

Aanpassingen aan methode Sellmeijer

# Proeven met IJkdijk tonen gevaar van piping

In het najaar van 2009 is in het Oost-Groningse Booneschans tot vier maal toe een dijk bezweken op het faamechanisme zandmeevoerende wellen, vaak kortweg aangeduid als 'piping'. De hier en daar levende twijfel – of hoop – dat piping niet tot een dijkdoorbraak kan leiden, is hiermee weggenomen.

DR.IR. A.R. KOELEWIJN / IR.IR. U. FÖRSTER

Na de succesvolle proef gericht op macro-instabiliteit (zie het artikel 'Zwakke plek in IJkdijk vroegtijdig gesignaleerd' in *Land+Water* 1-2/2009) wilden de bedrijven die via de Stichting IJkdijk nieuwe sensoren uittesten op de geschiktheid om dijkfalen tijdig aan te tonen, graag verder met het volgende faalmechanisme. Tegelijk bestond er binnen het onderzoeksprogramma 'Sterkte & Belastingen Waterkeringen' (SBW) behoefte om de bevindingen op het gebied van piping te toetsen in grootschalige proeven. Dit bleek mogelijk te zijn op het proefterrein in Booneschans, dat door Staatsbosbeheer tijdelijk ter beschikking is gesteld.

Uit het verleden was al bekend dat een waterkering op een zand- of grindlaag slechts een beperkt verval kan keren voordat het korrelige materiaal wordt uitgespoeld. Een eeuw geleden gaf de Britse kolonel Bligh dankzij zijn ervaringen in India een ondergrondafhankelijke verhouding aan tussen de benodigde kwelweglengte en het

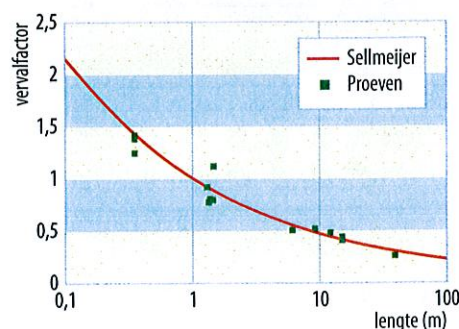


De eerste proefdijk na bezwijken door piping.

maximale verval over de kering, voor fijn zand bijvoorbeeld een factor 18, voor grof grind factor 3. Latere onderzoekers hebben ingewikkelder formules voorgesteld, waarvan de regel van Sellmeijer een van de bekendste is. Toch wordt de formule van Bligh ook in Nederland nog veel toegepast.

## Laboratoriumonderzoek

Doel van het onderzoeksprogramma SBW – uitgevoerd door Deltares in opdracht van Rijkswaterstaat – is meer inzicht te krijgen in de belasting op en de sterkte van waterkeringen, en zo de rekenregels en -modellen voor de toetsing te verbeteren. De wens om het aandeel 'geen oordeel' in de toetsuitkomsten te verkleinen en het terugbrengen van onterechte goed- en afkeuringen vormden de aanleiding voor het SBW-onderzoek. De hervalidatie van het pipingmechanisme is onderdeel van dit onderzoeksprogramma. Hiertoe zijn eerst tientallen kleine laboratoriumproeven met een kwelweglengte van zo'n 0,3 meter uitgevoerd, allereerst om het verschijnsel zelf beter te begrijpen, vervolgens om uiteenlopende typen zand bij verschillende pakkingsdichtheden te beproeven. Hiermee zijn



## KWELWEGLENGTE

Verband tussen kwelweglengte en keerbaar verval.

aanpassingen aan de regel van Sellmeijer voorgesteld.

Om deze bevindingen te valideren en om de invloed van de schaalgrootte te kunnen toetsen, is een grotere laboratoriumopstelling gebouwd, met een kwelweglengte van ongeveer 1,5 meter. Daarnaast zijn vier proeven uitgevoerd in de geocentrifuge. Deze proeven gaven een bevestiging van hetgeen was afgeleid uit de resultaten met de kleine proeven en theoretische beschouwingen. Deze lieten ook een sterke afhankelijk-

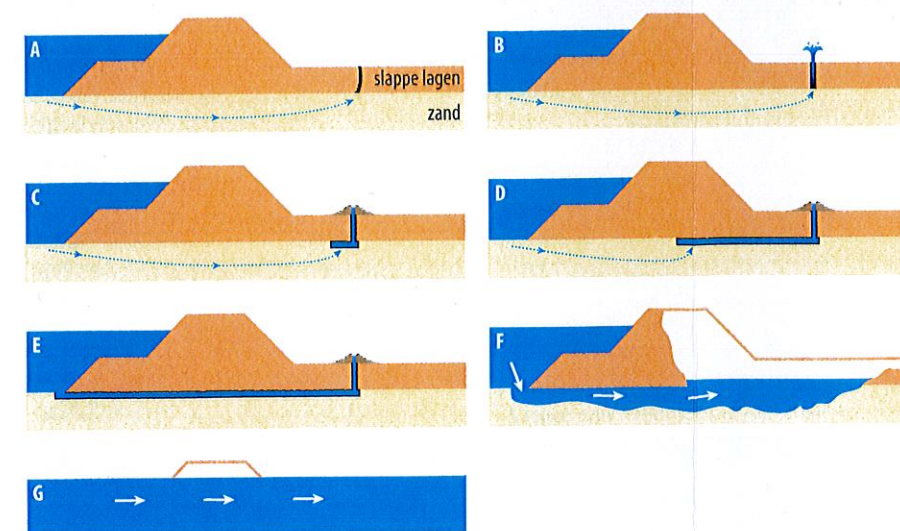
heid zien van de schaalgrootte: een kleine laboratoriumdijk zou naar verhouding meer verval kunnen keren dan een grote dijk.

Omdat er aan bezwijkproeven op echte dijken een fors prijskaartje hangt – naast maatschappelijke bezwaren –, hebben de onderzoekers gekozen voor vier proeven op het terrein van de IJkdijk. Er zijn proefdijken van klei met een verval van maximaal 3,5 meter en een kwelweglengte van 15 meter gerealiseerd op een pipinggevoelige ondergrond van 3 meter middelfijn tot fijn zand met daaronder een waterdichte folie. De lengte van de dijk bedroeg eveneens 15 meter.

## Meettechnieken

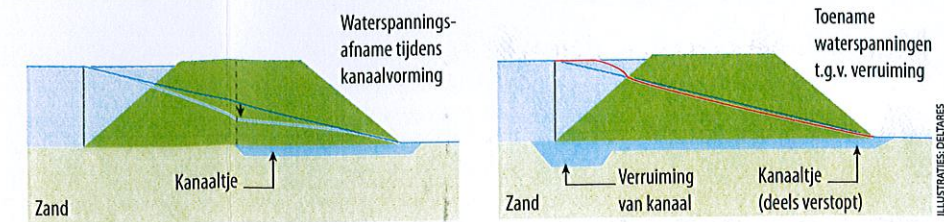
De metingen aan de veldproeven zijn geconcentreerd rond de overgang tussen zand en klei, omdat daar de meeste erosie te verwachten was. In de nabijheid hiervan zijn optische kunststofkabels, glasvezelkabels (al dan niet verwarmd), glasvezels geïntegreerd in een geotextielmat, micro-elektromechanische meetssystemen, een drainagebuis met akoestische apparatuur en elektrische condensatoren getest. Aan de benedenstromse zijde van de dijk is geëxperimenteerd met spontane-potentiaalmetingen in twee verschillende uitvoeringen en infraroodmetingen. Vanwege de mogelijk significante invloed van de vele kabeltjes, maten en de drainagebuis op het te onderzoeken proces, is een tweedeling gemaakt in de proeven: bij de eerste proef – voor zover bekend de eerste pipingproef op deze schaal in de wereld – waren de kabels en maten in beperkte mate aanwezig, bij de tweede en derde proef waren deze afwezig, om zo de meest zuivere omstandigheden te creëren voor het SBW-onderzoek, en bij de vierde proef waren deze opnieuw aanwezig en was er bovendien een drainagebuis in dwarsrichting midden onder de dijk geplaatst. De metingen-op-afstand, zoals de infraroodmetingen, zijn voor zover mogelijk bij iedere proef uitgevoerd.

Daarnaast was er bij elke proef uiteraard refe-



## BEZWIJKEN

Het proces van bezwijken door terugschrijdende erosie bestaat uit meerdere stappen: a) opheffing slappe-lagenpakket en scheurvorming; b) kwel; c) kanaalvorming; d) kanaalgroei; e) progressieve erosie; f) dijkinstabiliteit; g) bresgroei.



## WATERSPANNING

Invloed van pipe op waterspanningverloop onder dijk: tijdens kanaalgroei (links) en tijdens progressieve erosie (rechts).

rentiemonitoring geïnstalleerd. Naast metingen van de waterniveaus aan beide zijden, de in- en uitstroombelastingen, waterdrukmetingen over de diepte en temperatuurmetingen waren dit vooral waterspanningmetingen op het grensvlak van klei en zand. Bij de eerste en vierde proef waren dwars op de dijk vier rijen met elk vijftien waterspanningmeters geplaatst, bij de tweede en derde proef acht rijen. Dit alles gaf een nauwkeurig beeld van de waterdrukverdeling onder de dijk tijdens elke proef.

## Proefverloop

In alle proeven ontstonden één of meer zandmeevoerende wellen bij het tevoren als kritisch voorspelde verval. Deze voorspellingen zijn gemaakt met de theorie van Sellmeijer na kleine aanpassingen dankzij de resultaten van de kleine schaalproeven, die eerder al waren bevestigd in de grotere laboratoriumopstelling. Anders dan bij de labproeven met een perspexplaat op de zandlaag als vervanging van de kleilaag, was bij de veldproeven het proces van kanaalvorming niet direct waar te nemen. Met het fijne net van waterspanningmetingen kon dit toch met geijkte methoden worden gedetecteerd: in de nabijheid van een kanaaltje trad een geringe, maar significante verlaging van de waterdruk op in de fase van kanaalvorming. Eenmaal begonnen hield dit proces niet meer op bij gelijkblijvend verval. Na doorgroei tot aan het buiten-

water trad de volgende fase op, die van progressieve erosie. Deze gaat gepaard met een zo nu en dan spronggewijze toename van het zandtransport en een waterdruk hoger dan de initiële lineaire verdeling.

Een eenvoudiger, maar niet minder effectieve waarneming van de kanaalvorming bleek mogelijk met de meeste van de nieuwe meettechnieken. Doorgaans gebaseerd op het (veelal geringe) temperatuurverschil tussen het buitenwater en de zandlaag, was hiermee het pipingproces doorgaans al in de fase van kanaalvorming te ontdekken. De ruimingsfase (verbreding van het kanaal) was telkens goed te herkennen.

In de eerste drie proeven leidde het pipingproces tot het bezwijken van de dijk bij een verval dat amper hoger was dan het kritisch verval. Bij de vierde proef was in een laat stadium de drainagebuis midden onder de dijk ten dele geactiveerd. Zoals verwacht viel het pipingproces hiermee aanvankelijk geheel stil, maar bij een verhoging van de waterstand tot zo'n tweedertemeter boven het kritisch verval bezweek de dijk alsnog.

## Invloed schaalgrootte

De theorie van Sellmeijer kende al een relatie tussen de kwelweglengte en het keerbare verval. De proeven bij de verschillende schaalgroottes die tot dusverre zijn uitgevoerd, bevestigen deze relatie. In plaats van een constante verhouding tussen lengte en verval, zoals kolonel Bligh die veronderstelde, neemt deze verhouding geleidelijk af. Naarmate het verval over een kering toeneemt, moet de kwelweglengte hierdoor dus disproportioneel toenemen.

## Aanpassingen Sellmeijer

Het pipingproces blijkt inderdaad tot het bezwijken van dijken te kunnen leiden. Met de methode van Sellmeijer wordt het kritisch verval over de kering vrij goed voorspeld, al zijn dankzij het recente onderzoek wel aanpassingen aan deze methode voorgesteld; deze worden verwerkt in de volgende jaar uit te brengen vernieuwde voorschriften voor het toetsen op veiligheid (VTV). De proeven hebben de invloed van de schaalgrootte opnieuw bevestigd. Wel is aan het licht gekomen dat het proces op enkele punten wat anders lijkt te verlopen. Dit is onderwerp van een promotieonderzoek aan de TU Delft in samenwerking met Deltares.

André Koelelijn en Ulrich Förster zijn werkzaam als onderzoeker/adviseur bij Deltares in Delft.

## IN 'T KORT - VELDPROEVEN

- Onderzoek naar piping onderdeel van programma 'Sterkte & Belastingen Waterkeringen'
- Vier proeven met dijken met verval van 3,5 meter en kwelweglengte van 15 meter
- Eén of meer zandmeevoerende wellen bij het tevoren als kritisch voorspelde verval
- Methode Sellmeijer doet goede voorspelling, kleine aanpassingen dankzij veldproeven