

Resultaten monitoringsproef op Ameland Effect van tijdsafhankelijkheid op piping bij zeedijken

ir. J.J.M. Sluis
Specialist
Geotechniek
Witteveen+Bos



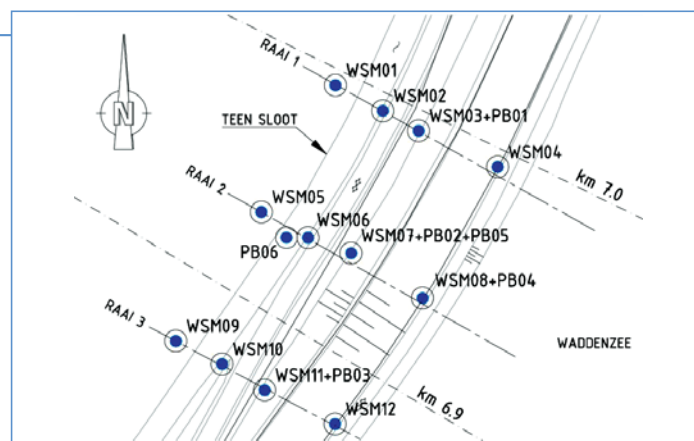
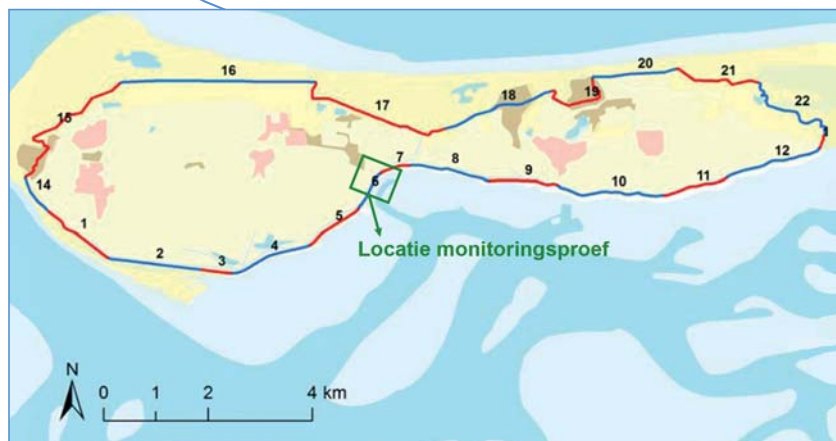
ir. E.E. Sirks
Specialist Waterkeringen,
Witteveen+Bos



dr. ir. A.R. Koelwijn
Specialist R&D, Deltares



ing. J.W. Veenstra
Projectleider
Wetterskip Fryslân



Figuur 1 – Dijkkringgebied Ameland en locatie van de monitoringsproef (dijksectie 6).

Figuur 2 – Bovenaanzicht van de dijksectie en de locatie van de meetinstrumenten.

Inleiding

Wetterskip Fryslân heeft de Waddenzeedijk van Ameland in de tweede toetsronde afgekeurd over praktisch de gehele lengte van 16,6 km. De dijk wordt versterkt binnen het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP). Over een traject van 300 m (van km 6,8 tot km 7,1 in dijksectie 6, zie figuur 1) waren in de planstudie oorspronkelijk pipingmaatregelen voorzien in de vorm van een damwand. Door bestaande bebouwing kan een berm op deze locatie niet aangebracht worden.

Wetterskip Fryslân is de beheerder van de dijk en heeft opdracht gegeven voor het uitvoeren van een monitoringsproef op deze dijksectie. Witteveen+Bos heeft dit onderzoek uitgevoerd in de periode van 15 november 2012 tot 1 april 2015 in samenwerking met Deltares en Fugro. Het doel van het onderzoek was het verkrijgen van inzicht in:

1. de invloed van een variërende buitenwaterstand op de waterspanningen in het watervoerende pakket en daarmee op de veiligheid tegen piping;
2. de optimalisatiemogelijkheden van de voorziene versterkingsmaatregelen.

Beschrijving monitoringsproef

De meetlocatie ligt nabij de Ballumerbocht en wordt gekenmerkt door een intergetijdegeul die

vlak tegen de buitenteen van de dijk aan ligt. De bodem en dijk bestaan uit overwegend zand. Rond NAP -2,0 m is een slecht doorlatende laag aanwezig bestaande uit kleiig zand.

Medio november 2012 zijn drie raaien uitgezet met in totaal twaalf waterspanningsmeters (WSM01 t/m WSM12) en drie peilbuizen (PB01 t/m PB03), zie figuur 2. De instrumenten zijn aangebracht in het watervoerende pakket. In de zomer van 2014 zijn in de middelste raai over een periode van vier weken drie extra peilbuizen (PB04 t/m PB06) geplaatst boven de slecht doorlatende laag om beter inzicht te krijgen in de geohydrologische interactie tussen de freatische lijn en de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket, zie figuur 3.

Analyse geohydrologisch systeem

Op basis van de meetdata is het geohydrologische systeem ter plaatse van de dijksectie geanalyseerd.

Figuur 4 toont het verloop van de buitenwaterstand (BWS) met bijbehorende respons in de meters van raai 2 tijdens een gemiddeld getij. Het verschil tussen de amplitude van de buitenwaterstand en de amplitude van de stijghoogte ter plaatse van de waterspanningsmeters is groot.

Dit is deels te verklaren door de intreeweerstand van het wad. De amplitudes van de gemeten stijghoogtes in de dijk zijn nagenoeg gelijk, de demping richting het achterland is beperkt en de teensloot blijkt weinig invloed te hebben op het stijghoogteverloop.

Figuur 5 geeft de respons weer van zowel de instrumenten onder als boven de afsluitende laag. In de afbeelding is duidelijk een verschil te zien in de gemeten respons. Hieruit is geconcludeerd dat de afsluitende laag onder de gehele dijk en de teensloot aanwezig is en tot ver in het achterland doorloopt, aangezien de geohydrologische interactie tussen de freatische lijn en de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket beperkt is.

Analyse stijghoogteverloop watervoerend pakket

De huidige rekenmodellen voor grondwaterstroming in combinatie met piping zijn gericht op stationaire stromingssituaties en gaan uit van een 'constante' buitenwaterstand. Bij rivierdijken is dit een goede benadering, omdat een hoge rivierafvoer in de regel vijf tot tien dagen aanhoudt. Bij een zeedijk duurt de stormopzet doorgaans niet meer dan drie dagen en kent het getij een cyclus van twaalf uur en vijftwintig minuten. De water-

Samenvatting

Rekenmodellen voor grondwaterstroming in combinatie met piping zijn gericht op stationaire stromingssituaties en gaan doorgaans uit van een constante buitenwaterstand. Zeedijken worden echter belast door een relatief kortdurende hoogwatergolf. De waterspanningen in het watervoerende pakket bereiken als gevolg van deze korte duur niet de stationaire waarde. Uitgaan van een constante buitenwaterstand in een piping-

beoordeling is daardoor conservatief voor zeedijken.

In de monitoringsproef Waddenzeedijk Ameland zijn verschillende methoden met elkaar vergeleken om het tijdsafhankelijke effect van de buitenwaterstand mee te nemen in de pipingbeoordeling. Dit heeft ertoe geleid dat op deze locatie eerder voorziene versterkingsmaatregelen in de vorm van damwandconstructies achterwege kunnen blijven.

spanningen in het watervoerende pakket bereiken als gevolg daarvan niet een stationaire toestand. Dit wordt ook wel het tijdsafhankelijke effect genoemd.

Een betrouwbare schatting van het stijghoogteverloop in het watervoerende pakket is nodig om het tijdsafhankelijke effect in rekening te kunnen brengen in de veiligheidsbeoordeling van het faalmechanisme piping. In dit onderzoek zijn de volgende vijf methoden toegepast om het gemeenten stijghoogteverloop te analyseren en te extrapoleren naar ontwerpomstandigheden:

1. analytisch conform TRWD
2. directe extrapolatie
3. methode Scheldestromen
4. frequentieanalyse
5. PlaxFlow

Tijdens de meetperiode traden twee relatief zware stormen op. Gedurende de storm op 6 december 2013 bereikte de buitenwaterstand een waarde van NAP +3,31 m en tijdens de storm van 22 oktober 2014 steeg het water tot NAP +3,15 m. De vijf methoden zijn gevalideerd op minimaal één van de twee stormen.

METHODE 1: ANALYTISCH CONFORM TRWD

Het Technisch rapport waterspanningen bij dijken (TRWD) [ref. 4.] beschrijft een analytische methode om het verloop van de waterspanningen in het watervoerende pakket te schematiseren op basis van responsmetingen. De methode beschrijft

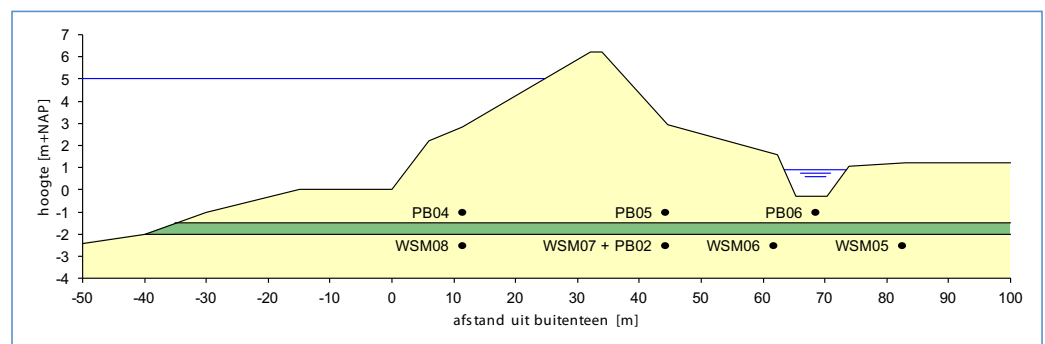
op fysisch-mathematische wijze het proces waarbij waterspanningen onder de dijk zich voortplanten naar het achterland. Met deze methode zijn peilbuismetingen te interpreteren en te extrapoleren.

In de methode wordt met een lekfactor (λ_w) een exponentiële functie gefit. Doordat op de meetlocatie de amplitudedemping richting het achterland beperkt is, wordt bij deze methode een relatief grote lekfactor gevonden. De methode is daarom minder goed toepasbaar voor deze locatie. Bovendien is het peil in de polder relatief hoog ten opzichte van de gemiddelde zeewaterstand, waardoor de keuze van de (getij)golf waarop de functie wordt gefit, veel invloed heeft op het verloop. Extrapolatie naar ontwerpomstandigheden geeft daarom met deze methode een grote spreiding.

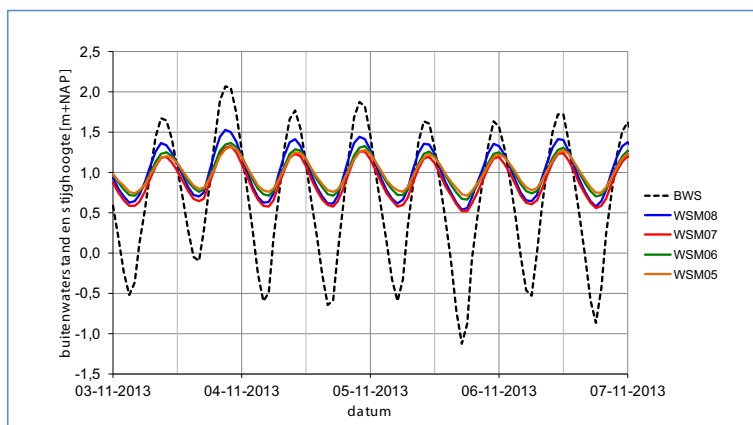
METHODE 2: DIRECTE EXTRAPOLATIE

De methode 'directe extrapolatie' is een relatief eenvoudige methode waarbij per getij een lokaal minimum en een lokaal maximum bepaald wordt voor zowel de buitenwaterstand als de responsmeting. Per piek kan een extrapolatiefactor worden afgeleid. Een statistische analyse op de individuele extrapolatiefactoren leidt vervolgens tot een algemene relatie tussen buitenwaterstand en respons.

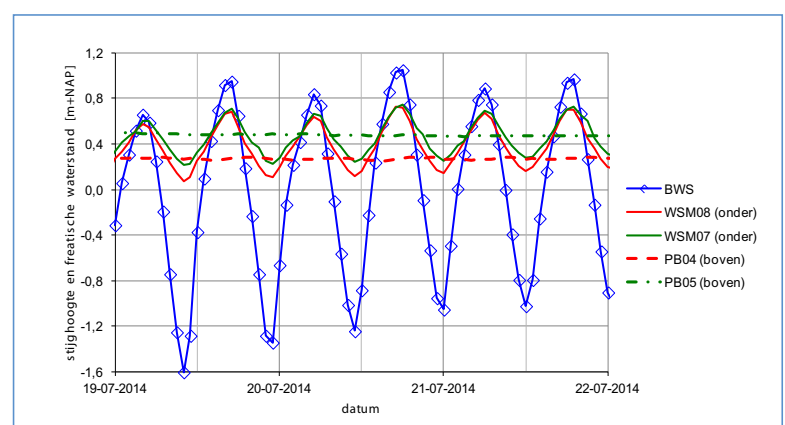
De methode is gevalideerd op beide stormen. Hierbij werd de respons onderschat. De onderschatting komt met name doordat de methode geen rekening houdt met de grotere invloed van een stormopzet op de stijghoogtes ten opzichte van een getijgolf. De aanname dat de waterstand lineair reageert op de buitenwaterstand is daardoor onjuist. De methode levert daardoor een onveilige schatting van het stijghoogteverloop.



Figuur 3 – Geschematiseerde dwarsdoorsnede met de locatie van de meetinstrumenten (raai 2).



Figuur 4 – Respons waterspanningsmeters in het watervoerende pakket op de buitenwaterstand onder dagelijkse omstandigheden (raai 2).



Figuur 5 – Respons van meetinstrumenten boven en onder de afsluitende laag onder dagelijkse omstandigheden (raai 2).

METHODE 3: METHODE SCHELDESTROMEN

De methode 'Scheldestromen' is door Waterschap Scheldestromen ontwikkeld en toegepast in de verlengde derde toetsronde. De individuele meetreeksen van de waterspanningsmeters zijn daarvoor opgedeeld in een quasi-statisch deel en een dynamisch deel, zie figuur 6.

Vervolgens is de faseverschuiving tussen buitenwaterstand en stijghoogte geneutraliseerd door de datapunten van de waterspanningsmeting te verschuiven in de tijd ten opzichte van de buitenwaterstand. Door het wegnemen van de faseverschuiving volgt een optimale relatie tussen de maximale buitenwaterstand en de maximaal gemeten stijghoogte, zie figuur 7. Voor het extrapoleren naar ontwerpomstandigheden zijn de individuele bijdragen van de quasi-statische en dynamische component van de buitenwaterstand bij elkaar opgeteld.

De methode Scheldestromen geeft voor beide stormen een overschatting van de gemeten respons tot enkele decimeters. Er is geen directe verklaring hiervoor, maar de methode lijkt erg gevoelig voor de kwaliteit van de data. De stati-

sche component heeft een grote bijdrage in de totale respons, maar heeft ook een grotere onnauwkeurigheid.

METHODE 4: FREQUENTIEANALYSE

De methode 'frequentieanalyse' heeft een aantal overeenkomsten met de methode Scheldestromen. Het scheiden van twee componenten uit de meetdata en het verschuiven van de meetreeksen in de tijd komen in beide methoden voor. De wijze waarop de componenten worden gescheiden en de meetreeksen wordt verschoven, is echter anders. Deze methode maakt gebruik van het frequentiedomein en kruiscorrelaties.

De invloed van het dubbeldaags getij is periodiek en kan gezien worden als een harmonische component; het dynamische gedeelte. Daarom is gekozen om deze componenten te scheiden van het quasi-statische deel [ref. 2], zie figuur 8.

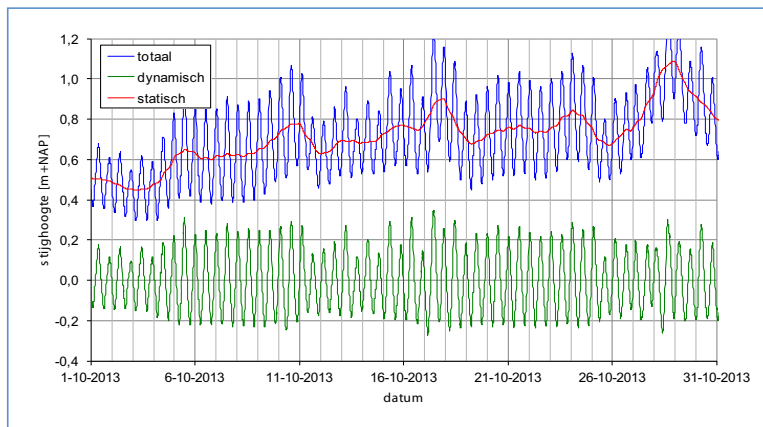
Vervolgens is voor iedere meetreeksen het dynamische deel uitgezet tegen het dynamische deel van de buitenwaterstand. De tijdsverschuiving tussen de meetreeksen en de buitenwaterstand is met kruiscorrelatie bepaald. De meetreeksen is net zo lang verschoven totdat deze kruiscorrelatie maxi-

maal is. Dit tijdsverschil is ook gebruikt om het faseverschil van het quasi-statische gedeelte te verwijderen, zie figuur 9.

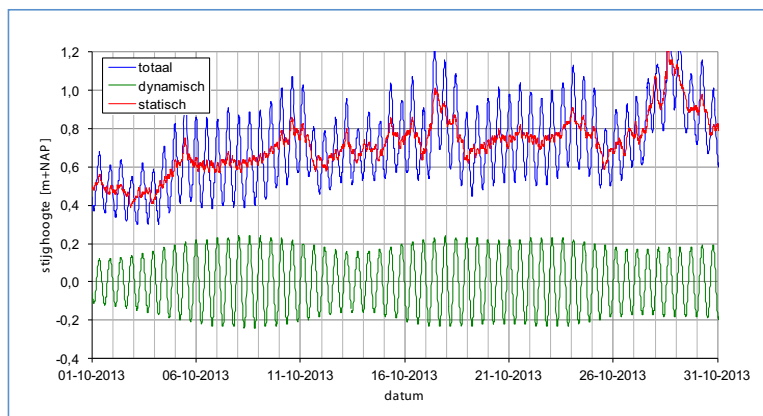
De frequentieanalyse is voor deze situatie op Ameland een relatief eenvoudige methode, welke goede resultaten geeft voor de verwachtingswaarde van de stijghoogte. De methode geeft echter niet per definitie een overschatting of onderschatting. Daarnaast heeft de methode als nadeel dat deze een continue meetreeksen moet hebben (en dus geen meetgaten mag bevatten), en de getijbeweging van de stijghoogte moet een goede sinusoïde zijn. Dat laatste is echter niet altijd het geval, bijvoorbeeld in situaties waar de stijghoogte wordt beïnvloed door een constant polderpeil. De afwijking tussen een goede sinusoïde en de werkelijke getijdebeweging zorgt ervoor dat de betrouwbaarheid van de methode omlaag gaat.

METHODE 5: PLAXFLOW

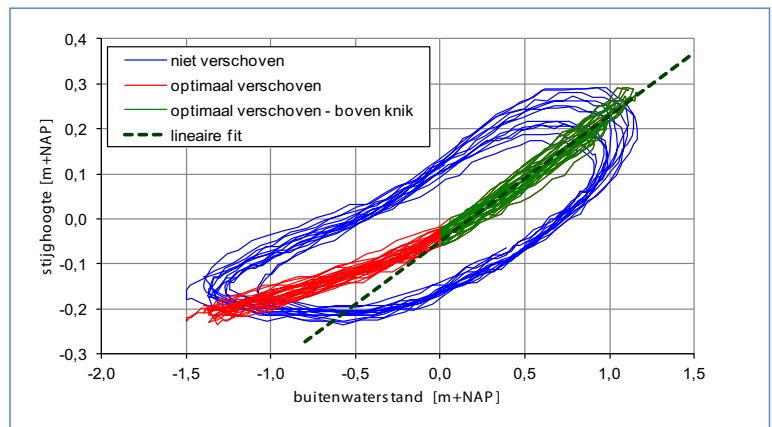
Met PlaxFlow kunnen stationaire en tijdsafhankelijke grondwaterstromingsberekeningen gemaakt worden op basis van de eindige elementen methode (EEM). Door het opleggen van hydraulische randvoorwaarden en grondeigenschappen



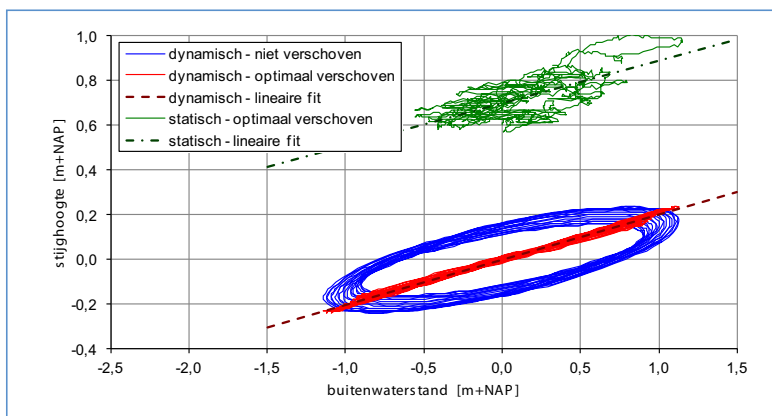
Figuur 6 – Opdelen van de totale respons in een dynamische en statische component met de methode Scheldestromen (WSM06).



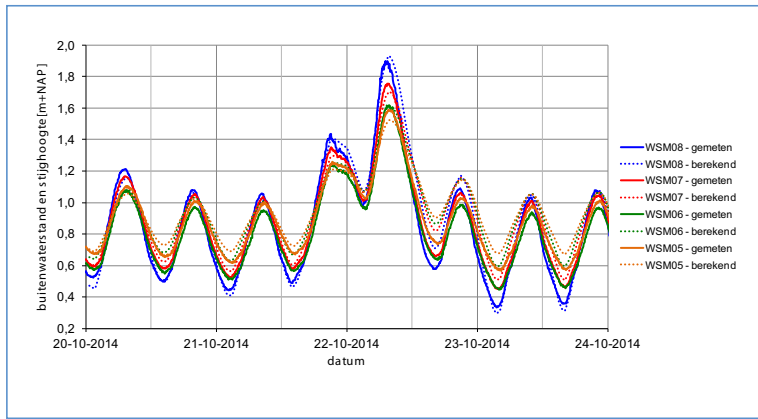
Figuur 8 – Opdelen van de totale respons in een dynamische en statische component met de methode frequentieanalyse (WSM06).



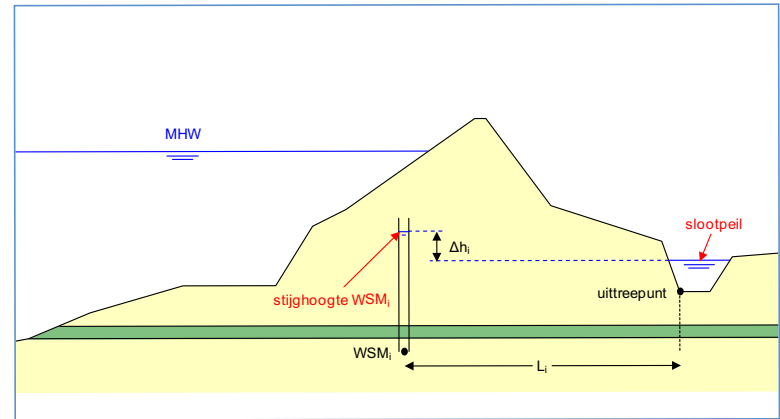
Figuur 7 – Optimaal verschuiven (kleinste kwadratenmethode) van de dynamische component met de methode Scheldestromen (WSM06).



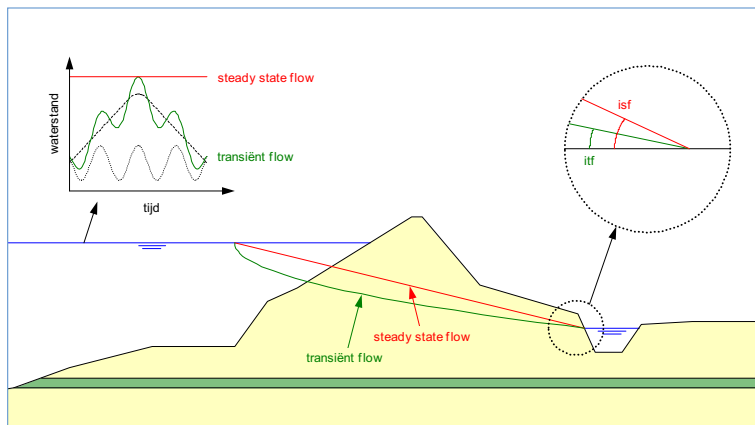
Figuur 9 – Optimaal verschuiven van de dynamische- en statische component met de methode frequentieanalyse (WSM06).



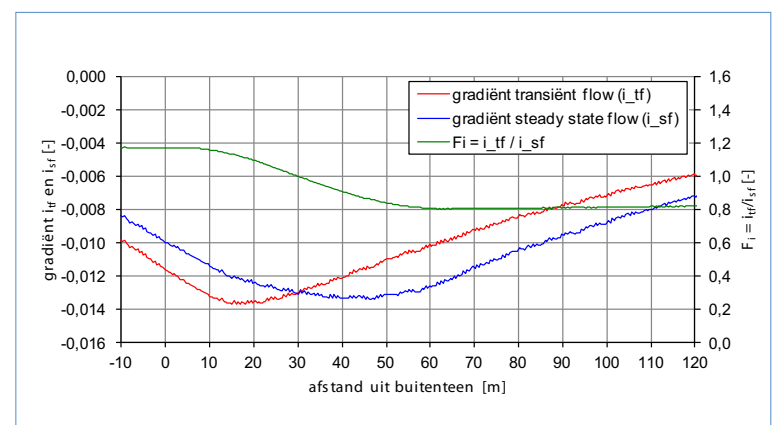
Figuur 10 – Validatie PlaxFlow model met de storm van 22 oktober 2014 (raai 2).



Figuur 11 – Schematische weergave van het principe van methode A.



Figuur 12 – Schematische weergave van het principe van methode B.



Figuur 13 – Gradiënt stijghoogteverloop voor zowel transiënt als steady state flow.

berekent het model de grondwaterstroming. De bijbehorende stijghoogte kan voor verschillende locaties uitgelezen worden.

Het model is opgezet en gefit voor een drietal situaties: laag getij, gemiddeld getij en de storm van 6 december 2013. Hiertoe zijn de modelrandvoorwaarden dusdanig gevarieerd zodat een zo goed mogelijke fit van het berekende stijghoogteverloop met het gemeten stijghoogteverloop werd verkregen.

De storm van 22 oktober 2014 is gebruikt om het PlaxFlow model te valideren. De berekende waarden zijn samen met de gemeten waarden gepresenteerd in figuur 10. De resultaten uit PlaxFlow komen goed overeen met de gemeten waarden. Tijdens de maatgevende waterstand (piek) is er een maximale afwijking van 10 cm tussen de berekende en de gemeten waterstand. De stijghoogte ter plekke van WSM08 is overschat in de berekening, de stijghoogten ter plekke van de overige waterspanningsmeters zijn onderschat. In deze situatie heeft de afwijking geen negatieve invloed op de veiligheid, omdat de benodigde kwelweglengte is afgeleid op basis van de stijghoogte bij WSM08. De afwijking tussen berekende stijghoogte en werkelijk optredende stijghoogte is een onzekerheid welke meegenomen dient te

worden in de interpretatie van de veiligheid tegen piping.

De methode PlaxFlow voorspelde voor deze locatie het beste het stijghoogteverloop van de tweede storm. Het is de meest geavanceerde methode van de vijf onderzochte methoden door de mogelijkheid om relatief veel randvoorwaarden van het geohydrologische systeem mee te kunnen nemen in de analyse. Dit is tevens ook het nadeel van deze methode; er is namelijk veel kennis van het geohydrologische systeem nodig en er is een storm nodig in de meetperiode om een goed geohydrologisch model op te kunnen zetten. Daarnaast is een tweede storm nodig om het model te valideren.

BANDBREEDTE STIJGHOOGTEVERLOOP

De bovenstaande methoden om het stijghoogteverloop in het watervoerende pakket te bepalen, geven een grote spreiding. Sommige methoden overschatten de stijghoogte systematisch (zoals de analytische methode conform TRWD), andere methoden onderschatten de stijghoogte structureel (zoals de directe extrapolatie methode). Het werkelijke stijghoogteverloop zal binnen de gevonden bandbreedte liggen. Op alle afgeleide stijghoogteverlopen is een pipinganalyse uitge-

voerd. Deze analyse omvat dus ook de stijghoogteverlopen die de stijghoogte overschatten.

Analyse piping

Na het afleiden van het stijghoogteverloop bij maatgevend hoogwater (MHW) is de veiligheid tegen piping beoordeeld. De pipinganalyse is uitgevoerd met twee methoden voor het in rekening brengen van het tijdsafhankelijke effect: methode 'verval' en methode 'gradiënt'.

METHODE A: VERVAL

De methode beschouwt per meetlocatie het verval (ΔH_i) en de aanwezige kwelweglengte vanaf de meetlocatie tot het uittreepunt (L_i), zie figuur 11. De kritische kwelweglengte (L_c), gegeven het aanwezige verval (ΔH_i), wordt vergeleken met de aanwezige kwelweglengte (L_i). Deze aanpak is toegepast in de verlengde derde toetsronde door Waterschap Scheldestromen.

METHODE B: GRADIËNT

De methode vermenigvuldigt het aanwezige verval over de waterkering (ΔH) met een factor F_i , welke afhankelijk is van de verhouding tussen de gradiënten voor steady en transiënt flow (zie figuur 12 en formule 1). Deze gradiënten kunnen

worden afgeleid uit de PlaxFlow-modellering. De methode is eerder toegepast bij de planstudie voor de versterking van de Waddenzeedijk van Texel.

$$\text{Formule 1: } F_i = i_{tf} / i_{sf}$$

waarin:

i_{sf}	gradiënt bij steady flow	[-]
i_{tf}	gradiënt bij transiënt flow	[-]
F_i	verhouding tussen gradiënten steady en transiënt flow; $F_i \leq 1$	[-]

Figuur 13 laat zien dat een factor F_i van circa 0,8 toegepast kan worden ter plaatse van het uitreepunt. De absolute verschillen tussen de gradiënt van de transient flow en de gradiënt van de steady state flow zijn echter klein. De bepaalde waarde van de verhouding tussen deze gradiënten wordt om deze reden niet erg betrouwbaar geacht voor deze meetlocatie.

INTREEPUNT

De locatie van het intreepunt is aangenomen op locatie 2 in figuur 14. Locatie 3 zou fysisch gezien de meest realistische keuze zijn. Door het ontbreken van geometrische en geotechnische data is een keuze voor locatie 3 echter niet conservatief.

Locatie 1 valt af, omdat de verschillende methoden voor het schematiseren van het stijghoogteverloop aantonen dat het intreeweerstand van het voorland meegenomen mag worden in de bepaling van de kwelweglengte. Locatie 4 volgt uit de toegepaste schematisaties voor het stijghoogteverloop volgens TRWD, maar deze valt af omdat een intreepunt op deze locatie fysisch slecht te onderbouwen is.

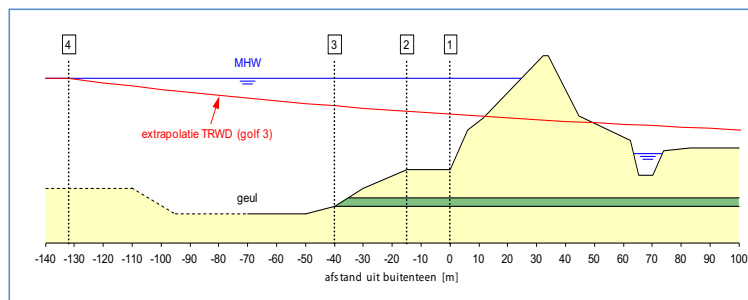
UITREEPUNT

Voor het uitreepunt is de insteek van de slootbodem aangenomen. Ter plaatse van de teensloot is de kans op opbarsten het meest waarschijnlijk, omdat hier de aanwezige deklaag minimaal is. Het waterpeil in de sloot is tijdens MHW NAP +0,9 m.

Resultaat

De vigerende pipingregel (Sellmeijer volgens Technisch rapport zandmeervoerende wellen, TRZW [ref. 3.]) en de voorgestelde pipingregel in het Onderzoeksrapport zandmeervoerende wellen, ORZW [ref. 1.] zijn toegepast. Tabel 1 geeft de resultaten van het bepaalde kwelweglengtetekort in raai 2. Een negatief kwelweglengtetekort betekent dat wordt voldaan aan de benodigde kwelweglengte.

Methode A geeft ter plaatse van WSM08 geen kwelweglengtetekort volgens de vigerende pipingregel, waardoor er geen doorgaande kwelweg zal ontwikkelen. Bij toepassing van de voorge-



Figuur 14 – Mogelijke locaties van het intreepunt.

Tabel 1 – Berekend kwelweglengtetekort [m] (raai 2).

Methode piping	Methode stijghoogte	Sellmeijer TRZW				ORZW			
		BWS	WSM08	WSM07	WSM06	BWS	WSM08	WSM07	WSM06
A: Verval	1 - TRWD	3,5	-10,1	16,3	30,6	30,8	2,1	26,3	39,6
	2 - Directe extrapolatie	3,5	-32,5	-7,1	9,6	30,8	-27,4	-4,2	12,2
	3 - Scheldestromen	3,5	-14,1	10,6	29,0	30,8	-3,3	18,8	37,5
	4 - Frequentieanalyse	3,5	-26,4	0,8	18,2	30,8	-19,5	5,9	23,4
	5 - PlaxFlow	3,5	-17,6	5,2	18,8	30,8	-7,9	11,8	24,2
B: Gradiënt	n.v.t.	-14,1	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	6,1	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.

stelde pipingregel uit ORZW zou er een kwelweglengtetekort zijn op basis van de berekende stijghoogte conform TRWD. Deze methode geeft in de situatie bij Ameland systematisch een overschatting van de stijghoogte en is daarmee dus conservatief. Alle andere methoden voldoen wel ter plaatse van WSM08.

Methode B voldoet volgens de vigerende pipingregel, maar niet met de voorgestelde pipingregel uit ORZW. De methode wordt echter voor de situatie bij Ameland niet betrouwbaar geacht vanwege het kleine verschil in gradiënt.

De combinaties van deze twee pipingregels, de middels vijf methoden bepaalde stijghoogteverlopen en de twee methoden om het tijdsafhankelijke effect in rekening te brengen, gaven voldoende basis om met vertrouwen te kunnen zeggen dat de dijk voldoet voor het faalmechanisme piping.

Conclusies en aanbevelingen

Met behulp van vijf methoden is de gemeten stijghoogte geanalyseerd. Methode 'TRWD' bleek niet goed toepasbaar voor de geohydrologische situatie op Ameland. 'Directe extrapolatie' is een eenvoudige methode, maar geeft een onderschatting van de stijghoogte en is daarom minder veilig. 'Scheldestromen' en met name 'Frequentieanalyse' zijn methoden die een goede inschatting kunnen geven in deze situatie. 'PlaxFlow' is in dit onderzoek de meest betrouwbare methode voor het inschatten van het stijghoogteverloop. Het is echter een complexe methode en er is een uitgebreid monitoringsprogramma over een langere periode nodig om een betrouwbaar model op te

kunnen zetten.

Een pipinganalyse is uitgevoerd met behulp van de verkregen stijghoogteverlopen en de twee verschillende methoden om het tijdsafhankelijke effect in rekening te brengen: methode 'verval' en methode 'gradiënt'. Met het in rekening brengen van het tijdsafhankelijke effect, is geconcludeerd dat er geen kwelweglengtetekort is en er geen maatregel toegepast hoeft te worden om piping te voorkomen. Het handhaven van de huidige positie van de geul is een randvoorwaarde van deze conclusie.

Aanbevolen wordt om de verschillende methoden ook toe te passen bij andere locaties waar het faalmechanisme piping relevant is. Op die manier kan de algemene toepasbaarheid van de methoden beter vastgesteld worden. Hiermee kan in de toekomst het oordeel over pipinggevoeligheid mogelijk vaker positief bijgesteld worden.

Referenties

1. Rijkswaterstaat (2012). Onderzoeksrapport zandmeervoerende wellen (ORZW).
2. Smith, Steven W. (2003). Digital signal processing: a practical guide for engineers and scientists. Burlington, Newnes. ISBN 0-750674-44-X.
3. TAW (1999). Technisch rapport zandmeervoerende wellen (TRZW).
4. TAW (2004). Technisch rapport waterspanningen bij dijken (TRWD).
5. Witteveen+Bos (2015). Onderzoeksrapport Waddenzeedijk Ameland, Monitoringsproef km 6,8 - km 7,1. ●