



Richard de Jager
Alliantie Markermeerdijken,
Boskalis



Joost v/d Meer
Alliantie Markermeerdijken,
Witteveen en Bos



Anne Bäcker
Alliantie Markermeerdijken,
Arthe Civil&Structure



Remco den Hertog
Alliantie Markermeerdijken,
Boskalis

PROEFTERPEN OP DE MARKERMEERDIJKEN: VAN THEORIE NAAR ONTWERP EN UITVOERING

Inleiding

De Markermeerdijken tussen Durgerdam en Hoorn zijn afgekeurd tijdens de tweede toetsronde in 2006. De stabiliteit en de hoogte van de dijken bleken niet te voldoen aan de wettelijke normen. Het versterken van de dijken volgens de vigerende leidraden zou leiden tot lange stabiliteitsbermen. De versterkingsopgave leek disproportioneel zwaar te worden. De sterkte die werd toegekend aan het veen onder de dijken kwam ter discussie te staan. Naar aanleiding hiervan is het onderzoeksprogramma Dijken op Veen geïnitieerd. De eerste fase van het onderzoek bestond uit een aantal bezwijkproeven in het veld [1], waaruit geconcludeerd werd dat de sterkte van het veen onderschat werd. De sterkte van veen wordt gemobiliseerd bij grote schuifvervorming, terwijl de vigerende leidraden voorschreven dat de sterkte bij een beperkte vervorming bepaald wordt. Daarnaast werd geconcludeerd dat de sterkte van veen gemeten en beschreven kan worden met methoden die voor klei gangbaar zijn. De tweede fase van het onderzoeksproject [2] had als doel om de onderzoeksresultaten toepasbaar te maken voor de dijkversterking van de Markermeerdijken. De onzekerheid in sterkte-eigenschappen van de ondergrond kan gereduceerd worden door de sterkte lokaal te meten. Het resultaat is de werkwijze Dijken op Veen (DoV).

De drie pijlers onder de werkwijze DoV zijn (1) de definitie van sterkte, (2) de lokale bepaling van sterkte in de ondergrond en (3) het verloop van sterkte met de verticale effectieve spanning. De ongedraineerde sterkte op de Critical State definieert de maatgevende sterkte van het veen. De sterkte van het veen is volledig gemobiliseerd op de Critical State. Een consistente definitie van de (rekafhankelijke) sterkte langs het glijvlak vereist dan dat de sterkte van de andere grondlagen ook op de Critical State gedefinieerd wordt. Het rekenen met de ongedraineerde schuifsterkte sluit beter aan op het verwachte, ongedraineerde spanningspad dan het rekenen met de schuifsterkteparameters c' en π' dat nu toe gangbaar was bij dijkversterkingen. Het WTI2017 hanteert dezelfde definities in het zogenaamde Critical State Soil Mechanics (CSSM) model. Deze benaming is niet geheel juist, omdat Critical State Soil Mechanics [3] hooguit een raamwerk of type model definieert. Hét CSSM-model bestaat niet.

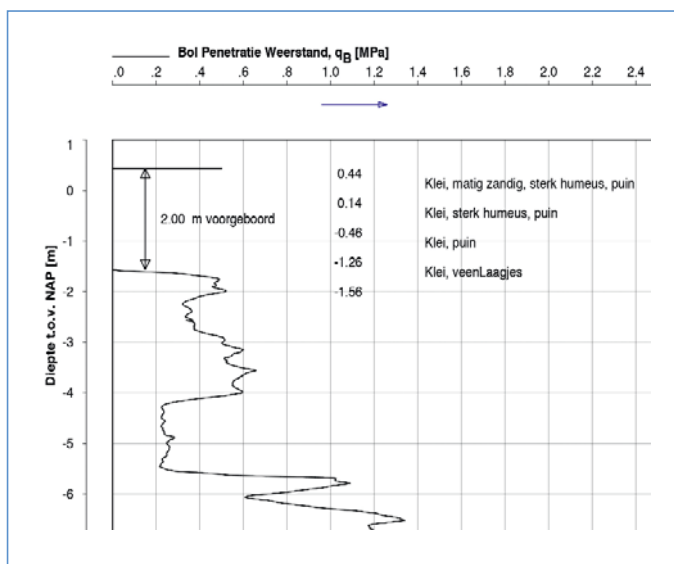
De ongedraineerde schuifsterkte van de ondergrond wordt per locatie bepaald door veldonderzoek uit te voeren. Op elke 100 meter langs de Markermeerdijken zijn vier sonderingen en een handboring genomen. In de meeste gevallen zijn bolsonderingen uitgevoerd in het voor- en achterland, en klasse 1-sonderingen in de kruin en

de berm. Tijdens de ontwikkelfase van het project zijn zes ijkvelden ingericht om de correlatie tussen de conusweerstand en de ongedraineerde schuifsterkte te kalibreren [4]. De spreiding in de resulterende kalibratiefactor is met de ruimtelijke variabiliteit een maat voor de onzekerheid in de lokaal, in-situ gemeten schuifsterkte.

Het verloop van de ongedraineerde schuifsterkte met de verticale, effectieve spanning hangt af van de grensspanning en een aantal parameters die per grondlaag constant zijn:

$$s_u = \sigma'_{v0} * S * (OCR)^m = \sigma'_{v0} * S * \left(\frac{\sigma'_{vg}}{\sigma'_{v0}}\right)^m \quad [\text{eq. 1}]$$

Hierin is de maatgevende, ongedraineerde schuifsterkte s_u [kPa] een functie van de initiële, verticale effectieve spanning σ'_{v0} [kPa], de ongedraineerde schuifsterkte ratio bij normaalgeconsolideerd gedrag S [-], de overconsolidatie-ratio OCR [-] (of grensspanning σ'_{vg} [kPa]) en een factor $0.5 < m < 1.0$ [-]. Deze relatie [eq. 1] wordt gebruikt om vanuit de bestaande, gemeten sterkte te extrapoleren voor de maatgevende situatie of het versterkingsontwerp. De afhankelijkheid van de grensspanning impliceert dat de belastingsgeschiedenis van de grond is meegenomen in het sterkteverloop. Wroth [5] heeft [eq. 1] theoretisch afgeleid vanuit een Critical State raamwerk. De theoretische afleiding laat zien dat



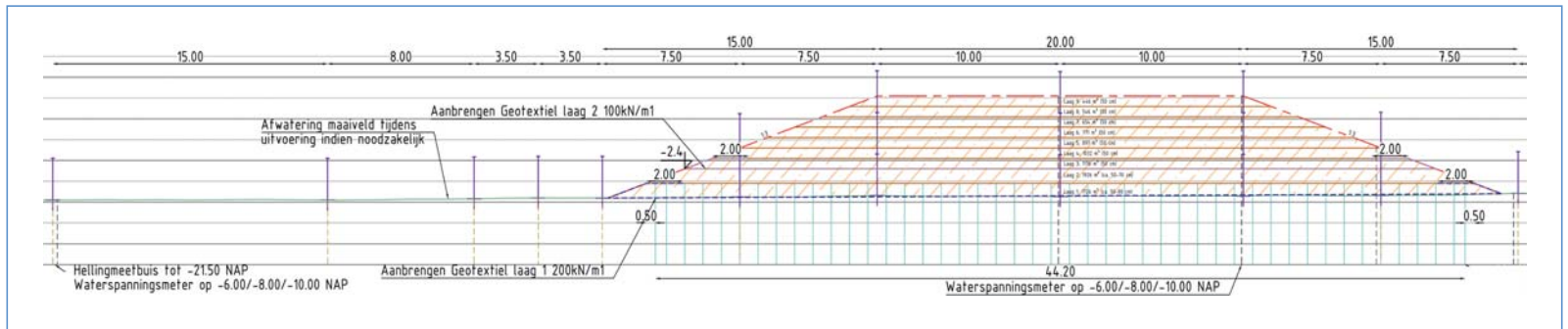
Figuur 1 – Typisch resultaat van bolsondering op de Markermeerdijken.



Figuur 2 – Opbouw van de proefterp bij Etersheim.

De aanleg van drie proefterpen is het sluitstuk van het ontwerp van de versterking van de Markermeerdijken. Veldproeven hebben de ontwikkeling van het sterkteconcept 'Dijken op Veen' geïnitieerd. De Alliantie Markermeerdijken heeft het concept geïmplementeerd en verder verfijnd tijdens de ontwerpfasen. De verificatie van het versterkingsontwerp door proefterpen maakt de cirkel rond. Het artikel behandelt de achtergrond en opzet van de proefterpen op de Markermeerdijken. De proefterpen faciliteren de stap van

ontwerp naar uitvoering, waarbij gefaseerde ophogingen op slappe grond in beperkte tijd gerealiseerd moeten worden. De monitoring tijdens de aanleg van de proefterpen levert ijkpunten voor de sterkteontwikkeling en vervormingen in de ondergrond. Een beheerste ophoging schept vertrouwen in het ontwerp en de uitvoeringsmethode, zowel binnen de eigen organisatie als naar de omgeving.



Figuur 3 – Opzet van proefterp bij De Weel.

de relatie afhankelijk is van het gekozen spanningspad, of het type laboratoriumtest. Dé ongedraineerde schuifsterkte bestaat niet. De SHANSEP methode [6,7] heeft [eq.1] voor het eerst empirisch vastgesteld, maar dan op basis van pieksterkten en een vastgesteld testprotocol. De term SHANSEP past daardoor niet bij de methodieken die voor Dijken op Veen en het WTI2017 ontwikkeld zijn.

De werkwijze DoV heeft de basis gelegd voor de dijkversterking Markermeerdijken. De Alliantie Markermeerdijken heeft de werkwijze praktisch toepasbaar en uitvoerbaar gemaakt. Dit artikel zal eerst beknopt ingaan op de praktische implicaties van de werkwijze DoV op de Markermeerdijken. Vervolgens zullen we de opzet van de proefterpen bespreken. De proefterpen verbinden de werkwijze DoV, het ontwerp van de Markermeerdijken en de uitvoering van de dijkversterking. De proefterpen zijn daarmee het sluitstuk in de implementatie van Dijken op Veen bij de Markermeerdijken.

Dijken op veen op de Markermeerdijken

De implementatie van de werkwijze DoV op de Markermeerdijken is een iteratief proces geweest, waarin de uitgangspunten, werkwijze, software en de ontwerp oplossingen geoptimaliseerd zijn. Ironisch genoeg bleek al snel dat niet het veen, maar de klei onder het veen maatgevend was voor de stabiliteit van de waterkering. De grondlaag klei van Calais is voorbelast door het lichte veen, terwijl het ontbreekt aan de structuur die in het veen aanwezig is. Figuur 1 illustreert het sterkteverloop met een bolsondering. De organische laag tussen -1.6 en -4.0 m NAP heeft een aanzienlijk hogere conusweerstand dan de onderliggende kleilaag.

Het onderzoeksproject DoV was gericht op het veen, en in veel mindere mate op de klei. De Alliantie Markermeerdijken heeft aanvullende tests laten uitvoeren op klei. In het algemeen geldt dat de kwaliteit van het grondonderzoek en de interpretatie van testresultaten bepalend zijn voor de uitkomst van de werkwijze DoV. Het bepalen van de Critical State vergt kennis over laboratoriumtests en grondgedrag. Het is per monster verschillend bij welke schuifvervorming de Critical State bereikt wordt. De onzekerheid in laboratoriumtests neemt toe met toenemende vervorming door beperkingen aan de apparatuur en niet-uniforme vervorming van het monster. We zullen in een aparte publicatie hier dieper op in gaan.

De werkwijze DoV is door de vele stappen in het ontwerpproces foutgevoelig en bewerkelijk. Iedere spanningsverandering in het dwarsprofiel heeft invloed op de sterkteontwikkeling in de ondergrond. De belastingsgeschiedenis (grensspanning) heeft invloed op de sterkteontwikkeling en moet dus gevolgd worden. De Eindige Elementenmethode leent zich bij uitstek voor een dergelijke, gefaseerde berekening. In de conventionele software voor glijvlakberekeningen moet de belastingsgeschiedenis vooralsnog op een andere manier geadmistreerd worden. De Alliantie Markermeerdijken heeft hier software voor ontwikkeld. Een belangrijk doel van de software was het minimaliseren van de foutgevoeligheid door automatisering en het faciliteren van de kwaliteitscontrole. Een tweede voorbeeld dat we hier noemen is het bepalen van het maatgevende dwarsprofiel. In theorie kunnen er vier verschillende maatgevende dwarsprofielen voor een sectie zijn, namelijk voor de bestaande situatie

(0-variant), het ontwerp, de uitvoeringsstabiliteit en zettingen. Een binnenwaarts stabiliteitstekort kan worden opgelost door een buitenwaartse asverschuiving met tijdelijke voorbelasting om de ondergrond te versterken. De dikte van het veenpakket bepaalt de maatgevende zetting, terwijl de klei onder het veen de stabiliteit bepaalt. Ook hiervoor biedt software uitkomst als het gaat om foutgevoeligheid en kwaliteitscontrole.

De introductie van de werkwijze DoV heeft op de Markermeerdijken tot een andere kijk op het ontwerpen geleid. Lage, lange stabiliteitsbermen zijn minder efficiënt, omdat de sterkte in de ondergrond pas significant toeneemt boven de grensspanning. De belastingsgeschiedenis wordt meegenomen in de sterkteontwikkeling van de ondergrond, zodat met tijdelijke ophogingen gewerkt kan worden. De Alliantie Markermeerdijken heeft hier gebruik van gemaakt door waar mogelijk met tijdelijke voorbelastingen te werken. Op deze manier kan het huidige dijkprofiel zoveel mogelijk behouden blijven in de eindsituatie, terwijl er naast de dijk een grondverbetering resteert na het verwijderen van de voorbelasting. Het effect van tijdelijke voorbelastingen is het grootst bij hoge ophogingen op een slappe ondergrond met een lage grensspanning. Deze ophogingen zijn ook het moeilijkst te realiseren. De uitvoeringsstabiliteit wordt een bepalende factor binnen het ontwerp van de dijkversterking.

Proefterpen

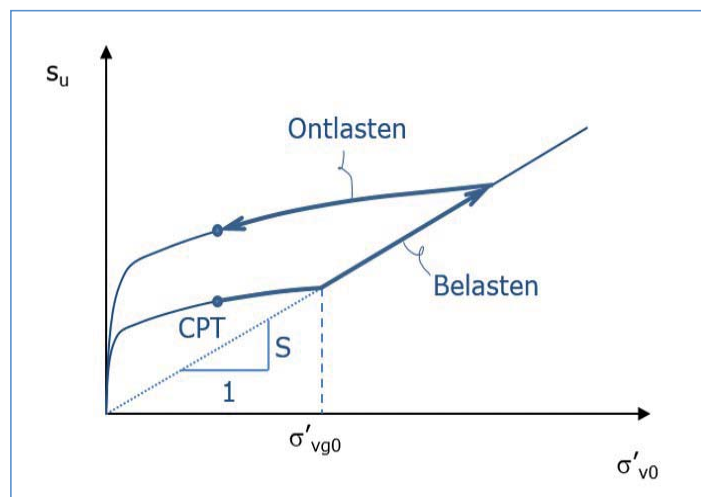
De Alliantie Markermeerdijken heeft drie proefterpen langs het traject van de dijkversterking opgebouwd. De proefterpen simuleren tijdelijke voorbelastingen op de onbelaste ondergrond

naast de dijk (figuur 2). Om praktische redenen is gekozen voor proefterpen aan de binnenzijde (achterland) van de dijk. De keuze voor het achterland of voorland heeft geen invloed op de doelstelling van de proefterpen. Op het moment van schrijven is de proefterp bij Broeckgouw op hoogte en staat op het punt om weer afgegraven te worden. De proefterp bij De Weel komt binnen enkele weken op hoogte. De proefterp bij Etersheim is later opgestart en wordt op het moment nog opgehoogd.

We hebben de proefterpen op dezelfde manier opgebouwd als de voorbelastingen die voor de dijkversterking zijn voorzien. Figuur 3 toont de proefterp bij De Weel. Op het maaiveld wordt een geogrid aangebracht om de stabiliteit tijdens de eerste ophoogslagen te waarborgen. Na het aanbrengen van een werkvloer wordt verticale drainage aangebracht (h.o.h. 1.5 meter) om het consolidatieproces te versnellen. Vervolgens wordt de terp in lagen van een meter opgebouwd bij een talud van 1v:3h, totdat een niveau van vijf meter boven het maaiveld is bereikt. De breedte van de kruin meet ten minste 20 meter. Net als bij de dijkversterking wordt de stabiliteit beheerst door de ophoogsnelheid aan te passen aan waterspanningsmetingen. Er zijn waterspanningsmeters geplaatst op verschillende lokaties en diepten. Zakbaken geplaatst in de kruin, het talud en de teen van de proefterp monitoren de zettingen. De horizontale vervormingen worden gemeten door inclinometers, die in het talud, de teen en op verschillende afstanden tot de teen geplaatst zijn.

Het hoofddoel van de proefterpen is de veldverificatie van de sterkteontwikkeling in de ondergrond. Een enorme meetcampagne met o.a. ongeveer 2700 sonderingen heeft de sterkte van de ondergrond onder de Markermeerdijken voor de dijkversterking in kaart gebracht. Een soortgelijke campagne na de dijkversterking komt te laat om de werkzaamheden bij te kunnen sturen. Daarom is gekozen voor een 'proof-of-concept' in combinatie met een beperkt aantal controle-sonderingen. Figuur 4 illustreert het pad van de ongedraineerde schuifsterkte onder de proefterpen volgens vergelijking [eq. 1]. Voor de opbouw wordt de ongedraineerde schuifsterkte vastgesteld met sonderingen. Vervolgens zal deze toenemen tijdens de opbouw van de proefterpen. Onder de initiële grensspanning σ'_{v0} is de toename beperkt, erboven bepaalt de parameter S de toename. Na het ontlasten vanaf de nieuwe grensspanning resteert een sterkte-toename. Op drie karakteristieke punten in Figuur 4 zullen klasse 1-sonderingen genomen worden: voor de opbouw van de proefterpen, als de proefterpen op hoogte zijn en het consolidatieproces (bijna) voltooid is, en na het afgraven als de ondergrond weer ontlast is. De sonderingen na het ophogen verifiëren de sterkte-toename bij een belasting boven de

Figuur 4 – Ontwikkeling ongedraineerde schuifsterkte s_u als functie van verticale effectieve spanning σ'_{v0} .



grensspanning ($OCR=1$, eq. 1). De sonderingen na het ontgraven meten de sterkte die overblijft na het ontlasten van de ondergrond ($OCR>1$, eq. 1).

De bouw van de proefterpen is het eerste stukje werk voor de dijkversterking van de Markermeerdijken. Het geeft ons de gelegenheid om het uitvoeringsontwerp te toetsen en de processen tijdens uitvoering af te stemmen. Een stabiele opbouw van de proefterpen schept vertrouwen in de gekozen ontwerpuitsgangspunten. Dit geldt zowel voor de eigen (uitvoerings)organisatie als de omgeving. Een van de kritiekpunten op de dijkversterking is het risico op beïnvloeding tijdens ophoging op de onbelaste ondergrond naast de dijk. De proefterpen geeft de Alliantie Markermeerdijken de mogelijkheid om te laten zien dat de ophogingen stabiel en de vervormingen in de ondergrond beperkt blijven, mits er op een beheerste manier gewerkt wordt. We gebruiken de proefterpen om een aantal ontwerpaspecten te evalueren die vooraf lastig in te schatten zijn. Een voorbeeld is de horizontale vervorming naast ophogingen. De metingen met de inclinometers geven ons de mogelijkheid om predicties van beïnvloeding te evalueren en waar mogelijk aan te scherpen. Een tweede voorbeeld is de instantane aanpassing van wateroverspanningen na het aanbrengen van een belasting. De ervaring in de praktijk leert dat deze waarde vaak veel hoger ligt dan vooraf verondersteld wordt (zie bijvoorbeeld Figuur 4.4 [8]). De instantane aanpassing van wateroverspanningen is belangrijk voor de eerste ophoogslag, omdat de sterkte volgens vergelijking [eq. 1] sterk afneemt bij lage spanningen (zie Figuur 4). Meer in het algemeen kunnen we stellen dat de metingen van wateroverspanningen en zettingen meer zekerheid bieden over de nauwkeurigheid van de voorspellingen die gedaan zijn voor het ontwerp van de dijkversterking.

Met de proefterpen zetten we de laatste stap van de werkwijze Dijken op Veen naar de versterking van de Markermeerdijken. We onderkennen dat er met de werkwijze DoV een grote stap voor-

waarts is gezet in het ontwerpen en bouwen op de slappe ondergrond in Nederland. Echter, de implementatie van de werkwijze in de praktijk is bepalend voor het succes van de nieuwe rekenmethodiek. De ervaring op de Markermeerdijken heeft geleerd dat dit stapsgewijs gaat, waarbij soms een stap terug noodzakelijk bleek. De laatste fase is de uitvoering van de dijkversterking die door middel van monitoring zal worden beheerst. De proefterpen scheppen vertrouwen in de ontwerpmethodiek voor de praktijk en slaan daarmee een brug naar de uitvoering.

Kijk voor meer informatie en video's over de proefterpen op www.markermeerdijken.nl.

Referenties

- [1] Zwanenburg, C., De bepaling van sterkte-eigenschappen van veen, *Geotechniek*, Juli 2013.
- [2] Zwanenburg, C., Dijken op Veen II: DoV werkwijze voor bepaling macrostabiliteit Markermeerdijk, *Deltares rapportnummer 1208254-032-GEO-001*, 2014.
- [3] Roscoe, K.H., Schofield, A.N., Wroth, C.P., On the yielding of soils, *Géotechnique*, Vol. 8, pp. 22-53.
- [4] De Bruijn, H.T.J., Visschedijk, M.A.T., Van den Ham, G.A., Dijk op Veen II: eindrapport heterogeniteit, *Deltares rapportnummer 1208254-019-GEO-0001*, 2014.
- [5] Wroth, C.P., The interpretation of in situ soil tests, *Géotechnique*, Vol. 34, Nr. 4, 449-489, 1984.
- [6] Ladd, C.L., Foott, R., New design procedure for stability of soft clays, *Journal of the geotechnical engineering division*, Vol. 100, Nr. 7, pp. 763-786, 1974.
- [7] Ladd, C.L., DeGroot, D.J., Recommended practice for soft ground site characterization: Arthur Casagrande Lecture, *Proceedings 12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, June 2003.
- [8] Leroueil, S., Magnan, J.-P., Tavenas, F (1990), "Embankments on soft clays", English Edition, Ellis Horwood Ltd, Great Britain. ●