

Pilot JLD-Dijkstabilisator Watergraafsmeer

Onderzoeksvraag 1: Ontwerpbaarheid

projectnummer 413509
definitief revisie 02
31 augustus 2023

Inhoudsopgave

Blz.

1	Inleiding	1
1.1	Achtergrond	1
1.2	Voorliggende rapportage	2
2	Aanpak	5
2.1	Deelvraag 1: Deelstappen ontwerp	5
2.2	Deelvraag 2: Veiligheid	5
2.3	Deelvraag 3: Procedure constructieve toets	6
2.4	Deelvraag 4: Procedure ankeruitval	6
2.5	Deelvraag 5: Effecten puin	6
2.6	Deelvraag 6: Onderzoeksvragen	7
3	Deelstappen ontwerp	8
3.1	Schetsontwerp (SO)	10
3.2	Voorlopig ontwerp (VO)	12
3.3	Definitief ontwerp (DO)	12
3.3.1	Toe te passen ontwerpmodellen	12
3.3.2	Controles ontwerpfase	13
3.4	Uitvoeringsontwerp (UO)	14
3.5	Ongedraineerd & Gedraineerd ontwerpen	14
4	Veiligheid	18
5	Procedure constructieve toets	19
6	Procedure ankeruitval	20
7	Effecten puin	21
8	Onderzoeksvragen	22
8.1	Onderzoeksvraag 2: Veiligheidsbenadering van constructieve elementen	22
8.2	Onderzoeksvraag 3: Bezijden talud boven de kopplaat	22
8.3	Onderzoeksvraag 4: Wrijvingskracht LDE in venige grond	23
8.4	Onderzoeksvraag 5: Stabiliteit en sterkte van de grond onder de kopplaat	23
8.5	Onderzoeksvraag 6: Groepseffect JLD-Dijkstabilisator	23
8.6	Onderzoeksvraag 7 & 11: Pipingrisico langs het anker & aanwezige wateroverspanning	25
8.7	Onderzoeksvraag 8: Invloed vervormingen JLD-Dijkstabilisator	25
8.8	Onderzoeksvraag 9: Beplanting	27
8.9	Onderzoeksvraag 10: Inpasbaarheid JLD-Dijkstabilisator i.c.m. palen keermuur	28
8.10	Onderzoeksvraag 11: Piping	29
8.11	Onderzoeksvraag 12: Beoordelingsmethode en monitoring	29

8.12	Onderzoeksvraag 13: Verloop voorspanning JLD-Dijkstabilisator	29
8.13	Onderzoeksvraag 14 & 18: Inbrengwijze stedelijk gebied en verloop pleistocene zandlaag	30
8.14	Onderzoeksvraag 15: Trillingen	30
8.15	Onderzoeksvraag 16: Grondverdringing	32
8.16	Onderzoeksvraag 18: Diepe ligging zandlaag	33
9	Effect hoge wrijving langs LDE	34
9.1	Case study	34
9.2	Onderzoeksvragen	34
10	Conclusie	37
11	Verwijzingen	39

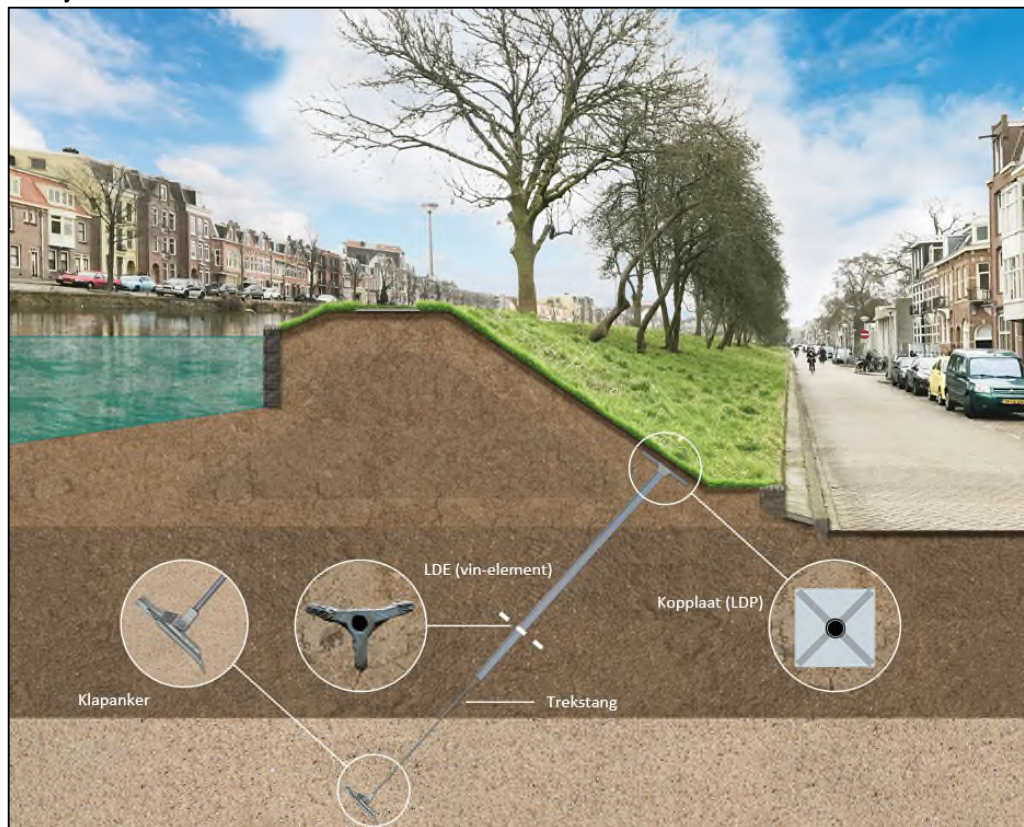
1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De JLD-Dijkstabilisator is een nieuwe dijkversterkingsmethode. Voor de ontwerpbaarheid en aantoonbaarheid van deze methode is een pilotproject in combinatie met praktijkproeven opgezet. De resultaten van het pilotproject en de praktijkproeven hebben als doel de (door)ontwikkeling van deze innovatie en het leveren van afdoende onderbouwing voor een ENW-acceptatie mogelijk te maken.

In een voorgaande fase zijn reeds diverse veldproeven uitgevoerd ten behoeve van de ontwikkeling en onderbouwing van de techniek. Deze veldproeven hebben antwoord gegeven op de meeste vragen rond deze innovatieve techniek maar niet alle vragen zijn hiermee beantwoord. De resterende vragen kunnen worden beantwoord met de resultaten van de pilot en de aanvullende veldproeven.

JLD Dijkstabilisator



De JLD-Dijkstabilisator bestaat uit een LDE (vin-element), klapanker, trekstang en kopplaat. Het klapanker wordt in een diepe zandlaag geplaatst, waardoor de krachten op het LDE-element via de kopplaat en de trekstang worden doorgegeven aan de zandlaag. Door het aanbrengen van de voorspanning op de kopplaat wordt de grond onder de kopplaat op spanning gebracht. Het voordeel van de JLD-Dijkstabilisator is dat dit een actief systeem betreft dat geen vervorming van de dijk nodig heeft voordat het in werking treedt.

In samenwerking met Waterschap Amstel, Gooi en Vecht is besloten een pilotproject uit te voeren. Als pilotproject is gekozen voor de versterking van de Ringdijk te Watergraafsmeer in Amsterdam. Daarbij is een team van JLD Contracting, Antea Group en Deltares betrokken.

Na het uitvoeren van de veldproeven is op basis van de postdictie een ontwerpmethodologie opgesteld voor de JLD-Dijkstabilisator. Het onderzoek uitgevoerd in de postdictie en de hierop gebaseerde ontwerpmethoden zijn voorgelegd aan de ENW. De ENW heeft aangegeven dat het onderzoek en de ontwerpmethodologie voldoende basis bieden voor verdere ontwikkelingen. Het ENW heeft hierbij wel enkele kennisvragen opgesteld die in de verdere doorontwikkeling beantwoord moeten worden. De kennisvragen van de ENW zijn bij aanvang van het pilotproject in Watergraafsmeer gecombineerd met kennisvragen die specifiek gelden voor de pilotlocatie en de dijkversterking van de Ringdijk. In het totaal betreft het negentien onderzoeksvragen die beantwoord moeten worden op basis van de pilot en de aanvullende veldproeven. Een aantal van deze vragen dienen voorafgaand aan het DO van het pilotproject te zijn beantwoord. Voor verder onderzoek en voor de beantwoording van deze onderzoeksvragen worden de volgende proeven en het eerder genoemde pilotproject uitgevoerd en gemonitord:

- voorspanproeven te Purmerend;
- interactieproef Veen te Broek in Waterland;
- pilotproject Ringdijk Watergraafsmeer.

1.2 Voorliggende rapportage

Voorliggend rapport betreft het resultaat van onderzoeksvraag 1. De onderzoeksvraag betreft de ontwerpbaarheid van de JLD-Dijkstabilisator.

De oorspronkelijke onderzoeksvraag uit het Plan van Aanpak (PvA) van de Pilot JLD-Dijkstabilisator ringdijk Watergraafsmeer is als volgt geformuleerd:

'De ontwerpbaarheid van de Dijkstabilisator gegeven de afgeleide ontwerpwijze en de daarmee te realiseren veiligheid'.

Onderzoeksvraag 1 is op de volgende manier geïnterpreteerd: Hoe moet een dijkversterking met de JLD-Dijkstabilisator worden ontworpen?

De onderzoeksvraag is beantwoord middels de onderstaande deelvragen:

1. Welke deelstappen zijn nodig om tot een gedragen ontwerp te komen?
2. Hoeveel veiligheid voegt de JLD-Dijkstabilisator toe aan de veiligheid van de dijk bij toepassing van de veiligheidsbenadering?
3. Welke procedure is nodig om de constructieve toets uit te voeren?
4. Welke procedure is nodig om het effect van ankeruitval te kwantificeren?
5. Wat is het effect van puin in de ondergrond op de ontwerpbaarheid van de JLD-Dijkstabilisator?
6. Welke plek krijgen de resultaten van onderzoeksvraag 2 t/m 16 en 18 in de ontwerpmethodologie?

Overige onderzoeksvragen

Het ENW heeft in 2016 advies uitgebracht over de voor de JLD-Dijkstabilisator uitgevoerde bezwijkproef en de uitwerking daarvan (advies ENW16-12). In uw advies zijn destijds een aantal vragen gesteld over deze techniek:

- De ontwerpbaarheid van de Dijkstabilisator gegeven de afgeleide ontwerpwijze en de daarmee te realiseren veiligheid (stabiliteit);
- Overstappen van referentieperiode van 10 jaar naar jaarkans in veiligheidsfilosofie;
- Bezijden talud boven de kopplaat meenemen in faalkansverdeling;
- Stabiliteit/sterkte grond onder de kopplaat meenemen in ontwerp;
- Groepseffect wanneer ankers vanuit ontwerpbehoefte dichter op elkaar moeten worden geplaatst;
- Effect doorgaande kruindaling en grondvervorming op ankers;
- Opstellen beoordelingsmethode incl. te monitoren parameters gedurende levensduur;
- Mate waarin de voorspanning over langere tijd aanwezig blijft bij een samendrukbare dijk;
- Uitvoerings- en locatie-specifieke aspecten.

De onderzoeksvragen 2 t/m 16 en 18 geven antwoord op de hierboven genoemde vragen en worden in deze rapportage behandeld. Daarnaast zijn in het project Watergraafsmeer ook de aanvullende onderzoeksvragen 17 en 19 geformuleerd. Deze onderzoeksvragen gaan in op de total cost of ownership en de benodigde beheerinspanning. Momenteel (maart 2019) wordt nog aan het beheerplan gewerkt. De uitkomsten daarvan geven weer input aan de 'total cost of ownership'. Vraag 17 en 19 zijn derhalve niet opgenomen in deze rapportage. Voor de volledigheid zijn in de onderstaande tabel alle onderzoeksvragen weergegeven.

Tabel 1-1: Totaal overzicht onderzoeksvragen

Nr.	Omschrijving onderzoeksvraag
1	De ontwerpbaarheid van de Dijkstabilisator gegeven de afgeleide ontwerpwijze en de daarmee te realiseren veiligheid (stabiliteit)
2	Overstappen van referentieperiode van 10 jaar naar jaarkans in veiligheidsfilosofie
3	Bezijden talud boven de kopplaat meenemen in faalkansverdeling
4	Interactie kracht (schuifkracht langs het LDE element) in venige grond;
5	Stabiliteit/sterkte grond onder de kopplaat meenemen in ontwerp
6	Groepseffect wanneer ankers vanuit ontwerpbehoefte dichter op elkaar moeten worden geplaatst;
7	Pipingrisico langs het anker (door het inbrengen van het anker met de voorloper) in andere dan zuiver kleiige gronden;
8	Effect doorgaande kruindaling en grondvervorming op ankers.
9	Effect bestaande beplanting op JLD ankers

Nr.	Omschrijving onderzoeksvraag
10	Inpasbaarheid in verband met aanwezigheid palen keermuur
11	Aanwezige wateroverspanning in relatie tot pipingrisico en uitvoerbaarheid
12	Opstellen beoordelingsmethode incl. te monitoren parameters gedurende levensduur
13	Mate waarin de voorspanning over langere tijd aanwezig blijft bij een samendrukbare dijk;
14	Inbrengwijze in een stedelijk gebied, (ruimtebeslag stelling, bomen etc.)
15	Trillingen tijdens het inbrengen;
16	Grondverdringing tijdens het inbrengen (deformaties dijk en panden).
17	Inzicht in kosten over de levensduur (TCO)
18	Welke consequenties op engineering en uitvoerbaarheid heeft de relatief diepe ligging van de pleistocene zandondergrond waarin de verankering moet worden geplaatst
19	Wat zijn de beheerconsequenties?

2 Aanpak

In dit hoofdstuk is beschreven hoe de onderzoeksvraag is beantwoord, per deelvraag is de aanpak beschreven.

2.1 Deelvraag 1: Deelstappen ontwerp

‘Welke deelstappen zijn nodig om tot een gedragen ontwerp te komen?’

Om tot een ontwerpmethode van een innovatieve techniek te komen is er gewerkt in meerdere onderzoekscycli. De eerste stap om tot een gedragen ontwerpmethode te komen is op het moment van schrijven reeds gezet. In opdracht van de POV-Macrostabieliteit is invulling gegeven aan de POV-M Publicatie Vernagelingstechnieken (PPV) (POV-Macrostabieliteit, dec 2018). In de rapportage is een ontwerpmethodiek beschreven ten behoeve van het ontwerp van een dijkversterking met de JLD-Dijkstabilisator. Dit vormt het startpunt van het beantwoorden van de onderzoeksvraag.

Het opstellen van het ontwerp voor het pilotproject te Watergraafsmeer is de tweede stap in het onderzoek. Binnen dit project is de kennis uit de PPV gebruikt. Door het toepassen van de ontwerpmethode is de praktische toepassing van de ontwerpmethode getest. In het ontwerp van de dijkversterking te Watergraafsmeer zoeken we naar optimalisatie van het ontwerpproces. Daarnaast is de ontwerpmethode aangevuld met eventueel ontbrekende ontwerpstappen. Daar waar is afgeweken van de PPV is afstemming gezocht met Deltares om de ontwerpmethode aan te scherpen. Door nauw samen te werken met een kennisinstituut is de kwaliteit gewaarborgd van het ontwerpproces. In de DO-rapportage is een overzicht geven van de te doorlopen ontwerpstappen.

De derde en laatste stap in het proces is het bijwerken van de POV-M Publicatie Vernagelingstechnieken. Door de ontwerpmethode toe te passen bij het pilotproject is nieuwe kennis vergaard. Deze kennis wordt geborgd door de ontwerpmethode te actualiseren met de nieuwe kennis. Deze laatste stap vindt buiten het project Watergraafsmeer plaats.

De ontwerpstappen zijn beschreven in dit document voor twee situaties, ongedraineerd en gedraineerd ontwerpen. De hoofdlijnen zijn beschreven welke stappen benodigd zijn voor een Voorlopig Ontwerp (VO) en een Definitief Ontwerp (DO). De stappen zijn ontleend aan het DO en de PPV.

2.2 Deelvraag 2: Veiligheid

‘Hoeveel veiligheid voegt de JLD d-Dijkstabilisator toe aan de veiligheid van de dijk bij toepassing van de veiligheidsbenadering?’

Om inzicht te krijgen in de toegevoegde veiligheid stellen we een ontwerp op voor het pilotproject. Daarnaast is er voor de PPE (POV-M Rekentechnieken, 2018) een rekenvoorbeeld opgesteld. Beide resultaten leveren informatie om tot een antwoord van deze deelvraag te komen.

De toe te voegen veiligheid is afhankelijk van meerdere componenten zoals:

- Constructieve sterkte: Hoe veel kracht kan de constructie maximaal aan? (Deelvraag 3 en 4 en onderzoeksvraag 6).
- Geotechnische limiet: Hoe veel extra kracht kan de waterkering aan? (onderzoeksvraag 3, 5, 8).
- Beheerderswens: de afspan frequentie is van belang voor de te behouden veiligheid? (onderzoeksvraag 13, 19).

Bij het opstellen van het ontwerp van de dijkversterking te Watergraafsmeer is de toe te voegen stabiliteit afhankelijk van de bovenstaande aspecten, welke is onderzocht doormiddel van een gevoeligheidsanalyse. Hiermee geven we een bandbreedte van de toe te voegen stabiliteit.

2.3 Deelvraag 3: Procedure constructieve toets

‘Welke procedure is nodig om de constructieve toets uit te voeren?’

De constructieve toets levert een input aan de maximaal te behalen veiligheid. De maximale kracht van de individuele constructie elementen, en de verbinding tussen de elementen bepaald welke kracht er op het systeem gezet kan worden. Allereerst zijn alle constructieve elementen binnen het systeem geïnventariseerd op basis van materiaaltesten en/of productinformatie van fabrikanten van de verschillende onderdelen. Vervolgens is de constructieve toets opgezet in lijn met Eurocode.

In voorliggend rapport is beschreven welke mechanismen beschouwd moeten worden. Er is verwezen naar de PPV voor de manier waarop de constructieve toets uitgevoerd moet worden.

2.4 Deelvraag 4: Procedure ankeruitval

‘Welke procedure is nodig om het effect van ankeruitval te kwantificeren?’

Indien een JLD-Dijkstabilisator uitvalt, zullen de naastgelegen Dijkstabilisatoren een grotere belasting op moeten nemen. Dit is getoetst door een 3D-berekening te maken met meerdere Dijkstabilisatoren. Vervolgens is de middelste Dijkstabilisator weggehaald om te beoordelen wat het effect is op zowel de stabiliteit als op de krachten op de naastgelegen ankers.

Deze procedure is beschreven met betrekking tot de bruikbaarheidsgrenstoestand. (Serviceability Limit State, SLS). Voor de uitkomsten is verwezen naar het DO en de PPV.

2.5 Deelvraag 5: Effecten puin

‘Wat is het effect van puin in de ondergrond op de ontwerpbaarheid van de JLD-Dijkstabilisator?’

Het doel is om een werkwijze te formuleren indien de JLD-Dijkstabilisator op puin en restanten funderingen stuit. De marges zijn omschreven waarbinnen afgeweken kan worden van het h.o.h. stramien uit het ontwerp zonder dat dit de vereiste stabiliteit beïnvloedt. Wanneer een Dijkstabilisator niet binnen deze marges geplaatst kan worden, dient een detailontwerp voor de desbetreffende locatie te worden gemaakt alvorens de uitvoering op die locatie verder kan. De marges waarbinnen van het h.o.h. stramien kan worden afgeweken zijn in het DO bepaald.

2.6 Deelvraag 6: Onderzoeksvragen

‘Welke plek krijgen de resultaten van onderzoeksvraag 2 t/m 19 in de ontwerpmethode?’

De ontwerpmethode van de JLD-Dijkstabilisator is pas compleet wanneer het antwoord van onderzoeksvraag 2 t/m 19 is verwerkt in de ontwerpmethode. Het beantwoorden van de onderzoeksvragen loopt parallel met het uitwerken van het DO ten behoeve van de dijkversterking te Watergraafsmeer. Het uitwerken van het ontwerp levert waardevolle informatie voor het beantwoorden van de onderzoeksvragen.

Sommige informatie uit het pilotproject volgt echter pas na monitoring van de realisatie en de gebruikersfase.

De onderzoeksvragen zijn beantwoord, per onderzoeksvraag is een rapportage opgesteld. Bepaalde onderzoeksvragen kunnen pas definitief beantwoord worden als monitoring heeft plaatsgevonden tijdens de realisatiefase en de gebruikersfase. In voorliggende rapportage zijn de conclusies van alle onderzoeksvragen beschreven met betrekking tot de invloed op de ontwerpmethode.

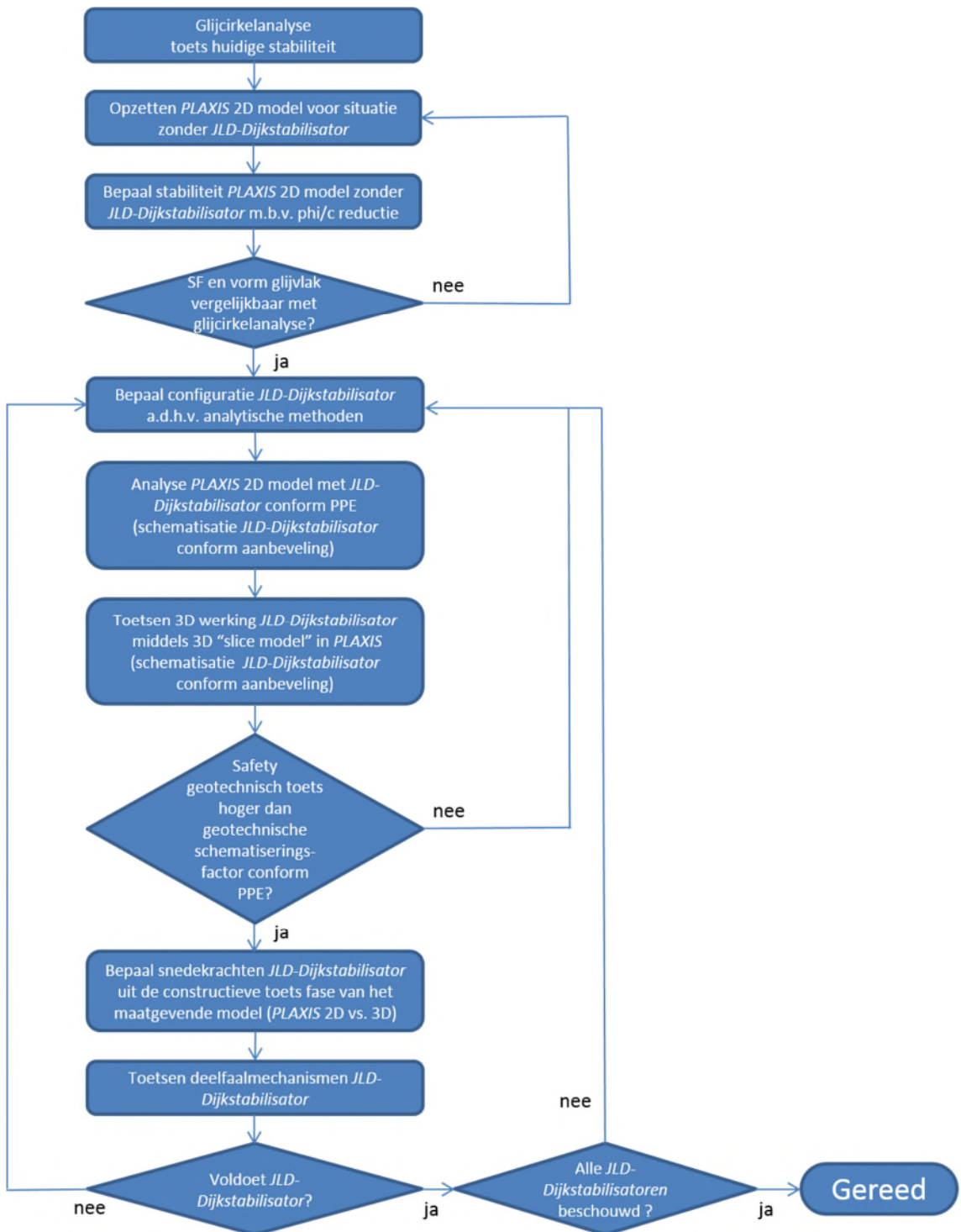
3 Deelstappen ontwerp

In dit hoofdstuk is deelvraag 1 uitgewerkt: ‘welke deelstappen zijn nodig om tot een gedragen ontwerp te komen?’

De ontwerpmethodiek van de *JLD-Dijkstabilisator* is uitgewerkt in de PPV en het DO van Watergraafsmeer. Per fase van het ontwerp is aangegeven welke stappen er genomen dienen te worden om tot een veilig ontwerp te komen. Voor de aandachtspunten per werkstap voor het ontwerp is verwezen naar de PPV (Publicatie Vernagelingstechnieken).

Er zijn twee methodes om een ontwerp op te stellen: ongedraineerd en gedraineerd. In de PPV zijn de ontwerpstappen beschreven van een ongedraineerd ontwerp. In het DO van de Ringdijk Watergraafsmeer zijn de ontwerpstappen beschreven van een gedraineerd ontwerp. De benodigde stappen komen hoofdzakelijk overeen. Het verschil tussen beiden is beschreven in paragraaf 3.5.

In Figuur 3-1 is het stroomschema van het ontwerp weergegeven.



Figuur 3-1 Stroomschema ontwerp JLD-Dijkstabilisator

De ontwerpstappen zijn omschreven voor een schetsontwerp, een voorontwerp, een definitief ontwerp en voor het uitvoeringsontwerp.

3.1 Schetsontwerp (SO)

Voordat de meer gedetailleerde ontwerpfasen beginnen is het wenselijk om op een relatief snelle manier vast te kunnen stellen of de *JLD-Dijkstabilisator* een haalbare versterkingsmaatregel is voor de betreffende dijkversterking. Aan de hand van de maatgevende faalmechanismen, de bodemopbouw, de (werk)ruimte aan de binnenzijde en het stabiliteitstekort van het betreffende traject kan worden vastgesteld of de *JLD-Dijkstabilisator* een passende versterkingsmaatregel is.

Faalmechanismen

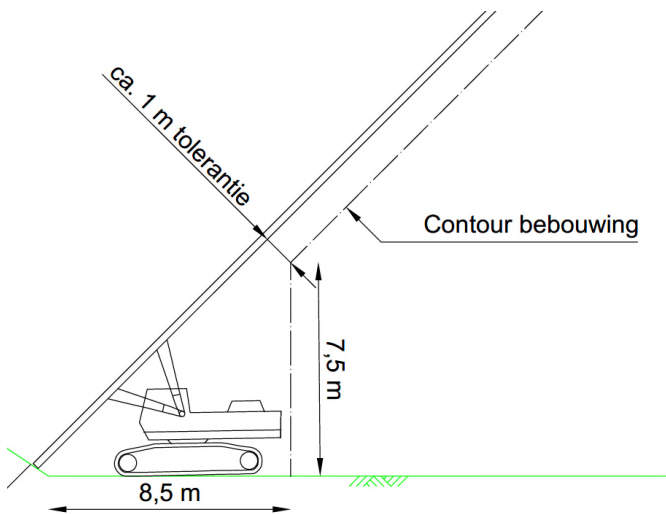
Dijktrajecten die zijn afgekeurd op macrostabiliteit kunnen worden verbeterd met de *JLD-Dijkstabilisator*. Tevens kan de *JLD-Dijkstabilisator* een hoogtetekort met minder ruimtebeslag oplossen. Indien een dijktraject ook op andere faalmechanismen is afgekeurd kan een hybride oplossing met de *JLD-Dijkstabilisator* mogelijk oplossing bieden.

Bodemopbouw

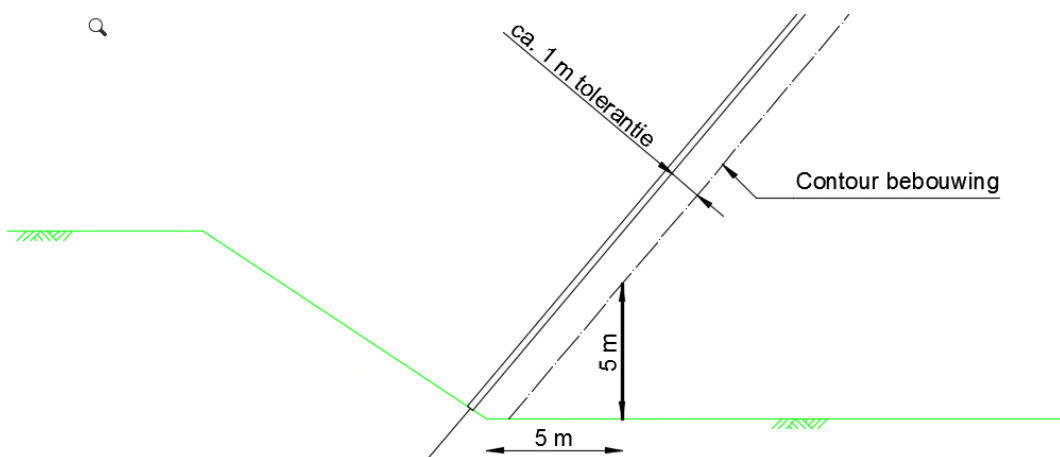
De diepte van de (Pleistocene) zandlaag ten opzichte van de mogelijke plaatsingslocaties van de *JLD-Dijkstabilisator* kan bepalend zijn voor de haalbaarheid van de versterkingsmethode. De afstand tussen de locatie waar de kopplaat van de JLD-Dijkstabilisator en de zandlaag waar het klapanker in kan worden vastgezet, mag niet te groot zijn. De kopplaat van de JLD-Dijkstabilisator wordt iets onder maaiveld aangebracht. Het klapanker moet twee meter in een vastgepakte (Pleistocene) zandlaag worden verankerd, in verband met het openklappen van het klapanker, en dient daarnaast voldoende dekking te hebben boven het klapanker om voldoende draagkracht te genereren. Het huidige standaard materieel heeft een drijfstang met een lengte van maximaal 30 m. Bij een te grote diepte van de vastgepakte (Pleistocene) zandlaag volstaat de huidige lengte van de drijfstang niet en dient het materieel aangepast te worden.

Werkruimte aan de binnenzijde van de dijk

Het materieel waarmee de *JLD-Dijkstabilisator* wordt geplaatst werkt ofwel vanuit de teen van de dijk of vanaf de kruin van de dijk. Het materieel en de plaatsingsmethode vereisen een minimale werkruimte om de *JLD-Dijkstabilisator* op een veilige manier te kunnen plaatsen. In Figuur 3-2 en Figuur 3-3 is het ruimtebeslag van het materieel schematisch weergegeven bij een plaatsingshoek van respectievelijk 45° en 50° waarbij gewerkt wordt vanaf de teen. De minimaal benodigde werkruimte is ca. 8,5 meter bij een plaatsingshoek van 45°. De hoogte van de bebouwing kan dan 7,5 meter zijn. Bij het plaatsen van de *JLD-Dijkstabilisator* vanuit de teen van de dijk zijn de plaatsingshoek, de werkruimte van het materieel (8,5 meter) en de afstand tot en de hoogte van de bebouwing bepalend.



Figuur 3-2: Ruimtebeslag materieel - werkend vanuit de teen van de dijk, bij een plaatsingshoek van 45 graden



Figuur 3-3: Ruimtebeslag materieel - werkend vanaf de kruin van de dijk, bij een plaatsingshoek van 50 graden

Wanneer de JLD-Dijkstabilisator vanaf de kruin van de dijk wordt geplaatst is er in de teen geen ruimte benodigd voor het materieel, dit leidt tot een reductie van het ruimtebeslag. Bij plaatsen van de JLD-Dijkstabilisator vanaf de kruin van de dijk is de plaatsingshoek van de JLD-Dijkstabilisator bepalend samen met de afstand tot en de hoogte van de bebouwing.

Stabiliteitstekort

Met de JLD-Dijkstabilisator kan een stabiliteitstekort tot maximaal circa 30% (incl. de eventueel te realiseren dijkverhoging) worden opgelost. De grootte van het stabiliteitstekort dat opgelost kan worden is afhankelijk van de ligging en grootte van het glijvlak. Het oplossen van een stabiliteitstekort met grootte en diepe glijvlakken vraagt een grotere toename van het weerstand biedend moment. Bij grootte en diepe glijvlakken neemt het stabiliteitstekort, dat kan worden opgelost met de JLD-Dijkstabilisator, dus af.

Wanneer het stabiliteitstekort te groot is om opgelost te worden met de JLD-Dijkstabilisator dan kan de JLD-Dijkstabilisator worden gecombineerd met andere dijkversterkingsmaatregelen om tot een ruimtebesparing te komen.

Tot slot dient in het schetsontwerp rekening gehouden te worden met de toegankelijkheid van het binnentalud en de locaties waar de kopplaten worden geplaatst. De voorspanning die in het systeem van de *JLD-Dijkstabilisator* wordt aangebracht dient gedurende de levensduur enkele malen opnieuw aangebracht te worden tot het initiële niveau. De voorspanning neemt geleidelijk af door kruip van de ondergrond.

3.2 Voorlopig ontwerp (VO)

In het voorontwerp worden de eerste berekeningen uitgevoerd voor het ontwerp van de dijkversterking met de *JLD-Dijkstabilisator*. Bij het ontwerp wordt er gewerkt van grof naar fijn. In deze fase van het ontwerp dienen de zaken bekeken te worden waar de grootste onzekerheid in zit en die bepalend zijn voor het ontwerp. Het voorontwerp van een dijkversterking met de *JLD-Dijkstabilisator* bestaat uit de volgende stappen:

- Analytische berekeningen:
 - bepaling voorspanning, plaatsing op het talud en plaatsingshoek *JLD-Dijkstabilisator*;
 - draagkracht grond onder de kopplaat.
- Plaxis 2D modellen:
 - toetsen constructieve elementen;
 - bepalen geotechnische stabiliteit;
 - draagkracht grond onder de kopplaat.

Voor een gedetailleerde beschrijving van de analytische berekeningen en de PLAXIS 2D modellen wordt verwezen naar de PPV, paragraaf 6.5.1 en paragraaf 6.5.2.

3.3 Definitief ontwerp (DO)

In het definitief ontwerp dienen alle details te zijn bepaald en alle aspecten van het ontwerp van de dijkversterking met de *JLD-Dijkstabilisator* te zijn doorlopen. Het definitief ontwerp van een dijkversterking met de *JLD-Dijkstabilisator* bestaat uit de volgende stappen:

- Ontwerpstappen uit het VO met een update van eventuele aanvullende (grond)onderzoeken;
- Plaxis 2D model vervormingen/tijdseffecten;
- Plaxis 3D modellen:
 - 3D slice model;
 - 3D detailmodel kopplaat.
- Toetsen deelfaalmechanismen;
- Uitvoeringstoleranties;
- Ankeruitval;
- Overgangsconstructies (zie § 4.4.6 van PPV).

Voor een gedetailleerde beschrijving wordt verwezen naar de PPV, §4.4.6 en §6.6.1 tot en met §6.6.4.

3.3.1 Toe te passen ontwerpmodellen

Voor definitieve ontwerpen dienen de in 2D-Eindige elementen software berekende vervormingen, spanningen, krachten en momenten geverifieerd te worden met 3D eindige-

elementen software, conform de aanwijzingen in hoofdstuk 4, 5 en 6 van het PPV, met doorverwijzingen naar de PPE (POV-M Rekentechnieken, 2018). De daarmee berekende resultaten maken een complete controle mogelijk voor geotechnisch falen, constructief falen en van grond-constructie interactie. De voorgeschreven rekenprocedure zorgt ervoor dat er per te controleren deelfaalmechanisme voldoende conservatieve keuzes worden gemaakt. Dit heeft betrekking op de in rekening te brengen stijfheden en sterktes van de grond en de constructie. De in de PPE voorgeschreven constitutieve modellen zorgen ervoor dat er rekening wordt gehouden met de schuifrekafhankelijke ongedraineerde sterkteopbouw van de grond, waarmee *'strain compatibility'* automatisch gewaarborgd is.

Het aanvullend controleren op het negatieve effect van een tot in het zand doorlopende *JLD-Dijkstabilisator* op piping en heave moet plaatsvinden door het toepassen van de standaard WBI beoordelingsprocedure in het geval van hydraulische kortsluiting.

3.3.2 Controles ontwerpfase

Tabel 3-1 geeft een samenvatting van de binnen een vernagelingsontwerp uit te voeren specifieke controles. De controles zijn aanvullend op de standaard controles die volgens WBI moeten worden uitgevoerd voor de verschillende hoofdfaalmechanismen.

Tabel 3-1 Samenvatting van de binnen het ontwerp uit te voeren specifieke controles voor vernagelingselement: JLD-Dijkstabilisator

Controles m.b.v. eindige-elementenberekeningen	Eisen
Controles op basis van krachten en momenten in constructieve elementen bij hoogwater en verkeersbelasting.	De krachten en momenten moeten worden bepaald bij WBN (Waterstand bij Norm) en verkeersbelasting, met toepassing van de partiële factoren volgens §3.6. van het PPV. De daarop volgende <i>Unity Checks</i> voor verschillende deelmechanismen moeten worden uitgevoerd conform de voorschriften in de hoofdstukken 5 en 6 van het PPV.
Controle op geotechnische stabiliteit bij hoogwater en verkeersbelasting	Geen doorgaande vervormingen door verlies van evenwicht (bezwijkvlakken). Ten opzichte van de controle op krachten en momenten te bepalen door aanvullende toepassing van een partiële factor voor de schematiseringonzekerheid voor geotechnische stabiliteit.
Controle op vervorming door hoogwater en door de daarbij eventueel aan te nemen verkeersbelasting	Maximaal 0,1m kruindaling over een breedte van 3 meter, of over de oorspronkelijke kruinbreedte indien minder dan drie meter. Te bepalen bij WBN en bij lage karakteristieke waarden voor de grondsterkte en de grondstijfheid. Maximaal 0,1m horizontale verschilverplaatsing tussen binnenteen en buitenteen. Bij een controle op maat mogen grotere vervormingen worden toegestaan (Zie daarvoor § 2.3 van de PPE).
Controle op niet aan hoogwater gerelateerde ankeruitval	De verhoogde krachten en momenten bij uitval moeten nog kunnen worden opgenomen. De te verhogen krachten en momenten worden bepaald bij WBN (Waterstand bij Norm) en verkeersbelastingen en bij lage karakteristieke waarden voor de grondsterkte en de grondstijfheid, maar zonder model- en schematiseringsfactor. Zie § 3.6 van het PPV.
Controle Piping/Heave	Eisen
Controle effect hydraulische kortsluiting op piping en heave	Langs de JLD-Dijkstabilisator mag geen piping of heave optreden of een dusdanige kwel dat dit tot falen van de constructie leidt.
Controle Overslag	Eisen
Controle erosiebestendigheid grasmat in relatie tot ligging kopplaat	De gronddekking van de kopplaat is minimaal 0,3 m incl. de graszode. Zie § 4.4.2 van het PPV

3.4 Uitvoeringsontwerp (UO)

In het uitvoeringsontwerp zal het definitief ontwerp van de *JLD-Dijkstabilisator* op enkele locaties nog verder gedetailleerd en specifieker gemaakt moeten worden. Gedacht kan worden aan obstakels en/of belendingen waardoor lokaal de beschikbare ruimte voor het materieel of voor de constructie wordt beperkt. Oplossingen kunnen worden verkregen door het stramien daar lokaal aan te passen door bijvoorbeeld de afstanden tussen de *JLD-Dijkstabilisatoren* in horizontale of verticale richting bij te stellen of een afwijkende plaatsingshoek toe te passen. Indien nodig dienen lokaal enkele extra *JLD-Dijkstabilisatoren* geplaatst te worden.

Het uitvoeringsontwerp zal, naast het definitieve ontwerp met eventuele aanpassingen/optimalisaties ook ingaan op de wijze van uitvoeren en de aspecten die daarbij aan de orde zijn. Voor een verdere beschrijving wordt verwezen naar §4.6.2.

3.5 Ongedraineerd & Gedraineerd ontwerpen

Er zijn een aantal verschillen tussen ongedraineerd en gedraineerd ontwerpen. Voor primaire waterkeringen wordt een ongedraineerd ontwerp toegepast. Voor regionale waterkeringen is dit niet het geval en wordt een gedraineerd ontwerp toegepast.

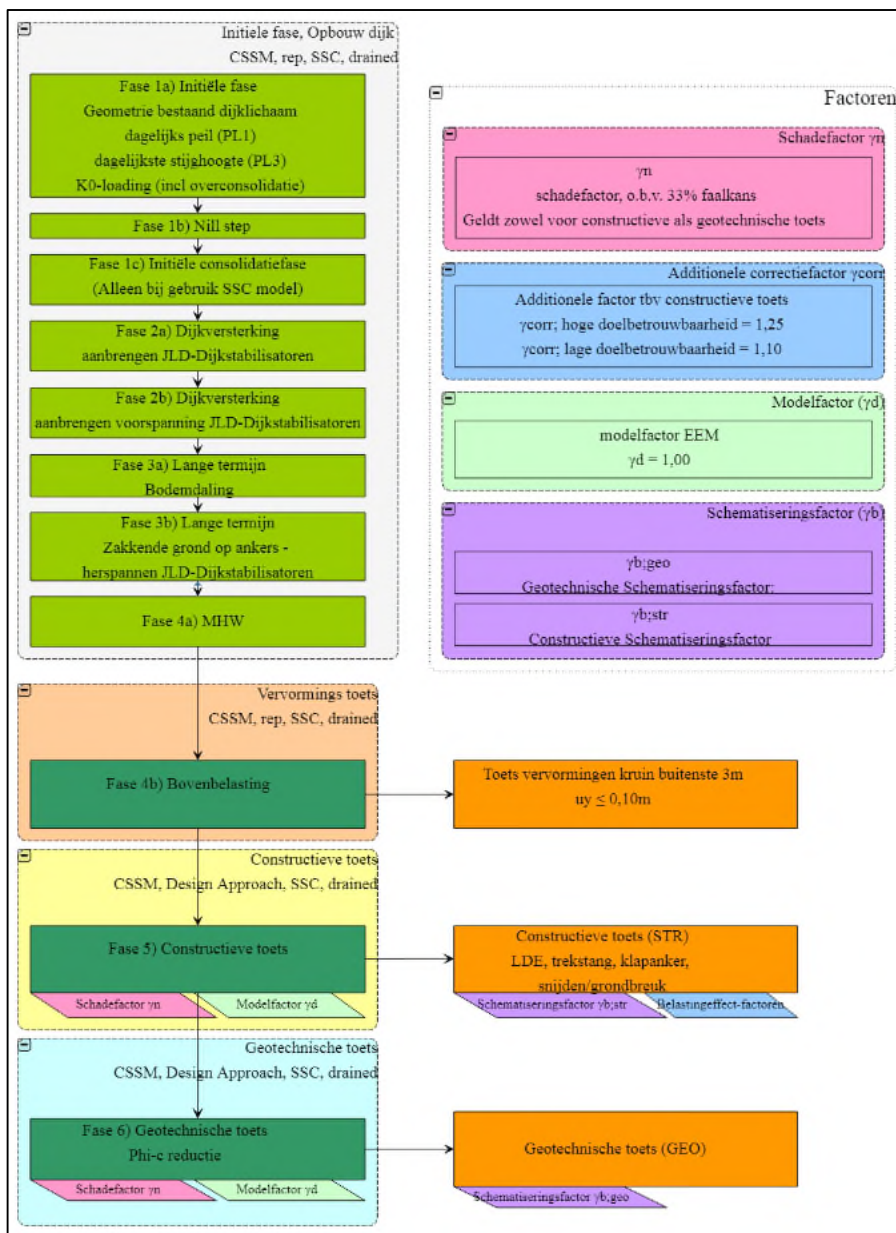
Het rekenvoorbeeld (POV-M Rekentechnieken, 2018) is geschreven voor toepassing bij primaire keringen. De fasering is weergegeven in Figuur 3-5. Omdat de dijkverbetering bij Watergraafsmeer een regionale betreft, zijn er enkele wijzigingen in de schematisatie en modellering benodigd. Voor primaire keringen is de overstap gemaakt naar ongedraineerd rekenen. Bij regionale keringen is deze overstap nog niet gemaakt en wordt de stabiliteit bepaald in gedraineerde omstandigheden. In de fasering die wordt gebruikt om de stabiliteit van de waterkering te bepalen en de snedekrachten in de constructie is daarom de overstap van gedraineerd naar ongedraineerd rekenen, die is opgenomen in de aanpak van ontwerp in EEM omgeving (POV-M Rekentechnieken, 2018), weggelaten. Deze stap wordt ten behoeve van het onderzoek in een later stadium uitgevoerd. Buiten deze wijziging is dezelfde fasering gehanteerd.

De verschillen met betrekking tot de rekenstappen is ook zichtbaar in Figuur 3-4 en Figuur 3-5. In Figuur 3-4 is de fasering weergegeven voor regionale keringen en Figuur 3-5 toont de fasering van primaire keringen. Hierin is zichtbaar dat de initiële fase gelijk is voor gedraineerd en ongedraineerd ontwerpen. Echter de vervormingstoets, de constructieve toets en geotechnische toets dienen gedraineerd uitgevoerd te worden voor een regionale kering en ongedraineerd voor een primaire kering.

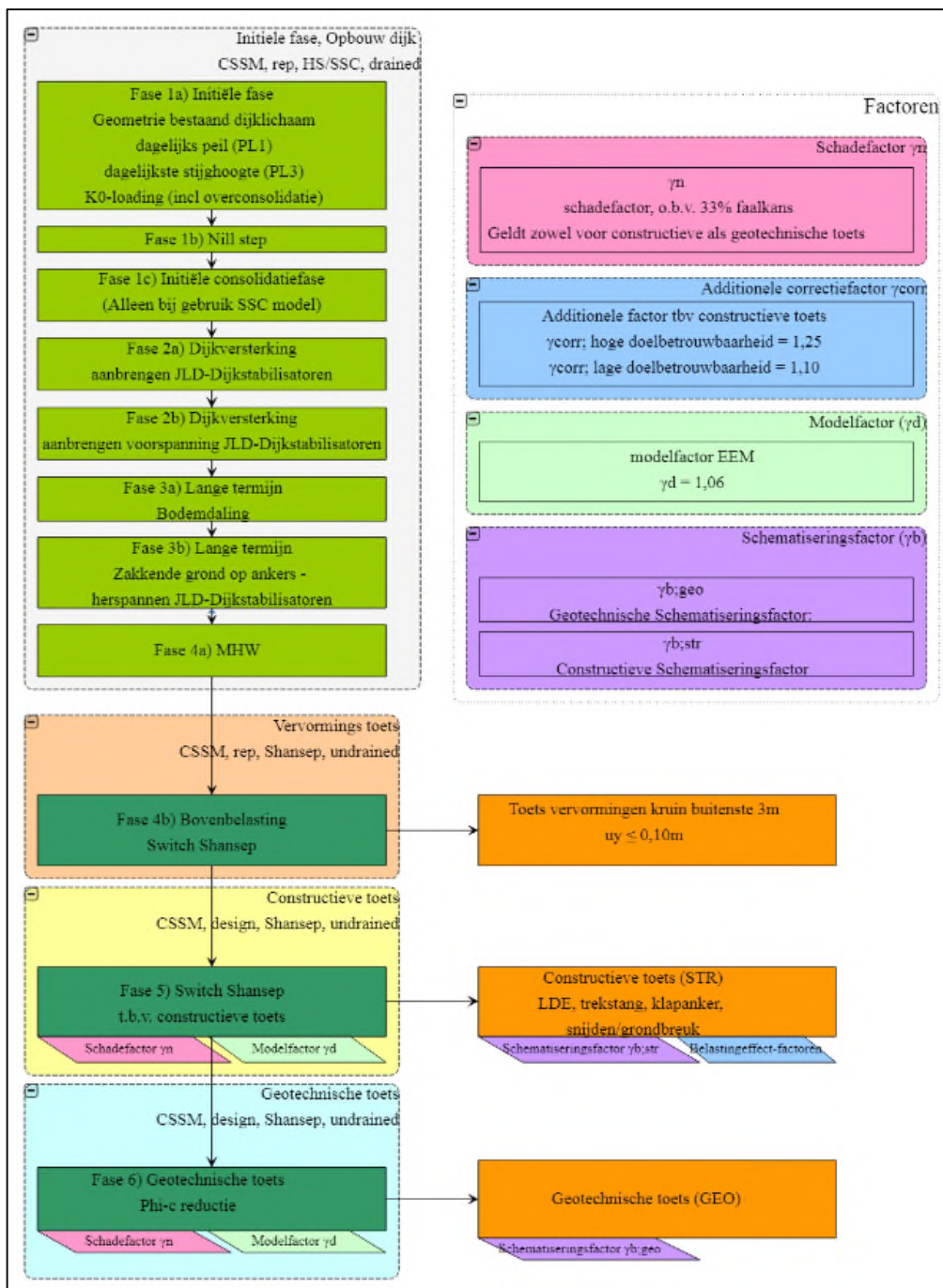
Voor een gedetailleerdere beschrijving wordt verwezen naar het PPE en PPV voor primaire waterkeringen (ongedraineerd ontwerp) en het DO van de Ringdijk Watergraafsmeer voor regionale waterkeringen (gedraineerd ontwerp).

Daarnaast is er een verschil tussen niet-associatieve en associatieve plasticiteit. De huidige leidraad voor regionale keringen (LTVRW) [3] en de veiligheidsfilosofie die hier onderdeel van is, zijn geïkt op associatieve grondparameters, $\phi' = \psi'$. Het is sinds enige tijd mogelijk om niet-associatief $\phi' \neq \psi'$ te rekenen in D-Geo Stability. Dit wordt echter alleen toegepast voor primaire keringen omdat de veiligheidsbenadering voor primaire keringen daarop gebaseerd is.

Voor berekeningen in Plaxis is aangesloten bij de richtlijnen uit het rapport POVM Rekentechnieken – EEM toepassing binnen het ontwerp (POV-M Rekentechnieken, 2018). Hierin is opgenomen dat voor het materiaalmodel Soft Soil Creep (SSC) uitgegaan dient te worden van niet-associatief gedrag. Bij het SSC model kan alleen een constante dilatatiehoek ψ worden gespecificeerd, die bij een critical state beschrijving ook gelijk aan nul moet worden gekozen. Om het Plaxismodel te valideren, worden er in D-Geo Stability aanvullende niet-associatieve berekening uitgevoerd.



Figuur 3-4: Fasering model stabiliteit en snedekrachten JLD-Dijkstabilisator in een regionale kering (Antea Group, 31-01-2019)



Figuur 3-5: Fasering model stabiliteit en snedekrachten JLD-Dijkstabilisator in een primaire kering (POV-M Rekentechnieken, 2018)

4 Veiligheid

In dit hoofdstuk is antwoord gegeven op deelvraag 2: ‘Hoeveel veiligheid voegt de JLD-Dijkstabilisator toe aan de veiligheid van de dijk bij toepassing van de veiligheidsbenadering?’

De toegevoegde waarde van de JLD-Dijkstabilisator is afhankelijk van twee factoren, namelijk de totale geotechnische stabiliteit en de constructieve sterkte van het systeem. Beide aspecten zijn in een sterkte- en snedekrachten model getoetst. Hierin is rekening gehouden met de planperiode van 100 jaar. Dit betekent dat tijdgebonden effecten, zoals degradatie van materialen en de zetting van de bodem, mee zijn genomen in de analyses.

De maximale geotechnische stabiliteit is beoordeeld aan de hand van een safety analyse in Plaxis 2D en 3D. In deze analyse is onderzoek gedaan naar het maatgevende glijvlak van de dijk na de versterking met de JLD-Dijkstabilisator. Hieruit volgt dat het glijvlak boven de JLD-Dijkstabilisator maatgevend is voor de Ringdijk in Watergraafsmeer. Het is project specifiek welk glijvlak maatgevend is en bovengenoemde resultaat geldt in dit geval alleen voor de Ringdijk Watergraafsmeer.

De te behalen stabiliteit is afhankelijk van de constructieve sterkte van het systeem. De optredende constructieve krachten zijn in een constructieve toets beoordeeld. Hier is bepaald bij welke kracht het eerste constructieve onderdeel bezwijkt. Vervolgens is de stabiliteit van de waterkering bepaald, gegeven de maximale kracht die het systeem op kan nemen. De maatgevende constructieve onderdelen zijn in het project te Watergraafsmeer de grond onder de kopplaat en de sterkte van het LDE. Deze factoren zijn maatgevend ten opzichte van de geotechnische stabiliteit.

In het PPV is een tekstuele vergelijking opgesteld tussen traditionele grondversterkingstechnieken en vernagelingstechnieken. Het beeld is dat grondoplossingen in theorie oneindig sterk gemaakt kunnen worden (de navenante toename in bijvoorbeeld het ruimtebeslag en de kosten daargelaten). Terwijl vernagelingstechnieken een bovengrens hebben van de toegevoegde sterkte. Op basis van de casussen Markermeerdijken en Watergraafsmeer blijkt dat vernagelingstechnieken de weerstand tegen afschuiven maximaal met ca. 10% tot 30% kunnen verhogen.

In het project van de Ringdijk Watergraafsmeer varieert de werkelijk toegevoegde stabiliteit zelfs tussen de 11% en de 43%. Uit de resultaten is geconcludeerd dat het systeem zorgt voor een grote toename van de stabiliteit. Daardoor is de stabiliteit van de Ringdijk te Watergraafsmeer voor de komende 100 jaar gegarandeerd. De maximaal toegevoegde stabiliteit is bij het project te Watergraafsmeer gelimiteerd door de constructieve capaciteit van de elementen van de JLD-Dijkstabilisator. In het kader van de ontwikkeling van het systeem is het waardevol om te kijken naar de maximale potentie van het systeem.

5 Procedure constructieve toets

In dit hoofdstuk is antwoord gegeven op deelvraag 3: ‘Welke procedure is nodig om de constructieve toets uit te voeren?’

De constructieve toets bestaat uit een toets op verschillende deelfaalmechanismen (POV-Macrostabiliteit, dec 2018). De deelfaalmechanismen die onder de constructieve toets vallen zijn in Tabel 5-1 weergegeven.

Tabel 5-1 Deelfaalmechanismen JLD-Dijkstabilisator

Constructief falen (STR)	Codering
Constructief bezwijken LDE door combinatie dwarskracht en normaalkracht	STR1
Constructief bezwijken LDE door combinatie buigend moment en normaalkracht	STR2
Constructief bezwijken trekstang door combinatie dwarskracht en normaalkracht	STR3
Constructief bezwijken trekstang door combinatie buigend moment en normaalkracht	STR4
Constructief bezwijken kopplaat (incl. verbinding)	STR5
Constructief bezwijken klapanker (incl. verbinding)	STR6
Grond-constructie interactie (SSI)	Codering
Snijden van de grond tussen de JLD-Dijkstabilisatoren	SSI1
Bezwijken houdkracht klapanker (draagkracht grond boven klapanker)	SSI2
Bezwijken grond onder de kopplaat	SSI3

In het PPV is per deelfaalmechanisme beschreven wat de deelfaalmechanisme inhouden en hoe deze getoetst dienen te worden. Tevens is hierin beschreven hoe de partiële factoren toegepast dienen te worden. De partiële factoren zijn beschreven in paragraaf 6.2 en de deelfaalmechanismen zijn beschreven in paragraaf 6.3.

Op basis van een beperkt aantal cases waarvoor een ontwerp is opgesteld met de JLD-Dijkstabilisator is gebleken dat constructief bezwijken LDE door combinatie buigend moment en normaalkracht (STR2) en Bezwijken grond onder de kopplaat (SSI3) doorgaans maatgevend zijn.

6 Procedure ankeruitval

In dit hoofdstuk is antwoord gegeven op deelvraag 4: 'Welke procedure is nodig om het effect van ankeruitval te kwantificeren?'

Het is mogelijk dat er door een niet hoogwater gerelateerde calamiteit een anker uitvalt. Een oorzaak kan bijvoorbeeld zijn: graafwerkzaamheden die de kopplaat beschadigen of een gestuurde boring die het LDE raakt. In overeenstemming met de PVV, is de kans dat een maatgevend hoogwater optreedt gedurende het falen van een anker als gevolg van de hierboven beschreven oorzaken dusdanig klein, dat dit buiten beschouwing gelaten is.

In het DO dient te worden getoetst op ankeruitval. Er dient een toets uitgevoerd te worden op de deelfaalmechanismen met de snedekrachten die zijn bepaald bij lage karakteristieke waarden van de sterkte en stijfheid van de grond. Er wordt geen schematiserings- en modelfactor toegepast. Dus hierbij is het uitgangspunt dat ankeruitval een bijzondere belastingsituatie is, waarbij alle materiaal-, model en schematiseringsfactoren gelijk aan 1,0 zijn gesteld. De snedekrachten kunnen uit fase 4b van de *PLAXIS* modellering worden gehaald (zie Figuur 3-4 en Figuur 3-5). De snedekrachten dienen vervolgens vermenigvuldigd te worden met de belastingeffect-factor voor ankeruitval ($\gamma_{\text{add,uitval}} = 1,30$) en als ingang gebruikt te worden voor de toetsing van de deelfaalmechanismen. Door het verhogen van de belastingeffect-factor wordt de kracht van het missende anker voor 30% op de direct naastgelegen ankers afgedragen, terwijl de overige kracht over de daarnaast gelegen ankers verdeeld wordt. De modificatie- en groepseffect-factoren zijn in de berekening met ankeruitval wél meegenomen, omdat deze geen onzekerheden in de materialen en belastingen verdisconteren.

Indien de combinatie van de snedekrachten bij karakteristieke waarden van de sterkte en stijfheid van de grond en de belastingeffect-factor voor ankeruitval lager is dan de ingangswaarden van de standaard toetsing van de deelfaalmechanismen, dan kan worden afgezien van de toetsing op ankeruitval.

7 Effecten puin

In dit hoofdstuk is antwoord gegeven op deelvraag 5: 'Wat is het effect van puin in de ondergrond op de ontwerpbaarheid van de JLD-Dijkstabilisator?'

Indien de JLD-Dijkstabilisator op puin stuit, kan de JLD-Dijkstabilisator binnen de uitvoeringstoleranties op een andere locatie geplaatst worden of met een andere plaatsingshoek.

In het DO dient gecontroleerd te worden welke uitvoeringstoleranties kunnen worden toegestaan zonder dat deze leiden tot een hogere faalkans van de, met *JLD-Dijkstabilisatoren* versterkte, waterkering. Het gaat hierbij niet om uitvoeringstoleranties die tot stand komen door plaatsingsonzekerheden veroorzaakt door het materieel (die zijn beschreven in § 4.6.1 van het PPV) maar om afwijkingen van het ontwerp en stramien door afwijkingen in de lokale omstandigheden (bijvoorbeeld de aanwezigheid van puin). Bij de controle van toegestane uitvoeringstoleranties kan worden gedacht aan de plaatsingshoek van de *JLD-Dijkstabilisatoren* of variaties in h.o.h. afstand.

Indien afwijkingen bij de uitvoering buiten de vastgestelde toleranties vallen, bijvoorbeeld doordat er veelvuldig puin is verwerkt in het binnentalud van de kering, dan dient het ontwerp herzien te worden en hierop worden aangepast. De uitvoeringstoleranties kunnen niet universeel worden afgeleid voor een met *JLD-Dijkstabilisator* versterkte waterkering omdat deze aanpak vraagt om maatwerkoplossingen en project specifiek is.

Ter voorbeeld geldt voor de Ringdijk te Watergraafsmeer een uitvoeringstolerantie van 5° ten opzichte van de plaatsingshoek van 55°. Het blijkt uit de resultaten dat het geotechnische veiligheidsverschil tussen de +1% en -2% blijft indien de JLD-Dijkstabilisator wordt ingebracht tussen respectievelijk 50° en 60°. Deze verschillen vallen binnen de marge. Indien de uiteindelijke hoek van inbrengen steiler dan 60° of flauwer dan 50° is, moet de situatie opnieuw worden berekend.

Daarnaast is onderzocht of een onderbreking van het stramien leidt tot significant negatief effect op de veiligheid. Voor de Ringdijk is een onderbreking in het stramien van 2 meter in een enkele rij en 3 meter in de 2^e rij onderzocht, tevens is een gevoeligheidsanalyse opgesteld. Uit de analyse volgt dat de behaalde veiligheid bij de afwijkingen hoger is dan de benodigde veiligheid. Bovenstaande gegevens zijn project specifiek en daarom kunnen de uitvoeringstoleranties niet universeel afgeleid worden.

8 Onderzoeksvragen

In dit hoofdstuk is antwoord gegeven op deelvraag 6: ‘Welke plek krijgen de resultaten van onderzoeksvraag 2 t/m 16 en 18 in de ontwerpmethode?’

Deze deelvraag is beantwoord door het analyseren van de conclusies van de onderzoeksvragen. Gemeten data die van toepassing is op de Ringdijk is project specifiek, conclusies die hieraan verbonden zijn hoeven niet te gelden voor een ontwerp van de JLD-Dijkstabilisator op een andere waterkering. Daarom is de gemeten data uit de conclusies gefilterd en indien dit beschreven is ter voorbeeld opgenomen. De aspecten die invloed hebben op het ontwerp of de manier waarop het ontwerp tot stand komt zijn per onderzoeksvraag opgenomen in onderstaande paragrafen.

8.1 Onderzoeksvraag 2: Veiligheidsbenadering van constructieve elementen

Onderzoeksvraag 2: *‘Hoe moet de veiligheidsbenadering van constructieve elementen verdisconteert worden in de veiligheidsbenadering van de JLD-Dijkstabilisator?’.*

In het Basisrapport Eindige-elementenmethode zijn kaders opgesteld voor de veiligheidsbenadering van constructieve elementen. Voor de JLD-Dijkstabilisator is bij deze kaders aangesloten. Dit betreft een werkwijze om te komen tot een veiligheid voor zowel geotechnische bezwijkmechanismen als voor constructieve bezwijkmechanismen.

De gewenste doelbetrouwbaarheid van het bezwijken van de constructieve elementen is hoger dan van het geotechnisch bezwijken en tevens is een ‘ductiel ontwerp’ gewenst, waarin eerst de grond bezwijkt voordat de constructieve elementen bezwijken. Om deze doelen te bereiken wordt de gewenste extra veiligheid verdisconteerd door het gebruik van belastingeffect-factoren. De te hanteren belastingeffect-factoren voor de JLD-Dijkstabilisator zijn gekozen in lijn met het Basisrapport Eindige-elementenmethode (Deltares i.o.v. POV-M, 2018) en de CUR 166 (SBRCUR, 2012). De belastingeffect-factoren zijn tevens weergegeven in de rapportage van onderzoeksvraag 2 in Tabel 2-1.

Door het hanteren van de werkwijze beschreven in de rapportage van onderzoeksvraag 2, zijn (verschillen in) referentieperioden geen onderdeel meer van de veiligheidsbenadering. Daardoor is overstappen van referentieperiode van 10 jaar naar jaarkansen in veiligheidsfilosofie niet meer aan de orde en is de onderzoeksvraag beantwoord.

8.2 Onderzoeksvraag 3: Bezwijken talud boven de kopplaat

Onderzoeksvraag 3: *‘Hoe moet het bezwijken van het talud boven de kopplaat meegenomen worden in de veiligheidsbenadering van de JLD-Dijkstabilisator?’*

Het bezwijken van het talud boven de kopplaat is in de veiligheidsbenadering opgenomen onder het deelfaalmechanisme ‘geotechnisch bezwijken buiten de vernagelingstechniek’ (GEO2). Dit deelfaalmechanisme wordt getoetst door ofwel een veiligheidsanalyse uit te voeren in een analytisch glijvlakmodel als D-Geo Stability, waarbij de JLD-Dijkstabilisator is geschematiseerd als een forbidden line, ofwel door het uitvoeren van een safety analyse in PLAXIS. Deze methode is opgenomen in de PPV (POV-M, 2018).

8.3 Onderzoeksvraag 4: Wrijvingskracht LDE in venige grond

Onderzoeksvraag 4: 'Wat is de interactie kracht (schuifkracht) langs het LDE element in venige grond?'

De hypothese was dat de relatie tussen de sondeerweerstand en de wrijving langs het LDE in venige ondergrond gelijk is aan de relatie in kleiige ondergrond. Om de hypothese te testen zijn praktijkproeven uitgevoerd in een venige ondergrond te Broek in Waterland. Uit de viertal proeven volgt dat de wrijving in veen twee maal groter is dan voorspeld. Er zijn slechts vier proeven uitgevoerd, waardoor het nog niet mogelijk is om de relatie te optimaliseren voor venige ondergrond. De conclusie van het onderzoek is: De wrijving in venige ondergrond is gelijk aan of groter dan de wrijving in kleiige ondergrond (op basis van een gelijke sondeerwaarde). Wanneer een lage wrijving maatgevend is, kan deze middels onderstaande vergelijking voorspeld worden.

$$F [kN] = 0,009 * O [m^2] * (q_{c,gem} [Mpa] + 0,10)$$

Wanneer een hoge wrijving maatgevend is (bijvoorbeeld voor het inbrengen van het LDE), kan deze berekend worden met de parameters beschreven in paragraaf 6.5 van de rapportage van onderzoeksvraag 4. Meer informatie over de wrijving langs het LDE is in hoofdstuk 9 opgenomen.

8.4 Onderzoeksvraag 5: Stabiliteit en sterkte van de grond onder de kopplaat

Onderzoeksvraag 5 is uitgesplitst in twee deelvragen.

- Deelvraag 1: Berekenen van draagkracht van de grond onder de kopplaat op een talud
- Deelvraag 2: Berekenen stabiliteit van de kopplaat als enkel element of als strokenfundering.

De ontwerpmethodiek van deelvraag 1 is in de PPV beschreven en behoeft geen wijzigingen. Deelvraag 2 is niet volledig in de PPV opgenomen en bevat een aanvulling. In de PPV is niet opgenomen wanneer bij de analytische rekenmethode de draagkracht als poer of als strokenfundering berekend dient te worden. Dit is in onderzoeksvraag 5 wel uitgezocht. Hieronder is de conclusie van deelvraag 2 opgenomen. De onderzoeksrapportage bevat geen wijzigingen.

Deelvraag 2: Berekenen stabiliteit van de kopplaat als enkel element of als strokenfundering.

In het ontwerp van een dijkversterking met de JLD-Dijkstabilisator kan er gekozen worden voor verschillende h.o.h. afstanden. Bij een grote h.o.h. afstand beïnvloeden de kopplaten elkaar niet. Bij een kleine h.o.h. afstand is de onderlinge invloed maximaal.

Om de draagkracht per kopplaat te bepalen, afhankelijk van de onderlinge h.o.h. afstand, zijn er berekeningen conform de NEN9997-1, Plaxis 2D en Plaxis 3D uitgevoerd. Hieruit volgt:

- Bij een h.o.h. afstand gelijk aan de kopplaatbreedte is de draagkracht per kopplaat minimaal. De draagkracht komt overeen met een strookfundering.
- Bij een toenemende h.o.h. afstand (groter dan 1 keer en kleiner dan 2 keer de kopplaatbreedte) neemt de draagkracht toe.
- Bij een h.o.h. afstand groter dan twee maal de kopplaatbreedte is de draagkracht maximaal. De draagkracht is vergelijkbaar met een poerfundering;

Er zijn berekeningen uitgevoerd in Plaxis 3D ten behoeve van bovenstaande. Daaruit blijkt dat de draagkracht per kopplaat bij h.o.h. 2 m met ruim een derde toeneemt ten opzichte van h.o.h. 1 m. Deze toename past binnen het beeld van de draagkracht zoals de methode in NEN9997-1 die schetst. Bij grotere h.o.h. afstanden neemt de draagkracht (per kopplaat) verder toe tot een zekere evenwichtswaarde. Deze toename lijkt positiever dan NEN9997-1 voorspelt, maar is meer in lijn met de draagkracht van legankers.

Er is een ontwerpwijze opgesteld voor het berekenen van de draagkracht van de grond onder de kopplaat bij een enkel element of als strokenfundering. Bij h.o.h. afstanden tot 2 maal de breedte van de kopplaat werkt de kracht op de kopplaat als een strookbelasting. Bij grotere h.o.h. afstanden is locatie specifiek gedetailleerd model onderzoek vereist.

Tijdens de technische commissie van 22 februari 2019 werd de vraag gesteld of er falen kan optreden in de lengterichting van de dijk. Deze vraag is beantwoord in hoofdstuk 5 van de rapportage van de onderzoeksvraag 5. Uit de berekeningen blijkt dat de draagkracht in dwarsrichting van de dijk (het talud op) meer maatgevend is dan de draagkracht in lengterichting van de dijk (tussen de kopplaten). De maatgevende bezwijkrichting is in alle gevallen in de dwarsrichting van de dijk.

8.5 Onderzoeksvraag 6: Groepseffect JLD-Dijkstabilisator

Onderzoeksvraag 6: *‘Wat zijn de groepseffecten wanneer JLD-Dijkstabilisatoren dicht op elkaar staan?’.*

De JLD-Dijkstabilisatoren worden op korte afstand van elkaar geplaatst. Hierdoor beïnvloeden de JLD-Dijkstabilisatoren elkaar. In deze onderzoeksvraag is, per element waaruit de JLD-Dijkstabilisator is opgebouwd, onderzocht wat de onderlinge beïnvloeding is, ofwel het groepseffect. Het groepseffect kan leiden tot een reductie van de sterkte waar rekening mee gehouden dient te worden in het ontwerp.

De onderzoeksvraag is onderverdeeld in vier deelvragen. De volgende deelvragen zijn benoemd:

1. Vanaf welke afstand treedt er onderlinge beïnvloeding op en hoe groot is deze beïnvloeding?
2. Wat is het groepseffect van de kopplaten?
3. Wat is het groepseffect van de LDE elementen?
4. Wat is het groepseffect van de klapankers?

Voor de beantwoording van deze vragen zijn twee methoden gebruikt. Ten eerste is op basis van een literatuurstudie een analytische methode bepaald waarmee het groepseffect en dus de reductie van de sterkte kan worden berekend. Ten tweede is het groepseffect middels een Eindige Elementen Model (EEM), PLAXIS 2D en/of PLAXIS 3D, bepaald.

Vanaf welke afstand treedt er onderlinge beïnvloeding op? (deelvraag 1)

De groepseffecten leiden, door onderlinge beïnvloeding van de elementen, tot een sterktereductie in de grond. De reductie door de groepseffecten is afhankelijk van de dimensies van de elementen en van de afstanden die de elementen tot elkaar hebben in het ontwerp. De reductie is dus geen vaste waarde. In Tabel 8-1, Tabel 8-2 en Tabel 8-3 is per element en per richting in de tweede kolom aangegeven tot welke afstand er groepseffecten zijn en hoe de groepseffecten meegenomen dienen te worden in het ontwerp.

Wat is het groepseffect? (deelvragen 2, 3 en 4)

Uit de analytische berekeningen en de PLAXIS berekeningen volgt dat de groepseffecten op de elementen van de JLD-Dijkstabilisator relatief groot kunnen zijn. Het maximale groepseffect is per onderdeel en per deelvraag opgenomen in respectievelijk Tabel 8-1, Tabel 8-2 en Tabel 8-3.

Tabel 8-1 Conclusie groepseffecten **kopplaat** (deelvragen 1 en 2)

Onderdeel	Afstand groepseffect (deelvraag 1)	Methode verdisconteren groepseffect in ontwerp	Maximale reductie door groepseffect ¹
Langsrichting van de dijk	Tot 3D	In het ontwerp dient zowel een analytische berekening uitgevoerd te worden (volgens NEN 9997-1) als een PLAXIS 2D berekening. De maatgevende draagkracht is leidend voor het verdere ontwerp. De reductie voor het groepseffect wordt in de analytische berekening meegenomen door uit te gaan van een strookfundering tot een h.o.h. afstand van 2 meter. Bij h.o.h. afstanden van meer dan 2 meter kan in de analytische berekening worden uitgegaan van een poerfundering. Bij een niet rechtlijnig stramien dient het ontwerp gecontroleerd te worden met PLAXIS 3D berekeningen	Analytisch: 0,80 EEM: 0,57
Dwarsrichting van de dijk	Bij h.o.h. afstand 1,4 meter geen groepseffect	Reductie voor groepseffect wordt meegenomen in het ontwerp door beschouwen draagkracht grond onder de kopplaat in PLAXIS 2D	Analytisch: - EEM: 1,0

1: Bij een h.o.h. afstand van 1 m.

Tabel 8-2 Conclusie groepseffect **LDE** (deelvragen 1 en 3)

Onderdeel	Afstand groepseffect (deelvraag 1)	Methode verdisconteren groepseffect in ontwerp	Maximale reductie door groepseffect ¹
Lateraal	Tot 6D	Reductie voor groepseffect wordt meegenomen in het ontwerp door toepassing van PLAXIS 2D (of 3D), waarin groepseffect van het LDE impliciet wordt meegenomen	Analytisch: 0,75 EEM: -
Axiaal	Tot 1D	De LDE elementen worden, gezien de afmetingen van de kopplaten, altijd op een grotere onderlinge afstand van elkaar geplaatst. Er hoeft in het ontwerp geen rekening te worden gehouden met een groepseffect van het LDE in axiale richting	Analytisch: 1,0 EEM: -

1: Bij een h.o.h. afstand van 1 m.

Tabel 8-3 Conclusie groepseffect **klapanker** (deelvragen 1 en 4)

Onderdeel	Afstand groepseffect (deelvraag 1)	Methode verdisconteren groepseffect in ontwerp	Maximale reductie door groepseffect ¹
Langsrichting van de dijk	Tot 4-8D	Houdkracht klapanker en reductie voor groepseffect op basis van analytische berekeningen.	Analytisch: 0,59 EEM: -
Dwarsrichting van de dijk	-	Houdkracht klapanker en reductie voor groepseffect op basis van analytische berekeningen.	Analytisch: 0,59 EEM: -

1: Bij een h.o.h. afstand van 1 m.

8.6 Onderzoeksvraag 7 & 11: Pipingrisico langs het anker & aanwezige wateroverspanning

Onderzoeksvraag 7 en 11 zijn gecombineerd in één onderzoeksrapportage, het betreft de volgende onderzoeksvragen:

- Onderzoeksvraag 7: Is er een risico op kwel, en daarmee op piping of heave langs het anker door het inbrengen van het anker met de voorloper/drijfstang en hoe groot is dit risico?
- Onderzoeksvraag 11: Kan de wateroverspanning in de zandlaag van de ringdijk Watergraafsmeer leiden tot kwel en daarmee tot piping of heave en kan dit een probleem opleveren voor de uitvoerbaarheid?

Bij het aanbrengen van de JLD-Dijkstabilisator wordt het klapanker met een drijfstang op de juiste diepte geplaatst. Door het terugtrekken van de drijfstang ontstaat een kleine holle ruimte van die gedeeltelijk weer dicht gaat zitten door lokale instortingen. Het aanbrengen van het LDE over de trekstang zorgt er voor dat de holle ruimte grotendeels wordt opgevuld door grondverdringing. Door het LDE, langs het gat voor de trekstang, blijft in principe een kleine holle ruimte over waardoor bij een stijghoogte in de zandlaag die boven de kopplaat uitstijgt mogelijk kwel/piping op kan treden.

Mogelijke maatregelen indien kwel optreedt in uitvoeringsfase is het dichten van het gat dat door het terugtrekken van de drijfstang wordt gemaakt met bijvoorbeeld bentoniet, mikoliet of een andere uithardende of expanderende vloeistof. Dezelfde maatregel kan gehanteerd worden indien blijkt dat kwel door het LDE element optreedt.

Op basis van de praktijkproeven is het aannemelijk dat er geen piping op zal treden langs de JLD-Dijkstabilisator. Er is in de proef in Purmerend één keer enig uittredend water waargenomen en daarom kunnen kwel en piping nog niet op voorhand worden uitgesloten. Daartoe is een toetsspoor opgesteld om te controleren of piping door toedoen van de JLD-Dijkstabilisator geen risico vormt voor de waterveiligheid. Dit toetsspoor is al opgenomen in de vigerende leidraad 'POV-M Publicatie Vernagelingstechnieken' (POV-M, 2018).

Om het ontwerp van de JLD-Dijkstabilisator te controleren op het risico op piping kan het standaard schema gevolgd worden met enkele kleine aanpassingen.

- 1) Controle van de opbouw van de dijk, is er sprake van een zandlaag die wordt afgesloten door een cohesieve laag?

- 2) Is er contact tussen het buitenwater en de watervoerende laag?
- 3) Is er sprake van een uitredepunt:
 - a. Ter plaatse van de JLD-Dijkstabilisator?
 - b. Ter plaatse van het achterland/teensloot
- 4) Controle op heave:
 - a. Ter plaatse van de JLD-Dijkstabilisator, met de bovenkant van het LDE als uitredepunt.
 - b. Ter plaatse van de teensloot of het achterland.
- 5) Controle van terugschrijdende erosie doormiddel van de formule van Sellmeijer.

8.7 Onderzoeksvraag 8: Invloed vervormingen JLD-Dijkstabilisator

Onderzoeksvraag 8: *‘Wat zijn de effecten van vervormingen door kruip en zettingen, veroorzaakt door kruinophogingen gedurende de levensduur, op de werking van de JLD-Dijkstabilisator?’*

Een groene dijk (zonder langsconstructies) is onderhevig aan verschillende soorten vervormingen (zetting, kruip, vervorming door veenoxidatie en zwel en krimp). In een waterkering versterkt met de JLD-Dijkstabilisator komen daar nog vervormingen bij als gevolg van de aangebrachte voorspanning. Daarnaast heeft de stijfheid van de JLD-Dijkstabilisator invloed op de optredende vervormingen.

In deze onderzoeksvraag is onderzocht wat de invloed is van de verschillende typen vervormingen op de JLD-Dijkstabilisator. Daarnaast is er bepaald of de huidige wijze van het modelleren van de stabiliteit van de waterkering en de snedekrachten in het LDE als gevolg van vervormingen voldoende veilig is.

Effecten van kruip, als gevolg van veenoxidatie, op de werking van de JLD-Dijkstabilisator

De invloed van veenoxidatie op de JLD-Dijkstabilisator dient per locatie en situatie beschouwd te worden. Bij de meeste keringen zal de JLD-Dijkstabilisator worden toegepast tussen het binnentalud van de kering en de Pleistocene zandlaag. De grond rond het LDE element bestaat uit dijkmateriaal, vaak kleiig. De diepere lagen zijn mogelijk slapper en bestaan soms uit veen. De venige grondlagen liggen bij de meeste waterkeringen onder de grondwaterstand. Daardoor is maaiveld daling ter plaatse van de JLD-Dijkstabilisator als gevolg van veenoxidatie in de regel niet van toepassing. Veenoxidatie heeft in de meeste gevallen dan ook geen invloed op de krachten die optreden in de JLD-Dijkstabilisator.

In de situaties dat het veen minder diep ligt of de grondwaterstand in droge perioden tot onder de bovenkant van het veenpakket kan komen, zoals ook bij de Watergraafsmeer het geval is, kan veenoxidatie in beperkte mate optreden. Veenoxidatie die optreedt ter plaatse van het LDE element leidt tot een beperkte toename van de dwarskracht en het moment.

Effecten van vervormingen die worden veroorzaakt door kruinophogingen gedurende de levensduur van het ontwerp op de werking van de JLD-Dijkstabilisator

Het effect van zetting en kruip op de JLD-Dijkstabilisator is onderzocht middels de EEM PLAXIS 2D. Ten behoeve van de beoordeling van de vervorming zijn de gemiddelde stijfheidsparameters van de ondergrond gebruikt. In het model zijn de verwachte vervormingen gedurende de planperiode van 100 jaar gesimuleerd. In deze simulatie zijn ook kruinophogingen meegenomen. Voor Watergraafsmeer volgt uit de berekeningen dat zetting en kruip, die worden veroorzaakt door kruinophogingen en door de aangebrachte voorspanning in de JLD-Dijkstabilisator, leiden tot een toename van de normaalkracht in de kopplaat en de dwarskracht en het moment in het

LDE. De snedekrachten in de overige elementen van de JLD-Dijkstabilisator nemen af onder invloed van zetting en kruip.

Ontwerpwijze met betrekking tot bovenstaande aspecten om de veiligheid van een waterkering versterkt met de JLD-Dijkstabilisator gedurende de levensduur te garanderen

De huidige ontwerpmethode van de JLD-Dijkstabilisator conform de 'POV-M publicatie eindige elementen methoden' (POV-M Rekentechnieken, 2018) kan onveranderd worden toegepast. Dit betreft een toets van de krachten middels een 'sterkte en snedekrachten model'. In het pilotproject aan de Watergraafsmeer zijn de snedekrachten in het LDE de maatgevende krachten. De krachten in het LDE aan het einde van de levensduur, onder invloed van vervormingen door zetting en kruip, worden op een veilige manier berekend met behulp van het sterkte- en snedekrachtenmodel volgens de methode uit het PPE. Geadviseerd wordt om deze toets op de krachten uit het sterkte- en snedekrachtenmodel en uit het vervormingsmodel bij elk project uit te voeren.

8.8 Onderzoeksvraag 9: Beplanting

Onderzoeksvraag 9: 'Wat is het effect van bestaande beplanting op de JLD-Dijkstabilisator?'

Onderzoeksvraag 9 bestaat uit twee deelvragen:

- Deelvraag 1: Wat is de te verwachten invloed van de JLD-Dijkstabilisator op de beplanting?
- Deelvraag 2: Wat is de te verwachten invloed van beplanting op de werking van de JLD-Dijkstabilisator?

Mogelijke interactie JLD-Dijkstabilisator met beplanting

De JLD-Dijkstabilisator wordt geplaatst in een stramien met een bepaalde hart-op-hart afstand. Als er een boom aanwezig is op de waterkering kan er lokaal van het stramien worden afgeweken om de boom te sparen. Het is van belang dat de boom en de JLD-Dijkstabilisator elkaar niet of nauwelijks beïnvloeden.

Om de onderzoeksvraag te kunnen beantwoorden zijn van de dijkversterking zowel de ontwerpfase, de uitvoeringsfase als de gebruikersfase beschouwd. Per fase zijn belangrijkste interacties tussen beplanting en de JLD-Dijkstabilisator geïdentificeerd. In Tabel 8-4 is per interactiepunt een beheersmaatregel opgenomen om te waarborgen dat zowel de boom als de JLD-Dijkstabilisator geen permanente schade ondervinden. Door het treffen van deze beheersmaatregelen kan worden gewaarborgd dat de wederzijdse interactie tussen de beplanting en de JLD-Dijkstabilisator beperkt dan wel verwaarloosbaar is.

Tabel 8-4 Overzicht interactie bomen en JLD-Dijkstabilisator

Fase	Aandachtspunt	Beheersmaatregel
Ontwerpfase	Een boom heeft zijn wortels nodig.	In de voorbereidingsfase dient de locatie van de wortelkluit in kaart te worden gebracht.
Ontwerpfase	Een boom heeft minimaal 80% van zijn wortels nodig.	In het ontwerp dient verificatie plaats te vinden van het percentage van de wortelkluit dat in tact blijft.
Ontwerpfase	De bomen beïnvloeden de stabiliteit van de waterkering.	Het effect van de boom op de stabiliteit van de waterkering dient meegenomen te worden in het ontwerp. Uitgaande van een regionale waterkering dient dit in lijn te zijn met de LTVRW2015.
Ontwerpfase	De bomen beïnvloeden de grondwaterstand.	Als de dijk droogtegevoelig is (veendijk), dan dient dit aspect mee te worden genomen in het ontwerp.
Ontwerpfase	Een ontgrondingskuil beïnvloedt de stabiliteit van de kopplaat	In de beoordeling van de stabiliteit van de kopplaat dienen eventuele ontgrondingskuilen te worden meegenomen. Vervolgens kan de gemiddelde stabiliteit van 1 glijvlak worden bepaald.
Uitvoeringsfase	Er kan een stabiliteitswortel ($\varnothing > 4$ cm) aangetroffen worden in het te ontgraven gedeelte.	Een European Tree Technician (ETT) kan beoordelen of de wortel veilig weggehaald kan worden
Uitvoeringsfase	Boomwortels hebben zuurstof nodig. De poriën in de grond zorgen voor voldoende zuurstof in de bodem.	De ontgraven grond wordt bij voorkeur niet rondom de bomen opgeslagen, dit om te voorkomen dat de holle ruimtes dicht gedrukt worden. Als er grond op de locatie van de wortelkluit wordt opgeslagen, dan mag de extra hoogte niet meer zijn dan 0,10 m. Er mag tevens geen zwaar materieel over de wortelkluit rijden.
Uitvoeringsfase	Het kan voorkomen dat een anker lokaal niet de grond in kan, door de aanwezigheid van een dikke wortel.	Verplaats het anker om de wortel te ontwijken.
Gebruikersfase	Er kunnen boomwortels over de kopplaat heen groeien.	Als de wortels het naspanssen bemoeilijken kan de wortel lokaal worden weggehaald.
Gebruikersfase	De boom kan gedurende de gebruikersfase verder groeien.	Een grotere boom vangt meer wind, de belasting van de boom neemt daardoor toe. Door in het ontwerp rekening te houden

Fase	Aandachtspunt	Beheersmaatregel
		met de groei van de bomen kan op voorhand het effect worden bepaald. Dit vergemakkelijkt de hertoetsing van de kering. Een andere maatregel is voorkomen van (te veel) groei van de boom door de boom te snoeien.

Resultaten monitoring beplanting na realisatie

Wat betreft deelvraag 1 is er een Virtual Tree Assessment uitgevoerd voor en na realisatie van de JLD-Dijkstabilisator. Er is een memo opgesteld met de uitkomsten, deze is nog niet in de onderzoeksrapportage opgenomen. Deelvraag 2 gaat in op de invloed van beplanting op de stabilisatoren. In de onderzoeksrapportage is een overzicht opgenomen van de interactie tussen bomen en de JLD-Dijkstabilisator. Dit blijft gehanteerd, enkele aanvullingen volgen hieronder.

Deelvraag 1: Wat is de te verwachten invloed van de JLD-Dijkstabilisator op de beplanting?

Conditie bomenbestand

In **2018** verkeerde het merendeel van het bomenbestand in een matige (43 bomen) of redelijke (50 bomen) conditie. Van twintig bomen is in 2018 de conditie als goed beoordeeld en van negen bomen was de conditie als slecht beoordeeld. Twaalf van de gekeurde bomen waren dood en acht bomen waren niet meer aanwezig.

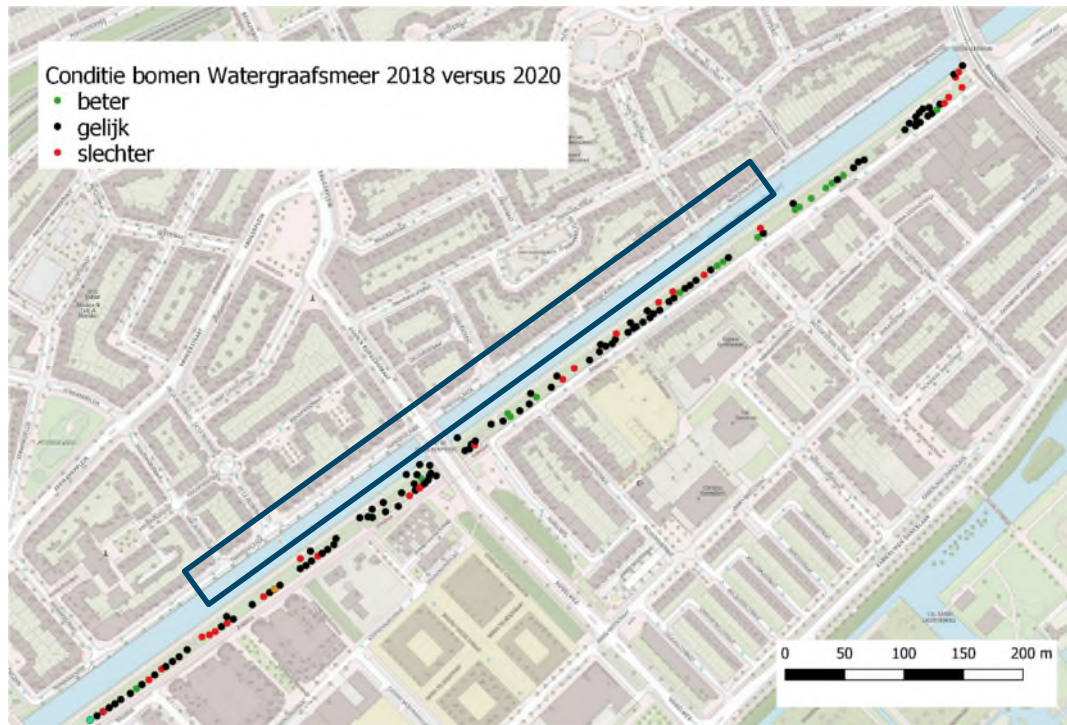
In **2020** is van 39 bomen de conditie als matig beoordeeld, de conditie van 56 bomen is als redelijk beoordeeld, de conditie van 14 bomen is als goed beoordeeld en de conditie van 12 bomen is bij de herkeuring in 2020 als slecht beoordeeld. Bij de herkeuring in 2020 waren 9 bomen verwijderd ten opzichte van het gekeurde bomenbestand in 2018. Er is geen verschil in conditie gesignaleerd tussen de bomen op de versterkte dijk versus de bomen op de onversterkte dijk.

Tabel 8-5: Overzicht conditieontwikkeling tussen de opname jaren 2018 en 2020

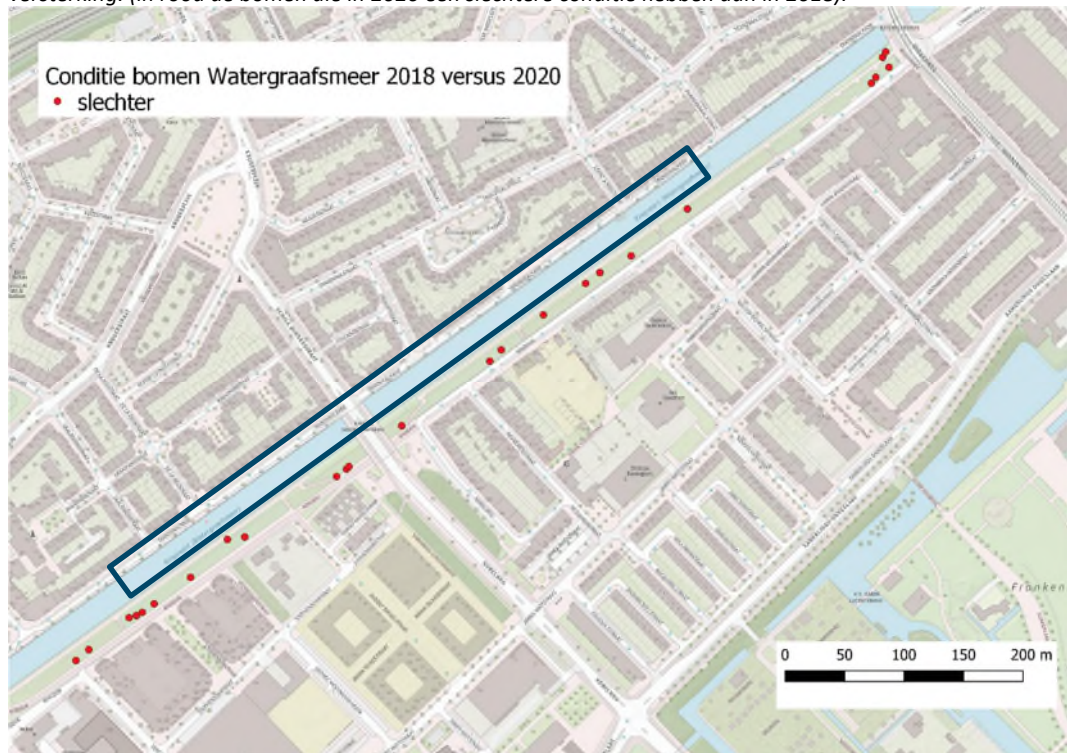
Conditieklasse	Conditie 2018	Conditie 2020
Goed	20 st	14 st
Redelijk	50 st	56 st
Matig	43 st	39 st
Slecht	9 st	12 st

De conditieontwikkeling laat zien dat de conditie van de bomen over het algemeen nauwelijks verschilt tussen de keuring voor aanvang van de werkzaamheden (2018) en de keuring na de werkzaamheden (2020). Als er in meer detail wordt gekeken is te zien dat er 26 bomen zijn waarvan de conditie achteruit is gegaan en 16 bomen waarvan de conditie vooruit is gegaan. In Figuur 8-1 en Figuur 8-2 is te zien dat zowel op de versterkte dijk (13 bomen) als de onversterkte dijk (13 bomen) de conditie achteruit is gegaan. De achteruitgang is mogelijk te wijden aan de droge zomer in 2018 en 2020. Doordat zowel de bomen op de onversterkte dijk als de versterkte dijk een soortgelijke ontwikkeling laten zien is er geen relatie tussen de verbetering/verslechtering van de conditie van de bomen en het gebruik van de JLD-Dijkstabilisator.

Er kan geconcludeerd worden dat er geen directe schade aan de boven- en ondergrondse delen van de bomen is ontstaan door de werkzaamheden. Deze gevolgen zouden nu zichtbaar zijn geweest. Voor de detailgegevens per boom zie de bijlage.



Figuur 8-1 Overzicht conditievergelijking bomen 2020 versus 2018, met in blauw de locatie van de versterking. (in rood de bomen die in 2020 een slechtere conditie hebben dan in 2018).



Figuur 8-2 Overzicht conditievergelijking bomen 2020 versus 2018 (selectie bomen met een slechtere conditie in 2020), met in blauw de locatie van de versterking

Deelvraag 2: Wat is de te verwachten invloed van beplanting op de werking van de JLD-Dijkstabilisator?

De monitoringsdata toont geen aanwijzing dat bomen een probleem zijn voor de dijkstabilisator, mede omdat de kopplaat ca 0,5 m diep onder het maaiveld ligt. Tevens is er geen bezwijken van een dijkstabilisator waargenomen of afwijkende vervormingen van de dijkstabilisatoren. Vanuit beheerogpunt wordt geadviseerd om bij een volgende toetsronde of eerder indien daar aanwijzingen voor zijn een kopplaat vrij te graven in de nabijheid van een boom.

8.9 Onderzoeksvraag 10: Inpasbaarheid JLD-Dijkstabilisator i.c.m. palen keermuur

Onderzoeksvraag 10: *'Hoe kan de JLD-Dijkstabilisator ingepast worden in de waterkering van de Ringdijk Watergraafsmeer waarbij er geen functieverlies optreedt voor de aanwezige palen van de keermuur, die aan de buitenzijde van de waterkering is gesitueerd?'*

De JLD-Dijkstabilisator kan in de Watergraafsmeer worden toegepast zonder dat er sprake is van wederzijdse beïnvloeding tussen de funderingspalen van de keermuur en het klapanker.

Als het klapanker in een zandlaag wordt gefundeerd zijn de vervormingen minimaal bij het terugtrekken van het klapanker. Om deze reden hoeft geen rekening gehouden te worden met vervormingen en is alleen een analyse benodigd naar de invloedzones rondom het klapanker en mogelijke druk- of trekpalen. Als het klapanker in een cohesieve laag is gefundeerd, moeten de vervormingen wel meegenomen worden in de analyse.

De invloedzone van een drukpaal is gebaseerd op de afmetingen van de logaritmische spiraal volgens Koppejan. De afmeting is afhankelijk van de hoek van inwendige wrijving waarin de paal gefundeerd is en de (equivalente) diameter van de paal. Met deze twee parameters kan de afstand bepaald worden door middel van de grafiek: 'afmetingen van de logaritmische spiraal volgens Koppejan'. De afmetingen van de invloedzone van een klapanker is gebaseerd op de equivalente diameter van het klapanker (breedte vanaf aslijn: $2 \cdot D_{eq}$) volgens CUR166 (Stichting CURNET, juli 2012).

Indien objecten aanwezig zijn in de waterkering dienen deze visueel inzichtelijk gemaakt te worden door middel van het opzetten van een dwarsprofiel. De invloedzone van het klapanker dient hierin opgenomen te worden, alsmede de invloedzones van eventueel aanwezige funderingen. Als de invloedzone van het klapanker en eventuele aanwezige paalfunderingen elkaar niet beïnvloeden en tevens andere aanwezige objecten in de waterkering geen invloed hebben op de invloedzone van het klapanker in de waterkering dan treedt geen functieverlies op.

Voor Watergraafsmeer zijn de invloedzones van het klapanker en de drukpaal gecontroleerd (uitgaande van een plaatsingshoek van 55°) door middel van een visualisatie van de invloedzone van een funderingspaal en het klapanker. De invloedzone van de funderingspaal en het klapanker overlappen elkaar niet. Er is tevens een controle uitgevoerd voor de variant waarin de JLD-Dijkstabilisator onder een hoek van 45° is geplaatst. Het is bij de Ringdijk te Watergraafsmeer niet mogelijk de ankers onder een hoek van 45° te plaatsen. In die situatie komen de paalfundering van de keermuur en het klapanker te dicht op elkaar.

8.10 Onderzoeksvraag 11: Piping

Zie onderzoeksvraag 7.

8.11 Onderzoeksvraag 12: Beoordelingsmethode en monitoring

Onderzoeksvraag 12: *'Opstellen beoordelingsmethode inclusief te monitoren parameters gedurende levensduur'*.

De beoordelingsmethode van de JLD-Dijkstabilisator is gemaakt op basis van de beoordelingsmethode van technische innovaties conform het WBI 2018. Deze methode uit het WBI is ontwikkeld voor primaire waterkeringen, maar de behandelde stappen en parameters zijn evenzeer relevant voor het uitvoeren van een toetsing van regionale waterkeringen waarbij de JLD-Dijkstabilisator is toegepast.

De beoordeling van de JLD-Dijkstabilisator bestaat uit een eenvoudige toets en eventueel een toets op maat. In eerste instantie wordt een eenvoudige toets uitgevoerd. Er is een toets op maat nodig als er niet voldoende gegevens beschikbaar zijn om de eenvoudige beoordeling uit te voeren en/of er zijn nieuwe inzichten met betrekking tot de technische innovatie en/of de hydraulische randvoorwaarden zijn ongunstiger geworden. Deze toets op maat zal in veel gevallen neerkomen op een gedeeltelijke of volledige herberekening van het ontwerp. Hiervoor zijn handvatten gegeven in de toets op maat, zie paragraaf 2.1.2 van de rapportage van onderzoeksvraag 12.

Om deze beoordelingen succesvol uit te kunnen voeren dienen verschillende parameters gemonitord te worden, zowel tijdens de aanlegfase als tijdens de beheerfase. Tijdens alle fases dienen (incidenteel) de waterspanningen in de dijk en de vervormingen van zowel de kopplaat als het maaiveld van de dijk te worden gemeten. Daarnaast dient vanaf de uitvoering ('continu') de voorspanning van de JLD-Dijkstabilisator te worden gemeten. In hoofdstuk 4 van de rapportage van onderzoeksvraag 12 zijn handvatten voor de monitoring gegeven. Tevens dient een beheerplan met een monitoringsplan voor de beheerfase aanwezig te zijn.

8.12 Onderzoeksvraag 13: Verloop voorspanning JLD-Dijkstabilisator

Onderzoeksvraag 13: *'Hoe verloopt de voorspanning van de JLD-Dijkstabilisatoren in de tijd bij een samendrukbare dijk?'*

Voor zowel de proeflocatie in Purmerend als het project in de Watergraafsmeer zijn predicties van het verloop van de voorspanning gemaakt. Uit de predicties blijkt dat de afname van de voorspanning in de tijd afvlakt en dat bij herhaaldelijk afspannen de voorspanning, zoals verwacht, steeds minder snel afneemt. Onderhoud in de vorm van naspannen is noodzakelijk om de voorspanning gedurende de levensduur op peil te houden. Hoe vaak de beheerder dient na te spannen is sterk afhankelijk van de lokale situatie en grondsterkte. Bij het pilotproject te Watergraafsmeer is de predictie dat circa 3 keer in 100 jaar nagespannen dient te worden.

Door middel van het opstellen van een monitoringsplan kan de frequentie van het meten van de voorspanning vastgelegd worden voor specifieke situaties, hierbij kan onderscheid gemaakt worden voor bijvoorbeeld dagelijkse omstandigheden en natte periodes.

Resultaten postdictie 2023

De monitoringsresultaten sluiten aan bij de predictie en daarom is er geen aanleiding tot het wijzigen van de conclusie van deelvraag 1. Hetzelfde geldt voor deelvraag 2, deze vraag gaat in op de beheerinspanning van de JLD-Dijkstabilisator. Uit de predictie volgt dat het systeem 2 keer nagespannen moet worden gedurende de levensduur van 100 jaar indien uitgegaan wordt van de verhoogde wrijving langs het LDE. De predictie met een lagere wrijving langs het LDE toont een beheerinspanning van 3 keer naspanssen gedurende 100 jaar. De monitoringsresultaten met betrekking tot de gemiddelde voorspanning over een glijvlak van 30 meter vertoont dat dit goed aansluit bij de predicties. Dit is in meer detail beschreven in de postdictie [4]. De onderzoeksrapportage behoeft om deze reden geen wijziging.

8.13 Onderzoeksvraag 14 & 18: Inbrengwijze stedelijk gebied en verloop pleistocene zandlaag

Onderzoeksvraag 14 & 18 zijn gecombineerd in één rapportage. Onderzoeksvraag 18: *‘Welke consequenties op het ontwerp en de uitvoerbaarheid van de JLD-Dijkstabilisator heeft de relatief diepe ligging van de pleistocene zandondergrond waarin de verankering moet worden geplaatst?’* en onderzoeksvraag 14: *‘Inbrengwijze in een stedelijk gebied, (ruimtebeslag stelling, bomen etc.)’*

De relatief diepe ligging van een draagkrachtige zandlaag brengt consequenties met zich mee met betrekking tot de beschikbare ruimte. Deze is begrensd door de palen van een keermuur enerzijds en de bebouwing anderzijds. Er is een beschouwing gemaakt van het benodigde profiel van vrije ruimte met betrekking tot de bebouwing en de ankerlengte. Dit dient in een ontwerpfase uitgewerkt te worden door een geometrische analyse uit te voeren en dit te visualiseren in een dwarsprofiel. Op basis hiervan kan geconcludeerd worden in of de JLD-Dijkstabilisator ingepast kan worden met betrekking tot objecten in de dijk (bijvoorbeeld funderingspalen keermuur) of op het achterland (bijvoorbeeld bebouwing en bomen bij de bebouwing). In de rapportage van onderzoeksvraag 14 & 18 zijn de afmetingen van de huidige machine opgenomen. JLD is voornemens om meerdere machines met verschillende afmetingen en aanbrenghmogelijkheden te ontwikkelen.

Voor objecten in het achterland zoals bebouwing dient de benodigde werkruimte vergeleken te worden met de beschikbare werkruimte. Hiervoor is een analyse nodig naar de werkruimte in horizontale richting en verticale richting. Door dit te visualiseren in een dwarsprofiel wordt inzicht verkregen of de JLD-Dijkstabilisator ingepast kan worden.

Indien blijkt dat de JLD-Dijkstabilisator niet past binnen het dwarsprofiel, dan kan het ontwerp hierop aangepast worden. Hetzij door de plaatsingshoek aan te passen, of door het stramien aan te passen. Als dit niet aangepast kan worden of hiermee nog steeds objecten de uitvoering belemmeren, kan een maatwerkoplossing opgesteld worden.

8.14 Onderzoeksvraag 15: Trillingen

Onderzoeksvraag 15: *‘Welke trillingen komen vrij tijdens het installeren van de JLD-Dijkstabilisator?’*

Trillingen

De trillingen die vrij komen zijn afhankelijk van de grondslag, het type JLD-anker en het toegepaste trilblok. Uit trillingsmetingen op de Ringdijk in Watergraafsmeer is een grafiek

samengesteld waarin de ontstane trilling t.o.v. de afstand tot het inbrengpunt weergegeven is. Deze grafiek is in de rapportage opgenomen van onderzoeksvraag 15. De betreffende gegevens zijn project- en locatiespecifiek. Risico op schade aan bebouwing is afhankelijk van de grondslag, type JLD anker en het trilblok.

Voor de Ringdijk in Watergraafsmeer werd het risico op schade aan de kademuur buitendijks en de bebouwing op basis van de trillingspredictie als klein gezien. De verwachting was dat de trillingen onder de grenswaarden zouden blijven. Tijdens de werkzaamheden is dit door middel van trillingsmetingen bevestigd. Tijdens de werkzaamheden zijn ten gevolge van de trillingen geen schades aan objecten geconstateerd of gemeld.

Beheersmaatregelen

Voorafgaand aan de werkzaamheden dient een trillingspredictie en een monitoringsplan te worden opgesteld. Op basis van de trillingspredictie kunnen risico's vooraf worden ingeschat. Bij risico op schade wordt aanbevolen vooraf duidelijke afspraken te maken over hoe om te gaan met schade en op welke termijn de schade wordt hersteld.

Tevens wordt sterk aanbevolen om voorafgaand aan en na de werkzaamheden, de huidige staat van de belendende bebouwing en objecten (bijvoorbeeld bij Watergraafsmeer: kademuur en muurtje binnenzijde) middels een (foto-)expertise vast te stellen. Door de foto-expertise kunnen eventuele kwetsbare panden tot de aandachtspunten worden toegevoegd en kunnen vermeende schades aan panden als gevolg van de werkzaamheden achteraf worden beoordeeld op juistheid.

Bij de expertise wordt over het algemeen in eerste instantie een globale (foto-)expertise uitgevoerd, zo kort mogelijk voordat de werkzaamheden aanvangen. Dat wil zeggen dat alleen de buitenzijde van de panden wordt geïnspecteerd op eventuele verzakkingen en scheurvorming. Zichtbare schade wordt op foto vastgelegd. Vervolgens kan op basis van de inspectie worden besloten om de panden, waarvan aan de buitenzijde schade is vastgesteld, ook aan de binnenzijde te inspecteren (intensieve foto-expertise).

Tijdens de uitvoering dienen de werkzaamheden door middel van monitoring te worden gevolgd waaronder: trillingsmetingen, deformatiemetingen, bijhouden van logboeken en visuele inspecties. Bij onverwachte trillingen of schaden worden de maatregelen uit Tabel 8-6 voorgesteld.

Tabel 8-6: Risico's monitoring trillingen

Risico	Gevolg	Maatregel
Schade aan gevoelige objecten zonder dat trillingsgrenzen zijn overschreden	Schade objecten	Stilleggen werkzaamheden en her-analyse trillingspredicties.
Externe trillingen	Foutieve overschatting trillingen	Analyse resultaten om deze foute resultaten te monitoren.

Bij overschrijding van signaleringwaarde of grenswaarde worden de acties uit Tabel 8-7 voorgesteld.

Tabel 8-7: Acties trillingsmetingen bij overschrijding van de signaleringswaarde en grenswaarde

Overschrijding	Actie
Signaleringswaarde	Wees alert en zet bemande metingen in i.p.v. onbemande trillingsmetingen
	Nadere visuele inspectie bebouwing, controleer of er extra scheurvorming plaatsgevonden heeft
	Overleg met betrokkenen
	Nader onderzoek naar de fundering van bestaande bouwwerken
	Bij geconstateerde gebreken afspraken maken voor herstel of herstelwerkzaamheden uitvoeren
Grenswaarde	Nadere inspectie bebouwing uitvoeren
	Overleg met betrokkenen
	Bemande trillingsmetingen uitvoeren
	Extra hoogtemetingen uitvoeren en eventueel hoogtebouten bijplaatsen
	Onderzoeken of met een kleinere slagenergie gewerkt kan worden of overgestapt kan worden naar een zwaarder trilblok met een lage slagkracht.
	Stil leggen van de werkzaamheden en besluit nemen over een oplossing

8.15 Onderzoeksvraag 16: Grondverdringing

Onderzoeksvraag 16: *'Hoe groot is de grondverdringing tijdens het inbrengen van het klapanker en het LDE? Hebben eventuele deformaties gevolgen voor de dijk en de omliggende bebouwing?'*

Om inzicht te krijgen in de grondverdringing/deformaties zijn metingen benodigd van de optredende deformaties na het inbrengen van het LDE element. Door het aanbrengen van de voorspanning zullen direct rondom de kopplaat ook vervormingen ontstaan. Tijdens het aanbrengen van de voorspanning dienen de vervormingen gedurende een dag gemeten te worden. Hieruit kan afgeleid worden wat de risico's zijn op problemen op de dijk en gelegen panden.

Dijk

Bij de Ringdijk en op de proeflocatie in Purmerend zijn de verplaatsingen te klein om te leiden tot kans op falen. Voor de Ringdijk geldt het volgende:

Uit de beoordeling van de meetresultaten van het drukkend inbrengen van het LDE en intrillen van het klapanker in de zandlaag blijkt dat de deformaties in een orde van grootte zijn dat de kans op afschuiven van het talud volgend uit deze deformaties verwaarloosbaar klein is.

Aanliggende panden

Bij grondverzakking is de schade aan panden gerelateerd aan de rotatie van de fundering onder het pand. Hierbij wordt er verschil gemaakt tussen constructieve schade, bij een rotatie van > 1:150, en cosmetische schade, bij een rotatie < 1:600 (Bijnagte & Luger, 2011). Aan de hand van de gemeten waarden kunnen de rotaties op elke van de monitoringspunten worden bepaald.

Hier geldt ook dat de gemeten data projectspecifiek is. Voor de Ringdijk te Watergraafsmeer geldt het volgende:

Voor de beoordeling van de gevolgen voor de aanliggende panden zijn uit gemeten verticale deformaties de rotaties bepaald. Aan de hand van deze rotaties is bepaald dat de kans op architectonische en constructieve schade aan de aanliggende panden kan worden uitgesloten. Pas wanneer de bebouwing binnen 1,5 m van de kopplaat zou staan dan is er een risico op schade.

Trillingen

Deformaties ten gevolge van trillingen zijn gemeten. Dit aspect is in de voorgaande paragraaf beschreven. Deformaties ten gevolge van trillingen zijn nihil voor de Ringdijk te Watergraafsmeer.

8.16 Onderzoeksvraag 18: Diepe ligging zandlaag

Zie onderzoeksvraag 14.

9 Effect hoge wrijving langs LDE

Tijdens de uitvoering van de dijkversterking te Watergraafsmeer was de weerstand langs de LDE's hoger dan voorzien.

Het voornemen om het LDE de laatste paar centimeters op diepte te brengen door de kopplaat voor te spannen is daardoor niet altijd over de volledige lengte gebeurd. Daarom is aanvullend bezien wat de duiding hiervan is. Dit leidt tot de volgende conclusies:

- In Watergraafsmeer is sprake van een hoge weerstand bij het inbrengen van het LDE.
- Dit blijkt onder andere uit de inbreng weerstand die wordt geregistreerd. In meer dan 80% van de gevallen is deze weerstand hoger dan de afspankracht van de kopplaat.
- Een hoge weerstand kan worden verklaard door de wrijving langs het LDE. Een aanzienlijke bijdrage wordt daarbij geleverd door het veen (ca. de helft). Dit inzicht sluit aan bij de resultaten van de proef in Broek in Waterland.

9.1 Case study

Vervolgens is het effect van de hoge wrijving op de krachtswerking in het systeem beschouwd doormiddel van meerdere gevoeligheidsberekeningen bij twee cases, namelijk de Ringdijk te Watergraafsmeer en de dijkversterking Bergambacht. Hieruit volgt dat het effect van de schuifweerstand op dwarskrachten en momenten grotendeels positief is. Een klein deel van de resultaten is niet eenduidig. Bij Watergraafsmeer nemen de dwarskracht en het moment (door toedoen van hogere schuifweerstand) toe bij een lage voorspanning en af bij een hoge voorspanning. Bij Bergambacht nemen de dwarskracht en het moment af bij een toenemende schuifweerstand. Aangezien dit de belangrijkste snedekrachten zijn voor de constructieve sterkte die kan worden toegevoegd aan de waterkering, zijn voorlopig berekeningen met de boven- en ondergrens van de schuifweerstand noodzakelijk.

9.2 Onderzoeksvragen

Het effect van de hoge wrijving op de beantwoording van de onderzoeksvragen beschouwd. In onderstaande tabel is de conclusie per onderzoeksvraag opgenomen.

Tabel 9-1 Conclusie effect hoge wrijving op onderzoeksvragen

Nr.	Omschrijving onderzoeksvraag	Invloed hoge schuifweerstand
1	De ontwerpbaarheid van de Dijkstabilisator gegeven de afgeleide ontwerpwijze en de daarmee te realiseren veiligheid (stabiliteit)	<ul style="list-style-type: none">• In de eerstvolgende projecten dient een gevoeligheidsberekening gemaakt te worden om te bepalen of een hoge of lage schachtwrijving maatgevend is voor de krachten in de constructieve onderdelen. Hierbij dient ook gecheckt te worden of er bij een hoge wrijving nog sprake is van een ductiel ontwerp;• Om de uitvoerbaarheid van de techniek te controleren dient altijd een berekening met een hoge schachtwrijving geanalyseerd te worden.
2	Overstappen van referentieperiode van 10 jaar naar jaarkans in veiligheidsfilosofie	Geen effect op de onderzoeksvraag

Nr.	Omschrijving onderzoeksvraag	Invloed hoge schuifweerstand
3	Bezijken talud boven de kopplaat meenemen in faalkansverdeling	Geen effect op de onderzoeksvraag
4	Interactie kracht (schuifkracht langs het LDE element) in venige grond;	<ul style="list-style-type: none"> Op basis van de beschikbare literatuur kan geen/weinig sterkte worden toegekend aan een venige ondergrond; De hoge wrijving die is gemeten in het Pilotproject komt overeen met de verwachting op basis van de trekproeven in venige ondergrond. Het advies is om project specifiek de wrijving in het veen te bepalen aan de hand van lokaal onderzoek.
5	Stabiliteit/sterkte grond onder de kopplaat meenemen in ontwerp	<ul style="list-style-type: none"> Hogere schachtwrijving heeft een positief effect op het draagvermogen van de kopplaat. Door de schachtwrijving goed in beeld te brengen doormiddel van lokaal onderzoek kan de berekende draagkracht geoptimaliseerd worden.
6	Groepseffect wanneer ankers vanuit ontwerpbehoefte dichter op elkaar moeten worden geplaatst;	<ul style="list-style-type: none"> De groepseffecten worden niet beïnvloed door de hogere wrijving
7	Pipingrisico langs het anker (door het inbrengen van het anker met de voorloper) in andere dan zuiver kleiige gronden;	Geen effect op de onderzoeksvraag
8	Effect doorgaande kruindaling en grondvervorming op ankers.	<ul style="list-style-type: none"> Om de effecten van de hoge wrijving gedurende de levensduur in beeld te brengen is een berekening met het vervormingsmodel uitgevoerd. In dit model zijn alle verschillende aspecten gedurende de levensduur nauwkeurig meegenomen. Uit het vervormingsmodel volgt dat door toedoen van de hogere wrijving alle constructieve krachten in het LDE afnemen. Dit is een positief effect op de te behalen veiligheid. Het minder gedetailleerde snedekrachten model laat grotendeels de zelfde resultaten zien. Omdat een klein deel van de resultaten af wijkt, dient voor alsnog de ontwerpmethode aangevuld te worden met een gevoeligheidsberekening met een hoge wrijving.
9	Effect bestaande beplanting op JLD ankers	Geen effect op de onderzoeksvraag
10	Inpasbaarheid in verband met aanwezigheid palen keermuur	Geen effect op de onderzoeksvraag
11	Aanwezige wateroverspanning in relatie tot pipingrisico en uitvoerbaarheid	Geen effect op de onderzoeksvraag
12	Opstellen beoordelingsmethode incl. te monitoren parameters gedurende levensduur	Geen effect op de onderzoeksvraag
13	Mate waarin de voorspanning over langere tijd aanwezig blijft bij een samendrukbare dijk;	<ul style="list-style-type: none"> Uit de tussentijdse postdictie volgt dat de hoge wrijving een positief effect heeft op het verloop van de voorspanning. Doordat het LDE meer

Nr.	Omschrijving onderzoeksvraag	Invloed hoge schuifweerstand
		<p>draagkracht heeft is de vervorming van de grond onder de kopplaat kleiner. Daardoor is de spanningsafname kleiner.</p> <ul style="list-style-type: none"> Het aantal keer naspannen neemt af van drie naar twee keer in 100 jaar.
14	Inbrengwijze in een stedelijk gebied, (ruimtebeslag stelling, bomen etc.)	Geen effect op de onderzoeksvraag
15	Trillingen tijdens het inbrengen;	Geen effect op de onderzoeksvraag
16	Grondverdringing tijdens het inbrengen (deformaties dijk en panden).	Geen effect op de onderzoeksvraag
17	Inzicht in kosten over de levensduur (TCO)	<ul style="list-style-type: none"> Doordat de spanningsafname in het systeem kleiner is, is het aantal naspanmomenten ook kleiner. Dit heeft een positief effect op de kosten gedurende de levensduur.
18	Welke consequenties op engineering en uitvoerbaarheid heeft de relatief diepe ligging van de pleistocene zandondergrond waarin de verankering moet worden geplaatst	Geen effect op de onderzoeksvraag
19	Wat zijn de beheerconsequenties?	<ul style="list-style-type: none"> Doordat de spanningsafname in het systeem kleiner is, is het aantal naspanmomenten ook kleiner. Dit is positief voor de beheerinspanning.

10 Conclusie

In dit document is de volgende onderzoeksvraag behandeld: Hoe moet een JLD-Dijkversterking met de JLD-Dijkstabilisator worden ontworpen?

De hoofdvraag is beantwoord door middel van de volgende deelvragen:

1. Welke deelstappen zijn nodig om tot een gedragen ontwerp te komen?
2. Hoeveel veiligheid voegt de JLD-Dijkstabilisator toe aan de veiligheid van de dijk bij toepassing van de veiligheidsbenadering?
3. Welke procedure is nodig om de constructieve toets uit te voeren?
4. Welke procedure is nodig om het effect van ankeruitval te kwantificeren?
5. Wat is het effect van puin in de ondergrond op de ontwerpbaarheid van de JLD-Dijkstabilisator?
6. Welke plek krijgen de resultaten van onderzoeksvraag 2 t/m 16 en 18 in de ontwerpmethode?

Ontwerpstappen

Om tot een ontwerp te komen zijn verschillende deelstappen nodig. Hoofdzakelijk zijn de volgende ontwerpen te onderscheiden:

- Schetsontwerp (SO);
- Voorlopig ontwerp (VO);
- Definitief ontwerp (DO);
- Uitvoeringsontwerp (UO).

De ontwerpmethodiek verschilt tussen primaire keringen en regionale keringen. Voor primaire keringen wordt een ongedraineerde methode toegepast en voor regionale keringen een gedraineerde ontwerp methode. De toe te passen ontwerpmodellen alsmede de verschillen tussen gedraineerd en ongedraineerd ontwerpen is beschreven in hoofdstuk 3. Deze procedure is al opgenomen in de vigerende leidraad 'PPV (POV-M, 2018)'.

Toegevoegde veiligheid

De toegevoegde waarde van de JLD-Dijkstabilisator is afhankelijk van twee factoren, namelijk de totale geotechnische stabiliteit en de constructieve sterkte van het systeem. Beide aspecten zijn in een sterkte- en snedekrachten model getoetst. Hierin is rekening gehouden met de planperiode van 100 jaar. Dit betekent dat tijdgebonden effecten zoals degradatie van materialen en de zetting van de bodem, mee zijn genomen in de analyses. Deze procedure is al opgenomen in de vigerende leidraad 'PPV (POV-M, 2018)'.

In het project van de Ringdijk Watergraafsmeer varieert de werkelijk toegevoegde stabiliteit tussen de 11% en de 43%. Uit de resultaten is geconcludeerd dat het systeem zorgt voor een grote toename van de stabiliteit. Daardoor is de stabiliteit van de Ringdijk te Watergraafsmeer voor minstens de komende 100 jaar gegarandeerd.

Constructieve toets

De constructieve toets bestaat uit verschillende deelfaalmechanismen. In hoofdzaak zijn er twee aspecten die getoetst dienen te worden. Ten eerste constructief falen (STR) en ten tweede grond constructie interactie (SSI). Deze aspecten bestaan weer uit subcomponenten weergegeven in hoofdstuk 5. Deze procedure is al opgenomen in de vigerende leidraad 'PPV (POV-M, 2018)'.

In het PPV is per deelfaalmechanisme beschreven wat de deelfaalmechanismen inhouden en hoe deze getoetst dienen te worden. Tevens is hierin beschreven hoe de partiële factoren toegepast dienen te worden. De partiële factoren zijn beschreven in paragraaf 6.2 en de deelfaalmechanismen zijn beschreven in paragraaf 6.3.

Op basis van een beperkt aantal cases waarvoor een ontwerp is opgesteld met de *JLD-Dijkstabilisator* is gebleken dat constructief bezwijken LDE door combinatie buigend moment en normaalkracht (STR2) en Bezwijken grond onder de kopplaat (SSI3) doorgaans maatgevend zijn.

Ankeruitval

Het is mogelijk dat er door een niet hoogwater gerelateerde calamiteit een anker uit valt. In het DO dient te worden getoetst op ankeruitval. Er dient een toets uitgevoerd te worden op de deelfaalmechanismen met de snedekrachten die zijn bepaald bij lage karakteristieke waarden van de sterkte en stijfheid van de grond. Er wordt geen schematiserings- en modelfactor toegepast. De snedekrachten worden uit fase 4b van de PLAXIS modellering gehaald en vermenigvuldigt met een belastingeffect-factor voor ankeruitval. Indien de combinatie van de snedekrachten bij karakteristieke waarden van de sterkte en stijfheid van de grond en de belastingeffect-factor voor ankeruitval lager is dan de ingangswaarden van de standaard toetsing van de deelfaalmechanismen dan kan worden afgezien van de toetsing op ankeruitval. Deze procedure is al opgenomen in de vigerende leidraad 'PPV (POV-M, 2018)'.

Puin

Indien de JLD-Dijkstabilisator op puin stuit kan de JLD-Dijkstabilisator binnen de uitvoeringstoleranties op andere locaties geplaatst worden. Indien afwijkingen bij de uitvoering buiten de vastgestelde toleranties vallen, bijvoorbeeld doordat er veelvuldig puin is verwerkt in het binnentalud van de kering, dan dient het ontwerp herzien te worden en hierop te worden aangepast. De uitvoeringstoleranties kunnen niet universeel worden afgeleid voor een met de *JLD-Dijkstabilisator* versterkte waterkering, omdat deze aanpak project specifiek is. Deze procedure is al opgenomen in de vigerende leidraad 'PPV (POV-M, 2018)'.

Wrijving langs het LDE

Uit het pilotproject te Watergraafsmeer en de interactieproeven te Purmerend volgt dat venige lagen voor een hoge wrijving langs het LDE kunnen zorgen. In de vigerende leidraad is opgenomen dat voor de sterkteberekeningen de laag karakteristieke wrijving maatgevend is. De conclusies uit het voorliggende onderzoek bieden een aanvulling op de vigerende leidraad 'PPV (POV-M, 2018)':

1. Per project dient er een gevoeligheidsberekening gemaakt te worden om te bepalen of hoge of lage wrijving maatgevend is voor de constructieve krachten in het systeem.
2. De uitvoerbaarheid dient gecontroleerd te worden aan de hand van hoog karakteristieke wrijving.
3. Het berekenen van de vervormingen dient met verwachtingswaarden voor de wrijving te worden uitgevoerd.

Onderzoeksvragen

De onderzoeksvragen 2 t/m 16 en 18 hebben allen invloed op het ontwerpen van een waterkering met een JLD-Dijkstabilisator. In hoofdstuk 8 zijn de belangrijkste invloeden op het ontwerp beschreven, per onderzoeksvraag.

11 Verwijzingen

- Antea Group. (31-01-2019). *Pilot JLD-Dijkstabilisator Watergraafsmeer - Definitief Ontwerp*.
- Bijnagte, i. J., & Luger, i. H. (2011). Het bepalen van schadekansen ten gevolge van meerdere zettingsbijdragen. *Geotechniek*, 18-21.
- Deltares i.o.v. POV-M. (2018). *Basisrapport Eindige-elementenmethode, concept, kenmerk:11201406-002-GEO-003*.
- NEN. (2017). *NEN997-1+C2 Geotechnisch ontwerp van constructies – Deel 1: Algemene regels*.
- POV-M. (2018). *POV-M publicatie EEM toepassen in het ontwerp*.
- POV-M. (2018). *POV-M Publicatie Vernagelingstechnieken*.
- POV-M Rekentechnieken. (2018). *EEM toepassen binnen het ontwerp, concept*.
- POV-Macrostablieit. (dec 2018). *POV-M Publicatie Vernagelingstechnieken*.
- SBRCUR. (2012). *CUR 166, Damwandconstructies, deel 1 en 2*. Gouda: Stichting CUR.
- Stichting CURNET. (juli 2012). *CUR166 Damwandconstructies 6e herziene druk deel 1*. Gouda.
- Stichting CURNET. (juni 2001). *CUR-Rapport 2001-4 Ontwerpregels voor Trekpalen*. Gouda: Stichting CUR.

Bijlage 1: Hoge wrijving langs het LDE

Pilot JLD-Dijkstabilisator Watergraafsmeer
Onderzoeksvraag 1: Ontwerpbaarheid
projectnummer 413509
31 augustus 2023 revisie 02
Waternet



Over Antea Group

Antea Group is het thuis van 1500 trotse ingenieurs en adviseurs. Samen bouwen wij elke dag aan een veilige, gezonde en toekomstbestendige leefomgeving. Je vindt bij ons de allerbeste vakspecialisten van Nederland, maar ook innovatieve oplossingen op het gebied van data, sensing en IT. Hiermee dragen wij bij aan de ontwikkeling van infra, woonwijken of waterwerken. Maar ook aan vraagstukken rondom klimaatadaptatie, energietransitie en de vervangingsopgave. Van onderzoek tot ontwerp, van realisatie tot beheer: voor elke opgave brengen wij de juiste kennis aan tafel. Wij denken kritisch mee en altijd vanuit de mindset om samen voor het beste resultaat te gaan. Op deze manier anticiperen wij op de vragen van vandaag en de oplossingen voor morgen. Al 70 jaar.

Copyright © 2018

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar worden gemaakt door middel van druk, fotokopie, elektronisch of op welke wijze dan ook, zonder schriftelijke toestemming van de auteurs.