

Pilot JLD-Dijkstabilisator Watergraafsmeer

Onderzoeksvraag 8

invloed vervormingen op JLD-Dijkstabilisator

projectnummer 413509
definitief revisie 02
1 maart 2019

Inhoudsopgave

Blz.

1	Inleiding	1
1.1	Achtergrond	1
1.2	Voorliggende rapportage	2
1.3	Leeswijzer	3
2	Achtergrond	4
2.1	Deelvraag 1: effect veenoxidatie op de JLD-Dijkstabilisator	4
2.2	Deelvraag 2: effect zetting en kruip op de JLD-Dijkstabilisator	6
2.3	Deelvraag 3: veilig omgaan met vervormingen in het ontwerp	8
3	Aanpak	10
3.1	Deelvraag 1: effect veenoxidatie op de JLD-Dijkstabilisator	10
3.2	Deelvraag 2: effect zetting en kruip op de JLD-Dijkstabilisator	10
3.3	Deelvraag 3: veilig omgaan met vervormingen in het ontwerp	10
4	Effect veenoxidatie op de JLD-Dijkstabilisator	11
4.1	Kwalitatieve beschouwing	11
4.2	PLAXIS modellering veenoxidatie	12
5	Effect zetting en kruip op de JLD-Dijkstabilisator	13
5.1	Klapanker	13
5.2	Trekstang	14
5.3	LDE	15
5.4	Kopplaat (LDP)	16
5.5	Monitoring en postdictie Watergraafsmeer	17
6	Omgang vervormingen in ontwerp	18
7	Conclusies en beantwoording onderzoeksvraag	20
8	Verwijzingen	22

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.

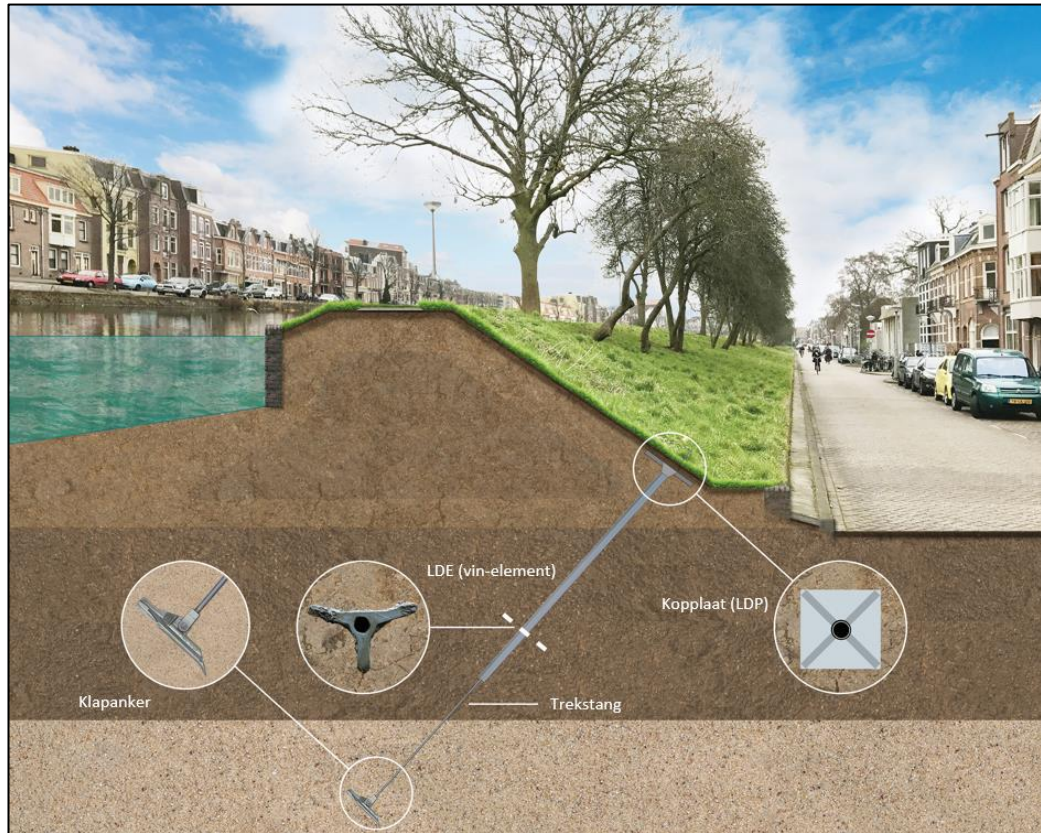
In een voorgaande fase zijn reeds diverse veldproeven uitgevoerd ten behoeve van de ontwikkeling en onderbouwing van de techniek. Deze veldproeven hebben antwoord gegeven op de meeste vragen rond deze innovatieve techniek maar niet alle vragen zijn hiermee beantwoord.

Na uitvoeren van de veldproeven is op basis van de postdictie een ontwerpmethode 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 ontwerpmethoden voldoende basis bieden voor verdere ontwikkelingen. Het ENW heeft hierbij wel enkele kennisvragen opgesteld die in de verdere doorontwikkeling beantwoord moeten worden.

In samenwerking met Waterschap Amstel, Gooi en Vecht is besloten een pilotproject uit te voeren. Als pilotproject is gekozen voor de dijkversterking van de Ringdijk te Watergraafsmeer in Amsterdam. Daarbij is een team van JLD Contracting, Antea Group en Deltares betrokken. De kennisvragen van 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 worden op basis van het pilot project en aanvullende veldproeven. Voor verder onderzoek en voor de beantwoording van de 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.

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.

1.2 Voorliggende rapportage

Het voorliggende rapport betreft de beantwoording van onderzoeksvraag 8 en het daaraan ten grondslag liggende onderzoek.

De oorspronkelijke onderzoeksvraag 8 uit het PvA van de Pilot JLD-Dijkstabilisator ringdijk Watergraafsmeer is als volgt geformuleerd: Effect doorgaande kruindaling en grondvervorming op ankers.

De onderzoeksvraag is op de volgende manier geïnterpreteerd: Wat zijn de effecten van vervormingen door kruip en zettingen, veroorzaakt door kruinophogingen gedurende de levensduur, op de werking van de JLD-Dijkstabilisator?

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

1. Wat zijn de effecten van kruip, als gevolg van veenoxidatie, op de werking van de JLD-Dijkstabilisator?
2. Wat zijn de effecten van vervormingen die worden veroorzaakt door kruinophogingen gedurende de levensduur van het ontwerp op de werking van de JLD-Dijkstabilisator?
3. Hoe dient in het ontwerp omgegaan te worden met bovenstaande aspecten om de veiligheid van een waterkering versterkt met de JLD-Dijkstabilisator gedurende de levensduur te garanderen?

1.3 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 is enige achtergrond gegeven omtrent vervormingen bij waterkeringen in het algemeen en bij waterkeringen versterkt met de JLD-Dijkstabilisator. In hoofdstuk 3 is de aanpak beschreven die is gevolgd bij de beantwoording van de onderzoeksvraag. In hoofdstuk 4 is beschreven wat de effecten van veenoxidatie op de JLD-Dijkstabilisator zijn. In hoofdstuk 5 is beschreven wat de effecten van zetting en kruip, als gevolg van een kruinophoging, op de JLD-Dijkstabilisator zijn. In hoofdstuk 6 is getoetst of invloed van vervormingen op de JLD-Dijkstabilisator in de huidige ontwerpmethodologie op een veilige manier wordt meegenomen. Tot slot zijn in hoofdstuk 7 de conclusies opgenomen en is de onderzoeksvraag beantwoord.

2 Achtergrond

Een waterkering is onderhevig aan verschillende typen vervormingen. Bij een groene dijk (niet versterkt met langsconstructies) gaat het om de volgende typen vervormingen:

- Zetting Mechanisme waarbij door een verhoging van de korrelspanning het grondskelet in elkaar wordt gedrukt
- Kruip Vervormingen van de ondergrond bij gelijkblijvende belasting
- Veenoxidatie Vindt plaats bij toetreding van lucht bij het veenpakket, waardoor het veen wordt afgebroken, met name via biologische processen. Dit proces vindt overwegend plaats boven het niveau van de laagste grondwaterstand.
- Zwel en krimp Met name klei is onderhevig aan zwel en krimp bij respectievelijk toetreding of uittreden van water

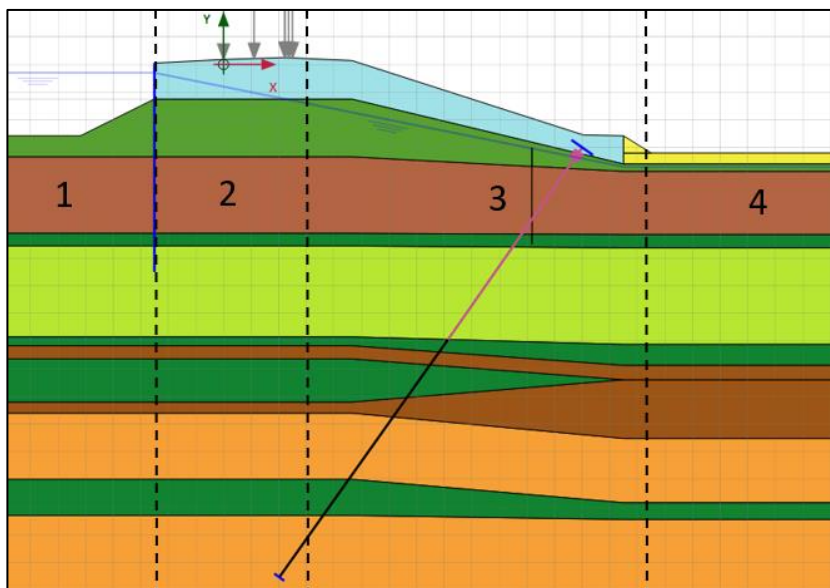
Naast deze oorzaken van vervormingen van de ondergrond bij groene dijken zijn er nog meer oorzaken voor vervorming zoals: reservoir compactie bij olie- & gaswinning, wegvloeien en oplossen van zout, stijging van mijnwater na beëindiging kolenwinning, tektonische, isostatische en eustatische bodembewegingen en aardgetijden en zeespiegelfluctuaties. Deze oorzaken hebben geen of een zeer beperkte invloed, hebben op alle grondlagen even veel effect (waardoor er geen verschilvervorming ontstaat) of zijn gebiedsafhankelijk (en komen niet voor bij de Watergraafsmeer). Deze oorzaken zijn daarom niet meegenomen bij het beantwoorden van deze onderzoeksvraag.

Zwel en krimp zijn cyclische processen door toetreding en uittreden van water in de grond. Doordat grondlagen afwisselend nat en droog komen te staan neemt de sterkte van de grond toe. Zwel en krimp zorgen ook voor vervormingen van de ondergrond. Door het cyclische gedrag van zwel en krimp is de eindvervorming echter nihil. Om deze rede is dit mechanisme niet verder beschouwd bij het beantwoorden van deze onderzoeksvraag.

2.1 Deelvraag 1: effect veenoxidatie op de JLD-Dijkstabilisator

De invloed van veenoxidatie op de JLD-Dijkstabilisator is sterk locatie afhankelijk en dient daarom per project beschouwd te worden. Bij de meeste keringen wordt de JLD-Dijkstabilisator 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 bevatten vaak veen. De slappe venige lagen bevinden zich vaak onder de grondwaterstand.

Om de invloed van veenoxidatie te beschouwen voor de Watergraafsmeer is de dijk opgedeeld in vier zones, zie Figuur 2-1. Bij zones 1 en 2 ligt de freatische waterstand in alle omstandigheden boven de bovenkant van het veenpakket. In deze zones zal er dus geen veenoxidatie optreden. In zone 3 neemt de hoogte van het freatisch vlak geleidelijk af. Bij het uitvoeren van de handboringen en sonderingen eind september 2018 (na de droge zomer) is gebleken dat de grondwaterstand in dit gedeelte van de dijk in circa 50% van de gevallen onder de bovenkant van de veenlaag lag. In deze zone van de dijk zal er dus wel enige veenoxidatie op kunnen treden. In zone 4 is de grondwaterstand gemeten middels peilbuizen. De gemeten grondwaterstand was gedurende de meetreeks hoger dan de bovenkant van het veenpakket. Het valt echter niet geheel uit te sluiten dat de het veen in een zeer droge periode gedeeltelijk droog valt. In zone 3 en 4 kan dus, in beperkte mate, veenoxidatie optreden.



Figuur 2-1 Dwarsprofiel Watergraafsmeer opgedeeld in 4 zones. Het veen is bruin gearceerd.

Bij een groene dijk zorgen kruip en veenoxidatie, die beide ook optreden zonder spanningstoename, voor een daling van het maaiveld. Veenoxidatie treedt in de meeste gevallen meer op in het achterland terwijl kruip meer optreedt onder de dijk. Voor de situatie van Watergraafsmeer zijn de vervormingen van de groene dijk schematisch weergegeven in Figuur 2-2.



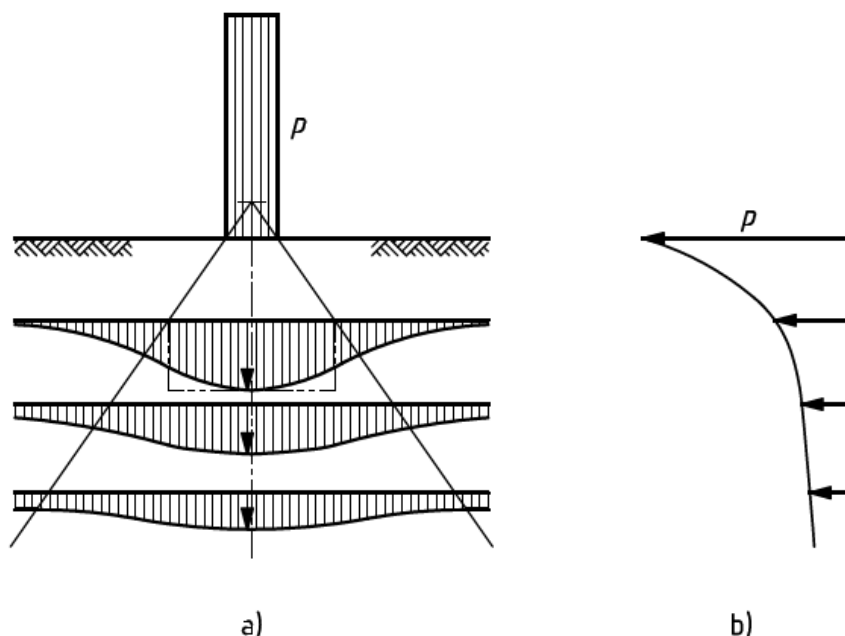
Figuur 2-2 Schematische weergave van de vervormingen van een groene dijk

2.2 Deelvraag 2: effect zetting en kruip op de JLD-Dijkstabilisator

Zetting

De vervormingen in de ondergrond veroorzaakt door zetting, als gevolg van een spanningstoename, treden op ter plaatse van de aangebrachte ophoging. Bij een groende dijk vindt de spanningstoename vrijwel altijd plaats ter plaatse van de kruin (door uitvoering van een kruinophoging ter compensatie van kruindaling), ter plaatse van het binnentalud of ter plaatse van de eventueel aanwezige binnenberm (ter verbetering van de binnenwaartse stabiliteit). Voor de dijk bij Watergraafsmeer zijn voor de komende 100 jaar alleen kruinophogingen voorzien.

In Figuur 2-3 is op basis van de theorie van Boussinesq de spreiding van een belasting gegeven met een smalle breedte. Bij toenemende diepte ontstaat er over een breder vlak een klokvormige spanning met een lagere waarde ten opzichte van de waarde op het maaiveld. Voor matig vaste grondlagen wordt vaak een spreiding van 2:1 (verticaal : horizontaal) aangehouden, wat nagenoeg overeenkomt met de waarde volgens Boussinesq.



Figuur 2-3 Spanningsspreiding in de ondergrond [bron NEN 9997-1 (NEN, 2016)]

Een dijk waarin de JLD-Dijkstabilisator wordt aangebracht heeft naast zettingen door ophogingen ook aanvullende zettingen door het aanbrengen van een voorspanning in de JLD-Dijkstabilisator. De voorspanning in de JLD-Dijkstabilisator leidt via de kopplaat en de wrijving langs het LDE element tot een spanningstoename in de ondergrond (zie Figuur 2-4).

Kruip

Kruip wordt ook wel secundaire zetting genoemd en is onafhankelijk van het dichtdrukken van de poriën. De kruipsnelheid is constant ten opzichte van de logaritmische schaal van de tijd. Dit betekent dat de kruip geleidelijk afneemt in de tijd.

Op plekken waar de grond vaker wordt opgehoogd is de kruip dus ook groter. Ter plaatse van de dijk is de kruip in de regel groter dan in het achterland (afhankelijk van het gebruik van het

achterland). Voor de dijk bij Watergraafsmeer zijn voor de komende 100 jaar alleen kruinophogingen voorzien, waardoor de kruip ook voornamelijk onder de kruin op zal treden. De voorspanning in de JLD-Dijkstabilisator leidt in de zone onder de kopplaat en rond het LDE element eveneens tot kruip van de ondergrond (zie Figuur 2-4).



Figuur 2-4 Schematische weergave van de spanningsverspreiding voor een dijk versterkt met JLD-Dijkstabilisator

De vervormingen die optreden bij een groene dijk worden rond de JLD-Dijkstabilisator versterkt binnen het gebied waarin de spanningen, veroorzaakt door de aangebrachte voorspanning, worden gespreid.

Wanneer de vervormingen van de dijk en het achterland in gelijke maten optreden zijn er geen ongelijke vervormingen en is er geen krachtstoename in de JLD-Dijkstabilisator. Wanneer er echter ongelijke vervormingen optreden tussen de kruin van de kering en het binnentalud dan leidt deze vervormingen tot een krachtstoename in de JLD-Dijkstabilisator.

Aan de onderzijde is de JLD-Dijkstabilisator verankerd in de Pleistocene zandlaag, deze zandlaag is nauwelijks onderhevig aan vervormingen en hierdoor is er in dit gedeelte geen krachtstoename. Aan de bovenzijde wordt de JLD-Dijkstabilisator op zijn plaats gehouden door de kopplaat. De kopplaat kan gelijk meebewegen met het maaiveld. De vervorming wordt hier dus perfect gevolgd en hierdoor is er dus geen aanvullende belasting. In de lagen tussen het maaiveld en de vaste zandlaag is er ook sprake van zetting en kruip. Deze is ongelijkmatig, in slappe lagen zal deze meer zijn dan in stijve lagen. De JLD-Dijkstabilisator zal als homogeen element niet geheel met alle vervormingen meebewegen. Daar waar de JLD-Dijkstabilisator minder naar beneden beweegt als de omliggende grond, zal er sprake zijn van een extra bovenbelasting. Daar waar de JLD-Dijkstabilisator meer naar beneden beweegt als de omliggende grond, zal er sprake zijn van een opwaartse belasting.

2.3 Deelvraag 3: veilig omgaan met vervormingen in het ontwerp

Berekening sterkte en snedekrachten – methode PPE

Onderdeel van de ontwerpmethodologie van de JLD-Dijkstabilisator is het uitvoeren van eindige elementen berekeningen (PLAXIS). De berekeningen worden uitgevoerd volgens de richtlijnen die onlangs zijn opgesteld als onderdeel van de POV-M publicatie *EEM toepassen binnen het ontwerp* (POV-M, 2018), afgekort tot PPE. Middels deze PLAXIS berekeningen wordt een stabiliteitsfactor bepaald en worden de snedekrachten in de constructie berekend. De methode betreft een relatief snelle berekeningswijze, waarin de invloed van vervormingen van de kering op de constructie is meegenomen.

De werkwijze van de modellering bestaat globaal uit de volgende aspecten:

- Modelleren van de belastinggeschiedenis van de dijk voor de versterking;
- Modelleren van de versterkingsmaatregel (JLD-Dijkstabilisator);
- Modelleren van 100 jaar kruip;
- Bepalen van de vervormingen als gevolg van de maatgevende situatie;
- Bepalen van de geotechnische stabiliteit en het uitvoeren van de constructieve toets bij de maatgevende situatie.

De berekeningen worden uitgevoerd met karakteristieke sterkte- en stijfheidsparameters om de spanningen in het model realistisch op te bouwen. Nadat de maatgevende situatie wordt gesimuleerd, wordt de overstap gemaakt naar rekenwaarden van de sterkte.

De zettingen worden in de modellering meegenomen door de geometrie gedurende de gehele levensduur gelijk te houden. Hiermee wordt een continue ophoging van de kering gemodelleerd. De zettingen die in een fase van de PLAXIS-berekening optreden worden na elke fase gecompenseerd.

De aanpak in deze methode, met betrekking tot het vervormingsgedrag, is gestoeld op een aanpak voor damwandconstructies. Deze aanpak is binnen het PPE vervolgens ook toegepast op andere constructieve dijkversterkingsmethoden, waaronder de JLD-Dijkstabilisator.

Vervormingsmodel

In de ontwerpmethodologie van de JLD-Dijkstabilisator zijn, naast het uitvoeren van de berekeningen volgens het PPE, tevens vervormingsberekeningen opgenomen. Deze vervormingsberekeningen hebben tot doel om een verwachting te geven van vervormingen van de kering en de vervormingen rond de kopplaat. Daarnaast wordt het model gebruikt om een inschatting te geven van de onderhoudsinspanning die benodigd is voor de voorspanning gedurende de levensduur van de JLD-Dijkstabilisator.

In het vervormingsmodel zijn alle aspecten die invloed hebben op de vervorming van de kering en van de JLD-Dijkstabilisator meegenomen in de modellering. Hiermee wordt een zo realistisch mogelijke voorspelling gegeven van de vervormingen en het benodigde beheerinspanning voor de voorspanning. In dit model zijn de volgende aanvullende aspecten beschouwd ten opzichte van het sterkte- en snedekrachtenmodel volgens de methode uit de PPE:

- De ophogingen (bij Watergraafsmeer enkel van de kruin, meerdere ophogingen gedurende de levensduur);
- Het herspannen van de JLD-Dijkstabilisator, zodat de voorspanning tussen de vooraf gekozen onder- en bovengrens blijft (iteratief proces om te bepalen wanneer de JLD-Dijkstabilisator opnieuw afgespannen dient te worden, tevens zijn er meerdere afspanmomenten gedurende de levensduur).

Het vervormingsmodel wordt in de basis uitgevoerd met verwachtingswaarden van de sterkte- en stijfheidsparameters. Hiermee wordt een betere inschatting verkregen van de vervormingen. Als aanvulling op deze basisberekening worden verschillende gevoeligheidsberekeningen uitgevoerd op de stijfheidsparameters om hiermee een bandbreedte te krijgen rond de verwachtingswaarden van de vervormingen. In Tabel 2-1 zijn de twee typen modellen met elkaar vergeleken.

Tabel 2-1 Vergelijk tussen het sterkte- en snedekrachtenmodel en het vervormingsmodel

	Sterkte- en snedekrachtenmodel	Vervormingsmodel
Doel	Bepalen van de geotechnische stabiliteit en de snedekrachten in de constructie	Bepalen van de vervormingen rond de kopplaat en de beheerinspanning op de voorspanning
Richtlijn	PPE	Geen
Zichtperiode	100 jaar	100 jaar
Kruinophogingen	Gemodelleerd door de geometrie gelijk te houden gedurende 100 jaar	Gemodelleerd met een fysieke ophoging in aparte fases
Afspannen JLD-Dijkstabilisator	Na aanbrengen JLD-Dijkstabilisator en na modelleren 100 jaar kruip	Zodra de voorspanning onder de ondergrens komt (iteratief bepaald)
Sterkte- en stijfheidsparameters	Opbouwen spanningen: laag karakteristieke sterkte- en stijfheidsparameters Geotechnische en constructieve toets: gereduceerde sterkte- en stijfheidsparameters (rekenwaarden)	Gemiddelde sterkte- en stijfheidsparameters + gevoeligheidsberekeningen op de sterkte- en stijfheidsparameters

3 Aanpak

In de onderstaande paragrafen is per deelvraag de aanpak beschreven die is gevolgd om de deelvragen te beantwoorden.

3.1 Deelvraag 1: effect veenoxidatie op de JLD-Dijkstabilisator

De kans dat veenoxidatie kan optreden verschilt sterk per locatie en dient daarom voor iedere locatie apart beschouwd te worden. In de Watergraafsmeer kan bij een zeer lage grondwaterstand in een droge periode beperkt veenoxidatie optreden ter plaatse van het binnentalud en het achterland.

De invloed van veenoxidatie op de JLD-Dijkstabilisator is kwalitatief beschouwd voor de situatie bij Watergraafsmeer. Het effect van veenoxidatie op de JLD-Dijkstabilisator kan mogelijk worden onderzocht door het toepassen van een volumecontractie op de veenlaag in het PLAXIS vervormingsmodel.

3.2 Deelvraag 2: effect zetting en kruip op de JLD-Dijkstabilisator

Een waterkering versterkt met de JLD-Dijkstabilisator is onderhevig aan zetting en kruip veroorzaakt door ophogingen en door de voorspanning in de JLD-Dijkstabilisator. De zetting en kruip, veroorzaakt door de twee typen spanningstoename, beïnvloeden elkaar. Het effect van beide typen vervorming op de JLD-Dijkstabilisator kan daarom alleen worden beschouwd met een methode die beide effecten tegelijkertijd mee kan nemen. Een eindige elementen berekening (PLAXIS) is de enige methode waarin beide effecten samen beschouwd kunnen worden.

Met behulp van het vervormingsmodel, waarin alle mechanismen die van invloed zijn op de vervormingen worden meegenomen, zijn de effecten van zetting en kruip op de JLD-Dijkstabilisator onderzocht.

Een eindige elementen berekening (PLAXIS) is de meest geschikte methode om de vervormingen te onderzoeken en het effect van de vervormingen op de JLD-Dijkstabilisator. Als onderdeel van de pilot Watergraafsmeer zijn monitoring en een postdictie voorzien. De monitoring dient als input voor de postdictie. Op basis van de postdictie worden de voorspellingen middels het vervormingsmodel geverifieerd en gekalibreerd.

3.3 Deelvraag 3: veilig omgaan met vervormingen in het ontwerp

In de ontwerpmethodiek van de JLD-Dijkstabilisator wordt het sterkte- en snedekrachtenmodel conform de methode uit het PPE gebruikt, om de invloed van vervormingen op de snedekrachten in de JLD-Dijkstabilisator te bepalen. Dit is een relatief snelle methode om de snedekrachten in de JLD-Dijkstabilisator aan het einde van de levensduur te bepalen.

Met behulp van een vergelijking tussen het sterkte- en snedekrachtenmodel en het vervormingsmodel is onderzocht of de snedekrachten berekend met het sterkte- en snedekrachtenmodel aan het einde van levensduur hoger zijn dan de snedekrachten berekend met het vervormingsmodel. Hiermee is gecontroleerd of de snedekrachten berekend met het sterkte- en snedekrachtenmodel conservatief zijn ten opzichte van het vervormingsmodel.

4 Effect veenoxidatie op de JLD-Dijkstabilisator

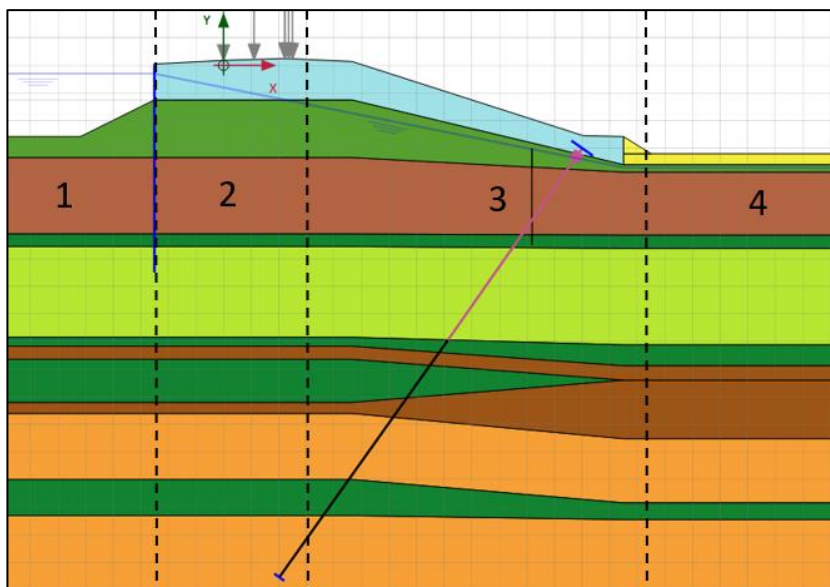
4.1 Kwalitatieve beschouwing

Op de locatie van het pilotproject is een veenlaag in de ondergrond aanwezig (zie Figuur 4-1). Deze veenlaag is overal afgedekt met een kleilaag. De kans dat de grondwaterstand onder de Ringvaart (1) en onder de kruin van de kade (2) lager komt te liggen dan de bovenkant van het veenpakket is zeer klein. Het is daarom niet waarschijnlijk dat op deze locaties veenoxidatie op zal treden.

Bij de Watergraafsmeer is na de lange droge periode in de zomer van 2018 de grondwaterstand gemeten in het binnentalud (3) bij het plaatsen van handboringen en sonderingen. De waterstand lag toen, op enkele locaties, onder de bovenkant van het veenpakket. Het veenpakket ligt onder verschillende kleilagen en staat daarom niet in vrije verbinding met de zuurstof die nodig is om het veen te laten oxideren.

In het achterland (4) ligt het veenpakket niet diep ten opzichte van het maaiveld. Tussen het veenpakket en het maaiveld zijn alleen een wegcunet en een dunne kleilaag aanwezig. Het is hier dus ook reëel dat de grondwaterstand onder de bovenkant van het veenpakket kan komen te liggen. Ondanks de aanwezigheid van de bovenliggende lagen, waardoor de toegang van zuurstof tot de veenlaag wordt beperkt, kan hier incidenteel oxidatie van het veenpakket optreden.

Als er veenoxidatie optreedt dan zal dit dus gebeuren in het achterland en ter hoogte van het LDE (zie Figuur 4-1). De belasting op het LDE neemt door de veenoxidatie toe doordat de veenlaag gedeeltelijk compacter wordt. Het moment en de dwarskracht in het LDE zullen toenemen als gevolg van deze toename in belasting.



Figuur 4-1 Ligging van de JLD-Dijkstabilisator ten opzichte van het veenpakket

4.2 PLAXIS modellering veenoxidatie

De enige manier om het oxideren van veen te modelleren in EEM (PLAXIS) is door een volumecontractie toe te passen. De volumecontractie kan in een apart model worden gemodelleerd waarbij de andere mechanismen die invloed hebben op de vervormingen buiten beschouwing worden gelaten. Het inpassen van een volumecontractie in het vervormingsmodel is echter lastig omdat in dit model ook alle andere mechanismen zijn gemodelleerd. De volumecontractie zou dan in vele fases opgebroken moeten worden om in dit model ingepast te kunnen worden. Het onderzoek naar veenoxidatie middels het modelleren van een volumecontractie in PLAXIS is tot op heden nog niet uitgevoerd.

5 Effect zetting en kruip op de JLD-Dijkstabilisator

In het vervormingsmodel zijn alle mechanismen die invloed hebben op de vervormingen van een met JLD-Dijkstabilisator versterkte waterkering gemodelleerd. Voor de case van Watergraafsmeer is onderzocht welke invloed de vervormingen hebben op de snedekrachten in de elementen van de JLD-Dijkstabilisator. Het vervormingsmodel is globaal opgebouwd uit de volgende stappen:

- Modelleren van de belastinggeschiedenis van de dijk voor de versterking;
- Aanbrengen van de JLD-Dijkstabilisator;
- Aanbrengen voorspanning JLD-Dijkstabilisator;
- Consolidatie tot $t = 2$ jaar;
- Herspannen JLD-Dijkstabilisator;
- Consolidatie tot $t = 5$ jaar;
- Op hoging kruin ($t = 5$ jaar);
- Consolidatie tot $t = 9$ jaar;
- Herspannen JLD-Dijkstabilisator;
- Consolidatie tot $t = 32$ jaar;
- Herspannen JLD-Dijkstabilisator;
- Consolidatie tot $t = 55$ jaar;
- Op hoging kruin ($t = 55$ jaar);
- Consolidatie tot $t = 100$ jaar;

In dit hoofdstuk is per element onderzocht hoe de snedekrachten veranderen, onder invloed van vervormingen, gedurende de levensduur.

5.1 Klapanker

De ontwikkeling van de snedekrachten in het klapanker in de tijd is weergegeven in Tabel 5-1. Uit deze resultaten blijkt dat de snedekrachten afnemen onder invloed van kruip. De snedekrachten nemen toe bij het herspannen van de JLD-Dijkstabilisator tot hetzelfde niveau als na de voorgaande keer herspannen. De netto toename door het herspannen en de invloed van kruip is in Watergraafsmeer 0%. Door de zetting als gevolg van een kruinophoging neemt de normaalkracht beperkt toe (circa +3%) en nemen de dwarskracht en het moment beperkt af (0 tot -2%). Dit komt doordat de kruinophoging klein van omvang is (35 cm ophoging) en de afstand tussen de ophoging en de JLD-Dijkstabilisator relatief groot is. De spanningstoename als gevolg van de kruinophoging is hierdoor beperkt.

De snedekrachten nemen gedurende de levensduur af onder invloed van zetting en kruip. Alleen door het aanspannen of herspannen van de JLD-Dijkstabilisator nemen de snedekrachten in het klapanker toe. Het effect van zettingen en kruip op het klapanker, voor de situatie bij Watergraafsmeer, is een afname van de snedekrachten.

Tabel 5-1 Ontwikkeling van snedekrachten in het klapanker in de tijd

Tijd [jaren]	Normaalkracht [kN]	Dwarskracht [kN]	Moment [kNm]
0	3,9	30,3	4,5
2 – voor herspannen	3,5	16,2	2,3
2 – na herspannen	3,9	30,3	4,5
5 – voor ophogen	3,6	19,5	2,8
5 – na ophogen	3,7	19,3	2,8
9 – voor herspannen	3,6	16,0	2,3
9 – na herspannen	4,0	30,3	4,5
32 – voor herspannen	3,7	15,3	2,2
32 – na herspannen	4,0	30,3	4,5
55 – voor ophogen	3,8	21,0	3,0
55 – na ophogen	3,9	20,7	3,0
100	3,8	15,4	2,2

5.2 Trekstang

De ontwikkeling van de normaalkracht in de trekstang in de tijd is weergegeven in Tabel 5-2. Uit deze resultaten blijkt dat de normaalkracht afneemt onder invloed van kruip. De normaalkracht neemt weer toe door het herspannen van de JLD-Dijkstabilisator. Door de zetting als gevolg van een kruinophoging neemt de normaalkracht in beperkt mate af.

Tabel 5-2 Ontwikkeling van normaalkracht in de trekstang in de tijd

Tijd [jaren]	Normaalkracht [kN]
0	60,0
2 – voor herspannen	31,8
2 – na herspannen	60,0
5 – voor ophogen	38,4
5 – na ophogen	38,0
9 – voor herspannen	31,3
9 – na herspannen	60,0
32 – voor herspannen	29,9

Tijd [jaren]	Normaalkracht [kN]
32 – na herspannen	60,0
55 – voor ophogen	41,2
55 – na ophogen	40,8
100	30,0

5.3 LDE

De ontwikkeling van de snedekrachten in het LDE in de tijd is weergegeven in Tabel 5-3. Uit deze resultaten blijkt dat de normaalkracht afneemt onder invloed van kruip. De dwarskracht en het moment nemen toe als gevolg van kruip. De dwarskracht neemt af door het herspannen van de JLD-Dijkstabilisator. De normaalkracht en het moment nemen toe met circa 10% tot 15% door het herspannen van de JLD-Dijkstabilisator. Door de zetting als gevolg van een kruinophoging neemt de normaalkracht beperkt af en blijven de dwarskracht en het moment gelijk.

Tabel 5-3 Ontwikkeling van snedekrachten in het LDE in de tijd

Tijd [jaren]	Normaalkracht [kN]	Dwarskracht [kN]	Moment [kNm]
0	60,0	1,2	1,6
2 – voor herspannen	31,8	1,8	2,0
2 – na herspannen	60,0	1,6	2,9
5 – voor ophogen	38,4	2,2	3,1
5 – na ophogen	38,0	2,2	3,1
9 – voor herspannen	31,3	2,2	3,1
9 – na herspannen	60,0	1,9	3,5
32 – voor herspannen	30,6	2,2	3,9
32 – na herspannen	60,0	2,2	4,1
55 – voor ophogen	41,2	2,5	4,4
55 – na ophogen	40,8	2,5	4,4
100	31,6	2,5	4,4

De dwarskracht en het moment nemen gedurende de levensduur toe. Aan het einde van de levensduur zijn de dwarskracht en het moment in het LDE maximaal. Het effect van zettingen en kruip op het LDE, voor de situatie bij Watergraafsmeer, is een toename van de dwarskracht en het moment.

5.4 Kopplaat (LDP)

De ontwikkeling van de snedekrachten in de kopplaat in de tijd is weergegeven in Tabel 5-4. Uit deze resultaten blijkt dat de normaalkracht toeneemt en de dwarskracht en het moment afnemen onder invloed van kruip. Het herspannen van de JLD-Dijkstabilisator heeft het omgekeerde effect op de snedekrachten. Door de zetting als gevolg van een kruinophoging blijven de snedekrachten in de kopplaat gelijk.

Tabel 5-4 Ontwikkeling van snedekrachten in de kopplaat in de tijd

Tijd [jaren]	Normaalkracht [kN]	Dwarskracht [kN]	Moment [kNm]
0	3,1	25,9	6,9
2 – voor herspannen	5,4	13,7	4,1
2 – na herspannen	4,4	26,5	7,1
5 – voor ophogen	5,4	16,9	4,9
5 – na ophogen	5,4	16,9	4,9
9 – voor herspannen	5,7	14,5	4,2
9 – na herspannen	4,8	26,0	7,2
32 – voor herspannen	5,8	14,9	4,2
32 – na herspannen	4,9	26,4	7,4
55 – voor ophogen	5,9	18,6	5,4
55 – na ophogen	5,9	18,7	5,4
100	5,8	15,8	4,5

De normaalkracht in de kopplaat neemt toe gedurende de levensduur. De optredende normaalkracht zit echter ver onder de normaalkrachtcapaciteit van de kopplaat en is hierdoor niet leidend in het ontwerp. De dwarskracht en het moment nemen gedurende de levensduur af onder invloed van zetting en kruip. Alleen door het aanspannen of herspannen van de JLD-Dijkstabilisator nemen de dwarskracht en het moment in de kopplaat toe. Het effect van zettingen en kruip op de kopplaat, voor de situatie bij Watergraafsmeer, is een toename van de normaalkracht en een afname van de dwarskracht en het moment.

5.5 Monitoring en postdictie Watergraafsmeer

In het DO van Watergraafsmeer zijn middels het vervormingsmodel voorspellingen gemaakt van de te verwachte vervormingen van de kering en de JLD-Dijkstabilisator. De Watergraafsmeer is een pilotproject waarbij het hoofddoel is om, naast het versterken van de kering, te leren van de ervaringen met deze dijkversterkingsmethode. Om die reden is in de pilot extra monitoring voorzien. De monitoring die benodigd is voor het definitief beantwoorden van de onderzoeksvraag bestaat uit:

- LDE Middels SAAF metingen worden de vervormingen van het LDE gemeten. De gemeten vervormingen worden vertaald naar dwarskrachten en momenten in het LDE.
- Geometrie kering Door het herhaaldelijk inmeten van het profiel van de kering worden de voorspelde vervormingen vergeleken met de daadwerkelijk opgetreden vervormingen.
- Kopplaat Door het herhaaldelijk inmeten van de kopplaat worden de voorspelde vervormingen vergeleken met de daadwerkelijk opgetreden vervormingen (vervorming richting het klapanker, vervorming richting de binnenteen en eventuele rotatie).
- Voorspanning De voorspanning beïnvloedt de vervormingen van de JLD-Dijkstabilisator en van de kering. Voor het optimaliseren van de modelleringen van de vervormingen zijn de meetgegevens van de voorspanning benodigd.
- Peilbuizen Hiermee wordt de stijghoogte gemeten die als input dient voor het vervormingsmodel.
- Neerslag Gegevens van de neerslag zijn benodigd om de waterspanningen in de dijk te bepalen en verklaren.
- Waterspanningen De waterspanningen dienen als input voor het vervormingsmodel

Op basis van de resultaten van de monitoring dient een postdictie uitgevoerd te worden op de modellen die zijn gebruikt om de vervormingen te voorspellen. In deze postdictie worden de voorspellingen vergeleken met de daadwerkelijk opgetreden vervormingen (en snedekrachten). De postdictie kan er toe leiden dat instellingen in de modellen aangepast worden (parameters of andere modelinstellingen) of de gevolgde methode (fasering, schematisering en aanpak). Door het uitvoeren van de postdictie kunnen de voorspellingen van de vervormingen en het gedrag van de JLD-Dijkstabilisator in de waterkering worden verbeterd.

Na het uitvoeren van de postdictie kan, op basis van bevindingen uit de postdictie, deze onderzoeksvraag opnieuw worden beschouwd.

6 Omgang vervormingen in ontwerp

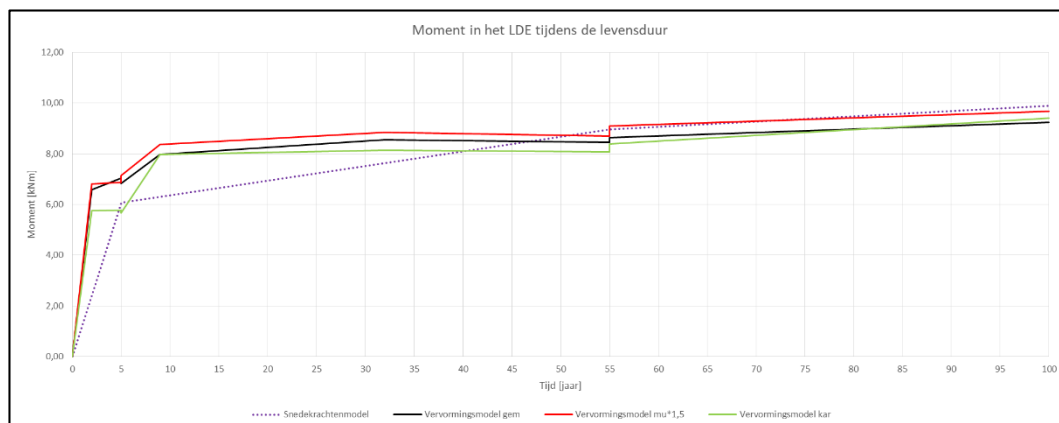
Bij de analyses die zijn uitgevoerd voor het beantwoording van deelvraag 2 (zie hoofdstuk 5) is gebleken dat de normaalkracht in de kopplaat en de dwarskracht en het moment in het LDE toenemen gedurende de levensduur onder invloed van zettingen en kruip. De berekende normaalkrachten in de kopplaat zitten dusdanig ver onder de normaalkrachtcapaciteit dat deze kracht nooit maatgevend kan worden in het ontwerp. De dwarskracht en het moment in het LDE lopen in gelijke mate op onder invloed van de zetting en kruip. In het ontwerp van de Watergraafsmeer is gebleken dat het moment in het LDE maatgevend is ten aanzien van de sterkte die aan de waterkering kan worden toegevoegd door toepassen van de JLD-Dijkstabilisator. Voor de beantwoording van deelvraag 3 is daarom gekeken naar de toename van het moment in het LDE onder invloed van zetting en kruip.

Met behulp van een vergelijking tussen het sterkte- en snedekrachtenmodel en het vervormingsmodel is onderzocht of de snedekrachten berekend met het sterkte- en snedekrachtenmodel aan het einde van levensduur hoger zijn dan de snedekrachten berekend met het vervormingsmodel. In de analyse is voor het maatgevende dwarsprofiel in de Watergraafsmeer een vergelijking gemaakt van het moment in het LDE berekend met het sterkte- en snedekrachtenmodel en het vervormingsmodel. Hierbij is het vervormingsmodel berekend met verwachtingswaarden van de sterkte- en stijfheidsparameters en zijn er tevens gevoeligheidsberekeningen uitgevoerd op de stijfheidsparameters. De volgende gevoeligheidsberekeningen zijn er uitgevoerd:

- Laag karakteristieke sterkte- en stijfheidsparameters de parameters zijn hiermee gelijk aan de parameters die worden gehanteerd in het sterkte- en snedekrachtenmodel
- Kruip parameter van de stijfheid verhoogd met een factor 1,5 ($\mu \times 1,5$) hiermee is de invloed van veenoxidatie op de JLD-Dijkstabilisator verdisconteerd

In het vervormingsmodel zijn op verschillende momenten drie extra fasen toegevoegd voor het modelleren van de extreme omstandigheden. Het toevoegen van de extreme omstandigheden in het vervormingsmodel zorgt ervoor dat de snedekrachten berekend met dit model vergeleken kunnen worden met de snedekrachten berekend in het sterkte- en snedekrachtenmodel. De eerste extra fase bestaat uit de overstap van gemiddelde parameters naar karakteristieke parameters in combinatie met de overstap naar de hoogwater situatie. De tweede extra fase bestaat uit de overstap naar rekenparameters. De derde extra fase bestaat uit de constructieve toets, waarin de rekenparameters nog verder zijn verlaagd (verlaging met het product van de minimaal benodigde schadefactor en de modelfactor). De in dit hoofdstuk gepresenteerde snedekrachten komen uit de constructieve toets fase.

In Figuur 6-1 zijn de resultaten van berekeningen weergegeven. Hieruit blijkt dat de momenten berekend met de vervormingsmodellen tot vlak voor het einde van de levensduur maatgevend zijn ten opzichte van het moment dat is berekend met het sterkte- en snedekrachtenmodel. Aan het einde van de levensduur is het moment uit het sterkte- en snedekrachtenmodel echter hoger dan de momenten uit de vervormingsmodellen. Het moment dat wordt berekend met het sterkte- en snedekrachtenmodel na 100 jaar wordt gebruikt voor de constructieve toets van de JLD-Dijkstabilisator. Daarnaast worden op de snedekrachten, die worden verkregen met behulp van het sterkte- en snedekrachtenmodel, veiligheidsfactoren toegepast om onzekerheden af te dekken. Het toepassen van het sterkte- en snedekrachtenmodel is hiermee een conservatieve benadering voor het toetsen van de veiligheid van de kering versterkt met de JLD-Dijkstabilisator.



Figuur 6-1 Overzicht van het moment in het LDE element tijdens de levensduur op basis van verschillende berekeningen.

7 Conclusies en beantwoording onderzoeksvraag

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.

De hoofdvraag van deze onderzoeksvraag luidt: Wat zijn de effecten van vervormingen door kruip en zettingen, veroorzaakt door kruinophogingen gedurende de levensduur, op de werking van de JLD-Dijkstabilisator?

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

1. Wat zijn de effecten van kruip, als gevolg van veenoxidatie, op de werking van de JLD-Dijkstabilisator?
2. Wat zijn de effecten van vervormingen die worden veroorzaakt door kruinophogingen gedurende de levensduur van het ontwerp op de werking van de JLD-Dijkstabilisator?
3. Hoe dient in het ontwerp omgegaan te worden met bovenstaande aspecten om de veiligheid van een waterkering versterkt met de JLD-Dijkstabilisator gedurende de levensduur te garanderen?

Wat zijn de effecten van kruip, als gevolg van veenoxidatie, op de werking van de JLD-Dijkstabilisator? (deelvraag 1)

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 maaiveldaling 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.

Wat zijn de effecten van vervormingen die worden veroorzaakt door kruinophogingen gedurende de levensduur van het ontwerp op de werking van de JLD-Dijkstabilisator? (deelvraag 2)

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 twee kruinophogingen meegenomen.

Uit de berekeningen volgt 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.

Hoe dient in het ontwerp omgegaan te worden met bovenstaande aspecten om de veiligheid van een waterkering versterkt met de JLD-Dijkstabilisator gedurende de levensduur te garanderen? (deelvraag 3)

De huidige ontwerpmethode van de JLD-Dijkstabilisator conform de 'POV-M publicatie eindige elementen methoden' (POV-M, 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 Verwijzingen

NEN. (2016). *NEN 9997-1: Geotechnisch ontwerp van constructies - Deel 1: Algemene regels.*
POV-M. (2018). *POV-M publicatie EEM toepassen binnen het ontwerp.*

Contactgegevens

Antea Group

Rivium Westlaan 72
2909 LD CAPELLE A/D IJSSEL
Postbus 8590
3009 AN ROTTERDAM

E. www.anteagroup.nl

JLD Contracting BV

Wieder 23
1648 GA DE GOORN
Postbus 144
1135 ZK EDAM

E. www.JLDcontracting.com