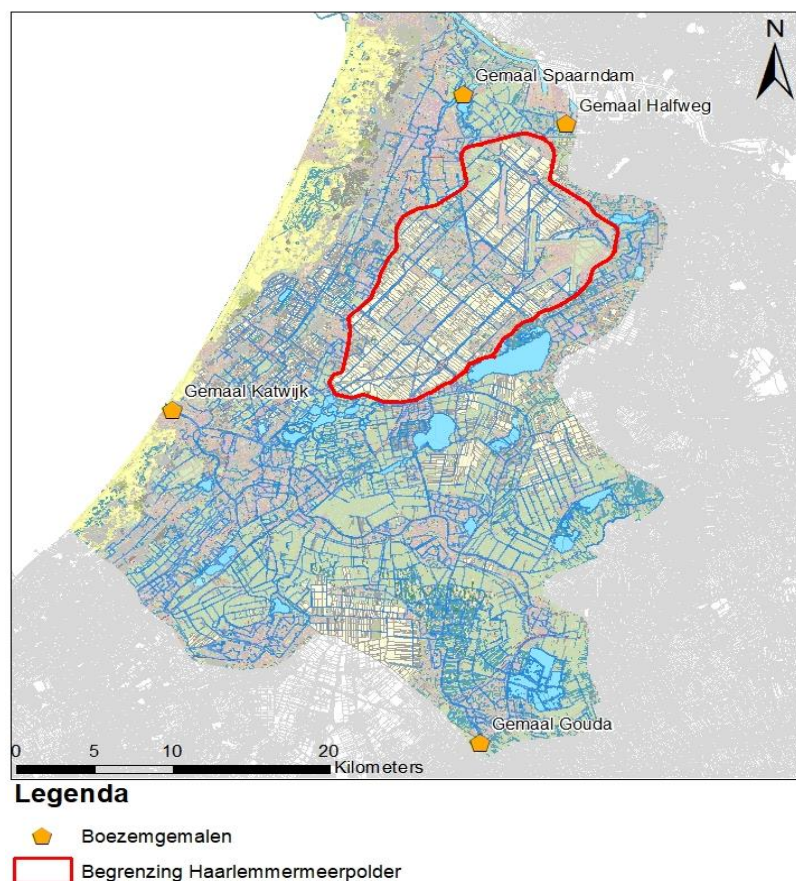
Om een duidelijk beeld te krijgen hoe het water in de Haarlemmermeerpolder in combinatie met de piekberging wordt afgevoerd, wordt in dit hoofdstuk een hydrologische systeemanalyse gemaakt. In de hydrologische systeemanalyse staat vermeld hoe het watersysteem binnen Rijnland afwatert op de buitenwateren.

Het watersysteem van Rijnland moet, met oog op de piekberging, op drie schaalniveaus worden bekeken. Hierbij wordt als eerste gekeken naar het Rijnlandse watersysteem, waar deze afwatert en op welke manier dit gebeurt. Vervolgens wordt het watersysteem van de Haarlemmermeerpolder bekeken dat zich binnen het watersysteem van Rijnland bevindt. Tot slot wordt het watersysteem van Haarlemmermeerpolder in combinatie met de piekberging beschouwd. Deze drie schaalniveaus zijn van belang om helder te hebben aangezien de piekberging afwatert op de Hoofdvaart, gelegen in de Haarlemmermeerpolder, die op zijn beurt weer afwatert in het boezemstelsel. In dit hoofdstuk wordt een steeds verfijndere hydrologische systeem analyse gemaakt. De rood omlijnde locaties in de figuren 2 en 3 geven respectievelijk de locaties weer van de Haarlemmermeerpolder en van de piekberging.

De schaalniveaus ter verduidelijking, zijn:

- Het Rijnlandse watersysteem
- Watersysteem Haarlemmermeerpolder
- Watersysteem Haarlemmermeerpolder in combinatie met de piekberging

Watersysteem Rijnland



Figuur 2: Watersysteem van het Hoogheemraadschap van Rijnland

2.1 Het Rijnlandse watersysteem

Aanvoer

In figuur 2 is het boezemstelsel van Rijnland te zien. Het boezemstelsel wordt gevoed door het water uit 204 verschillende polders. Het polderwater watert af op het boezemstelsel. Dit gebeurt met 809 poldergemalen. Het boezemstelsel heeft een oppervlak van 5216 ha en bevat 1208 km aan regionale kering (Rijnland, sd).

In tijden van droogte is het mogelijk om het boezemstelsel te vullen met water uit de Hollandse IJssel. Boezemgemaal Gouda (gelegen in de zuidpunt van het Rijnlandse gebied) heeft de mogelijkheid om het water vanuit het buitenwater, het gebied van Rijnland in te pompen.

Peilen

In het Rijnlandse gebied worden in totaal 747 peilen gehandhaafd. Echter zijn deze peilen onder te verdelen in drie categorieën:

- Polderpeil
- Tussenpeil
- Boezempeil

In het boezemstelsel wordt logischerwijs het boezempeil gehandhaafd. Echter is het waterpeil in de boezem is niet altijd hetzelfde. Deze peilfluctuatie heeft te maken met de regenintensiteit in het Rijnlandse gebied en met het zomer- en winterpeil. Dat het water geen vast peil heeft, wil niet zeggen dat niet gestreefd wordt naar een bepaald peil. Dit peil noemt men ook wel het streef- of boezempeil. In het boezemstelsel worden twee peilen gehandhaafd: het zomer- en winterpeil.

- Winterpeil: -0,64 m NAP
- Zomerpeil: -0,61m MAP

Afvoer

Het afwateren van het boezemstelsel gebeurt door middel van vier boezemgemalen. In tabel 1 hieronder zijn de gemalen, afwateringslocatie en het debiet overzichtelijk weergegeven (Nederlandse Gemalen Stichting, sd).

Boezemgemaal	Watert af op	Debiet in m ³ per minuut
Katwijk	Noordzee	5640
Spaarndam	Noordzeekanaal	1890
Halfweg	Noordzeekanaal	1980
Gouda	Hollandsche IJssel	2400

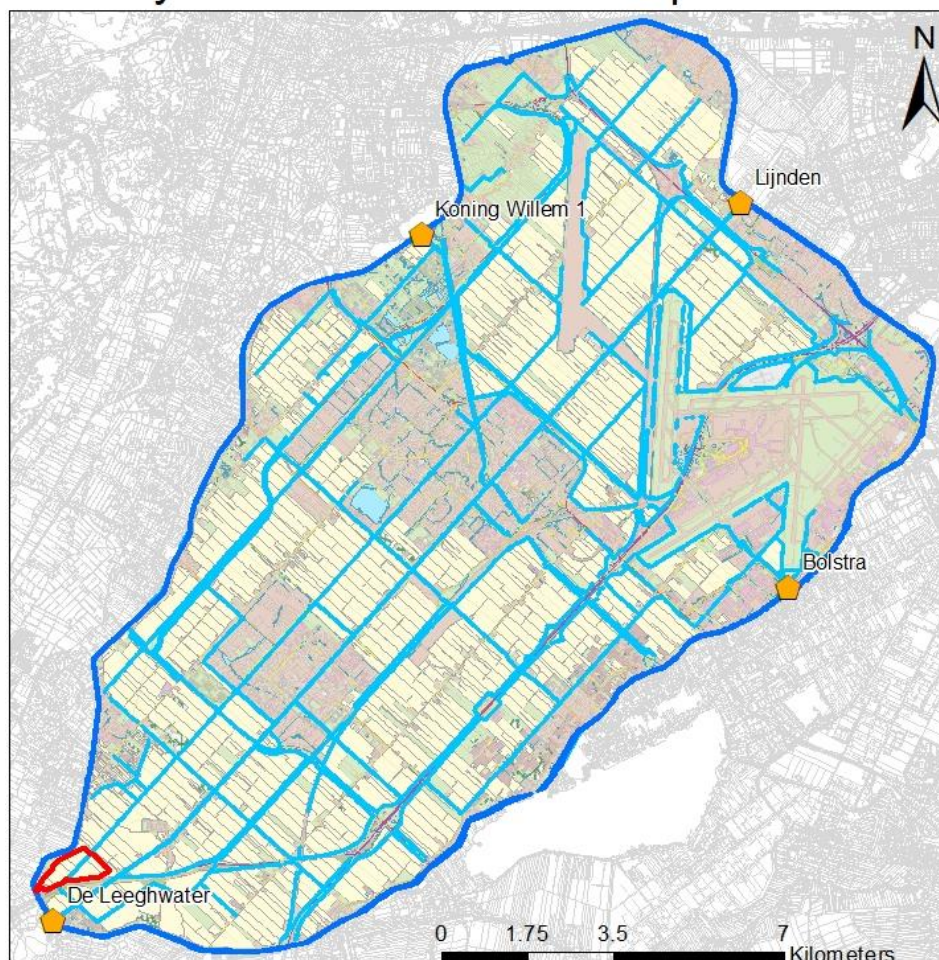
Tabel 1: Overzicht boezemgemalen van het Hoogheemraadschap van Rijnland

2.2 Watersysteem Haarlemmermeerpolder

Het hydrologisch stelsel van de Haarlemmermeerpolder heeft zich door de jaren heen ontwikkeld als een ingewikkeld watersysteem. In de Haarlemmermeerpolder zijn 45 poldergemalen te vinden die gezamenlijk 42 peilgebieden beheersen. Van deze 45 poldergemalen zijn 4 belangrijke gemalen die zorgen dat de polder droog blijft (Albrecht). Dit zijn de gemalen: De Leeghwater, De Lijnden, Koning Willem 1 en Bolsta. Deze vier gemalen pompen het water van de polder naar de boezem. Het grootste gedeelte van het water afkomstig uit de Haarlemmermeerpolder is onder normale omstandig relatief zout. Het heeft de voorkeur om het zoute water af te laten stromen richting het Noordzeekanaal. Dit komt omdat het water richting het gemaal van Gouda zoet is. Het heeft de voorkeur om hier niet onnodig brakig/zout water aan toe te voegen. Om deze reden wordt het over het algemeen geprefereerd om eerst de noordelijke poldergemalen aan te zetten.

Wanneer het peil hoog genoeg is, activeren de gemalen. Als eerst zal het gemaal De Lijnden in gebruik worden genomen. Vervolgens wordt het gemaal Koning Willem 1 ingezet. Als laatste wordt het gemaal De Leeghwater geactiveerd. Het gemaal Bolsta is een gemaal dat niet in connectie staat met de drie andere gemalen en kan dus niet helpen met het leegpompen van een groot gedeelte van de Haarlemmermeerpolder. Dit gemaal is echter wel verantwoordelijk voor het drooghouden van de peilgebieden in de buurt van Schiphol (Biesma, Informatie watersysteem, 2018).

Watersysteem Haarlemmermeerpolder



Legenda

- | | |
|---|---|
| Begrenzing piekberging Haarlemmermeer | Polderwater |
| ⬠ Poldergemalen | Boezemwater |

Figuur 3: Watersysteem Haarlemmermeer

Aanvoer

Het water dat zich in het watersysteem van de Haarlemmermeerpolder bevindt, is afkomstig van enkele bronnen. Eén van deze bronnen is kwelwater (dat onder andere afkomstig is van oude afzettingen en een verbinding heeft met zee, vandaar het braklig/zoute water). Een andere bron van het water in de Haarlemmermeerpolder is afkomstig van neerslag. De laatste bron van water is afkomstig van agrariërs die water van de ringvaart benutten om hun percelen te bewateren. Deze percelen ontwateren vervolgens op het watersysteem van de Haarlemmermeerpolder.

Afvoer

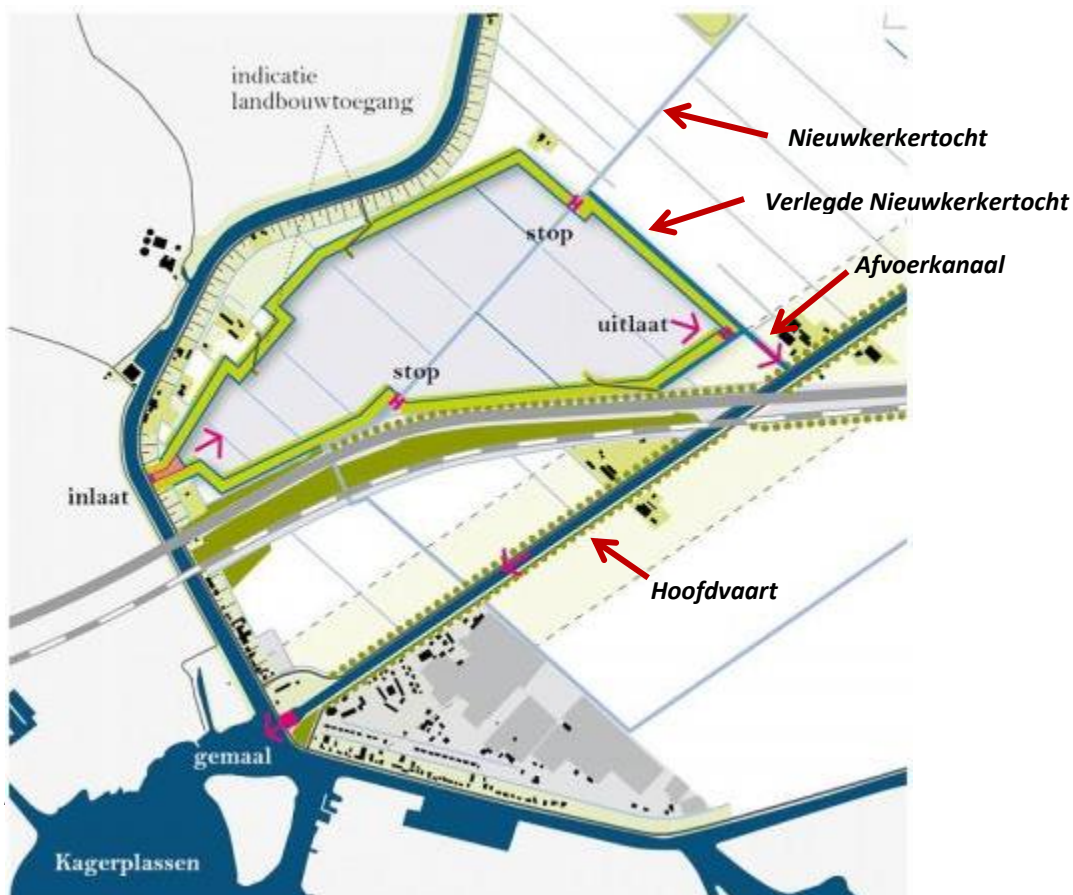
De Haarlemmerpolder watert af, door middel van vier poldergemalen, op het boezemstelsel van Rijnland. Deze vier poldergemalen zijn: De Leeghwater, De Lijnden, Koning Willem 1, Bolsta (Nederlandse Gemalen Stichting, sd). Zie tabel 2 voor de pompcapaciteit per gemaal en waar deze op af watert.

Poldergemaal	Watert af op	Debiet m ³ /minuut
Lijnden	Ringvaart	850
Koning Willem 1	Ringvaart	600
De Leeghwater	Ringvaart	625
Bolsta	Ringvaart	120

Tabel 2: Overzicht hoofdpoldergemalen in de Haarlemmermeerpolder

2.3 Watersysteem Haarlemmermeerpolder in combinatie met piekberging

In figuur 4 is het ontwerp van de piekberging Haarlemmermeer weergegeven. De piekberging is ontworpen in de zuidelijke punt van de Haarlemmermeerpolder, zie figuur 3. De reden hiervoor zijn om in tijden van hoogwater het boezemstelsel van Rijnland te ontlasten en door de diepe ligging van het maaiveld.



Figuur 4: Bovenaanzicht ontwerp piekberging Haarlemmermeer

De piekberging vult zich door middel van een inlaatsysteem. De inlaat staat in verbinding met de ringvaart, die deel uitmaakt van het boezemstelsel. De piekberging is gedimensioneerd op een T=15 bui. Dit betekent dat de piekberging gemiddeld eens in de vijftien jaar in gebruik genomen wordt.

Peilen

De waterstand in de gevulde piekberging is NAP -2,40 m. De bodem van de waterberging bevindt zich gemiddeld op NAP -4,50 m. Dit betekent dat 2,10 m water in de piekberging staat wanneer deze volledig gevuld is. In totaal kan 1 miljoen m³ water geborgen worden in de berging. Binnen het bergingsgebied ligt de Nieuwkerkertocht. Deze watergang voert het water van de percelen binnen de piekberging naar de Hoofdvaart, waarna het vervolgens via gemalen in het boezemstelsel gepompt wordt. In de Haarlemmermeerpolder worden twee peilen gehanteerd:

- Zomerpeil Nieuwkerkertocht NAP -5,87
- Winterpeil Nieuwkerkertocht NAP -6,02

(Witteveen+Bos, 22 december 2017)

Afvoer

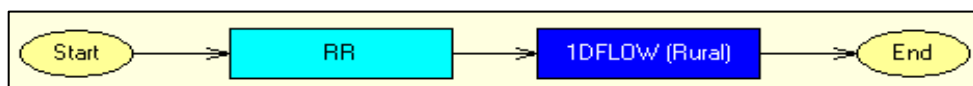
Hoe de piekberging precies gaat afwateren wordt in dit rapport beschreven. Momenteel is bekend dat het bergingsgebied afwatert op de Hoofdvaart via het afvoerkanaal. Dit dient te gebeuren in een tijdsbestek van 2 tot 5 dagen na vulling. Het water uit de piekberging wordt door middel van een uitlaatsysteem afgewaterd. Wanneer de piekberging nagenoeg geleegd is, kan eventueel gebruik gemaakt worden van de doorlaten in de Nieuwkerkertocht om het water in de piekberging sneller op het oorspronkelijke peil van Nieuwkerkertocht te brengen.

3. Minimaal afwateringsdebiet

In een situatie die gemiddeld één keer in de vijftien jaar voorkomt wordt de inlaat van de piekberging Haarlemmermeer open gezet en stroomt de piekberging vol. Vervolgens moet deze piekberging na een bepaalde tijd weer afwateren. In dit hoofdstuk is beschreven wat de randvoorwaarde van het debiet is voor het afwateren van de piekberging op de Hoofdvaart. Deze randvoorwaarde worden door middel van SOBEK (een softwareprogramma waarin hydrologische systemen gemodelleerd worden) berekend. De resultaten van deze berekening schetsen een beeld van de realiteit over de effecten van het debiet op de Hoofdvaart. De berekende effecten worden later meegenomen in het besluit over de optimale afwatering van de piekberging Haarlemmermeer.

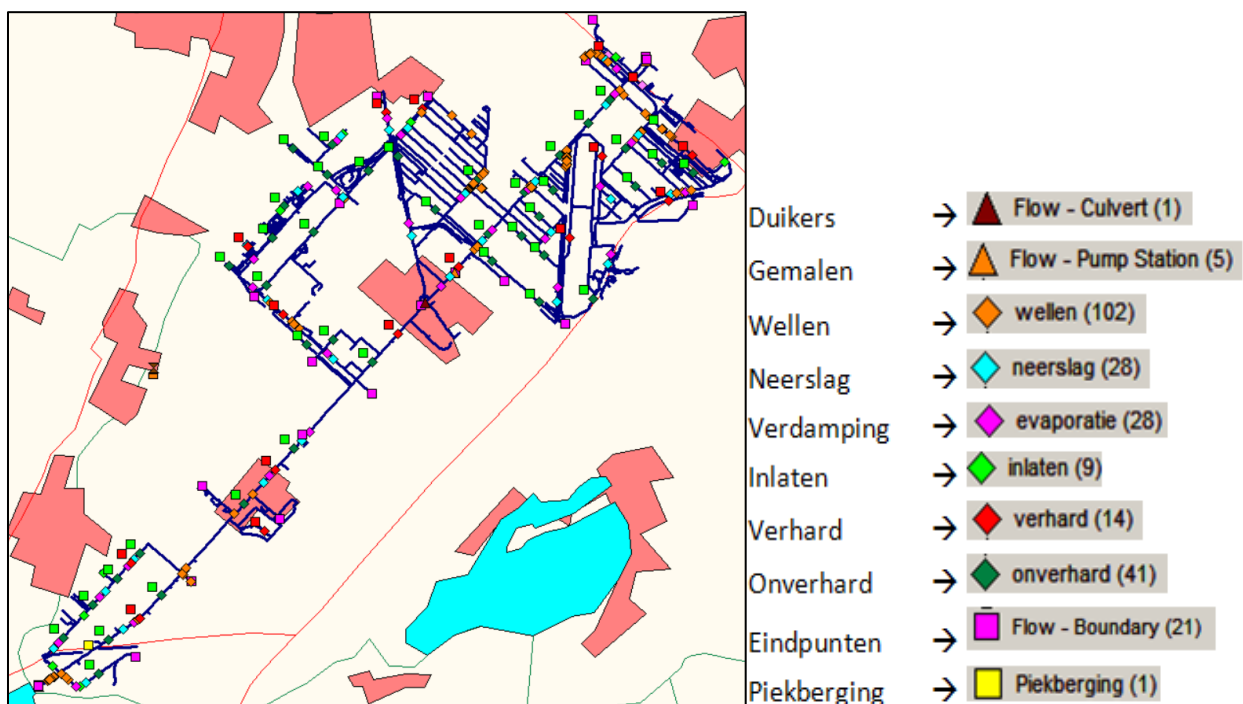
3.1 SOBEK model

Voor het berekenen van de randvoorwaarde is een SOBEK model gebruikt die aangeleverd is vanuit het Hoogheemraadschap van Rijnland. Het gebruikte model bevat het watersysteem van de Haarlemmermeerpolder. Voor het simuleren van de Haarlemmermeerpolder is gebruik gemaakt van een "RR (Rainfall-Runoff)" en een "1DFLOW (Rural)" zoals te zien is in figuur 5 hieronder



Figuur 5: Flowdiagram of simulation mode

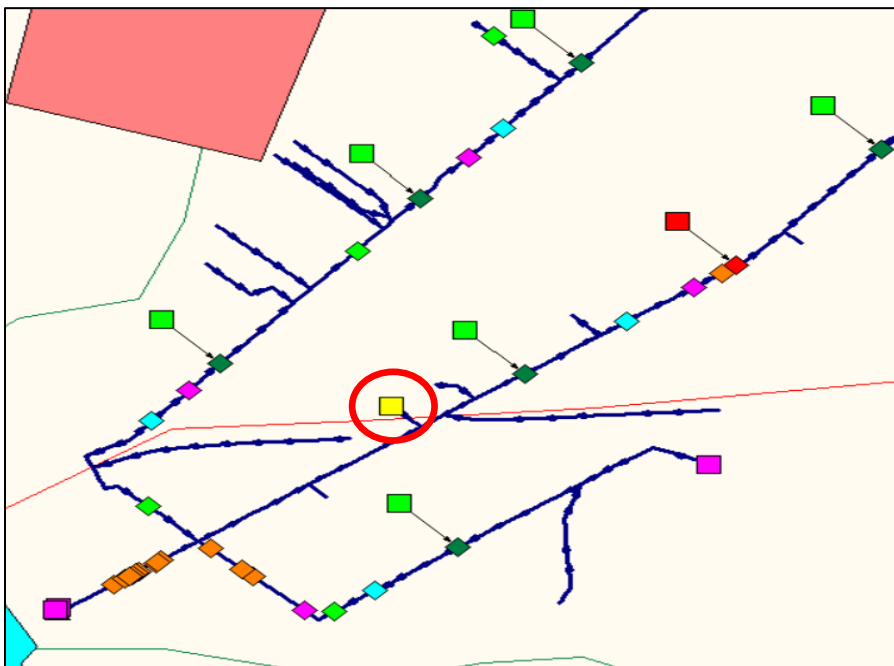
Het model stroomt af met behulp van zogenaamde "Boundary nodes" die dienen als eindpunten voor het model. Deze eindpunten nemen de waarde over van de ringvaart waar het watersysteem op afwatert. Daarnaast zijn alle watergangen in het model verwerkt waarbij elke watergang zijn eigen dimensionering heeft op basis van de meest recente veldmeting. Ook zijn kunstwerken toegevoegd zoals duikers en gemalen. Daarnaast zijn punten in het model gezet die de effecten van neerslag en verdamping kunnen nabootsen. Op deze manier word situatie geschetst die lijkt op de werkelijkheid, zie figuur 6.



Figuur 6: Model schematisatie Haarlemmermeerpolder

Piekberging in model

Om te testen wat de effecten zijn van het afwateren van de piekberging op het watersysteem van de Haarlemmermeerpolder, is de piekberging toegevoegd aan het huidige model. Het nieuw geplaatste punt dat de piekberging representeert is in figuur 7 hieronder rood omcirkeld. Hierbij wordt de piekberging vertegenwoordigd door een "Boundary node". Omdat het water vanuit de ringvaart wordt opgevangen in de piekberging en op een later tijdstip afwatert in het watersysteem van de Haarlemmermeerpolder, ontstaat model technisch gezien water in de polder. Dit is een reden waarom gekozen is om de piekberging te laten vertegenwoordigen door een Boundary node. Deze "Boundary nodes" dienen als begin- of eindpunt voor een model waarin kan worden verwerkt hoeveel water het model in of uit gaat en op welk tijdstip dit gebeurt. Deze aspecten maken een Boundary node een geschikte keuze om de piekberging te vertegenwoordigen. In het gebruikte SOBEK model is enkel de piekberging toegevoegd aan de huidige situatie. De uitlaat die verantwoordelijk is voor het legen van de piekberging stroomt niet loodrecht uit op de verlegde nieuwkerkertocht. De uitlaat is zo ontworpen dat het water uit de piekberging, via het afvoerkanaal, afwatert op de Hoofdvaart. Dit heeft als gevolg dat het volledige debiet van de piekberging richting het gemaal de Leeghwater wordt geleid. Hierdoor is gekozen om alleen het afvoerkanaal te modeleren en niet de volledige verlegde nieuwkerkertocht, zie figuur 4 voor de ligging van de nieuwkerkertocht.



Figuur 7: Piekberging in Sobek model

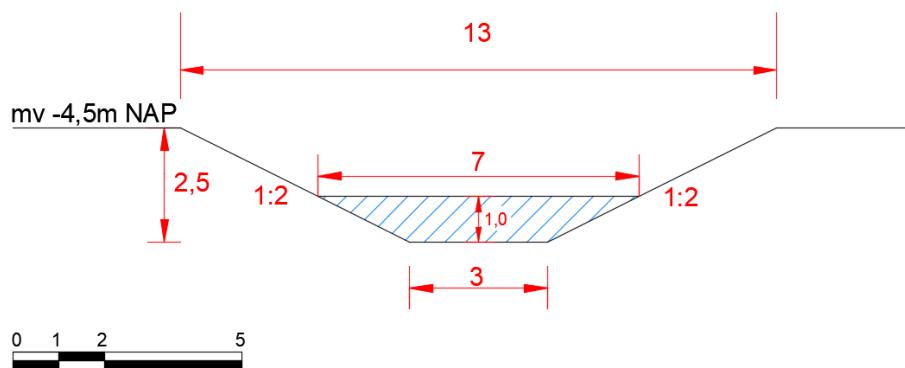
3.2 Randvoorwaarde

Nadat een $t=15$ is voorgekomen en die piekberging is vol gestroomd, moet het water vervolgens afwateren op de polder. De tijd tussen het sluiten van de inlaat en het openen van de uitlaat is niet gedefinieerd (Biesma, Informatie watersysteem, 2018). Dit komt omdat (na een $T=15$ bui) wordt gewacht tot het polderpeil weer op het normale peil is. Het wachten met afwateren van de piekberging is vanwege het beperken van natschade van de agrariërs van de polder. Door de $T=15$ bui is een hoge kans aanwezig dat veel agrariërs al natschade ondervinden door een te hoog polderpeil. Als de piekberging zou afwateren op de Haarlemmermeerpolder terwijl er nog een hoog

polderpeil is, zal het hoge polderpeil langer aanwezig zijn. Hierdoor zou meer schade ontstaan voor agrariërs door het legen van de piekberging. Dit is een niet gewenst resultaat en er zal dus worden gewacht met afwateren van de piekberging tot het polderpeil het gewenste peil terug heeft.

Om te weten wat de grenzen zijn bij het bepalen van de beste afwateringswijze, zijn de uiterste waarden berekend. Deze uiterste waarden zijn gezocht op basis van de watersnelheid in de Hoofdvaart waarbij deze niet groter mag zijn dan 0,3 m/s.

Voor het berekenen van de legingstijd van de piekberging is een dimensionering nodig van het afvoerkanaal. De dimensionering van dit afvoerkanaal moet nog worden geoptimaliseerd en heeft voor deze berekening een dimensionering gekregen die overeenkomt met de dimensionering van de Nieuwkerkertocht. De aangenomen dimensionering heeft een natoppervlak van 5 m², zie figuur 8.



Figuur 8: Afmetingen afvoerkanaal ten behoeve van berekening afwateringsmodel

3.3 Resultaten

Voor het afwateren van de piekberging Haarlemmermeerpolder zijn verschillende debieten getest om te onderzoeken wat de effecten van de leging van de piekberging zal zijn. In theorie zouden de drie gemalen samen een debiet aan kunnen van 34,73 m³/s. Dit debiet is echter veel te hoog als dit werkelijk het debiet zou zijn dat afgewaterd op de Hoofdvaart vanuit de piekberging. Het waterniveau zal stijgen tot -4,787 m NAP. Dit is ruim een meter hoger dan het gewenste peil voor de Haarlemmermeerpolder. Ook zou een watersnelheid van bijna 4,5 m/s worden bereikt, zie tabel 3.

Als het gewenst is, dat het peil van de Haarlemmermeerpolder niet stijgt door invloed van het legen van die piekberging, dan zou een minimale afwateringstijd van ongeveer 2 dagen nodig zijn en zal het maximale debiet door de uitlaat 5,79 m³/s zijn. Als de piekberging geleegd wordt gedurende twee dagen dan zal het afwaterniveau enkel met een centimeter stijgen op de locatie waar het afvoerkanaal afwatert op de Hoofdvaart. De watersnelheid door het afvoerkanaal zou 1,22 m/s zijn en 0,2 m/s zijn in de Hoofdvaart richting het gemaal De Leeghwater.

3 Gemalen	Debiet uit piekberging (m ³ /s)	Afwateringstijd	Waterhoogte (m)	Watersnelheid afvoerkanaal (m/s)	Watersnelheid Hoofdvaart (m/s)
Berekening 1	34,73	8 uur	-4,79	4,491	0,436
Berekening 2	27,78	10 uur	-4,99	3,937	0,392
Berekening 3	23,15	12 uur	-5,18	3,501	0,360
Berekening 4	11,57	24 uur	-5,88	2,129	0,292
Berekening 5	5,79	48 uur	-5,95	1,220	0,204
Berekening 6	3,86	72 uur	-5,95	0,906	0,193
Berekening 7	2,89	96 uur	-5,95	0,714	0,186
Berekening 8	2,31	120 uur	-5,95	0,604	0,174

Tabel 3: Resultatentabel afwatering piekberging Haarlemmermeer met drie gemalen

Als de afwatering van de piekberging enkel begrenst wordt door een maximale watersnelheid van 0,3 m/s in de Hoofdvaart, dan zou de piekberging in één dag kunnen worden gelegegd. Door een toevoeging van een debiet van 11,57 m³/s zou de snelheid van de Hoofdvaart oplopen tot 0,29 m/s. De watersnelheid vanuit het afvoerkanaal zou hier 2,1 m/s bedragen en zorgt dan voor een stijging in de waterhoogte van 10 cm t.o.v. het streefpeil op locatie van het afvoerkanaal.

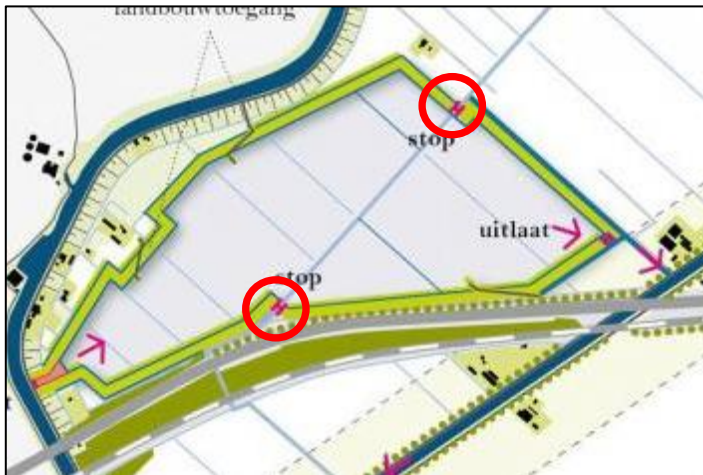
De nieuwe piekberging van de Haarlemmermeerpolder is zo ontworpen dat deze vlak bij het gemaal de Leeghwater afwatert. De verwachting hiervan is dat dit gemaal het grootste gedeelte van het debiet opvangt dat vanuit de piekberging wordt losgelaten. In de onderstaande tabel (tabel 4) zijn de resultaten te zien van het afwateren van de piekberging op de Hoofdvaart waarbij alleen het gemaal Leeghwater aanstaat. Als de resultaten worden vergeleken met de resultaten waarbij alle drie de gemalen aan staan, dan valt op dat de verschillen minimaal blijken. Bij eenzelfde debiet en afwateringstijd is het verschil in waterhoogte tussen de simulatie waarbij één gemaal aan staat of drie gemalen aan staan, maar enkele millimeters. Ook is het verschil zeer gering op de afwateringssnelheid die zou voor komen in het afvoerkanaal. Bij een afwateringstijd van 8 uur kan de watersnelheid nog 0,4 m/s verschillen van elkaar. Dit effect wordt naarmate meer tijd wordt genomen voor het afwateren van de piekberging minder. Dit betekent echter wel net een overschrijding van de 0,3 m/s voor het afwateren binnen 24 uur. Over het algemeen kan worden gezegd dat het voor het afwateren van het debiet niet uit maakt of alleen de Leeghwater aanstaat of alle drie de gemalen worden ingezet.

Alleen Leeghwater	Debiet uit piekberging (m ³ /s)	Afwateringstijd	Waterhoogte (m)	Watersnelheid afvoerkanaal (m/s)	Watersnelheid Hoofdvaart (m/s)
Berekening 1	34,73	8 uur	-4,802	4,743	0,475
Berekening 2	27,78	10 uur	-5,009	4,194	0,429
Berekening 3	23,15	12 uur	-5,185	3,699	0,375
Berekening 4	11,57	24 uur	-5,833	2,191	0,304
Berekening 5	5,79	48 uur	-5,951	1,256	0,205
Berekening 6	3,86	72 uur	-5,95	0,953	0,195
Berekening 7	2,89	96 uur	-5,95	0,757	0,187
Berekening 8	2,31	120 uur	-5,95	0,643	0,176

Tabel 4: Resultatentabel afwatering piekberging Haarlemmermeer met één gemaal

3.4 Doorlaten

De nog te realiseren piekberging die in de Haarlemmermeerpolder komt te liggen, zal zo geplaatst worden dat deze over de nieuwerkertocht komt te liggen. Bij het ontwerp van de piekberging is bepaald dat de nieuwerkertocht normaal kan doorstromen. Dit wordt mogelijk gemaakt door in de kade doorlaten aan te leggen, zie figuur 9. Deze doorlaten zullen tijdens het vullen van de piekberging gesloten worden zodat de piekberging niet meteen leeg stroomt in de nieuwerkertocht. De doorlaten zullen een dimensionering hebben van 2 bij 2,7 meter. De doorlaten die geplaatst worden hebben de eis om op afstand bestuurbaar te zijn. Om deze doorlaten vervolgens goedkoop te houden, zullen deze niet volledig controleerbaar zijn. Hiermee wordt bedoeld dat de doorlaten alleen volledig open of gesloten kunnen worden en niet gedeeltelijk open. In het geval dat de piekberging volledig gevuld is, en de doorlaten worden gebruikt om de piekberging te legen, dan zou een te grote kwantiteit aan water door de piekberging stromen. Dit zal zorgen voor hoge stroomsnelheden en erosie bij de nieuwerkertocht. Dit is door het Hoogheemraadschap van Rijnland niet gewenst (Biesma).



Figuur 9: Doorlaat locaties

Voor het legen van de piekberging brengen deze doorlaten mogelijkheden met zich mee. Dit omdat de doorlaten eventueel mee kunnen helpen met het afwateren van de gevulde piekberging. Een optie zou kunnen zijn om de doorlaten op een later stadium van het legen in te zetten. Het grootste gedeelte van de afwatering kan zoals gepland via het afvoerkanaal afwateren. Vervolgens zouden de doorlaten open kunnen worden gezet om het laatste gedeelte van het afwateringsproces te versnellen en hiermee de totale legingstijd bevorderen.

3.5 Deelconclusie

Voor het afwateren van de Haarlemmermeerpolder is berekend wat de minimale afwateringstijd kan zijn en wat de effecten dit met zich meedraagt. Hieruit blijkt dat binnen twee dagen de piekberging gelegeerd kan worden zonder een te hoge stroomsnelheid in de Hoofdvaart te veroorzaken. Bij het legen van de piekberging binnen twee dagen wordt tevens een peilstijging als gevolg van de afwatering voorkomen. Hierbij zou een debiet vrij komen van minsten $5,79 \text{ m}^3/\text{s}$. De watersnelheid in de Hoofdvaart zou $0,2 \text{ m/s}$ zijn in deze situatie. De bijbehorende watersnelheid die voorkomt in het afvoerkanaal zou $1,22 \text{ m/s}$ zijn. Bij het vergelijken van de waterstanden en snelheden tussen de berekening met alleen gemaal de Leeghwater en de berekening met drie gemalen valt op dat de waarden weinig van elkaar verschillen. Hieruit kan geconcludeerd worden dat gemaal de Leeghwater individueel verantwoordelijk is voor het afvoer van het water uit de piekberging, onafhankelijk van de werking van de andere gemalen.

4. Maximale waterstandsdeling

In tijden van veel neerslag staat het waterpeil in het boezemstelsel van Hoogheemraadschap Rijnland hoog. Wanneer het boezemstelsel gevuld is en er weinig bergingscapaciteit is, kan besloten worden om de piekberging Haarlemmermeer te gebruiken om het overtollige water uit de boezem tijdelijk te bergen.

Het bergingsgebied wordt gelegeerd in een droge periode. In de droge periode dienen de Rijnlandse gemalen het overtollige water in het boezemstelsel af te voeren naar het buitenwater. Hierdoor komt de bergingscapaciteit van het boezemstelsel weer terug. Wanneer het waterniveau in de polder op oorspronkelijk peil is, start de piekberging Haarlemmermeer met afwateren. Om het risico op wateroverlast te verkleinen streeft het Hoogheemraadschap naar een zo snel mogelijke leging van het bergingsgebied. Op deze manier kan de piekberging meerdere malen in een natte periode gebruikt worden.

Echter kan een te snelle leging van het bergingsgebied invloed hebben op de kades rondom de piekberging. Door het water een bepaalde tijd vast te houden in het bergingsgebied, stijgt het waterniveau (stijghoogte) in de omliggende kades. De zogenaamde stijghoogte in de kade kan, als het water lang genoeg in de berging staat, hetzelfde peil bereiken als het oppervlaktewater in het bergingsgebied (-2,4m NAP).

Tijdens de leging van de piekberging daalt de stijghoogte in de kades rondom de piekberging. Deze daling is echter vele malen trager dan de daling van de waterstand in de piekberging. Een hoge stijghoogte in de kade in combinatie met een lage waterstand in de piekberging kan leiden tot het faalmechanisme 'afschuiving'.

Het Hoogheemraadschap van Rijnland heeft de definitieve kade-ontwerpen vastgesteld. De stabiliteit van de kades tijdens de leging van de piekberging hangt af van de afwatersnelheid. Daarom wordt in dit hoofdstuk antwoord gegeven op deelvraag drie: Wat is het maximale debiet van de afwatering van de piekberging Haarlemmermeer waarbij de stabiliteit van de kades rondom de piekberging gewaarborgd blijft? Hierbij wordt alleen gekeken naar het faalmechanisme 'afschuiving' (macrostabiliteit) tijdens en net na de leging van de piekberging. Om de kadestabiliteit te waarborgen, heeft het Hoogheemraadschap van Rijnland de legingstijd van de piekberging op minimaal twee dagen gezet. In dit hoofdstuk wordt deze tijdsduur nader bekeken met het softwareprogramma D - Geostability.

4.1 Modelleren waterspanningen

De macrostabiliteit wordt in grote mate beïnvloed door de waterstanden in de kade en de stijghoogtes in de onderliggende lagen. Daarom is het van belang om de grondwaterstand en stijghoogtelijnen in de dwarsdoorsnede goed te dimensioneren. Hierbij is een onderscheid tussen normale condities en extreme condities. De ligging van de freatische lijn hangt af van:

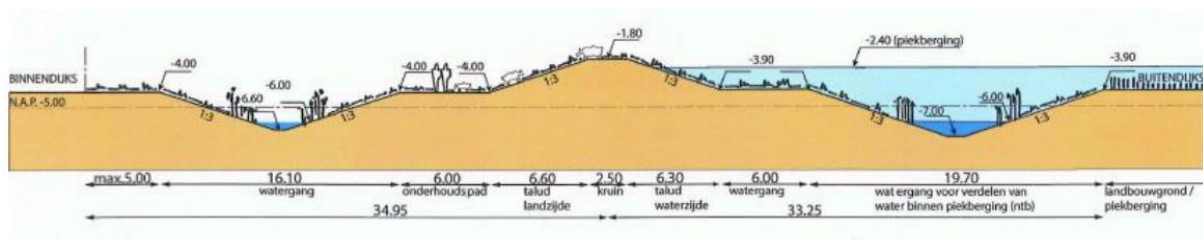
- Het materiaal van de kade
- Geometrie van de kade
- Polderpeilen en waterstanden in normale en extreme situaties
- Open/dichte afdekking op het buitentalud

Kleine verschillen in deze factoren kunnen relatief grote gevolgen hebben.

Materiaal kade

De kades rondom de piekberging worden gerealiseerd met grond uit de piekberging zelf. Deze grond is gewonnen door het graven van sloten en verlaging van het maaiveld. De gebiedseigen grond is klei (klasse 2 en 3). De kern van de kade bestaat uit deze klasse 2 en 3 klei. De kern van de kade wordt afgedekt met een klasse 1 kleilaag, variërend in dikte van 0,3 in de kruin meter tot 0,5 meter in het talud.

Geometrie kade



Figuur 10: Dwarsdoorsnede kade in de piekberging Haarlemmermeer

De geometrie van de kades rondom de piekberging ligt vast is het Programma van Eisen (PvE). De kades hebben een talud van 1:3 en zijn gemiddeld 2,20 meter hoog. Aan beide zijden van de kades wordt een sloot gegraven. Zie figuur 10 voor een schematische doorsnede van de kades.

Peilen

Gevulde piekberging	-2,40 meter NAP
Slootpeil in bergingsgebied	-6,60 meter NAP
Grondwaterspiegel	-4,60 meter NAP
Kruin kade	-1,80 meter NAP
Maaiveldhoogte	-4,30 meter NAP
Taludhelling	1:3

Afdekking buitentalud

Het buitentalud van een waterkering dient goed beschermd te zijn tegen het water. Het is van belang dat een erosiebestendige laag wordt aangebracht om afkalving te voorkomen. Ideaal voor het afdekken van waterkeringen is klei. Door de compacte samenstelling sijpelt er langzaam water door en door de onderlinge samenhang zal weinig erosie plaatsvinden. Klei is onderverdeeld in drie categorieën, zie tabel 5.

Voor het buitentalud van de kade dient de meest erosiebestendige klei toegepast te worden. Dit zal gebeuren met erosiebestendige klei (klasse 1).

Erosiebestendigheds-categorie	Grenswaarden classificatieproeven (alle getallen zijn massapercentages t.o.v. de droge massa) w_l = vloeigrens I_p = plasticiteitsindex $I_p = 0.73 \cdot (w_l - 20)$ is de zogenaamde A-lijn in het plasticiteitsdiagram (figuur 6.1)	
1. Erosiebestendige klei	w_l en I_p en zandgehalte	> 45 > $0.73 \cdot (w_l - 20)$ < 40
2. Matig erosiebestendige klei	w_l en I_p en zandgehalte	< 45 > 18 < 40
3. Weinig erosiebestendige klei	w_l en/of I_p en/of zandgehalte	< $0.73 \cdot (w_l - 20)$ < 18 > 40

Tabel 5: Overzicht van de eisen aan klei voor het gebruik in dijken

4.2 D – Geostability

Met het softwareprogramma D – Geostability wordt de stabiliteit van de kade berekend. Het programma houdt rekening met de verschillende krachten aanwezig in de kade en ondergrond en de veiligheidsnormen. In het geval van de kades van de piekberging is gebruik gemaakt, in het programma, van de Bishop methode waarbij cirkelvormige glijcirkels ontstaan door verscheidende berekeningen. Aan de ‘meest ongunstige’ glijcirkel wordt een waarde gehecht. Dit is de stabiliteitsfactor.

In een eerder stadium in het project zijn D-Geostability modellen gemaakt om het ontwerp van de kades vast te leggen. Van deze bestaande modellen is het model met de laagste stabiliteitsfactor en meest waterdoorlatende ondergrond gekozen tot verdere berekeningen.

4.2.1 Invoerparameters grondsoorten

Het Hoogheemraadschap van Rijnland heeft speciaal voor haar waterschap specifieke parameters per grondsoort. Deze parameters zijn toegekend aan grondlagen in het model. Uitzondering hierop is de cohesie van zandige klei. Door een onderzoek, uitgevoerd door RPS-BCC in 2013, is vastgesteld dat voor de situatie specifiek voor de piekberging Haarlemmermeer een cohesie van 2,9 kPa gebruikt dient te worden, zie tabel 6 (RIO, 2013).

Grondsoort	Ydroog [Kn/m ³]	Ynat [Kn/m ³]	Hoek van inw wrijving [°]	Cohesie [kPa]
veen>300%	10,3	10,3	20,0	2,0
veen<300%	11,4	11,4	20,0	2,0
hum. Klei (<14kN/m ³)	13,3	13,3	25,5	1,4
siltige klei (>14Kn/m ³ en <16Kn/m ³)	15,4	15,4	26,8	2,8
zandige klei (>16,5Kn/m ³)	17,7	17,7	30,8	1,5
zand	18,0	20,0	32,5	0,0
basisveen	12,0	12,0	20,0	2,0
pleistocene zand	18,0	20,0	32,5	0,0

Tabel 6: Rijnlandse parameterset voor grondsoorten

Het materiaal van de kades is gebiedseigen. In onderstaande tabel zijn de parameters voor de afdekklei (C1) en het kernmateriaal weergegeven, zie tabel 7 (RIO, 2013).

Materiaal	Ydroog [Kn/m ³]	Ynat [Kn/m ³]	Hoek van inw wrijving [°]	Cohesie [kPa]
Afdekklei	17,0	17,0	1,5	16,9
Kernmateriaal	17,7	17,7	0,4	32,4

Tabel 7: Parameterset voor de te realiserende kade

4.2.2 Stijghoogtelijnen en belasting

De stijghoogtelijnen bepalen grotendeels de stabiliteit van de kade. In het model zijn drie stijghoogtelijnen (PL-lines) weergegeven (zie figuur 10). In tabel 8 is een verduidelijking weergegeven van de stijghoogte en de bijbehorende functie

Stijghoogtelijn	Functie
1	Stijghoogte van het meest ongunstigste scenario (hoog in kade, laag in piekberging)
2	Stijghoogte uit het 1 ^e watervoerende pakket
3	Stijghoogte van het water in de piekberging

Tabel 8: Stijghoogtelijnen met bijbehorende functie in het model

Deze stijghoogtelijnen zijn gebaseerd op de bevindingen uit paragraaf 4.1.

Op de kade is een belasting van 5Kn/m³ gezet. Denk hierbij aan onderhoudsmachines e.d.

4.3 bepalen stabiliteitsfactor

De stabiliteitstoets in D - Geostability is van belang aangezien bepaald moet worden of de kade stabiel blijft wanneer een snelle leging van de piekberging, na een lange bergingsperiode, plaatsvindt. Het programma berekent de stabiliteitsfactor van de kade. De berekende stabiliteitsfactor dient te voldoen aan de vooraf gestelde stabiliteitsfactor. In deze subparagraaf wordt uitgelegd hoe de stabiliteitsfactor wordt vastgesteld.

Stabiliteitsfactor

De minimaal vereiste stabiliteitsfactor is het product van een vermenigvuldiging. De som luidt:
 schadefactor * schematiseringsfactor * materiaalfactor * modelfactor = stabiliteitsfactor
 (Interprovinciaal Overleg, 1999)

Schadefactor

De schadefactor is afhankelijk van de IPO-klasse van de kade en kan bepaald worden op basis van de LTVRW, zie tabel 9 en 10. (waterschappen, 2015)

Normklasse	Overschrijdingskans [per jaar]
IPO – I	1/10
IPO – II	1/30
IPO – III	1/100
IPO – IV	1/300
IPO – V	1/1.000

Tabel 9: Normklassen regionale keringen: Boezemkaden en keringen langs regionale rivieren

Normfrequentie waterkering [1/jaar]	Schadefactor [-]
1/10	0,8
1/30	0,85
1/100	0,9
1/300	0,95
1/1000	1,0
1/1250	1,1

Tabel 10: Vereiste schadefactor stabiliteit binnentalud - boezemkaden en keringen langs regionale rivieren

De kades rondom de piekberging zijn ontworpen met IPO-klasse III. In tabel 9 is af te leiden dat bij een IPO-klasse III een overschrijdingskans van 1/100 hoort. Vervolgens dient in tabel 10 gekeken te worden. De gehanteerde normfrequentie voor de piekberging is 1/100. Dit betekent dat de schadefactor voor de piekberging Haarlemmeerpolder 0,9 is.

Schematiseringsfactor

De schematiseringsfactor is afhankelijk van de veiligheid welke in de berekening is meegenomen. Factor ligt tussen de 1,0 en 1,3. Bij 1,3 is sprake van veel onzekerheden in de schematisering. Bij 1,0 is alles van de ondergrond goed in kaart gebracht (risico op weinig schematiseringsfouten in het model). 1,0 wordt niet heel snel gebruikt. Vaak wordt de schematiseringsfactor door de opdrachtgever opgegeven (meestal 1,1 – 1,2) of wordt gevraagd om deze zelf te bepalen. In het geval van de kades rondom de piekberging wordt de 1,0 gehanteerd. Dit omdat veel boringen en sonderingen zijn uitgevoerd die de ondergrond goed in kaart hebben gebracht. Daarnaast is bodemonderzoek uitgevoerd voor de parameters van de aanwezige grondsoorten.

Materiaalfactor

De materiaalfactor is al verwerkt in de parameterset die gebruikt wordt voor het rekenmodel (van representatieve parameters naar rekenwaarden, wordt gerekend in de Deltares software met rekenwaarden) en kan dus als 1,0 worden meegenomen.

Modelfactor

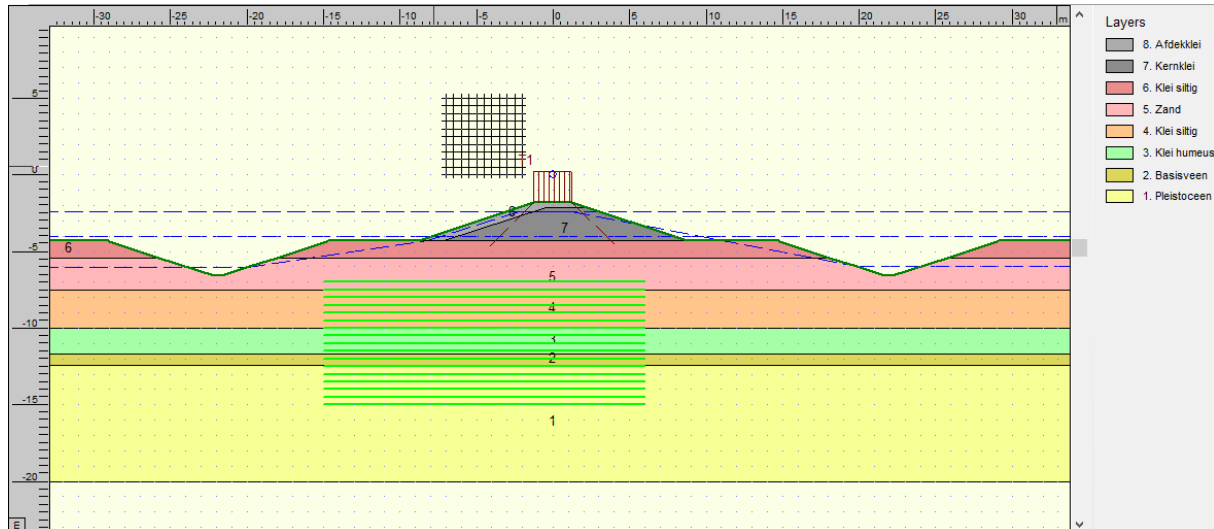
De modelfactor is afhankelijk van het gebruikte rekenmodel. Voor de berekeningen van de kades in de piekberging Haarlemmeer wordt het rekenmodel van Bishop gebruikt. De modelfactor is te vinden in tabel 11 en bedraagt 1,0.

Rekenmodel / stabiliteitsanalyse		Modelfactor ¹³	Bron (status)
Bishop		1,0	VTV2006 (vigerend)
LiftVan		1,05	VTV2006 (vigerend)
EEM – Mohr Coulomb		1,0	VTV2006 (vigerend)
Spencer – Van der Meij	zonder opdrukken	0,95	Concept TR Macro stabiliteit (niet vigerend)
	met opdrukken	1,05	Concept TR Macro stabiliteit (niet vigerend)

Tabel 11: Modelfactor bij toepassing van het Mohr-Coulomb materiaalmodel (gedraineerd grondgedrag)

4.4 D-Geostability model

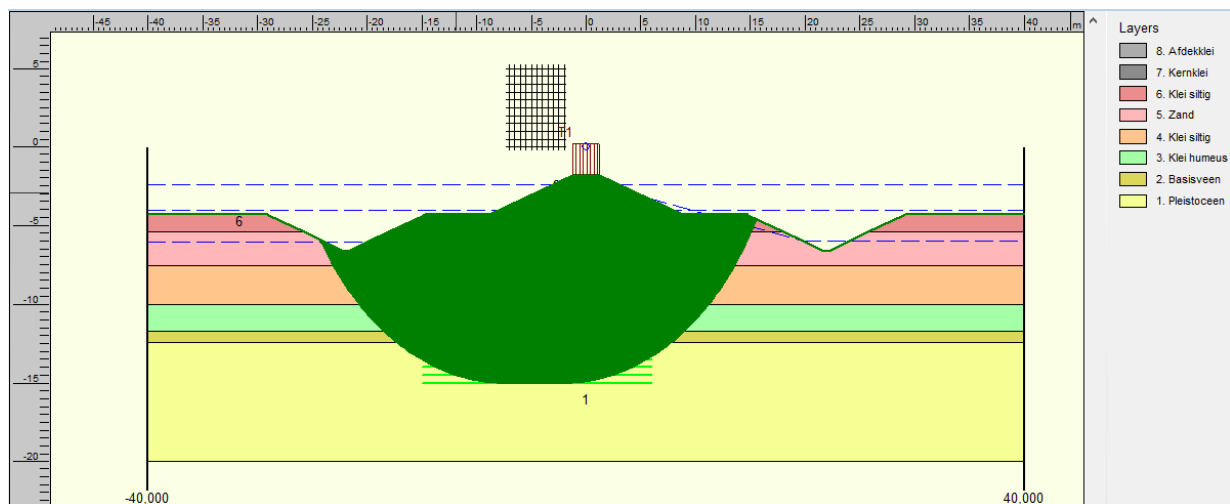
Het stabiliteitsmodel waarin de kades van de piekberging Haarlemmermeer zijn opgenomen is te zien in figuur 11. Hierin zijn ook de onderliggende grondlagen goed te onderscheiden. In dit zijaanzicht zal het water van de piekberging aan de linkerkant van de kade staan. Nadat het model volledig in D-Geostability staat, is het mogelijk om het door te rekenen.



Figuur 11: Modelschematisatie van de kades rondom de piekberging Haarlemmermeer

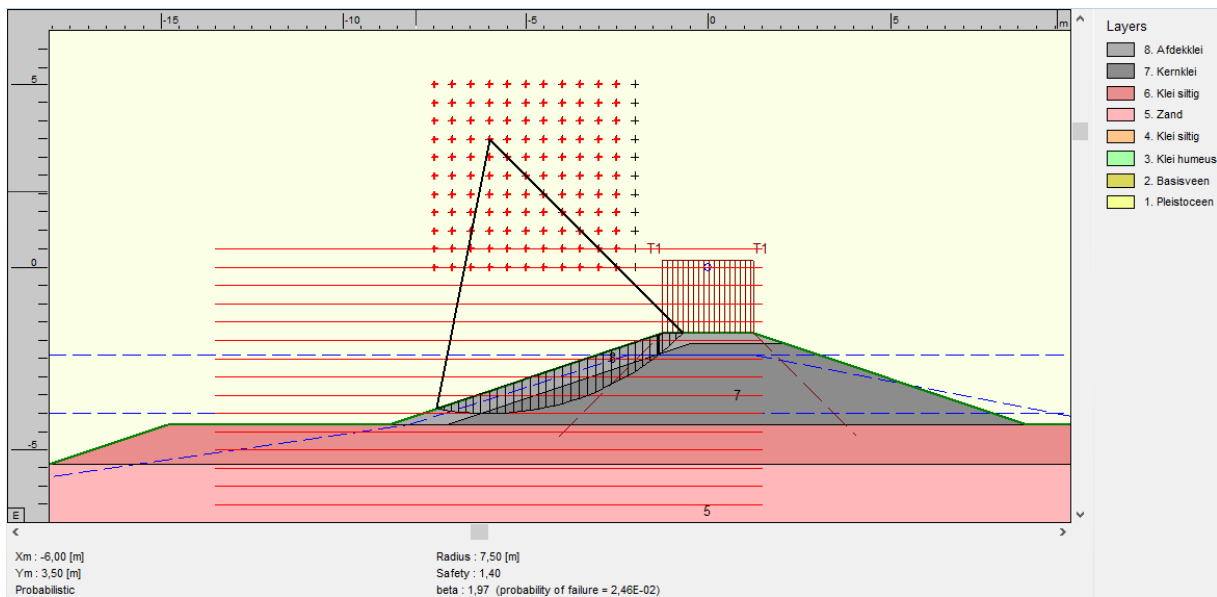
Na het toevoegen van het “grid” en de “tangent line” is het model doorgerekend. In de safety overview is een groen vlak te zien op de kade, zie figuur 12. Dit betekent dat de kade voldoet aan de stabiliteitsfactor van 0,9. Deze 0,9 is gebaseerd op de som eerder gegeven in dit hoofdstuk:
schadefactor + schematiseringsfactor + materiaalfactor + modelfactor = stabiliteitsfactor

Ingevuld: $0,9 * 1,0 * 1,0 * 1,0 = 0,9$



Figuur 12: Veiligheidsoverzicht kades piekberging Haarlemmermeer

Nadat het model volledig in D-Geostability staat, is het mogelijk om de meest kritieke glijcirkel te aanschouwen. Zie figuur 13 voor de meest kritieke glijcirkel en de bijbehorende stabiliteitsfactor.



Figuur 13: Spanningen kades piekberging Haarlemmermeer

4.5 Deelconclusie

Door de uitkomst van het D – Geostability model te vergelijken met de vooraf gestelde stabiliteitsfactor kan geconcludeerd worden dat de macrostabiliteit van de kades rondom de piekberging Haarlemmermeer voldoet in de meest extreme situatie. Hieronder valt de situatie waarbij de piekberging één jaar gevuld is, waardoor de stijghoogte in de kades hetzelfde niveau als de waterhoogte in het bergingsgebied bereikt, en vervolgens binnen één seconde geleegd wordt.

Desalniettemin dient vervolgonderzoek uitgevoerd te worden naar de microstabiliteit van de kades. Dit omdat de kans zeer aannemelijk is dat de kades instabiel worden vanwege de microstabiliteit en wateroverspanning. Microstabiliteit is het faalmechanisme waarbij het gevaar van binnenuit de dijk komt. De waterdruk vanuit de dijk drukt de bekleding van de dijk af waardoor water uit de dijk treedt en de dijk versneld erodeert (Vree, 2018).

Om deze reden en voor het vervolg van dit onderzoek, wordt op dit moment een minimale tijdsduur van twee dagen aangehouden voor het legen van de piekberging (Balsters, 2018). Voor dit onderzoek wordt de legingstijd van twee dagen als richtlijn beschouwd vanwege ontbrekend onderzoek.

5. Bodem- en oeverbescherming

Om erosie van de bodem en oevers in de Hoofdvaart en het afvoerkanaal te voorkomen, is het nodig om erosiebestendige maatregelen toe te passen. Erosie is het proces van slijtage van een vast oppervlak waarbij materiaal wordt verplaatst of geheel verdwijnt. Erosie kan door meerdere oorzaken ontstaan. In de Hoofdvaart en het afvoerkanaal kan erosie plaatsvinden door hoge stroomsnelheden die samenhangen met de legingstijd van de piekberging.

Vanwege de berekende hoge stroomsnelheid (zie hoofdstuk 3) en mogelijk opbarstingsgevaar is in deze berekening gekozen om het afvoerkanaal te voorzien van een betonnen bak. Via deze wijze hoeft geen rekening gehouden te worden met bodem- en oevererosie van het afvoerkanaal. Echter kan dit wel leiden tot stroomsnelheden tot over de 2 m/s. Dit kan grote gevolgen hebben voor de bodem en oevers van de Hoofdvaart.

5.1 Bodembescherming

In deze subparagraaf wordt de bodembescherming bepaald. Hierbij wordt onderscheidt gemaakt tussen water dat loodrecht op de Hoofdvaart uitstroomt en water dat onder een hoek afwatert vanuit het afvoerkanaal op de Hoofdvaart. De bodembescherming zal stortsteen zijn. Of een bepaalde stortsteengrootte voldoet, wordt aan de hand van de formule berekend:

$$V_{et} = a * f_t * C_k * \sqrt{D_{90}}$$

Waarin:

V_{et}	=	<i>Gemiddelde stroomsnelheid in turbulent water waarbij het materiaal op een horizontale bodem in beweging komt</i>
a	=	<i>Empirisch bepaalde factor afhankelijk van het materiaal waaruit de korrels bestaan</i>
f_t	=	<i>de turbulent factor die de mate van turbulentie aangeeft</i>
C_k	=	<i>de coëfficiënt van Chezy</i>
D_{90}	=	<i>Korrel diameter</i>

Om te bepalen welke steensortering van toepassing is voor het beschermen van de bodem van de Hoofdvaart, is de berekening in drie delen opgeknipt. In het eerste deel wordt berekend bij welke stroomsnelheid de bodem van de Hoofdvaart erodeert. Ten tweede wordt berekend over welke lengte de bodembescherming dient te liggen. Tot slot wordt de benodigde steengrootte berekend. (Koning, 1991).

5.1.1 Afvoerkanaal watert loodrecht af op Hoofdvaart

De benodigde steengrootte van bodembescherming wordt uitgevoerd in deze subparagraaf uitgelegd in drie stappen. In de eerste stap wordt de maximale watersnelheid in de Hoofdvaart berekend.

Vervolgens is de bijbehorende lengte van de bodembescherming in de Hoofdvaart bepaald. Tot slot is de bijbehorende steengrootte berekend.

1. Eroderen bodem Hoofdvaart

- Bepalen debiet vanuit het afvoerkanaal:

$$Q = v * a$$

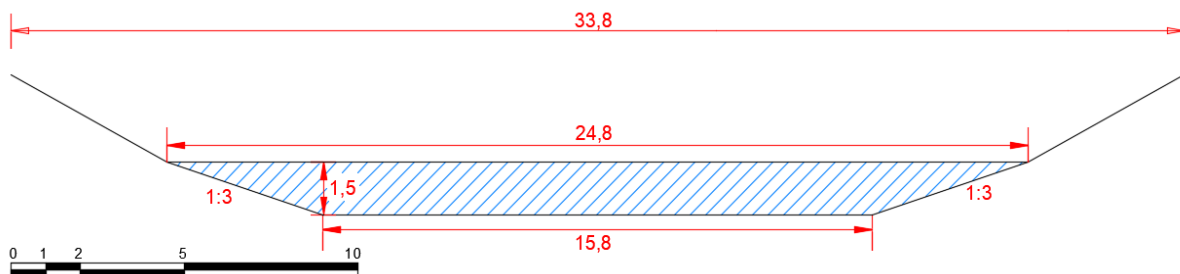
$$Q = 2,13 * 5 \text{ (zie hoofdstuk 3)}$$

$$Q = 12,8 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Bepalen watervoerende doorsnede van de Hoofdvaart

$$\text{Watervoerende doorsnede} = (15,8 * 1,5) + (4,5 * 1,5) = 30,45 \text{ m}^2$$

(zie figuur 14)



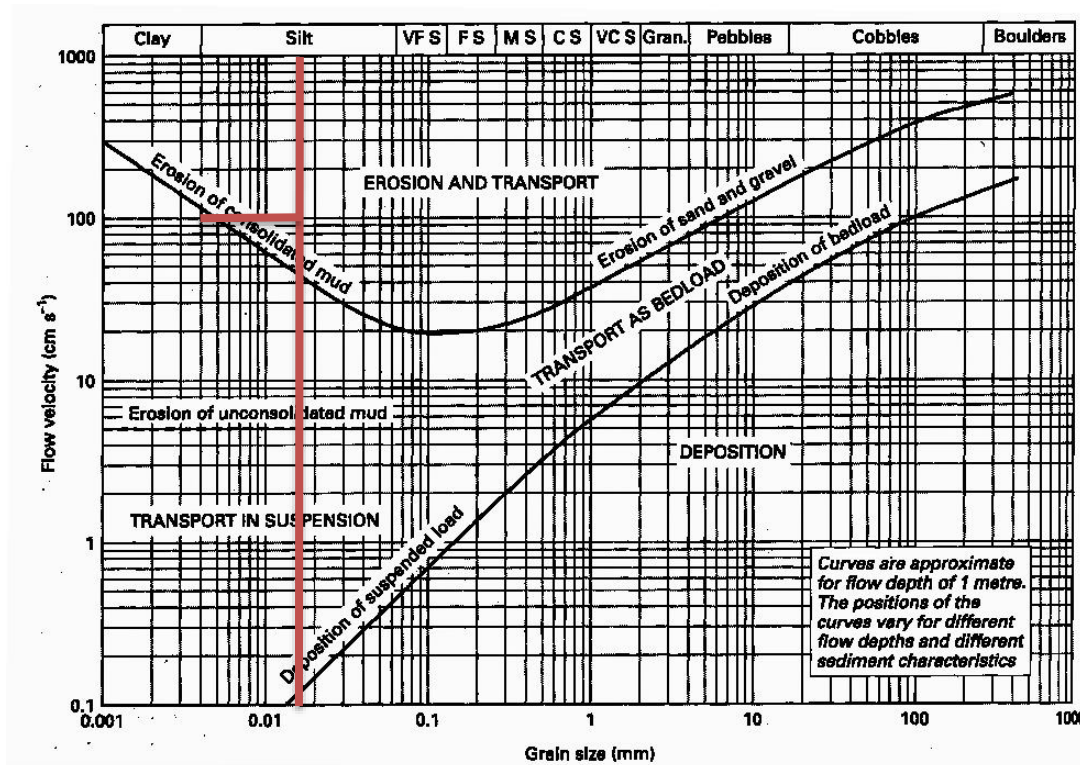
Figuur 14: Afmetingen Hoofdvaart

- Bepalen stroomsnelheid Hoofdvaart

De maximale stroomsnelheden in de poldersloten zijn opgenomen in de beleidsplannen van Hoogheemraadschap van Rijnland. Hierin staat dat de stroomsnelheid in de Hoofdvaart maximaal $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ bedraagt.

- De Hoofdvaart in de Haarlemmermeerpolder is uitgegraven in kleigrond.

In de Hjulström-curve (figuur 15) is te zien bij welke stroomsnelheid klei kan eroderen (Geocoaching, sd). Dit is bij een stroomsnelheid >1,0 m/s. Het onderstaande figuur (figuur 15) geldt voor watergangen waar de hydraulische straal (R)=1 en normale turbulentie aanwezig is.



Figuur 15: Hjulström-curve

- Bepalen hydraulische straal (R) van de Hoofdvaart:

$$R = \frac{A}{P}$$

$$R = \frac{30,45}{25,29}$$

$$R = 1,2$$

Aangezien de Hydraulische straal >1, dient een correctiefactor (f_t) toegepast te worden op de stroomsnelheid van 1,1 (Koning, 1991).

Dit betekent dat de Hoofdvaart in normale turbulentie pas erodeert als de snelheid die hoger ligt dan 1,1 m/s.

Echter vindt erosie in wervelstraten plaats bij een 2 x zo lage snelheid. Dus bij

$$\frac{1,1}{2} = 0,55 \text{ m/s}$$

2. Lengte bodembescherming

Zoals eerder vermeld erodeert de bodem van de Hoofdvaart bij stroomsnelheden $>0,55$ m/s. Om te berekenen waar de grens zich bevindt van stroomsnelheid $\leq 0,55$ is de volgende formule gebruikt:

$$V(x) = \frac{q(v)}{A(x)} \leq 0,55 \quad V(x) = \frac{12,8}{2m \cdot b(x)} \leq 0,55 \quad b(x) = \frac{12,8}{0,55} = 11,64$$

Bij een breedte van 11,64 tussen de wervelstraten zal de stroomsnelheid $\leq 0,55$ m/s. Opmeten uit het op schaal getekende stroombeeld geeft $b(x) = 11,64$ m op $x = 12$ m vanaf de uitlaatconstructie. Een bodembescherming over deze lengte is vereist ter voorkoming van aantasting van de kanaalbodem. De bodembescherming dient aangebracht te worden in een spreidwijdte van 1:7 ten opzichte van het afvoerkanaal (Biesma). Zie bijlage 1

3. Bepalen steengrootte

- Om de steengrootte van het stortsteen te bepalen wordt er getoetst met lichte stortsteen. Mocht dit niet voldoen, wordt getoetst met middelzwaar stortsteen.

Gegevens lichte stortsteen:

D_{50}	0,29 m
D_{90}	0,35 m
ρ_{steen}	2650 kg/m ³
$R(\text{Hoofdvaart})$	1,5

Voor de Chezy-coëfficiënt geldt dan:

$$Ck = 18 \log\left(\frac{12R}{D_{90}}\right) \quad Ck = 18 \log\left(\frac{12 \cdot 1,5}{0,35}\right) \quad Ck = 30,8 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$$

- Tenslotte dient de empirisch bepaalde factor (a) bepaald te worden die informatie geeft over het materiaal waaruit de korrels bestaan.

De formule voor (a) luidt:

$$a = 0,22 \sqrt{\frac{\rho_{materiaal} - \rho_{water}}{\rho_{water}}} \quad a = 0,22 \sqrt{\frac{2650 - 1000}{1000}} \quad a = 0,28$$

- Vervolgens kan de formule die de gemiddelde stroomsnelheid in turbulent water waarbij het materiaal op een horizontale bodem in beweging komt, worden ingevuld:

$$V_{et} = a * f_t * Ck * \sqrt{D_{90}}$$

$$V_{et} = 0,22 * 0,55 * 30,8 * \sqrt{0,35}$$

$$V_{et} = 2,6 \text{ m/s}$$

Een bodembescherming van licht stortsteen kan stroomsnelheden aan tot 2,6 m/s. In de Hoofdvaart (net buiten het afvoerkanaal) zal de stroming maximaal 2,13 m/s zijn. Hieruit kan geconcludeerd worden dat een bodembescherming van licht stortsteen voldoende is om erosie te voorkomen. Een stroomsnelheid in de Hoofdvaart van 2,13 m/s zal echter zeer plaatselijk voorkomen. Omdat de stroomsnelheid in de afstand snel afneemt, kan het stortebed wellicht (in de afstand) lichter uitgevoerd worden. Hier dient wel nader onderzoek naar gedaan te worden.

5.1.2 Afvoerkanaal watert af op Hoofdvaart onder een hoek

Om het water uit de piekberging alvast richting het gemaal de Leeghwater te stuwen, kan een optie zijn om het water vanuit het afvoerkanaal onder een hoek af te laten wateren op de Hoofdvaart. De impact hiervan op de soort bodembescherming is gering (in tegenstelling tot de oeverbescherming). Daarom geldt hier dezelfde soort bodembescherming als het scenario waar het water vanuit het afvoerkanaal loodrecht afwatert op de Hoofdvaart. In dit scenario is uitgegaan van een hoek van 45°.

Echter dient wel het stortebed verlengt te worden. Om de lengte van de bodembescherming te berekenen is een stroombeeld geschetst, zie bijlage 2.

Zoals eerder vermeld erodeert de bodem van de Hoofdvaart bij stroomsnelheden >0,55 m/s. Om te berekenen waar de grens zich bevindt van stroomsnelheid ≤0,55 is de volgende formule gebruikt:

$$V(x) = \frac{q(v)}{A(x)} \leq 0,55 \quad V(x) = \frac{12,8}{2m * b(x)} \leq 0,55 \quad b(x) = \frac{12,8}{0,55} = 11,64$$

Bij een breedte van 11,64 meter tussen de wervelstraten zal de stroomsnelheid ≤ 0,55 m/s. Opmeten uit het op schaal getekende stroombeeld geeft $b(x) = 11,64 \text{ m}$ op $x = 18 \text{ m}$ vanaf de uitlaatconstructie. Een bodembescherming over deze lengte is vereist ter voorkoming van aantasting van de kanaalbodem.

5.2 Oeverbescherming

Om te komen tot een geschikte oeverbescherming op hoogte van de uitlaatconstructie van de piekberging Haarlemmermeerpolder, is op basis van de mogelijk voorkomende stroomsnelheden de meest geschikte oeverbescherming toegelicht. Op basis van de later te maken variaties, kan per variatie de meest geschikte oeverbescherming worden gekozen. De besproken oeverbeschermingen zijn afkomstig uit overleg met deskundigen en uit “Natuurvriendelijke oevers, CUR-publicatie 200 - 202”

Geschikte oeverbeschermingen

Voor het kiezen van een meest geschikte oeverbescherming zijn vier verschillende oeverbeschermingen met elkaar vergeleken. De gekozen vier constructies zijn gekozen op basis van de meest voorkomende oeverbeschermingen, die worden toegepast op watergangen die overeenkomen met de situatie van de Hoofdvaart.

Voor de eerst mogelijke oeverbescherming die erosie kan tegenhouden ter hoogte van het afvoerkanaal is gekozen voor een palenrij (figuur 16).

Een palenrij is sterker dan een normale beschoeiing met een redelijk goede grondkerende functie. Een palenrij is vrij goedkoop (€100, -/meter) om aan te leggen en is gemiddeld eens in de 15 jaar toe aan vervanging. Of een palenrij sterk genoeg is, om de haakse stroming op te vangen die vanuit het afvoerkanaal op de Hoofdvaart uitkomt, is niet bekend. Mocht de palenrij beschadigd worden als gevolg van het legen van de piekberging, dan zou het repareren van de oeverbescherming niet hoog in de kosten lopen. Tevens is in de piekberging in de huidige situatie al sprake van een palenrij als oeverbescherming. Als een palenrij wordt gekozen als de gewenste oeverbescherming, verandert weinig aan de situatie zoals die nu is voor de Hoofdvaart en wordt in principe “niks” gedaan. Het verschil zal echter zijn dat de palenrij vaker onderhoud nodig zal hebben.



Figuur 16: Palenrijconstructie (Aalsburg)

Een andere mogelijkheid is een hardhouten damwand (figuur 17). Een hardhouten damwand is steviger en heeft een langere levensduur dan een palenrij, namelijk een levensduur van 30 jaar. Dit maakt een hardhouten damwand een duurzamere oeverconstructie dan een palenrij. Hiertegenover staat echter wel een hoger prijskaartje. De prijs van deze oeverconstructie is afhankelijk van de lengte van de damwanden maar in de praktijk kan worden uitgegaan van €400, - per strekkende meter. Een hardhouten damwand is vrij robuust en zou de klap van het afwateren van de piekberging prima kunnen opvangen. Hierdoor is geen extra onderhoud nodig aan de oeverconstructie als gevolg van legen van de piekberging.



Figuur 17: Hardhouten damwandconstructie (Bekecke)

Vervolgens kan nog worden gekozen voor een stalen damwand (figuur 18). Een stalen damwand is sterker dan een hardhouten damwand. Ook heeft een stalen damwand een erg lange levensduur, namelijk rond de 100 jaar. Het onderhoud zal hiermee ook zeer beperkt worden. Echter is de prijs van een stalen damwand hoog. Volgens kosten deskundige ligt dit bedrag rond de €700 á €800 per strekkende meter aan oeverbescherming. Een stalen damwand zou zonder problemen het legen van de piekberging kunnen opvangen.



Figuur 18: Stalen damwandconstructie (BV)

Een andere sterke oeverbeschermingsconstructie die vaak in de praktijk gebruikt wordt, is basaltton (figuur 19). Basaltton is een steenzetting met een hoge stabiliteitsfactor die zowel op een talud als verticaal geïmplementeerd kan worden. Ook heeft een oeverconstructie van basaltton een hoge levensduur. De kosten van een oeverconstructie met basalttonzetting zijn echter wel hoog en bedragen rond de €110,- per vierkant meter.



Figuur 19: Basalttonzetting (Rijkswaterstaat)

5.3 Deelconclusie

Om erosie van de bodem in de Hoofdvaart te voorkomen dient een bodembescherming toegepast te worden. Deze bodembescherming dient een lengte te hebben van 18 meter (gebaseerd op de watersnelheid van 0,55 m/s) in zowel de loodrechte afwatering van het afvoerkanaal op de Hoofdvaart als in de variant waar de afwatering onder een hoek van 45° is. Het verschil in steengrootte tussen beide varianten is eveneens nihil. Een stortebed van licht stortsteen voldoet in beide gevallen.

Het verschil tussen loodrecht afwateren op de Hoofdvaart en onder een hoek kenmerkt zich door de benodigde lengte van de oeverbescherming aan de zuidelijke oever van de Hoofdvaart. Bij een loodrechte afwatering van het afvoerkanaal in de Hoofdvaart dient oeverbescherming geplaatst te worden over een langere afstand dan de variant waar het water afwatert onder een hoek van 45°. Dit brengt extra materiaalkosten met zich mee.

Afhankelijk van de stroomsnelheden, materiaalsterkte, duurzaamheid en kosten kan worden gekozen voor de best passende oeverbescherming die aansluit bij de situatie. De goedkoopste constructie onder de hierboven genoemde oeverbeschermingen is de palenrij. Dit is tevens ook de zwakste oeverbescherming. Er kan niet met zekerheid worden gezegd of deze constructie sterk genoeg is voor de stroomsnelheden die plaatsvinden bij het afwateren van de piekberging. De andere drie constructies zijn zodanig sterk dat deze het legen van de piekberging wel aankunnen. Onder deze constructie kan qua prijs het best gekozen worden voor een hardhouten damwand. De stalen damwand en de basaltinzetting zijn samen de duurste varianten en tevens ook de constructies met de langste levensduur. Op basis van het ontwerp en de functie van het afvoerkanaal kan een geschikte oeverbescherming worden gekozen.

6. Opbarsting afvoerkanaal

Om opbarsting te voorkomen in het afvoerkanaal van de piekberging Haarlemmermeerpolder, zijn de opwaartse en neerwaartsedruk op de locatie van het afvoerkanaal berekend. Deze berekeningen zijn gebaseerd op de sonderingen die zijn uitgevoerd in de piekberging, zie bijlage 3 en 4 voor de locaties van de sonderingen (Fugro Geoservices B.V., 2016). De oorzaak van opbarsting is dat water omhoog komt vanuit een diepe zandlaag in de ondergrond (1^e watervoerende pakket) waarbij de waterdruk (opwaartse druk) groter is dan de druk van de deklaag (neerwaartsedruk). Dit water zal zichtbaar worden aan het oppervlak en verstoort de samenstelling van de ondergrond. De kracht waarmee dit water de opwaartse beweging maakt, kan dusdanig groot zijn waardoor het constructies optilt. Om opbarsting te voorkomen dient de neerwaartsedruk minstens 1,1 keer groter zijn dan de opwaartse druk. Dit kan bereikt worden door zowel de opwaartse druk te verkleinen of door de neerwaartsedruk te verhogen. In dit hoofdstuk is gekeken naar opbarsting tijdens de huidige-, bouw-, en rustfase. Ook zijn meerdere methoden beschreven om opbarsting te voorkomen.

6.1 Huidige situatie

In tabel 12 staan de opwaartse en neerwaartsedruk op locatie van het afvoerkanaal weergegeven. De neerwaartsedruk is gebaseerd op de verschillende bodemlagen in de deklaag. De opwaartse druk is berekend aan de hand van de stijghoogte afkomstig vanuit het eerste watervoerende pakket (-3,1m NAP) tot aan het pleistoceen. In de tabel hieronder is te zien dat in de huidige situatie de neerwaartsedruk hoger is dan de opwaartse druk. Dit resulteert in een situatie waarbij geen opbarsting plaats vindt. Aan de hand van een formule kan worden bepaald of opbarsting plaatsvindt. Om zeker te zijn dat geen opbarsting plaats vindt moet de veiligheidsfactor minstens een waarde hebben van 1,1. Momenteel is de neerwaartsedruk gemiddeld 1,28 keer groter dan de opwaartse druk, zie onderstaande formule. Dit wordt in de tabel de opbarstingsveiligheidsfactor genoemd.

$$\frac{\text{neerwaartse druk}}{\text{opwaartse druk}} \geq 1,1 \qquad \frac{109,8}{85,9} = 1,28 \geq 1,1$$

Sondering	Maaiveld	Neerwaartsedruk(kN/m ³)	Opwaartse druk (kN/m ³)	Opbarsting veiligheidsfactor
DKM36	-4,70	111,08	88,00	1,26
DKM37	-4,74	111,75	89,00	1,26
DKM38	-4,53	113,34	88,00	1,29
DKM39	-4,49	111,34	86,00	1,29
DKM40	-3,86	119,58	83,00	1,51
DKM41	-4,54	109,75	86,00	1,28
DKM42	-4,53	111,08	87,00	1,28
DKM43	-4,52	110,94	86,50	1,28
DKM44	-4,42	110,56	85,00	1,30
DKM45	-3,84	122,91	87,00	1,41
DKM46	-4,72	103,65	84,00	1,23
DKM47	-4,81	103,43	84,00	1,23
DKM48	-4,65	103,81	83,00	1,25
DKM49	-4,68	107,14	86,00	1,25
DKM50	-4,86	100,61	84,00	1,20
DKM51	-4,92	105,84	88,00	1,20

Tabel 12: Opbarstingsveiligheid huidige situatie

6.2 Bouwfase

Door het afgraven van het afvoerkanaal wordt de balans tussen de opwaartse- en neerwaartsedruk verstoord. Dit komt omdat een gedeelte van de neerwaartsedruk verwijderd wordt. Deze verschillen kunnen resulteren in een situatie waarbij sprake is van opbarsting.

In tabel 13 is de opbarstingsveiligheid factor te zien die tijdens de realisatiefase van het afvoerkanaal voor kan komen. In de situatie die hier geschetst is, is gegraven tot een maaiveldhoogte van -7 NAP en is de dimensionering gebruikt van de nieuwerkertocht. Hiervoor moet tussen de 2 á 3 meter vanaf het maaiveld worden afgegraven. In de berekening van de neerwaartsedruk zijn twee factoren meegenomen. De eerste factor is de neerwaartsedruk afkomstig van de deklaag tussen de bodem van het afvoerkanaal tot de pleistocene laag. Bij de tweede factor is de neerwaartsedruk afkomstig uit de taluds van de oever.

Hieronder is te zien dat, als het afvoerkanaal wordt afgegraven, te veel neerwaartsedruk wordt verwijderd met als gevolg dat de opwaartse druk groter wordt dan de neerwaartsedruk. Dit zal leiden tot een situatie waarbij opbarsting plaatsvindt. Dit is tevens te zien aan de opbarstingsveiligheidsfactor die onder de gewenste 1,1 ligt. Aan de hand van deze tabel kan geconcludeerd worden dat opbarsting-voorkomende maatregelen nodig zijn voor zowel de bouwfase als de rustfase van het afvoerkanaal.

Sondering punt	Benodigde afgraving t.o.v mv	Bodem afvoerkanaal	Neerwaartse druk tijdens bouwfase	Opwaartse druk	Opbarsting veiligheidsfactor
DKM36	2,30	-7,00	87,61	90,00	0,97
DKM37	2,26	-7,00	88,99	91,00	0,98
DKM38	2,47	-7,00	87,83	90,00	0,98
DKM39	2,51	-7,00	85,20	88,00	0,97
DKM40	3,14	-7,00	80,86	81,00	1,00
DKM41	2,46	-7,00	83,99	88,00	0,95
DKM42	2,47	-7,00	85,46	89,00	0,96
DKM43	2,48	-7,00	85,44	88,50	0,97
DKM44	2,58	-7,00	82,65	87,00	0,95
DKM45	3,16	-7,00	87,43	89,00	0,98
DKM46	2,28	-7,00	80,61	86,00	0,94
DKM47	2,19	-7,00	81,02	86,00	0,94
DKM48	2,35	-7,00	79,37	85,00	0,93
DKM49	2,32	-7,00	83,95	88,00	0,95
DKM50	2,14	-7,00	79,82	86,00	0,93
DKM51	2,08	-7,00	86,49	90,00	0,96

Tabel 13: Opbarstingsveiligheid bouwfase

6.3 Rustfase

Na het afgraven van het afvoerkanaal komt het kanaal in de rustfase terecht. In de rustfase wordt het kanaal gebruikt als verlenging van de nieuwkerkertocht. Dit betekent dat het afvoerkanaal deel wordt van het watersysteem van de Haarlemmermeerpolder en dat deze het hele jaar mee zal stromen. Het afvoerkanaal is voorlopig gedimensioneerd met een bodemhoogte van -7m NAP. In de rustfase zal hier dus permanent één meter water in staan. Het water in het afvoerkanaal zal zorgen voor extra neerwaartsedruk. Hierdoor zal de opbarstingsveiligheidsfactor erop vooruit gaan ten opzichte van de bouwphase, zie tabel 14. Echter ligt de veiligheidsfactor op bijna elk sonderingspunt nog onder de gewenste waarde van 1,1. Dit betekent voor het afvoerkanaal dat opbarsting-voorkomende maatregelen nodig zijn om de veiligheid te waarborgen.

Sondering punt	Benodigde afgraving t.o.v mv	Bodem afvoerkanaal	Neerwaartse druk tijdens rustfase	Opwaartse druk	Opbarsting veiligheidsfactor
DKM36	2,30	-7,00	97,61	90,00	1,08
DKM37	2,26	-7,00	98,99	91,00	1,09
DKM38	2,47	-7,00	97,83	90,00	1,09
DKM39	2,51	-7,00	95,20	88,00	1,08
DKM40	3,14	-7,00	90,86	81,00	1,12
DKM41	2,46	-7,00	93,99	88,00	1,07
DKM42	2,47	-7,00	95,46	89,00	1,07
DKM43	2,48	-7,00	95,44	88,50	1,08
DKM44	2,58	-7,00	92,65	87,00	1,06
DKM45	3,16	-7,00	97,43	89,00	1,09
DKM46	2,28	-7,00	90,61	86,00	1,05
DKM47	2,19	-7,00	91,02	86,00	1,06
DKM48	2,35	-7,00	89,37	85,00	1,05
DKM49	2,32	-7,00	93,95	88,00	1,07
DKM50	2,14	-7,00	89,82	86,00	1,04
DKM51	2,08	-7,00	96,49	90,00	1,07

Tabel 14: Opbarstingsveiligheid rustfase

6.4 Opbarsting-voorkomende maatregelen

Spanningsbemaling

Om de opwaartse druk te verkleinen tijdens de bouwphase, is een optie om gebruik te maken van spanningsbemaling. De bemaling wordt aangelegd in de pleistocene zandlaag. Van belang is om te weten dat bemaling door middel van zuigen begrensd is met een maximale zuigafstand; dit is 7,1 meter.

Het maaiveld ter hoogte van het afvoerkanaal ligt op -4,5 meter NAP, het bemalingsniveau dient 0,30 meter onder de putbodem te liggen, dat is -7,4 meter NAP. Dit betekent dat de pompen een hoogte moeten overbruggen van 2,9 meter, dus het is toepasbaar.

Om efficiënt te bemalen dient het onttrekkingsdebiet berekend te worden. Dit resultaat geeft weer hoeveel water per uur uit het pleistoceen moet worden gepompt om de opwaartse druk voldoende te verlagen zodat geen opbarsting plaatvindt.

Om het onttrekkingsdebiet te berekenen zijn de volgende gegevens nodig **Ongeldige bron opgegeven.:**

Oppervlakte bouwput = $130 * 7 = 910 \text{ m}^2$

Stijghoogte pleistoceen = -3,3 m NAP

KD waarde zandpakket = $1300 \text{ m}^2/\text{dag}$

Hydraulische weerstand deklaag = 1000 dagen

Bemalingsniveau = -13,6 m NAP

Verschil stijghoogte en bemalingsniveau = $s(r) = -3,3 \text{ en } -7,4 = 4,1$

- $s(r) = \frac{Q}{2\pi kD} K_0 \frac{r}{\lambda}$
- $Q = \frac{2\pi kD s(r)}{K_0 \frac{r}{\lambda}}$
- $r = \text{straal bouwput} = \sqrt{\left(\frac{910}{\pi}\right)} = 17 \text{ m}$
- $\lambda = \sqrt{kD C} = \sqrt{1300 * 1000} = 1140 \text{ m}$
- $K_0 = \frac{17}{1140} = 0,014$
- Aflezen tabel 15 geeft waarde 4,72
- $Q = \frac{2\pi * 1300 * 4,1}{4,72} = 7095 \frac{\text{m}^3}{\text{dag}} = 296 \frac{\text{m}^3}{\text{uur}}$

K ₀ -waarden als functie van r/λ					
r / λ	K ₀	r / λ	K ₀	r / λ	K ₀
0,01	4,72	0,12	2,25	0,6	0,78
0,02	4,03	0,15	2,03	0,7	0,66
0,03	3,62	0,20	1,75	0,8	0,56
0,04	3,34	0,25	1,54	0,9	0,49
0,05	3,11	0,30	1,37	1,0	0,42
0,06	2,93	0,35	1,23	1,5	0,21
0,07	2,78	0,40	1,11	2,0	0,11
0,08	2,65	0,45	1,01	3,0	0,03
0,09	2,53	0,50	0,92	4,0	0,01
0,10	2,43				

Tabel 15: K₀-waarden als functie van r/λ

Er dient dus 296 m^3 water per uur omhoog gepompt te worden om te zorgen dat de ondergrond niet opbarst. Dit kan met behulp van één centrifugaalpomp met een onttrekkingsdebiet van 350 m^3 per uur.

Groutinjectie

Een groutinjectie is het inbrengen van grout om de grond te stabiliseren waarbij de stijfheid-, sterke-, en doorlatendheideigenschappen van de ondergrond verbeterd worden. Het grout bestaat uit een mengsel van cement en water in de verhouding 5:2. Het toepassen van groutinjecties heeft als gevolg dat de bodem verzwaard wordt. Op de locatie van het afvoerkanaal is dit zeer goed toepasbaar om de opbarstingsproblematiek te voorkomen.

Er zijn verschillende methoden voor groutinjectie:

Bodeminjectie: Hierbij worden de poriën in de ondergrond gevuld. Toepasbaar in zandgrond en grindgrond.

Jet-grouten: Hierbij wordt de ondergrond losgewoeld onder hoge druk en vermengd met grout: Toepasbaar in bijna elke ondergrond.

6.5 Deelconclusie

Om opbarsting te voorkomen is het nodig dat de neerwaartsdruk groter is dan de opwaartse druk. Om veiligheid te waarborgen moet dit minstens 1,1x groter zijn. In de huidige situatie is de neerwaartsdruk gemiddeld 1,28x groter op de locatie van het toekomstige afvoerkanaal. Zodra het afvoerkanaal gegraven wordt, wordt de neerwaartsdruk dermate verlaagd dat dit minder is dan de opwaartsdruk. Dit betekent dat bij het graven van een afvoerkanaal waarbij de dimensionering overeenkomt met de nieuwkerkertocht, opbarsting zal plaatsvinden. Om deze opbarsting te voorkomen, zullen maatregelen moeten worden getroffen. Hierbij kan gedacht worden aan spanningsbemaling. In de rustfase zal een meter water in het afvoerkanaal komen te staan met als gevolg extra neerwaartsdruk. Dit zorgt voor een neerwaartsdruk die groter is dan de opwaartse druk. Echter zal dit verschil niet 1,1x zo groot zijn. Hierdoor zal in de rustfase van het afvoerkanaal het risico op opbarsting te hoog zijn. Er zullen extra maatregelen nodig zijn om dit risico te verlagen naar een acceptabel niveau. Voorbeelden van deze maatregelen zijn, maaiveldverhoging rondom de oevers, plaatsen van betonnen bak of het toepassen van een groutinjectie.

7. Ontwerp varianten

Om te komen tot een beste wijze van afwatering van de piekberging Haarlemmermeer polder worden in dit hoofdstuk meerdere varianten gecreëerd. Deze varianten zijn zo ontwikkeld dat deze kunnen zorgen voor de afwatering van de piekberging. Hierbij zijn in de varianten zo veel mogelijk verschillende attributen te verwerken. Dit maakt elke variant uniek. Deze varianten zijn gecreëerd zodat deze in een later stadium naast elkaar kunnen worden gelegd en met elkaar worden vergeleken.

7.1 Betonnen bak variant

Een kostenbesparend uitgangspunt is om het afvoerkanaal zo praktisch mogelijk te ontwerpen. Hierbij is de nadruk gelegd op het optimaliseren van het afvoerkanaal waarbij de piekberging zo snel mogelijk kan afwateren. Een praktische toepassing van het afvoerkanaal is de betonnen bak variant, daarom is deze variant verder uitgewerkt. Bij de betonnen bak variant zal het binnenste deel van het afvoerkanaal bestaan uit betonlaag van 10 cm. Zie figuur 20 voor een impressie van de betonnen bak variant.

De afwatering van de piekberging Haarlemmermeer door middel van de betonnen bak variant onderscheidt zich van de andere varianten doordat het relatief eenvoudig voldoet aan de gestelde randvoorwaarden.

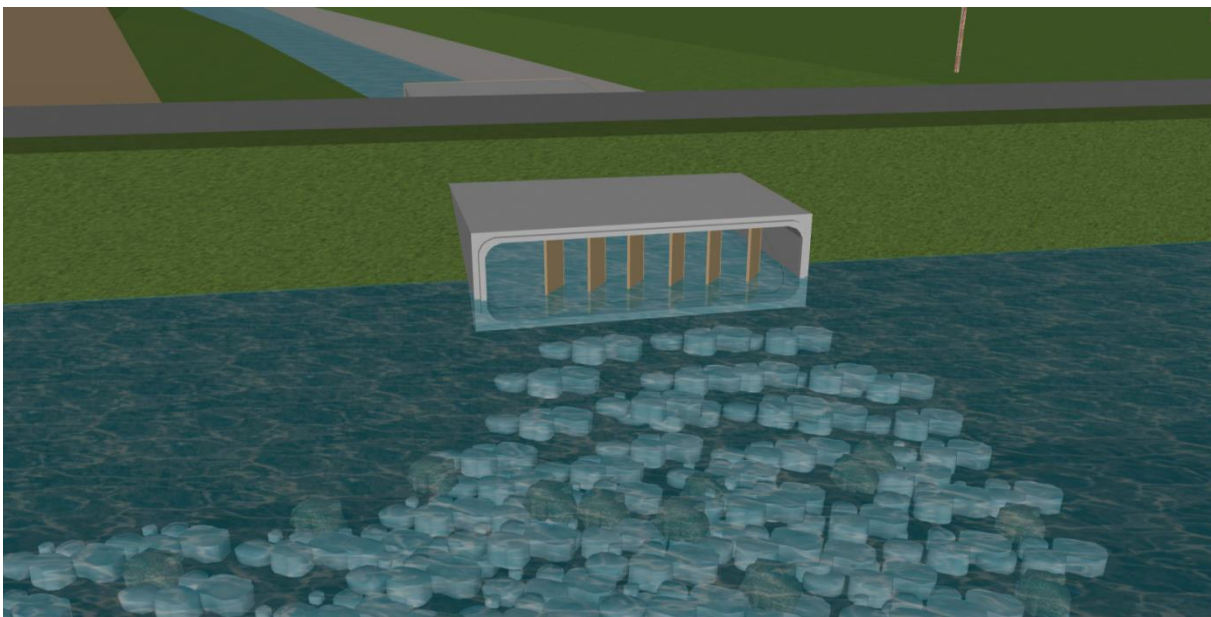


Figuur 20: Impressiebeeld betonnen bak variant

Hydrologische kenmerken

Door de robuustheid van beton is geen limiet aan de watersnelheid in de bak. Om deze reden is in deze variant uitgegaan van een legingstijd van de piekberging Haarlemmermeer in 2 dagen. Dit betekent dat de maximale watersnelheid, tijdens het legen van de piekberging, 1,256 m/s is (zie tabel 4).

In figuur 20 is te zien dat het afvoerkanaal haaks op de Hoofdvaart afwatert. Om het water richting gemaal de Leeghwater te sturen, zijn beweegbare schotten in de duiker gerealiseerd, zie figuur 21. De beweegbare schotten zijn toegevoegd aan de variant zodat het water niet loodrecht op de Hoofdvaart afwatert. De schotten staan onder een hoek van 45°. Een nevenfunctie van de schotten is dat het water niet direct op de overstaande oever botst, waardoor bespaard is op de oeverbescherming ten opzichte van afwatering zonder schotten (zie bijlage 1 en 2).



Figuur 21: Impressiebeeld duiker met schotten onder een hoek van 45°

Echter dient wel bodembescherming aangebracht te worden in de Hoofdvaart. Dit doordat hoge watersnelheden bereikt worden tijdens de leging. De bodembescherming dient een lengte van 19 meter en een breedte van 12 meter te hebben. (zie paragraaf 5.1.1).

Kijkend naar de opbarsting zullen er zich geen problemen voordoen. Dit komt door het soortelijk gewicht van beton. Dit is zwaar genoeg om te zorgen dat de neerwaartsedruk minimaal met een factor 1,1 groter is dan de opwaartse druk (zie tabel 16).

Sondering	Benodigde afgravingsdiepte	Maaiveld	Neerwaartsedruk (kN/m ³)	Opwaartse druk (kN/m ³)	Opbarsting veiligheidsfactor
DKM36	2,4	-7	314,96	88,0	3,58
DKM37	2,36	-7	316,16	89,0	3,55
DKM38	2,57	-7	314,96	88,0	3,58
DKM39	2,61	-7	312,22	86,0	3,63
DKM40	3,24	-7	307,73	83,0	3,71
DKM41	2,56	-7	311,71	86,0	3,62
DKM42	2,57	-7	312,91	87,0	3,60
DKM43	2,58	-7	313,16	86,5	3,62
DKM44	2,68	-7	310,34	85,0	3,65
DKM45	3,26	-7	313,76	87,0	3,61
DKM46	2,38	-7	309,48	84,0	3,68
DKM47	2,29	-7	309,82	84,0	3,69
DKM48	2,45	-7	308,28	83,0	3,71
DKM49	2,42	-7	312,22	86,0	3,63
DKM50	2,24	-7	309,14	84,0	3,68
DKM51	2,18	-7	314,96	88,0	3,58

Tabel 16: Opbarstisico met betonnen bak

7.2 Natuurlijke variant

Mens en natuur zijn onophoudelijk met elkaar verbonden. Dit heeft geresulteerd in een variant waar de nadruk gelegd is op het verbeteren van de natuur- en ecologiewaarden in de zuidpunt van de Haarlemmermeerpolder. Deze variant onderscheidt zich ten opzichte van de andere varianten in de mogelijkheden tot verbetering van de natuurwaarden in het gebied. Zie figuur 22 voor een impressie van de natuurlijke variant.

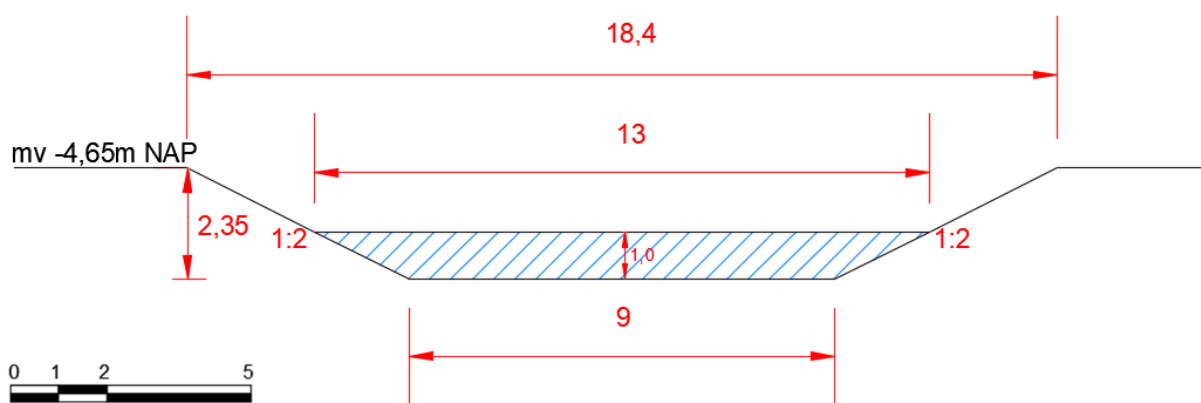


Figuur 22: Impressiebeeld natuurlijke variant

Hydrologische kenmerken

Zoals te zien is in figuur 22 buigt het afvoerkanaal af. De bocht in het afvoerkanaal is aangelegd om het water tijdens de leging van de piekberging Haarlemmermeer richting gemaal de Leeghwater te sturen en heeft een boogstraal van 55 meter. Door deze boogstraal te hanteren is het mogelijk om de bestaande bushalte te laten staan.

Om optimaal gebruik te maken van de groeimogelijkheden van de natuur is het van belang een lage stroomsnelheid te behouden. De lage stroomsnelheid is gewaarborgd door het verbreden van het afvoerkanaal. In de natuurlijke variant is de bodembreedte van het afvoerkanaal 6 meter breder dan de betonnen bak variant. Dit zorgt voor een stroomsnelheid van maximaal 0,29 m/s. Met deze stroomsnelheid is de piekberging Haarlemmermeer gelegegd in 5 dagen. Zie figuur 23 voor de afmetingen van het afvoerkanaal in de natuurlijke variant.



Figuur 23: Afmetingen afvoerkanaal natuurlijke variant

Bodem- en oeverbescherming

Wanneer de natuurlijke variant niet verbreedt wordt en de piekberging leegt in 5 dagen, is de maximale stroomsnelheid in het afvoerkanaal (op basis van SOBEK-berekening) 0,6 m/s. In deze variant is gekozen om de stroomsnelheid laag te houden waardoor erosiebestendige maatregelen uitgespaard worden. Om het gebruik van deze maatregelen te voorkomen, is de maximale toelaatbare snelheid in het afvoerkanaal 0,3 m/s.

Om een watersnelheid te handhaven, tijdens de leging van de piekberging, van 0,3 m/s, dient het afvoerkanaal met 6 meter verbreed te worden ten opzichte van de betonnen bak variant. Dit maakt de bodembreedte van het afvoerkanaal in totaal 9 meter. De stroomsnelheid van het water bij een bodembreedte van 9 meter is 0,29 m/s (SOBEK-berekening).

Opbarsting

De piekberging Haarlemmermeer wordt gerealiseerd met een gesloten grondbalans. Uit de ontgravingen komt totaal 320.000 m³ grond vrij. De kades rondom de piekberging hebben in totaal een volume van 229.000 m³. Dit betekent dat 109.000 m³ grond over is (mits overal 30 cm van het maaiveld afgegraven kan worden) (Offermans, 2018).

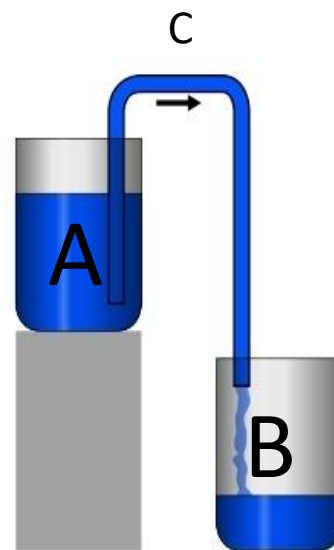
Van dit grondoverschot kunnen de kades aan weerszijden van het afvoerkanaal gerealiseerd worden. Dit heeft een gunstig effect ten aanzien van de veiligheid tegen opbarstingsgevaar. De spreiding van deze extra belasting in de ondergrond kan worden berekend aan de hand van de elasticiteitstheorie.

7.3 Hevel variant

Wat is hevelen

Het principe van hevelen is een vloeistof laten stromen van bak A naar bak B. Doormiddel van een buis waarbij de vloeistof boven het oppervlak van bak A stroomt en vervolgens naar bak B stroomt, die lager is gelegen, zonder hulp van een motor of pomp (zie figuur 24). De stroming in de buis wordt aangedreven door de val van het water onder invloed van de aantrekkingskracht van de aarde (zwaartekracht).

De vloeistof aan de uitgangszijde (bak B) wordt door de zwaartekracht naar beneden getrokken wat voor een verminderde druk zorgt aan de bovenkant van de hevel (punt c). De atmosferische druk ¹ kan vervolgens de vloeistof uit bak A bergopwaarts de buis in duwen. Door de constante stroming (aangedreven door de zwaartekracht) trekt de buis zich vacuüm. Door dit principe zal het water onophoudelijk door de buis blijven stromen tot een evenwicht wordt bereikt tussen beide bakken of de situatie zich voordoet waarbij lucht in de buis terecht komt met als gevolg dat het vacuüm trekken verloren gaat.



Figuur 24: Principe hevelen

Toepasbaar

Het principe van hevelen kan ook bij de piekberging van de Haarlemmermeerpolder worden toegepast. De reden waarom hevelen hier mogelijk is, komt doordat het waterpeil van de piekberging hoger ligt dan het waterpeil van de Hoofdvaart. Om het water van bak A (piekberging) naar bak B (Hoofdvaart) te verplaatsen, moet het water bergopwaarts stromen. Hierbij dient het water over de kade van de piekberging te stromen om vervolgens naar beneden af te wateren in de Hoofdvaart (zie figuur 25-28).



Figuur 25: Impressiebeeld hevelvariant

¹ Hydrostatische druk die vloeistoffen en gasen uitoefenen op voorwerpen

Hydrologische aspecten

Als wordt gekozen om de hevel variant toe te passen, dan is het van belang dat de deze variant de afwatering van de piekberging aan kan. Dit betekent dat de hevels een debiet van 1.000.000m³ in 2 tot 5 dagen moeten kunnen afvoeren. Om de dimensionering van de hevels te bepalen kan de formule $Q=v*A$ worden gebruikt. Op basis van de formule van Bernoulli kan de stroomsnelheid van het water in de hevel worden berekend, bij deze berekening is de weerstand in de buis niet is meegerekend. Voor de watersnelheid in de hevel is de volgende formule gebruikt:

$$V = \sqrt{2 * g * h}$$

Waarin:

V = stroomsnelheid in de buis in m/s

g = zwaartekracht (9,81 m/s²)

h = waterhoogte verschil

Hieruit volgt:

$$V = \sqrt{2 * 9,81 * (-2.4 - -6)} = 8,4 \text{ m/s}$$

De gemiddelde snelheid die door het drukverschil tussen de waterlichamen word veroorzaakt, zal rond de 8,4 m/s bedragen.

Op basis van de snelheid en het debiet kan de doorsnede ofwel de oppervlakte(A) van de buis worden berekend die voor de gewenste afvoer kan zorgen. In tabel 17 hieronder is de straal berekend die benodigd is om af te wateren binnen 2 tot 5 dagen met een watersnelheid van 8,4 m/s. Hierbij is de straal berekend voor het hevelen waarbij zowel 1, 2 als 3 buizen worden toegepast.

Dagen	Debiet (Q in m ³ /s)	oppervlak hevel (A in m ²)	Diameter 1 hevel (in meter)	Diameter 2 hevels (in meter)	Diameter 3 hevels (in meter)
2	5,89	0,70	0,94	0,67	0,55
3	3,96	0,47	0,77	0,55	0,45
4	2,99	0,36	0,67	0,48	0,39
5	2,41	0,29	0,61	0,43	0,35

Diameter 4 hevels (in meter)	Diameter 5 hevels (in meter)	Diameter 6 hevels (in meter)	Diameter 7 hevels (in meter)	Diameter 8 hevels (in meter)	Diameter 9 hevels (in meter)	Diameter 10 hevels (in meter)
0,47	0,42	0,39	0,36	0,33	0,31	0,30
0,39	0,35	0,32	0,29	0,27	0,26	0,24
0,34	0,30	0,27	0,25	0,24	0,22	0,21
0,30	0,27	0,25	0,23	0,21	0,20	0,19

Tabel 17: Aantal benodigde hevels

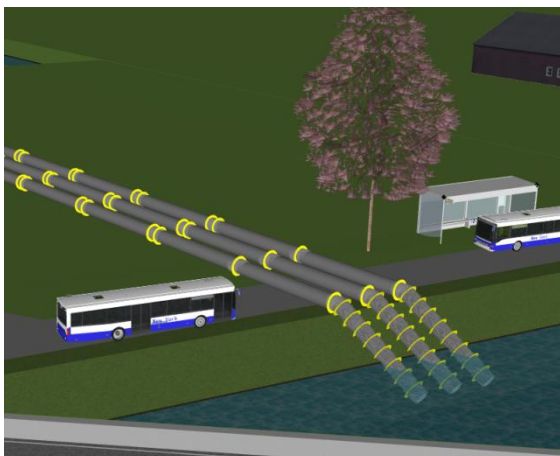
Zoals te zien is kan het afwateren van de piekberging bereikt worden met buisdiameters die variëren tussen de 0,94 meter en 0,19 meter. Hierbij is de grootste benodigde diameter van de buis nodig onder voorbehoudt dat de piekberging in 2 dagen afwatert en dat hier één buis voor wordt toegepast. De kleinste diameter die in de tabel hierboven berekend is, is in de situatie waarbij 5

dagen wordt gebruikt om de piekberging te legen. In deze situatie zijn 10 buizen toegepast die vervolgens allen een diameter van 19 cm nodig hebben.

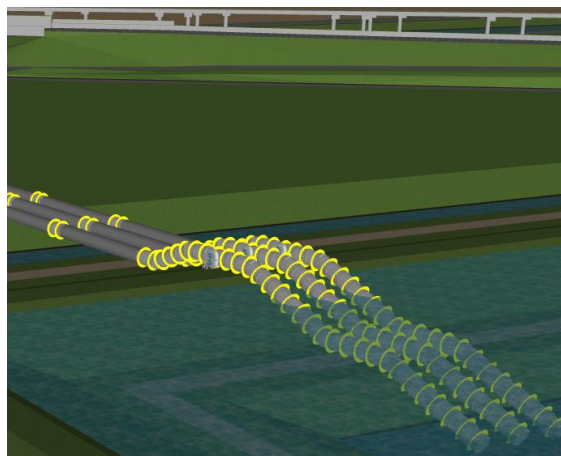
Voor- en nadelen

Het grootste voordeel van het toepassen van de hevel variant ligt in de kosten. Dit komt omdat er geen afvoerkanaal aangelegd is om de piekberging te legen. Het aanleggen van het afvoerkanaal heeft grote voordelen aangezien geen grondverzet nodig is voor het afvoerkanaal. Dit scheelt vervolgens ook in de onderhoudskosten die komen te vervallen. Daarnaast wordt de opbarsting problematiek die aanwezig is op de locatie van het afvoerkanaal volledig vermeden aangezien geen afvoerkanaal hoeft worden gegraven.

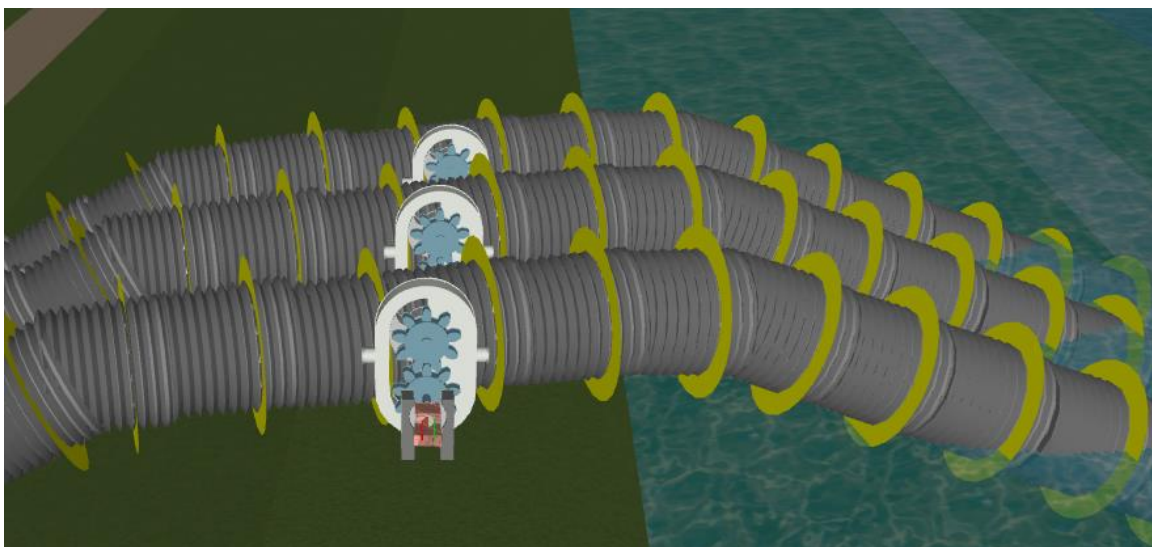
Het nadeel van de hevel variant is dat zodra de piekberging in gebruik is en deze geleegd moet worden, de hevels handmatig moeten worden aangelegd. Hierdoor kost de hevel variant gemiddeld één keer in de 15 jaar zowel mankracht als tijd. Vervolgens moeten de hevels op gang worden gebracht. De hevels dienen eerst vacuüm te zuigen zodat de buis zich volledig kan vullen met water. Hiervoor is een pomp vereist. Ook is deze afwateringsvariant in strijd met de wens dat het afwateren van de piekberging op afstand bedienbaar moet zijn. Dit is niet het geval omdat de buizen handmatig worden aangelegd en de pompen op locatie worden geactiveerd. Ook wordt de kortste route voor het afwateren van de Nieuwkerkertocht geblokkeerd. Hierdoor zal het water een alternatieve weg moeten vinden om af te wateren op de Hoofdvaart.



Figuur 28: Impressiebeeld hevelvariant



Figuur 28: Impressiebeeld hevelvariant



Figuur 28: Impressiebeeld hevelvariant

7.4 Taludwerkendevariant

Bij de laatste variant die beschreven wordt, ligt de focus op de opbarstingsgevoeligheid. Door aan weerszijden van het afvoerkanaal de oever op te hogen, ontstaat genoeg neerwaartsedruk zodat geen opbarsting meer plaats vindt. Er is gestreefd om een afvoerkanaal te ontwerpen waarbij te allen tijde het mechanisme opbarsting voorkomen wordt, zonder dat extreme maatregelen zijn toegepast. Het uitsluiten van opbarsting-voorkomende maatregelen zijn, kijkend naar de kosten, interessant. Om de taludvariant nog kosten-interessanter te maken is gestreefd naar een maximale watersnelheid in het afvoerkanaal lager dan 1,0 m/s. Dit is namelijk de snelheid waarbij kleibekleding erodeert (zie paragraaf 5.1.1, figuur 15).

De afwatering van de piekberging Haarlemmermeer door middel van de taludvariant onderscheidt zich van de andere varianten door de kleine ingreep die nodig is om deze variant te realiseren en het bijbehorende 'relatief' lage kostenplaatje. Zie figuur 29 voor een impressie van de taludvariant.

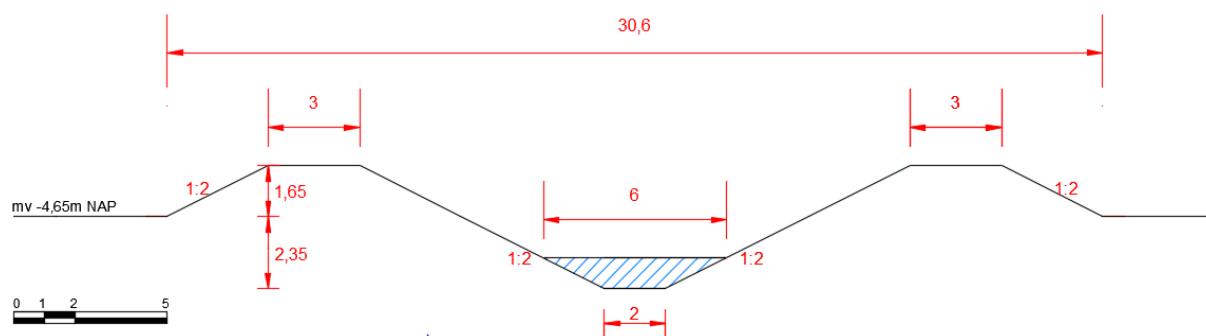


Figuur 29: Impressiebeeld taludvariant

Hydrologische kenmerken

Net als de betonnen bak variant watert het afvoerkanaal loodrecht af op de Hoofdvaart. Zoals te zien is in figuur 29 bevat de duiker in deze variant geen schotten. Dit is het directe gevolg van de stroomsnelheid in het afvoerkanaal, die onder de 1,0 m/s dient te zijn.

De meeste optimale stroomsnelheid en de daarbijhorende legingstijd van de piekberging zijn berekent aan de hand van SOBEK. De stroomsnelheid die in deze variant gehandhaafd is tijdens leging van het bergingsgebied is 0,89 m/s. Met deze afvoersnelheid is de piekberging leeg binnen 3,5 dagen. Voor de berekening in SOBEK is de dimensionering van het afvoerkanaal gebruikt volgens figuur 30.



Figuur 30: Afmetingen afvoerkanaal taludvariant

Bodem- en oeverbescherming

Door de lage watersnelheid in het afvoerkanaal is de bodem- en oeverbescherming uitgespaard mits de bodembekleding bestaat uit klei. Klei heeft de eigenschap om te eroderen bij watersnelheden van $> 1,0 \text{ m/s}$ (zie figuur 15 Hjulström-curve I). Deze variant is gedimensioneerd waarbij de watersnelheid maximaal $0,9 \text{ m/s}$ bedraagt. Daarom voldoet enkel de kleibekleding.

Opbarsting

Om de opbarstgevoeligheid te berekenen is gebruikt gemaakt van de opbarst-exceltabel van Hoogheemraadschap Rijnland, gebaseerd op de formules van Grau. Zie bijlage 6 voor de bijbehorende exceltabel. De simplistische methode om de opwaartse- en neerwaartsedruk met elkaar te vergelijken gaat in dit geval niet op. Doordat het afvoerkanaal ten opzichte van de andere varianten een smalle bodembreedte heeft, zorgen de taluds aan weerszijden van het afvoerkanaal voor een neerwaartsedruk die zich zo in de bodem verspreidt, dat dit invloed heeft op de neerwaartsedruk te midden van het afvoerkanaal.

Om te zorgen dat de opbarstingsfactor gelijk of groter is dan 1,1, zijn in de exceltabel de grondlagen geïnterpreteerd van sondering DKM48. Dit omdat gebleken is dat deze sondering de meest ongunstige bodemopbouw heeft, kijkend naar opbarstingsgevoeligheid, zie bijlage 5. Hieruit is gebleken dat de bodembreedte maximaal 2 meter mag zijn met een diepteligging van -7 m NAP. Ook dient een ophoging geplaatst te worden op het maaiveld. Deze ophoging dient 1,65 meter hoog te zijn waarbij een talud van 1:2 wordt gehandhaafd (zie figuur 30).

8. Multicriteria-analyse

Bij een Multicriteria-analyse (MCA) worden de effecten van een variant systematisch via een aantal criteria getoetst. In het geval van de piekberging Haarlemmermeer zijn deze criteria onderscheiden in legingstijd, ecologische gebruikswaarde, persoonlijke wensen en kosten. Criteria die in onderstaande paragrafen behandeld worden, krijgen een weging gebaseerd op onderlinge afwegingen tussen de criteria. De varianten worden vervolgens beoordeeld op de criteria waarna deze wordt samengevoegd met de wegingsfactor. Hieruit volgt het resultaat waarbij de variant met de hoogste score, de beste variant is ten opzichte van de andere varianten.

8.1 Criteria

Kosten

Het kostenoverzicht is beoordeeld aan de hand van een Life Cycle Costing (LCC) analyse. LCC is een methodiek voor het in kaart brengen van de financiële kosten van een product die investeringskosten, beheers- en onderhoudskosten en sloopkosten onderling vergelijkbaar maakt. In het project 'afwatering piekberging Haarlemmermeer' is de LCC-methodiek gebruikt om een kostenindicatie te geven voor de oplossingsmaatregelen voor de gestelde randvoorwaarden per variant over een tijdspanne van 50 jaar.

<i>Kosten tabel</i>	Betonnen bak variant	Natuurlijke variant	Hevel variant	Taludwerkende variant
Opbarstingsmaatregelen	€12,500.-	€490,000.-	€0.-	€0.-
Bodem- en oever bescherming	€15,000.-	€0.-	€0.-	€0.-
Graafkosten	€22,400.-	€39,400.-	€0.-	€19,600.-
Aanlegkosten	€31,450.-	€15,000.-	€37,500.-	€15,000.-
Beheer en onderhoud	€3,000.-	€24,500.-	€10,000.-	€24,500.-
Sloopkosten	€53,850.-	€54,400.-	€0.-	€34,600.-
Totaalkosten per variant	€138,200.-	€623,300.-	€47,500.-	€93,700.-

Tabel 18: Kostentabel

De kosten van de varianten die te zien zijn in de bovenstaande tabel (tabel 18), zijn op een provisorische wijze berekend. Hierbij is een schatting gemaakt van de verwachte kosten zodat enkel een indruk van de totale kosten gemaakt kan worden. Onder de kosten van de opbarstingsmaatregelen, vallen de kosten van bemaling en groutinjecties. Deze kosten zijn respectievelijk toegedeeld aan de betonnen bak variant en de natuurlijke variant. De kosten in de bodem- en oeverbescherming zijn afkomstig van maatregelen zoals stortsteen en/of houten damwanden. De graafkosten zijn berekend op basis van het aantal kuub grondverzet dat nodig bij het graven van het afvoerkanaal. In de aanlegkosten staat een indicatie weergegeven van de materiële kosten die nodig zijn bij de betreffende variant, denk hierbij aan een duiker, brug, hevels, betonnen bak. Onder beheer- en onderhoudskosten worden de jaarlijkse kosten van baggeren, maaien en controleren van materieel meegenomen, gedurende een tijdspanne van 50 jaar. De toegekende sloopkosten van de varianten zijn op basis van de kosten die nodig zijn om materieel te verwijderen en benodigde grondverzet om het afvoerkanaal terug te vullen tot zijn originele staat.

Legingstijd

Voor het criterium legingstijd geldt de volgende definitie: Een snelle legingstijd betekent dat de piekberging Haarlemmermeer binnen een korter tijdsbestek opnieuw ingezet kan worden om overtollig water te bergen. Er wordt gekeken welke legingstijd toebehoort aan bepaalde watersnelheden in het afvoerkanaal en het gevolg hiervan. Bij dit criterium wordt een snelle legingstijd positiever beoordeeld dan een lange legingstijd.

Ecologische gebruikswaarde

Het criterium ecologische gebruikswaarde is beoordeeld op aanwezige natuur en welke kansen het afvoerkanaal de natuur biedt. Wordt er meer natuur toegepast om bepaalde diersoorten terug te krijgen of deze meer kans te bieden voor voortplanting, dan wordt een hogere score toegekend. In het water kan hierbij gedacht worden aan visschuilplaatsen en paaipplaatsen. Op het land wordt gekeken naar bepaalde planten en riet soorten om die terug te halen om zo schuilplaatsen te creëren.

Infrastructuur

De mate van infrastructuur is beoordeeld op de verwachte belemmering op bevordering die de variant kan veroorzaken. Hierbij is gekeken naar wegen die geblokkeerd worden door aanleg van de variant. Als een weg voor een langdurige periode afgesloten dient te worden, dan zal een variant slechter scoren op Infrastructuur.

Bedrijfsvoering

Naast dat de piekberging moet afwateren, heeft het Hoogheemraadschap van Rijnland nog andere wensen. Hierbij kan gedacht worden aan de wens voor een afwatersysteem dat volledig op afstand controleerbaar is. Voldoet een variant aan de wensen van het Hoogheemraadschap, dan zullen hoge scores worden toegekend aan de betreffende variant. Voldoet een variant niet aan bepaalde eisen, zullen minder punten aan deze variant worden toegekend.

8.2 Wegingsfactoren

Voor het opstellen van de MCA is het gebruikelijk om een wegingsfactor per criterium te gebruiken. Ten behoeve van het bepalen van deze wegingsfactor, is in een scoretabel het belang van criteria ten opzichte van elkaar weergegeven. De scores van het onderlinge belang resulteert in een totale wegingsscore per criterium. Indien het ene criterium belangrijker gevonden wordt dan het criterium waartegen het afgewogen wordt, krijgt het hoogst gewaardeerde criterium een waarde 7 en het laagst gewaardeerde criterium een waarde 1. Indien de criteria gelijkwaardig zijn, wordt aan beiden een waarde 4 toegekend. Het totaal aantal punten dat een criterium, na weging met de andere criteria, toegekend krijgt, wordt de totale wegingsscore voor die variant.

Criterium	Kosten	Legingstijd	Ecologisch gebruikswaarde	Infrastructuur	Bedrijfsvoering	Totaal score
Kosten	n.v.t	5	6	7	3	21
Legingstijd	3	n.v.t	6	7	3	19
Ecologisch gebruikswaarde	2	2	n.v.t	5	2	11
Infrastructuur	1	1	3	n.v.t	1	6
Bedrijfsvoering	5	5	6	7	n.v.t	23

Tabel 19: Wegingsscore per criterium

Om de totaalscores in realistische wegingsfactoren uit te drukken, zijn de totaalscores gedeeld door zeven en afgerond op hele getallen. Op deze manier zijn de definitieve wegingsfactoren per criteria tot stand gekomen. Zie tabel 20 voor de criteria met uiteindelijke wegingsfactoren.

Criteria	Wegingsfactor
Kosten	3
Leginstijd	3
Ecologisch gebruikswaarde	2
Infrastructuur	1
Bedrijfsvoering	3

Tabel 20: Definitieve wegingsfactoren

8.3 Criteria beoordeling

Om te bepalen welke variant het meest optimaal is, is in dit hoofdstuk de Multicriteria-analyse uitgevoerd. Er is een waarde gehecht aan de eerder genoemde criteria, per variant. Er is gekozen om de waarde van een criterium uit te drukken in + of -. Dit omdat dit zorgt voor homogene eenheden per criteria. In de tabellen hier onder zijn de criteria weergegeven met de daarbijhorende beoordeling.

Bedrijfsvoering	Symbool
zeer goed	+++
goed	++
voldoende	+
geen effect	0
onvoldoende	-
slecht	--
zeer slecht	---

Tabel 23: Bedrijfsvoering beoordeling

Kosten (in euro's)	Symbool
> €50.000	+++
€50.000 - €100.000	++
€100.000 - €200.000	+
€200.000 - €300.000	0
€300.000 - €400.000	-
€400.000 - €500.000	--
> €500.000	---

Tabel 23: Kosten beoordeling

Ecologische gebruikswaarde	Symbool
sterk stimulerend	+++
redelijk stimulerend	++
matig stimulerend	+
geen effect	0
matig voorkomend	-
redelijk voorkomend	--
sterk voorkomend	---

Tabel 23: Ecologische gebruikswaarde beoordeling

Infrastructuur	Symbool
sterk bevorderend	+++
redelijk bevorderend	++
matig bevorderend	+
geen effect	0
matig belemmerend	-
redelijk belemmerend	--
sterk belemmerend	---

Tabel 24: Infrastructuur beoordeling

Leginstijd (in dagen)	Symbool
2	+++
2,5	++
3	+
3,5	0
4	-
4,5	--
5	---

Tabel 23: leginstijd beoordeling

Op basis van de beoordeling van de criteria van de bovenstaande tabellen kunnen de varianten worden beoordeeld. In de tabel hieronder (tabel 26) is te zien hoe goed een variant scoort op een criteria. Zo is bijvoorbeeld te zien dat de betonnen bak variant goed beoordeeld is op leginstijd en bedrijfsvoering en negatief op de ecologische gebruikswaarde.

	Betonnen bak variant	Natuurvariant	Hevelvariant	Taludwerkende variant
Kosten	+	---	+++	++
Leginstijd	+++	---	+++	0
Ecologisch gebruikswaarde	---	+++	0	++
Infrastructuur	-	--	-	-
Bedrijfsvoering	+++	+++	---	+

Tabel 24: variant beoordeling

Om de beoordeelde varianten te koppelen aan de wegingsfactor van de criteria, moet de beoordeling eerst worden vertaald naar getallen. De laagste beoordeling, namelijk “---”, heeft het laagste cijfer (-3) gekregen. De hoogste beoordeling “+++” staat gelijk aan het cijfer 3 (zie tabel 27).

Beoordeling	Waarde
+++	3
++	2
+	1
0	0
-	-1
--	-2
---	-3

Tabel 25: Vertaling beoordeling score

De variant beoordeling uit tabel 26 wordt vervolgens met behulp van tabel 27 vertaald tot MCA scores per variant (tabel 28). Door deze stap is het mogelijk om de wegingsfactor toe te passen op de beoordeling.

	Betonnen bak variant	Natuur variant	Hevel variant	Taludwerkende variant
Kosten	1	-3	3	2
Leginstijd	3	-3	3	0
Ecologisch gebruikswaarde	-3	3	0	2
Infrastructuur	-1	-2	-1	-1
Bedrijfsvoering	3	3	-3	1

Tabel 26: MCA scores per variant (exclusief wegingsfactor)

8.4 Resultaten

Om te komen tot een resultaat waarbij de beste wijze van afwatering van de piekberging blijkt, moeten de criteria beoordelingen en de wegingen worden samengevoegd. Hieruit ontstaat een resultatentabel (tabel hieronder 29) waarbij de varianten goed presteren op de belangrijkste criteria, veel punten krijgen. De variant die het beste scoort is uiteindelijk de variant die leidt tot een goede afwatering van de piekberging Haarlemmermeerpolder.

	Weging	Betonnen bak variant	Natuurlijke variant	Hevel variant	Taludwerking variant
Kosten	3	3	-9	9	6
Legingstijd	3	9	-9	9	0
Ecologisch gebruikswaarde	2	-6	6	0	4
Infrastructuur	1	-1	-2	-1	-1
Bedrijfsvoering	3	9	9	-9	3
Totaal score		14	-5	8	12

Tabel 27: MCA definitief

In de tabel hierboven is te zien dat de betonnen bak variant de hoogste score weet te behalen met een totaalscore van 14 punten. Deze variant scoort hoog vanwege de hoge behaalde punten in de legingstijd en aan hoe goed deze variant voldoet aan de wensen van het Hoogheemraadschap Rijnland.

De variant die als 2^e uit de bus komt met een score dichtbij de nummer 1, is de taludwerking variant. Deze variant verliest het van de betonnen bak variant met een verschil van 2 punten. Het opmerkelijk aan deze variant is dat deze op geen enkele criteria slecht scoort. Hierbij komt kijken dat deze variant prima scoort op de kosten en de ecologische gebruikswaarde in verhouding met de andere varianten.

De hevel variant heeft uiteindelijk een totaalscore van 8 punten. Deze uiteindelijke score is te danken aan de lage kosten en de snelle legingstijd die deze variant heeft. Echter omdat deze variant niet volledig op afstand bestuurbaar is, scoort deze variant slecht op de bedrijfsvoering van Rijnland.

De natuurlijke variant scoort uitermate slecht met een negatieve score van -5. Deze lage score is te danken aan de hoge kosten die nodig zijn om deze variant te realiseren en aan de lange legingstijd die nodig is bij deze variant. Hierdoor heeft de natuurlijke variant de laagst mogelijke score behaald op deze criteria. Dit zijn tevens de criteria die zwaar mee tellen. Wel scoort de natuurlijke variant maximaal op de ecologische gebruikswaarde en het voldoen aan wensen. Dit is echter niet genoeg voor de natuurlijke variant om een positieve score te behalen.

9. Conclusie

Zoals blijkt uit de resultaten van de Multicriteria-analyse, is de variant die het beste geschikt is voor de afwatering van de piekberging Haarlemmermeer de betonnen bak variant. Door het plaatsen van een betonnen bak in het afvoerkanaal wordt aan de meeste randvoorwaarden optimaal voldaan.

Er hoeft geen rekening meer te worden gehouden met de stroomsnelheid in het afvoerkanaal tijdens het legen. Dit houdt in dat de maximale stroomsnelheid van 0,3m/s overschreden mag worden in het afvoerkanaal. Dit geldt niet voor de maximale stroomsnelheid in de Hoofdvaart.

De hoogste stroomsnelheid die echter voor komt in de Hoofdvaart als gevolg van afwatering ligt rond de 0,2m/s. Hierdoor kan de piekberging met een hoger debiet afwateren. De piekberging kan door het toepassen van een afvoerkanaal met een betonnen bak een legingstijd van 2 dagen realiseren. Hierbij is 2 dagen de minimale legingstijd waarbij de limitaties liggen op de microstabiliteit van de kades. Door het plaatsen van beweegbare schotten in de duiker van het afvoerkanaal kan de richting van het water worden beïnvloed.

Dit scheelt aanzienlijk voor het plaatsen van bodem- en oeverbescherming. Echter zal nog wel breuksteen op de bodem van de Hoofdvaart op locatie van het afvoerkanaal nodig zijn. Daarnaast is het noodzakelijk om tegenover het afvoerkanaal nog een vorm van oeverbescherming te plaatsen. Omdat de precieze impact op de oever van de Hoofdvaart niet volledig bekend is, kan hiervoor het beste een damwandenrij geplaatst worden.

Tijdens de realisatie van de betonnen bak variant zal zonder het toepassen van maatregelen opbarsting van de ondergrond optreden. Om op deze locatie opbarsting te voorkomen zullen opbarstingsvoorkomende maatregelen getroffen moeten worden. Hierbij zou het uitvoeren van spanningsbemaling een geschikte optie zijn. In de rustfase van het afvoerkanaal zal door de hoge neerwaartsedruk van de betonnen bak geen sprake meer zijn van gevaar op opbarsting. Door het toepassen van de een betonlaag in het afvoerkanaal, zullen de kosten van de het afvoerkanaal echter wel stijgen.

10. Discussie en aanbeveling

De conclusie dat de betonnen bak variant als beste afwateringswijze uit de Multicriteria-analyse komt, is in overeenstemming met de verwachtingen van het Hoogheemraadschap van Rijnland. Onze verwachting ging echter uit naar de taludvariant. De verklaring voor dit resultaat is de criteria beoordeling. De criteria waar de betonnen bak variant het hoogst op scoort (legingstijd en wenselijkheid) hebben de hoogste weging toegekend gekregen.

Het advies voor vervolgonderzoek is dan ook om een onderzoek te doen waarbij een specifieke weging wordt gehangen aan de criteria. Op deze manier kan met meer duidelijkheid gezegd worden wat de totaalscores per variant zijn. Wellicht blijkt dan dat een andere variant op de eerste plaats komt. Daarnaast dient vervolgonderzoek gedaan te worden naar de microstabiliteit van de kades rondom de piekberging Haarlemmermeer. Wanneer blijkt dat de microstabiliteit voldoet bij een waterstandsding van meer dan 1 meter per dag, kan de legingstijd van de piekberging aangescherpt worden tot onder de 2 dagen. Ook dient nader onderzoek gedaan te worden naar de mogelijkheden van het afwateren door het gebruikmaken van de doorlaten in de Nieuwkerkertocht. Dit is optimalisatieslag en kan wellicht zorgen voor een snellere leging van de piekberging. Tot slot dient nader gekeken te worden naar de bodembescherming in de Hoofdvaart. De afmetingen liggen vast. Echter kan wellicht een lichtere steensoort gebruikt worden in de afstand van de bodembescherming.

Nawoord

Het schrijven van deze scriptie hebben wij als erg interessant en leerzaam ervaren. Wij zijn trots op het resultaat en blij dat we de laatste fase tijdens onze opleiding met een goed gevoel kunnen afronden.

Het plan wat wij in januari hadden bedacht was om een optimaal uitlaatsysteem te ontwerpen voor de afwatering van de piekberging Haarlemmermeer. Echter sloten we met deze hoofdvraag een paar randvoorwaarden uit. Het was een lastige puzzel om tot de goede hoofd- en deelvragen te komen maar het is gelukt.

Door de wekelijkse koffiepraatjes met het IPM-team, waar wij deel van uitmaakten, zijn we precies te weten gekomen wat het Hoogheemraadschap van Rijnland belangrijk vindt en waar ze voor staan. De bevindingen en resultaten uit ons onderzoek zijn bedoeld om het Hoogheemraadschap van Rijnland van informatie en alternatieve mogelijkheden te voorzien betreffende het definitieve ontwerp van het afvoerkanaal.

Tijdens het afstudeerproces zijn we vaak tegen vaktechnische problemen aangelopen. Gelukkig waren altijd collega's bereid om ons te helpen. We hebben veel geleerd van het afgelopen half jaar. Naast de opgedane vakkennis hebben we veel samengewerkt met collega's waardoor onze omgang met collega's op de werkvloer verbeterd is. Ook hebben we geleerd om minder afwachtend te zijn. We stappen nu makkelijker af op collega's.

Roel Brouwer

Ruben Baars

Leiden, 16 mei 2018

Bibliografie

Aalsburg, v. (sd). *Een beschoeiing bestaande uit palen*.

Albrecht, E. (sd). *Haarlemmermeerpolder*. Opgeroepen op Februari 19, 2018, van De Nederlandse Gemalen Stichting:
<http://www.gemalen.nl/download/verhalen/De%20Haarlemmermeerpolder.pdf>

Balsters, A. (2018, Maart 7). (R. Baars, Interviewer)

Bekecke. (sd). *Beschoeiing voor oevers en woonboten*.

Biesma, J. (sd).

Biesma, J. (2018, Februari 14). Informatie watersysteem. (R. Baars, & R. Brouwer, Interviewers)

BV, I. (sd). *Oeverconstructies*.

Fugro Geoservices B.V. (2016). *Geotechnisch onderzoek Piekberging Haarlemmermeer*.
Leidschendam: Fugro Geoservices B.V.

Geocoaching. (sd). Opgehaald van http://coolgeography.co.uk/A-level/AQA/Year%2012/Rivers_Floods/Long%20profile/Hjulstrom.htm

Hoogheemraadschap Rijnland. (sd). *Rijnland*. Opgehaald van Rijnland.net:
<https://www.rijnland.net/plannen/home-plannen-piekberging/haarlemmermeerpolder>

Interprovinciaal Overleg. (1999). *IPO-Richtlijn ter bepaling van het veiligheidsniveau van boezemkaden*. Den Haag: Interprovinciaal Overleg.

Koning, I. N. (1991). *Toegpaste vloeistofmechanica*. Halsteren: Educaboek.

Nederlandse Gemalen Stichting. (sd). *De Nederlandse Gemalen Stichting*. Opgehaald van NGE:
http://www.gemalen.nl/gemaal_detail.asp?gem_id=1165

Offermans, J. (2018). *Grondbalans piekberging Haarlemmermeer*. Leiden.

Rijkswaterstaat. (sd). *Betonblokken van basalt*.

Rijnland. (sd). *Rijnland*. Opgehaald van <https://www.rijnland.net/over-rijnland/organisatie/kentallen>

RIO. (2013). *Piekberging Haarlemmermeer*. Leiden: W.A. Matla.

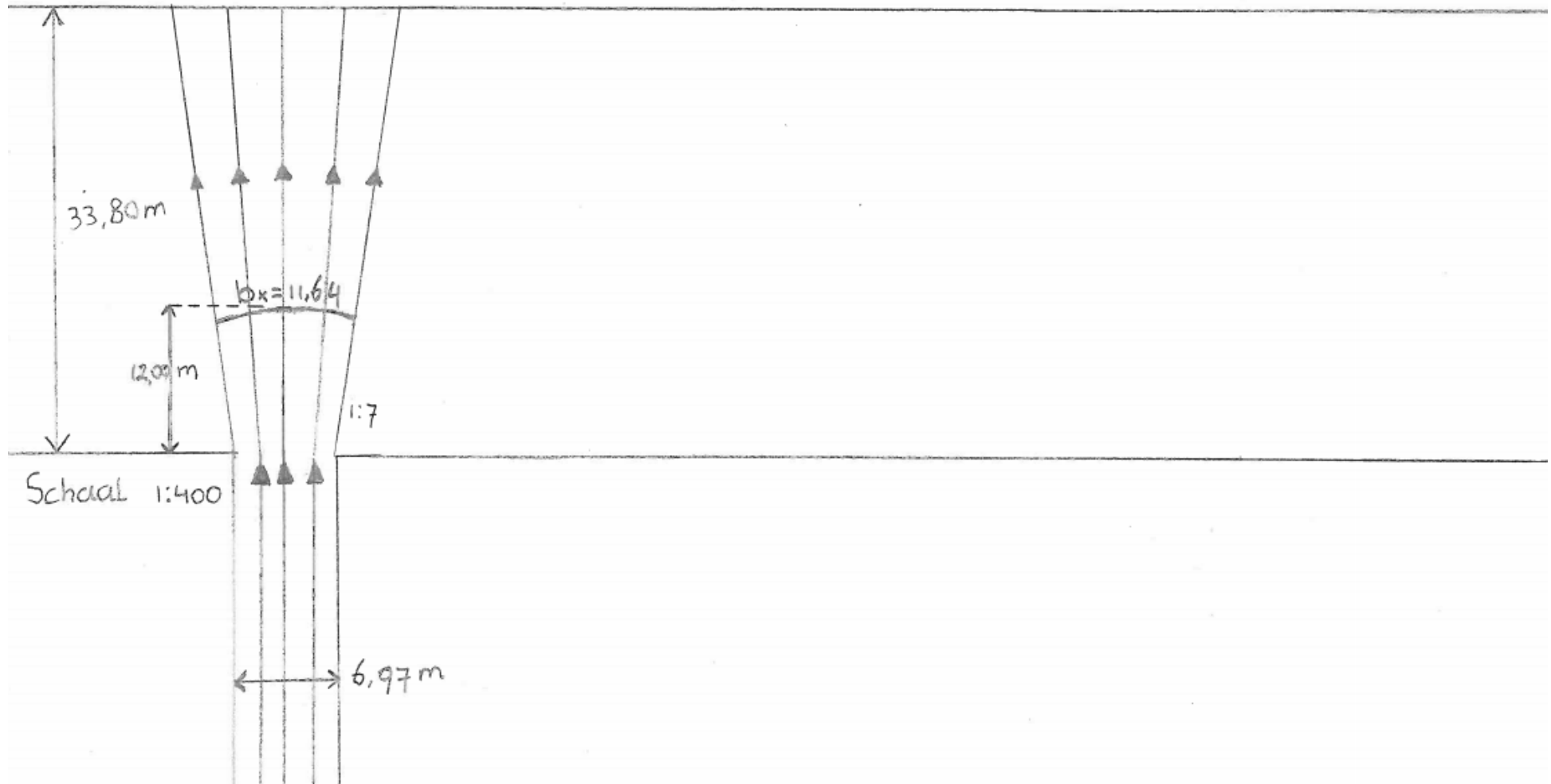
Vree, J. d. (2018, mei 29). *Piping*. Opgehaald van Joostdevree:
<http://www.joostdevree.nl/shtmls/piping.shtml>

waterschappen, U. v. (2015). *Leidraad Toetsen Veiligheid Regionale Waterkeringen*. Amersfoort: Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer.

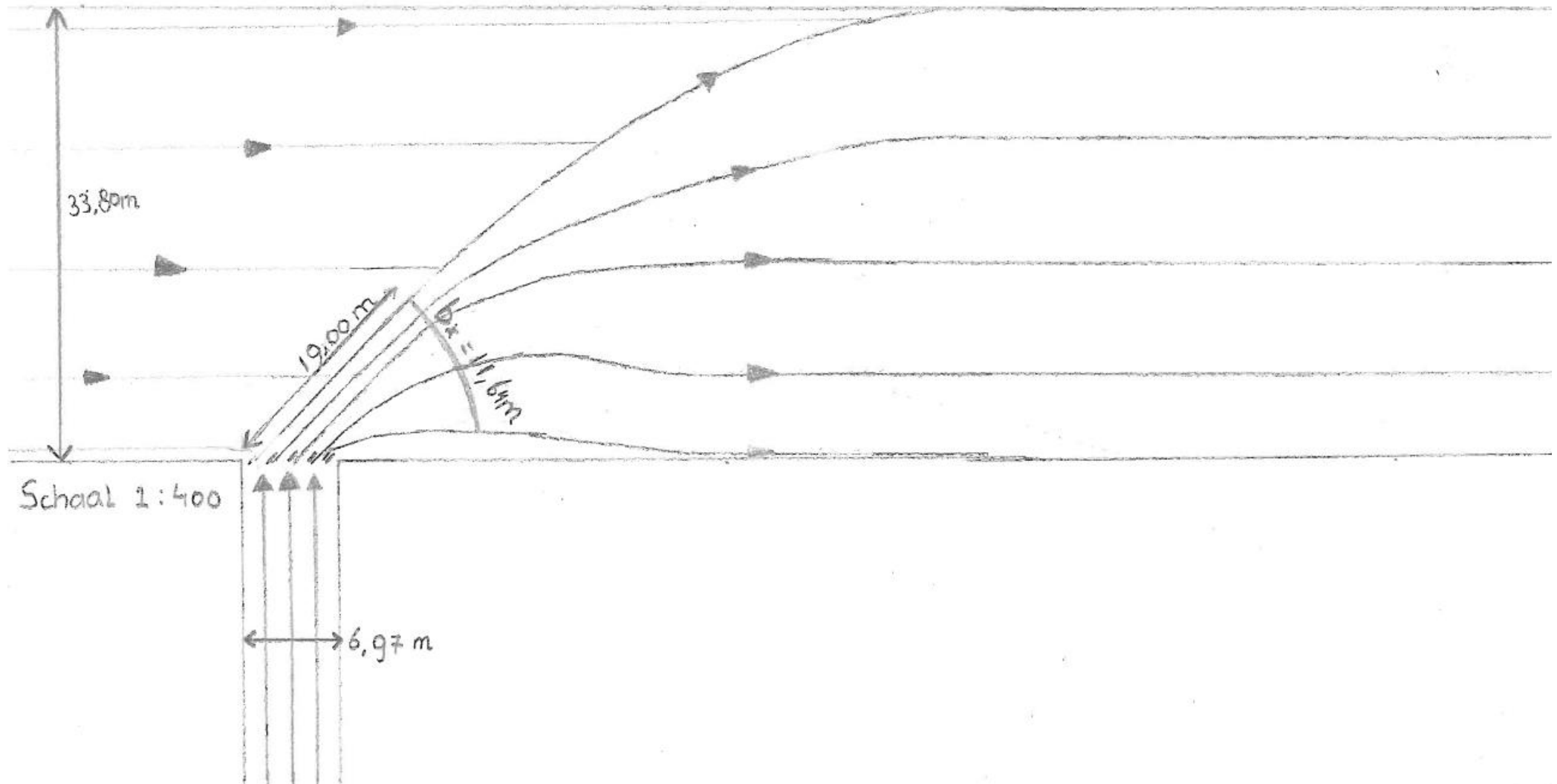
Witteveen+Bos. (22 december 2017). *Piekberging Haarlemmermeer PvE*. Deventer: W+B.

Bijlagen

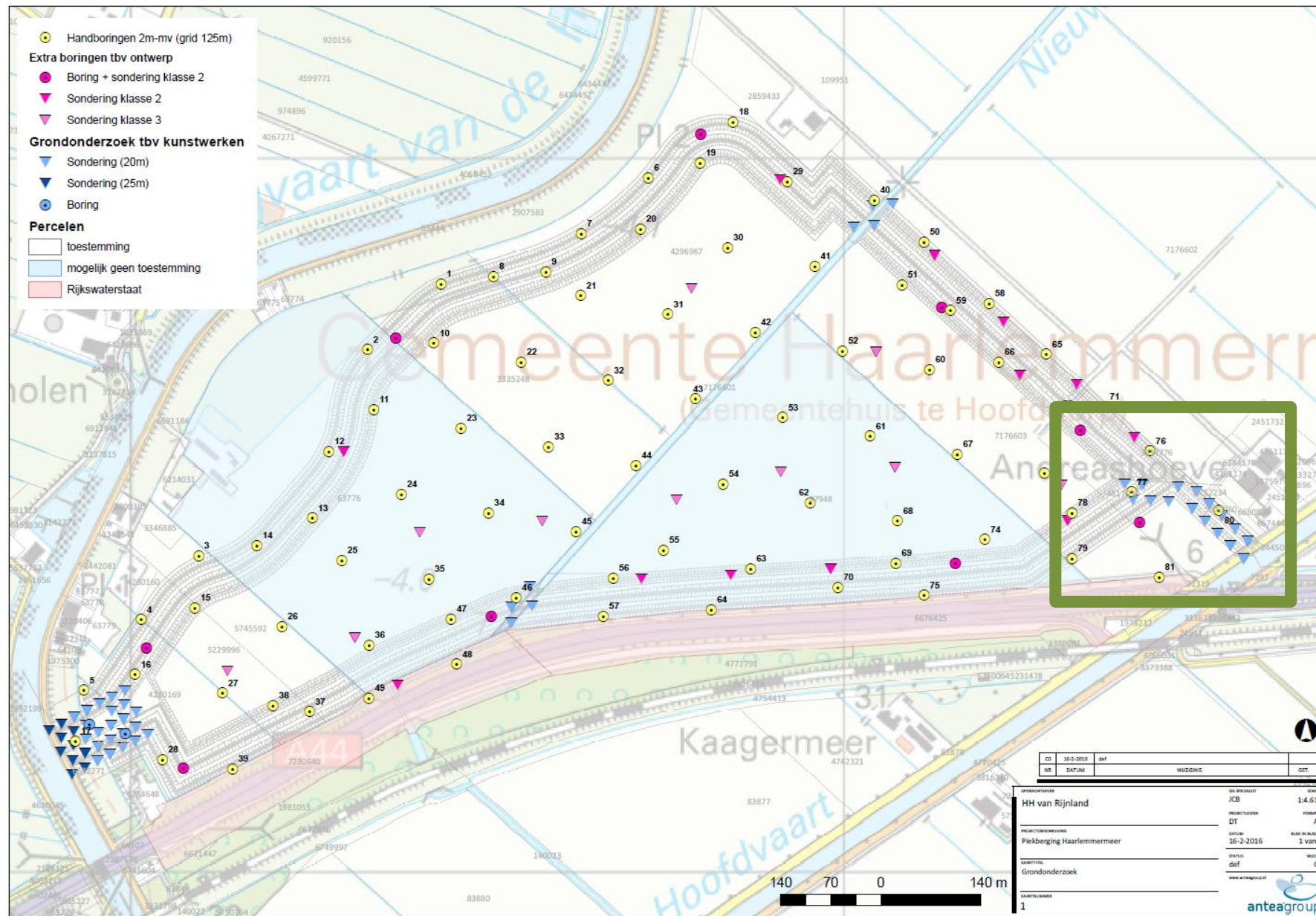
Bijlage 1: Stroomschema, afvoerkanaal watert loodrecht af op Hoofdvaart



Bijlage 2: Stroomschema, afvoerkanaal watert in een hoek van 45° af op Hoofdvaart



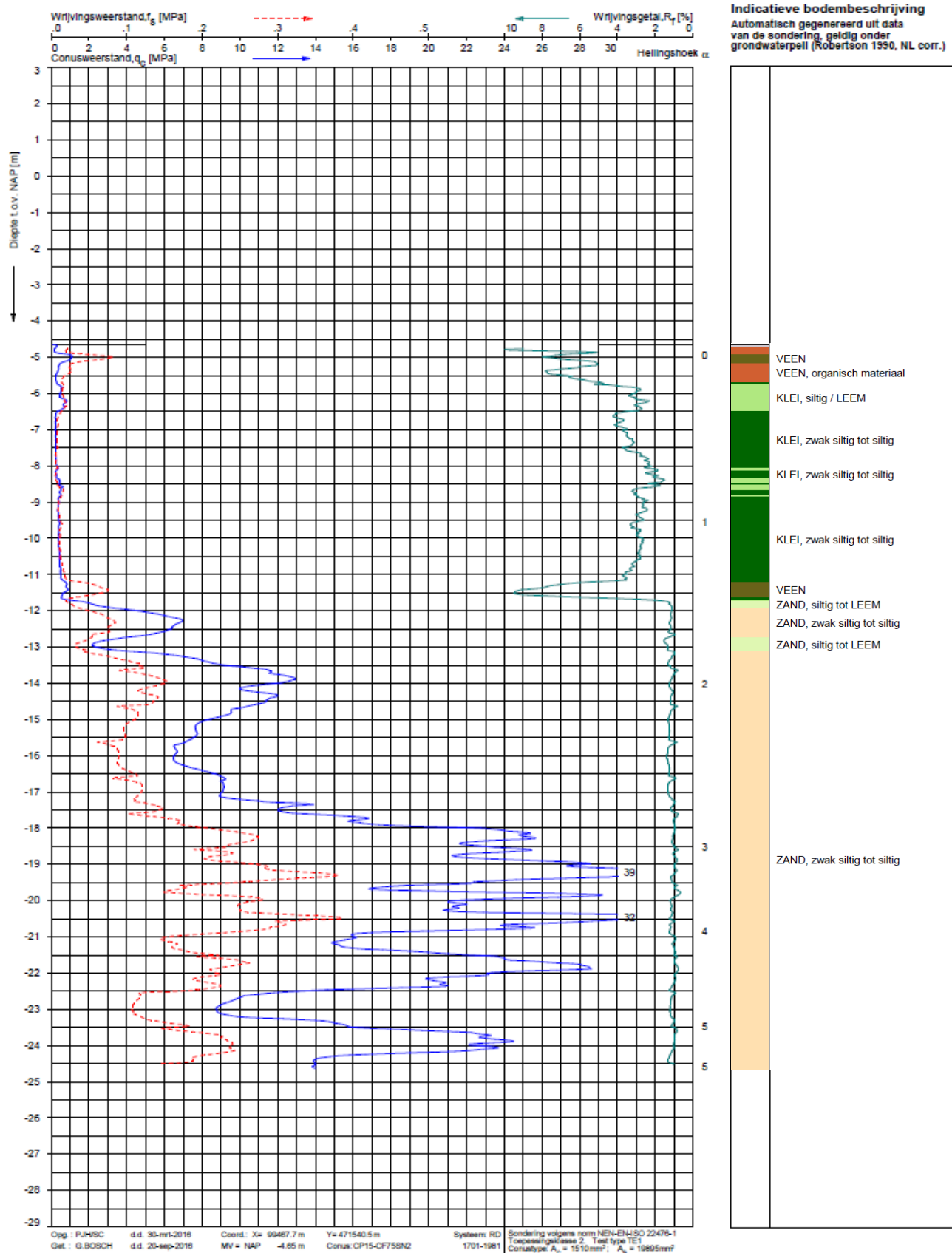
Bijlage 3: Kaart met sonderingen



Bijlage 4: Kaart met sonderingen



Bijlage 5: Sondering DKM48



Bijlage 6: Excel sheet opbarsting met taludwerking

Volumegewichten [kN/m3]

Basisveen	12
beton	25
Klei (humeus)	13,3
Klei (siltig)	15,4
Zand	19

Stijghoogte -3,1 m NAP

In geval van afgraving / watergang

Bodemhoogte	-7 m NAP
Waterdiepte	1 m
Talud, 1:	2 -
Bodembreedte	2 m
Volumegewicht water	10 kN/m3

a	8 m
b	1 m
d2	4,6 m
f	0,23 -

Bodemlaag	Bovenkant [m NAP]	Onderkant [m NAP]	Dikte [m]	Samenstelling
1	-3	-4,65	1,7	Klei (siltig)
2	-4,65	-5,59	0,9	Klei (humeus)
3	-5,59	-5,7	0,1	Klei (siltig)
4	-5,7	-6	0,3	Klei (siltig)
5	-6	-7	1,0	Klei (siltig)
6	-7	-7,2	0,2	Klei (siltig)
7	-7,2	-11,3	4,1	Klei (siltig)
8	-11,3	-11,6	0,3	Basisveen
9	-11,6			
10				

Profiel

Met afgraving/watergang

Neerwaarts	Neerwaarts onder		Neerwaarts boven	
	dikte	gewicht	dikte	gewicht
25,41	0,0	0,0	1,7	25,4
12,502	0,0	0,0	0,9	12,5
1,694	0,0	0,0	0,1	1,7
4,62	0,0	0,0	0,3	4,6
15,4	0,0	0,0	1,0	15,4
3,08	0,2	3,08	0,0	0,0
63,14	4,1	63,14	0,0	0,0
3,6	0,3	3,6	0,0	0,0

som neerwaarts
som opwaarts
veiligheid

129,446
85,0
1,5

93,6
85,0
1,10

59,626

69,82