

Stabiliteit bodem en waterkeringen

Voorverkenning gebiedsontwikkeling Alem

Lijst met aanpassingen

Versie	Datum	Beschrijving van de wijziging
C1.0	11-03-2022	Concept versie
D1.0	23-06-2022	Definitieve versie n.a.v. review

Verantwoording

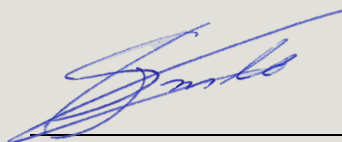
Titel Stabiliteit bodem en waterkeringen
Onderwerp Alem diverse onderzoeken
Projectnummer 51006865
Klant Dekker Grondstoffen B.V.
Referentienummer NL22-648800269-26476
Versie D1.0

Datum 23-06-2022

Auteur Martijn Peters
E-mailadres waterbouw@sweco.nl



Gecontroleerd door Frank Smorenborg
Paraaf gecontroleerd



Vrijgegeven door Marc Everaars
Paraaf vrijgegeven



Inhoudsopgave

1.	Inleiding	4
1.1	Achtergrond	4
1.2	Doel	4
1.3	Gevraagde onderzoeken	5
1.4	Onderzoeksaspecten	5
2.	Uitgangspunten	7
2.1	Normen en richtlijnen.....	7
2.2	Veiligheidsfilosofie	7
2.3	Ontwerp en bodemopbouw	8
2.4	Hydraulische belasting	12
3.	Methodiek	15
3.1	Macrostabiliteit.....	15
3.2	Piping.....	16
3.3	Grasbekleding	18
3.4	Verwekings- en bresvloeiing	18
4.	Pipingopgave traject 39-1.....	20
5.	Stabiliteit zandwinput.....	22
5.1	Afschuiven	22
5.2	Verwekingsvloeiing.....	22
5.3	Bresvloeiing.....	25
5.4	Maatregelen.....	26
6.	Effect zandwinning op dijk.....	30
6.1	Stabiliteit buitenwaarts	30
6.2	Piping.....	30
6.3	Stabiliteit binnenwaarts	31
7.	Erosie door golfslag.....	32
7.1	Effect winning op golfhoogte	32
7.2	Golfafslag van voorland.....	35
7.3	Maatregelen.....	36
8.	Effect verplaatsen haven	37
8.1	Stabiliteit buitenwaarts	37
8.2	Piping.....	38
8.3	Stabiliteit binnenwaarts	40
8.4	Effect op grasbekleding dijk	41
9.	Effect getijdengeul	42
9.1	Stabiliteit buitenwaarts	42
9.2	Piping en stabiliteit binnenwaarts	43
9.3	Ontwerp en vervolgstappen	43
10.	Conclusie en aanbevelingen	45
10.1	Pipingopgave.....	45
10.2	Zandwinput	45
10.3	Verplaatsen haven.....	46
10.4	Getijdengeul	46
11.	Referenties	47

1. Inleiding

1.1 Achtergrond

Voor de gebiedsontwikkeling Alem-St Andries wordt een MIRT-onderzoek uitgevoerd dat inzicht moet geven in de volgende vragen:

- Is er een gezamenlijke gebiedsontwikkeling mogelijk waarin meerdere opgaven verwezenlijkt worden, en is zandwinning in de Marensche Waarden daar onderdeel van?
- Is een dergelijke gebiedsontwikkeling ook haalbaar en realiseerbaar, in termen van financiering, draagvlak en uitvoerbaarheid?

Op grond van dit onderzoek nemen de betrokken partijen een besluit over een vervolg voor nadere uitwerking (MIRT-verkenning).

De eerste stap van het onderzoek was het inventariseren van opgaven en aandachtspunten. Hiervoor is informatie verzameld, in overleg met een projectgroep en een klankbordgroep. Vanuit beide groepen zijn aanvullende vragen gesteld, waarbij met name de vragen van de klankbordgroep zich richten op de effecten van zandwinning.

In een regulier planproces komen de gestelde vragen over de effecten van maatregelen op de omgeving pas in een later stadium aan bod. Het is de wens van de betrokken partijen om hier niet op te wachten, maar om nu een tussenstap te nemen met aanvullend onderzoek.

Opdrachtgever verwacht als uitkomst van de onderzoeken meer inzicht te krijgen in de haalbaarheid en uitvoerbaarheid van de zandwinning, en andere mogelijke maatregelen in het kader van de gebiedsontwikkeling.

1.2 Doel

Middels de te voeren aanvullende onderzoeken wil opdrachtgever alvast voor enkele onderdelen duidelijkheid verkrijgen over de veiligheid voor de omgeving, de haalbaarheid en uitvoerbaarheid en daarmee de kans op vergunbaarheid. Opdrachtgever wil graag aandachtspunten aangeleverd zien met betrekking tot deze uitgangspunten om tot een gedegen ontwerp te komen.

Opgemerkt wordt dat het detailniveau van het aanvullend onderzoek niet gelijk is aan dat van een MER, omdat de planvorming op dit moment nog niet concreet genoeg is.

1.3 Gevraagde onderzoeken

De gevraagde onderzoeken hebben betrekking op de volgende disciplines:

- geohydrologie;
- oppervlaktewaterkwaliteit;
- geotechniek (stabiliteit bodem en waterkeringen).

In voorliggend rapport worden de resultaten van het onderzoek naar de stabiliteit van bodem en waterkeringen (geotechniek) gepresenteerd.

1.4 Onderzoeksaspecten

In tabel 1.1 zijn de onderzoeksaspecten met betrekking tot de geotechniek vermeld met een verwijzing naar de betreffende paragrafen.

Tabel 1.1 Onderzoeksaspecten geotechniek

Hoofdonderdeel	Subonderdeel	Onderzoeksvragen	Sub-onderzoeksvragen	Paragraaf	Beknopt antwoord
Effecten van de grondstoffenwinning	Stabiliteit bodem en waterkering	Wat zijn de effecten van de ontzanding op de stabiliteit van de waterkering?		6.1 t/m 6.3	Ontgraving heeft geen invloed op stabiliteit van de waterkering.
		Wat is het effect van de ontzanding op de bodemstabiliteit?	Wat is het effect op de macrostabiliteit?	5.1	Een talud van 1:4 voor de put is stabiel.
			Wat is het effect op de verwekingsvloeiing?	5.2	Er is een hoog risico op verwekingsvloeiing.
			Wat is het effect op de bresvloeiing?	5.3	Er is een klein risico op bresvloeiing.
		Onder welke randvoorwaarden dient de ontzanding plaats te vinden om de bodemstabiliteit te garanderen?		5.4	Door uitvoeringsmaatregelen te treffen.
		Met welke maatregelen/werkwijze kunnen de effecten geminimaliseerd worden?		5.4	Aanvullende onderzoeken, maatregelen tijdens de uitvoering of verflauwing taludhelling.
	Golfslag	Met welke maatregelen/werkwijze kunnen de effecten geminimaliseerd worden?		7.3	Bekleding aanbrengen op de oever. De afslag van voorland is gering, dus enkel herstel is voldoende.
Effecten van de getijdengeul	Algemeen	Zijn er aanbevelingen om de uitgangspunten te verbeteren?		9.3	Houd 1,5 m dikke deklaag onder geul aan en voer aanvullende onderzoeken uit.

Hoofdonderdeel	Subonderdeel	Onderzoeksvragen	Sub-onderzoeksvragen	Paragraaf	Beknopt antwoord
	Stabiliteit waterkering	Wat zijn de effecten van de vergraving voor een getijdengeul op de stabiliteit van de waterkering? Is de maatregel vergunbaar? Zo nee, hoe is deze vergunbaar te maken?		9.1 t/m 9.3	Getijdengeul ligt ver genoeg weg, daardoor waarschijnlijk geen effect op stabiliteit.
		Met welke maatregelen/werkwijze kunnen de effecten geminimaliseerd worden?		9.3	Voldoende dikke deklaag (>1,5 m).
Effecten van verplaatsing haven	Stabiliteit waterkering	Wat zijn de effecten van de vergraving voor een haven op de stabiliteit van de waterkering? Is de maatregel vergunbaar? Zo nee, hoe is deze vergunbaar te maken?		8.1 t/m 8.4	Groot effect, voornamelijk op piping. Het is vergunbaar door deklaag te garanderen op de havenbodem of door pipingscherm aan te brengen.
		Met welke maatregelen/werkwijze kunnen de effecten geminimaliseerd worden?		8.1 t/m 8.2	Meest effectief is door op voldoende afstand van de teen te graven.

2. Uitgangspunten

2.1 Normen en richtlijnen

De berekeningen van de zandwinput en het effect op de waterkering worden uitgevoerd conform de vigerende normen en richtlijnen:

- CUR-aanbeveling 113: Oeverstabiliteit bij zandwinputten [11]
- WBI 2017¹ [9]

2.2 Veiligheidsfilosofie

De zandwinput dient veilig en stabiel ontworpen te worden. Dit is uitgevoerd conform de CUR-aanbeveling 113. Bij het ontwerp dient de waterveiligheid van het dijklichaam gegarandeerd te worden, hiervoor is gebruik gemaakt van het WBI 2017. Voor elk dijktraject een norm vastgesteld. De dijk rond Alem is normtraject 39-1, de dijk ten westen van de gebiedsontwikkeling is onderdeel van normtraject 38-2. Voor beide trajecten is de ondergrens vastgesteld op 1/3.000 per jaar [1].

Op basis van de faalkansbegroting is een faalkansruimte voor de diverse toetssporen bepaald. De faalkansruimte voor de relevante toetssporen zijn hieronder weergegeven in Tabel 2-1. Vanwege het verschil in lengte tussen beide trajecten verschillen de doorsnede-eisen.

Tabel 2-1 Faalkansruimte per toetsspoor

Toetsspoor	Toegestane bijdrage aan faalkans [%]	Faalkansruimte [1/jaar]	Doorsnede-eis traject 39-1 [1/jaar]	Doorsnede-eis traject 38-2 [1/jaar]
Piping (STPH)	24	1/12.500	1/90.864	1/349.372
Macrostabiliteit binnenwaarts (STBI)	4	1/75.000	1/307.742	1/1.075.511
Grasbekleding erosie buitentalud (GEBU)	5	1/60.000	1/30.774	1/107.551

Afslag van het voorland zal niet direct leiden tot falen van de dijk. Voor de afslag van het voorland is voornamelijk relevant wat de te verwachten schade is. Daarom worden berekeningen voor de afslag van het voorland gedaan bij een storm met een terugkeertijd van 10 jaar en 100 jaar.

¹ In deze fase wordt gekeken naar de haalbaarheid van het ontwerp waaronder de effecten van het ontwerp op de huidige waterkering. Het effect op de huidige situatie van de waterkering wordt daarom beschouwd conform het WBI 2017.

2.3 Ontwerp en bodemopbouw

In deze paragraaf wordt het principeontwerp en de bodemopbouw beschreven van de diverse onderdelen van de gebiedsontwikkeling nabij Alem.

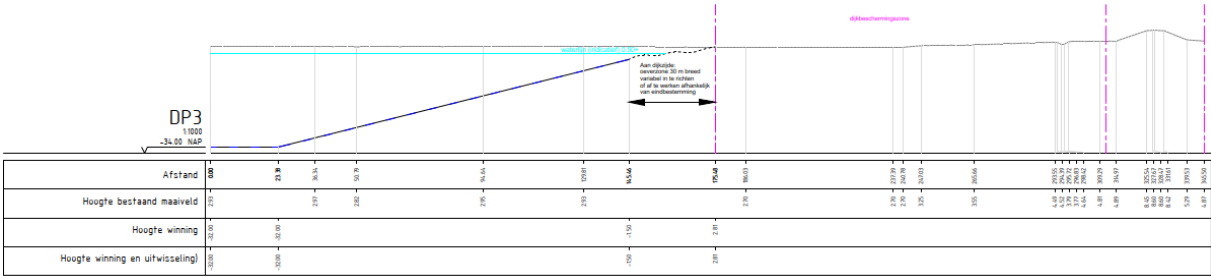
2.3.1 Zandwinput

Voor de zandwinning wordt het voorland ten noordwesten van Alem ontgraven, zoals is weergegeven in Figuur 2-1. Er zijn twee varianten ontworpen waarbij enkel de inrichting in het noordoostelijke deel van de zandwinput varieert. De exacte inrichting in het noordoostelijke deel heeft geen effect op de stabiliteit. Beide varianten zijn in Appendix 1 weergegeven.



Figuur 2-1 Locatie zandwinput nabij Alem. Ontgraving zandwinput aangegeven met zwarte lijnen, oeverzone in groen en de dijk rond Alem met rood. De locatie van dwarsdoorsnede 3 (DP3), zie Figuur 2-2, is aangegeven met de blauwe stippellijn

Het huidige voorland varieert van NAP +1,0 m tot NAP +7,0 m. Onder een taludhelling van 1:4 wordt de zandwinput gegraven tot een diepte van NAP -32,0 m. De putdiepte is dus 33 m tot 39 m. Een doorsnede van de zandwinput is gegeven in Figuur 2-2, dit is dwarsprofiel 3 (DP3). De locatie van DP3 is met een blauwe stippellijn aangegeven in Figuur 2-1.

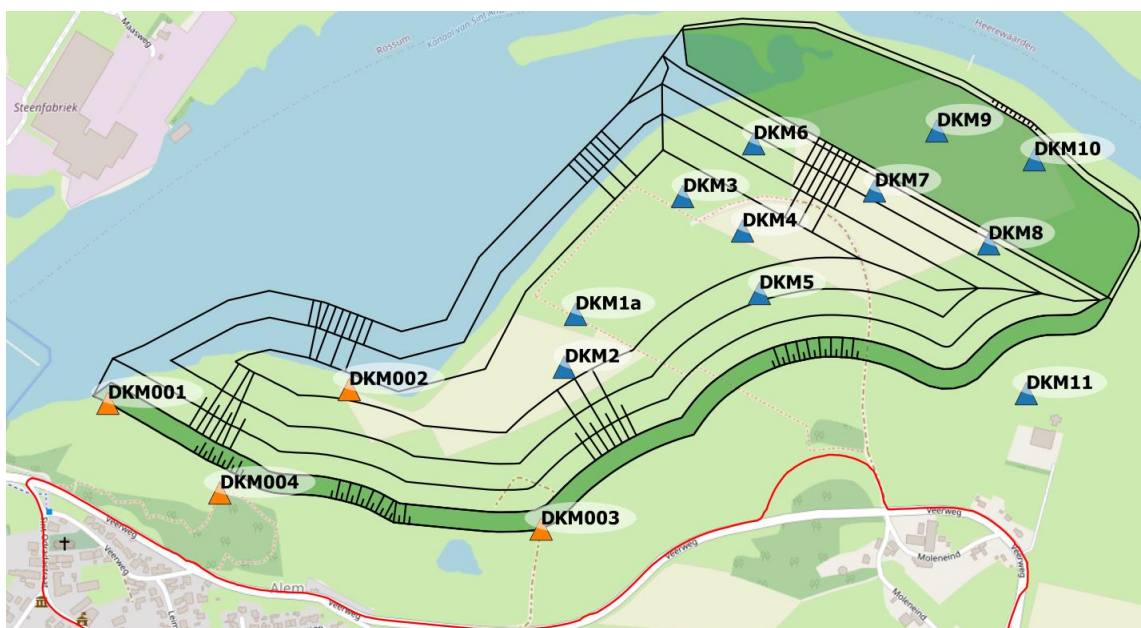


Figuur 2-2 Dwarsprofiel 3

Tussen de zandwinput en de waterkering rondom Alem, is een oeverzone van 30 m vastgesteld dat grenst aan de beschermingszone van de dijk. Deze beschermingszone beslaat circa 150 m vanaf de kruin van de dijk. Net binnen de beschermingszone komt mogelijk een zomerkade met daarop een fietspad.

De zomerkade heeft een hoogte van NAP +4,6 m, een breedte van 5,0 m en een helling van 1:5.

In 2007 is door Fugro grondonderzoek uitgevoerd [2]. Hierbij zijn sonderingen en boringen uitgevoerd en zijn korrelverdelingen gemaakt. Deze sonderingen en boringen zijn alleen in het noordelijke deel van de huidige variant van de zandwinput uitgevoerd. Om meer inzicht te krijgen in de bodemopbouw in het zuidelijke deel van de ontgraving zijn in 2022 vier aanvullende sonderingen uitgevoerd tot een diepte van circa NAP -49 m [3]. In combinatie met de aanvullende sonderingen is genoeg bekend over de bodemopbouw om de analyses voor deze fase uit te voeren. Een overzicht van alle uitgevoerde sonderingen is weergegeven in Figuur 2-3.



Figuur 2-3 Overzicht uitgevoerde sonderingen uit 2007 (blauwe driehoeken) en uit 2022 (oranje driehoeken)

De boringen en sonderingen geven duidelijk weer dat de bodem met uitzondering van de bovenste paar meter bestaat uit zand. Op dieptes van NAP -20 m tot NAP -25 m bestaat de grond meer uit grind. De interpretatie van het grondonderzoek is gepresenteerd in Tabel 2-2.

Tabel 2-2 Bodemopbouw zandwinput (gebaseerd op S1 en B1 vanwege centrale ligging [2])

Van [m NAP]	Tot [m NAP]	Grondsoort
Maaiveld	1,5	Klei
1,5	-10,5	Zand, matig vast
-10,5	-19,5	Zand, vast
-19,5	-25,0	Grind
-25,0	-35,0	Zand, matig vast
-35,0		Zand, vast

Op basis van tabel 2.b uit de NEN9997-1 (2017) zijn de karakteristieke waarden voor de grondeigenschappen bepaald.

Tabel 2-3 Karakteristieke waarden voor bodemopbouw zandwinput uit NEN9997-1

Grondsoort	γ_{nat} [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	c'_{kar} [kPa]	ϕ'_{kar} [°]
Klei, matig	17	17	5,0	17,5
Zand, matig vast	18	20	0,0	32,5
Zand, vast	19	21	0,0	35,0
Grind, matig	18	20	0,0	35,0

Waarvoor geldt:

γ_{nat}	Volumege wicht van de grond bij natuurlijk watergehalte;
γ_{sat}	Volumege wicht van verzadigde grond;
c'_{kar}	Effectieve cohesie (karakteristieke waarde)
ϕ'_{kar}	Effectieve hoek van inwendige wrijving (karakteristieke waarde)

2.3.2 Verplaatsen haven

Een ander onderdeel van de gebiedsontwikkeling rond Alem is het verplaatsen van jachthaven De Maas. Het zoekgebied voor de nieuwe haven is ten zuidoosten van de huidige haven, zoals is weergegeven in Figuur 2-4. Het zoekgebied is grotendeels binnen de beschermingszone van de primaire waterkering rond Alem. Dit betekent dat de aanleg van de haven mogelijk een effect heeft op de stabiliteit van de waterkering.



Figuur 2-4 Zoekgebied verplaatsing van de haven

Het huidige voorland binnen het zoekgebied ligt op circa NAP +2,5 m tot NAP +3,0 m. Voor de haven wordt het voorland ontgraven tot een waterdiepte van 3 m. Dit betekent dat de ontgraving plaatsvindt tot een diepte van NAP -2,0 m uitgaande van een gemiddeld waterpeil van NAP +1,0 m, zoals gepresenteerd in paragraaf 2.4.1.

De bodem bestaat voornamelijk uit zand onder een deklaag van enkele meters van klei. Binnen het zoekgebied is de kleideklaag in het noordwesten tot circa

NAP +1,0 m en richting het zuidoosten tot circa NAP -3,0 m op basis van sonderingen uit 2022 [3].

In onderzoeken van Grontmij uit 1997 is rond Alem een karakteristieke weerstand van de deklaag (c-waarde) van gemiddeld 20 dagen gevonden bij een deklaag van ruim 3 m [4]. Onder de deklaag is een dik watervoerend pakket aanwezig van circa 70 m. In het onderzoek uit 1997 is een kD-waarde, de combinatie van de doorlatendheid en dikte van het watervoerend pakket, van 3250 m²/dag gehanteerd [4].

Op basis van het WTI SOS kan ook de deklaagdikte en de korrelgrootte, d_{70} , worden bepaald. Op basis van het SOS is in 70% van de scenario's een deklaag tot een diepte van in ieder geval NAP -1,25 m aanwezig. Op basis van alle SOS-scenario's, is vast te stellen dat er een deklaagdikte van minimaal 1,25 m aanwezig is. Onder de deklaag is er sprake van zeer grof zand. In alle SOS-scenario's is de gemiddelde d_{70} gelijk aan 360 μm en een gemiddelde doorlatendheid van 50 m/dag. Deze doorlatendheid komt overeen met de gehanteerde doorlatendheid in het onderzoek van Grontmij uit 1997.

Op basis van bovenstaande informatie zijn conservatieve waarden aangehouden. Daarbij zijn de gemiddelde waarden omgerekend naar karakteristieke waarden [10]. Deze waarden zijn nodig voor de piping berekeningen. Bij de berekening naar karakteristieke waarden is uitgegaan van een lognormale verdeling met een variatiecoëfficiënt van 12% voor de d_{70} en 50% voor de doorlatendheid. Voor de deklaagdikte en de weerstand van de deklaag is gebruik gemaakt van de boringen, het oude onderzoek en de hoogtekkaart van Nederland (AHN4). Een overzicht van de gehanteerde parameters voor de piping berekeningen zijn weergegeven in Tabel 2-4.

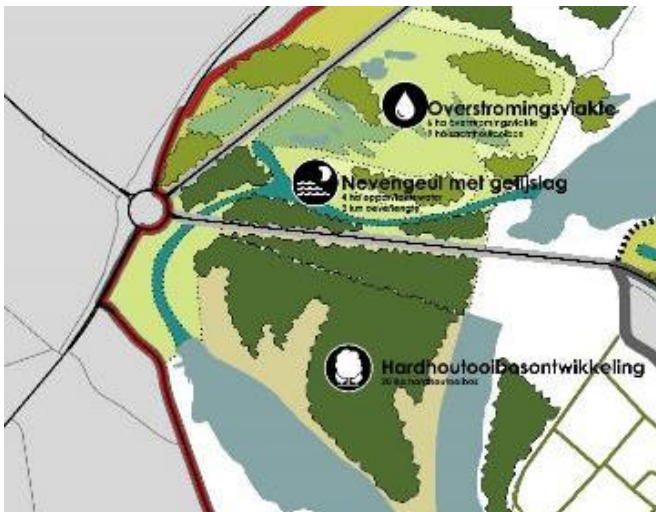
Tabel 2-4 Parameters voor piping berekeningen

Parameter	Zandwinning	Ontgraven haven (oost)	Ontgraven haven (west)
Maaiveldhoogte voorland	NAP +2,80 m	NAP +2,50 m	NAP +2,50 m
Maaiveldhoogte achterland²	NAP +3,00 m	NAP +4,00 m	NAP +5,80 m
Onderzijde deklaag	NAP -1,25 m	NAP +1,25 m	NAP +1,25 m
Doorlatendheid deklaag	0,15 m/dag	0,15 m/dag	0,15 m/dag
Dikte zandlaag	70 m	70 m	70 m
Doorlatendheid zandlaag	93,83 m/dag	93,83 m/dag	93,83 m/dag
Korrel diameter (d_{70})	288,69 μm	288,69 μm	288,69 μm

2.3.3 Getijdengeul

In het voorland bij dijktraject 38-2, dijktraject Maasdijk Bommelerwaard, is het plan om een getijdengeul aan te leggen. De geul zal lopen tussen de huidige haven bij Alem en het Gat van Sientje vlak langs de rotonde nabij de plaats Rome. De gebiedsontwikkeling met de getijdengeul bij dijktraject 38-2 is weergegeven in Figuur 2-5.

² Bij locaties 2 en 3 is een grote berm aanwezig en is de gegeven maaiveldhoogte op een afstand van respectievelijk 70 m en 50 m vanaf de kruin bepaald.



Figuur 2-5 Gebiedsontwikkeling ten westen van Alem met getijdengeul

Het huidige voorland heeft een hoogte van circa NAP +3,0 tot NAP +4,0 m. De afgraving in het voorland voor de getijdengeul betreft maximaal een diepte van één meter.

In het gebied zijn in het voorland drie boringen beschikbaar in Dinoloket (geraadpleegd in februari 2022). Uit deze boringen is een deklaagdikte van slechts 0,4 m tot 0,8 m te identificeren.

Uit onderzoek van Grontmij in 1997 is een gemiddelde karakteristieke deklaagdikte van 5,2 m gevonden voor het dijktraject Maasdijk Bommelerwaard tussen hm0 en hm37 [4]. Op basis van het SOS is in slechts 16% van de scenario's een deklaag aanwezig van meer dan 5,2 m. In 60% van de scenario's is de deklaagdikte slechts 1,7 tot 2,0 m dik.

Er zijn voor de getijdengeul enkel kwalitatieve analyses uitgevoerd, waardoor er geen exacte parameters bepaald zijn voor dit gebied.

2.4 Hydraulische belasting

2.4.1 Waterstanden

Voor de bepaling van de waterstanden bij de norm (1/3.000 jaar) is gebruik gemaakt van de software Hydra-NL v2.8.2 met de database WBI2017_Bovenmaas_39-1_v03. Met deze software wordt conform het WBI 2017 gerekend inclusief onzekerheden. De waterstand bij de norm (terugkeertijd van 3.000 jaar) is NAP +7,66. Deze waterstand is benodigd voor onder andere de pipingberekeningen en is bepaald bij het rekenpunt dk_00044 zoals is weergegeven in Figuur 2-6.



Figuur 2-6 Rekenlocatie hydraulische belasting

Om te bepalen wat de waterstand is bij normale omstandigheden is gebruik gemaakt van de database van Rijkswaterstaat. Bij Alem is geen meetpunt aanwezig, maar 7 km bovenstrooms ligt een meetpunt bij Lith. De data bij dit meetpunt komt goed overeen met de werkelijkheid bij Alem. Op basis van data van Rijkswaterstaat uit 2020 en 2021, varieert de waterstand bij Lith onder normale omstandigheden rond NAP +1,0 m met een enkele uitschieter naar boven. Op basis van deze gegevens wordt uitgegaan van een lage waterstand van NAP +0,0 m.

Het polderpeil is benodigd voor de pipingberekeningen en is bepaald aan de hand van het peilbesluit. Het peilbesluit vanuit het waterschap is weergegeven in Tabel 2-5. In beide gebieden is een marge van ±0,15 m.

Tabel 2-5 Peilbesluit

	Alem (peilgebied BOM560)	Rome (peilgebied BOM534)
Zomerpeil [m NAP]	2,90	2,45
Winterpeil [m NAP]	2,70	2,30

Het polderpeil heeft grote invloed op het risico op piping. De waardes uit Tabel 2-5 zijn conservatief, naar verwachting zal het polderpeil stijgen bij hoogwater. Daarom wordt voor opbarsten uitgegaan van polderpeil plus de 0,15 m marge, dus een peil van NAP +2,85 m. Indien opbarsten plaatsvindt zal het peil gelijk zijn aan het maaiveld.

2.4.2 Golfbelasting

Voor het bepalen van de golfhoogte voor de afslag van het voorland is geen gebruik gemaakt van Hydra-NL. Er is gekozen om de golven met de formule van Bretschneider te bepalen. Op deze manier kunnen de invoergegevens, zoals de strijklengtes, nauwkeuriger en beter navolgbaar toegepast worden.

De golfhoogtes zijn bepaald op basis van de volgende vergelijkingen [6]:

$$\bar{H} = 0,283 \tanh(0,530\bar{d}^{0,75}) \tanh\left(\frac{0,0125\bar{F}^{0,42}}{\tanh(0,53\bar{d}^{0,375})}\right) \quad [1]$$

$$\bar{d} = \frac{dg}{u^2} \quad [2]$$

$$\bar{F} = \frac{Fg}{u^2} \quad [3]$$

$$\bar{H} = \frac{H_s g}{u^2} \quad [4]$$

Met

g = valversnelling [m/s^2] (9,81 m/s^2)

u = windsnelheid op 10 m hoogte [m/s]

d = waterdiepte [m]

F = strijklengte [m]

H_s = Significante golfhoogte [m]

Voor de windsnelheden wordt gebruik gemaakt van de data van het weerstation bij Deelen, omdat dit weerstation redelijk nabij gelegen is (ca. 45 km). Daarnaast is dit weerstation net als Alem ook niet in de buurt van de kust gelegen, waardoor de windsnelheden en -richtingen naar verwachting nauwkeurig overeenkomen.

Zoals is weergegeven in bovenstaande formules spreken we van significante golfhoogte. Wanneer er in dit rapport gesproken wordt over golfhoogte gaat het, tenzij anders vermeld, altijd over de significante golfhoogte.

3. Methodiek

De gebiedsontwikkeling bestaat uit 3 onderdelen, namelijk de zandwinput, haven en getijdegeul. Bij de onderdelen moeten, afhankelijk van het onderdeel de volgende aspecten beschouwd worden:

- Macrostabiliteit
- Piping
- Bekleding van de dijk
- Verwekings- en bresvloeiing

In onderstaande paragrafen staat per onderdeel de aanpak toegelicht.

3.1 Macrostabiliteit

Een analyse op macrostabiliteit brengt het risico op afschuiven van een talud langs een glijvlak in kaart. Gedurende een storm stijgt de grondwaterstand in de dijk, waardoor een hoger risico op afschuiven aan de binnenzijde plaatsvindt. Aan de buitenzijde kan afschuiven plaatsvinden als de waterstand snel daalt na hoogwater. Hierdoor is de grondwaterstand in de dijk ten opzichte van de buitenwaterstand hoog en is er een hogere kans op afschuiven aan de buitenzijde.

De berekeningen zijn gedaan met de software D-Geo Stability v18.1.1.3.

3.1.1 Zandwinput

Voor het afschuiven van de zandwinput wordt de CUR-aanbeveling 113 gevolgd [11]. Daarbij dient aan onderstaande voorwaarden te worden voldaan, indien niet aan de voorwaarden wordt voldaan dient een stabiliteitsberekening met de methode Bishop te worden uitgevoerd.

- géén gronddepot of andere bovenbelasting vlak langs oever;
 - géén slappe cohesieve lagen;
 - helling flauwer dan 1:3.
- Of
- Stabiliteitsberekening volgens methode Bishop met grondparameters geschat volgens NEN 6740.

Door de zandwinning zal materiaal langs de oever aanwezig zijn en vrachtwagens zullen worden ingezet. Daarom wordt niet aan de eenvoudige voorwaarden voldaan en dient een stabiliteitsberekening te worden uitgevoerd.

Voor het risico op afschuiven van de zandwinput wordt een D-Geo Stability berekening uitgevoerd met de methode Bishop. Hierin wordt de bodemopbouw en parameters gevolgd zoals beschreven in hoofdstuk 2.3.1.

Voor de parameters van de bodemopbouw worden karakteristieke waarden ingevoerd. Volgens de CUR-aanbeveling dient er dan te worden voldaan aan een veiligheidsfactor van 1,3 bij de methode van Bishop [11].

Voor de berekeningen van de stabiliteit van het talud van de zandwinput is uitgegaan van een grondwaterstand gelijk aan het waterpeil, aangezien de bodem bestaat uit zand. Door de hoge doorlatendheid van het grondlichaam zal de grondwaterstand direct reageren op variatie in de buitenwaterstand. Onder

normale omstandigheden zal de waterstand, zoals is aangegeven in paragraaf 2.4.1, op circa NAP +1,0 m liggen.

Er wordt een verkeersbelasting van 13,3 kN/m² over een lengte van 2,5 m toegepast. Dit is de maximale verwachte belasting en komt overeen met zwaar werkverkeer. De aanpassingspercentages in de cohesieve grondsoorten als gevolg van de verkeersbelasting bedragen 50% en als spreiding in de ondergrond wordt een hoek van 26,6° aangehouden [5].

3.1.2 Waterkering

Er is geen informatie aangeleverd over de dijkopbouw. Daarom worden in deze fase geen berekeningen uitgevoerd en wordt de stabiliteit van de waterkering kwalitatief beschouwd.

3.2 Piping

Piping is een faalmechanisme dat bestaat uit drie onderdelen, namelijk opbarsten, heave en terugschrijdende erosie. Alle drie de onderdelen moeten optreden om daadwerkelijk te leiden tot piping. Opbarsten van de deklaag kan plaatsvinden als de deklaag dun is en de stijghoogte, de druk vanuit het water onder de deklaag, hoog. Bij heave wordt het risico op verticale waterstroming bij het uittredepunt bepaald. Bij terugschrijdende erosie wordt het daadwerkelijk vormen van de pipe berekend waarbij zand meegevoerd wordt.

Bij Alem is 1,0 km dijk mogelijk afgekeurd op piping in het voorlopig oordeel afkomstig van het waterveiligheidsportaal. Dit betekent dat het waterschap niet kan uitsluiten dat piping kan optreden bij een storm die overeenkomt met de norm. De exacte opgave op basis van huidige regelgeving is niet bekend. Voordat de effecten van het ontgraven op het risico op piping worden doorgerekend, wordt gekeken naar de huidige staat van de dijk. Vervolgens wordt gekeken naar het effect van de gebiedsontwikkeling op het risico op piping, aangezien de dijk moet blijven voldoen aan de veiligheidsnormen.

In deze notitie wordt ingegaan op de huidige pipingopgave, het effect van het ontgraven van het voorland en welke maatregelen genomen kunnen worden om aan het WBI te voldoen.

3.2.1 Huidige pipingopgave

Om de pipingopgave in kaart te brengen worden drie doorsnedes berekend op het risico op opbarsten, heave en terugschrijdende erosie. Indien één van de drie mechanismes niet kan optreden, kunnen er geen zandmeevoerende wellen ontstaan. Deze berekeningen worden gedaan conform het WBI [9]. Om de pipingopgave goed in kaart te brengen worden drie locaties geanalyseerd zoals is weergegeven in Figuur 3-1. Locatie 1 is gekozen vanwege het relatief lage maaiveld achter de dijk. Locatie 2 en 3 zijn gekozen om de pipingopgave goed in beeld te hebben binnen het zoekgebied voor de haven.



Figuur 3-1 Locaties voor piping berekeningen bij het afgekeurde dijkvak (paarse lijn)

Voor de drie deelfaalmecanisme (opbarsten, heave en terugschrijdende erosie) zijn verschillende vereiste veiligheidsfactoren. Er wordt uitgegaan van een veilige schematiseringsfactor van 1,2. In Tabel 3-1 zijn de vereiste factoren weergegeven.

Tabel 3-1 Factoren voor de piping berekeningen bij Alem

	Schadefactor	Schematiseringsfactor	Vereiste veiligheidsfactor
Opbarsten	1,45	1,20	1,74
Heave	1,10	1,20	1,33
Terugschrijdende erosie	1,23	1,20	1,47

3.2.2 Effect ontgraven voorland

Bij de werkzaamheden wordt alleen (een deel van) het voorland weggegraven. Het dempende effect wordt bepaald door de effectieve voorlandlengte (fictieve lengte waarover de stijghoogte daalt) te berekenen. Deze wordt berekend met de volgende vergelijking [10]:

$$L_{eff} = \lambda_1 \tanh \frac{L_1}{\lambda_1} \quad \text{[Vergelijking 3.1]}$$

$$\lambda_1 = \sqrt{kD \frac{d_{klei}}{k_{klei}}} \quad \text{[Vergelijking 3.2]}$$

Met:

L_1 = Voorlandlengte [m]

k = Doorlatendheid watervoerend pakket [m/dag]

D = Dikte zandmeervoerende laag [m]

d_{klei} = Dikte deklaag [m]

k_{klei} = Doorlatendheid deklaag [m/dag]

Om het risico op piping niet te vergroten dient een maatregel genomen te worden dat het ontgraven voorland compenseert en ervoor zorgt dat het risico niet wordt vergroot.

3.3 Grasbekleding

Het ontgraven van het voorland heeft mogelijk invloed op het risico op erosie van de bekleding van de dijk. De bekleding aan de buitenzijde van de dijk kan eroderen door golven die op het talud klappen (mechanisme golfklap) of door de stroming van het oplopen van het water na de golfklap (golfoploop). Golfklap heeft een hogere belasting dan golfoploop en is daarom dominant. De dijk bestaat volledig uit grasbekleding aan de buitenzijde en daarom wordt geanalyseerd of de bekleding blijft voldoen.

Als eerste wordt het effect van de ontgravingen op de hydraulische belasting bij de norm bepaald. Dit wordt gedaan met de software Hydra-NL door een profiel inclusief voorland en exclusief voorland door te rekenen. Vervolgens wordt de grasbekleding, conform het WBI [9], doorgerekend met de software BM Gras Buitentalud. Aangezien geen informatie over de kwaliteit van de grasbekleding beschikbaar is, wordt zowel een gesloten als een open grasbekleding doorgerekend. Als resultaat wordt een veiligheidsfactor berekend. Indien de veiligheidsfactor groter is dan 1, betekent het dat de bekleding voldoet bij de norm.

3.4 Verwekings- en bresvloeiing

Bij een ontgraving van een diepe put, dient het risico op verwekings- en bresvloeiing in kaart te worden gebracht conform de CUR-aanbeveling 113.

3.4.1 Verwekingsvloeiing

Verwekingsvloeiing kan optreden door verlies aan korrelspanning in een losgepakt zandpakket waardoor het zandpakket wegstroomt. Een plotselinge verandering in belasting kan dit mechanisme initiëren. Verwekingsvloeiing zal optreden als het talud voldoende steil is, losgepakte zandlagen aanwezig zijn en een verandering in belasting. Om te bepalen of het talud voldoende steil is zodat verwekingsvloeiing kan plaatsvinden wordt gebruik gemaakt van het geometriecriterium uit de CUR-aanbeveling. Het geometriecriterium is als volgt:

$$\alpha_R \text{ flauwer dan } 1: 7 \left(\frac{H_R}{30} \right)^{1/3} \quad [\text{Vergelijking 3.3}]$$

$$\alpha_R \text{ flauwer dan } 1: 4 \left(\frac{H_R}{30} \right)^{1/3} \quad [\text{Vergelijking 3.4}]$$

Met:

α_R = rekentaludhelling [-]

H_R = rekenputdiepte [m]

Wanneer wordt voldaan aan geometriecriterium [1] is de kans op verwekingsvloeiing verwaarloosbaar klein. Wanneer aan geometriecriterium [2] wordt voldaan is de faalkans verwaarloosbaar klein als de dikte van de verwekingsgevoelige lagen kleiner is dan 3 m. Wanneer aan beide criteria niet wordt voldaan, dienen de verwekingsgevoelige lagen kleiner te zijn dan 1 m.

Om de aanwezigheid van losgepakte zandlagen voldoende in kaart te brengen dient er elke 500 m een sondering tot een diepte van 1,5 keer de putdiepte aanwezig te zijn. Of een zandlaag los- of vastgepakt is, wordt bepaald op basis van het criterium van Baldi [7]. Het Baldi criterium geeft op basis van de conusweerstand en de diepte een schatting van de relatieve dichtheid en daarmee ook de aanwezigheid van los of vastgepakte zandlagen. Bij een relatieve dichtheid van tussen 33% en 50% is er sprake van los tot matig gepakte zandlagen. Onder de 33% is er sprake van zeer losgepakte zandlagen. Bij een relatieve dichtheid van meer dan 50% zal verwekingsvloeiing niet optreden.

3.4.2 Bresvloeiing

Bresvloeiing is oppervlakte-erosie waardoor het talud wordt uitgesleten en zandlagen mogelijk wegstromen. Bresvloeiing kan ontstaan als het zuigproces niet voldoende wordt gemonitord, dikke klei- of veenlagen niet op een juiste manier worden verwijderd, fijne zandlagen aanwezig zijn en bij een steil talud met onvoldoende bermen. De uitwerking van deze eisen en de resultaten zijn verder toegelicht in paragraaf 5.3.

4. Pipingopgave traject 39-1

Voordat het effect van ontgravingen op het risico op piping wordt behandeld, wordt ingegaan op het risico op piping bij Alem in de huidige situatie. Uit de wettelijke beoordeling, uitgevoerd in 2020 [12], volgt namelijk dat een deel van het dijktraject bij Alem niet is goedgekeurd voor het faalmechanisme piping. De andere faalmechanismen hebben in dit traject het oordeel voldoet. Om inzicht te verkrijgen waar deze risico's liggen in het gebied, en welke eventuele compenserende maatregelen getroffen dienen te worden, is voorliggende analyse uitgevoerd. Het effect van de ontgravingen bij Alem op het risico op piping komen aan bod bij de zandwininput in paragraaf 6.2 en de haven, paragraaf 8.2.

In de beoordeling heeft het dijkdeel tussen dijkpaal 0 en dijkpaal 10 het oordeel categorie IV gekregen voor piping, dit betekent dat de dijk mogelijk is afgekeurd voor dit faalmechanisme. Er zijn in dit dijkdeel geen berekeningen uitgevoerd volgens de huidige normen, het oordeel is gebaseerd op de resultaten uit het VNK in combinatie met een beheerdersoordeel. Mogelijk is de pipingopgave kleiner of niet aanwezig op delen van het traject. Indien er wel een pipingopgave aanwezig is, kan deze worden gemitigeerd door maatregelen te treffen in combinatie met de gebiedsontwikkeling. In dit hoofdstuk wordt het risico op piping beschreven in de huidige situatie zonder ontgravingen.



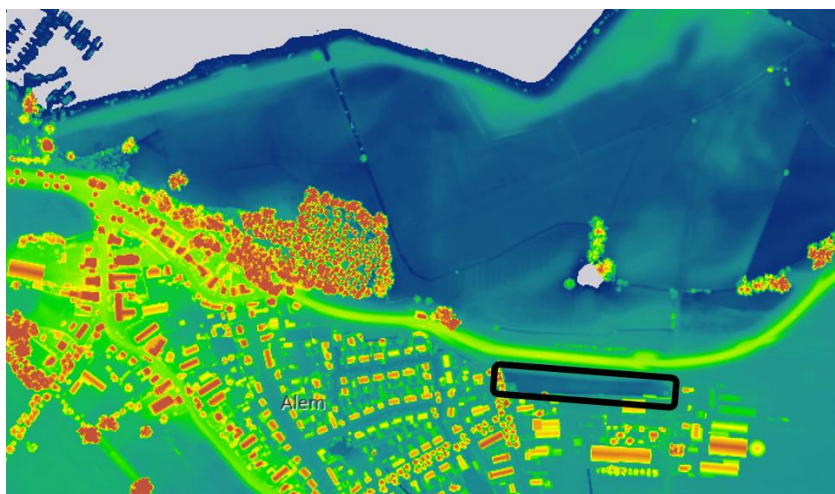
Figuur 4-1 Eindoordeel op faalmechanisme piping [12]

Op basis van de berekeningen is naar voren gekomen dat de westelijke locaties voldoen aan de gestelde eisen en de oostelijke locatie niet voldoet, zoals gepresenteerd in Tabel 4-1. In Appendix 2 zijn de berekeningen gepresenteerd.

Tabel 4-1 Oordeel piping huidige situatie

	Vereiste factor	Locatie 1	Locatie 2	Locatie 3
Opbarsten	1,74	1,01	0,75	1,00
Heave	1,33	0,41	0,31	0,41
Terugschrijdende erosie	1,47	1,43	1,93	1,61
Oordeel		Voldoet niet	Voldoet	Voldoet

Op alle drie de locaties is er een risico op opbarsten (het openscheuren van de deklaag) en risico op heave (omhoog gerichte waterstroming bij het uittredepunt). Bij het zuidwestelijke gedeelte, dus locaties 2 en 3, wordt voldaan aan de eisen voor terugschrijdende erosie. Het grote verschil met locatie 1, waar niet wordt voldaan aan de gesteld eisen t.a.v. terugschrijdende erosie, is dat bij locatie 1 het maaiveld in het achterland 1,0 tot 2,8 m lager ligt. Dit is duidelijk waarneembaar op de hoogtekaart (AHN4), zoals weergegeven in Figuur 4-2. Hierdoor is de aanwezige deklaagdikte kleiner. Daarnaast ligt bij hetzelfde dijkvak in het voorland een plas. De plas is in dit onderzoek verder niet meegenomen, aangezien dit dijkdeel al afgekeurd wordt bij de aanname dat de deklaagdikte onder de plas voldoende is. Exacte gegevens over deze plas zijn onbekend, dus om een nauwkeuriger oordeel te kunnen geven dient deze ingemeten te worden en daaronder de deklaagdikte bepaald te worden.



Figuur 4-2 Hoogtekaart (AHN) Alem met meest pipinggevoelig gedeelte zwart omcirkeld

In bovenstaande analyses zijn een hoge schematiseringsfactor en conservatieve uitgangspunten gehanteerd. Dat betekent dat met aanvullende boringen en inmetingen het dijkvak mogelijk goedgekeurd kan worden. Er wordt daarom geadviseerd om eerst te kijken naar optimalisaties van het oordeel voordat versterkingsmaatregelen genomen worden.

5. Stabiliteit zandwinput

Het graven van een zandwinput dient onder een veilig en stabiel talud uitgevoerd te worden. De stabiliteit van de zandwinput wordt bepaald conform de CUR-aanbeveling 113. Deze norm is gebruikelijk voor de aanvraag van een eventuele vergunning. Het ontwerp van de zandwinput wordt doorgerekend op het risico op afschuiven, verwekingsvloeiing en bresvloeiing. Vervolgens worden mogelijke beheersmaatregelen om het risico nog verder te kunnen minimaliseren beschreven en wordt een optimalisatie van het ontwerp gepresenteerd.

5.1 Afschuiven

Afschuiven betekent dat het talud langs een glijvlak bezwijkt. Er is, zoals beschreven in paragraaf 3.1.1, een stabiliteitsberekening uitgevoerd met D-Geo Stability om het risico op afschuiven te bepalen. Alleen dwarsdoorsnede DP3 is doorgerekend, aangezien dit de enige dwarsdoorsnede is waarbij belasting aanwezig is naast de oever. De geometrie van de andere doorsnedes en locaties zijn gelijk, waardoor dwarsdoorsnede DP3 maatgevend is voor afschuiven. Uit de stabiliteitsberekening, uitgevoerd met de methode van Bishop, volgt een veiligheidsfactor van 2,59. Het resultaat van de berekening is weergegeven in Appendix 3.

De berekende veiligheidsfactor van 2,59 is ruim hoger dan de vereiste factor van 1,30. Dit betekent dus dat het risico op afschuiven zeer klein is en dat het talud **voldoet** op afschuiven volgens de CUR-aanbeveling 113.

5.2 Verwekingsvloeiing

Verwekingsvloeiing ontstaat door een trilling bij losgepakte zandlagen bij een steil talud. Verwekingsvloeiing vindt vaak plaats in een kort tijdsbestek van enkele minuten tot een half uur. Als resultaat vloeit veel zand weg waardoor een flauwer talud ontstaat. Voor het optreden van verwekingsvloeiing moet aan de volgende drie criteria worden voldaan:

1. Het zand moet verwekingsgevoelig zijn, dus voldoende losgepakt;
2. De taludgeometrie moet ongunstig zijn;
3. Er moet sprake zijn van een inleidend mechanisme.

Aangezien het winnen van zand een inleidend mechanisme voor verwekingsvloeiing kan zijn, wordt aan het derde criterium voldaan. In onderstaande paragrafen is de beoordeling uitgevoerd van criterium één en

twee. Als één van de twee criteria niet voldoet, treedt er geen verwekingsvloeiing op.

5.2.1 Verwekingsgevoelige zandlagen

Op basis van het Baldi-criterium, zie paragraaf 3.4, is in kaart gebracht of er losgepakte zandlagen aanwezig zijn [7]. De sonderingen en het Baldi-criterium voor los en vastgepakte zandlagen zijn weergegeven in Appendix 4.

In elke sondering zijn los tot matig los gepakte zandlagen geïdentificeerd van meer dan 1,0 m dik. Het overzicht is weergegeven in Tabel 5-1. Het grootste risico op verwekingsgevoelige zandlagen is, op basis van de geanalyseerde sonderingen, tussen NAP -26,5 m en NAP -37,0 m.

Tabel 5-1 Verwekingsgevoelige zandlagen met minimale dikte 1,0 m (relatieve dichtheid kleiner dan 50%)

Sondering	Diepte [m NAP]	Dikte [m]	Opmerkingen
DKM1A	-6,7 tot -8,1	1,4	
DKM1A	-25,3 tot -27,6	2,3	
DKM1A	-28,0 tot -32,5	4,5	
DKM2	1,5 tot -0,2	1,7	
DKM2	-5,1 tot -8,5	3,4	
DKM2	-28,0 tot -32,0	4,0	
DKM3	-30,2 tot -34,0	3,8	Relatieve dichtheid vooral meer dan 33%
DKM4	-4,0 tot -6,0	2,0	
DKM4	-27,0 tot -33,4	6,4	Relatieve dichtheid overal meer dan 33%.
DKM5	-1,0 tot -2,0	1,0	
DKM5	-28,2 tot -32,9	4,7	Wrijvingsgetal fluctueert tussen 0,8% en 1,5%
DKM5	-33,2 tot -35,0	2,8	
DKM6	-30,0 tot -34,0	4,0	
DKM7	-27,5 tot -29,3	1,8	
DKM7	-30,9 tot -31,0	1,1	
DKM7	-34,2 tot -37,1	2,9	
DKM8	-26,8 tot -28,7	1,9	
DKM9	-18,5 tot -20,5	2,0	
DKM9	-28,1 tot -32,5	4,4	
DKM9	-33,0 tot -34,4	1,4	
DKM10	-27,9 tot -29,0	1,1	
DKM11	-6,0 tot -8,1	2,1	
DKM11	-25,0 tot -26,3	1,3	
DKM11	-26,5 tot -34,3	7,8	
DKM001	-5,0 tot -7,0	2,0	
DKM001	-31,2 tot -33,3	2,1	
DKM001	-35,0 tot -37,1	2,1	
DKM002	-30,0 tot -33,0	3,0	
DKM003	-15,0 tot -17,0	2,0	
DKM003	-17,2 tot -19,9	2,7	
DKM003	-26,0 tot -33,6	7,6	
DKM003	-37,0 tot -40,0	3,0	
DKM004	-26,0 tot -35,5	9,5	
DKM004	-37,1 tot -39,0	1,9	

Indien wordt gekeken naar de definitie van losgepakte zandlagen bij een relatieve dichtheid van minder dan 33%, zijn losgepakte zandlagen aanwezig op een diepte zoals weergegeven in Tabel 5-2.

Tabel 5-2 Sterk losgepakte zandlaag met minimale dikte 1,0 m (relatieve dichtheid kleiner dan 33%)

Sondering	Diepte [m NAP]	Dikte [m]
DKM1A	-28,0 tot -29,6	1,6
DKM2	-28,1 tot -30,1	2,0
DKM6	-31,5 tot -33,5	2,0
DKM7	-30,9 tot -31,0	1,1
DKM7	-34,2 tot -37,1	2,9
DKM11	-28,0 tot -32,9	4,9
DKM003	-26,0 tot -29,3	3,3
DKM003	-30,2 tot -33,0	2,8
DKM004	-27,7 tot -31,6	3,9
DKM004	-33,1 tot -34,2	1,1
DKM004	-37,4 tot -38,9	1,5

Op basis van de duidelijke losgepakte zandlagen is er nog steeds risico op verwekingsgevoelige lagen op een diepte van NAP -26,0 m tot circa NAP -38,0 m.

Op basis van deze analyse kan risico op verwekingsvloeiing niet worden uitgesloten.

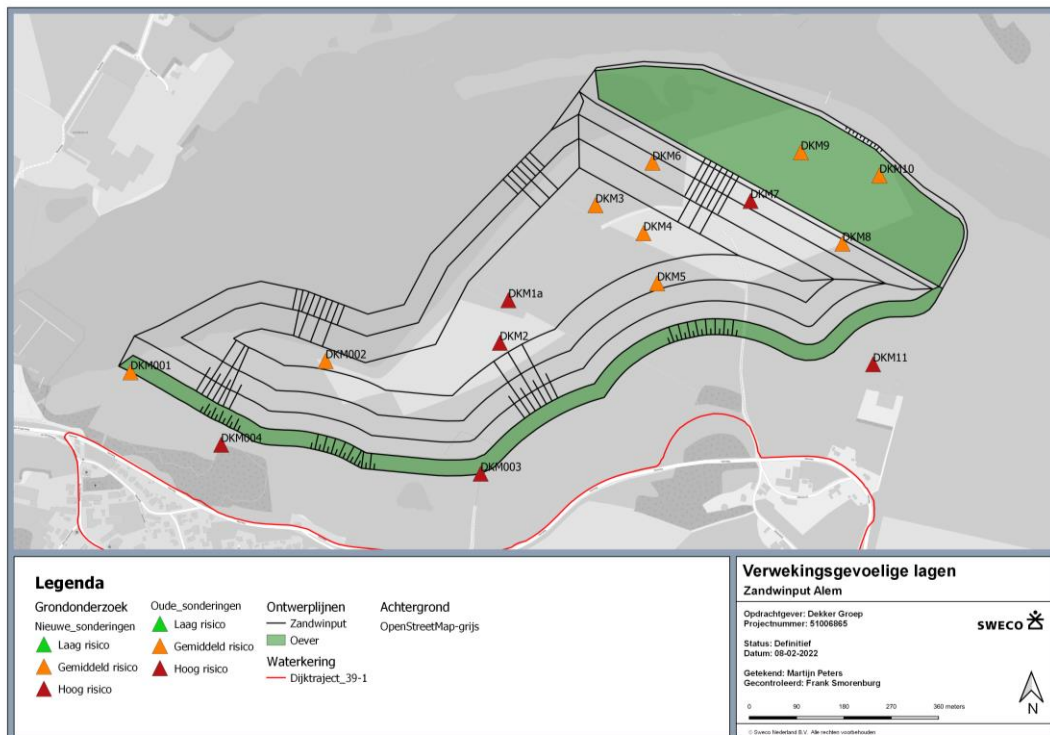
5.2.2 Taludgeometrie

Verwekingsvloeiing kan enkel optreden wanneer het talud steil is. Wanneer het talud voldoende flauw is kan er dus geen verwekingsvloeiing optreden. Dit is bepaald op basis van het geometriecriterium, zoals is beschreven in paragraaf 3.4.

Bij een maaiveldhoogte van NAP +3,0 m en een putdiepte op NAP -32,0 m voldoet een talud van 1:4 niet aan beide criteria. Om te voldoen aan criterium 1 dient de taludhelling maximaal 1:7,53 te zijn en om te voldoen aan criterium 2 dient de taludhelling maximaal 1:4,30 te zijn. Dit betekent dat, met het huidige ontwerp (1:4 talud), de dikte van verwekingsgevoelige lagen maximaal 1 m mag zijn om verwekingsvloeiing uit te sluiten conform de CUR-aanbeveling 113.

5.2.3 Conclusie

Verwekingsvloeiing kan worden uitgesloten als aan één van de drie criteria die gesteld zijn in paragraaf 5.2 niet kan worden voldaan. Aan criterium 3, aanwezigheid van een inleidend mechanisme, wordt voldaan door de zandwinning. Uit analyses uitgevoerd voor criteria 1 en 2 blijkt dat op basis van zowel de geometrie als de aanwezigheid van losgepakte zandlagen verwekingsvloeiing niet kan worden uitgesloten. Figuur 5-1 geeft weer de sonderingen weer met bijbehorende risico op basis van de huidige analyse op verwekingsvloeiing. Er is een gemiddeld risico toegekend als er lagen van meer dan 1,0 m los tot matig gepakt aanwezig zijn en een hoog risico als er lagen van meer dan 1,0 m los tot zeer los gepakt aanwezig zijn.



Figuur 5-1 Sonderingen met hoog risico (zeer losgepakte zandlagen) en gemiddeld risico (losgepakte tot matig gepakte zandlagen) op verwerkingsvloeiing

Dit betekent niet dat verwerkingsvloeiing daadwerkelijk op zal treden. Er zijn aanvullende analyses of beheersmaatregelen nodig om het risico op verwerkingsvloeiing uit te kunnen sluiten. Deze aanbeveling is verder uitgewerkt in paragraaf 5.4.

5.3 Bresvloeiing

Naast de analyses op afschuiven en verwerkingsvloeiing, dient er ook conform de CUR-aanbeveling 113 een analyse op bresvloeiing uitgevoerd te worden. Bij bresvloeiing bezwijkt het talud door gestaag wegstromen van grondlagen. In tegenstelling tot verwerkingsvloeiing dat binnen een half uur plaatsvindt, kan bresvloeiing wel 12 uur lang doorgaan.

Volgens de eenvoudige toets van de CUR-aanbeveling 113 voldoet de zandwinput op bresvloeiing als er wordt voldaan aan onderstaande 6 voorwaarden:

1. Dikke stoorlagen (> 1 m) , indien aanwezig, worden met geschikt materieel verwijderd;
2. Zand is grof genoeg;
3. Er wordt van te voren een werkplan voor de uitvoering vastgesteld;
4. Zuigproces wordt beheerst door monitoring van positie zuigbuis en productie;
5. Gezogen taluds worden regelmatig gepeild;
6. Taludhelling volgens tabel 2a en 2b in de CUR-aanbeveling 113.

Voorwaarde 3, 4 en 5 vinden plaats tijdens de uitvoering. Er wordt aangenomen dat deze acties als zodanig worden uitgevoerd, voor en tijdens het graven van de zandwinput. Voorafgaand aan de uitvoering dient dit geverifieerd te worden. Voorwaarden 1, 2 en 6 zijn in onderstaande paragrafen nader toegelicht.

Onder dikke stoorlagen (voorwaarde 1) worden cohesieve lagen, als klei en veen, verstaan. Dikke stoorlagen zijn nauwelijks aanwezig in dit gebied. Deze zijn enkel in de bovenste paar meter aanwezig. Door bij de fasering van het zandwinnen rekening te houden met het eerst weghalen van de bovenste circa 2 m, zal dit niet leiden tot bresvloeiing.

Bij de boringen die zijn uitgevoerd door Fugro in 2007 [2], is ook de korrel diameter bepaald, waardoor ook gekeken kan worden of het zand grof genoeg is om te voldoen aan voorwaarde 2. Fijner zand levert namelijk meer risico op bresvloeiing op. Als voorwaarde voor grof zand stelt de CUR-aanbeveling een minimale waarde voor D_{50} van 200 μm en voor D_{15} van 100 μm . Voor deze voorwaarden zijn boormonsters B1 t/m B4 bekeken, daaruit is gebleken dat alleen bij boring B3 niet aan de voorwaarden kan worden voldaan. Op een diepte van NAP +1,8 m tot NAP -1,2 m is de D_{50} gelijk aan 200 μm en de D_{15} aan 90 μm , waardoor niet aan de tweede voorwaarde wordt voldaan. Dit is 0,5 tot 3,5 m onder maaiveld en indien deze laag voorzichtig wordt verwijderd, zal deze fijnere zandlaag ook geen bresvloeiing veroorzaken.

Naast de bodemeigenschappen, dient het talud ook voldoende flauw te zijn (voorwaarde 6). Wanneer het talud niet voldoende flauw is zal bij bresvloeiing het talud verflauwen. De interpretatie op basis van de CUR-aanbeveling voor deze zandwinput is gepresenteerd in Tabel 5-3. Hieruit kan worden opgemaakt dat het huidige plan, een put van 35 m diep met een taludhelling van 1:4 niet volstaat zonder een berm. Aan de rivierzijde, waar de diepte 22 m is ten opzichte van de huidige bodem, volstaat een talud van 1:4.

Tabel 5-3 Taludhelling zandwinput gebaseerd op CUR-aanbeveling 113 tabel 2a en 2b

	Putdiepte [m]	Taludhelling gemiddeld [v:h]	Diepte berm [m t.o.v. maaiveld]	Breedte berm [m]
Zonder berm	35	1:5,43	n.v.t.	n.v.t.
1 berm	35	1:3,5	17,5	17,5
2 bermen	35	1:3	12,0	12,0 (bovenste berm) 24,0 (onderste berm)
3 bermen	35	1:2,5	9,0	9,0 (bovenste berm) 18,0 (middelste berm) 37,0 (onderste berm)

Concluderend kan worden samengevat dat niet direct aan voorwaarde 1 en 2 wordt voldaan maar in voorgaande paragrafen mogelijkheden zijn aangereikt waardoor op basis van deze voorwaarden geen bresvorming hoeven te veroorzaken. Op basis van bovenstaande analyse wordt niet voldaan aan voorwaarde 6 vanwege een te steile taludhelling. Om mogelijk te voldoen aan deze voorwaarde zijn aanvullende analyses en/of maatregelen benodigd om bresvorming uit te kunnen sluiten.

5.4 Maatregelen

Het talud van de zandwinput voldoet op het faalmechanisme afschuiven, maar zowel verwekingsvloeiing als bresvloeiing kan niet worden uitgesloten. Er zijn in

totaal vier te treffen maatregelen waardoor de zandwininput voldoet gegeven in de CUR-113. Deze worden in onderstaande paragrafen toegelicht. Vervolgens wordt er in paragraaf 5.4.5 toegelicht welke maatregelen worden geadviseerd.

5.4.1 Gedetailleerde analyses

Voor verwekingsvloeiing en bresvloeiing zijn nadere analyses mogelijk waardoor mogelijk het risico op verwekingsvloeiing en bresvloeiing kan worden uitgesloten.

Bij de uitgevoerde analyse op verwekingsvloeiing is de korreldiameter niet meegenomen. Met een aanvullende analyse kan de benodigde dikte voor verwekingsvloeiing, dat afhankelijk is van de korreldiameter, nader worden bepaald. Hierdoor kan mogelijk verwekingsvloeiing worden uitgesloten.

Uit de boringen blijkt dat de korreldiameter (D_{50}) gemiddeld circa 350 μm is. Dit is grover dan vereist is voor bresvloeiing. Met een bresmodel kan het risico op bresvloeiing met de korreldiameter nauwkeuriger worden bepaald. Voor het bresmodel is naast de korreldiameter ook de porositeit en doorlatendheid nodig waarvoor aanvullende onderzoeken uitgevoerd dienen te worden.

5.4.2 Praktijkproef

Zowel verwekings- als bresvloeiing voldoen niet volgens de eenvoudige beoordeling binnen de CUR-aanbeveling 113. Met behulp van een praktijkproef kan mogelijk worden aangetoond dat verwekings- en bresvloeiing niet zullen optreden. De praktijkproef dient wel te worden gedaan bij soortgelijke omstandigheden en kan mogelijk worden gecombineerd door dit op locatie uit te voeren en te integreren in het werkplan.

5.4.3 Ontwerp aanpassen

Het ontwerp kan op twee manieren worden aangepast, namelijk door de put minder diep te graven en door de helling van het talud te verflauwen of bermen toe te passen.

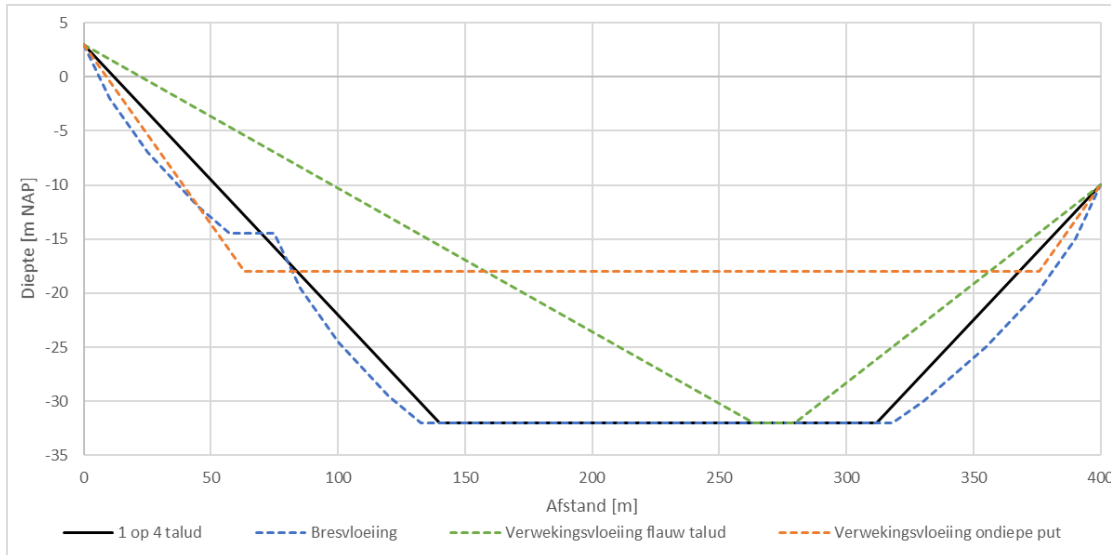
De aanpassingen om bresvloeiing uit te sluiten zijn klein. Met een berm met een breedte van 17,5 m op een diepte van 17,5 m onder maaiveld, kan er zand gewonnen worden onder een talud met een gemiddelde helling van 1:3,5. Hierdoor zal het ruimtebeslag van de zandwininput niet of nauwelijks veranderen. Er kan ook gekozen worden voor meer platbermen zoals is weergegeven in Tabel 5-3.

Verwekingsgevoelige lagen komen voornamelijk voor onder NAP -28 m. Wanneer er zand wordt gewonnen tot NAP -18 m, zullen deze lagen geen risico vormen voor verwekingsvloeiing. De lagen zijn dan dieper dan 1,5 keer de putdiepte, waardoor die geen invloed hebben op de stabiliteit van de zandwininput.

Een andere optie om verwekingsvloeiing uit te sluiten is om een flauw talud aan te houden van 1:7,53 (geometriecriterium). Wanneer zand gewonnen wordt onder dit talud zal er geen verwekingsvloeiing kunnen plaatsvinden bij een putdiepte van 35,0 m.

Bovenstaande drie mogelijkheden om het ontwerp aan te passen zodat verwekingsvloeiing of bresvloeiing kan worden uitgesloten zijn weergegeven in Figuur 5-2. Zoals is weergegeven kan bresvloeiing relatief eenvoudig worden

uitgesloten zonder dat het een groot effect heeft op het ruimtebeslag³. Het ontwerp aanpassen zodat het voldoet aan verwekingsvloeiing heeft echter een groot effect op het ruimtebeslag.



Figuur 5-2 Aanpassingen aan ontwerp om te voldoen aan bresvloeiing of verwekingsvloeiing. Om beide risico's uit te sluiten zal een combinatie van de oplossing voor bresvloeiing als verwekingsvloeiing moeten worden toegepast.

5.4.4 Maatregelen uitvoering

Om het risico op verwekings- en bresvloeiing te minimaliseren, kunnen maatregelen worden getroffen voor de uitvoering. Tijdens de uitvoering kunnen onderstaande maatregelen worden genomen om het risico klein te houden:

In het geval van hydraulisch ontgraven:

- Bij de uitvoering een cutterzuiger gebruiken en verwekingsgevoelige lagen laagsgewijs wegbaggeren;
- Zorgen voor dat de ontgravingen in den natte plaats vinden, met natuurlijke toestroom van zand, waar gewerkt wordt met constante zuigdiepte en verhaalsnelheid.

In het geval van mechanisch ontgraven:

- De ontgraving met een kraanschip met knijper uitvoeren in lagen van enkele meters. De exacte dikte van de lagen zal bepaald dienen te worden voor aanvang van de uitvoering.

Naast het winnen van zand, kunnen ook andere trillingen een aanleiding zijn voor verwekingsvloeiing. Door het inbrengen van bijvoorbeeld funderingspalen kunnen wateroverspanningen ontstaan in de verwekingsgevoelige laag, waarna de schuifsterkte wegvalt en het risico bestaat op instabiliteit van het talud. Bij werkzaamheden die trillingen kunnen veroorzaken tijdens of nadat de zandwinning is gegraven, wordt geadviseerd om waterspanningsmeters toe te passen. Bij te hoog oplopen van de wateroverspanningen dienen de

³ Om bresvloeiing helemaal uit te sluiten dient de toplaag eerst verwijderd te worden, zoals is beschreven in paragraaf 5.3.

werkzaamheden dan tijdelijk te worden gestaakt tot het moment dat de waterspanningen weer zijn gedaald tot een aanvaardbaar niveau.

5.4.5 Conclusie

Met de huidige schetsontwerpen en analyses kan verwekingsvloeiing en bresvloeiing niet worden uitgesloten. Om te komen tot een stabiele zandwinput tijdens de uitvoering worden de volgende maatregelen geadviseerd:

- Uitvoering van nadere analyse om verwekingsvloeiing uit te sluiten op basis van korreldiameter.
- Aanpassing van het ontwerp door een platberm van 17,5 m breed op NAP -14,5 m toe te voegen. De taludhelling reduceren⁴ tot een gemiddelde taludhelling van 1:3,5.
- Fasering toe te passen waarbij de bovenste 3,5 m voorzichtig wordt afgegraven voordat de rest van het voorland wordt ontgraven.

Er wordt dus een aanpassing van het ontwerp geadviseerd om bresvloeiing uit te sluiten. Om het risico op verwekingsvloeiing uit te sluiten is een nadere analyse geadviseerd, omdat een aanpassing van het ontwerp op basis van de huidige analyse een grote impact op het ruimtebeslag heeft. Afhankelijk van de resultaten worden daarbij nog aanvullende uitvoeringsmaatregelen en monitoring geadviseerd.

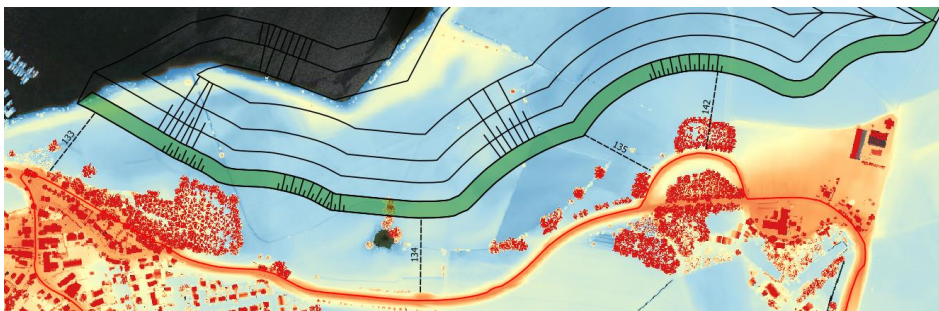
⁴ De verwachting is dat een talud van 1:3,5 niet zal afschuiven vanwege de hoge berekende stabiliteitsfactor bij een talud van 1:4, maar dit dient ter controle nog te worden berekend.

6. Effect zandwinning op dijk

Voor de dijk wordt een deel van het voorland ontgraven. Dit kan mogelijk een effect hebben op de stabiliteit van de dijk en het risico op zandmeevoerende wellen (piping).

6.1 Stabiliteit buitenwaarts

De ontgravingen van het voorland voor de zandwinning gebeuren buiten de beschermingszone. Dit betekent dat deze ontgravingen geen effect zullen hebben op de stabiliteit van de waterkering. Zoals is weergegeven in Figuur 6-1 is de afstand van de teen van de dijk tot de oeverzone van de zandwinning minimaal 130 m. Het is niet mogelijk dat een glijvlak ontstaat met een lengte van meer dan 130 m. Daarnaast heeft een ontgraving van het voorland geen significant invloed op de waterstanden gerelateerd aan het faalmechanisme stabiliteit buitenwaarts. Concluderend zal een ontgraving buiten de beschermingszone niet leiden tot een verhoogd risico op instabiliteit van het buitentalud.



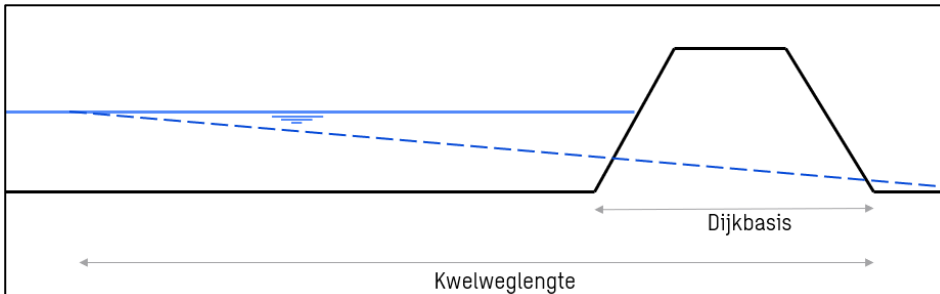
Figuur 6-1 Afstand (in meters) ontgravingen vanaf teen van de dijk. Kaart geprojecteerd op hoogtekkaart (AHN4)

6.2 Piping

Het huidige voorland heeft een dempend effect en daarmee ook reducerend effect op het risico op piping. Door (een deel van) het voorland weg te graven kan potentieel een verhoogd risico op piping optreden.

De maximale kwelweglengte is maximaal het dubbele van de dijkbasis [10]. De pipegroei zal namelijk tot halverwege de kwelweglengte een evenwicht bereiken. Wanneer het intredepunt verder dan de dijkbasis van de buitenteen geschematiseerd wordt zal de pipe tot maximaal de buitenteen groeien. Uit onderzoek is naar voren gekomen dat meer voorland meegenomen mag worden voor de kwelweglengte. Bij waterschap Rivierenland wordt daarom een

maximale kwelweglengte van driemaal de dijkbasis gehanteerd. In Figuur 6-2 is schematisch weergegeven wat wordt bedoeld met kwelweglengte, dijkbasis en stijghoogteverloop.



Figuur 6-2 Schematisering kwelweglengte met stijghoogteverloop (blauwe strepen)

De dijkbasis bij Alem, afstand buitenteen tot binnenteen, heeft een breedte van maximaal 70 m. Voor de kwelweglengte mag maximaal driemaal de dijkbasis meegenomen worden, wat in dit geval neerkomt op 210 m. Van het voorland wordt dus 140 m meegenomen. Zoals te zien is in Figuur 6-1 vindt de ontgraving ruim 130 m plaats vanaf de buitenteen. Daarnaast is een 30 m brede oeverzone voor het daadwerkelijke talud van de zandwinput. Dat betekent dat de ontgravingen op een afstand van 160 m. Dit is dus verder weg van de dijk dan meegenomen mag worden in de pipingberekening. Daarom kan worden vastgesteld dat de zandwinput conform de huidige normen en regelgeving geen nadelig invloed heeft op het risico op piping.

6.3 Stabiliteit binnenwaarts

De hoogte van de freatische lijn (de grondwaterstand binnen de dijk) en de stijghoogte (de opwaartse druk vanuit de zandlaag) hebben invloed op de stabiliteit van de binnenzijde van de dijk. Het risico op instabiliteit van de waterkering is het hoogst bij een hoge freatische lijn en hoge stijghoogte. Deze situatie wordt veroorzaakt door een hoge waterstand.

Het ontgraven van het voorland heeft in ieder geval geen invloed op de freatische lijn voor de analyse op stabiliteit binnenwaarts, omdat de freatische lijn niet afhankelijk is van het voorland. Zoals naar voren is gekomen bij de geohydrologische analyse, heeft het ontgraven van het voorland nagenoeg geen invloed op de stijghoogtes in het achterland. Daarnaast zal bij maatgevend hoogwater de deklaag achter de dijk opbarsten, zoals ook weergegeven in hoofdstuk 4. Na opbarsten zal de stijghoogte niet verder kunnen stijgen, waardoor een potentieel verhoogde stijghoogte niet zal leiden tot andere uitgangspunten voor de analyse op stabiliteit binnenwaarts.

De waterlijnen in de dijk zullen in dit geval niet veranderen en daardoor zal de ontgraving van de zandwinput niet leiden tot een verhoogd risico op instabiliteit van de binnenzijde van de dijk.

7. Erosie door golfslag

De oever van de zandwinput kan mogelijk schade ondervinden door golfklappen. Door herhaaldelijke belasting door golven die op de oever klappen, kan een deel van de grond eroderen. Door de zandwinput zal de strijklengte, de maximale lengte over het water waar golven door de wind kunnen ontstaan, toenemen ten opzichte van de huidige situatie. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op het effect van de zandwinput op de golfhoogte en de daarbij verwachte schade. Vervolgens wordt aangegeven welke maatregelen genomen kunnen worden om het risico te minimaliseren.

7.1 Effect winning op golfhoogte

De zandwinput ligt buiten de beschermingszone van de waterkering. Dat betekent dat er na realisatie van de zandwinput een breed voorland aanwezig is. Dit voorland zal niet gedurende één storm volledig wegslaan en zal daardoor ook geen effect hebben op de stabiliteit van de waterkering. Echter is het wel mogelijk dat een storm een gedeeltelijke afslag van het voorland veroorzaakt. Om het risico op golfafslag van het voorland in kaart te brengen, worden de golven bij een terugkeertijd van 10 jaar en 100 jaar berekend.

7.1.1 Locaties en strijklengtes

Op een drietal locaties, namelijk in het zuiden, zuidoosten en noordoosten van de oever, is de golfhoogte bepaald. De locaties zijn gekozen zodat er vanuit elke (relevante) windrichting gecontroleerd kan worden of afslag van de oever ook kan leiden tot erosie binnen de beschermingszone van de dijk. De locaties zijn weergegeven in Figuur 7-1.



Figuur 7-1 Locaties bepaling hydraulische belasting afslag voorland

De strijklengtes zijn ingemeten in een geografisch informatiesysteem (GIS) omgeving en is weergegeven in Appendix 4. De strijklengtes zijn gemeten vanaf de drie locaties, zoals weergegeven in Figuur 7-1, totdat de bodem ergens weer op een hoogte van minimaal NAP +0,0 m is. De gemeten strijklengtes per locatie per windrichting zijn weergegeven in Tabel 7-1.

Tabel 7-1 Strijklengtes in meters bij huidige situatie en na ontgraven van zandwinput

		W	WNW	NW	NNW	N	NNO	NO	ONO
Huidige situatie	Locatie 1			290	308	484	671	750	148
	Locatie 2		334	549	550	335	117	170	
	Locatie 3	851	589	412	298	126	224	121	
Zandwinput	Locatie 1			504	498	663	848	960	1298
	Locatie 2		915	794	823	687	800	926	
	Locatie 3	1362	1002	792	509	481	454	480	

7.1.2 Resultaten berekeningen Bretschneider

Met een combinatie van windsnelheid, strijklengte en waterdiepte kan de golfhoogte worden berekend. Dit is gedaan conform de formule van Bretschneider.

De windsnelheid is bepaald bij weerstation Deelen. Dit weerstation ligt relatief (ten opzichte van andere weerstations die gebruikt worden door Hydra-NL) dichtbij en is net als de beschouwde locaties landinwaarts gelegen. Op basis van dit meetstation is per windrichting bij een terugkeertijd van 10 jaar en 100 jaar de windsnelheid bepaald.

De strijklengtes uit Tabel 7-1 zijn aangehouden voor de berekeningen waarbij de zandwinput is gegraven.

De waterstand is volgens de data van Rijkswaterstaat uit 2020 en 2021 minimaal circa NAP +0,0 m. De ontgravingen zijn minimaal op NAP -10,0 m, waardoor een waterdiepte van 10 m of meer aanwezig is. Een waterdiepte van meer dan 10 m heeft nauwelijks effect op de resultaten waardoor een waterdiepte van 10 m is aangehouden voor de berekeningen van de golfhoogte.

In Tabel 7-2 zijn de resultaten van de berekeningen met de formule van Bretschneider weergegeven. Alle resultaten zijn in meer detail in Appendix 7 samengevoegd.

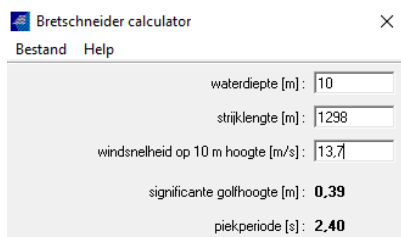
Tabel 7-2 Golfhoogte in meters bij ontgraven van zandwinput met het verschil in golfhoogte in meters t.o.v. de huidige situatie. Maatgevende golven per locatie zijn blauw gearceerd.

		W	WNW	NW	NNW	N	NNO	NO	ONO
1/10 jaar	Locatie 1			0,36 (0,07)	0,29 (0,05)	0,29 (0,03)	0,31 (0,03)	0,34 (0,03)	0,39 (0,23)
	Locatie 2		0,50 (0,17)	0,43 (0,06)	0,36 (0,05)	0,29 (0,07)	0,30 (0,17)	0,34 (0,17)	
	Locatie 3	0,64 (0,11)	0,52 (0,1)	0,43 (0,1)	0,29 (0,06)	0,25 (0,11)	0,24 (0,06)	0,26 (0,11)	
1/100 jaar	Locatie 1			0,46 (0,09)	0,36 (0,06)	0,35 (0,04)	0,38 (0,04)	0,42 (0,04)	0,48 (0,29)
	Locatie 2		0,64 (0,21)	0,55 (0,08)	0,44 (0,07)	0,35 (0,09)	0,37 (0,21)	0,41 (0,21)	
	Locatie 3	0,81 (0,14)	0,66 (0,13)	0,55 (0,13)	0,36 (0,07)	0,31 (0,13)	0,30 (0,08)	0,32 (0,14)	

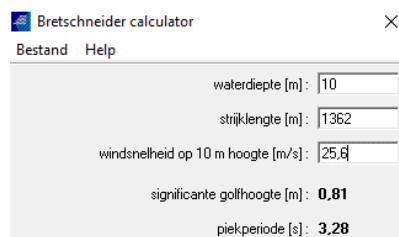
Zoals te zien is in bovenstaande tabel, treden de grootste golfhoogtes op bij locatie 3. De wind vanuit het westen is over het algemeen maatgevend en bij locatie 3 is de strijklengte het grootst. De golven zijn hier 11 cm (10 jaar) of 14 cm (100 jaar) hoger dan de huidige situatie.

7.1.3 Validatie resultaten

De golfhoogtes zijn berekend met de Bretschneider formule. Om te controleren of de berekeningen correct uitgevoerd zijn, zijn een aantal berekeningen ook gedaan met de Bretschneider calculator van Hydra-NL, zoals is weergegeven in Figuur 7-2 en Figuur 7-3.



Figuur 7-2 Validatie Bretschneider met Hydra-NL voor locatie 1 met wind uit het oostnoordoosten met terugkeertijd van 10 jaar



Figuur 7-3 Validatie Bretschneider met Hydra-NL voor locatie 3 met wind uit het westen met terugkeertijd van 100 jaar

Bij de berekeningen is uitgegaan van een waterdiepte van 10 meter. Variatie in de waterdiepte (meer dan 10 meter) heeft een minimaal verschil. Wanneer een waterdiepte van 30 meter wordt aangehouden worden de golven hoogstens een enkele centimeter hoger. Door dit minimale verschil is de waterdiepte niet verder in detail uitgewerkt.

In 2008 zijn ook de golfhoogtes bepaald voor een terugkeertijd van 10 jaar op basis van de toen geldende plannen [1]. Er was in 2008 een golfhoogte van circa 45 cm voor de zuidzijde (locatie 1 en 2 in bovenstaande berekeningen) en circa 77 cm voor de oostzijde (locatie 3 in bovenstaande berekeningen) bepaald. De golfhoogtes die hierboven zijn berekend bij een terugkeertijd van

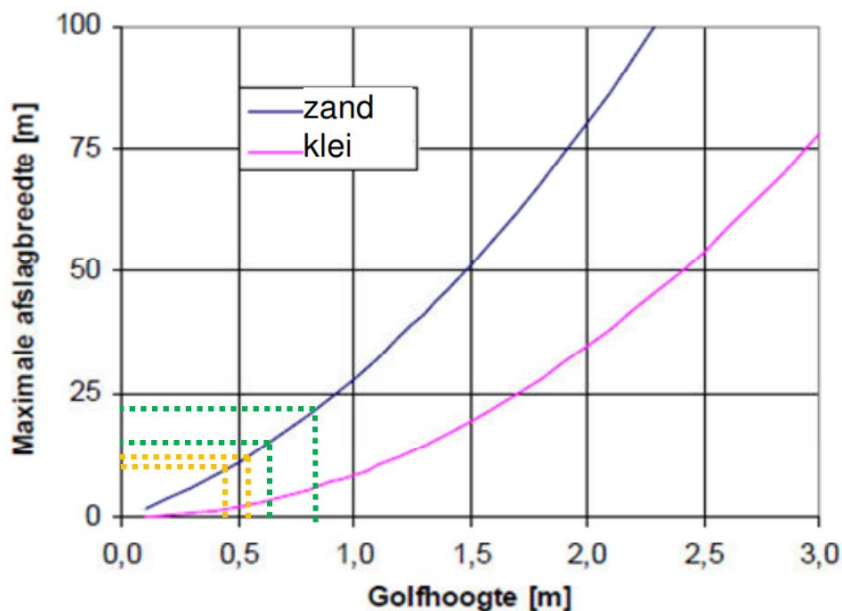
10 jaar zijn circa 5 a 10 cm lager dan in 2008. Dit is mogelijk te verklaren door de keuze van een ander weerstation. In 2008 was Schiphol als weerstation gekozen en dit weerstation ligt in de buurt van de kust en het weerstation Deelen niet. Daarnaast zijn de plannen voor de afmetingen van de zandwinput ook licht veranderd wat een kleine afwijking in de golfhoogte kan verklaren.

7.2 Golfafslag van voorland

Op basis van data van Rijkswaterstaat uit 2020 en 2021, varieert de waterstand bij Lith voornamelijk rond NAP +1,0 m met een enkele uitschieter naar boven. De waterstand nabij Lith zal nagenoeg overeenkomen met de waterstand bij Alem, aangezien het meetpunt bij Lith slechts 7 km bovenstrooms ligt en er geen sprake is van een sluis tussen het meetpunt en Alem. Op basis van het feit dat de waterstand de afgelopen jaren nauwelijks lager dan NAP +1,0 m is geweest, kan worden uitgegaan dat de golfaanval en daarmee de schade vooral op het talud boven NAP +0,0 m plaatsvindt.

Met behulp van Bretschneider is de golfhoogte bepaald op verschillende locaties. Bij een terugkeertijd van 10 jaar en 100 jaar is de golfhoogte voor locatie 1 en 2 respectievelijk maximaal 43 cm en 55 cm. De golfaanval vanuit het westnoordwesten heeft een grote hoek van inval voor de zuidzijde van de ontgraving en zal weinig impact hebben op het voorland. Daarom worden de golven vanuit het westnoordwesten buiten beschouwing gelaten. Voor locatie 3 is de golfhoogte bij een terugkeertijd van 10 jaar en 100 jaar respectievelijk maximaal 64 cm en 81 cm.

Op basis van het faalspoor golfafslag voorland in het WBI (Figuur 7-4) is de afslagbreedte bepaald. Als uitgangspunt is genomen dat de oever bestaat uit zand.



Figuur 7-4 Minimaal benodigde marge buiten de invloedszone met waarden (Tabel 7-3) ingetekend met oranje stippellijn voor zuidelijke locaties en groene stippellijn voor oostelijke locaties [9]

Zoals is weergegeven in Tabel 7-3 is de maximale afslagbreedte 16 m bij een storm met een terugkeertijd van 10 jaar en 22 m bij een storm met een terugkeertijd van 100 jaar. Zonder de zandwinput zal de afslag van het voorland slechts een enkele meter minder zijn, maar er is dan natuurlijk nog wel meer voorland aanwezig.

Tabel 7-3 Maximale afslagbreedte gedurende een storm gebaseerd op de significante golfhoogte zoals weergegeven tussen haakjes.

	1/10 jaar	1/100 jaar
Zuiden (locatie 1 en 2)	10 m ($H_s=0,43$)	12 m ($H_s=0,55$)
Oosten (locatie 3)	16 m ($H_s=0,64$)	22 m ($H_s=0,81$)

7.3 Maatregelen

Om de oever en het overgebleven voorland te beschermen kunnen zowel preventieve als correctieve maatregelen worden genomen. De afslag van het voorland is maximaal 22 m waardoor afslag van het voorland gedurende een storm niet binnen de beschermingszone zal komen. Afslag van het voorland zal daarom geen effect hebben op de stabiliteit van de dijk.

Om erosie van het voorland te voorkomen of te verminderen kan gekozen worden voor een bekleding van het talud vanaf NAP +0,0 m. Door de oever af te werken met klei zal het risico op erosie worden verminderd. De locatie is daarnaast ook geschikt voor een natuurvriendelijke oever. Met deze koppelkans kan zowel de oever minder snel eroderen en kan een mogelijk positief effect hebben op de natuur en biodiversiteit. Om de oever nog beter te beschermen tegen golfaanval kan ook gekozen worden voor grasbekleding. Een harde bekleding, zoals asfalt of steen, wordt echter afgeraden aangezien het niet nodig is op deze locatie en geen duurzame oplossing is.

Naast andere bekleding kan ook gekozen worden voor een zeer flauw talud. Naar verwachting zal een talud van ongeveer 1:10 (v:h) golfafslag en erosie van het voorland voorkomen [8]. Dit is mogelijk binnen de 30 meter zone tussen de zandwinput en de beschermingszone (150 m vanaf de waterkering).

De maximale afslagbreedte is gering, daarnaast zijn de uitgangspunten conservatief gekozen. Dit betekent dat er voldoende ruimte is om enige erosie van het voorland toe te staan. Om te voorkomen dat er zand erodeert binnen de beschermingszone van de dijk, dient wel na elke storm eventuele schade te worden hersteld. Dit betekent dat na een storm het voorland binnen enkele weken wordt geïnspecteerd en dat het grondlichaam direct wordt aangevuld.

Voor de golfafslag is gerekend met een terugkeertijd van 10 en 100 jaar. De norm voor de waterkering is 1/3000 jaar. Onder normomstandigheden zal de golfhoogte vanuit het westen maximaal 1,07 m zijn. Dit betekent dat de maximale afslagbreedte bij een storm bij de norm ongeveer 30 m zal zijn. Een dergelijke afslag van het voorland zal niet direct leiden tot falen van de waterkering, maar kan na verloop van tijd wel een negatief effect hebben voor piping.

8. Effect verplaatsen haven

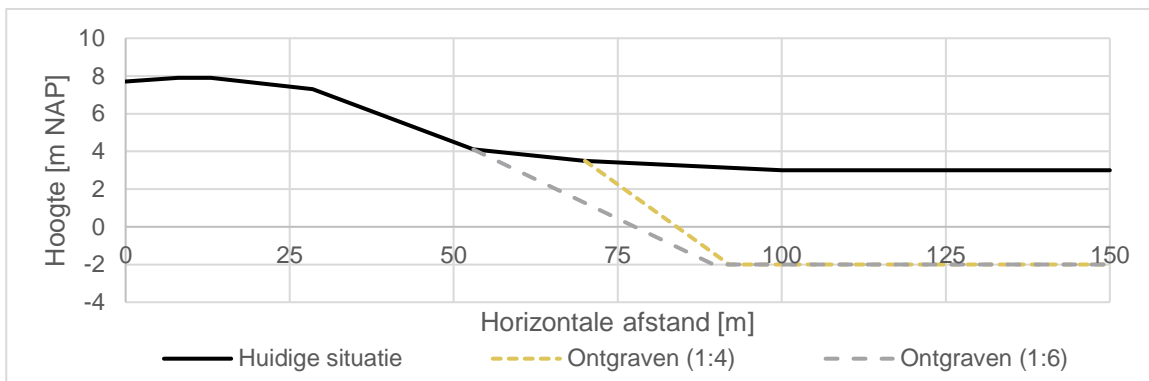
8.1 Stabiliteit buitenwaarts

Het ontgraven van het voorland bij de buitenteen van de dijk kan resulteren in een verhoogd risico op instabiliteit. Onder stabiliteit buitenwaarts wordt het risico op afschuiven van het dijkwal aan de waterzijde verstaan. Het grootste risico op afschuiven van de buitenwaartse zijde is bij een hoge waterstand in de dijk en een lage waterstand in de rivier. Dit waterstandsverschil kan veroorzaakt worden doordat het waterpeil snel zakt nadat er een hoogwater is opgetreden. Daarnaast kan het verschil ook veroorzaakt worden door hevige lokale regenval.

De dijkopbouw is voor deze analyse niet bekend, maar er kan op basis van algemene verwachtingen wel richting worden gegeven aan een veilige ontgraving. Voor het uiteindelijke ontwerp dient een stabiliteitsberekening te worden gemaakt.

Er wordt uitgegaan dat de ontgraving van het voorland gelijk is aan de bodem van de haven (NAP -2,0 m). Opvallend op deze locatie is het flauwe buitentalud van de dijk van 1:5 tot zelfs 1:7. Dit is een zeer flauw talud waardoor afschuiven van het buitentalud zeer onwaarschijnlijk is. Indien voor de haven vanaf de huidige teen onder eenzelfde taludhelling wordt ontgraven, zal dit zeer waarschijnlijk geen risico vormen voor instabiliteit aan de buitenzijde van het talud. Een haventalud van circa 1:4 zal waarschijnlijk ook niet leiden tot instabiliteit van het buitentalud. Indien gekozen wordt om niet direct bij de teen van de dijk, maar op een afstand te ontgraven, zal dit waarschijnlijk helemaal geen directe invloed hebben op de stabiliteit van de dijk. Een constructieve maatregel lijkt met de huidige beschikbare informatie overbodig.

Figuur 8-1 laat twee ontwerpen van ontgravingen zien die naar verwachting kansrijk zullen zijn. Een ontgraving onder een flauwer talud of verder weg van de dijk zal logischerwijs dan ook voldoen. Dit dient in een later stadium bij het ontwerp nog doorgerekend te worden.



Figuur 8-1 Verwachte profiel van ontgraving voor veilig buitentalud

8.2 Piping

Het huidige voorland heeft een dempend effect op de stijghoogte en pipevorming voor het mechanisme piping. Daarnaast heeft het voorland ook een positief effect op de toegestane lengte van de kwelweg. Zoals is beschreven in hoofdstuk 4 voldoet de dijk bij het zoekgebied van de haven op piping bij de norm. In deze paragraaf wordt eerst bepaald wat het effect is van het ontgraven in het zoekgebied van de haven en daarna welke maatregelen getroffen kunnen worden.

8.2.1 Effect ontgraven zoekgebied haven

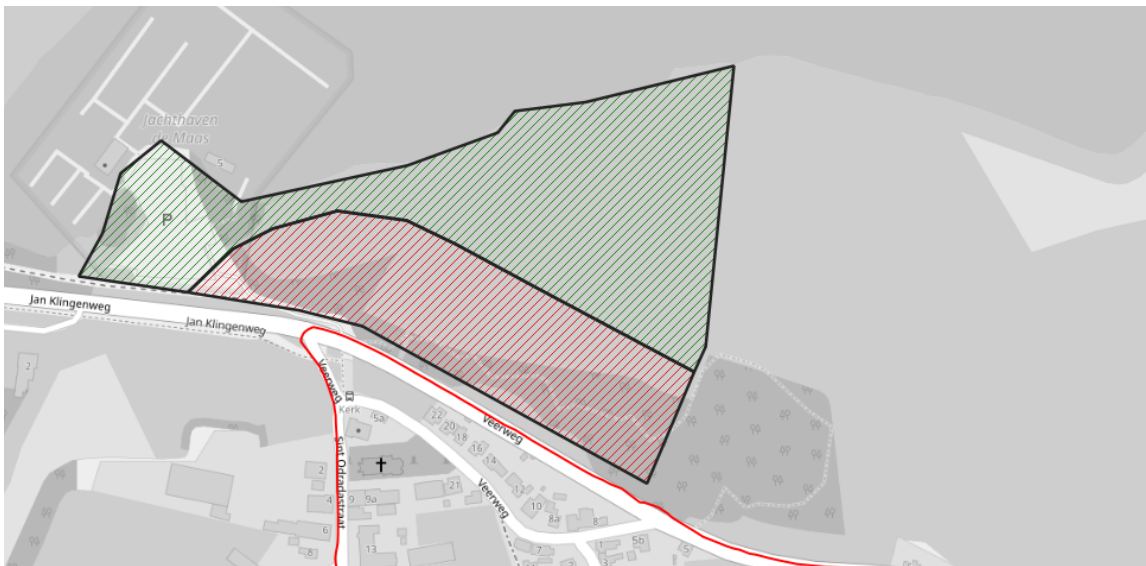
Er wordt in eerste instantie voor de berekeningen uitgegaan van ontgravingen vanaf de teen. In de volgende paragraaf wordt ook aangegeven hoeveel voorland intact moet blijven om te blijven voldoen aan de norm. Het effect wordt op locatie 2 en 3, zoals gepresenteerd in Figuur 3-1, berekend.

Aangezien opbarsten en heave ook plaatsvinden bij de aanwezigheid van het voorland, ligt de focus op de terugschrijdende erosie. Het ontgraven van het voorland heeft een groot effect op de veiligheidsfactor, zoals te zien is in de resultaten in Tabel 8-1. Zonder het voorland zal op beide locaties de dijk niet meer voldoen aan de norm op basis van de pipinganalyse.

Tabel 8-1 Veiligheidsfactor piping - terugschrijdende erosie

	Locatie 2	Locatie 3
Vereiste veiligheidsfactor	1,47	1,47
Huidige situatie	1,93	1,61
Ontgraven voorland	0,95	0,88

Voor een voldoende oordeel is bij locatie 2 en 3 respectievelijk een voorlandlengte van ongeveer 85,5 m en 82,5 m nodig. Indicatief levert dat het overzicht op zoals weergegeven in Figuur 8-2.



Figuur 8-2 Indicatie voor gebied dat ontgraven kan worden zodat de dijk nog voldoet aan de norm (groene arcering) en gebied waarbij ontgraving resulteert in een onvoldoende oordeel (rode arcering)

8.2.2 Maatregelen in ontwerp

Indien de haven dichtbij de dijk dan circa 85 m geplaatst wenst te worden, dan zijn maatregelen noodzakelijk zodat de dijk op deze locatie blijft voldoen aan de norm. Hierbij moet wel worden vermeld dat de 85 m afstand gebaseerd is op dezelfde parameters als gebruikt voor het in kaart brengen van de pipingopgave zoals weergegeven in hoofdstuk 4. Dit betekent dat er uitgegaan is van conservatieve uitgangspunten, waardoor in werkelijkheid mogelijk meer voorland ontgraven kan worden waarbij de dijk nog voldoet.

Er zijn twee mogelijke maatregelen beschouwd, namelijk klei ingraven of een pipingscherm aanbrengen. Deze worden beide hieronder verder besproken.

Klei-ingraving

Door klei in te graven in de bodem van de haven, zorgt dit voor weerstand zoals normaal gesproken ook het voorland zal doen. Voor een voldoende oordeel is een effectieve voorlandlengte⁵ van minimaal 81,8 m nodig. Indien meer voorland aanwezig is, is minimaal benodigde weerstand van de deklaag lager. Daarom is er gekeken naar klei-ingraving over drie verschillende afstanden. De minimaal benodigde deklaagdiktes zijn bepaald op een doorlatendheid van de deklaag van 0,15 m/dag. Dit is namelijk ook de gebruikte doorlatendheid bij de huidige deklaag van het voorland zoals is weergegeven in paragraaf 2.3.2. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 8-2. De berekeningen zijn gemaakt op basis van vergelijking 3-1 en 3-2 in paragraaf 3.2.2.

⁵ De effectieve voorlandlengte is de lengte waarover de potentiaal daalt en is dus niet hetzelfde als het daadwerkelijke voorland.

Tabel 8-2 Dimensionering maatregel klei-ingraving

	Eenheid	Optie 1	Optie 2	Optie 3
Lengte klei-ingraving	[m]	85	100	120
Leklengte (λ_1)	[m]	249,0	119,7	96,8
Weerstand voorland (c)	[dagen]	9,44	2,18	1,43
Doorlatendheid deklaag	[m/dag]	0,15	0,15	0,15
Benodigde dikte deklaag	[m]	1,42	0,33	0,21

De weergegeven lengte van de klei-ingraving is de lengte gemeten vanaf de buitenteen van de dijk. Dus indien niet het hele voorland afgegraven wordt hoeft enkel klei-ingraving tot deze afstand te worden uitgevoerd. Het is wel van belang dat ook het haventalud wordt bedekt met een dikke deklaag. De dikte van de deklaag voor het haventalud zal, tegen piping, minimaal gelijk moeten zijn aan de dikte in het voorland. De exacte dikte van de deklaag op het haventalud is afhankelijk van andere mogelijke faalmechanismen en ontwerp, zoals golfafslag, en zal daarom bij het ontwerp nader bepaald moeten worden.

Zoals te zien is in de resultaten heeft de lengte waarover de klei-ingraving gebeurd een groot effect op de benodigde dikte van de deklaag. Het risico van een dunne deklaag aanbrengen is wel dat de doorlatendheid mogelijk lager is dan de verwachte 0,15 m/dag. Daarnaast kan ook kleine erosie direct leiden tot een mogelijke zwakke plek wat resulteert in een verhoogd risico op piping.

Pipingscherm

Een pipingscherm is een constructief element wat de stroming van het water onder de dijk verstoort. Op basis van een berekening op het deelmechanisme heave is een pipingscherm gedimensioneerd.

Als uitgangspunt is aangenomen dat het hele voorland wordt afgegraven, waardoor de stijghoogte bij de buitenteen van de dijk gelijk is aan de waterstand. De diepte tot waar het pipingscherm moet komen is afhankelijk van de stijghoogte op die locatie. Aan de binnenzijde is de stijghoogte minder hoog, waardoor het pipingscherm ook minder diep hoeft.

Een pipingscherm in de buitenteen dient in ieder geval tot een diepte van NAP -4,42 m te worden aangebracht. In de binnenteen tot een diepte van NAP -1,92 m.

Dit ontwerp is op basis van schetsniveau. Voor een uiteindelijk ontwerp worden aanvullende grondonderzoeken geadviseerd.

8.3 Stabiliteit binnenwaarts

Door het ontgraven van het voorland is de demping mogelijk minder groot waardoor een hogere stijghoogte kan plaatsvinden. Echter, met in achtname van bovenstaande maatregelen, zal er geen of bijna geen toename van de stijghoogte plaatsvinden ten opzichte van de huidige situatie. Een ander component wat van invloed is op de stabiliteit aan de binnenzijde, is de freatische lijn. De freatische lijn zal niet anders zijn in de dijk door ontgravingen van het voorland in het scenario van maatgevend hoogwater. Deze constatering worden ook onderschreven door het geohydrologisch onderzoek.

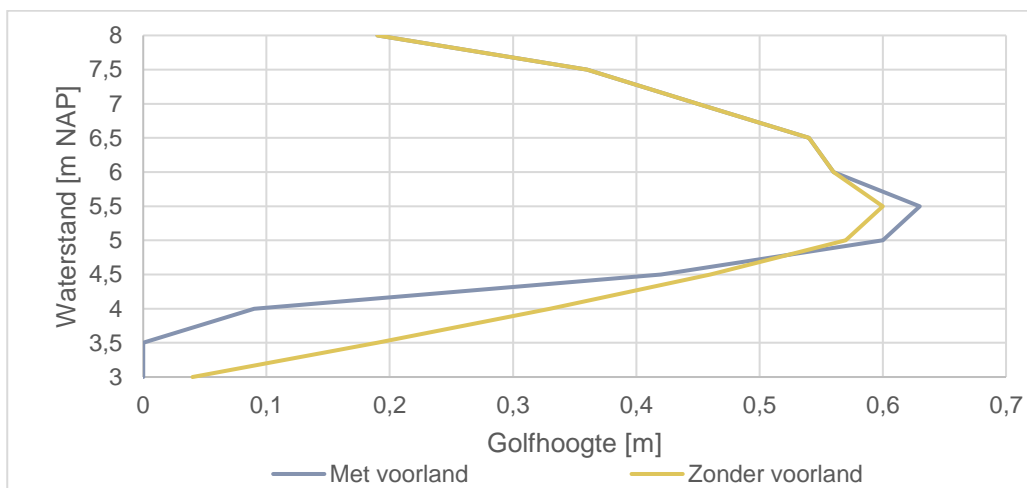
Aangezien er aan de binnenzijde geen aanpassingen worden gedaan kan worden geconcludeerd dat het risico van het ontgraven van het voorland op de

stabiliteit aan de binnenzijde verwaarloosbaar klein is. Dit komt ook doordat het achterland erg hoog is of dat opbarsten toch plaatsvindt waardoor de stijghoogte niet verder kan stijgen in maatgevende situatie.

8.4 Effect op grasbekleding dijk

Het ontgraven van het voorland kan mogelijk leiden tot hogere golven die op de dijk komen. Uit de berekeningen met Hydra-NL komt naar voren dat het ontgraven van het volledige voorland binnen het zoekgebied voor de haven geen effect heeft op de maximale golfbelasting op de dijk.

Zoals te zien is in Figuur 8-3 resulteert het ontgraven in een verhoogde golfhoogte bij lage waterstanden tot maximaal bij een waterstand van NAP +4,7 m. Dit is verklaarbaar, aangezien het voorland een dempend effect heeft op golven als de waterdiepte maximaal tweemaal de golfhoogte is. Wanneer de waterdiepte groot is, worden golven niet gedempt door de aanwezigheid van voorland. Rond NAP +5,5 m is bij de maximale golfhoogte een klein onverklaarbaar verschil te zien. Dit heeft mogelijk te maken met de schematisering van de teen van de dijk in de software Hydra-NL. Het ontgraven van het voorland zal in ieder geval niet leiden tot een hogere maximale golfhoogte.



Figuur 8-3 Effect ontgraven voorland op golfhoogte bij de teen van de dijk uitgezet tegen de waterstand

Vervolgens is het effect van de golfklappen op de erosie van de grasbekleding op de dijk geanalyseerd. Dit is berekend met de software BM Gras Buitentalud voor grasbekleding die gekwantificeerd kan worden als open of als gesloten zoden. Op basis van de analyse is een veiligheidsfactor van 4,00 en 2,45 voor respectievelijk gesloten en open zoden berekend. Een veiligheidsfactor van meer dan 1,00 geeft weer dat de bekleding niet faalt, dus dit betekent dat de bekleding voldoet bij de norm. Het ontgraven van het voorland resulteert ook niet in een hogere kans op erosie van het buitentalud van de dijk.

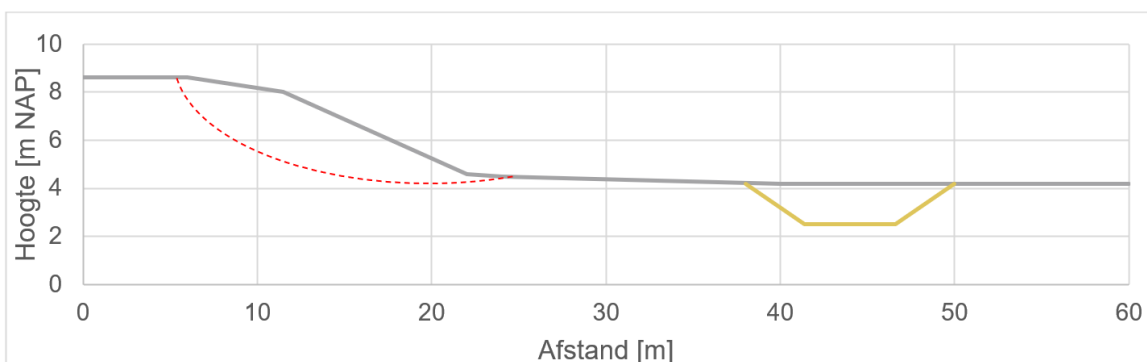
9. Effect getijdengeul

In het voorland van het dijktraject 38-2 wordt in kaart gebracht of een getijdengeul aangelegd kan worden. De getijdengeul komt gedeeltelijk binnen de beschermingszone en kan daardoor mogelijk invloed hebben op de stabiliteit van de waterkering. Voornamelijk omdat een gedeelte van de deklaag ontgraven wordt. In deze paragraaf wordt de stabiliteit binnenwaarts, stabiliteit buitenwaarts en piping beschouwd. Vervolgens wordt er een algemeen advies gegeven over het ontwerp.

9.1 Stabiliteit buitenwaarts

Door een ontgraving te doen vlak voor de dijk kan mogelijk een verhoogd risico op afschuiven van het buitentalud plaatsvinden. Voornamelijk bij de rotonde tussen Alem en Zaltbommel wordt de getijdengeul in de plannen vlak voor de dijk gerealiseerd. De dijk heeft op deze locatie, gemeten uit AHN4, een talud van circa 1:4.

Op de tekeningen van het plan komt de getijdengeul op een afstand van minimaal 35 m vanaf de kruin van de dijk. Indicatief ziet het profiel er dan uit zoals weergegeven in Figuur 9-1.



Figuur 9-1 Indicatieve doorsnede buienzijde traject 38-2 (grijs) en de getijdengeul (geel) met de verwachte glijcirkel (rode stippellijn)

Indien de getijdengeul op een afstand van circa 15 m vanaf de teen van de dijk ligt het waarschijnlijk dat de maatgevende glijcirkel rond de teen uittreedt. Dat zal betekenen dat de getijdengeul geen effect heeft op de stabiliteit van het buitentalud van de dijk. Indien de getijdengeul dichterbij gegraven wordt kan de maatgevende glijcirkel in de geul uittreden, waardoor het risico op instabiliteit van het buitentalud hoger is dan in de huidige situatie.

Het is zeer onwaarschijnlijk dat een glijvlak ver van de teen van de dijk aan de buitenzijde uittreedt. Bij binnenwaartse stabiliteit is het wel mogelijk dat het glijvlak langgerekt is vanwege opwaartse druk, de stijghoogte onder de deklaag. Deze opwaartse druk is niet of nauwelijks aanwezig in het voorland, waardoor een glijvlak aan de buitenzijde cirkelvormig zal zijn. Het is daarom onwaarschijnlijk dat de glijcirkel breed is en ver vanaf de teen uittreedt.

Voor het uiteindelijke ontwerp wordt geadviseerd om minimaal één stabiliteitssom te maken waar de geul het meest dichtbij de waterkering ligt. Er worden geen stabiliteitsproblemen verwacht, dus op basis van buitenwaartse stabiliteit is de getijdengeul een kansrijke ontwikkeling.

9.2 Piping en stabiliteit binnenwaarts

Op basis van de SOS-scenario's en beschikbaar onderzoek blijkt dat een deklaagdikte in het voorland aanwezig is van circa 2,0 m. Met het graven van een getijdengeul zal deze deklaagdikte grotendeels worden weggegraven. Wanneer de deklaag weg is, is de weerstand door het voorland lager. Daardoor zal de stijghoogte minder gedempt zijn. Dit betekent dat vanwege een hogere stijghoogte mogelijk een hoger risico op instabiliteit aan de binnenzijde van de waterkering is. Daarnaast is een kortere kwelweg aanwezig en zal piping sneller optreden. Dit betekent dat de pipe minder ver hoeft te groeien om te leiden tot falen van de dijk. Voor piping zal de aanwezige kwelweglengte op de meest ongunstige plek 170 m zijn in plaats van de huidige 400 m.

Bovenstaande constatering gaat uit van het graven van een getijdengeul zonder dat er een voldoende dikke kleilaag overblijft of aan wordt gebracht. Indien eenzelfde dikke deklaag aanwezig blijft als in de huidige situatie zal de getijdengeul niet leiden tot een verhoogd risico op piping of instabiliteit aan de binnenzijde.

9.3 Ontwerp en vervolgstappen

Voor het ontwerp van de getijdengeul zijn vanuit geotechnisch oogpunt twee aspecten van belang, namelijk de afstand tot de dijk en de dikte van de kleilaag onder de getijdengeul.

9.3.1 Geometrie

De getijdengeul kan waarschijnlijk redelijk dichtbij de teen van de dijk gegraven worden zonder dat het leidt tot afkeuren van de dijk op de stabiliteit aan de buitenzijde. Dit is de verwachting vanwege het feit dat het talud redelijk flauw is (1:4). Door de getijdengeul op een afstand van minimaal 15 m vanaf de teen van de dijk te graven is de verwachting dat de getijdengeul helemaal geen invloed op de stabiliteit van het buitentalud heeft. Zoals eerder gemeld wordt er geadviseerd om in ieder geval een stabiliteitsberekening uit te voeren. Hiervoor dient wel de ondergrond en de dijk voldoende in kaart te zijn gebracht.

9.3.2 Dikte deklaag

Waterschap Rivierenland heeft aangegeven dat een kleilaag van minimaal 1,5 m vereist is bij een dergelijke ingreep in het voorland. Dit komt, volgens het SOS, ook redelijk overeen met de huidige deklaagdikte en is daarom ook een zeer logische eis. Indien deze deklaag wordt aangehouden zal dat niet voor een verhoogd risico op piping of instabiliteit van de binnenzijde zorgen.

Mogelijk is een dikkere kleilaag dan de aangenomen 1,7 a 2,0 m aanwezig op de locatie voor de getijdengeul. Door het uitzetten van boringen kan de deklaagdikte beter in kaart worden gebracht en is het eventueel niet nodig om overal 1,5 m extra te ontgraven om op te vullen met klei. De boringen dienen dus in ieder geval tot een diepte van de getijdengeul plus 1,5 m uitgevoerd te worden. Daarnaast wordt in het kader van duurzaam grondgebruik geadviseerd om te kijken naar de mogelijkheid om de klei die ontgraven wordt her te gebruiken als kleilaag onder de getijdengeul.

10. Conclusie en aanbevelingen

In deze notitie zijn veel geotechnische aspecten rond de gebiedsontwikkeling bij Alem geanalyseerd. Hieronder worden kort de belangrijkste conclusies en aanbevelingen gepresenteerd.

10.1 Pipingopgave

Op basis van conservatieve uitgangspunten voldoet de dijk rond Alem niet op piping vanwege het lage achterland tussen de Meerenstraat en de Veerweg. Er wordt geadviseerd om eerst onderzoek te doen na de doorlatendheden en de deklagen in voor- en achterland, aangezien kleine optimalisaties al kunnen leiden tot een voldoende oordeel. Op de rest van het traject ten noordwesten van Alem voldoet de dijk wel op piping.

10.2 Zandwinput

Het ontwerp van de zandwinput zal leiden tot een stabiel talud. Echter zijn er voor de uitvoering risico's geïdentificeerd. Zo is er een hoge kans op verwekingsvloeiing met eventuele extra bresvloeiing als gevolg. Om te komen tot een stabiele zandwinput tijdens de uitvoering zijn de volgende maatregelen geadviseerd:

- Uitvoering van nadere analyse om verwekingsvloeiing uit te sluiten op basis van korreldiameter.
- Aanpassing van het ontwerp door een platberm van 17,5 m breed op NAP -14,5 m toe te voegen. De taludhelling reduceren tot een gemiddelde taludhelling van 1:3,5.
- Fasering toe te passen waarbij de bovenste 3,5 m voorzichtig wordt afgegraven voordat de rest van het voorland wordt ontgraven.

Er wordt dus een aanpassing van het ontwerp geadviseerd om bresvloeiing uit te sluiten. Om het risico op verwekingsvloeiing uit te sluiten is een nadere analyse geadviseerd, omdat een aanpassing van het ontwerp op basis van de huidige analyse een grote impact op het ruimtebeslag heeft. Afhankelijk van de resultaten worden daarbij nog aanvullende uitvoeringsmaatregelen en monitoring geadviseerd.

De ontgraving van de put conform het huidig ontwerp zal niet leiden tot een verhoogd risico op instabiliteit of piping van de waterkering.

10.3 Verplaatsen haven

Voor het verplaatsen van de haven zal een deel van het voorland worden ontgraven. Afhankelijk van de afstand tot de teen van de dijk, kan de ontgraving een negatief invloed hebben op de stabiliteit van de dijk.

Vanwege het flauwe buitentalud van de dijk is de verwachting dat het risico op instabiliteit laag is en er redelijk dichtbij de dijk ontgraven kan worden. Indien een taludhelling van 1:6 wordt aangehouden of de ontgraving op een afstand van circa 30 m van de teen wordt uitgevoerd zal de dijk waarschijnlijk blijven voldoen op stabiliteit. Het uiteindelijke ontwerp dient wel geverifieerd te worden met een stabiliteitsberekening. Hiervoor is wel aanvullende informatie over bodem- en dijkopbouw nodig.

Zolang een voorlandlengte van minimaal 85 m aanwezig is in het zoekgebied van de haven, zal het voorland zorgen voor voldoende demping en voldoet de dijk op piping. Indien er meer voorland wordt ontgraven dienen maatregelen getroffen te worden. Het voorland kan gecompenseerd worden met een klei-ingraving van ongeveer 1,5 m dik of met een pipingscherm. Afhankelijk van de locatie van het scherm dient deze te worden ingebracht tot een diepte van NAP -4,42 m in de buitenteen of NAP -1,92 m in de binnenteen. Voor alle analyses op piping geldt dat met aanvullend grondonderzoek (voornamelijk op doorlatendheid zandlaag en deklaagdikte in het voor- en achterland) veel optimalisatie mogelijk is.

Het ontgraven van het voorland voor de haven leidt niet tot een verhoogd risico op erosie van de grasbekleding of stabiliteit van het binnentalud. In combinatie met de voorgestelde maatregelen is het verplaatsen van de haven vanuit geotechnisch oogpunt kansrijk.

10.4 Getijdengeul

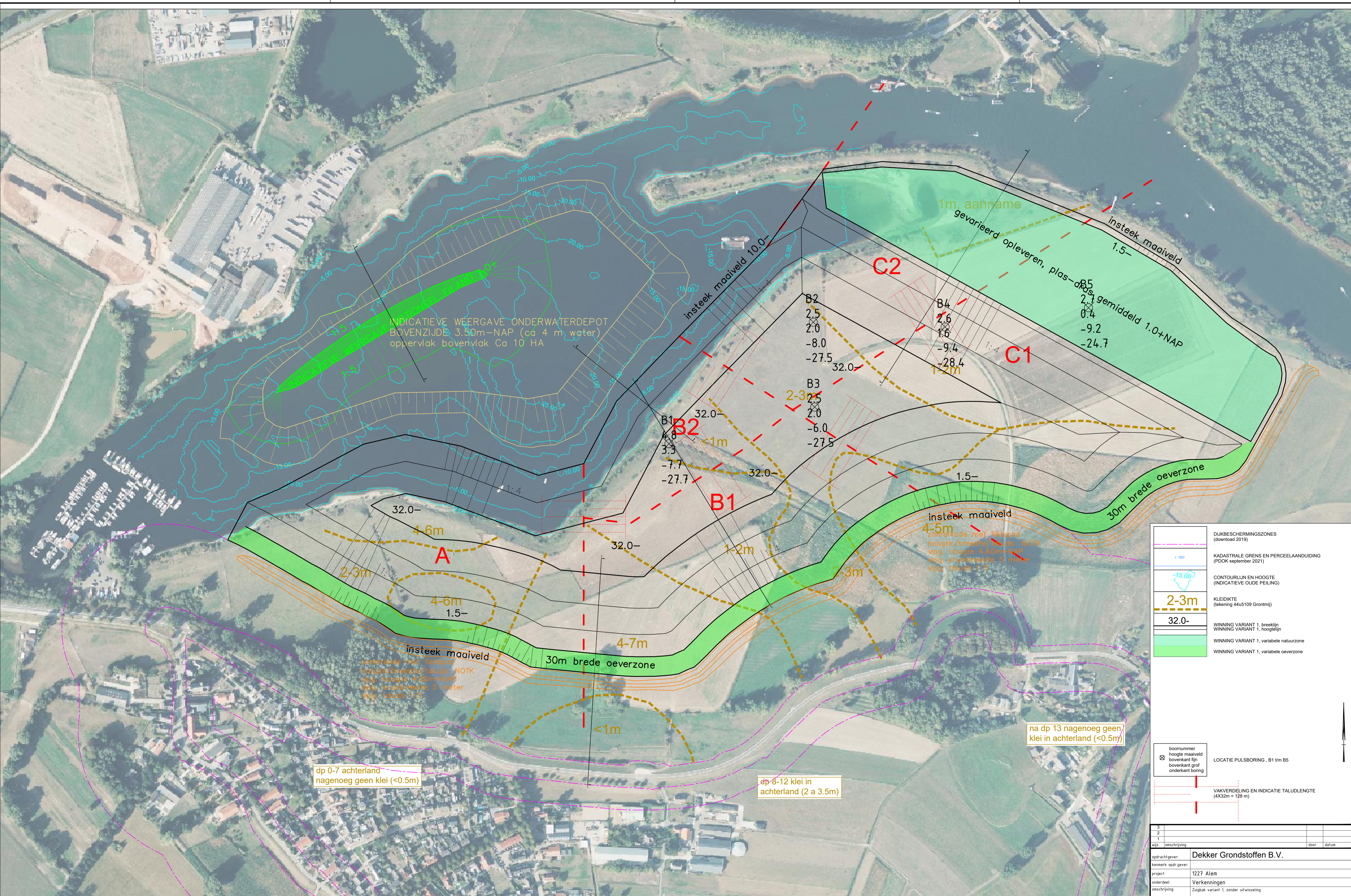
De realisatie van de getijdengeul is vanuit geotechnisch oogpunt zeer kansrijk. Als de getijdengeul met een afstand van minimaal 15 m van de teen van de dijk wordt aangebracht met een kleilaag van minimaal 1,5 m dik onder de geul zal de geul waarschijnlijk niet leiden tot een verhoogd risico voor de dijk. Er wordt in ieder geval geadviseerd om één stabiliteitsberekening uit te voeren voor de locatie waar de geul het meest in de buurt komt van de dijk.

Voor de uitvoering wordt geadviseerd om boringen van de diepte van de geul plus 1,5 m uit te zetten om de deklaag goed in kaart te brengen. Daarnaast wordt geadviseerd om te kijken naar de mogelijkheid om de klei die ontgraven wordt her te gebruiken als kleilaag onder de getijdengeul.

11. Referenties

- [1] Factsheets normering primaire waterkeringen, Ministerie van Infrastructuur en Milieu (28 juni 2016)
- [2] Grondonderzoek betreffende Herinrichting Marensche Waarden te Alem, Fugro ingenieursbedrijf B.V. (30 maart 2007)
- [3] Geotechnisch onderzoek, Ten behoeve van ontgravingen te Alem, Wiertsema & Partners B.V. (1 februari 2022)
- [4] Verbetering Maasdijken Bommerwaard - Grondmechanisch onderzoek, Grontmij Gelderland (juli 1997)
- [5] Leidraad Toetsen op Veiligheid Regionale Waterkeringen. STOWA, 2015
- [6] Shore Protection Manual, volume I, US Army Corps of Engineers, Virginia (1977)
- [7] SBW Faalmechanismen in losgepakt zand, Deltares (december 2012)
- [8] Memo golfhoogten bij uitbreiding zandwinning Marensche Waarden 251402, Grontmij (14 april 2008)
- [9] Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017 - Bijlage III Sterkte en veiligheid, Ministerie van Infrastructuur en Milieu (1 januari 2017)
- [10] Schematiseringshandleiding piping, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (28 mei 2021)
- [11] CUR-aanbeveling 113 - Oeverstabiliteit bij zandwinputten. CUR bouw & infra (2008)
- [12] Eerste Beoordeling Primaire Keringen Overstromingskans - Veiligheidsoordeel Dijktraject 39-1, Waterschap Rivierenland (23 april 2020)

Appendix 1 Ontwerpvarianten zandwinput



SITUATIE
SCHAAL 1 : 2.500

OPMERKINGEN

- Coördinatensysteem RD(x,y) en NAP(z)
- Maten in meters, tenzij anders vermeld
- Hoogtematen in meters t.o.v. N.A.P., tenzij anders vermeld
- Diameters in millimeters, tenzij anders vermeld

	DIJKBESCHERMINGSZONES (download 2019)
	KADASTRALE GRENSEN EN PERCEELAANDUIDING (PDK september 2021)
	CONTOURLIJN EN HOOGTE (INDICATIEVE OUDE PEILING)
	KLEIDIKTE (tekening 44u5109 Grontmij)
	WINNING VARIANT 1, breeklijn
	WINNING VARIANT 1, hooglijn
	WINNING VARIANT 1, variabele natuurzone
	WINNING VARIANT 1, variabele oeverzone

boornummer
hoogte maaiveld
bovenkant fijn
bovenkant grof
onderkant boring

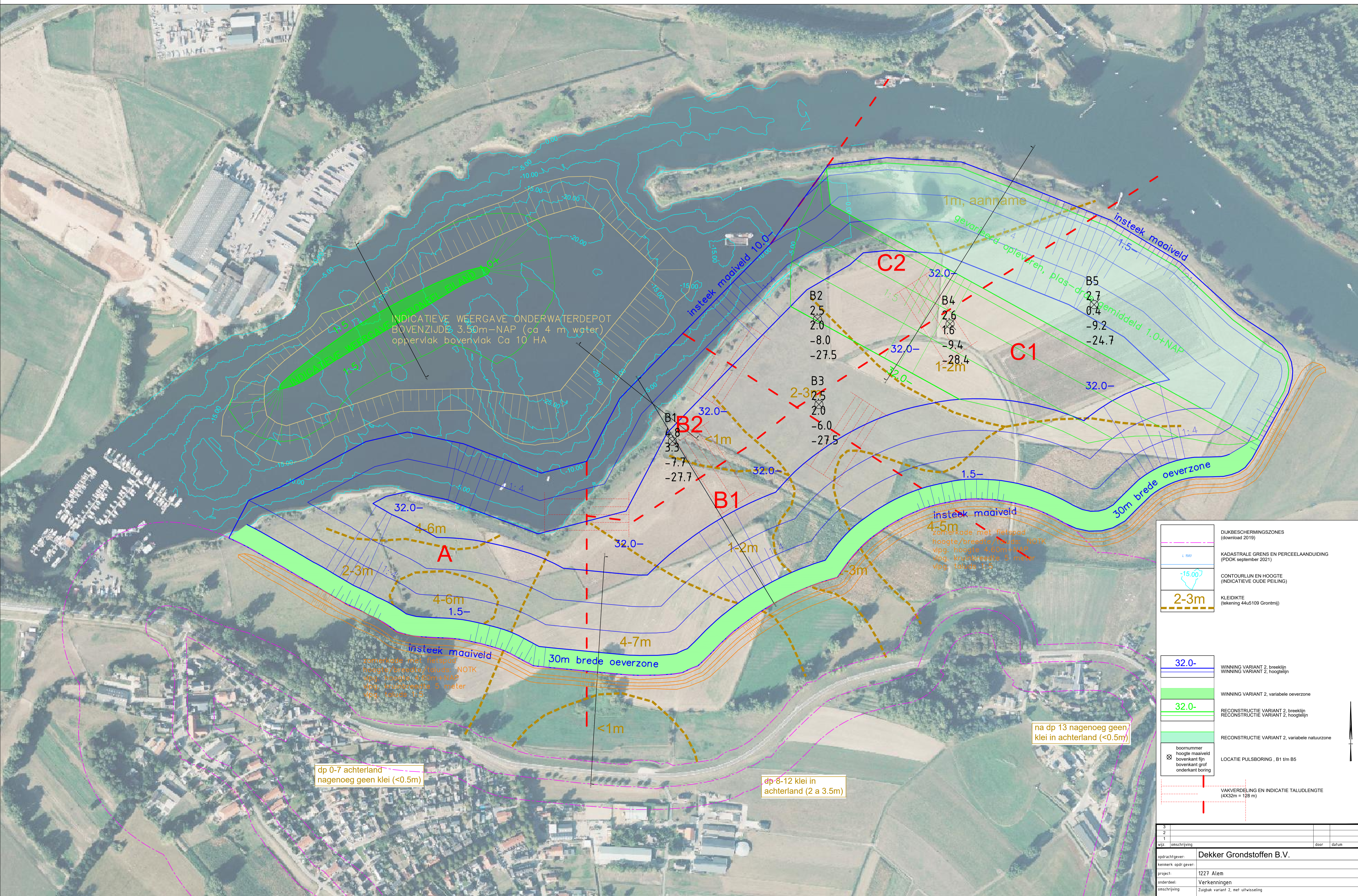
LOCATIE PULSBORING, B1 t/m B5

VAKVERDELING EN INDICATIEVE TALUDLENGTE
(4X32m = 128 m)

3			
2			
1			
wijz.	omschrijving	door	datum
opdrachtgever:	Dekker Grondstoffen B.V.		
kenmerk opdr.gaver:			
project:	1227 Alem		
onderdeel:	Verkenningen		
omschrijving:	Zugbak variant 1, zonder uitwisseling		

tek. nr.	1227_023_0
blad	1
bestand	12270230.dwg
datum	
schaal	1 : 2.500
formaat	A1
status	concept 23-11-2021
getekend	rm
gezien	





INDICATIEVE WEERGAVE ONDERWATERDEPOT
BOVENZIJDIG 3.50m-NAP (ca 4 m water)
oppervlak bovenvlak Ca 10 HA

dp 0-7 achterland
nagenoeg geen klei (<0.5m)

dp 8-12 klei in
achterland (2 a 3.5m)

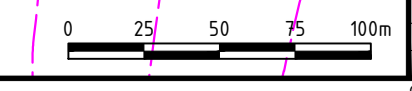
na dp 13 nagenoeg geen
klei in achterland (<0.5m)

	DIJKBESCHERMINGSZONES (download 2019)
	KADASTRALE GRENS EN PERCEELANDUIDING (PDK september 2021)
	CONTOURLIJN EN HOOGTE (INDICATIEVE OUDE PEILING)
	KLEIDIKTE (tekening 44u5109 Grontmij)
	32.0- WINNING VARIANT 2, breeklijn WINNING VARIANT 2, hoogtelijn
	WINNING VARIANT 2, variabele oeverzone
	32.0- RECONSTRUCTIE VARIANT 2, breeklijn RECONSTRUCTIE VARIANT 2, hoogtelijn
	RECONSTRUCTIE VARIANT 2, variabele natuurzone
	boormummer hoogte maaiveld bovenkant fijn bovenkant grof onderkant boring
	LOCATIE PULSBORING - B1 t/m B5
	VAKVERDELING EN INDICATIE TALUDELNGTE (4X32m = 128 m)

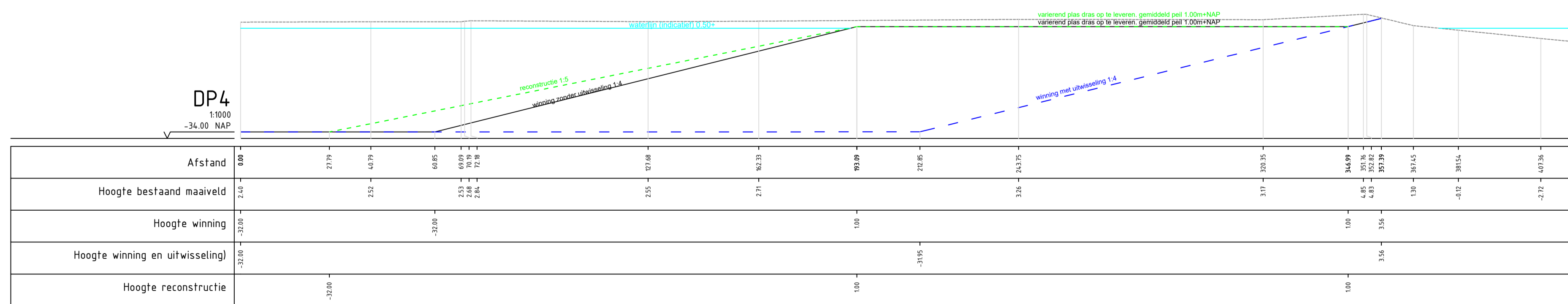
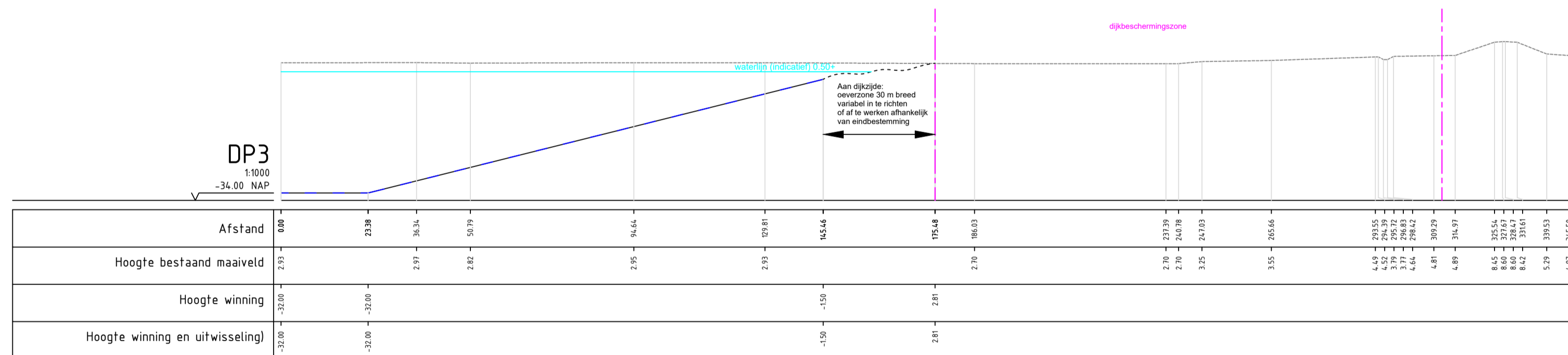
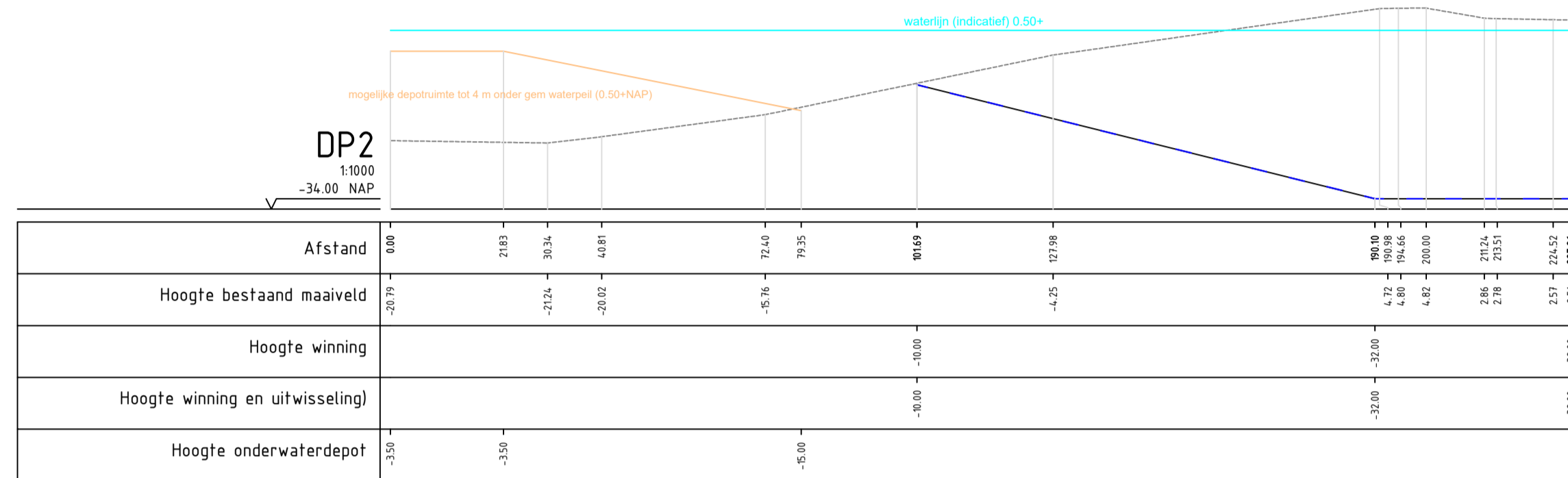
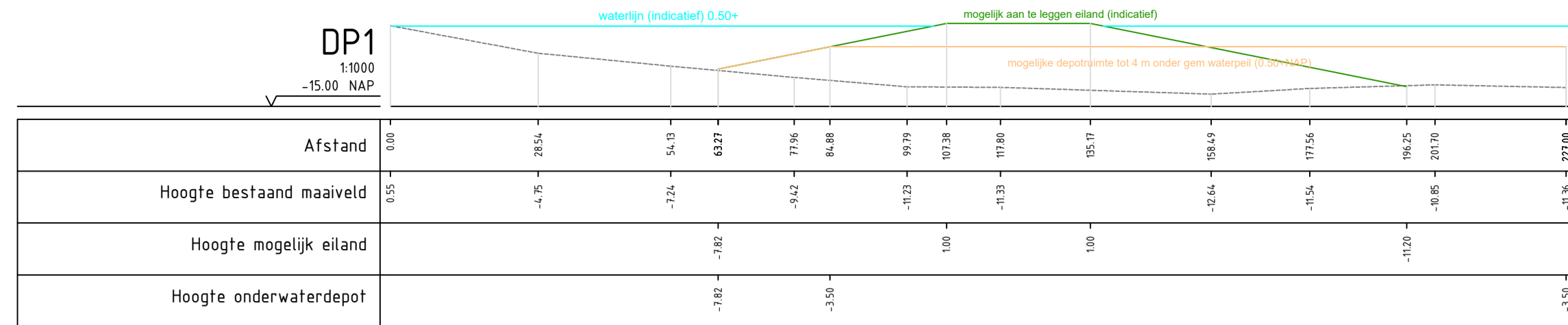
3			
2			
1			
wijz.	omschrijving	door	datum
opdrachtgever:	Dekker Grondstoffen B.V.		
kenmerk opdr.gaver:	1227 Alem		
project:	Verkenningen		
onderdeel:	Zugbak variant 2, met uitwisseling		
omschrijving:			
tek. nr.	1227_023_0		
blad	2		
bestand	12270230.dwg		
datum			
schaal	1 : 2.500		
formaat	A1		
status	concept 23-11-2021		
getekend	rm		
gezien			

SITUATIE
SCHAAL 1 : 2.500

OPMERKINGEN
 - Coördinatensysteem RD(x,y) en NAP(z)
 - Maten in meters, tenzij anders vermeld
 - Hoogtematen in meters t.o.v. N.A.P., tenzij anders vermeld
 - Diameters in millimeters, tenzij anders vermeld



© Landmeetkundig en Adviesbureau Meet B.V.



DWARSPROFIEL
SCHAAL 1 : 1000

OPMERKINGEN
 - Coördinatensysteem RD(x,y) en NAP(z)
 - Maten in meters, tenzij anders vermeld
 - Hoogtematen in meters t.o.v. N.A.P., tenzij anders vermeld
 - Diameters in millimeters, tenzij anders vermeld



3			
2			
1			
wijz.	omschrijving	door	datum
opdrachtgever:	Dekker Grondstoffen B.V.		
kenmerk opdr.gaver:	1227 Alem		
project:	Verkenningen		
onderdeel:	profielen		
omschrijving:			
tek. nr.	1227_023_0		
blad	3		
bestand	12270230.dwg		
datum			
schaal	1 : 1000		
formaat	A1		
status	concept 23-11-2021		
getekend	rm		
getekend			

© Landmeetkundig en Adviesbureau Meet B.V.

Appendix 2 Berekeningen piping huidige situatie

1. Veiligheidsfilosofie en bepaling stabiliteitsfactor



Algemene gegevens

Project: Gebiedsontwikkeling Alem
 Projectnummer: 51006865
 Dijktraject: 39-1
 Locatie: 1
 Opgesteld door: M. Peters
 Gecontroleerd door: F. Smorenburg
 Versienummer: D1
 Datum: 1-3-2022
 Opmerkingen:



Deelfaalmechanismen

	Opbarsten	Heave	Piping
--	-----------	-------	--------

Uitgangspunten:

De dijktrajectnorm, signaleringskans P;norm
 De dijktrajectnorm max. toelaatbare overstromingskans P;max
 Faalkansruimtefactor ω
 Parameter m.b.t. de fractie van de lengte gevoelig voor faalmechanisme a
 Parameter m.b.t. de lengte van onafhankelijke, equivalente vakken b
 Lengte in meters van het dijktraject waarop de norm van toepassing is L;traject
 Schematiseringsfactor

P;norm	1/3000	1/3000	1/3000
P;max	1/3000	1/3000	1/3000
ω	0,24	0,24	0,24
a	0,9	0,9	0,9
b	300	300	300
L;traject	4701	4701	4701
	1,2	1,2	1,2

Resultaat:

Lengte-effect factor N
 De faalkanseis P;eis,dsn
 Terugkeertijd 188.788
 Geëiste betrouwbaarheidsindex Beta;eis,dst
 Max betrouwbaarheidsindex Beta;eis,mt
 Partiële veiligheidsfactor die verband houdt met schade (ook wel schadefactor)
 Minimaal vereiste stabiliteitsfactor F_{min}

N	15,1	15,1	15,1
P;eis,dsn	5,30E-06	5,30E-06	5,30E-06
	188.788	188.788	188.788
Beta;eis,dst	4,4	4,4	4,4
Beta;eis,mt	3,4	3,4	3,4
	1,45	1,10	1,23
F _{min}	1,74	1,33	1,47

Gebruikte formules

Formule:

$$P_{eis,dsm} = \frac{P_{max} \cdot \omega}{N}$$

$$N = 1 + \frac{a \cdot L_{traject}}{b}$$

$$\beta_{eis,dsm} = -\Phi^{-1}(P_{eis,dsm})$$

$$\beta_{eis,dsm} = -\Phi^{-1}(P_{max})$$

Formule:

$$Y_{up} = 0,48 \cdot e^{0,46\beta_{eis,dsm} - 0,27\beta_{max}}$$

Formule:

$$Y_{he} = 0,37 \cdot e^{0,48\beta_{eis,dsm} - 0,30\beta_{max}}$$

Formule:

$$Y_{pip} = 1,04 \cdot e^{0,27\beta_{eis,dsm} - 0,42\beta_{max}}$$

Formule:

$$F_{min} = Y_n \cdot Y_b$$

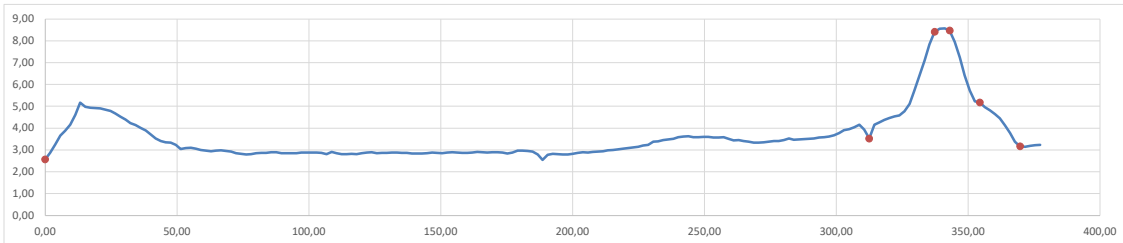
2. Geometrie



Algemene gegevens

Project:	Gebiedsontwikkeling Alem
Projectnummer:	51006865
Dijktraject:	39-1
Locatie:	1
Opgesteld door:	M. Peters
Gecontroleerd door:	F. Smorenburg
Versienummer:	D1
Datum:	1-3-2022

Karakteristieke punten	x	y
Begin voorland	0,0	2,6
Buitenteen	312,5	3,5
Buitenkruin	337,3	8,4
Binnenkruin	343,0	8,5
Binnenberm	354,4	5,2
Binnenteen	369,7	3,2



3. Stijghoogte

Algemene gegevens

Project:	Gebiedsontwikkeling Alem
Projectnummer:	51006865
Dijktraject:	39-1
Locatie:	1
Opgesteld door:	M. Peters
Gecontroleerd door:	F. Smorenburg
Versienummer:	D1
Datum:	1-3-2022

Bepaling lekfactor voorland

Doorlatendheid van zandlaag	k	93,83	m/dag
Dikte van de zandlaag	D	70,00	m
Maaiveldhoogte voorland	y _{maaiveld}	2,80	m NAP
Onderzijde deklaag	y _{deklaag}	-0,70	m NAP
Dikte van de afdekkende laag voorland	d1	3,50	m
Doorlatendheid afdekkende laag voorland	kv1	0,15	m/dag
Hydraulische weerstand afdekkende laag voorland	c1	23	dag
Lekfactor voorland	λ_1	391,48	m

Berekenen van de lekfactor achterland

Doorlatendheid van zandlaag	k	93,83	m/dag
Dikte van de zandlaag	D	70,00	m
Maaiveldhoogte achterland	y _{maaiveld}	3,00	m NAP
Onderzijde deklaag	y _{deklaag}	-0,70	m NAP
Dikte van de afdekkende laag achterland	d3	3,70	m
Doorlatendheid afdekkende laag achterland	kv3	0,15	m/dag
Hydraulische weerstand afdekkende laag achterland	c3	25	dag
Lekfactor achterland	λ_3	402,51	m

Stromingsweerstand tpv dijk

Breedte van de dijk	L2	57,16	m
Doorlatendheid van zandlaag	k	93,83	m/dag
Dikte van de zandlaag	D	70,00	m
Stromingsweerstand tpv dijk	W2	0,01	dag/m

Stromingsweerstand voorland

Lekfactor	λ_1	391,48	m
Doorlatendheid van zandlaag	k	93,83	m/dag
Dikte van de zandlaag	D	70,00	m
Lengte van het voorland	L1	312,49	m
Stromingsweerstand voorland	W1	0,04	dag/m

Stromingsweerstand achterland

Lekfactor	λ_3	402,51	m
Doorlatendheid van zandlaag	k	93,83	m/dag
Dikte van de zandlaag	D	70,00	m
Lengte van het achterland	L3	1000,00	m
Stromingsweerstand achterland	W3	0,06	dag/m

Stijghoogte binnenteen

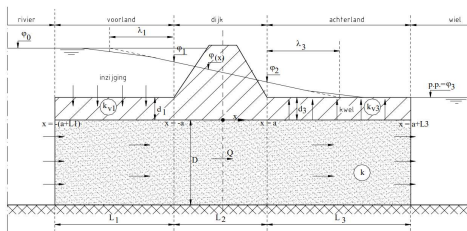
Stijghoogte gelijk aan polderpeil	ϕ_3	2,85	m NAP	Polderpeil
Stijghoogte gelijk aan MHW	ϕ_0	7,66	m NAP	Waterstand bij de norm
Stijghoogte ter plaatse van de binnenteen	ϕ_2	5,53	m NAP	

Stijghoogte buitenteen

Stijghoogte gelijk aan polderpeil	ϕ_3	2,85	m NAP
Stijghoogte gelijk aan MHW	ϕ_0	7,66	m NAP
Stromingsweerstand achterland	W3	0,06	dag/m
Stromingsweerstand tpv dijk	W2	0,01	dag/m
Stijghoogte ter plaatse van de buitenteen	ϕ_1	5,91	m NAP

Gebruikte formules

Weergave model 4A: Strooming in een zandondergrond onder een ondoorlatende dijk, met slecht doorlatende, afdekkende lagen in het voor- en achterland, zonder radiale intree of uittree van water.



Formules lekfactor:

$$\lambda = \sqrt{kD \cdot c_i}$$

$$c_i = \frac{d_i}{k_{vi}}$$

Formule stromingsweerstand dijk:

$$W_2 = \frac{L_2}{kD}$$

Formule stromingsweerstand achterland:

$$W_3 = \frac{\lambda_3}{kD} \cdot \tanh \frac{L_3}{\lambda_3}$$

Stijghoogte formule buitenteen:

$$\phi_1 = \phi_3 + (\phi_0 - \phi_3) \frac{W_2 + W_3}{\sum W} = \phi_3 + (\phi_0 - \phi_3) \frac{L_2 + \lambda_3 \tanh \frac{L_3}{\lambda_3}}{\lambda_1 \tanh \frac{L_1}{\lambda_1} + L_2 + \lambda_3 \tanh \frac{L_3}{\lambda_3}}$$

Formule stromingsweerstand voorland:

$$W_1 = \frac{\lambda_1}{kD} \cdot \tanh \frac{L_1}{\lambda_1}$$

Formule stijghoogte binnenteen:

$$\phi_2 = \phi_3 + (\phi_0 - \phi_3) \frac{W_1}{\sum W} = \phi_3 + (\phi_0 - \phi_3) \frac{\lambda_3 \tanh \frac{L_3}{\lambda_3}}{\lambda_1 \tanh \frac{L_1}{\lambda_1} + L_2 + \lambda_3 \tanh \frac{L_3}{\lambda_3}}$$

Stijghoogte ter plaatse van achterland:

$$\phi(x) = \phi_3 + (\phi_2 - \phi_3) \frac{\sinh \frac{a + L_3 - x}{\lambda_3}}{\sinh \frac{L_3}{\lambda_3}}$$

4. Opbasten en heave



Algemene gegevens

Project:	Gebiedsontwikkeling Alem
Projectnummer:	51006865
Dijktraject:	39-1
Locatie:	1
Opgesteld door:	M. Peters
Gecontroleerd door:	F. Smorenburg
Versienummer:	D1
Datum:	1-3-2022

Parameters

Maalveld hoogte uitredepunt		3,00	m NAP
Onderkant deklaag		-0,70	m NAP
Maatgevend hoogwater	MHW	7,66	m NAP
Berekende stijghoogte tpv uitredepunt	φ	5,53	m NAP
Polderpeil	PP	2,85	m NAP

Opbarsten

Deklaagdikte	D	3,70	m
Gewicht	γ_{nat}	17,00	kN/m ³
Kritieke stijghoogteverschil	$\Delta\varphi_{c,u}$	2,71	m
Optredend stijghoogteverschil	$\Delta\varphi$	2,68	m
Berekende veiligheidsfactor opbarsten	F_u	1,01	
Vereiste stabiliteitsfactor	F_{min}	1,74	

Oordeel **Onvoldoende**

Heave

Optredende heavegradiënt	i	0,72	
Kritieke heavegradiënt	$i_{c,h}$	0,30	
Berekende veiligheidsfactor Heave	F_h	0,41	
Vereiste stabiliteitsfactor	F_{min}	1,33	

Oordeel **Onvoldoende**

5. Terugschrijdende erosie (Sellmeijer)



Algemene gegevens				
Project:		Gebiedsontwikkeling Alem		
Projectnummer:		S1006865		
Dijktraject:		39-1		
Locatie:		1		
Opgesteld door:		M. Peters		
Gecontroleerd door:		F. Smorenburg		
Versienummer:		D1		
Datum:		1-3-2022		
Parameters				
Doorlatendheid watervoerende laag	k	1,09E-03	m/s	
Doorlatendheid deklaag	k'	1,74E-06	m/s	
Dikte watervoerende laag tpv voorland	D	70,00	m	
Dikte deklaag tpv voorland	D'	3,50	m	
Lekengte	Δl	391,48	m	
Lengte voorland	L_{voorland}	312,49	m	
Fictieve lengte intredepunt tot buitenteen		259,57	m	
Dijkbreedte		57,16	m	
Kwielwielengte	L	171,48	m	Maximaal 3 maal de dijkbasis
Maaiveld hoogte uitredepunt		3,00	m NAP	
Onderkant deklaag		-0,70	m NAP	
Dikte deklaag		3,70	m	
Dikte zandlaag	D	70,00	m	
Maatgevend hoogwater	MHW	7,66	m NAP	
Polderpeil	PP	3,00	m NAP	Gelijk aan maaiveld
Coefficient van White	η	0,25		Uit schematiseringshandleiding piping
Volumegewicht van water	γ_w	9,81	kN/m ³	
Volumegewicht zandkorrels onder water	γ_p	16,50	kN/m ³	Uit schematiseringshandleiding piping
70-percentielwaarde van de korrelverdeling (l.r.w.)	d_{70}	2,89E-04	m	
Referentie d_{70} van de toegepaste grondsoorten	d_{70m}	2,08E-04	m	Uit schematiseringshandleiding piping
Rolweerstandshoek van de zandkorrel	θ	37,00	°	Uit schematiseringshandleiding piping
Doorlatendheid zandlaag	k	1,09E-03	m/s	
Kinematische viscositeit	ν	1,33E-06	m ² /s	Uit schematiseringshandleiding piping
Zwaartekracht versnelling	g	9,81	m/s ²	
Intrinsieke doorlatendheid van de zandlaag	K	1,47E-10	m ²	$\nu \cdot k/g$
Vereiste stabiliteitsfactor piping	F_{min}	1,47		
Pipingberekening				
Weerstandsfactor	$F_{\text{resistance}}$	0,32		
Schaalfactor	F_{scale}	0,08		
Geometriefactor	F_{geometry}	1,15		
Optredend verval	$\Delta H - 0,3d$	3,55	m	$(MHW - PP) - 0,3 \cdot d$
Kritiek toelaatbaar verval	$\Delta H_{\text{c,p}}$	3,44	m	$\Delta H_{\text{c,p}} = (L \cdot F_{\text{res}} \cdot F_{\text{scale}} \cdot F_{\text{geometry}}) / F_{\text{min}}$
Bereken de veiligheidsfactor terugschrijdende erosie	F_p	1,43		
Oordeel		Onvoldoende		

1. Veiligheidsfilosofie en bepaling stabiliteitsfactor



Algemene gegevens

Project:	Gebiedsontwikkeling Alem
Projectnummer:	51006865
Dijktraject:	39-1
Locatie:	2
Opgesteld door:	M. Peters
Gecontroleerd door:	F. Smorenburg
Versienummer:	D1
Datum:	1-3-2022
Opmerkingen:	



Deelfaalmechanismen

	Opbarsten	Heave	Piping
--	-----------	-------	--------

Uitgangspunten:

De dijktrajectnorm, signaleringskans
 De dijktrajectnorm max. toelaatbare overstromingskans
 Faalkansruimtefactor
 Parameter m.b.t. de fractie van de lengte gevoelig voor faalmechanisme
 Parameter m.b.t. de lengte van onafhankelijke, equivalente vakken
 Lengte in meters van het dijktraject waarop de norm van toepassing is
 Schematiseringsfactor

P;norm	1/3000	1/3000	1/3000
P;max	1/3000	1/3000	1/3000
ω	0,24	0,24	0,24
a	0,9	0,9	0,9
b	300	300	300
L;traject	4701	4701	4701
	1,2	1,2	1,2

Resultaat:

Lengte-effect factor
 De faalkanseis
 Terugkeertijd
 Geëiste betrouwbaarheidsindex
 Max betrouwbaarheidsindex
 Partiële veiligheidsfactor die verband houdt met schade (ook wel schadefactor
 Minimaal vereiste stabiliteitsfactor

N	15,1	15,1	15,1
P;eis,dsn	5,30E-06	5,30E-06	5,30E-06
	188.788	188.788	188.788
Beta;eis,dn	4,4	4,4	4,4
Beta;eis,m	3,4	3,4	3,4
	1,45	1,10	1,23
F _{min}	1,74	1,33	1,47

Gebruikte formules

Formule:

$$P_{eis,dsm} = \frac{P_{max} \cdot \omega}{N}$$

$$N = 1 + \frac{a \cdot L_{traject}}{b}$$

$$\beta_{eis,dsm} = -\Phi^{-1}(P_{eis,dsm})$$

$$\beta_{eis,dsm} = -\Phi^{-1}(P_{max})$$

Formule:

$$Y_{up} = 0,48 \cdot e^{0,46\beta_{eis,dsm} - 0,27\beta_{max}}$$

Formule:

$$Y_{he} = 0,37 \cdot e^{0,48\beta_{eis,dsm} - 0,30\beta_{max}}$$

Formule:

$$Y_{pip} = 1,04 \cdot e^{0,27\beta_{eis,dsm} - 0,42\beta_{max}}$$

Formule:

$$F_{min} = Y_n \cdot Y_b$$

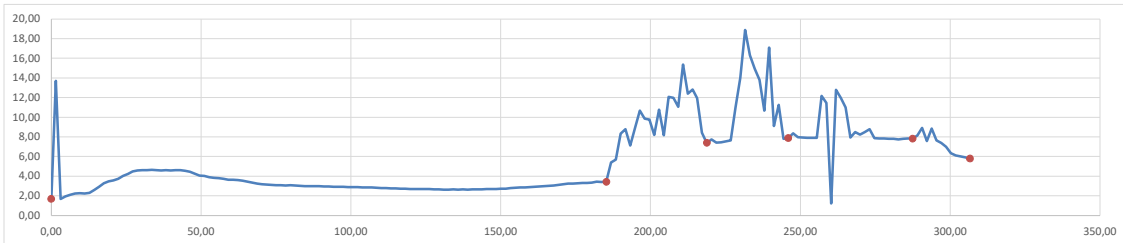
2. Geometrie



Algemene gegevens

Project:	Gebiedsontwikkeling Alem
Projectnummer:	51006865
Dijktraject:	39-1
Locatie:	2
Opgesteld door:	M. Peters
Gecontroleerd door:	F. Smorenburg
Versienummer:	D1
Datum:	1-3-2022

Karakteristieke punten	x	y
Begin voorland	0,0	1,7
Buitenteen	185,3	3,4
Buitenkruin	218,8	7,4
Binnenkruin	245,9	7,9
Binnenberm	287,5	7,8
Binnenteen	306,6	5,8



3. Stijghoogte

Algemene gegevens	
Project:	Gebiedsontwikkeling Alem
Projectnummer:	51006865
Dijktraject:	39-1
Locatie:	2
Opgesteld door:	M. Peters
Gecontroleerd door:	F. Smorenburg
Versienummer:	D1
Datum:	1-3-2022

Bepaling lekfactor voorland			
Doorlatendheid van zandlaag	k	93,83	m/dag
Dikte van de zandlaag	D	70,00	m
Maaiveldhoogte voorland	y _{maaiveld}	2,50	m NAP
Onderzijde deklaag	y _{deklaag}	1,25	m NAP
Dikte van de afdekkende laag voorland	d1	1,25	m
Doorlatendheid afdekkende laag voorland	kv1	0,15	m/dag
Hydraulische weerstand afdekkende laag voorland	c1	8	dag
Lekfactor voorland	λ1	233,95	m

Berekenen van de lekfactor achterland			
Doorlatendheid van zandlaag	k	93,83	m/dag
Dikte van de zandlaag	D	70,00	m
Maaiveldhoogte achterland	y _{maaiveld}	4,00	m NAP
Onderzijde deklaag	y _{deklaag}	1,25	m NAP
Dikte van de afdekkende laag achterland	d3	2,75	m
Doorlatendheid afdekkende laag achterland	kv3	0,15	m/dag
Hydraulische weerstand afdekkende laag achterland	c3	18	dag
Lekfactor achterland	λ3	347,01	m

Stromingsweerstand tpv dijk			
Breedte van de dijk	L2	121,36	m
Doorlatendheid van zandlaag	k	93,83	m/dag
Dikte van de zandlaag	D	70,00	m
Stromingsweerstand tpv dijk	W2	0,02	dag/m

Stromingsweerstand voorland			
Lekfactor	λ1	233,95	m
Doorlatendheid van zandlaag	k	93,83	m/dag
Dikte van de zandlaag	D	70,00	m
Lengte van het voorland	L1	185,25	m
Stromingsweerstand voorland	W1	0,02	dag/m

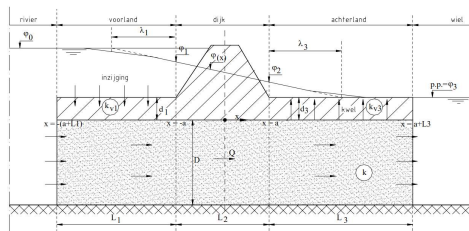
Stromingsweerstand achterland			
Lekfactor	λ3	347,01	m
Doorlatendheid van zandlaag	k	93,83	m/dag
Dikte van de zandlaag	D	70,00	m
Lengte van het achterland	L3	1000,00	m
Stromingsweerstand achterland	W3	0,05	dag/m

Stijghoogte binnenteen				
Stijghoogte gelijk aan polderpeil	φ ₃	2,85	m NAP	<i>Polderpeil</i>
Stijghoogte gelijk aan MHW	φ ₀	7,66	m NAP	<i>Waterstand bij de norm</i>
Stijghoogte ter plaatse van de binnenteen	φ ₂	5,52	m NAP	

Stijghoogte buitenteen			
Stijghoogte gelijk aan polderpeil	φ ₃	2,85	m NAP
Stijghoogte gelijk aan MHW	φ ₀	7,66	m NAP
Stromingsweerstand achterland	W3	0,05	dag/m
Stromingsweerstand tpv dijk	W2	0,02	dag/m
Stijghoogte ter plaatse van de buitenteen	φ ₁	6,46	m NAP

Gebruikte formules

Weergave model 4A: Strooming in een zandondergrond onder een ondoorlatende dijk, met slecht doorlatende, afdekkende lagen in het voor- en achterland, zonder radiale intree of uittree van water.



Formules lekfactor:

$$\lambda = \sqrt{kD \cdot c_i}$$

$$c_i = \frac{d_i}{k_{vi}}$$

Formule stromingsweerstand dijk:

$$W_2 = \frac{L_2}{kD}$$

Formule stromingsweerstand achterland:

$$W_3 = \frac{\lambda_3}{kD} \cdot \tanh \frac{L_3}{\lambda_3}$$

Stijghoogte formule buitenteen:

$$\varphi_1 = \varphi_3 + (\varphi_0 - \varphi_3) \frac{W_2 + W_3}{\sum W} = \varphi_3 + (\varphi_0 - \varphi_3) \frac{L_2 + \lambda_3 \tanh \frac{L_3}{\lambda_3}}{\lambda_1 \tanh \frac{L_1}{\lambda_1} + L_2 + \lambda_3 \tanh \frac{L_3}{\lambda_3}}$$

Formule stromingsweerstand voorland:

$$W_1 = \frac{\lambda_1}{kD} \cdot \tanh \frac{L_1}{\lambda_1}$$

Formule stijghoogte binnenteen:

$$\varphi_2 = \varphi_3 + (\varphi_0 - \varphi_3) \frac{W_1}{\sum W} = \varphi_3 + (\varphi_0 - \varphi_3) \frac{\lambda_3 \tanh \frac{L_3}{\lambda_3}}{\lambda_1 \tanh \frac{L_1}{\lambda_1} + L_2 + \lambda_3 \tanh \frac{L_3}{\lambda_3}}$$

Stijghoogte ter plaatse van achterland:

$$\varphi(x) = \varphi_3 + (\varphi_2 - \varphi_3) \frac{\sinh \frac{a + L_3 - x}{\lambda_3}}{\sinh \frac{L_3}{\lambda_3}}$$

4. Opbasten en heave



Algemene gegevens

Project:	Gebiedsontwikkeling Alem
Projectnummer:	51006865
Dijktraject:	39-1
Locatie:	2
Opgesteld door:	M. Peters
Gecontroleerd door:	F. Smorenburg
Versienummer:	D1
Datum:	1-3-2022

Parameters

Maalveld hoogte uittredepunt		4,00	m NAP
Onderkant deklaag		1,25	m NAP
Maatgevend hoogwater	MHW	7,66	m NAP
Berekende stijghoogte tpv uittredepunt	φ	5,52	m NAP
Polderpeil	PP	2,85	m NAP

Opbarsten

Deklaagdikte	D	2,75	m
Gewicht	γ_{nat}	17,00	kN/m ³
Kritieke stijghoogteverschil	$\Delta\varphi_{c,u}$	2,02	m
Optredend stijghoogteverschil	$\Delta\varphi$	2,67	m
Berekende veiligheidsfactor opbarsten	F_u	0,75	
Vereiste stabiliteitsfactor	F_{min}	1,74	

Oordeel **Onvoldoende**

Heave

Optredende heavegradiënt	i	0,97	
Kritieke heavegradiënt	$i_{c,h}$	0,30	
Berekende veiligheidsfactor Heave	F_h	0,31	
Vereiste stabiliteitsfactor	F_{min}	1,33	

Oordeel **Onvoldoende**

5. Terugschrijdende erosie (Sellmeijer)



Algemene gegevens				
Project:		Gebiedsontwikkeling Alem		
Projectnummer:		S1006865		
Dijktraject:		39-1		
Locatie:		2		
Opgesteld door:		M. Peters		
Gecontroleerd door:		F. Smorenburg		
Versienummer:		D1		
Datum:		1-3-2022		
Parameters				
Doorlatendheid watervoerende laag	k	1,09E-03	m/s	
Doorlatendheid deklaag	k'	1,74E-06	m/s	
Dikte watervoerende laag tpv voorland	D	70,00	m	
Dikte deklaag tpv voorland	D'	1,25	m	
Lekengte	Δl	233,95	m	
Lengte voorland	L_{voorland}	185,25	m	
Fictieve lengte intredepunt tot buitenteen		154,28	m	
Dijkbasis		121,36	m	
Kwielweglengte	L	275,64	m	Maximaal 3 maal de dijkbasis
Maaiveld hoogte uitredepunt		4,00	m NAP	
Onderkant deklaag		1,25	m NAP	
Dikte deklaag		2,75	m	
Dikte zandlaag	D	70,00	m	
Maatgevend hoogwater	MHW	7,66	m NAP	
Polderpeil	PP	2,85	m NAP	
Coefficient van White	η	0,25		Uit schematiseringshandleiding piping
Volumegewicht van water	γ_w	9,81	kN/m ³	
Volumegewicht zandkorrels onder water	γ_p	16,50	kN/m ³	Uit schematiseringshandleiding piping
70-percentielwaarde van de korrelverdeling (l.r.w.)	d_{70}	2,89E-04	m	
Referentie d_{70} van de toegepaste grondsoorten	d_{70m}	2,08E-04	m	Uit schematiseringshandleiding piping
Rolweerstandshoek van de zandkorrel	θ	37,00	°	Uit schematiseringshandleiding piping
Doorlatendheid zandlaag	k	1,09E-03	m/s	
Kinematische viscositeit	ν	1,33E-06	m ² /s	Uit schematiseringshandleiding piping
Zwaartekracht versnelling	g	9,81	m/s ²	
Intrinsieke doorlatendheid van de zandlaag	K	1,47E-10	m ²	ν^2/k^2
Vereiste stabiliteitsfactor piping	F_{min}	1,47		
Pipingberekening				
Weerstandsfactor	$F_{\text{resistance}}$	0,32		
Schaalfactor	F_{scale}	0,07		
Geometriefactor	F_{geometry}	1,28		
Optredend verval	$\Delta H - 0,3d$	3,99	m	$(MHW - PP) - 0,3d$
Kritiek toelaatbaar verval	$\Delta H_{\text{c,p}}$	5,22	m	$\Delta H_{\text{c,p}} = (L \cdot F_{\text{res}} \cdot F_{\text{scale}} \cdot F_{\text{geometry}}) / F_{\text{min}}$
Bereken de veiligheidsfactor terugschrijdende erosie	F_p	1,93		
Oordeel		Voldoende		

1. Veiligheidsfilosofie en bepaling stabiliteitsfactor



Algemene gegevens

Project:	Gebiedsontwikkeling Alem
Projectnummer:	51006865
Dijktraject:	39-1
Locatie:	3
Opgesteld door:	M. Peters
Gecontroleerd door:	F. Smorenburg
Versienummer:	D1
Datum:	1-3-2022
Opmerkingen:	



Deelfaalmechanismen

	Opbarsten	Heave	Piping
--	-----------	-------	--------

Uitgangspunten:

De dijktrajectnorm, signaleringskans	P;norm	1/3000	1/3000	1/3000
De dijktrajectnorm max. toelaatbare overstromingskans	P;max	1/3000	1/3000	1/3000
Faalkansruimtefactor	ω	0,24	0,24	0,24
Parameter m.b.t. de fractie van de lengte gevoelig voor faalmechanisme	a	0,9	0,9	0,9
Parameter m.b.t. de lengte van onafhankelijke, equivalente vakken	b	300	300	300
Lengte in meters van het dijktraject waarop de norm van toepassing is	L;traject	4701	4701	4701
Schematiseringsfactor		1,2	1,2	1,2

Resultaat:

Lengte-effect factor	N	15,1	15,1	15,1
De faalkans	P;eis,dsn	5,30E-06	5,30E-06	5,30E-06
Terugkeertijd		188.788	188.788	188.788
Geëiste betrouwbaarheidsindex	Beta;eis,dsn	4,4	4,4	4,4
Max betrouwbaarheidsindex	Beta;eis,max	3,4	3,4	3,4
Partiële veiligheidsfactor die verband houdt met schade (ook wel schade factor)		1,45	1,10	1,23
Minimaal vereiste stabiliteitsfactor	F _{min}	1,74	1,33	1,47

Gebruikte formules

Formule:

$$P_{eis,dsm} = \frac{P_{max} \cdot \omega}{N}$$

$$N = 1 + \frac{a \cdot L_{traject}}{b}$$

$$\beta_{eis,dsm} = -\Phi^{-1}(P_{eis,dsm})$$

$$\beta_{eis,dsm} = -\Phi^{-1}(P_{max})$$

Formule:

$$Y_{up} = 0,48 \cdot e^{0,46\beta_{eis,dsm} - 0,27\beta_{max}}$$

Formule:

$$Y_{he} = 0,37 \cdot e^{0,48\beta_{eis,dsm} - 0,30\beta_{max}}$$

Formule:

$$Y_{pip} = 1,04 \cdot e^{0,27\beta_{eis,dsm} - 0,42\beta_{max}}$$

Formule:

$$F_{min} = Y_n \cdot Y_b$$

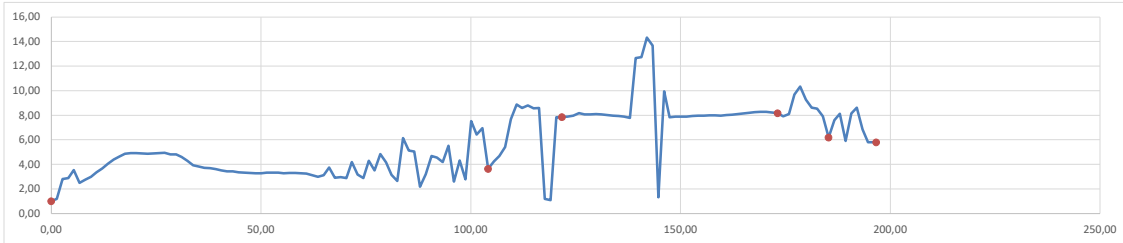
2. Geometrie



Algemene gegevens

Project:	Gebiedsontwikkeling Alem
Projectnummer:	51006865
Dijktraject:	39-1
Locatie:	3
Opgesteld door:	M. Peters
Gecontroleerd door:	F. Smorenburg
Versienummer:	D1
Datum:	1-3-2022

Karakteristieke punten	x	y
Begin voorland	0,0	1,0
Buitenteen	104,1	3,6
Buitenkruin	121,7	7,8
Binnenkruin	173,1	8,2
Binnenberm	185,3	6,2
Binnenteen	196,6	5,8



3. Stijghoogte

Algemene gegevens	
Project:	Gebiedsontwikkeling Alem
Projectnummer:	51006865
Dijktraject:	39-1
Locatie:	3
Opgesteld door:	M. Peters
Gecontroleerd door:	F. Smorenburg
Versienummer:	D1
Datum:	1-3-2022

Bepaling lekfactor voorland			
Doorlatendheid van zandlaag	k	93,83	m/dag
Dikte van de zandlaag	D	70,00	m
Maaiveldhoogte voorland	y _{maaiveld}	2,50	m NAP
Onderzijde deklaag	y _{deklaag}	1,25	m NAP
Dikte van de afdekkende laag voorland	d1	1,25	m
Doorlatendheid afdekkende laag voorland	kv1	0,15	m/dag
Hydraulische weerstand afdekkende laag voorland	c1	8	dag
Lekfactor voorland	λ1	233,95	m

Berekenen van de lekfactor achterland			
Doorlatendheid van zandlaag	k	93,83	m/dag
Dikte van de zandlaag	D	70,00	m
Maaiveldhoogte achterland	y _{maaiveld}	5,80	m NAP
Onderzijde deklaag	y _{deklaag}	1,25	m NAP
Dikte van de afdekkende laag achterland	d3	4,55	m
Doorlatendheid afdekkende laag achterland	kv3	0,15	m/dag
Hydraulische weerstand afdekkende laag achterland	c3	30	dag
Lekfactor achterland	λ3	446,35	m

Stromingsweerstand tpv dijk			
Breedte van de dijk	L2	92,46	m
Doorlatendheid van zandlaag	k	93,83	m/dag
Dikte van de zandlaag	D	70,00	m
Stromingsweerstand tpv dijk	W2	0,01	dag/m

Stromingsweerstand voorland			
Lekfactor	λ1	233,95	m
Doorlatendheid van zandlaag	k	93,83	m/dag
Dikte van de zandlaag	D	70,00	m
Lengte van het voorland	L1	104,14	m
Stromingsweerstand voorland	W1	0,01	dag/m

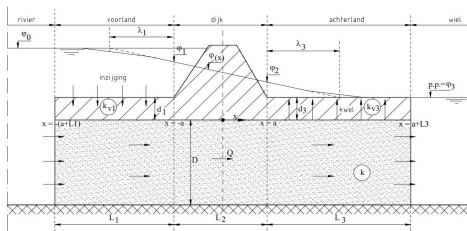
Stromingsweerstand achterland			
Lekfactor	λ3	446,35	m
Doorlatendheid van zandlaag	k	93,83	m/dag
Dikte van de zandlaag	D	70,00	m
Lengte van het achterland	L3	1000,00	m
Stromingsweerstand achterland	W3	0,07	dag/m

Stijghoogte binnenteen				
Stijghoogte gelijk aan polderpeil	φ ₃	2,85	m NAP	<i>Polderpeil</i>
Stijghoogte gelijk aan MHW	φ ₀	7,66	m NAP	<i>Waterstand bij de norm</i>
Stijghoogte ter plaatse van de binnenteen	φ ₂	6,20	m NAP	

Stijghoogte buitenteen				
Stijghoogte gelijk aan polderpeil	φ ₃	2,85	m NAP	
Stijghoogte gelijk aan MHW	φ ₀	7,66	m NAP	
Stromingsweerstand achterland	W3	0,07	dag/m	
Stromingsweerstand tpv dijk	W2	0,01	dag/m	
Stijghoogte ter plaatse van de buitenteen	φ ₁	6,91	m NAP	

Gebruikte formules

Weergave model 4A: Strooming in een zandondergrond onder een ondoorlatende dijk, met slecht doorlatende, afdekkende lagen in het voor- en achterland, zonder radiale intree of uittree van water.



Formules lekfactor:

$$\lambda = \sqrt{kD \cdot c_i}$$

$$c_i = \frac{d_i}{k_{vi}}$$

Formule stromingsweerstand dijk:

$$W_2 = \frac{L_2}{kD}$$

Formule stromingsweerstand achterland:

$$W_3 = \frac{\lambda_3}{kD} \cdot \tanh \frac{L_3}{\lambda_3}$$

Stijghoogte formule buitenteen:

$$\varphi_1 = \varphi_3 + (\varphi_0 - \varphi_3) \frac{W_2 + W_3}{\sum W} = \varphi_3 + (\varphi_0 - \varphi_3) \frac{L_2 + \lambda_3 \tanh \frac{L_3}{\lambda_3}}{\lambda_1 \tanh \frac{L_1}{\lambda_1} + L_2 + \lambda_3 \tanh \frac{L_3}{\lambda_3}}$$

Formule stromingsweerstand voorland:

$$W_1 = \frac{\lambda_1}{kD} \cdot \tanh \frac{L_1}{\lambda_1}$$

Formule stijghoogte binnenteen:

$$\varphi_2 = \varphi_3 + (\varphi_0 - \varphi_3) \frac{W_1}{\sum W} = \varphi_3 + (\varphi_0 - \varphi_3) \frac{\lambda_3 \tanh \frac{L_3}{\lambda_3}}{\lambda_1 \tanh \frac{L_1}{\lambda_1} + L_2 + \lambda_3 \tanh \frac{L_3}{\lambda_3}}$$

Stijghoogte ter plaatse van achterland:

$$\varphi(x) = \varphi_3 + (\varphi_2 - \varphi_3) \frac{\sinh \frac{a + L_3 - x}{\lambda_3}}{\sinh \frac{L_3}{\lambda_3}}$$

4. Opbasten en heave



Algemene gegevens

Project:	Gebiedsontwikkeling Alem
Projectnummer:	51006865
Dijktraject:	39-1
Locatie:	3
Opgesteld door:	M. Peters
Gecontroleerd door:	F. Smorenburg
Versienummer:	D1
Datum:	1-3-2022

Parameters

Maalveld hoogte uitredepunt		5,80	m NAP
Onderkant deklaag		1,25	m NAP
Maatgevend hoogwater	MHW	7,66	m NAP
Berekende stijghoogte tpv uitredepunt	φ	6,20	m NAP
Polderpeil	PP	2,85	m NAP

Opbarsten

Deklaagdikte	D	4,55	m
Gewicht	γ_{nat}	17,00	kN/m ³
Kritieke stijghoogteverschil	$\Delta\varphi_{c,u}$	3,33	m
Optredend stijghoogteverschil	$\Delta\varphi$	3,35	m
Berekende veiligheidsfactor opbarsten	F_u	1,00	
Vereiste stabiliteitsfactor	F_{min}	1,74	

Oordeel **Onvoldoende**

Heave

Optredende heavegradiënt	i	0,74	
Kritieke heavegradiënt	$i_{c,h}$	0,30	
Berekende veiligheidsfactor Heave	F_h	0,41	
Vereiste stabiliteitsfactor	F_{min}	1,33	

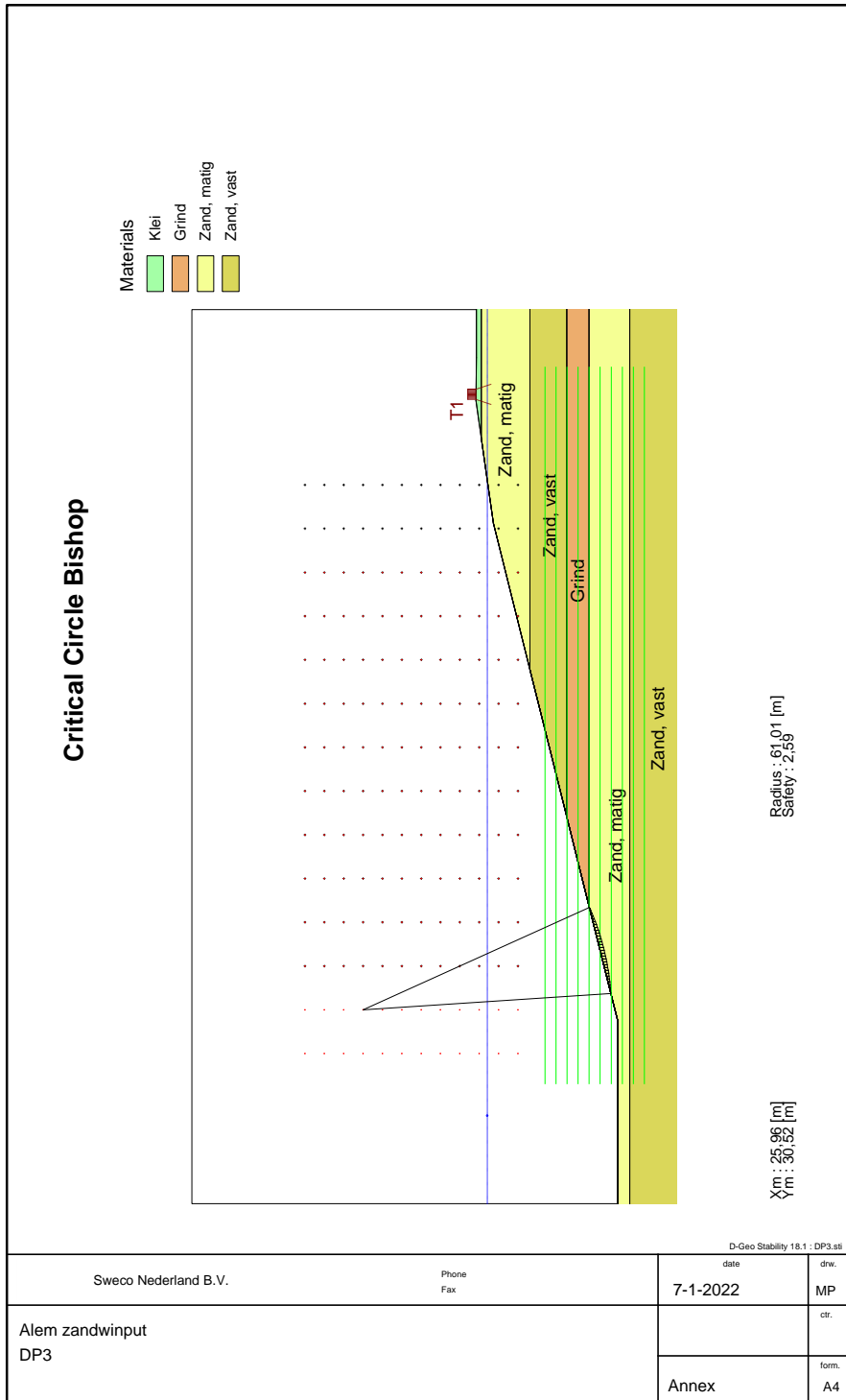
Oordeel **Onvoldoende**

5. Terugschrijdende erosie (Sellmeijer)



Algemene gegevens				
Project:		Gebiedsontwikkeling Alem		
Projectnummer:		S1006865		
Dijktraject:		39-1		
Locatie:		3		
Opgesteld door:		M. Peters		
Gecontroleerd door:		F. Smorenburg		
Versienummer:		D1		
Datum:		1-3-2022		
Parameters				
Doorlatendheid watervoerende laag	k	1,09E-03	m/s	
Doorlatendheid deklaag	k'	1,74E-06	m/s	
Dikte watervoerende laag tpv voorland	D	70,00	m	
Dikte deklaag tpv voorland	D'	1,25	m	
Lekengte	Δl	233,95	m	
Lengte voorland	L_{voorland}	104,14	m	
Fictieve lengte intredepunt tot buitenteen		97,77	m	
Dijkbasis		92,46	m	
Kwielweglengte	L	190,23	m	Maximaal 3 maal de dijkbasis
Maaiveld hoogte uitredepunt		5,80	m NAP	
Onderkant deklaag		1,25	m NAP	
Dikte deklaag		4,55	m	
Dikte zandlaag	D	70,00	m	
Maatgevend hoogwater	MHW	7,66	m NAP	
Polderpeil	PP	2,85	m NAP	
Coefficient van White	η	0,25		Uit schematiseringshandleiding piping
Volumegewicht van water	γ_w	9,81	kN/m ³	
Volumegewicht zandkorrels onder water	γ_p	16,50	kN/m ³	Uit schematiseringshandleiding piping
70-percentielwaarde van de korrelverdeling	d_{70}	2,89E-04	m	
Referentie d_{70} van de toegepaste grondsoorten	d_{70m}	2,08E-04	m	Uit schematiseringshandleiding piping
Rolweerstandshoek van de zandkorrel	θ	37,00	°	Uit schematiseringshandleiding piping
Doorlatendheid zandlaag	k	1,09E-03	m/s	
Kinematische viscositeit	ν	1,33E-06	m ² /s	Uit schematiseringshandleiding piping
Zwaartekracht versnelling	g	9,81	m/s ²	
Intrinsieke doorlatendheid van de zandlaag	K	1,47E-10	m ²	ν^2/k^2g
Vereiste stabiliteitsfactor piping	F_{min}	1,47		
Pipingberekening				
Weerstandsfactor	$F_{\text{resistance}}$	0,32		
Schaalfactor	F_{scale}	0,08		
Geometriefactor	F_{geometry}	1,18		
Optredend verval	$\Delta H - 0,3d$	3,45	m	$(MHW - PP) - 0,3d$
Kritiek toelaatbaar verval	$\Delta H_{\text{c,p}}$	3,76	m	$\Delta H_{\text{c,p}} = (L \cdot F_{\text{res}} \cdot F_{\text{scale}} \cdot F_{\text{geometry}}) / F_{\text{min}}$
Bereken de veiligheidsfactor terugschrijdende erosie	F_p	1,61		
Oordeel		Voldoende		

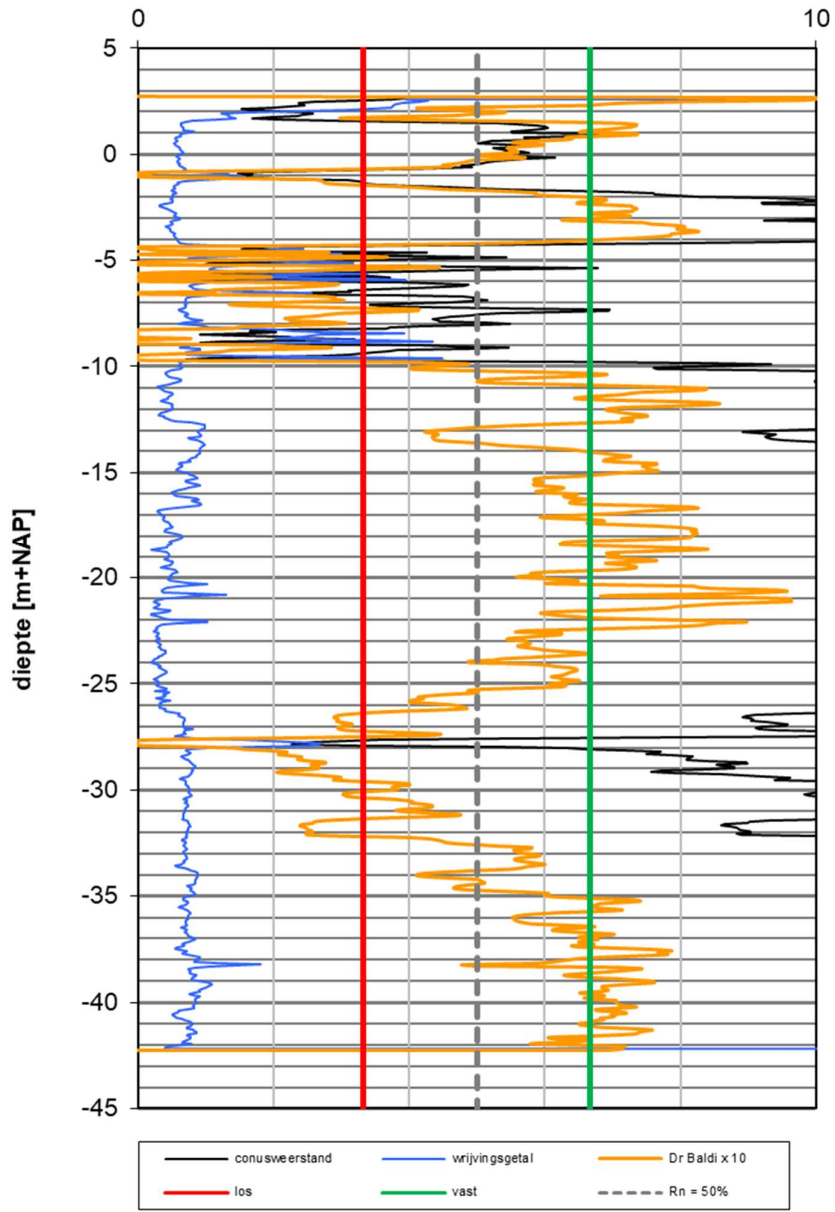
Appendix 3 Resultaten afschuiven zandwinput



Appendix 4 Verwekingsgevoelige zandlagen

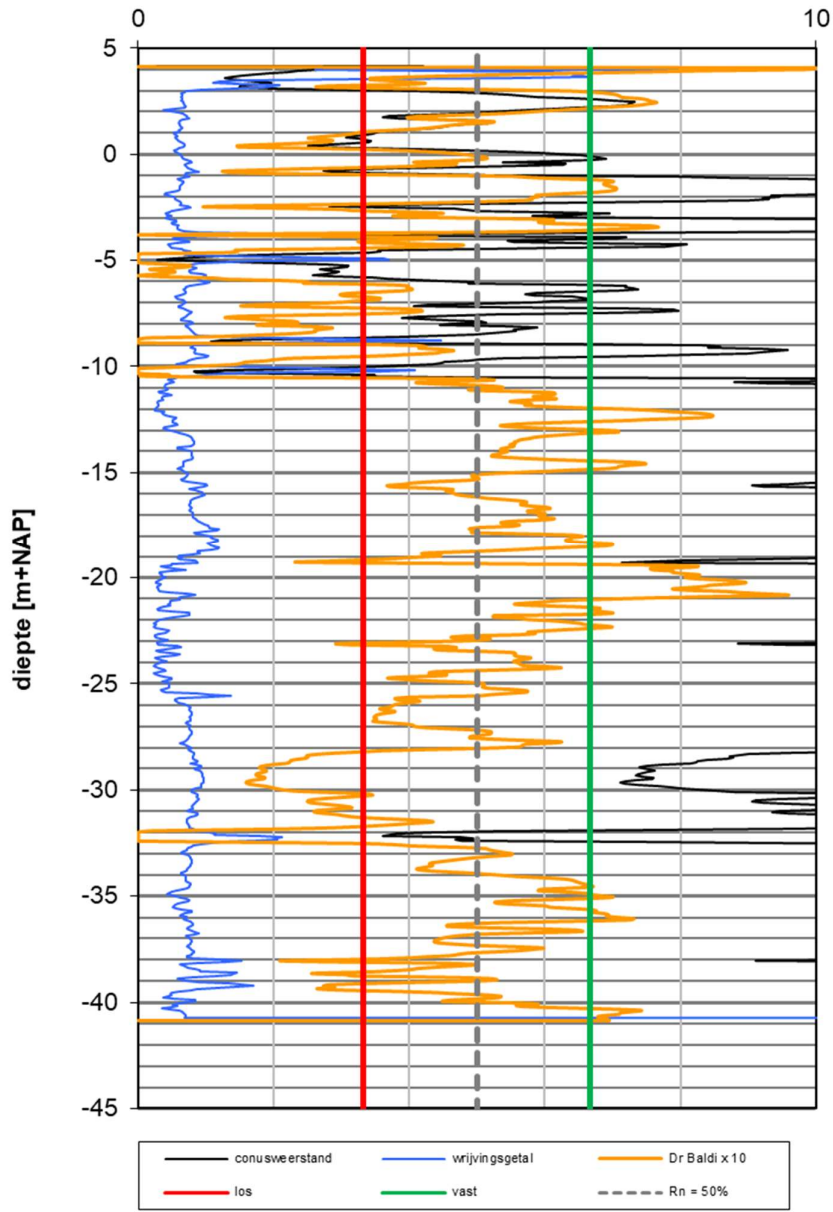
DKM1A

conusweerstand q_c [Mpa] / wrijvingsgetal [%] / $Dr \times 10$ [%]



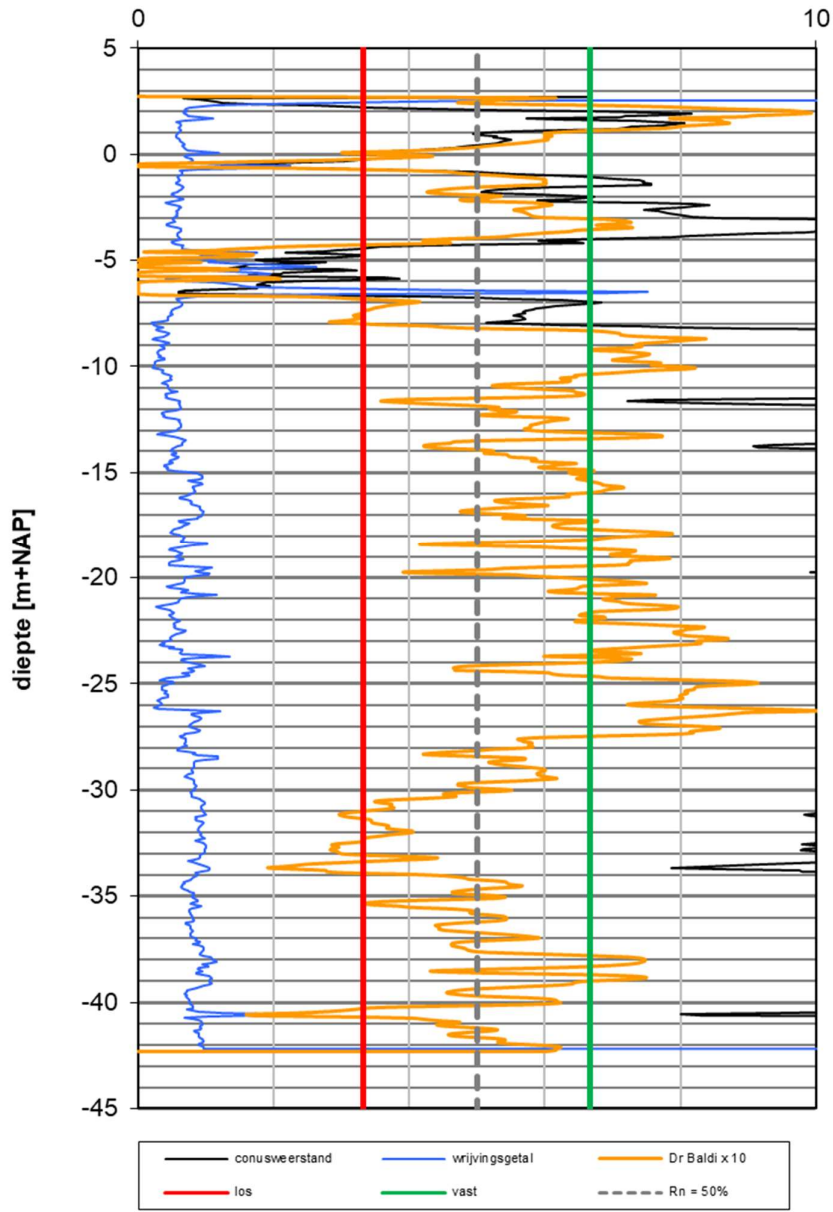
DKM2

conusweerstand q_c [Mpa] / wrijvingsgetal [%] / $Dr \times 10$ [%]



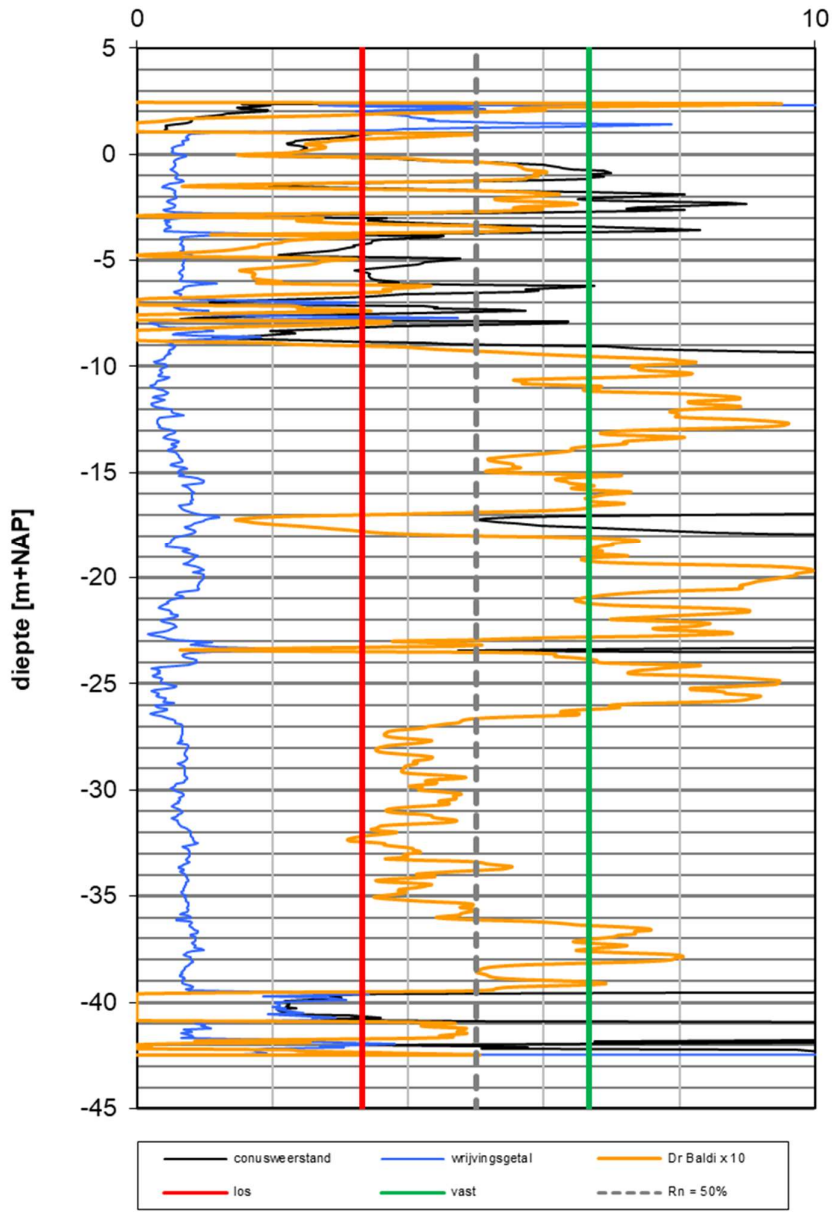
DKM3

conusweerstand q_c [Mpa] / wrijvingsgetal [%] / $Dr \times 10$ [%]



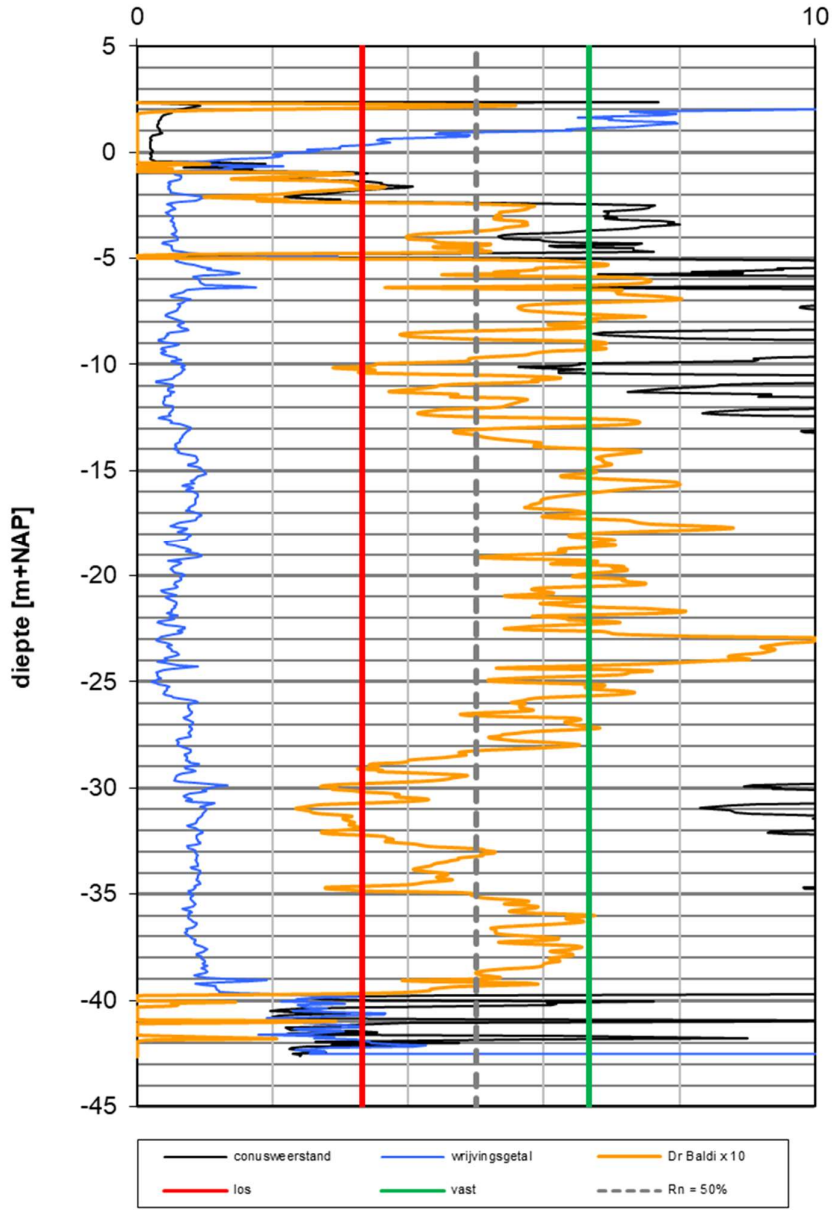
DKM4

conusweerstand qc [Mpa] / wrijvingsgetal [%] / Dr x 10 [%]



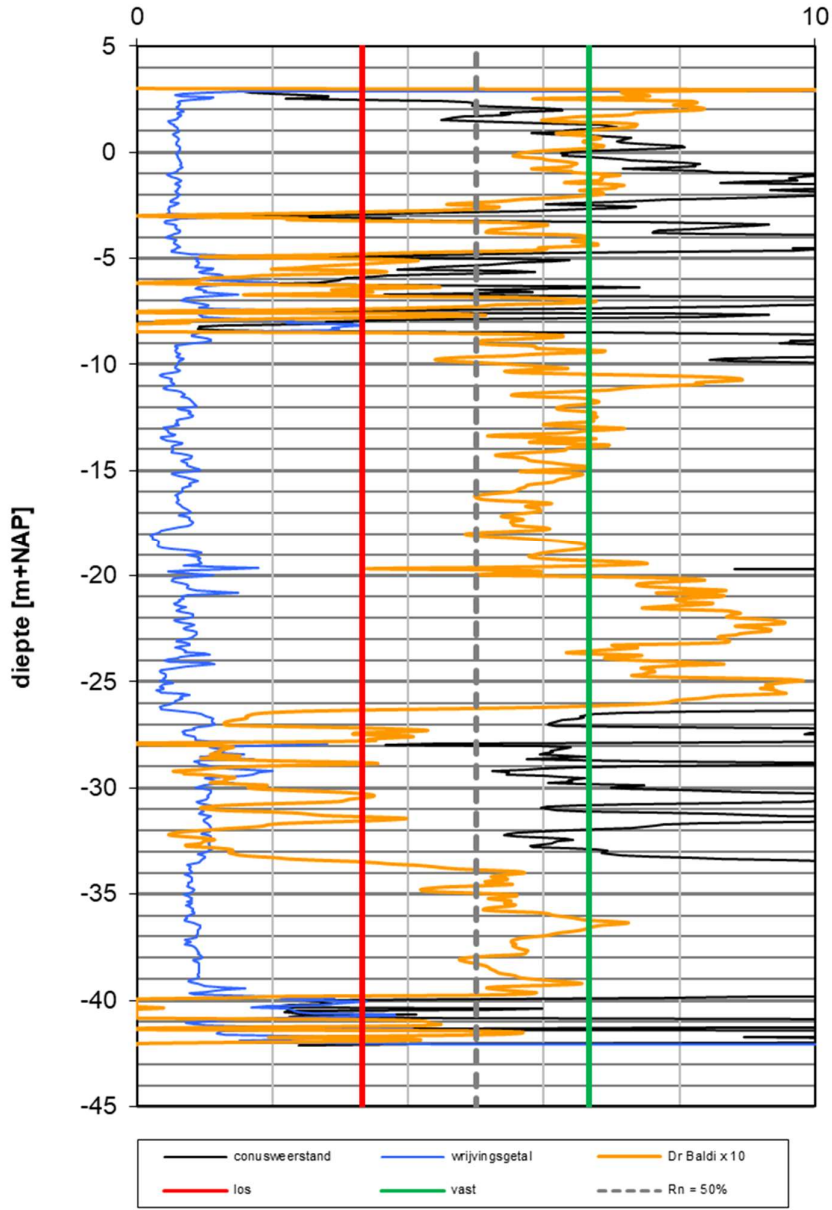
DKM5

conusweerstand qc [Mpa] / wrijvingsgetal [%] / Dr x 10 [%]



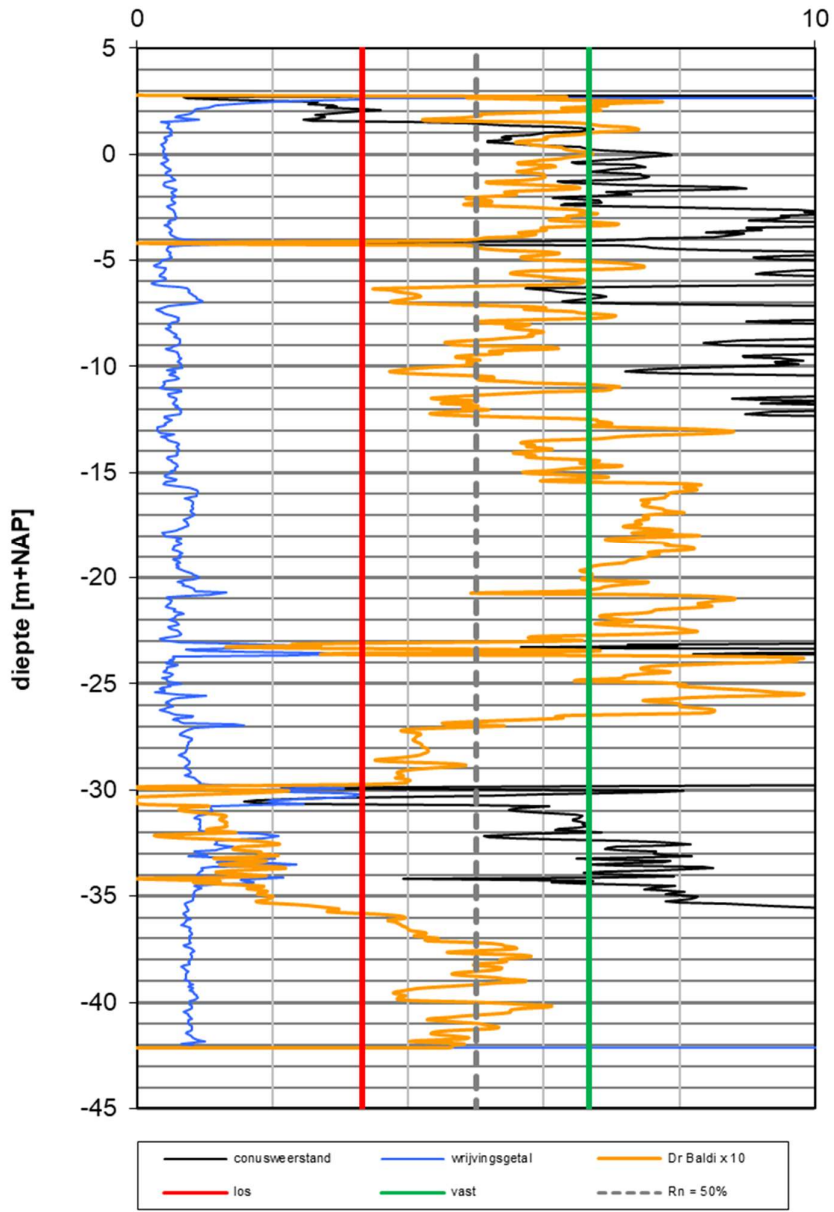
DKM6

conusweerstand qc [Mpa] / wrijvingsgetal [%] / Dr x 10 [%]



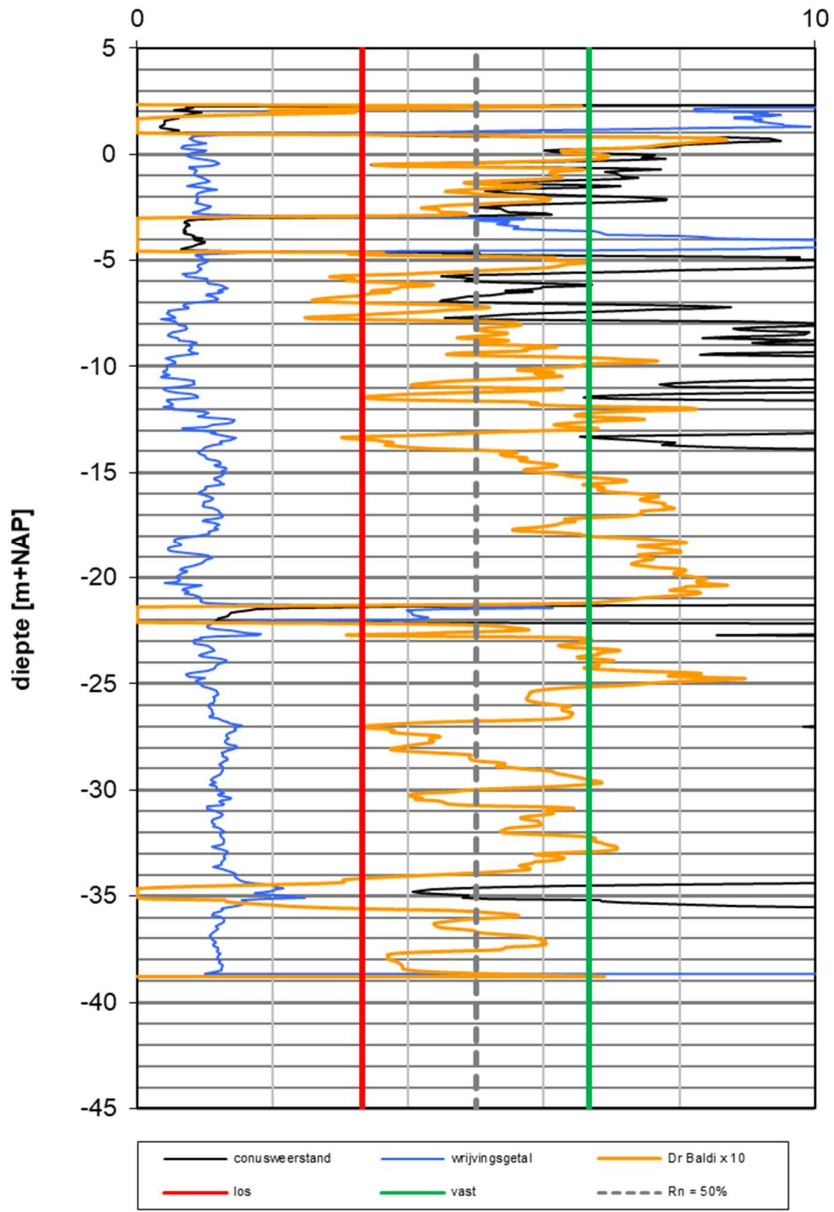
DKM7

conusweerstand q_c [Mpa] / wrijvingsgetal [%] / $Dr \times 10$ [%]



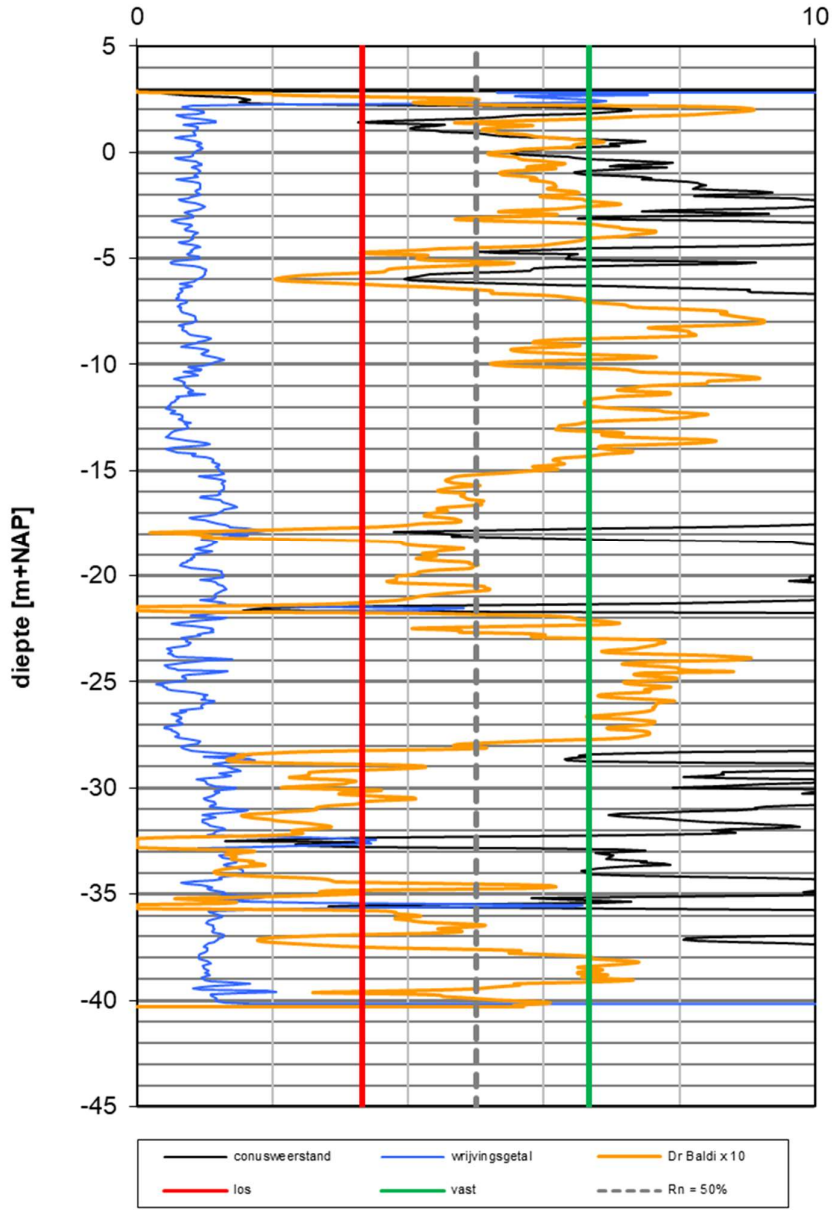
DKM8

conusweerstand qc [Mpa] / wrijvingsgetal [%] / Dr x 10 [%]



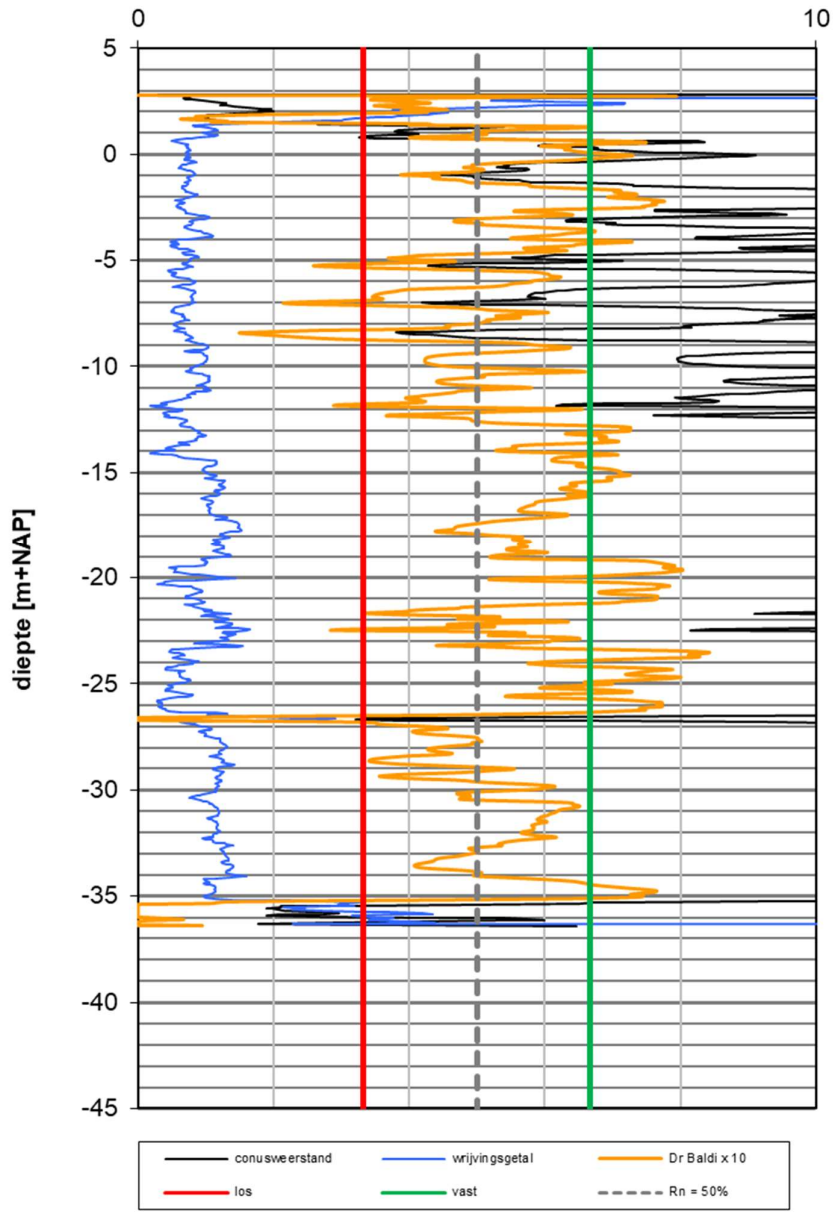
DKM9

conusweerstand qc [Mpa] / wrijvingsgetal [%] / Dr x 10 [%]



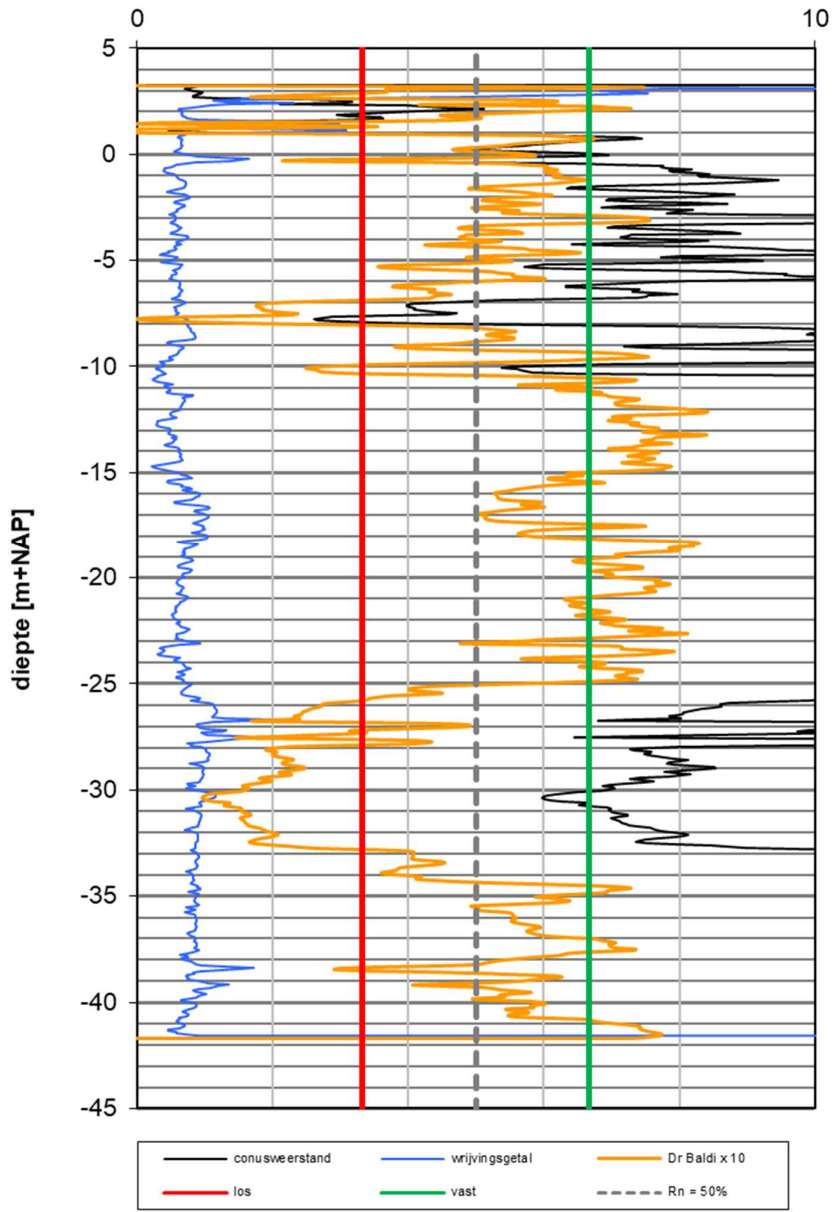
DKM10

conusweerstand q_c [Mpa] / wrijvingsgetal [%] / $Dr \times 10$ [%]



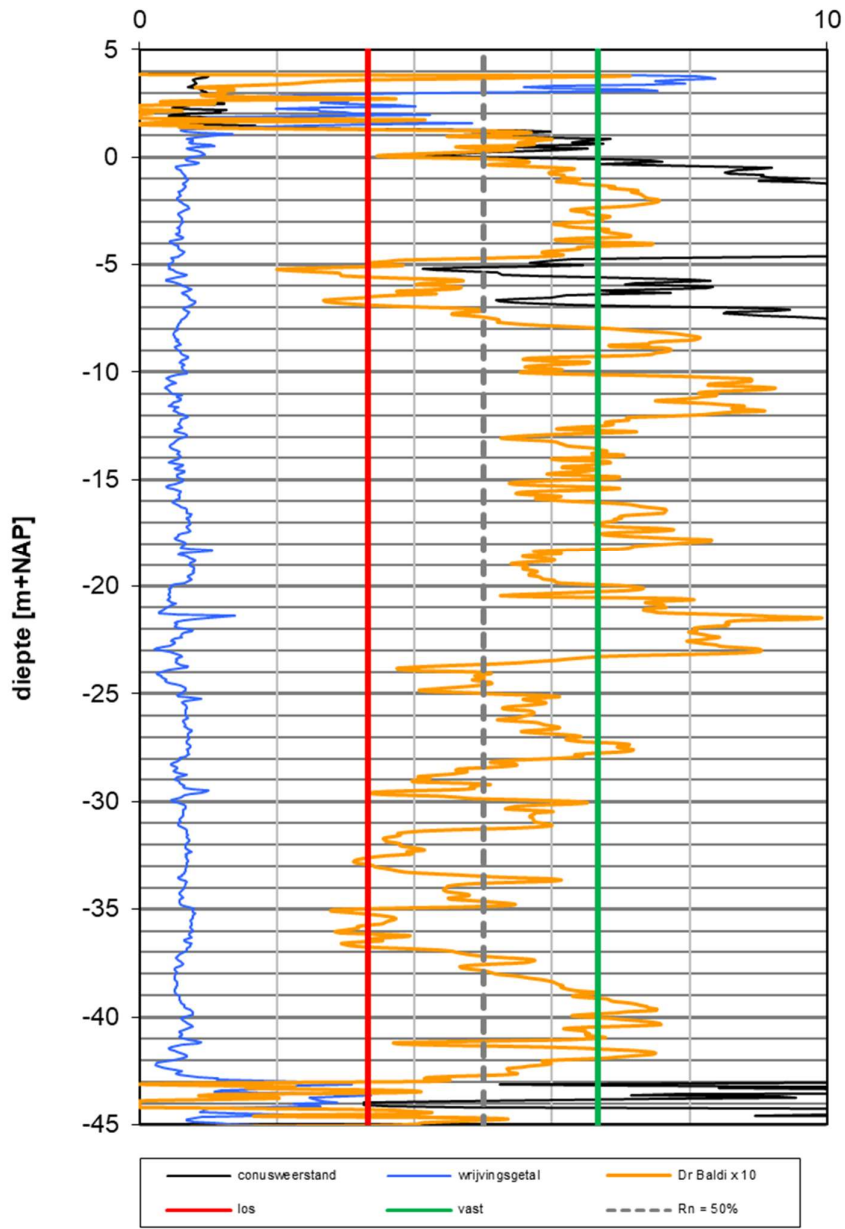
DKM11

conusweerstand q_c [Mpa] / wrijvingsgetal [%] / $Dr \times 10$ [%]



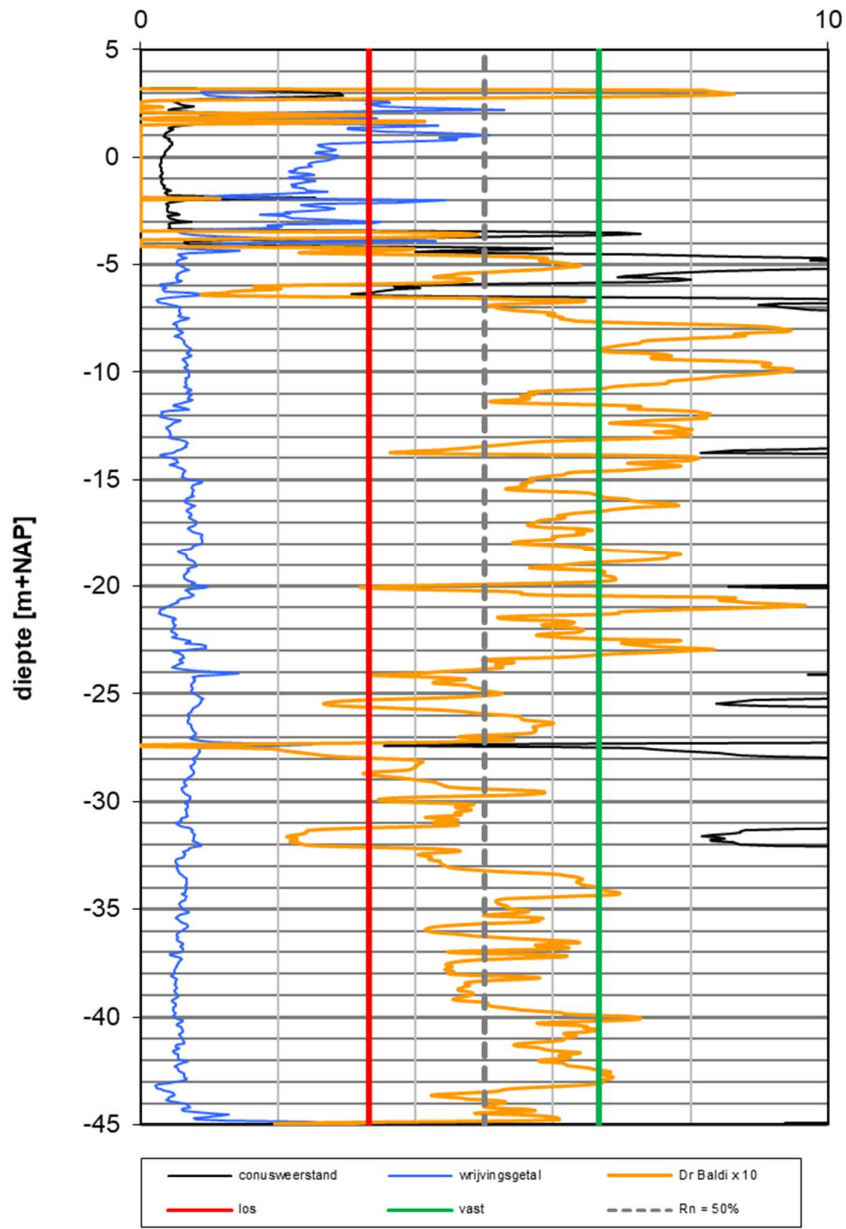
DKM001

conusweerstand qc [Mpa] / wrijvingsgetal [%] / Dr x 10 [%]



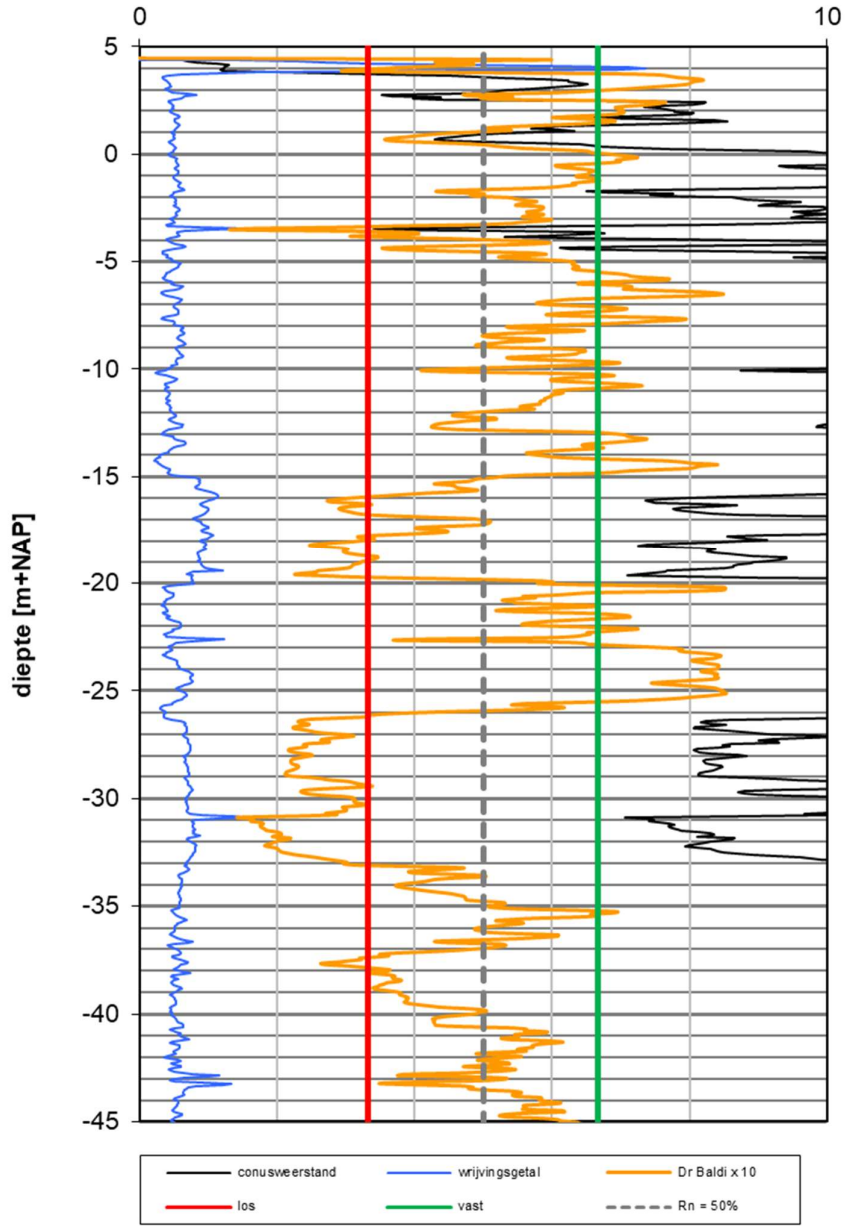
DKM002

conusweerstand qc [Mpa] / wrijvingsgetal [%] / Dr x 10 [%]



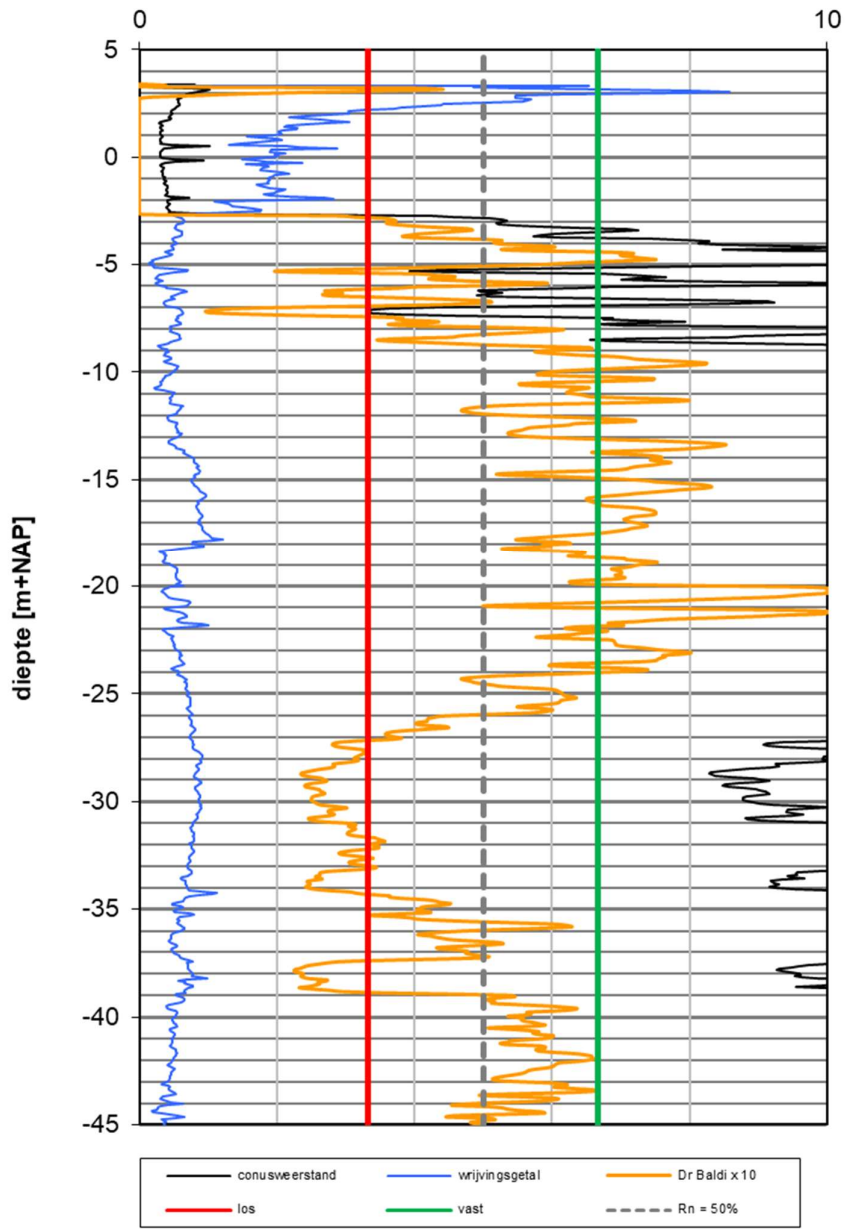
DKM003

conusweerstand qc [Mpa] / wrijvingsgetal [%] / Dr x 10 [%]



DKM004

conusweerstand qc [Mpa] / wrijvingsgetal [%] / Dr x 10 [%]



Appendix 5 Geometriecriterium

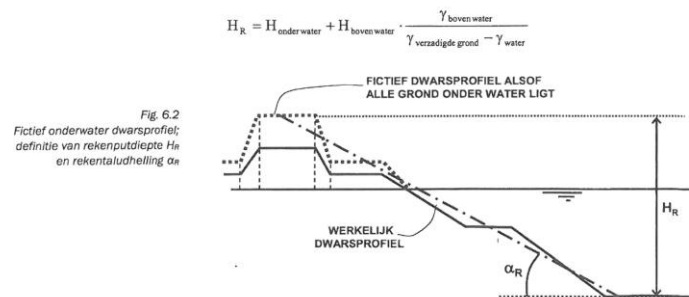
Projectnummer:	51006865
Project	Zandwinning Alem stabiliteitsberekeningen
Betreft:	Rekenputdiepte en rekentaludhelling



bodem_put	-32,00	m+NAP
maaiveld	3,00	m+NAP
waterstand	0,00	m+NAP
H_ow	32,00	m
H_bw	3,00	m
y_bov	18,00	kN/m ³
y_nat	20,00	kN/m ³
y_water	9,81	kN/m ³
Hr	37,30	m
fictief maaiveld	5,30	m+NAP
α_r	0,133	rad
α_r 1 op	7,527	m
α_r	0,232	rad
α_r 1 op	4,301	m

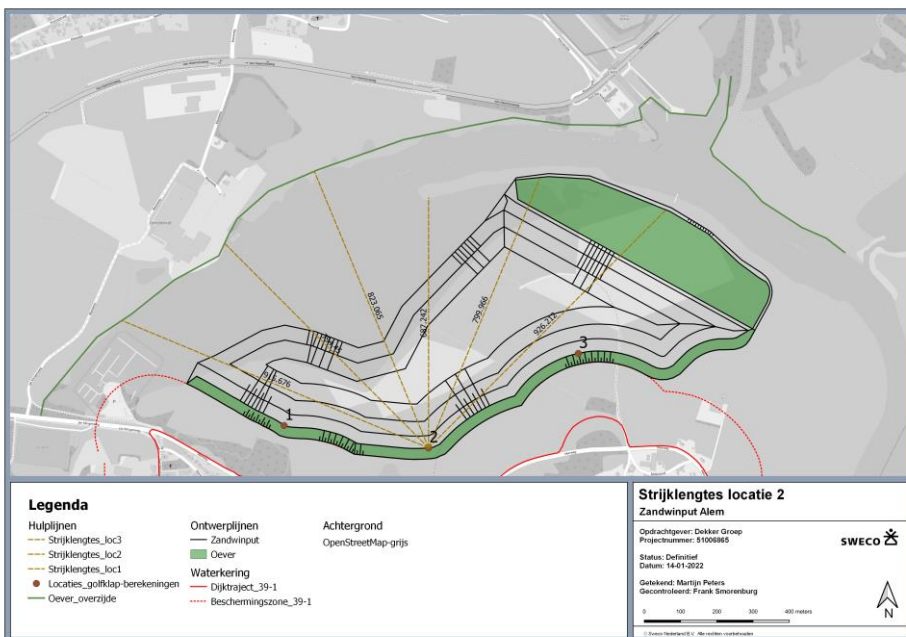
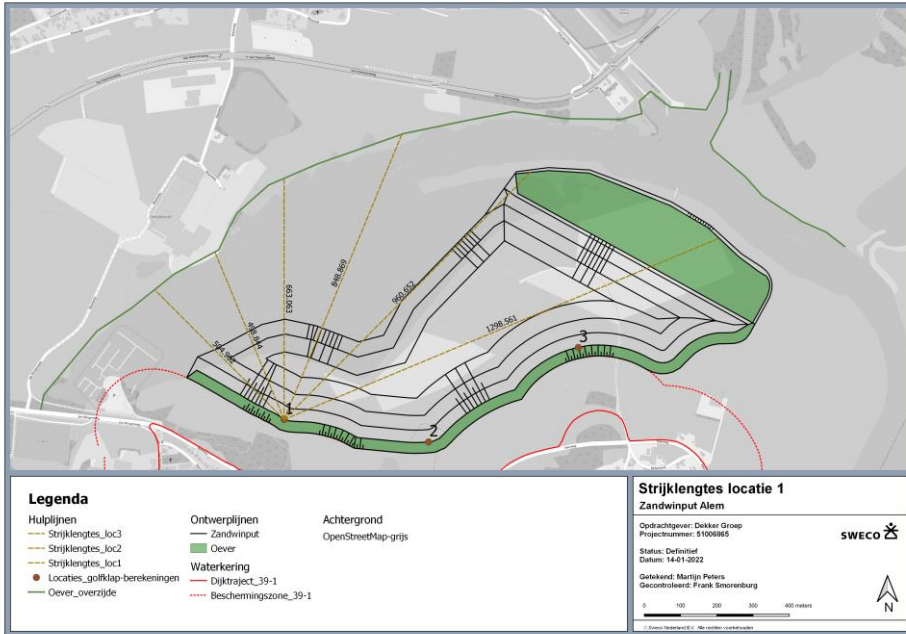
Geometriecriterium [1]

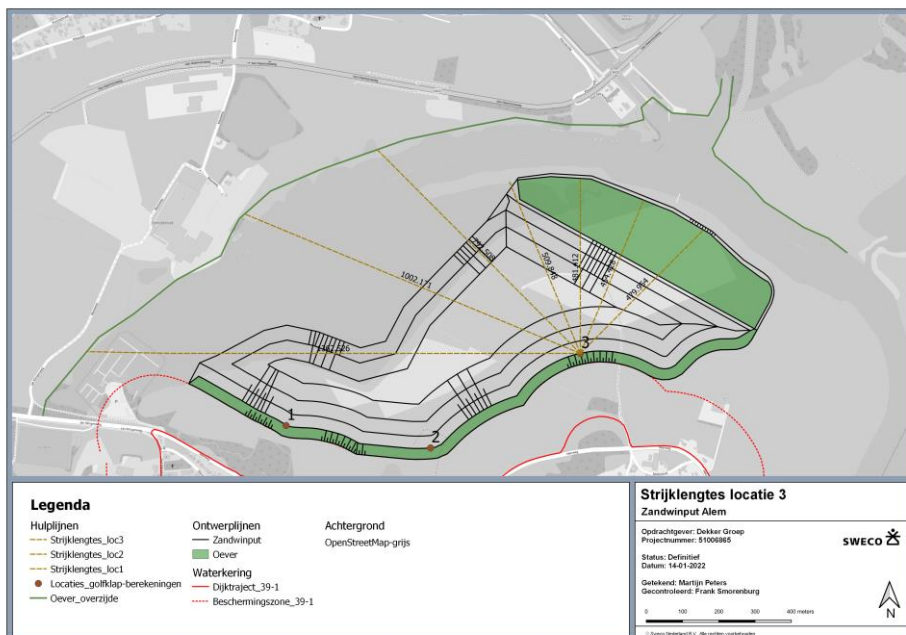
Geometriecriterium [2]



- Er wordt een combinatie van het *verwerkingsgevoeligheid-criterium* en het *geometriecriterium* beschouwd. De maximaal toelaatbare dikte van de lagen met een relatieve dichtheid kleiner dan 50%, is vergroot tot 3 m en het geometriecriterium is vervuimd tot de eis dat de rekentaludhelling α_R flauwer moet zijn dan $1 : 4 \cdot (H_R/30\text{m})^{1/3}$.

Appendix 6 Striijklengtes





Appendix 7 Golfhoogtes berekend met Bretschneider

		Windsnelheid	W	WNW	NW	NNW	N	NNO	NO	ONO	
		10 jaar	20,8	19,4	17,7	14,9	13,3	13,1	13,6	13,7	
		100 jaar	25,6	23,9	22	18	15,8	15,7	16,2	16,5	
Zonder zandwininput	Strijklengtes										
		Locatie 1			290	308	484	671	750	148	
		Locatie 2		334	549	550	335	117	170		
		Locatie 3	851	589	412	298	126	224	121		
	Resultaten										
	10 jaar	Locatie 1			0,28	0,24	0,25	0,28	0,31	0,16	
		Locatie 2		0,33	0,37	0,30	0,22	0,14	0,17		
		Locatie 3	0,53	0,42	0,33	0,24	0,14	0,18	0,15		
	100 jaar	Locatie 1			0,36	0,30	0,31	0,35	0,38	0,20	
		Locatie 2		0,42	0,47	0,38	0,26	0,17	0,20		
Locatie 3		0,67	0,53	0,42	0,29	0,18	0,22	0,18			
Met zandwininput	Strijklengtes										
		Locatie 1			504	498	663	848	960	1298	
		Locatie 2		915	794	823	687	800	926		
		Locatie 3	1362	1002	792	509	481	454	480		
	Resultaten										
	10 jaar	Locatie 1			0,36	0,29	0,29	0,31	0,34	0,39	
		Locatie 2		0,50	0,43	0,36	0,29	0,30	0,34		
		Locatie 3	0,64	0,52	0,43	0,29	0,25	0,24	0,26		
	100 jaar	Locatie 1			0,46	0,36	0,35	0,38	0,42	0,48	
		Locatie 2		0,64	0,55	0,44	0,35	0,37	0,41		
Locatie 3		0,81	0,66	0,55	0,36	0,31	0,30	0,32			
Verschil	Strijklengtes										
		Locatie 1			214	190	179	177	210	1150	
		Locatie 2		581	245	273	352	683	756		
		Locatie 3	511	413	380	211	355	230	359		
	Resultaten										
	10 jaar	Locatie 1			0,07	0,05	0,03	0,03	0,03	0,23	
		Locatie 2		0,17	0,06	0,05	0,07	0,17	0,17		
		Locatie 3	0,11	0,10	0,10	0,06	0,11	0,06	0,11		
	100 jaar	Locatie 1			0,09	0,06	0,04	0,04	0,04	0,29	
		Locatie 2		0,21	0,08	0,07	0,09	0,21	0,21		
Locatie 3		0,14	0,13	0,13	0,07	0,13	0,08	0,14			

Appendix 8 Berekening heavescherm

Ontwerp heave:				
Parameters		Buitenteen	Binnenteen	
Onderkant deklaag		1,25	1,25	m NAP
Maaiveldhoogte		4,00	4,00	m NAP
stijghoogte ter plaatse van de onderkant van het kwelscherm	ϕ_o	7,66	6,41	m NAP
polderpeil (gelijk aan maaiveld)	h_p	4,00	4,00	m NAP
kritieke verhang	i_c	0,5	0,5	-
maximale afstand kwelscherm waar fluidisatie kan optreden	x	5,67	3,17	m
Heave voldoet		Voldoet niet	Voldoet niet	-
onderkant kwelscherm		-4,42	-1,92	m NAP