



Dennis Grotegoed
GeoConsultancy BV



Johan Bogaards
Royal HaskoningDHV



Eelco van Putten
DEME Infra



Stefanos Gkekis
Witteveen+Bos

DE BLANKENBURGVERBINDING – KISTDAMONTWERP VAN DE MAASDELATUNNEL

Inleiding

In opdracht van Rijkswaterstaat realiseert BAAK, een consortium van Ballast Nedam, DEME en Macquarie, de nieuwe Blankenburgverbinding. De Blankenburgverbinding verbindt de A20 bij Vlaardingen met de A15 bij Rozenburg middels een nieuwe snelweg, de A24. Deze verbinding draagt bij aan een robuust netwerk. De drukte op de A15 en de Beneluxcorridor neemt af en de bereikbaarheid van de Rotterdamse haven naar de Randstad

verbetert. De A24 wordt ingepast in de omgeving en voorzien van een landtunnel op de noordoever (Hollandtunnel) en een zinktunnel (Maasdelatunnel) onder de Nieuwe Waterweg. Ter plaatse van de Maasdelatunnel wordt dit deel van de Nieuwe Waterweg het Scheur genoemd. Ook wordt de A20 verbreed. De nieuwe rijksweg wordt in 2024 opgesteld.

In de tender heeft BAAK het referentieontwerp voor de zinktunnel aangepast van zes kleine naar

twee grote zinkelementen. Slechts twee afzinkoperaties in plaats van zes reduceert de hinder voor scheepvaart op de druk bevaren Nieuwe Waterweg. Met twee elementen blijft het voor scheepvaart mogelijk de hoofdvaarweg te kruisen. De maximale lengte van een zinkelement is beperkt waardoor de toeritten vanaf de oever tot tegen de hoofdvaarweg moeten worden doorgetrokken. Door gebruik te maken van kistdammen (figuur 1) wordt dit mogelijk en wordt tevens het voor de zinksleuf benodigde ruimtebeslag in de “oevers” verder beperkt. Aan de noordoostzijde is in het verlengde van de kistdam nog een laad- en loskade gerealiseerd, zodat een groot deel van de aanvoer van materialen ten behoeve van de realisatie van de gehele Blankenburgverbinding via het water kan plaatsvinden. Hierdoor blijft het onderliggend wegennet nagenoeg onbelast. Na realisatie van de tunnelverbinding worden de kistdammen ontmanteld en komt de oorspronkelijk breedte van de waterlijn van Het Scheur weer terug. In dit artikel wordt ingegaan op het ontwerp van de tijdelijke kistdammen.

Ontwerp van de Kistdammen *‘De diepste (tijdelijke) kade van Rotterdam’*

Dat het ontwerp van de kistdammen uitdagend is blijkt wel uit het feit dat deze tijdelijke constructie een grotere kerende hoogte en een dieper bodemniveau heeft in vergelijking met de diepzeekades van het havengebied van Rotterdam.

De kistdammen bestaan uit damwanden en combiwanden. De zijwanden en waterzijdige wand zijn uitgevoerd als combiwand met buispaaldiameters oplopend tot Ø1820-25 mm met bovenzijde op NAP +3,5 m en tot een maximale diepte van NAP -40m. De landzijdige wand is uitgevoerd als lichtere combiwand of relatief zware damwand. Wanden worden gekoppeld met legankers oplopend in diameter tot M110/100 (Staalkwaliteit ASDO500). Bij het heien (figuur 2) tot dergelijke dieptes zijn aanzienlijke heiafwijkingen te verwachten. De diepste tussenplanken worden tot een diepte van NAP -33m weggezet. Het risico op slotopeningen, doordat planken tijdens het inbrengen te veel ingedrukt of uitgetrokken worden, is daarom reëel. Omdat de permanente combiwanden van de tunnel zelfs nog iets dieper worden weggezet, is voor het bepalen van de te verwachten hei-



Figuur 1 – Kistdammen en toerit Noordzijde (boven) en Zuidzijde (onder).

SAMENVATTING

De bouwcombinatie BAAK realiseert op dit moment de Blankenburgverbinding, een nieuwe snelwegverbinding A24 tussen de A20 bij Vlaardingen en de A15 bij Rozenburg. Een belangrijke schakel in deze verbinding is de Maasdeltatunnel met diepe toeritten en een zinkdeel. Om deze diepe toeritten mogelijk te maken zijn kistdammen in het druk bevaren "Scheur" ontworpen. Deze diepe toeritten

en de kistdammen zijn nodig omdat een bouwmethode met slechts twee zinkelementen mogelijk te maken. Hiermee zorgt BAAK voor zo min mogelijk hinder voor de scheepvaart en omgeving. In dit artikel worden enkele ontwerp-overwegingen en uitvoeringsaspecten van de kistdammen toegelicht.

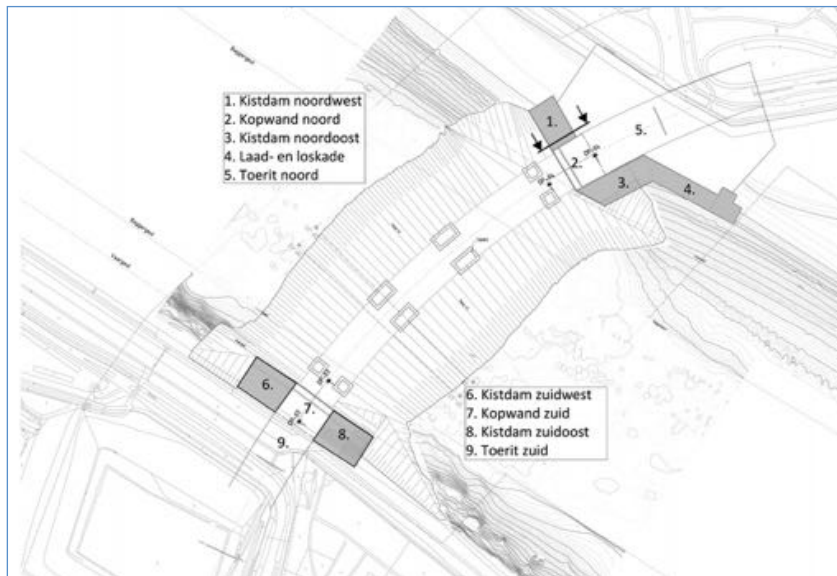
toleranties van de buispalen en de installeerbaarheid van de tussenplanken op het land een heiproef uitgevoerd. Hieruit bleek dat de tussenplanken voorgeboord moesten worden om zonder al te veel weerstand op diepte te komen. Met een extra maatvoerder die tijdens het makelaar geleid voorpoten aanwijzingen geeft over de verticaliteit van de buizen, kan de gewenste heitolerantie worden bereikt (maximaal 1:200).

De bovenzijde van de kistdammen heeft een niveau van NAP +3,5 m. De vulling van de kistdam bestaat deels uit oorspronkelijke grond en deels uit een aangebrachte zandvulling. Doordat de kistdammen zijn gerealiseerd buiten de hoofdvaartgeul bestaat de kistdamvulling vanaf NAP -8 m en dieper uit oorspronkelijk aanwezige grond. Daarboven is aangevuld met aangevoerd zeezand.

De voor het ontwerp maatgevende situatie treedt op nadat de zinksleuf voor de tunnelelementen is gebaggerd tot NAP -25,5 m / -28,5 m. Op dat moment bedraagt de kerende hoogte 28m voor de noordelijke kistdammen en zelfs 32m voor de zuidelijke. Om dit mogelijk te maken is een freatische bemaling voorzien binnen de kistdammen. Het verlagen van de waterdruk ontlast de wanden en verhoogt de korrelspanningen in de kistdammen waardoor de stabiliteit toeneemt. De van nature aanwezige kleilaag op het Pleistocene zand voorkomt dat de waterstandsverlaging in de omgeving merkbaar is. Aangezien de waterstandsverlaging een cruciaal onderdeel is van het ontwerp, zijn aanvullende calamiteitenscenario's in het ontwerp meegenomen. Zo is er een noodoverloop ontworpen die onder vrij verval kan uitstromen in het bouwdoek. Als de bemaling uitvalt, staat er een noodaggregaat klaar welke automatisch inschakelt. Tevens worden de pompen dubbel uitgevoerd. Daarnaast is een scenario denkbaar waarbij een schip een van de kistdammen aanvaart. In zo'n geval stroomt de kistdam vol met water en kan de freatische bemaling noch de noodoverloop voorkomen dat waterstand in de kistdam stijgt. Voor dit extreme scenario is een extra calamiteitensituatie doorgerekend waarbij is aangetoond dat de kistdam niet zal bezwijken.

'Ontwerpen met D-Sheet Piling, uitwerken met PLAXIS'

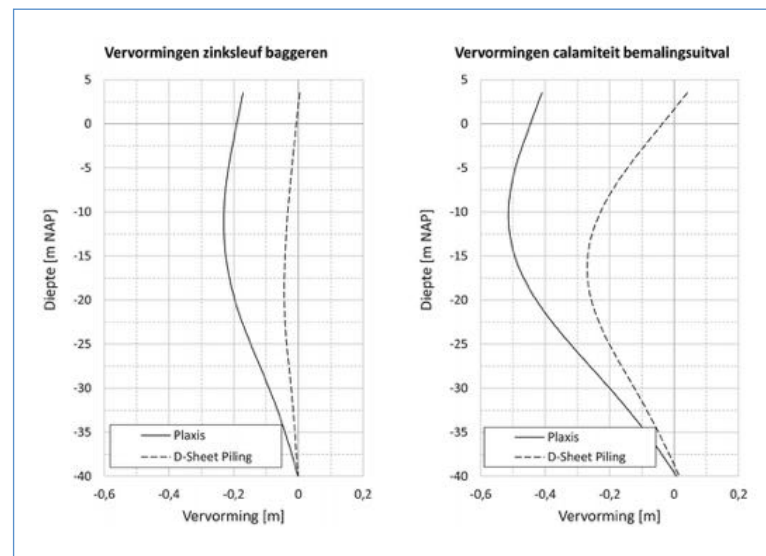
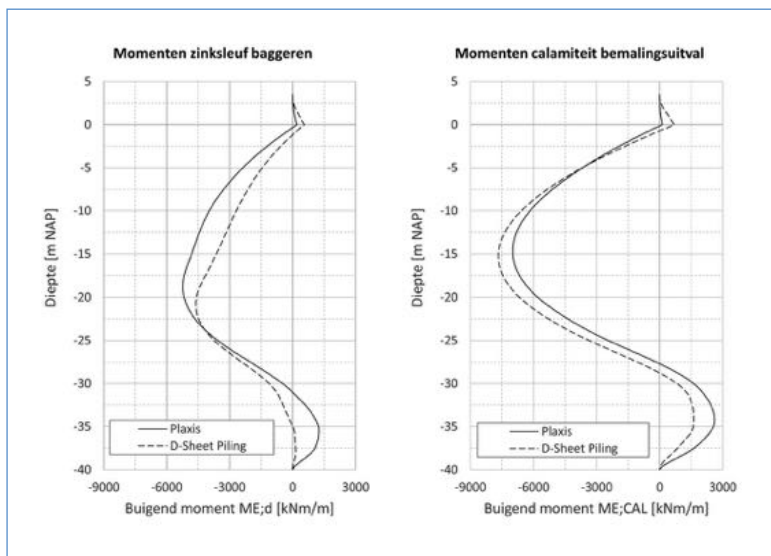
In het voorontwerp is gestart met een inschatting van de breedte van de kistdam gelijk aan de



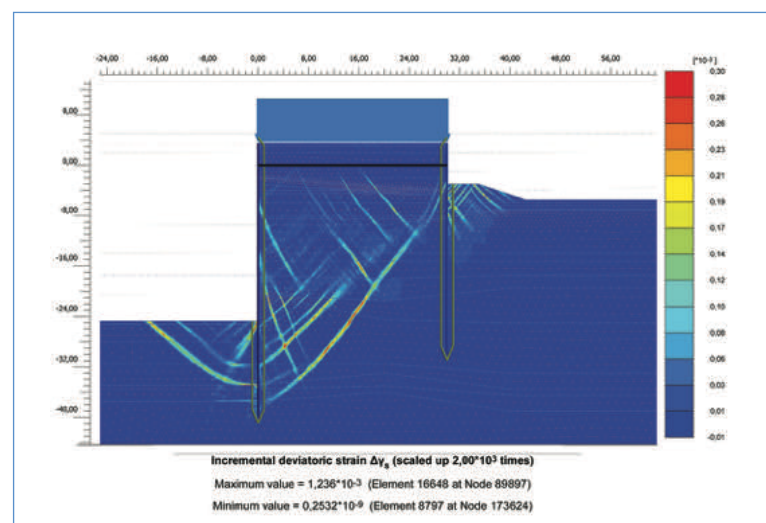
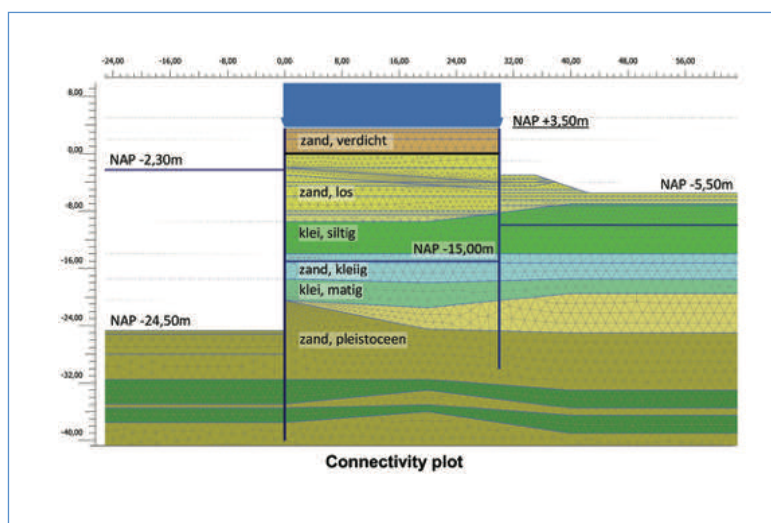
Figuur 2 – Heiwerkzaamheden kistdammen toerit Noordzijde.

kerende hoogte. In de CUR166 wordt voor de breedte een range van 0,7 à 1,5 keer de kerende hoogte genoemd. De combiwanden en damwanden van de kistdammen zijn in eerste instantie gedimensioneerd met een rekenmodel op basis van een verend ondersteunde ligger, D-Sheet Piling. Hierbij zijn zowel berekeningen gemaakt van de voorwand en "ankerwand" (indicatie stabiliteit) als een separate beschouwing van beide wanden waarbij de ankerkracht uit de som van de voorwand als belasting wordt ingevoerd op de

achterwand. Cruciaal hierbij is een veilige modellering in het verloop van het maaiveld, zodat actieve belastingen en passieve weerstand niet worden onderschat, respectievelijk worden overschat. Daarnaast is als extra randvoorwaarde gesteld dat de horizontale verplaatsing van de voorwand op ankerniveau gelijk moet zijn aan die van de achterwand. Op de krachtswerking (momenten en ankerkrachten) is bewust extra veiligheidsmarge aangehouden. Immers, het is algemeen bekend dat met deze manier van reke-



Figuur 3-4 – Vergelijk momenten (links) en vervormingen (rechts) maatgevende situaties D-Sheet Piling en Plaxis.



Figuur 5 – Visualisatie maatgevende situatie met actieve en passieve wiggen.

nen de interactie van wanden en de optredende grondpressies tussen voorwand en achterwand niet goed wordt meegenomen en er wordt geen rekening gehouden met de onderlinge beïnvloeding van de verschillende faalmechanismen. De geotechnisch adviseurs van de kistdammen hechtten er toch waarde aan om, op een snelle manier, gevoel te krijgen bij de orde van grootte van de stabiliteit en krachtwerving en impact van variaties in bijvoorbeeld ankerniveau, alvorens met een methode op basis van eindige elementen te gaan ontwerpen.

In het Definitief Ontwerp zijn vervolgens alle kistdammen beschouwd in PLAXIS 2D, waarbij de verificatiestappen ten behoeve van de uiterste grenstoestand zijn gemodelleerd overeenkomstig de NEN 9997-1. Voor de maatgevende bouwphase is tevens een rekenstap toegevoegd waarin zowel de algehele als de inwendige stabiliteit van de kistdam wordt getoetst. Deze toets geschiedt met gereduceerde sterkte van zowel de de kistdamvulling als de actieve en passieve wiggen met $\gamma_{\varphi} = 1,25$ en

$\gamma_{c'} = 1,45$ overeenkomstig betrouwbaarheidsklasse 2 (RC 2) van NEN9997-1. Conform CUR 166 zou voor de toetsing van de inwendige stabiliteit alleen op de kistdamvulling een reductie van de sterkte met $\gamma_{\varphi} = 1,45$ moeten worden toegepast. Aangezien de grond aan de achterzijde van de kistdam een belangrijke aandrijvende belasting levert ten aanzien van de inwendige stabiliteit is ervoor gekozen om bij toetsing niet alleen op de vulling van de kistdam, maar ook op de actieve en passieve korrelpressies een sterktereductie toe te passen. De sterktereductie is aangehouden in lijn met NEN 9997-1.

Nadat de eerste eindige elementen modellen waren opgesteld in het DO, is een vergelijking gemaakt tussen beide methoden. In figuren 3 en 4 zijn momenten en vervormingen voor de maatgevende situaties vergeleken. Voor de voorwand van de kistdam is de situatie na baggeren van de zinksleuf maatgevend in UGT. Daarnaast is het calamiteitscenario met bemalingsuitval (of lekkage na aanvaren) na gebaggerde zinksleuf ook relevant.

De optredende momenten tussen Plaxis en D-Sheet Piling verschillen van -12% tot +10%. Wat wel opvalt is dat in de fase zinksleuf baggeren Plaxis wat hogere momenten geeft en dat het veldmoment op een hoger niveau ontstaat. Dit is het gevolg van de overlap van de actieve en passieve wig van voor- en achterwand. Deze interactie zit niet in D-Sheet Piling, maar komen wel tot uiting in Plaxis.

De vervormingen worden in D-Sheet Piling onderschat. Dit komt omdat de vervorming ten gevolge van de overlap van actieve en passieve wig en de interne schuifvervorming van de kistdamvulling in D-Sheet Piling niet wordt meegenomen. In Plaxis is waarneembaar dat de gehele kistdam enigszins schraakt. De ankerkrachten zijn in de D-Sheet Piling sommen structureel circa 30% hoger. Na een terug analyse van de Plaxis resultaten in D-Sheet Piling, waarbij de ankerstijfheid is verlaagd zodat de vervormingen tussen D-Sheet Piling en Plaxis beter overeenkomen, lagen de ankerkrachten van D-Sheet Piling en Plaxis in dezelfde orde van

grootte. Geconcludeerd wordt dat het gebruik van D-Sheet Piling in een voorontwerp tot de mogelijkheden behoort om eerste dimensies af te schatten en variaties snel en eenvoudig te onderzoeken. Tijdig opstarten van een eerste Plaxis model wordt, gezien onderlinge interacties van voor- en achterwand en bijkomende vervormingen van interne schuifspanningen in het vulmateriaal van de kistdam wordt wel noodzakelijk geacht.

Vanuit de nadere analyses van het DO met de eindige elementenmethode, waarbij ook rekening is gehouden met de getijdewerking, waterspiegel-daling en combinatie van scheeps- en windgolven, is gebleken dat een resulterende verhouding hoogte/breedte van ca. 1,0 voldoende is om krachtwerking en vervorming binnen acceptabele grenzen te houden. Zelfs bij een breedte van 30m in combinatie met een relatief hoog ankerniveau is nog te zien dat actieve en passieve wiggen elkaar kunnen overlappen, zie figuur 5.

Ten opzichte van het tenderontwerp is, om de veiligheid van de werknemers tijdens de bouw van de kistdammen te verhogen, het ankerniveau verhoogd. Hierdoor is werken beneden de waterlijn tijdens de bouw van de kistdammen voorkomen. Dit voor de krachtwerking ongunstige effect is grotendeels gecompenseerd door een extra waterstandverlaging binnen de kistdam. Voornoemde is een goed voorbeeld van invulling van het ABC (Always Be Careful) beleidsprincipe van BAAK.

“De kracht van begrijpelijke rekenmodellen”

De kracht van een goed ontwerp is door de complexe situatie dusdanig te ontleden dat begrijpelijke “gesimplificeerde” (ontwerp) modellen ontstaan. Resultaten en effecten van variaties kunnen dan eenvoudiger worden verklaard en ingeschat. Bij het ontwerp van de kistdammen is dit gerealiseerd door de krachtsafdracht van kopwanden, die de toerit van de tunnel afsluiten, niet via de kistdammen, maar via de toerit zelf af te leiden. In het voorontwerp was voorzien om het vakwerk die de kopwand ondersteund zijn krachten te laten afdragen naar de aan weerszijden aanwezige kistdammen. In het definitief ontwerp zijn deze krachten afgeleid naar de aanwezige langswanden van de toerit. Hiermee is voorkomen dat een relatief grote belasting op en belastingafdracht via de kistdam zal optreden, welke in complexe 3D effecten resulteert.

Door deze aanpak is BAAK erin geslaagd om binnen 9 maanden van VO, DO en UO tot start uitvoering van de kistdammen te komen. Opgemerkt wordt dat in verband met de opstart van de fabricage van de buispalen de definitieve afmetingen van de combiwanden na slechts 6 maanden bekend dienden te zijn. Om tijdwinst te behalen bij het aanzienlijk aantal rekensneden, variaties en fase-

ringstappen in PLAXIS, is gebruik gemaakt van een geavanceerd ontwerpproces met geautomatiseerde EEM opbouw en uitvoer.

Uitvoeringsaspecten “Legankers van 100mm in diameter en 60m lang”

Naast de breedte is ook het ankerniveau een belangrijke design driver binnen het kistdamontwerp. Het niveau van de legankers is, zoals eerder benoemd, een veiligheidsoverweging geweest. Er is bewust voor gekozen om de legankers (figuur 6) niet onder de gemiddelde waterlijn aan te brengen. Dat wil zeggen op ca. NAP +0,00m. Dit heeft uiteindelijk geresulteerd in beperkt zwaardere combiwanden dan wanneer de legankers op een dieper niveau aangebracht zouden worden. Door de verbinding tussen buispaal en leganker met een ankerplaat in een betonprop (figuur 7) binnen de buispaal te realiseren is ervoor gezorgd dat men onafhankelijk van getijde of golfslag kon werken. Om diezelfde reden is voor de delen van de kistdam die zijn uitgevoerd met een damwand ervoor gekozen om gebruik te maken van een, aan de binnenzijde, gelaste ankerstoel (figuur 7). Vanwege ankeruitval zijn alle ankers in de buizen dubbel uitgevoerd.

Een bijkomend voordeel van het op een hoger gekozen ankerniveau is dat het aandeel zakkende

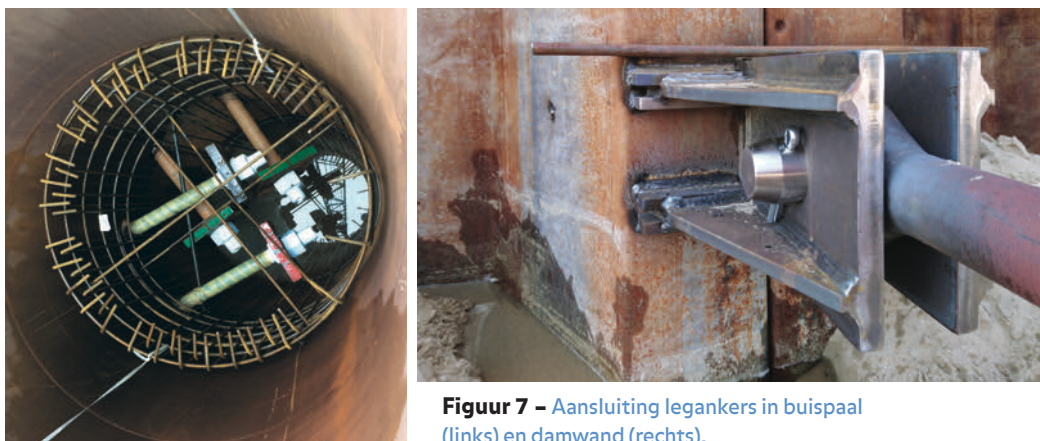
grond als belasting op de legankers wordt vermindert. Vanwege geringere effectieve spanningen door een beperkte hoogte van de aanvulling boven het ankerniveau is de belasting beperkt gebleven tot “slechts” 40% extra ten opzichte van de verwachte ankerkracht. Om de staaldoorsnede zo efficiënt mogelijk te kunnen gebruiken voor axiale trek, zijn alle ankers uitgevoerd met scharnierende verbindingen.

“Balanceren met grond- en waterdruk”

Om de kistdammen voldoende sterkte en stabiliteit te geven, is een goede vulling van de kistdam belangrijk. De combiwanden zijn vanaf het water aangebracht. De bovenste meters onder de waterbodem bestaan uit slappe kleilagen en moesten deels worden vervangen door schoon zand. Dit kan slechts tot een beperkte diepte om te voorkomen dat de combiwanden sterk vervormen en onvoldoende passieve weerstand kunnen ontwikkelen. Buiten de kistdammen is immers nog niet gebaggerd. Na baggeren tot een diepte van ca. NAP -8m zijn de kistdammen stapsgewijs gevuld. Om relatief snel te kunnen vullen zonder dat er te hoge wateroverspanningen ontstaan, zijn voorafgaand in de kistdammen vanaf pontons verticale drains aangebracht. Om de kistdammen met zand te kunnen vullen tot ankerniveau op NAP +0,00m was reeds een gedeeltelijke bemaling in de kist-



Figuur 6 – Legankers kistdammen.



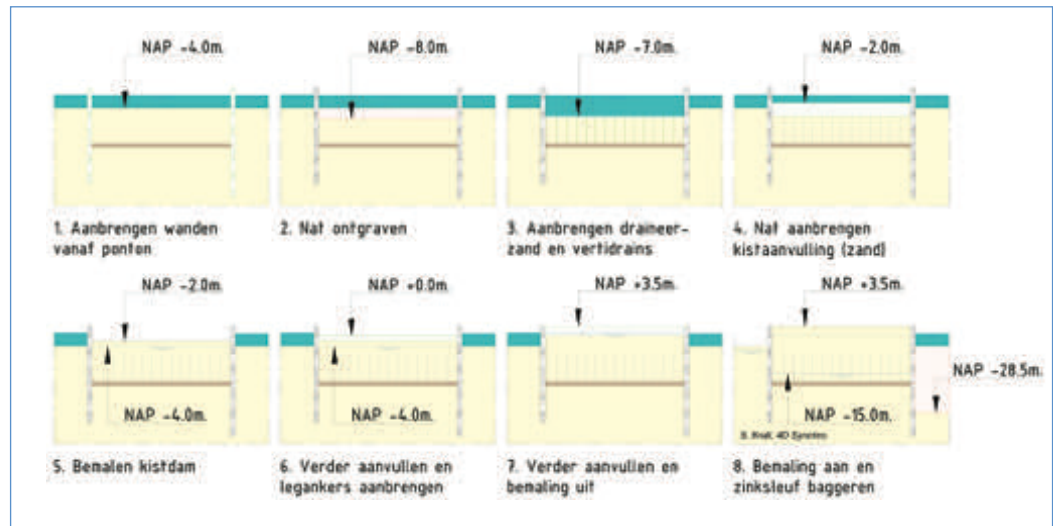
Figuur 7 – Aansluiting legankers in buispaal (links) en damwand (rechts).

dammen benodigd. Deze faseringsstappen, met gedeeltelijk aanvullen en verder verlagen van de waterstand in de kistdam, zorgen ervoor dat grond- en waterdruk steeds in evenwicht blijven en de krachten en vervormingen niet te groot wordt voordat de legankers verbonden zijn. In figuur 8 zijn schetsen van de verschillende faseringsstappen opgenomen van kistdam noordwest. Beperkte vervormingen waren ook gewenst vanwege de geringe stelbaarheid van de legankers.

Conclusie

Door toepassing van de tijdelijke kistdammen, die na het baggeren van de zinksleuf een aanzienlijke kerende hoogte hebben, is BAAK in staat om ten behoeve van de passage van de hoofdvaarweg gebruik te maken van slechts twee afgezonden tunnelelementen. De kistdammen leveren tevens een verbeterde veiligheid, laad-los mogelijkheden, een logistiek betere bereikbaarheid en lagere te baggeren hoeveelheden. BAAK laat daarmee zien dat de belangen van omgevingspartijen, in dit geval Rotterdamse havenbedrijven en scheepvaart, in de aanpak worden meegewogen.

Door in het ontwerp de complexe situaties goed te ontleden en te simplificeren is BAAK in staat geweest om binnen 6 maanden na de start van het



Figuur 8 – Faseringsstappen kistdammen (kistdam Noordwest).

uitwerkingstraject de definitieve combiwanden te kunnen bestellen en binnen 9 maanden de eerste buispalen vanaf een ponton in Het Scheur te kunnen plaatsen. Het komt zelden voor dat ten behoeve van de realisatie van een tunnelproject, tijdelijke constructies met dergelijke afmetingen worden gerealiseerd die na een aantal jaar weer verdwenen zijn. Op het moment van schrijven van dit artikel zijn ook de funderingswerkzaamheden

van de tunnel reeds in afgeronde. De definitieve tunnelwanden bestaan ook uit combiwanden en damwanden en de diepe funderingselementen (voornamelijk op trek belast) zijn uitgevoerd als ankerpalen. Daarnaast is ook het eerste definitieve betonwerk al gerealiseerd. Ook bij deze activiteiten is veel ervaring opgedaan die ongetwijfeld met geotechnisch Nederland gedeeld zal worden. ●

OPLOSSINGEN VOOR WERELDWIJDE UITDAGINGEN

DEME is wereldleider op het gebied van baggeren, maritieme infrastructuur, offshore energie en milieusanering. Met onze typerende pioniersgeest en een duidelijke visie werken we bij DEME aan een duurzame toekomst. We bieden oplossingen voor wereldwijde uitdagingen: de stijgende zeespiegel, de groeiende wereldbevolking, de reductie van emissies, vervuilde rivieren en bodems en de schaarste aan mineralen.

www.deme-group.com