

In het ondiepe water van de Kaspische Zee ontstaan in de winter door opwaaiing en waterstroming enorme bewegende ijsmassa's. Het bewegende ijs vormt een serieuze bedreiging voor de constructies die nodig zijn voor de exploratie en productie van het enorme Kashagan-olieveld. Dammen beschermen de productie-eilanden tegen de ijsgang. Het bepalen van de belasting door ijsgang is een vak apart. Voor de meeste constructies geldt dat de sterkte van het ijs de maximale belasting bepaalt. Afschuiven van het talud en integraal wegschuiven van een dam over de ondergrond zijn de belangrijke bezwijkmechanismen. De uiteinden van de dammen bestaan uit kistdammen met combiwanden waarvoor een nieuw type slotconstructie is ontwikkeld

# Kunstmatige eilanden in de Kaspische zee onder ijsbelasting

**Figuur 1** Exploitatie in de winter

## Inleiding

In het ondiepe water van de Kaspische Zee (drie tot acht meter) ontstaan in de winter door opwaaiing en waterstroming enorme bewegende ijsmassa's. Deze gevaarlijke combinatie van ondiep water en kruidend ijs is uniek in de wereld. Het bewegende ijs vormt dan ook een serieuze bedreiging voor de constructies die nodig zijn voor de exploratie en productie van het enorme 'Kashagan' olieveld. Een aanvaring met de ijsplaten, met afmetingen van enkele honderden meters tot kilometers, zou voor extreme belastingen zorgen op civiele constructies, in de orde van 1 MN per strekkende meter.

Ingenieursbureau Witteveen+Bos is sinds 1997 actief in Kazachstan en ontwerpt de infrastructuur die de oliewinningsconstructies moet beschermen tegen het kruierende ijs en in de zomer tegen hoge golven.

## Projectbeschrijving

Sinds het begin van het oliewinningsproject zijn meerdere exploratieboringen uitgevoerd. Deze boringen zijn uitgevoerd met behulp van een mobiel drijvend platform dat kan worden afgezonden op ondiepe onderwater berm. Deze tijdelijke constructies zijn ook toegepast tijdens de winter in combinatie met een actief monitoringsysteem. Als bescherming zijn stalen ijsbeschermingsconstructies (afgekort als IPS) toegepast.

Dit zijn speciaal gefabriceerde afzinkbare bakken (barges) met een schuine zijkant (zie figuur 1). Door de schuine zijkant zal het ijs sneller breken en zijn de ijsbelastingen lager. Op basis van het exploratie programma zijn de locaties van de productie-eilanden vastgesteld. De productie-eilanden in Kazachstan maar ook in de Arctische gebieden onderscheiden zich van normale eilanden en overige offshore constructies op onderstaande aspecten:

- Eilanden worden toegepast in ondiep water, met als gevolg dat ijs relatief snel accumuleert rondom het eiland. Dit heeft invloed op de bereikbaarheid en evacuatie, en kan leiden tot kruidend ijs op het eiland. Bij het ontwerp van de bekleding en taludstabiliteit dient hier rekening mee te worden gehouden.
- Eilanden hebben een relatief lage hoogte boven water (free board), waardoor ze kunnen worden blootgesteld aan golfoverslag en ijs (ride-up en pile-up). De eilanden worden daarom ontworpen met een ijsmanagement zone, kwetsbare faciliteiten worden beschermd en buiten deze zone geplaatst.

De eilanden zijn opgebouwd uit fijne fractie breuksteen van kalksteen (limestone quarry run). Dit materiaal is ruim voorradig en kan worden aangevoerd met duwbakken. De kalksteen wordt

eerst aangebracht tot 1 meter boven zeeniveau. Daarna worden de damwanden vanaf het eiland met behulp van een trilblok geïnstalleerd. De damwanden zijn circa 17 meter lang en worden op 20 meter afstand verankerd door een 5 meter hoge ankerwand. Tenslotte wordt de rest van het eiland in laagjes aangevuld en verdicht tot gewenst niveau. Huidig gemiddeld waterniveau is circa 1,0 m CD en huidige waterdiepte varieert tussen de 3 en 8 meter. De meeste eilanden worden gebouwd tot 5,2 m CD. Het niveau van het eiland is bepaald aan de hand van toekomstige scenario's voor waterspiegelstijging, upsurges die significant zijn vanwege de beperkte waterdiepte, golven en bodemdaling als gevolg van oliewinning. Voor alle semi-permanente eilanden geldt dat deze bestendig moeten zijn tegen ijsbelastingen gedurende de gehele levensduur. Hiervoor bestaan in feite twee opties:

- Optie 1: Toepassen van dammen als beschermingsconstructies rondom het eiland. Deze dammen moeten de volledige ijsbelastingen kunnen opnemen zodat kwetsbare constructies daarachter niet worden belast door ijs.
- Optie 2: Versterken van de keerconstructie van het eiland in combinatie met een veiligheidszone aan de periferie van het eiland. De keerconstructie moet de volledige ijsbelasting kunnen opnemen.

De keuze voor 1 van deze opties is afhankelijk van de geometrie en functionele eisen, zoals gebruiksduur, bemand c.q. onbemand, de processen en installaties op het eiland e.d. In overleg met Agip KCO is gekozen voor twee kunstmatige productie-eilanden die worden beschermd door een stelsel van dammen (optie 1). De overige eilanden zijn niet voorzien van beschermingsconstructies (optie 2). De twee eilanden worden omringd door dammen. De totale lengte van de dammen bedraagt meer dan 4 km. De dammen zijn circa 60 meter breed en 8 meter hoog. Deze aanzienlijke afmetingen zijn nodig om voldoende sterkte en stabiliteit te krijgen.

### Ijsbelasting

Het ontwerp van de infrastructuur voor de oliewinning in de Noord Kaspische zee vereist nieuwe technische oplossingen. Ijsbelasting is het primaire ontwerpcriterium voor de constructies.

Goede kennis van mogelijke ijsbelasting en scenario's is onontbeerlijk. Witteveen+Bos heeft, samen met Canadese ijsspecialisten, het unieke gedrag van het ijs op de Kaspische Zee in kaart gebracht. In de winter van 2005 is geparticipeerd in een uitgebreid veldonderzoek bestaande uit monitoring met ijsbewegingen, meting van ijsdikte met behulp van ground penetrating radar vanuit de lucht (helikopter), meting van ijsdikte en sterkte en onderzoek naar scouring van de zeebodem door stamukhi (ijsbergen van kruierend ijs). *Figuur 3* is een foto van een proef waarmee de druksterkte (crushing) van het ijs is onderzocht. De proef is uitgevoerd met een omgebouwde boorunit, van origine bedoeld voor geotechnisch onderzoek.

Het bepalen van de belastingen door ijsgang is een vak apart. De belasting is afhankelijk van veel aspecten waaronder de interactie

met de constructie.

In theorie zijn drie benaderingen mogelijk:

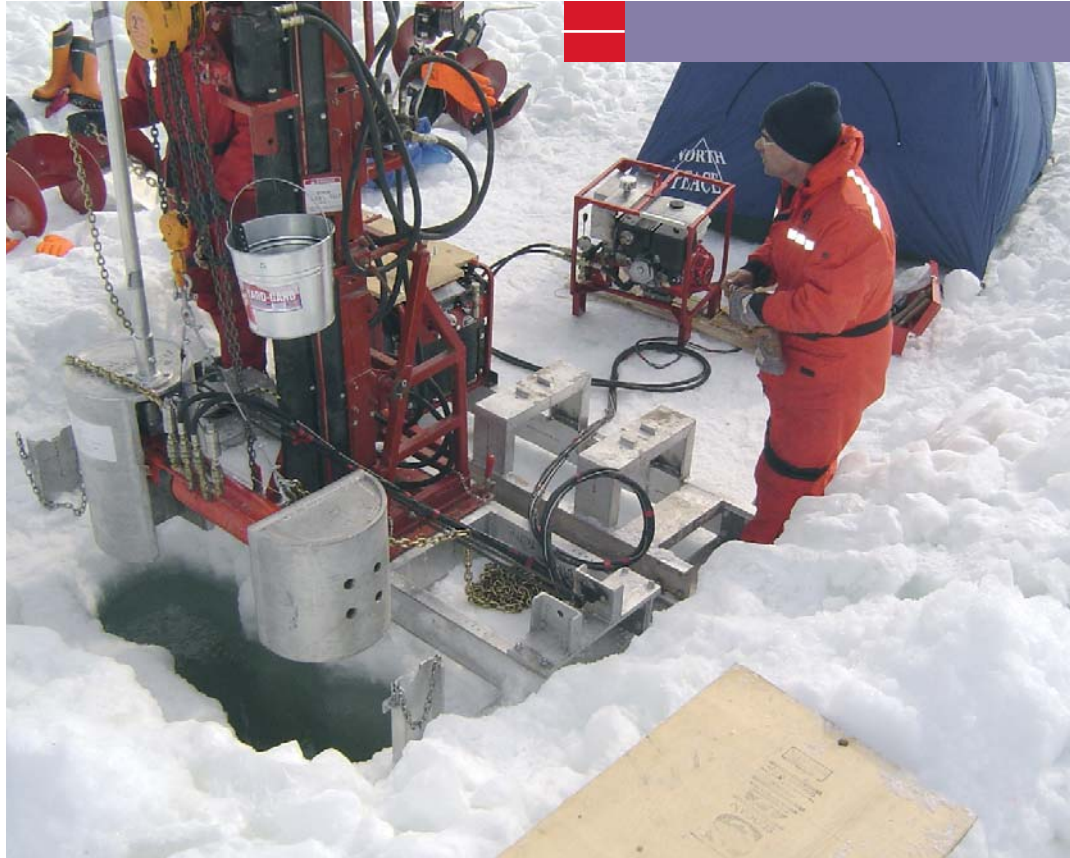
- Limit Force, op basis van de aandrijvende kracht;
- Limit Energy, op basis van de kinetische energie;
- Limit Stress, op basis van lokaal bezwijken van het ijs tegen de constructie.

De eerste twee benaderingen kunnen worden toegepast onder specifieke omstandigheden. Voor de meeste constructies geldt dat voldaan moet worden aan de Limit Stress benadering (bovengrens).

In de berekening van de ijsbelasting zit een 'sterkte-parameter'. De sterkte is afhankelijk van het bezwijkmechanisme van het ijs, in interactie met de constructie. In hoofdzaak worden drie bezwijkmechanismen onderscheiden: crushing (compression), bending (flexure) en rubbing



**Figuur 2** Productie-eiland met beschermende dammen in de winter



**Figuur 3** Onderzoek op het ijs.

(mix van voorgaande aspecten en o.a. shearing, splitting, buckling, creeping). Welk bezwijkmechanisme optreedt hangt af van de interactie met de constructie: vertikaal en smal of juist schuin en breed? Typische waarden voor de sterkte liggen in de orde van 0,1 tot 1,0 MN/m<sup>2</sup> voor buiging en 1,0 tot 10 MN/m<sup>2</sup> voor crushing. De totale kracht volgt uit vermenigvuldiging van de ijssterkte met de ijsdikte en constructiebreedte. De limit stress benadering geeft een bovengrens, hoger kan de uitgeoefende kracht op een constructie niet zijn omdat het ijs bezwijkt.

Bij de toetsing van de stabiliteit gaat het om de belasting en weerstand. Voor eisen met betrekking tot betrouwbaarheid, veiligheidsklassen, herhalingsperioden en partiële factoren is de Canadese norm voor ijsbelaste constructies (CSA, Ref.1) gehanteerd. Zowel de CSA als de Amerikaanse API en Russische SNIP en VSN gaan in op de eisen ten aanzien van constructies en bepaling van ijsbelastingen en scenario's. Daarnaast wordt er momenteel gewerkt aan een nieuwe ISO norm (19906) op het gebied van door ijs belaste offshore constructies.

### Geotechnische aspecten

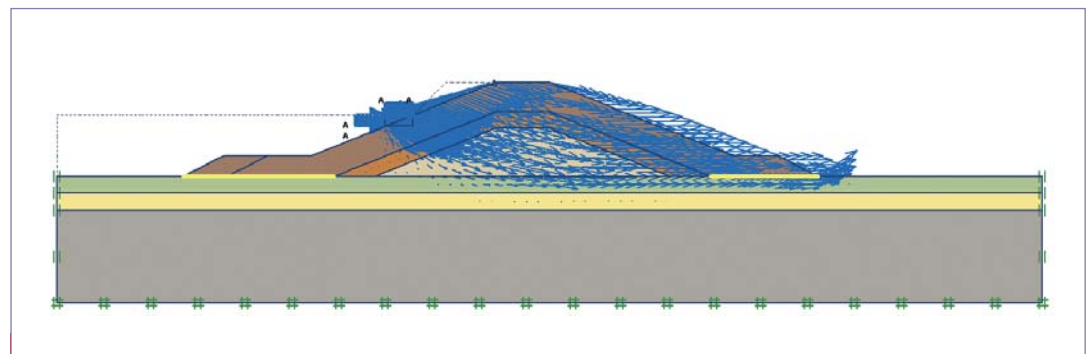
De ondergrond bestaat uit een toplaag van sediment bestaande uit schelpen, silt en slappe kleilagen, los fijn zand en gecementeerd zand. De laagopbouw is sterk wisselend, de totale dikte is circa 3 meter. De sedimentlagen zijn normaal

geconsolideerd. De silt- en kleilagen zijn te herkennen aan een lage conusweerstand ( $q_c < 0,3$  MPa) en hebben een lage ongedraineerde schuifsterkte ( $C_u < 25$  kPa). De zandlagen hebben een

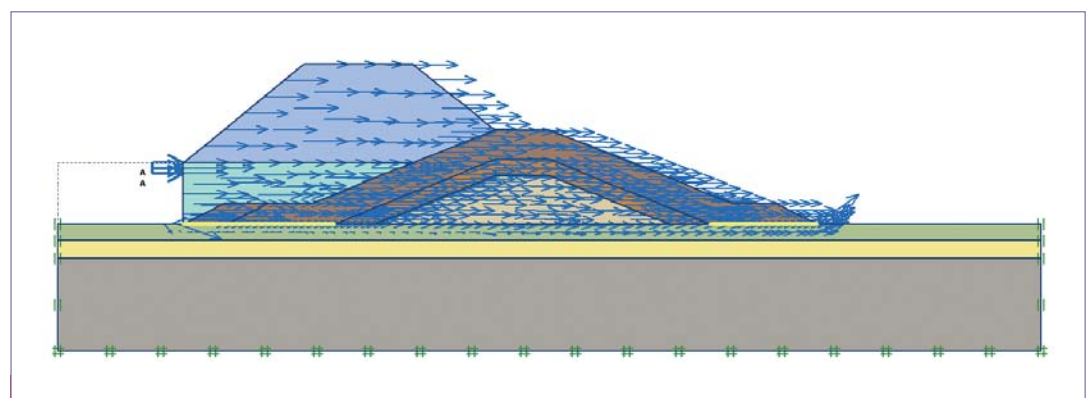
hoek van inwendige wrijving van 30 tot 40 graden afhankelijk van de pakking. Deze sedimentlagen zijn zeer bepalend voor de stabiliteit van de dammen omdat die een ondiep glijvlak hebben en gebruik maken van de slapste laag. Onder deze sedimentlagen ligt een kleilaag van tientallen meters dik. De vaste kleilagen zijn te herkennen aan de hogere conusweerstand ( $Q_c > 2$  MPa) en hebben een hoge ongedraineerde schuifsterkte ( $C_u = 50-150$  kPa) en zijn overgeconsolideerd. De punt van de damwanden staat in deze vaste kleilaag; ook alle overige diepe paalfunderingen worden volledig op schachtwrijving in deze kleilagen gefundeerd.

De eilanden en dammen zijn opgebouwd uit kalksteen (limestone quarry run en rock). De droge dichtheid van een proefstuk limestone rock is circa 1,85 ton/m<sup>3</sup> als gevolg van de interne poriën. De bulk dichtheid van limestone rock is nog lager door de poriën tussen de rock. De droge dichtheid van verdicht limestone quarry run (bulk) is aanzienlijk hoger dan dat van rock, zelfs tot 2,0 ton/m<sup>3</sup>. Daarnaast heeft het materiaal goede sterkte eigenschappen (wrijving en cohesie ten gevolge van verkitting).

Onderstaand wordt een aantal geotechnische constructies belicht, te weten dammen, combiwanden en versterkte damwandconstructies.



**Figuur 4** EEM berekening van een dam met ijsbelasting op het talud en een actief glijvlak.



**Figuur 5** EEM berekening van een dam met kruidend ijs en een integraal bezwijkmechanisme.

## Dammen

De dammen bestaan in de kern uit breuksteen van kalksteen. De kern is afgedekt met tenminste twee lagen stortsteen (armor rock) waarvan de buitenste bestaat uit hoge dichtheid stortsteen in verband met de gewenste duurzaamheid en 40 jaar levensduur.

Witteveen+Bos heeft aan de hand van vier 'ijsbelastingsscenario's' een methode ontwikkeld om het ontwerp van een dam te toetsen op ijsbelastingen (Ref.2). De analyses worden uitgevoerd met het eindige-elementenprogramma (EEM) PLAXIS, dat normaal wordt gebruikt om de interactie tussen grond en constructies te analyseren. Met de modellen is de stabiliteit van de dam te controleren en kunnen de benodigde dimensies worden bepaald.

Zoals beschreven is één van de opties het beschermen van de eilanden, dit kan met dammen die tevens dienen als golfbreker. Het gedrag van de dammen onder invloed van ijsbelasting is uitvoerig onderzocht. Er worden vier bezwijkmechanismen getoetst:

- **Edge failure:** dit wordt gecontroleerd door de horizontale ijsbelasting te toetsen aan de passieve weerstand bij een hoogte gelijk aan D50 van de armor layer. Edge failure is een onderhoudsprobleem en mag niet frequent optreden onder normale omstandigheden.

Edge failure mag optreden bij grotere ijsdiktes omdat hiermee het ijs in buiging bezwijkt en daarmee de belasting sterk afneemt.

- **Afsluiven talud:** net als bij dijken kan een actief glijvlak ontstaan, maar nu als gevolg van de horizontale en verticale ijsbelasting (zie figuur 4). De horizontale kracht kan in deze fase niet groter zijn dan de verticale belasting (gewicht van kruierend ijs op het talud) omdat anders het ijs van het talud wordt gedrukt. Aangezien de belasting zich zeer snel kan opbouwen (enkele minuten) moet rekening gehouden worden met onge-draineerd gedrag in de overwegend kleiige sedimentlagen onder de dammen.
- **Integraal afsluiven dam:** dit kan zich voordoen wanneer het talud volledig bedekt is met kruierend ijs (zie figuur 5). Hierdoor kan de ijsbelasting toenemen, schuift de dam over het funderingsoppervlak af en blijft de dam mogelijk zelfs intact. In dit scenario wordt uitgegaan van de ongunstige situatie met ijs tot aan de teen van het talud; ijs op de zeebodem zou op een gegeven moment gunstig kunnen gaan werken.
- **Decapitation,** oftewel het onthoofden van de dam. Uit onderzoek is gebleken dat de hier-

voor vermelde mechanismen eerder optreden. Dit mechanisme kan wel optreden wanneer de top van de dam bevroren is en zodoende als een schijf kan worden weggedrukt.

De ontwerpaanbevelingen en berekeningsmethodieken volgend uit dit onderzoek zijn tevens opgenomen in de nieuwe Rock Manual (Ref.3).

## Combiwanden

De uiteinden van de dammen bestaan vanwege nautische aspecten uit kistdammen met verticale wanden. Deze kopconstructies worden door hun geprononceerde positie blootgesteld aan hoge ijskrachten. Deze kopconstructie bestaat uit een symmetrische achthoekige kistdam die opgebouwd is uit combiwand-elementen. De combiwanden bestaan uit (primaire) buisprofielen met tussengelegen (secundaire) damwanden.

Vanwege de hoge belastingen zijn de buispalen en damwanden uitgevoerd in hoogwaardig staal, dat ook bij lage temperaturen voldoende sterkte behoudt. De eisen, die worden gesteld aan toepassing van staal in koude gebieden, zijn gereguleerd in de normen (bijvoorbeeld J2 kwaliteit conform Eurocode voor staalproducten) en worden onderzocht met behulp van kerfslagwaardetests. Het damwandprofiel is met extra dikte gewalst (zie kopje 'Onbeschermde keerconstructies'). De buispalen zijn gevuld met beton om de weerstand tegen lokale ijsdruk te vergroten. De grond achter de wand wordt extra goed verdicht. Ook het verbindingsslot moet worden aangepast aan de extreme belastingen. Vanuit deze achtergrond is een nieuw type verbindingsslot ontwikkeld, het K101 slot. Een robuuste verbinding voor combiwanden, die bestand is tegen grote ijsbelasting.

De standaard verbindingssloten voor combiwanden hebben zich in de afgelopen jaren bewezen door middel van toepassing bij verschillende kademuuren en bouwputten. Echter, bij het ontwerp van constructies in de Noord Kaspische zee is onderkend, dat deze verbinding een kwetsbaar onderdeel is van het geheel. De normale verbindingssloten van het type Larssen hebben als basis gediend voor het ontwerp van een nieuw type verbindingsslot. De in aanvulling gestelde eisen zijn onderstaand verwoord.

Deze eisen kunnen evengoed gelden voor een combiwand van een kademuur, maar zijn in deze situatie expliciet gemaakt:

- Het verbindingsslot moet uit één stuk bestaan.
- De lasverbindingen van het verbindingsslot moeten praktisch uitvoerbaar en controleerbaar zijn.



**Figuur 6** Foto van de bouw van een kopconstructie.

- Het verbindingsslot moet de belasting vanuit de damwand (trek, druk, afschuiving of verdraaiing) kunnen opnemen. Aan de hand van geavanceerde driedimensionale berekeningen zijn de krachten in het verbindingsslot bepaald, waaruit de dimensies van het verbindingsslot zijn afgeleid.
- Het verbindingsslot moet functioneren gedurende de hele levensduur. Het zoute karakter van de Kaspische zee kan tot aanzienlijke corrosie leiden. Voor alle profielen wordt in het ontwerp rekening gehouden met 6 mm corrosie en coating in een speciale zone. Dit heeft geleid tot een dikker verbindingsslot (14 mm).

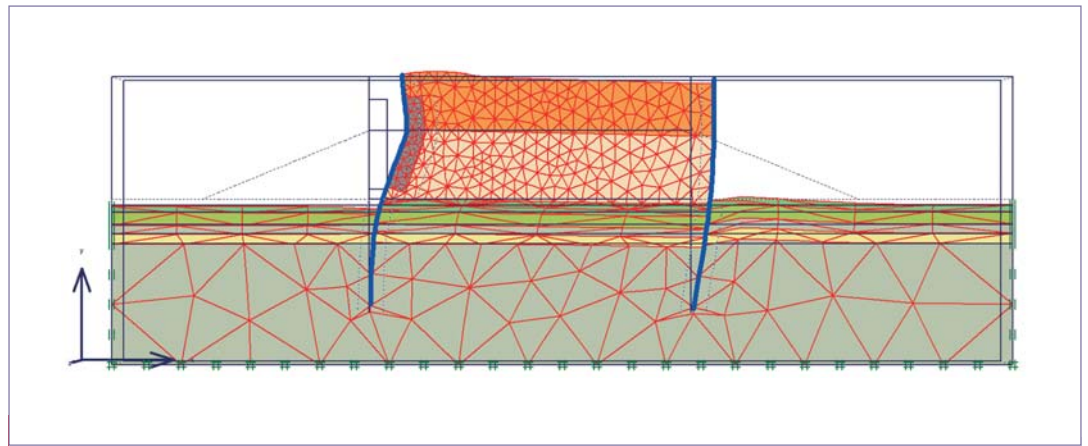
In 2005 zijn de eerste kopconstructies met succes gebouwd (zie figuur 6). De combiwanden zijn geïnstalleerd met behulp van een dubbel heiframe (Engels systeem), waarmee een goede uitvoeringsnauwkeurigheid is bereikt. Vanwege de vormvastheid en stijfheid van het K101 slot is ook de verbinding in een rechte lijn aan de buispaal gelast, ongeacht afwijkingstoleranties van de buispalen. Beide aspecten hebben ertoe geleid dat aan de uitvoeringstoleranties is voldaan.

### Onbeschermde keerconstructies

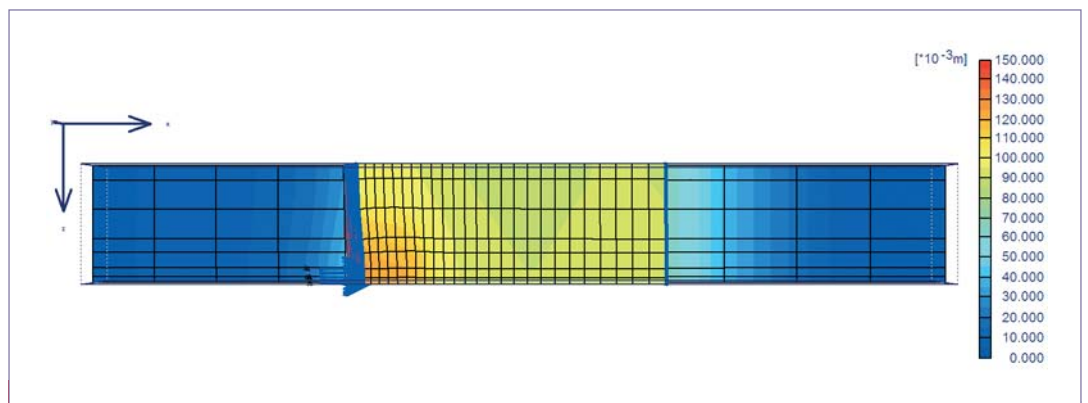
Een aantal eilanden is niet beschermd door dammen. Voor de keerconstructies zijn verschillende opties bekeken, zoals versterkte damwandconstructies, combiwanden bestaande uit buispalen en damwanden of combiwanden bestaande uit H-profielen met damwanden. Voor de ondiepe locaties is gekozen voor versterkte damwandconstructies.

De damwanden zijn ontworpen op zeer grote locale belastingen en hoge globale belastingen. Voor locale belastingen wordt uitgegaan van de locale ijsdikte die kan oplopen tot 2,5 meter. Voor de globale ijsbelasting wordt uitgegaan van een nominale ijsdikte van circa 1 meter. Om dergelijke grote ijsbelastingen te kunnen opnemen zijn onderstaande aanpassingen doorgevoerd:

- Toepassen van een speciaal aangepast damwand profiel met extra dik lijf en flens (Larssen 606-modified, flens 19 mm, lijf 12,5 mm). In tegenstelling tot de tendens in de markt van steeds dunnere profielen met hogere weerstandsmomenten is hier gekozen voor een robuuster profiel dat ook na 40 jaar levensduur en corrosie nog voldoet.
- Verhogen van het eilandniveau ter plaatse van de kades tot 6,7 m CD om zodoende meer



**Figuur 7** EEM berekening van versterkte damwandconstructie belast door ijs.



**Figuur 8** 3D-EEM berekening van versterkte damwandconstructie lokaal belast door ijs, bovenaanzicht.

passieve weerstand te mobiliseren. Zonder deze aanpassingen zou de vervorming te groot worden en grondmechanisch bezwijken optreden vergelijkbaar met een passieve wig voor een ankerwand.

- Storten van beton achter de damwand bij de zwaarst belaste secties. Het beton geeft een gunstige spreiding van de ijsbelasting in horizontale en verticale richting. Dit is met name effectief voor hoge locale ijsbelastingen over circa 5 tot 25 meter breedte. De mate van spreiding is onderzocht aan de hand van vergelijkende PLAXIS 2D en 3D berekeningen, zie figuren 7 en 8 (kistdam constructie). Daarnaast voorkomt het beton dat het profiel van de damwand samengedrukt kan worden waarmee het weerstandsmoment zou afnemen.

### Conclusies

Geotechniek is grenzeloos, in de zin dat het verder gaat dan de dagelijkse praktijk in Nederland. Het is ook grenzeloos in de zin van grensverleggend. Het bovenstaande project is daar een

voorbeeld van. Geotechniek wordt toegepast in combinatie met 'ice-engineering'; daarnaast worden nieuwe ontwerpmethoden en producten ontwikkeld en bestaande verbeterd. ■

*Reacties op dit artikel kunnen tot 1 april 2008 naar de uitgever worden gestuurd.*

### Literatuur

Ref.1: CSA-S471-04, *General requirements, Design criteria, The environment and loads. Code for the design, Construction and Installation of Fixed Offshore Structures.* Canadian Standards Association, 2004

Ref.2: H.J. Lengkeek en K.R. Croasdale, *Design of Ice Protection Barrier in Caspian Sea*, 2003: 22ND International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, June 2003, Cancun, Mexico.

Ref.3: CUR, CIRIA, CETMEF, *The Rock Manual, The use of rock in hydraulic engineering*, 2007.