

Beschrijving en conclusies Eemdijkproef

Breedevelt, Joost; Post, Mark; de Bruijn, Huub; Lengkeek, Arny; Naves, Thomas

Publication date

2018

Document Version

Final published version

Published in

Geotechniek

Citation (APA)

Breedevelt, J., Post, M., de Bruijn, H., Lengkeek, A., & Naves, T. (2018). Beschrijving en conclusies Eemdijkproef. *Geotechniek*, 22(4), 46-49.

https://issuu.com/uitgeverijeducom/docs/geotechniek.dec2018_lowres

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.



Joost Bredeveld
Deltares



Mark Post
Deltares



Huub de Bruijn
Deltares



Arny Lengkeek
Delft University
of Technology &
Witteveen+Bos

Thomas Naves
Witteveen+Bos

BESCHRIJVING EN CONCLUSIES EEMDIJKPROEF

In Nederland werken Rijk en waterschappen intensief samen om via o.a. dijkversterkingen het land te beschermen tegen overstromingen. Binnen het huidige dijkversterkingsprogramma betreft het aantal kilometers te versterken dijk vanwege onvoldoende dijkstabiliteit 287 km, waarvan aan 69.5 km een hoge urgentie is toegekend en opgenomen in de programmering 2015-2020.

Om deze versterkingen kwalitatief beter, sneller uitvoerbaar en goedkoper te maken is in 2015 de POV|Macrostabiliteit (POVM) opgezet. Binnen dit onderzoeksprogramma hebben waterschappen, bedrijfsleven en kennisinstituten gezamenlijk naar innovaties gezocht om de macrostabiliteit bij dijken op slappe grond effectiever te kunnen aanpakken. Een al veelvuldig toegepaste versterkings-maatregel voor een onder hoogwater condities instabiele dijk, die naar verwachting ook in de toekomst relevant blijft, is een stabiliteit-verhogende wand in de vorm van een stalen damwand (zie figuur 1). Deze maatregel spaart bebouwing of andere waarden, maar is wel een relatief dure vorm van dijkversterking. Bij dit type versterkingsconstructie kunnen in principe grotere vervormingen worden toegelaten, zonder dat dit direct leidt tot functieverlies.

De hoge kosten hangen ten eerste samen met de conservatief ingestoken veiligheidsfilosofie opgenomen in de huidige richtlijn voor het met een EEM-rekenmodel ontwerpen van stabiliteit-

verhogende stalen damwanden belast door hoogwater. Zo leidt de eis, dat de damwand geen barrière mag vormen voor het grondwaterregime in de dijk, in het algemeen tot een discontinue wandconstructie opgebouwd uit gekoppelde panelen van meerdere planken in plaats van een doorgaande wand. Hierbij dient in verband met het discontinue karakter van de wand een 10% lagere wandsterkte te worden aangehouden. Een tweede oorzaak voor de hoge kosten zijn strenge eisen in de huidige richtlijn, die veelal een zware (verankerde) damwand noodzakelijk maken welke de waterkerende functie eigenlijk volledig overneemt. Zo gelden strenge vervormingseisen in de te beschouwen grenstoestanden, die bij een niet-constructief versterkte dijk niet van toepassing zijn. Zo dienen in de bruikbaarheidsgrenstoestand de kruinzakking en horizontale verplaatsing van de constructie kleiner dan 0,10 m te zijn. Ook mag voor damwandprofielen in de doorsnede-klassen 1 en 2, in tegenstelling tot Eurocode NEN-EN1993-5, enkel de elastische momentcapaciteit worden benut.

Een belangrijke constatering hierbij is dat de conservatief ingestoken veiligheidsfilosofie en de strenge eisen mede ingegeven zijn door het feit, dat het aan betrouwbaar inzicht in het werkelijke gedrag van deze constructief versterkte dijk onder hoogwater- en opdrijfcondities ontbreekt. Deze extreme condities treden immers zelden op. Daarmee ontbreekt ook validatie van het sterkte- en

vervormingsgedrag in het EEM-rekenmodel, wat het leggen van de juiste relatie tussen het voor-geschreven en in de analyse gerealiseerde betrouwbaarheidsniveau onmogelijk maakt. Dit heeft tot nu toe de wenselijk geachte aanscherping van de huidige aanpak bemoeilijkt.

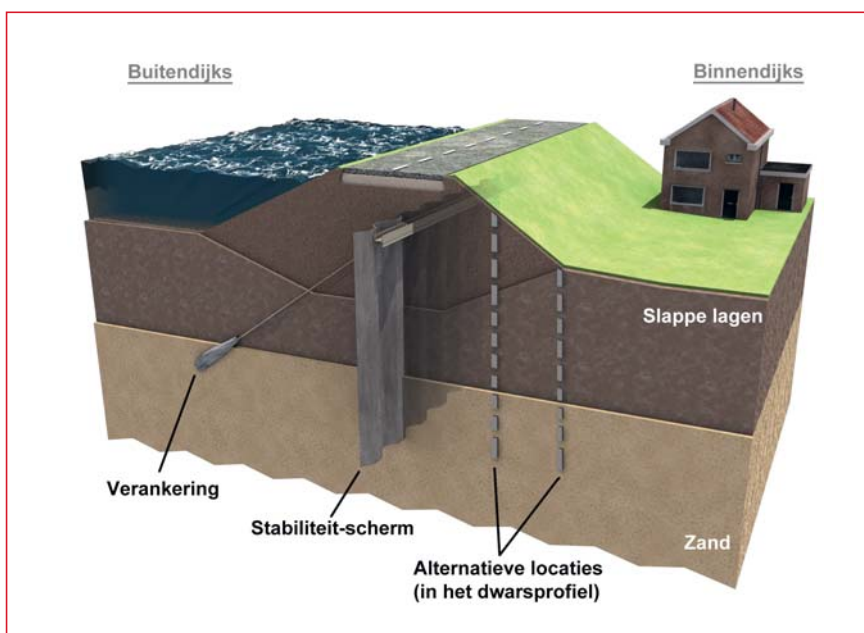
EEMDIJKPROEF

Wat betreft stalen damwanden als stabiliteit-verhogende constructie heeft het onderzoek binnen de POV|Macrostabiliteit zich gericht op de hypothese, dat meer inzicht in de werkelijke grond-constructie-interactie bij en het resulterende gedrag van de versterkingsmaatregel een lichter (en dus flexibeler) ontwerp mogelijk maakt. Hierdoor wordt het gedrag van de damwand minder bepalend voor dat van de dijk; doordat staal en grond meer samenwerken wordt de constructie substantieel goedkoper. Dit heeft geleid tot de drie doelstellingen voor het onderzoek:

- het in kaart brengen van het werkelijke sterkte- en stijfheidsgedrag van de constructief versterkte dijk tot na bezwijken.
- het vaststellen van de mate waarin de beschikbare rekenmodellen het gedrag kunnen voorspellen.
- het verzamelen van een betrouwbare en complete case, zodat huidige en toekomstige ontwerp aanpakken rekentechnisch kunnen worden gevalideerd.

Het uiteindelijke programma van de EEMdijkproef bestond uit 4 proeven:

- Om de onderzoekshypothese te bewijzen is een onderzoeksprogramma opgetuigd rondom een full-scale bezwijkproef op een dijk versterkt met een onverankerde doorgaande stalen damwand. Met als belangrijk uitgangspunt, dat inzicht in het bezwijkgedrag van de versterkte dijk (i.e. systeemgedrag) alleen is te vergaren als er ook voldoende inzicht wordt verkregen in de grond-constructie-interactie van de damwand met de omringende grond tot aan bezwijken (i.e. elementgedrag). Het onderzoeksprogramma heeft daarom naast de full-scale bezwijkproef op een versterkte dijk (Figuur 2 NO-kant, ook aangeduid als FST blauw) ook uit andere grootschalige onderdelen bestaan.
- Wat betreft het systeemgedrag is bij vergelijkbare extreme condities een full-scale bezwijkproef op een niet versterkte gronddijk uitgevoerd (Figuur 2, ZW-kant, ook aangeduid als FST groen). Het gedrag van de niet versterkte dijk heeft in feite als referentie gediend voor dat van de versterkte dijk.



Figuur 1 –
Toepassing
verankerde
damwand als
constructieve
dijkversterking.

Samenvatting

125 woorden!

De meest prangende onderzoeksvragen over het elementgedrag betroffen:

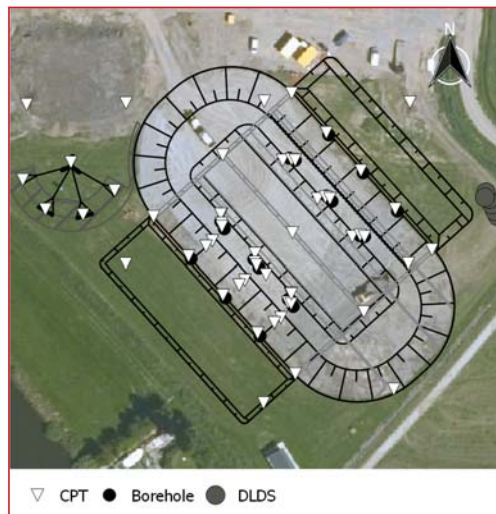
- De interactie tussen een onverankerde damwandplank en de omringende grond, in het bijzonder als deze is opgebouwd uit panelen en er lokaal plastisch bezwijken heeft plaatsgevonden. Dit heeft geleid tot vier pullover testen (Zie figuur 2, W-kant, aangeduid als POT) op verschillende panelen van meerdere damwandplanken.
- De reststerkte van de grond na het bezwijken van het binnentalud van de constructief versterkte dijk. Hiertoe is er uitgebreid veld- en laboratoriumonderzoek uitgevoerd waarin naast Triaxiaal en DSS proeven op grote klei- en veenmonsters ook proeven met grote rekken middels een cyclische belasting zijn onderzocht (zie figuur 2, O-kant, aangeduid als DLDS).

Met het oog op de onderzoeksdoelstellingen, zijn vooraf onder andere de volgende kennisvragen geformuleerd:

- Wat zijn de vervormingen van de beide proefdijken tot aan het bezwijken? De aan deze vraag gerelateerde monitoring heeft zich gericht op het deformatieverloop in de tijd van kruin, binnentalud (inclusief damwandkop) en ontgraving. In het binnentalud en over de damwandlengte is het deformatieverloop ook in de diepte gemeten. Voor en na bezwijken van de proefdijken is de dwarsdoorsnede (met restprofiel tot in de ontgraving) uitgebreid ingemeten.
- In hoeverre gedraagt een in grond ingebedde damwandplank na ontstaan van een plastisch scharnier zich volgens de NEN-EN1993-5? De aan deze vraag gerelateerde monitoring heeft zich gericht op het verloop van de deformatiemetingen in de tijd van maaiveld (binnentalud) en damwandkop. Verder is in de grond en over de damwandlengte het deformatieverloop gemeten. Tot slot is over het relevante deel van de planklengte het rekverloop in de tijd in het damwandprofiel gevolgd.
- Welke invloed heeft het (dis)continue karakter en de mate van inbedding van de wand op de doorsnedeklasse volgens NEN-EN1993-5? De monitoring gerelateerd aan deze vraag heeft zich gericht op het vastleggen van verschillen qua verloop in de tijd van deformaties op/in de grond en over de wandlengte, en van de rekken in het damwandprofiel.

GRONDONDERZOEK EN MONITORING

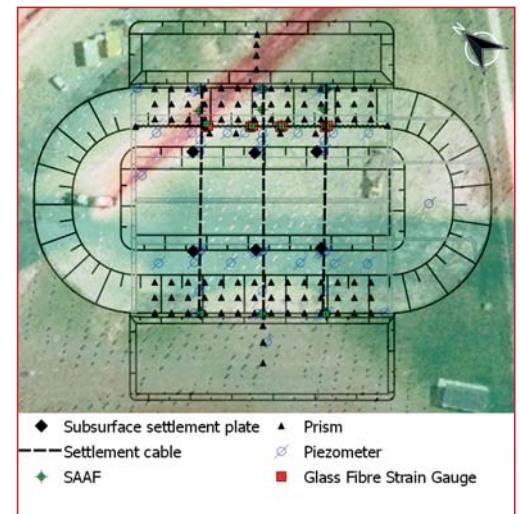
Het vooraf karakteriseren van de proeflocatie vond met sonderingen en boringen plaats, terwijl het afleiden van verwachtingswaarden voor sterkte-



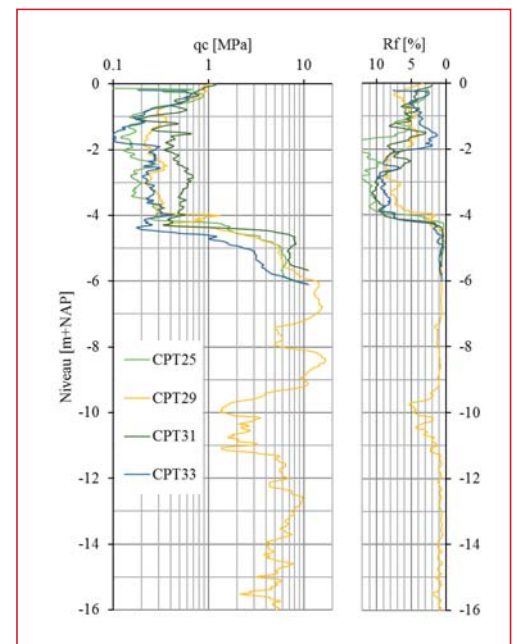
Figuur 2 – Bovenaanzicht proefterrein met contour van de dijk en ontgraving en de grond-onderzoekslocaties. De damwand versterkte dijk (FST-blauw) ligt aan de NO-kant.

en stijfheidsparameters van grondlagen en damwandplanken in het ontwerp met laboratoriumonderzoek op monsters plaatsvond. Het initiële grondwaterregime op de proeflocatie is in kaart gebracht met voor de aanleg aangebrachte water-spanningsmeters. Zowel tijdens de aanleg van de proefdijken als juist voor, tijdens en juist na de bezwijkproeven vond een uitgebreide monitoringscampagne naar geotechnische en constructieve aspecten in meerdere meetraaien plaats (zie Figuur 3), om tot een complete case voor validatie te komen.

De ondergrond bestaat uit een 4,5m dik Holocene pakket van klei- en veenlagen met daaronder Pleistocene zand en kleilagen. In figuur 4 zijn vier sonderingen weergegeven, waarbij sondering 25 en 29 representatief zijn voor het projectgebied. In tabel 1 zijn de geotechnische lagen weergegeven. De ondergrond kan als homogeen worden beschreven, maar met twee belangrijke uitzonderingen. Ten eerste heeft onder de geprojecteerde kruin van de "groene" dijk een oude zomerkade gelegen waardoor de ondergrond is voorbelast. Dit is ook te zien op de AHN en de infrarood kaart aan het kleurverschil (donkergroen in Figuur 3). Als gevolg van de voorbelasting is de conusweerstand in sondering 31 ca 0,5 MPa in zowel de klei- als veenlaag. Ten tweede is een tussenlaag aangetroffen aan de teen van de "groene" dijk. Deze slappe siltige kleilaag (3a) kon alleen goed worden onderkend met Klasse 1 sonderingen (Eurocode NEN-EN-ISO 22476-1). De conusweer-



Figuur 3 – Meetcampagne aanleg- en proeffase full-scale proeven.



Figuur 4 – Representatieve sonderingen.

stand in sondering 33 is ca 0,1 MPa op een diepte van -1,5m NAP. Vervolgens is ook in het laboratoriumonderzoek vastgesteld dat de classificatie parameters van deze laag wezenlijk anders zijn. Het laboratoriumonderzoek bestond verder uit een uitgebreid programma aan Direct Simple Shear (DSS) proeven, anisotroop geconsolideerde ongedraineerde Triaxiaalproeven (ACU) en Constant Rate of Strain proeven (K0-CRS) ter bepaling van de stijfheid en sterkte parameters. Met deze proeven zijn parameters bepaald voor verschillende rekenprogramma's en verschillende constitutieve modellen, waaronder het nieuwe NGI-ADP-

SHANSEP model in Plaxis.

Het primaire doel van de geotechnische monitoring tijdens de aanleg was het zo snel en zo veilig mogelijk (i.e. zonder stabiliteitsverlies) in 8 lagen van 0,5 m tot 1 m dikte aanbrengen van de proefdijken (zie Figuur 5). Het verloop van de resulterende zettingen tijdens de aanleg is gevolgd met zakbakens en zettingsmeetplaatjes, terwijl dat van de horizontale gronddeformaties met inclinometers in kaart is gebracht. De ontwikkeling van de schuifsterkte is uit het verloop van water-(over)spanningen en periodieke klasse 1 sonderingen gevolgd. De aanpak in de geest van de Observational Method (i.e. continue vergelijken van gemeten en met rekenmodellen voorspelde zettingen en consolidatie) gaf daarbij verscherpt inzicht in de werkelijke eigenschappen van de ondergrond.

PULLOVER TEST

In vier pullover tests (POT, zie Figuur 6) zijn verschillende panelen van meerdere damwandplanken aan de kop omver getrokken, om de grond-constructie-interactie na ontstaan van een plastisch scharnier in de damwand te onderzoeken. Hierbij zijn een GU8N triplet in de sterke richting (2 flenzen op druk), een GU8N triplet in de zwakke richting (1 flens op druk), een paneel van drie dubbele AZ13-700 planken en een paneel van drie dubbele AZ26 planken tot bezwijken belast. Het omver trekken vond plaats door het (met een constante snelheid) intrekken van een hydraulische vijzel vanaf een reactieframe. De AZ26 is een doorsnedeklasse 2 profiel conform NEN-EN1993-5, de andere damwanden zijn een doorsnedeklasse 3 profiel.

De trekkracht is met een trekkrachtmeter op de vijzel gemeten, waarbij de vijzelverplaatsing met een optische sensor is vastgelegd. Het deformatieverloop in de tijd is gevolgd via een Total-Station, die prisma's op het maaiveld voor het paneel en op twee niveaus op het paneel gedurende de proeven heeft ingemeten (zie figuur 6). Het deformatieverloop in de diepte is met SAAF's (i.e. Shape Accel Array Fields) in de neutrale lijn van de damwand en in de grond juist voor de damwand gemonitord. Tot slot is het rek-verloop in de diepte over een groot deel van de damwandlengte met glasvezelsensoren in de druk- en trekflens gevolgd. Na de vier pullover tests zijn de damwand-planken uitgegraven en zijn 3D laserscans tot juist onder de bezwijkpunten gemaakt.

De invloed van de mate van discontinuïteit op de grond-constructie-interactie is onderzocht door de resultaten voor de smalle GU8N-triplets te vergelijken met die voor de 'doorgaande' panelen van AZ-profielen. Op basis daarvan is geconcludeerd dat bij panelen die bestaan uit minimaal 3-dubbele damwandprofielen er geen negatief effect is op het constructief gedrag. Er is ook nagegaan wat de invloed van de doorsnedeklasse conform NEN-EN 1993-5 is op het gedrag, door het gedrag van het AZ13-700 paneel (doorsnedeklasse 3) en AZ26 paneel (doorsnedeklasse 2) te vergelijken. De proefresultaten bevestigen het verschil in de doorsnedeklasse 2 en doorsnedeklasse 3 profielen. Tot slot is nog de invloed van de belastingrichting op het gedrag onderzocht, door de proefresultaten voor beide GU8N triplet over elkaar heen te leggen.

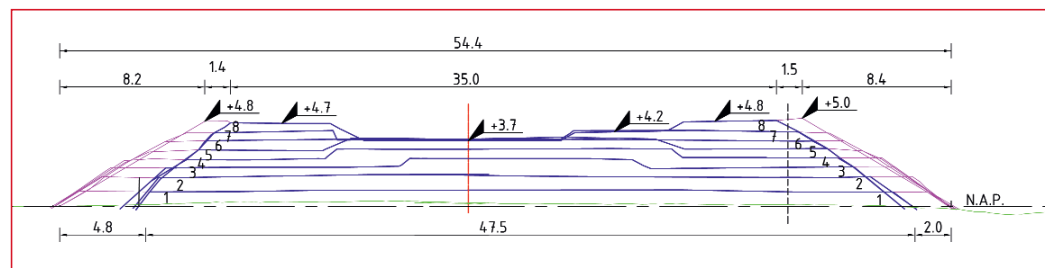
FULL-SCALE BEZWIJKPROEVEN

In beide full-scale proeven (FST's) zijn aan de 60 m lange proefdijk hoogwater- en opdrijf-condities opgelegd, zodanig dat er onvoldoende weerstand tegen instabiliteit is ontstaan. Met een uitgebreide monitoringscampagne is de opbouw van de extreme condities beheerst en gefaseerd tot stand gebracht, en is het gedrag tot aan bezwijken nauwkeurig in kaart gebracht. In de versterkte dijk was een continue wand opgebouwd uit afwisselend een lange en een korte GU8N triplet aangebracht. Het aanbrengen van de extreme condities (zie Figuur 7) bestond achtereenvolgens uit een brede ontgraving in de teen van de dijk, het verzadigen (dus verzwakken) van de zandkern, het opvoeren van de bovenbelasting op de kruin en het creëren van opdrijfcondities voor het binnentalud door het waterpeil te verlagen in de ontgraving.

In Figuur 7 wordt een indruk gegeven van de monitoring tijdens de FST's. Het tijds - deformatieverloop van het binnentalud en de damwandkop is met een Total-Station gevolgd, die prisma's op drie niveaus over de volledige dijk lengte van 60 m, heeft ingemeten. Het deformatieverloop in de diepte is in drie meetraaien (zie Figuur 3) gemeten met behulp van een SAAF. De SAAF's zijn geplaatst in de binnenteen, halverwege het binnentalud en in de kruin (bij de versterkte dijk juist aan de taludzijde van de damwand). De (verticale) deformatie van de bodem van de ontgraving is gevolgd door geplaatste zakbakens periodiek in te meten. Van vier meetplanken binnen de damwand is het rekverloop in de diepte over een groot deel van de damwandlengte met glasvezelsensoren in de druk- en trekflens gevolgd. Gedurende de proef op de versterkte dijk is ook nog periodiek een 3D laserscan gemaakt. Van beide proefdijken zijn video-opnamen gemaakt van het volledige proefverloop.

Uit het vergelijken van het gedrag van beide proefdijken blijkt, dat deze qua vervorming in de binnenteen een gelijksoortig bezwijkgedrag vertonen (in beide gevallen treedt bezwijken op bij 10 à 20 cm). Ter hoogte van de kruin was dit gedrag anders: tot juist voor bezwijken had de kruin van de niet versterkte dijk een vervorming in de orde van grootte van cm's ondergaan, terwijl deze vervorming bij de versterkte dijk (weliswaar bij een hogere belasting) in de orde van grootte van decimeters was. Waar de kruin van de niet-versterkte dijk dus vrijwel geen visuele waarschuwing gaf voorafgaand aan bezwijken deed de kruin van de versterkte dijk dat dus duidelijk wel.

Om bij de niet versterkte grond dijk de werkelijke opgetreden vervormingen van het afgeschoven binnentalud qua orde van grootte terug te rekenen, was het nodig om in de berekeningen voor de reststerkte van de grond ongeveer de helft van de pieksterkte aan te houden. Dit was een ruim lagere sterkte dan wat uit het reststerkte onderzoek op



Figuur 5 -
Aanlegfasering
proefdijken.



Figuur 6 - Monitoring
instrumentatie horizontale
verplaatsingen bij Pullover
Test op AZ26 paneel.



Figuur 7 – Full-scale proef met monitoring instrumentatie in de dijk en op het talud.



Figuur 8 – Bezijken van constructief versterkte proefdijk.

basis van de ACU en DSS proeven op grote klei- en veenmonsters is gekomen. Dit verschil tussen de resultaten uit de proef en het laboratoriumonderzoek maakt dat over de reststerkte geen eenduidige conclusie is te trekken.

CONCLUSIES

De conclusies in het analyse rapport van de POVM EEMdijkproef zijn gebaseerd op basis van de meetdata en uitgebreide 2D en 3D analyses in Plaxis en Diana. De conclusies met betrekking tot de genoemde kennisvragen zijn de volgende:

- De huidige ontwerprichtlijn schrijft EEM-analyses met gedraineerd grondgedrag uitgaande van karakteristieke sterkte- en stijfheidsparameters voor. Eén van de meest wezenlijke wijzigingen in de komende POVM-publicaties, het rekenen met ongedraineerd grondgedrag, is met de proef gevalideerd.
- De huidige ontwerprichtlijn (Ontwerp Stabiliteitsschermen in Primaire Waterkeringen) stelt strenge eisen aan de vervormingen in de bruikbaarheidsgrenstoestand en uiterste grenstoestand. In de proeven bleek echter de (ongedraineerde) vervorming van de (constructief versterkte) dijk sterk aan de stabiliteit van de dijk of damwandconstructie te zijn gerelateerd. De vervormingen ten gevolge van hoogwater zijn zeer beperkt bij een stabiele dijk, onafhankelijk of deze constructief versterkt is of niet. Het lijkt dan ook voldoende te zijn om in de uiterste grenstoestand alleen de sterkte en stabiliteit te beoordelen. Vervormingseisen zijn in dat geval alleen voor de aanlegfase relevant.
- De werkelijke vervormingen zijn relatief goed te reproduceren op basis van gemiddelde waarden voor zowel de sterkte- als stijfheidsparameters. Door het gecombineerde effect van karakteristieke waarden voor stijfheid en sterkte worden aanzienlijk grotere vervormingen berekend in de geavanceerde modellen, zowel voor gedraineerde als ongedraineerde analyses. Een modelfactor toe-

passen op een vervormingsberekening lijkt hiermee overbodig.

- De huidige ontwerprichtlijn benut, ook bij profielen die conform NEN-EN1993-5 in doorsnede-klasse 1 en 2 vallen, alleen de elastische momentcapaciteit. Op basis van de resultaten uit de pull-over tests wordt echter aanbevolen om voor de constructieve toets van de damwand op de Eurocode-aanpak aan te sluiten. Op voorwaarde dat de panelen uit minimaal drie dubbele damwandplanken bestaan lijkt voor relatief zware profielen in doorsnede-klasse 2 met de plastische momentcapaciteit te kunnen worden gerekend. In het onderzoeksprogramma is voor smallere damwandpanelen niet aangetoond dat ook de plastische momentcapaciteit wordt behaald.

- De huidige ontwerprichtlijn acht het wenselijk dat de grondwaterstand in de dijk niet wordt beïnvloed. Om deze reden wordt in het algemeen een discontinue wand van gekoppelde panelen in de dijk aangebracht, waarin wel de planken binnen een paneel maar niet de randplanken van de panelen onderling via de damwandsloten zijn gekoppeld. De pullover tests hebben laten zien, dat er bij discontinue wanden (indien er panelen worden toegepast die bestaan uit minimaal drie dubbele planken) geen reductie van het weerstandsmoment nodig is.

- Uit de full-scale proef op de versterkte dijk blijkt verder dat een continue wand voordelen biedt.

Niet alleen vanwege de herverdeling in de lengtes van de dijk, maar ook omdat de continue wand na bezijken (zie figuur 8) nog steeds aan het waterkerende vermogen kan bijdragen.

- Bij een beoordeling moet men zich ervan bewust zijn dat de geleverde damwandplanken een gegarandeerde minimale staalkwaliteit hebben en dat de dikte binnen bepaalde toleranties valt. De daadwerkelijk staalkwaliteit wordt aangetoond op basis van trekproeven en de dikte met metingen. Er ontstaat een mogelijkheid tot optimalisatie bij een beoordeling op een later tijdstip, door gebruik te maken van resultaten van trekproeven en dikte-metingen.

De conclusies en aanbevelingen zijn opgenomen in het analyse rapport van de POVM EEMdijkproef en worden verwerkt in de nieuwe POVM publicatie voor "toepassing van de eindige-elementen methode binnen het ontwerp" en de nieuwe POVM publicatie voor "stabiliteitsverhogende langconstructies". Deze publicaties komen eind 2018 beschikbaar op de POVM website povmacrostabiliteit.nl/rapporten/

De auteurs willen hierbij de POVM bedanken voor het initiatief en de financiering van de proef. Verder worden alle partners bedankt voor de goede samenwerking. Dit onderzoek is tevens onderdeel van het Perspectief research programme All-Risk (P15-21), deels gefinancierd door NWO Domain Applied and Engineering Sciences. ●