

## Invloed van een weg op dijkerosie tijdens golfoverslag

*Anouk Bomers, Juan-Pablo Aguilar-Lopez, Jord Warmink, Suzanne Hulscher (Universiteit Twente)*

**Tot op heden wordt de stabiliteit van de dijken berekend aan de hand van een met gras bedekte standaarddijk. Constructies, zoals kunstwerken of wegen, in of op de dijk worden niet meegenomen, terwijl deze de stabiliteit wel kunnen beïnvloeden. Daarom is er in deze studie gekeken naar het effect van een weg boven op de dijk op de erosieontwikkeling tijdens golfoverslag. Om dit effect te onderzoeken is een gekoppeld hydrodynamisch-erosiemodel ontwikkeld. De resultaten laten zien dat het ontwikkelde model in staat is om dijkerosie te voorspellen.**

Steden in kust- en riviergebieden zullen de komende decennia naar verwachting uitbreiden als gevolg van bevolkingsgroei. Hierdoor zullen in 2070 wereldwijd hoogstwaarschijnlijk 140 miljoen mensen afhankelijk zijn van waterkeringen [1]. Het grootste gedeelte van deze waterkeringen zal in de toekomst door de verwachte klimaatsveranderingen niet aan de veiligheidsnormeringen voldoen. Langs de Nederlandse kust zal de zeespiegel stijgen en de piekafvoeren van de rivieren in ons land zullen toenemen. Dit leidt tot de noodzaak van robuustere waterkeringen. Daarnaast zal de groei in bevolkingsdichtheid druk uitoefenen op de hoeveelheid land dat gebruikt kan worden voor wonen, recreatie et cetera. Daarom zal de noodzaak in de toekomst groter worden om efficiënt om te gaan met het landgebruik. Multifunctionele waterkeringen zijn hierbij een uitkomst, waarbij de waterkeringen niet alleen de functie hebben van het waarborgen van de waterveiligheid maar ook gebruikt kunnen worden voor onder andere recreatie.

In totaal worden er bij het toetsen van dijken twaalf faalmechanismes beschouwd. De veiligheidsnormen van onze dijken voor het faalmechanisme golfoverslag worden echter nog steeds bepaald aan de hand van een homogene, met gras bedekte standaarddijk. Constructies in of op de dijk worden niet expliciet meegenomen, terwijl deze wel degelijk invloed kunnen hebben op de stabiliteit van de dijken.

In dit onderzoek is gekeken naar de invloed van een weg op de kruin van de dijk op erosieontwikkeling tijdens golfoverslag. Een dijk met een weg op de kruin is een goed voorbeeld van een multifunctionele dijk. Dit type functionele waterkering wordt al jaren toegepast en is eigenlijk niet meer weg te denken uit het algemene straatbeeld. Grote schade als gevolg van golfoverslag is geregeld voorgekomen in het verleden. Golfoverslag kan leiden tot erosie van het dijkprofiel. Indien golfoverslag een lange periode aanhoudt, kan de hoeveelheid erosie zo groot worden dat de dijk uiteindelijk zal falen (zie afbeelding 1).



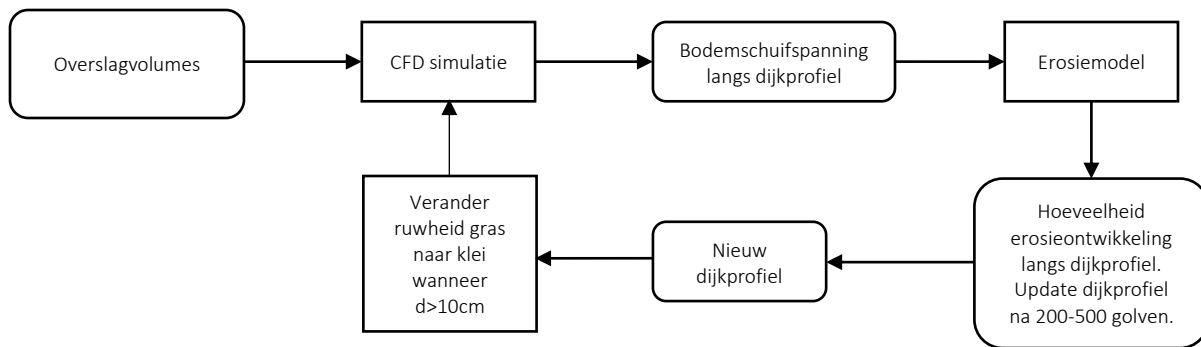
*Afbeelding 1. Het falen van een dijk veroorzaakt door golfoverslag (foto: Zitscher, 1976)*

Om de erosie tijdens golfoverslag te kunnen voorspellen is in deze studie een gekoppeld hydrodynamisch-erosiemodel ontwikkeld. Dit model is gekalibreerd en gevalideerd aan de hand van een erosietest met de golfoverslagsimulator ([2], voor meer details zie [3]). Het hydrodynamisch-erosiemodel model is vervolgens gebruikt om te bepalen hoe de erosieontwikkeling verandert door een weg op de kruin ten opzichte van een met gras bedekte standaarddijk. Hierbij lag de nadruk op de kruin van de dijk. In dit artikel wordt eerst het model en de kalibratie- en validatieprocedure beschreven. Vervolgens zal het model toegepast worden om erosieontwikkeling te bepalen voor een dijk met en zonder een weg op de kruin.

## **Methode**

### ***Modelbeschrijving***

Een gekoppeld hydrodynamisch-erosiemodel is ontwikkeld om de erosieontwikkeling tijdens golfoverslag te kunnen berekenen. Afbeelding 2 geeft een overzicht van het gekoppelde hydrodynamische-erosiemodel. Het hydrodynamische model simuleert het water dat wordt losgelaten door de golfoverslagsimulator. De berekende bodemschuifspanningen tijdens de hydrodynamische simulaties worden vervolgens gebruikt om de hoeveelheid erosie te bepalen aan de hand van een erosiemodel. De berekende dijkprofielen zijn gevalideerd met behulp van de gemeten dijkprofielen tijdens de erosietest in Millingen aan de Rijn. In dit onderzoek zijn overslagafvoeren van 50 en 100 l/s per meter gesimuleerd. Omdat de hoeveelheid erosie die door slechts één golf wordt veroorzaakt relatief klein is, wordt het dijkprofiel pas aangepast na ongeveer 200-500 golven, afhankelijk van de overslagafvoer. Zowel het hydrodynamische model als het erosiemodel worden in de volgende paragrafen in meer detail beschreven.



Afbeelding 2. Overzicht hydrodynamisch-erosiemodel

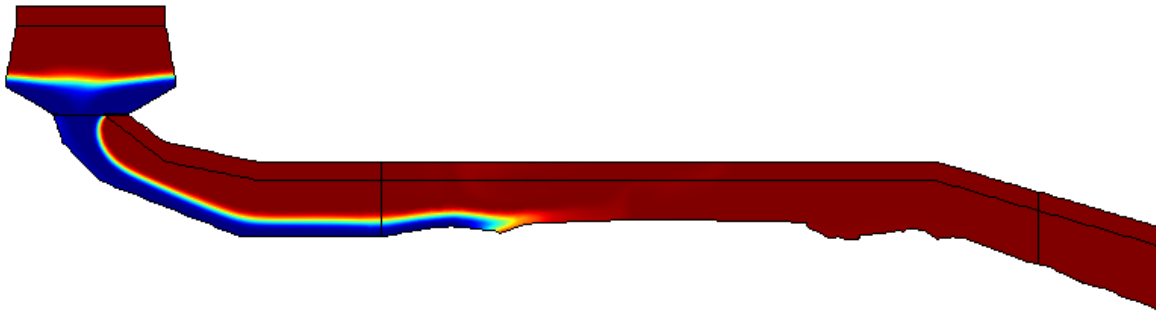
### Hydrodynamisch model

De hydrodynamische condities tijdens golfoverslag zijn berekend aan de hand van een RANS-model gecombineerd met een  $k\epsilon$ -turbulentiemodel [4]. De differentiaalvergelijkingen zijn opgelost aan de hand van de Finite Element Method (FEM), waarbij de model geometrie is opgedeeld in kleine eindige elementen. De set van vergelijkingen wordt opgelost voor elk element afzonderlijk. Het gebruikte *grid* heeft een hogere resolutie langs het dijkeprofiel en neemt af in verticale richting. Er is gekozen voor een hoge resolutie langs het dijkeprofiel om zo de hydrodynamische condities tijdens golfoverslag zo accuraat mogelijk te kunnen berekenen. Wall-functies zijn toegepast langs de randen van het model om zo de ruwheden van staal (overslagsimulator), gras, klei en asfalt mee te kunnen nemen [3].

De geometrie in het hydrodynamische model is gebaseerd op het gemeten dijkeprofiel aan het begin van de erosietest in Millingen aan de Rijn (afbeelding 3). De golfoverslagsimulator is opgenomen in de modelgeometrie om zo verschillende overslagvolumes correct te kunnen simuleren. Het model is gekalibreerd aan de hand van de ruwheid van het staal van de simulator. Het hydrodynamische model berekent de door de overslaande golven veroorzaakte waterstroming over het dijkeprofiel (afbeelding 4). De frictiesnelheden van het water op de dijkebekleding zijn vervolgens gebruikt om de bodemschuifspanningen te bepalen.



Afbeelding 3. Schets van het model gebaseerd op de dijkegeometrie zoals gemeten tijdens het golfoverslagexperiment in Millingen aan de Rijn



Afbeelding 4. CFD-simulatie van een overslaande golf met een volume van 1500 liter per meter

### **Erosiemodel**

Het erosiemodel berekent de hoeveelheid erosie die de tijdens de hydrodynamische simulaties berekende bodemschuifspanningen veroorzaken. Het model veronderstelt een homogene grasbekleding. Er wordt dus aangenomen dat het gras over het gehele dijkwandprofiel dezelfde sterkte heeft. Onder het gras is een homogene kleilaag aanwezig (zie afbeelding 3). Daarnaast is er verondersteld dat erosie onder de weg niet mogelijk is. Details omtrent de parameters (grasdikte, grassterkte etc.) zijn te vinden in [3].

Erosie ontstaat alleen als de bodemschuifspanningen tijdens golfoverslag hoger zijn dan de kritieke bodemschuifspanning. De hoeveelheid erosie is afhankelijk van het overslagvolume en bijbehorende overslagtijd en is voor elke individuele golf anders. Een groter volume zal leiden tot hogere bodemschuifspanningen. Daarnaast heeft een langere overslagtijd een effect op de hoeveelheid erosie, aangezien de dijk langer blootgesteld is aan de bodemschuifspanningen van de overslaande golf.

Tijdens golfoverslag zal allereerst het gras beschadigen. Er is aangenomen dat bij een erosiediepte van 10 centimeter geen gras meer aanwezig is [5]. Hierdoor wordt de kleilaag blootgesteld aan de golven en is de dijk kwetsbaarder voor verdere erosie.

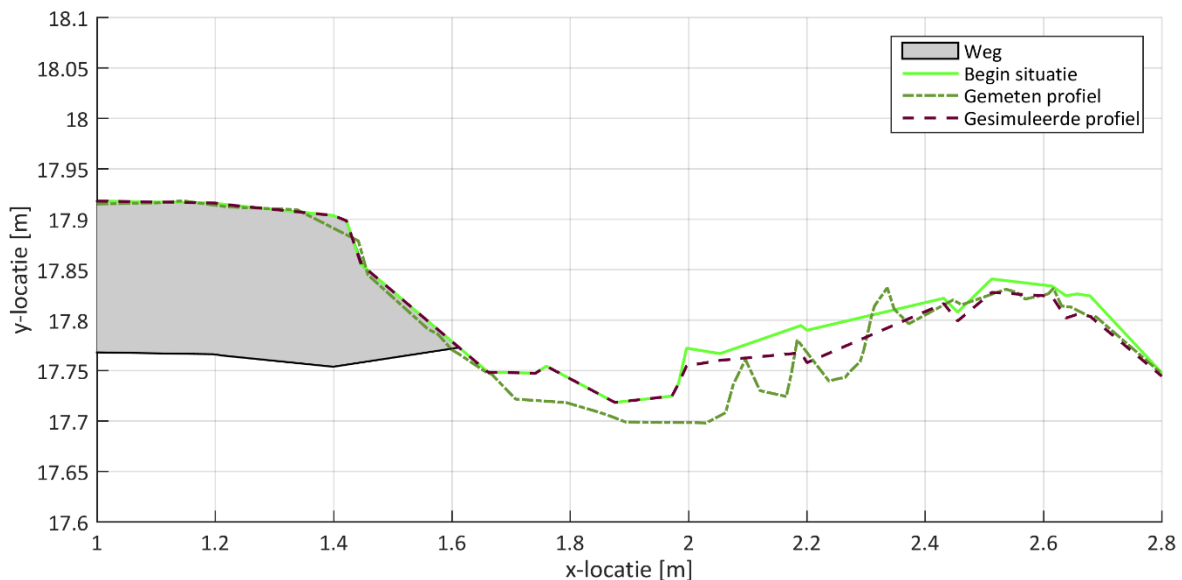
### **Validatie gekoppeld hydrodynamisch-erosiemodel**

In eerdere studies zijn experimenten met een golfoverslagsimulator uitgevoerd om inzicht te krijgen in erosieontwikkeling tijdens golfoverslag (afbeelding 5). De simulator bestaat uit een stalen kist waarin water wordt opgeslagen. Vervolgens wordt de simulator volgens een random stochastische verdeling geopend om zo condities van een echte storm te kunnen na bootsen [6].



Afbeelding 5. Testsectie van een dijk met een weg op de kruin in Millingen aan de Rijn [7]

Tijdens de experimenten in Millingen aan de Rijn zijn erosietesten uitgevoerd, waarbij de dijkprofielen zijn gemeten met een 3D laserscan. De gemeten dijkprofielen tijdens de erosietest zijn gebruikt om het gekoppelde hydrodynamisch-erosiemodel te valideren. Afbeelding 6 geeft de gesimuleerde en gemeten dijkprofielen na 3 uur testen met een overslagafvoer van 50 l/s per meter. Tijdens de validatie lag de nadruk op de overgang van de asfaltweg naar de grasbekleding. Alleen de wegberm aan de landzijde is meegenomen, omdat de verwachting was dat de veranderingen in erosie hier het grootst zullen zijn.



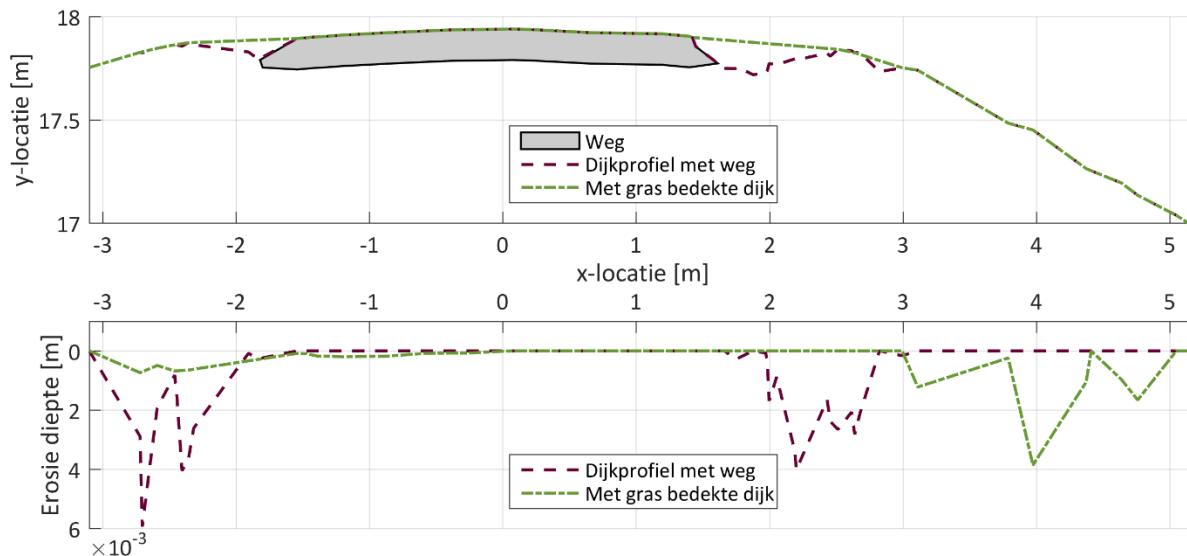
Afbeelding 6. Vergelijking van de gemodelleerde en gemeten dijkprofielen aan de landzijde van de weg na drie uur testen met een overslagdebiet van 50 l/s/m

Het gesimuleerde erosieprofiel laat zien dat de locatie van de erosie aan de landzijde van de weg goed overeenkomt met het gemeten profiel. Daarnaast is de gesimuleerde erosie in de juiste orde van grootte. De verschillen ontstaan doordat het gemeten erosieprofiel een onregelmatiger beeld laat zien dan het gesimuleerde profiel. Dit komt doordat de grasbekleding in werkelijkheid heterogeen is, waardoor op kleine schaal (centimeters) verschillen in erosie optreden. Het model neemt echter een homogene grassterkte aan langs het dijkprofiel. Daarnaast blijkt dat in werkelijkheid de graszode 'opstroopt' door de overslaande golven. Het model gaat echter uit van geleidelijke erosie van de graszode, waardoor dit opstropen van gras niet wordt meegenomen. Hierdoor is het gesimuleerde erosieprofiel regelmatiger en gladder dan het gemeten erosieprofiel. Ondanks deze aannames in het model wordt de erosie aan de landzijde van de weg goed gesimuleerd en is de gesimuleerde erosie in dezelfde orde van grootte als de gemeten erosie. Dit resultaat geeft daarom voldoende vertrouwen in het model om te veronderstellen dat het in staat is om de erosieontwikkeling tijdens golfoverslag te voorspellen.

### Effect van een weg op de erosieontwikkeling

Om het effect van een weg op de erosieontwikkeling door golfoverslag te bepalen zijn twee dijken vergeleken: een dijk met weg en een dijk zonder weg (afbeelding 7). Voor de compleet met gras bedekte (standaard)dijk zijn de door verkeer veroorzaakte kuilen verwijderd, waardoor een glad dijkprofiel ontstaat. Uit de resultaten blijkt dat erosie op de kruin van de dijk aanzienlijk toeneemt

doordat er een weg op de kruin ligt. Zowel aan de linker- als aan de rechterzijde van de weg neemt de hoeveelheid erosie toe. Daarnaast is te zien dat bij een dijkprofiel met een weg op de kruin geen erosie optreedt langs het talud, terwijl er wel erosie optreedt op de compleet met gras bedekte dijk.



Afbeelding 7. Boven: initiële dijkprofielen voor de dijk met en zonder weg. Onder: plot van de erosiediepte na 150 overslaande golven met een volume van 1500 l/m voor een dijk met en zonder weg

Met een numeriek model is het mogelijk de oorzaken van de verschillen te analyseren. De toename in erosie op de kruin van de dijk wordt veroorzaakt door een combinatie van een gladdere asfaltsectie en de beschadigde bermen langs de kant van de weg. Hierbij spelen de volgende drie aspecten een rol: (1) extra turbulentie veroorzaakt door een onregelmatig dijkprofiel (beschadigde bermen), (2) extra turbulentie veroorzaakt door grotere ruwheidsverschillen en (3) minder afremming door gladdere asfaltsectie.

Allereerst blijkt uit de modelresultaten dat erosie erg gevoelig is voor onregelmatigheden in het dijkprofiel. Een onregelmatig oppervlak zorgt voor een toename in turbulentie van de overslaande golven. Daarnaast laten de gemodelleerde bodemschuifspanningen zien dat een opwaartse helling zorgt voor een toename van de erosie. De bermen van de weg zijn beschadigt door verkeer. Hierdoor zijn kuilen aanwezig in het dijkprofiel met een weg op de kruin. Deze kuilen zorgen voor extra turbulentie en daardoor tot hogere bodemschuifspanningen. Dit heeft weer tot gevolg dat de hoeveelheid erosie zal toenemen. De erosie neemt met name toe op de plekken waar een opwaartse helling aanwezig is. Dit kan voorkomen worden met regelmatig onderhoud aan de bermen van de weg. Door te zorgen dat geen kuilen aanwezig zijn in het dijkprofiel, zal de hoeveelheid erosieontwikkeling aanzienlijk afnemen. Daarnaast is het mogelijk om constructies (bijvoorbeeld verhoging/paaltjes) langs de weg te plaatsen om ervoor te zorgen dat het verkeer niet meer uitwijkt op het gras, waardoor de bermen onbeschadigd blijven.

Het tweede aspect is het feit dat de asfaltsectie een lagere ruwheid heeft dan het gras. Deze lagere ruwheid zorgt voor minder afremming van de overslaande golf. Hierdoor hebben de golven relatief hoge stroomsnelheden. De relatief hoge stroomsnelheden zullen tot erosie leiden bij de overgang van de asfaltweg naar de grassectie. Het is aan te raden om het effect van verschillende bodemruweden op erosieontwikkeling mee te nemen tijdens de toetsing van de waterkeringen. Op dit moment wordt

er tijdens toetsing uitgegaan van een standaard met gras bedekte dijk. De resultaten laten echter zien dat een sectie met een lagere ruwheid kan leiden tot meer erosieontwikkeling bij de transitie naar de grasbekleding.

Ten derde neemt de turbulentie van de overslaande golven toe doordat er een plotselinge toename is in bodemruwheid van asfalt naar gras. Door de plotselinge toename in bodemruwheid wordt de golf geremd, waardoor de turbulentie toeneemt. Deze turbulentie leidt tot extra erosieontwikkeling aan de landzijde van de weg. Een mogelijkheid is om maatregelen te nemen waardoor een geleidelijke toename in ruwheid ontstaat. Hierdoor kan erosie lokaal worden beperkt en zal het ontstaan van zwakke plekken in de grasbekleding afnemen.

De hoeveelheid erosie op de kruin van de dijk zal dus toenemen door een asfaltweg. Er valt echter op te merken dat de verwachting is dat de hoeveelheid erosie langs het talud van de dijk zal afnemen door een weg op de kruin van de dijk en bijbehorende kuilen aan weerszijden. De stroomsnelheden van de overslaande golven zijn door de kuilen afgenomen. Hierdoor hebben de overslaande golven in vergelijking met een compleet met gras bedekte dijk een lagere stroomsnelheid wanneer zij het talud van de dijk bereiken. Deze lagere stroomsnelheden zorgen voor lagere bodemschuifspanningen. Dit heeft tot gevolg dat er minder tot geen erosie optreedt langs het talud van de dijk.

Afbeelding 7 geeft alleen de eerste paar meters van het talud weer en de bijbehorende veranderingen in erosieontwikkeling. Er is een *test run* gedaan met het gekoppeld hydrodynamisch-erosiemodel waarin de gehele dijkgeometrie was opgenomen, om te bepalen of de hoeveelheid erosie, indien er een weg op de kruin aanwezig is, ook afneemt verder benedenstrooms van het talud en langs de teen van de dijk. Hieruit blijkt dat de hoeveelheid erosie langs zowel het talud als de teen van de dijk afneemt ten gevolge van de weg en bijbehorende bermen. Hieruit kan opgemaakt worden dat een weg op de dijk leidt tot een verschuiving van de erosieontwikkeling tijdens golfoverslag van de teen en het talud naar de kruin van de dijk. Dit heeft implicaties voor de stabiliteit van de dijk.

Er moet opgemerkt worden dat de gesimuleerde test nog niet uitgebreid is geanalyseerd. We bevelen daarom aan om een uitgebreide gevoeligheidsanalyse te doen om te kijken of dit effect ook te zien is bij andere geometrieën. Daarnaast wordt er aanbevolen om te onderzoeken welke locatie van erosieontwikkeling (de kruin, het talud of de teen van de dijk) de stabiliteit van de dijk het meest in gevaar brengt.

## Conclusies

Het hydrodynamisch-erosiemodel dat ontwikkeld is in deze studie bleek in staat om inzicht te geven in de effecten van een weg op de dijk op erosieontwikkeling tijdens golfoverslag. Hieruit is gebleken dat de hoeveelheid erosie op de kruin significant toeneemt indien er een weg aanwezig is. Een analyse van de modelresultaten liet zien dat deze toename wordt veroorzaakt doordat de golf minder energie verliest vanwege de gladdere asfaltsectie en doordat er een plotselinge toename is in turbulentie, veroorzaakt door een toename van de bodemruwheid. De hoeveelheid erosie langs het talud en de teen van de dijk lijkt echter af te nemen. Er kan dus geconcludeerd worden dat een weg op de kruin van de dijk invloed heeft op de erosieontwikkeling tijdens golfoverslag en daarmee ook op de stabiliteit van de dijk. Om meer inzicht te krijgen in het erosieproces kan het hydrodynamisch-erosiemodel gebruikt worden om verschillende dijkconfiguraties van geometrie, ruwheid en constructies te simuleren en te bepalen hoe dit dijkerosie tijdens golfoverslag beïnvloedt. Deze kennis kan vervolgens gebruikt worden om bestaande rekenregels en toetsen te verbeteren.

### Dankwoord

Dit onderzoek werd ondersteund door het NWO-Perspectiefprogramma multifunctionele dijken, dat deels gefinancierd is door het ministerie van Economische Zaken.

### Referenties

1. Kok, M., Vrijling, J. K., & Zevenbergen, C. (2013). Towards an integrated evaluation framework for Multi-Functional Flood Defences. *Comprehensive Flood Risk Management*, 921–926.
2. Van Hoven, A., Verheij, H., Hoffmans, G., & Van der Meer, J. W. (2013). Evaluation and Model Development: Grass Erosion Test at the Rhine dike, 137.
3. Bomers, A., Aguilar Lopez, J. P., Warmink, J. J., & Hulscher, S. J. M. H. (2016). Modelling erosion development during wave overtopping of an asphalt road covered dike. In M. Lang, F. Klijn, & P. Samuals (Eds.), *3rd European Conference on Flood Risk Management (FLOODrisk 2016)* (Vol. 7, pp. 4–11). Lyone, France: E3S Web of Conferences.
4. Spalding, D.B., Launder, B.E. (1974). The Numerical Computation of Turbulent Flows. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* (Vol. 3, pp. 267-289).
5. Hoffmans, G. (2012). *The influence of Turbulence on Soil Erosion*. Delft: Eburon Academic Publishers.
6. Van der Meer, J., Schrijver, R., Hardeman, B., Van Hoven, A., Verheij, H., Steendam, G.J. (2009). Guidance on erosion resistance of dikes from three years of testing with the Wave Overtopping Simulator. *Proceeding ICE, Coast Marine Structures and breakwaters 2009*. Edinburgh, UK
7. Bakker, J., Melis, R., & Mom, R. (2013). *Factual Report: Overslagproeven Rivierenland* (No. Projectnummer: 12i071. Versie 1.0). Marknesse.