

---

# Casus kistdam Dijkversterking Tiel-Waardenburg

Aan: DIV Macrostablieiteit

Van: Milan Hinborch, Ben Rijnveld

Datum: 7 december 2023

Referentie: 6423-241096.TN01v1.0

Onderwerp: Casus kistdam Dijkversterking Tiel-Waardenburg

## 1. Inleiding

De Innovatieversneller (DIV) maakt deel uit van de Kennis- en Innovatieagenda van het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP). DIV stimuleert en versnelt de toepassing en doorwerking van slimme en innovatieve oplossingen in het HWBP. De DIV Macrostablieiteit is de opvolger van de POVM. Binnen de POVM zijn de PPE [PPE 2020] en PPL [PPL 2020] (hierna PPE en PPL) ontwikkeld. Met betrekking tot het ontwerp van kistdammen is een aantal kennisleemtes geïdentificeerd. Inmiddels zijn er echter in de ontwerp praktijk wel al kistdammen ontworpen. In het kader van kennisdeling en het ontsluiten van praktijk kennis en ervaring is door DIV gevraagd om een Casus omtrent het ontwerp van een kistdam te delen vanuit het dijkversterkingsproject Tiel-Waardenburg (TiWa), zodat andere projecten hier hun voordeel mee kunnen doen.

In deze Casus wordt in hoofdstuk 2 het project beschreven en in hoofdstuk 3 de geometrie en bodemopbouw. In hoofdstuk 4 wordt ingegaan op hoe is omgegaan met de aanwezige kennisleemtes in de ontwerpaanpak. In hoofdstuk 5 wordt ingegaan op enkele andere bevindingen uit het ontwerp die relevant kunnen zijn voor andere projecten.

Benadrukt wordt dat bij TiWa projectspecifieke invulling is gegeven aan de aanwezige kennisleemtes, maar dat hier in andere projecten op een andere manier invulling aan kan worden gegeven.

## 2. Projectbeschrijving

Het dijktraject Tiel-Waardenburg wordt de komende jaren versterkt. De projectlocatie is weergegeven in Figuur 1. De dijkversterking wordt in opdracht van Waterschap Rivierenland (WSRL) uitgevoerd door de aannemerscombinatie Mekante Diek (Ploegam, Van Oord en Dura Vermeer). In het westelijk deel, nabij Rijswaard, bestaat de versterkingsmaatregel uit een zelfstandig waterkerende constructie in de vorm van een kistdam. Deze locatie is weergegeven in Figuur 2.





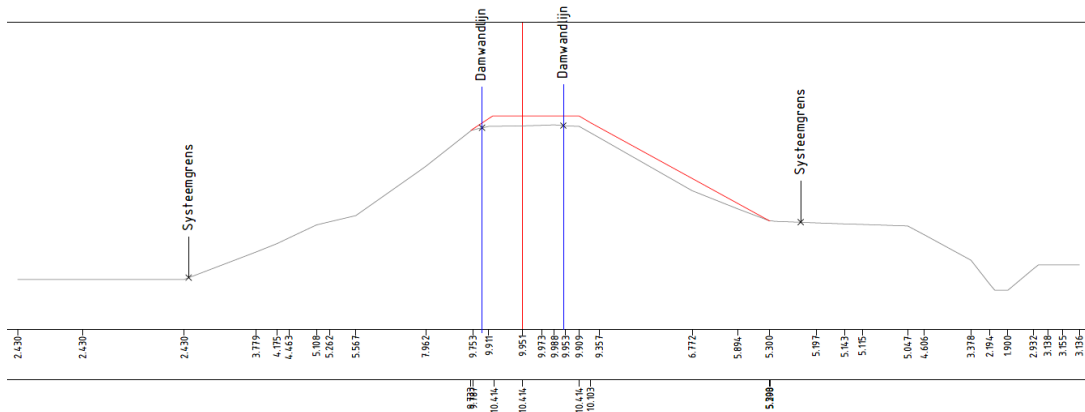
Figuur 1: Locatie Dijkversterking Tiel-Waardenburg met locatie kistdam (rood)



Figuur 2: Locatie van de kistdam tussen TG198 en TG199

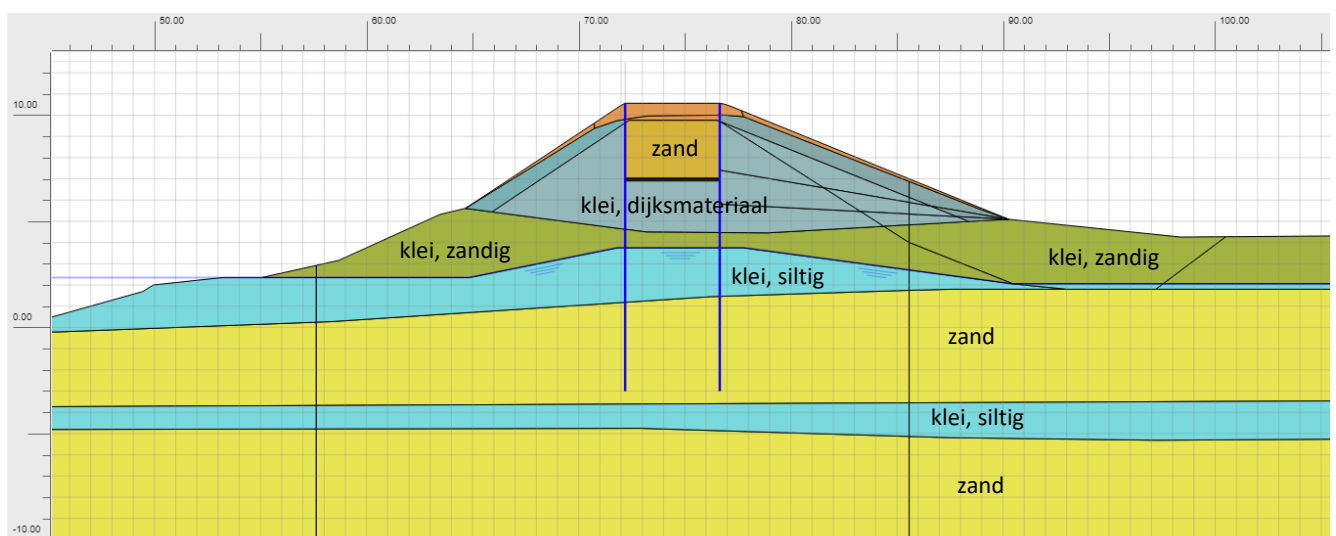
### 3. Geometrie en bodemopbouw

Een dwarsprofiel van de huidige dijk is weergegeven in Figuur 3. De huidige dijk is smal en steil met een kruinbreedte van ca. 4 m en taluds ca. 1v:2,5h aan de binnenzijde en 1v:1,5h aan de buitenzijde. Aan de buitenzijde is een strang aanwezig. De versterkingsmaatregel bestaat uit een kistdam met een damwand in de binnenkruin en buitenkruin, die verankerd zijn met horizontale legankers. De kruin wordt met ca. 0,5 m opgehoogd in combinatie met een beperkte aanvulling van het binnentalud. De reden voor de oplossing met de kistdam is de zeer beperkte beschikbare ruimte door bebouwing aan de binnenzijde en de strang aan de buitenzijde van de dijk.



Figuur 3: Dwarsprofiel huidige dijk met versterkingsmaatregel (binnendijks rechts)

De bodemopbouw is weergegeven in Figuur 4. De dijk is in de huidige situatie geheel opgebouwd uit klei. Bij de aanleg van de kistdam wordt de klei tussen de damwanden boven het verankeringsniveau vervangen door zand. Onder en aan weerszijden van de dijk is een siltige/zandige kleideklaag aanwezig van ca. 2 à 3 m dik. Daaronder bevindt zich het Pleistocene zand met rond NAP -5 m een stoorlaag van klei van ca. 1 m dik.



Figuur 4: Geometrie en bodemopbouw kistdam

## 4. Ontwerp kistdam

Een kistdam bestaat uit een door wanden opgesloten grondmassief, dat horizontale en verticale belastingen naar de ondergrond moet overbrengen. Bij het faalmechanisme binnenwaartse macrostabiliteit fungeert de wand aan de polderzijde als grondkerende wand en die aan de waterzijde als ankerwand. Bij het faalmechanisme buitenwaartse macrostabiliteit wisselen de twee wanden van functie. Er is sprake van een kistdam omdat de twee wanden in elkaars invloedsgedebied staan. Het ontwerp van de kistdam is conform de PPL en PPE uitgevoerd met het eindige-elementenmodel PLAXIS. De 'standaard' aanpak en rekenfasering voor het ontwerp van een verankerde damwand zijn gevolgd. In hoofdstuk 15 van de PPL wordt alleen kort ingegaan op het principe en de uitvoering van een kistdam, maar een specifieke ontwerpaanpak wordt niet gegeven. Wel is de kennisleemte benoemd m.b.t. de toetsing van de kistdamvulling op basis van CUR166. Op de website van de DIV worden nog aanvullende kennisleemtes m.b.t. kistdammen benoemd. Hieronder wordt eerst ingegaan op hoe met de verschillende kennisleemtes is omgegaan, waarna in paragraaf 4.7 het resulterende ontwerp van de kistdam is samengevat.

### 4.1 De interactie tussen de wanden via ankers en tussenliggende grond

De wanden zijn gemodelleerd als elastische 'plates'. Het anker is gemodelleerd als een elastisch 'node-to-node' anker (trekelement), dat scharnierend aan beide wanden is verbonden. Er is gerekend met de ongecorrodeerde eigenschappen, omdat dit een bovengrens geeft van de krachten in de constructie. Voor de kistdamvulling is boven het ankerniveau uitgegaan van zand, wat gemodelleerd is met het Hardening Soil grondmodel. Conform de PPL is een puntveer gemodelleerd onder de punt van de damwanden. Omdat bleek dat er in bepaalde belastinggevallen een trekkracht kan optreden in de damwand aan de rivierzijde, is de puntveer als elastoplastisch ( $EA = 1E5 \text{ kN/m}$ ) gemodelleerd met een onbeperkt drukdraagvermogen ( $F_{\max, \text{comp}} = 1E9 \text{ kN/m}$ ) en een trekdraagvermogen van  $F_{\max, \text{tens}} = 0 \text{ kN/m}$ . Dit is een conservatieve aanname en hiermee wordt voorkomen dat in de damwand een hogere trekkracht optreedt dan mogelijk is op basis van het verticaal draagvermogen. Er is wel gerekend met trekdraagvermogen door wandwrijving (slip) door middel van de standaardwaarde  $R_{\text{inter}} = 0,67$ . De interactie tussen de wanden via de ankers en tussenliggende grond wordt in het EEM model verder 'automatisch' meegenomen, waarbij rekening wordt gehouden met het kracht-ervormingsgedrag van de verschillende grondlagen en constructieve elementen.

### 4.2 De modellering van de kistdamvulling en de impact van zettingen daarop

De oude dijk is volledig uit klei opgebouwd. Er is een zandvulling boven het ankerniveau toegepast om de onzekerheid op dit punt te beperken. Tevens is de kistdam in de kruin van de huidige dijk toegepast, waar de ophoging beperkt is, zodat de zettingen zeer beperkt zijn. Er is wel rekening gehouden met het effect van zakkende grond op de ankerstangen conform de rekenmethodes uit de PPE/PPL, geval 2 'loodrecht belaste ankerstang'. Voor het zand van de kistdamvulling is een laag karakteristieke waarde van de stijfheid van  $E_{50}^{\text{ref}} = 20.000 \text{ kN/m}^2$  gehanteerd, op basis van de waarde

voor zand ophoogmateriaal uit de proevenverzameling van WSRL. Dit is een relatief lage en dus conservatieve waarde. Met goed verdicht zal de stijfheid naar verwachting hoger zijn. Verder is gerekend met de standaard waarde van de wandwrijving  $R_{\text{inter}} = 0,67$ .

Conform [CUR 166] dient een toets uitgevoerd te worden van de kistdamvulling, waarbij alleen de parameters van de vulling worden gereduceerd en verder met representatieve parameters wordt gerekend. In een gevoeligheidsanalyse is deze toets is uitgevoerd voor de hoogwatersituatie (fase 4b, BGT vervormingstoets), waarbij de parameters in de zandophoging en het dijksmateriaal binnen de kistdam zijn verlaagd met de factoren voor RC3 uit [CUR 166]. Hieruit blijkt dat dit tot een toename van de snedekrachten van enkele procenten, maar dat deze ruimschoots lager zijn dan UGT-toets bij hoogwater (fase 5). Daarom is deze toets verder buiten beschouwing gelaten.

### 4.3 De invloed van de initiële spanningstoestand

Om de initiële spanningstoestand te modelleren is de aanpak uit het rekenschema uit de PPE/PPL gebruikt, waarmee de spanningstoestand van de huidige dijk en consolidatie gedurende de levensduur van de constructie worden gemodelleerd. Hierbij volgen de initiële spanningen uit een  $K_0$ -procedure, waarna met een nul-belastingstap de onbalans wordt weggewerkt.

### 4.4 De te beschouwen belastingcombinaties om tot maatgevende krachten te komen;

De te beschouwen belastingcombinaties voor een kistdam komen in de PPE/PPL vrijwel niet aan bod. Omdat de kistdam 2 kanten op keert heeft dit wel speciale aandacht. De (extra) belastingcombinaties die zijn beschouwd zijn:

- STBI tijdens hoogwater zonder significante overslag (grond in de kistdam niet volledig verzadigd aangenomen), incl. bovenbelasting op de kruin van de dijk.
- STBI tijdens hoogwater met significante overslag (10 l/s/m) (grond in de kistdam volledig verzadigd aangenomen), excl. bovenbelasting.
- STBU bij val na hoogwater waarbij geen significante overslag is opgetreden (grond in de kistdam niet volledig verzadigd aangenomen), incl. bovenbelasting op de kruin van de dijk.
- STBU bij val na hoogwater waarbij wel significante overslag is opgetreden (grond in de kistdam is volledig verzadigd aangenomen), excl. bovenbelasting.

Het belastinggeval STBU na overslag is geen standaard belastinggeval. Omdat bij een kistdam bij significante overslag de volledige constructie verzadigd kan raken en in de kistdam opgesloten kan worden, is deze belastingssituatie beschouwd. De bijbehorende schadefactor is op vergelijkbare wijze afgeleid als voor STBU zonder significante overslag. Hiervoor is bij TiWa uitgegaan van een 10x lagere faalkanseis ten opzichte van de situatie STBI met overslag.

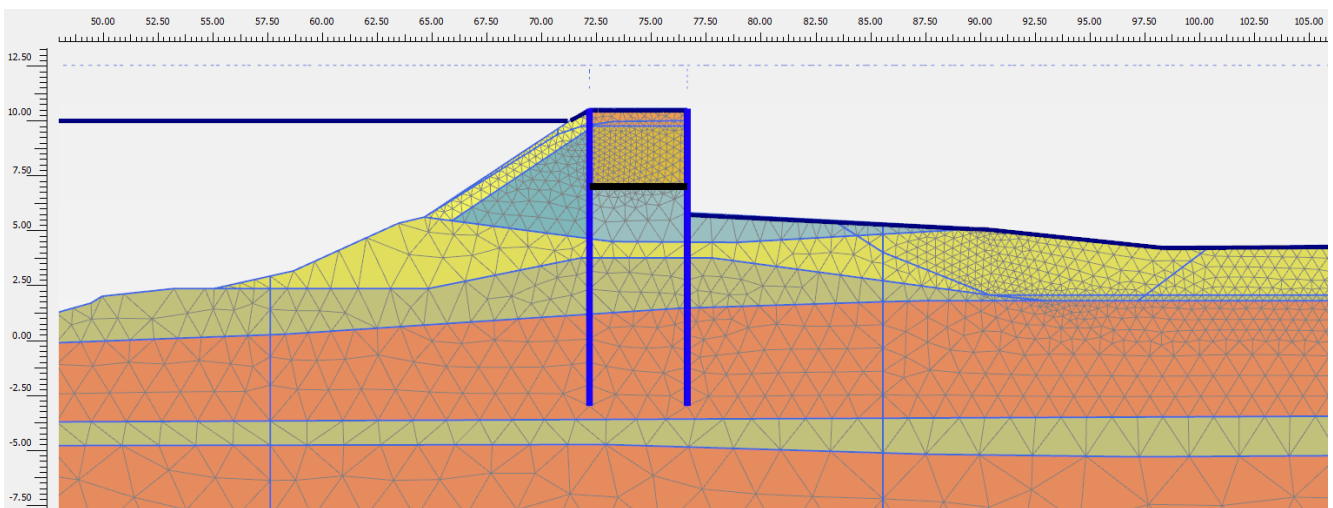
Voor de binnenwaartse stabiliteit en buitenwaartse stabiliteit zijn 2 aparte Plaxisberekeningen gemaakt. Per berekening zijn zowel de situatie zonder als met overslag beschouwd. Omdat de 2

damwanden ieder voor 4 belastingsituaties getoetst dienen te worden, dient zorgvuldig te worden omgegaan met de verschillende belastinggevallen en berekeningen en kunnen meerdere iteraties noodzakelijk zijn om tot een optimaal ontwerp te komen. Hierbij speelt mee dat verschillende gevallen maatgevend kunnen zijn voor de verschillende onderdelen van de constructie. In het geval van TiWa waren de volgende belastinggevallen maatgevend:

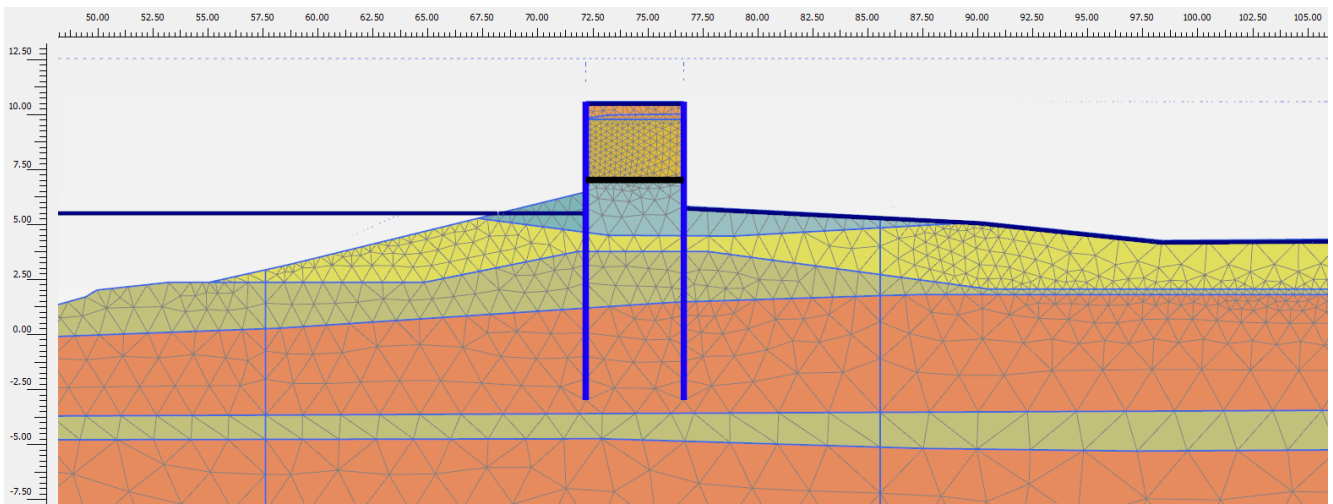
- Stabiliteit (benodigde lengte damwanden): STBI zonder overslag
- Sterkte en vervorming damwand in de binnenkruin (polderzijde): STBI met overslag
- Sterkte en vervorming damwand in de buitenkruin (rivierzijde): STBI met overslag
- Sterkte ankerstang: STBU na overslag (met verzadigde dijk)

Speciale aandacht is ook benodigd voor de modellering van een eventueel restprofiel. Door de steile taluds en de dunne deklaag in combinatie met opbarsten in het achterland (STBI) treedt in alle belastinggevallen een restprofiel op, zowel bij STBI als STBU. In alle gevallen is de maatgevende situatie voor STBI en STBU beschouwd:

- STBI: waar nodig is de sterkte van het buitentalud verhoogd, zodat er geen restprofiel ter plaatse van het buitentalud optreedt en de actieve belasting niet wordt onderschat (Figuur 5).
- STBU: waar nodig is de sterkte van het binnentalud verhoogd, zodat er geen restprofiel ter plaatse van het binnentalud optreedt en de actieve belasting niet wordt onderschat.
- Voor de verankering is de situatie STBU na overslag maatgevend met de situatie dat zowel aan de binnenzijde als aan de buitenzijde een restprofiel is opgetreden (Figuur 6).



Figuur 5: Belastinggeval STBI met significante overslag met restprofiel aan de binnenzijde



Figuur 6: Belastinggeval STBU na significante overslag met restprofiel aan de binnen- en buitenzijde

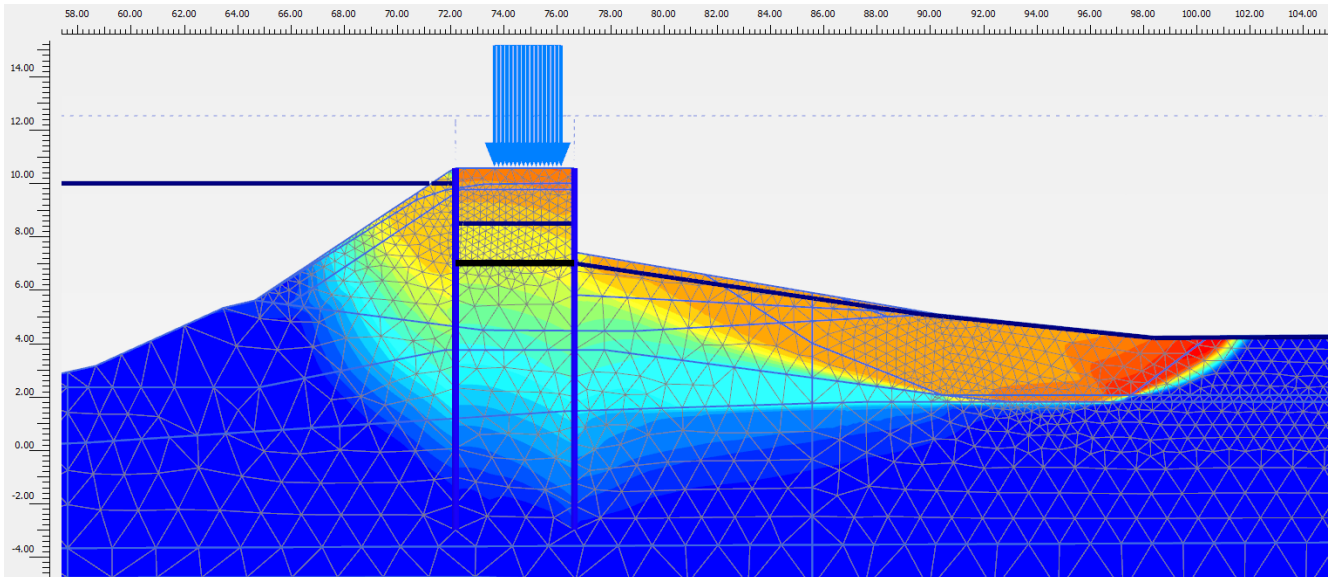
Voor de toetsing van de kistdam zijn de schadefactoren voor STBI en STBU bepaald volgens de standaard aanpak conform de PPE/PPL. Voor de kistdam zijn de vervormingen (met name de uitbuiging van de damwanden) in de situatie STBI relatief groot. Dit is het gevolg van de beperkte weerstand aan de binnenzijde door het restprofiel en opdrijven/opbarsten van de deklaag. De vervormingseis voor TiWa was door WSRL voor kistdammen al opgerekt van de standaardwaarde van 100 mm naar 150 mm, maar voldeed nog niet (uitbuiging ca. 200 mm). Daarom is in het ontwerp een Toets op Maat conform bijlage A van de PPE toegepast, waarbij is onderbouwd dat bij grotere vervormingen de waterveiligheid gewaarborgd blijft. De belangrijkste argumenten hierbij zijn:

- De kruindaling voldoet in alle gevallen aan de eis. De maximale verticale vervorming van de kruin van de kistdam bedraagt ca. 13 mm.
- Alleen in de verzadigde situatie met overslag wordt niet aan de eis voldaan. De hoogwatersituatie zonder overslag voldoet met een uitbuiging van ca. 60 mm.
- De damwanden zijn 1,5 m langer dan voor piping/heave benodigd is. Vanwege de strang binnendijs is al gerekend met een intredepunt dichtbij de dijk. Als door grote vervormingen een intredepunt langs de damwand aan de rivierzijde ontstaat, is de stijghoogte bij de binnenste damwand nog dusdanig dat aan het heavecriterium voldaan wordt.
- De damwanden zijn voldoende erosiebestendig, zodat de bekleding ook bij grote vervormingen voldoet
- Microstabiliteit is niet relevant door de damwanden aan weerszijden van de kruin, waardoor dit mechanisme niet op kan treden.

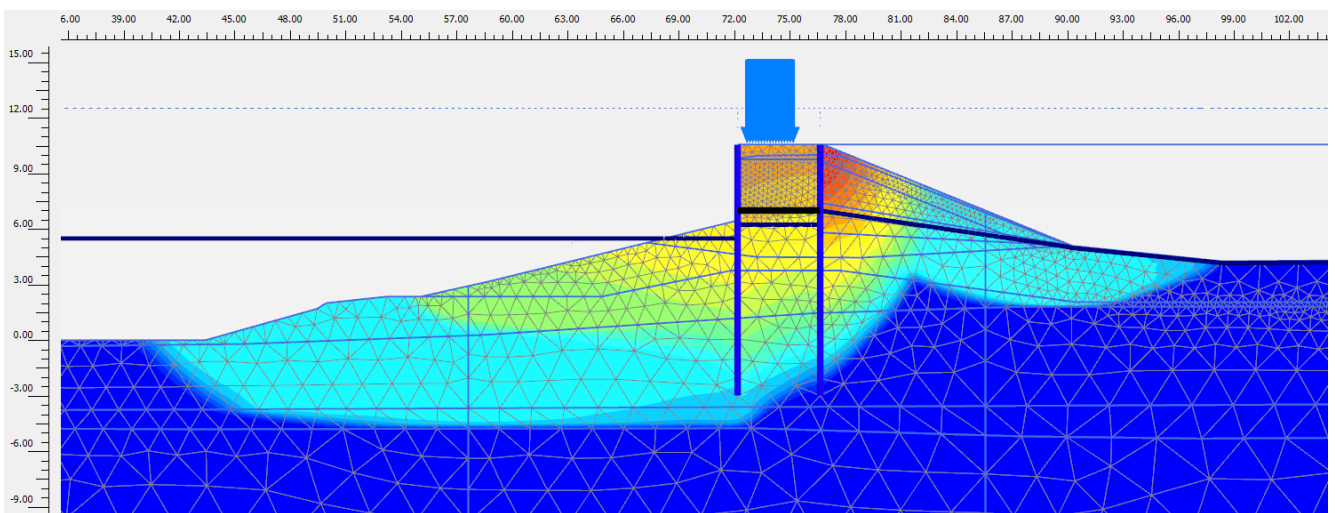
In de situatie STBU voldoen de vervormingen ruim aan de standaard eis.

De binnenwaartse en buitenwaartse stabiliteit voldoen met  $\Sigma M_{sf} = 1,32$  en  $\Sigma M_{sf} = 1,49$  ruim aan de eis ( $\gamma_b = 1,10$ ). De situatie zonder overslag is maatgevend. De glijvlakken zijn weergegeven in Figuur 7 en Figuur 8. De damwanden en verankering voldoen ruim op sterkte, met unity checks van maximaal ca. 0,50. Er is echter voor gekozen om de lengte en zwaarte van het damwandprofiel AZ24-700 en de

verankering GEWI 63,5T niet verder te optimaliseren. De reden is met name het beperken van de vervormingen door een stijvere constructie. Daarnaast speelt de installeerbaarheid een rol bij de keuze van het damwandprofiel. Bij een lichter profiel is de kans op schade tijdens de installatie te groot. Ook de invloed van een zwaarder damwandprofiel AZ36-700 is beschouwd, om de vervormingen verder te beperken. Hiermee werd echter nog niet voldaan aan de vervormingseis van 150 mm, zodat gekozen is voor een lichter damwandprofiel in combinatie met de Toets op Maat.



Figuur 7: Maatgevend glijvlak STBI (vervormingen in de sterktereductie fase)



Figuur 8: Maatgevend glijvlak STBU (vervormingen in de sterktereductie fase)

## 4.5 De invloed op de geohydrologie

Voor de invloed op de regionale geohydrologie onder 'dagelijkse omstandigheden' zijn dezelfde modellen en methodes gebruikt als voor de reguliere langsconstructies. Voor de geohydrologie bij



hoogwater gerelateerde belastingsituaties zijn aanvullende belastingcombinaties beschouwd, zoals hierboven bij de belastinggevallen is beschreven.

#### **4.6 De eventuele werking van dicht bij elkaar staande wanden die samen met de tussenliggende grond als samengestelde ligger werken**

Als de wanden dicht bij elkaar staan kan hierdoor trek in één van de damwanden ontstaan. In het geval van de kistdam bij TiWa bleek dit ook het geval te zijn in de damwand aan de rivierzijde, in de binnenwaartse belastingsituatie. Om te voorkomen dat de damwand te veel trekkracht opneemt, is onder de damwanden, zoals hierboven al beschreven, een elastoplastische puntveer gemodelleerd met een trekdraagvermogen van nul. De maximale trekkracht die optreedt in de damwand ten gevolge van de wrijving tussen de grond en damwand in het model bedraagt ca. 50 kN/m. Het verticaal draagvermogen is getoetst voor zowel het druk- als trekdraagvermogen van de damwanden en voldoet ruim bij de inbedding van de damwand van ca. 4 m in het Pleistocene zand. Conform de PPL is hierbij gerekend met een reductie van de conusweerstand als gevolg van trillend inbrengen van de damwanden en afname van de korrelspanning ten gevolge van hoogwater.

#### **4.7 Resultierend ontwerp kistdam**

Uit de ontwerpverificaties blijkt dat een kistdam met damwanden AZ24-700 (S355) voldoet aan de eisen ten aanzien van sterkte. De damwanden hebben een lengte van ca. 12 m met een puntniveau van NAP -3,0 m in verband met de stabiliteit van de constructie. Voor piping/heave voldoet een puntniveau van NAP -1,5 m. De damwanden zijn verbonden door middel van legankers type GEWI 63,5T op een niveau van NAP +7,0 m. Dit is ca. 3 m onder het niveau van de kruin. De reden voor het lage ankerniveau is de gunstige krachtswerking in de kistdam. Er is gerekend met corrosie (12 mm op de diameter) van de ankers. Omdat in het ontwerp van de kistdam rekening moet worden gehouden met het ontstaan van een restprofiel, treedt er een relatief grote uitbuiging van de damwanden op. Door het lage ankerniveau worden de uitbuiging en krachten in de damwand beperkt.

Een foto van de kistdam tijdens uitvoering is weergegeven in Figuur 9.



Figuur 9: Foto van de kistdam tijdens uitvoering

## 5. Overige bevindingen ontwerp kistdammen TiWa

Naast de in deze casus beschreven kistdam, zijn voor de dijkversterking Tiel-Waardenburg op andere locaties kistdammen ontworpen en zijn twee bestaande kistdammen getoetst, die bij de vorige dijkversterking in 1995 zijn aangebracht. Deze kistdammen zijn op dezelfde manier berekend als de beschreven casus. Deze berekeningen leidden tot de volgende bevindingen:

- Als de kistdam fungeert als heavescherm voor het voorkomen van piping, kan de heavelengte maatgevend zijn voor het puntniveau van de damwanden. In dat geval is het voldoende als de damwand aan de polderzijde lang genoeg is en kan het ontwerp geoptimaliseerd worden door de damwand aan de rivierzijde korter te maken. In het geval van een kistdam bij TiWa leverde dit een besparing op van 7 m damwandlengte aan de rivierzijde. Het verschil in damwandlengte leidde niet tot een significant ander krachtenspel in de kistdam.
- Bij de toetsing van de bestaande kistdammen, bleek de sterkte van de ankerstangen maatgevend. Door een inspectie van de kistdammen, waarbij de ankers vrij gegraven zijn, bleek dat de opgetreden corrosie veel minder was dan de waarde van 0,06 mm per jaar waarmee conform de PPL gerekend dient te worden. Hiermee bleek de restlevensduur van de kistdam alsnog ruim boven de 100 jaar te liggen.

## 6. Referenties

- [PPE 2020] POVM Eindige-elementenmethode (PPE), POV Macrostablieit, maart 2020
- [PPL 2020] POVM Langsconstructies (PPL), POV Macrostablieit, maart 2020
- [WSRL 2020] Werkprotocol Langsconstructies, Waterschap Rivierenland, versie D2.0, 15-02-2020
- [CUR 166] CUR-publicatie 166 (zesde druk) Damwandconstructies, Stichtig CURNET, Gouda, juli 2012