

Advies

Overstromingskans bij golfoverslag n.a.v. casestudy fysica en statistiek

Advies nummer 26-13 van 28 september 2026

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
Directeur-generaal Water en Bodem
De heer drs. J.H. Slootmaker
Postbus 20901
2500 EX Den Haag

Geachte heer Slootmaker,

In de praktijk komen bij zowel het beoordelen als bij het ontwerpen situaties voorbij, waarbij de berekende kansbijdragen of rekenresultaten ogenschijnlijk geen recht doen aan de realiteit, zoals ook eerder is geconstateerd in het ENW-advies 20-1 'Naar geloofwaardige overstromingskansen' uit 2020. Dit is bijvoorbeeld gesignaleerd bij golfoverslag, macrostabiliteit en piping. Een keten aan metingen, statistiek, modelberekeningen en probabilistiek gaan vooraf aan de behaalde resultaten. Om inzicht te krijgen en te bepalen waar de resultaten uit de pas kunnen gaan lopen met de verwachting op basis van experimenteel onderzoek, beheerervaring en overleefde belastingsituaties, hebben de ENW-werkgroepen Techniek en Veiligheid een casestudy uitgevoerd, waarbij gezocht is naar de oorzaken van deze discrepanties.

De casestudy heeft zich gericht op de overstromingskansbijdrage van golfoverslag, omdat veel resultaten - volgend uit de in de ontwerppraktijk gebruikte tools - niet overeenkwamen met resultaten uit praktijkonderzoek. Daarnaast is het formulepark relatief overzichtelijk. De rekenkundige uitkomsten voor het faalmechanisme Gras Erosie Kruin en Binnentalud (GEKB) met de Cumulatieve Overbelasting Methode (COM) leren namelijk dat de berekende overslagdebieten, waarop de dijk bestand moet zijn om voldoende veiligheid te bieden tegen doorbreken, bij meerdijken vaak in de buurt van 10 l/s per m liggen. Op basis van inzichten, opgebouwd door vele jaren aan onderzoek met praktijkproeven, worden echter veel hogere overslagdebieten waargenomen. Het gevolg is dat de dijken veel veiliger zijn dan door de modellen wordt ingeschat.

De centrale vraag die in de casestudy is onderzocht, is of met de huidige tools geloofwaardige overstromingskansen worden berekend, of dat door conservatisme in de rekenmethoden de dijk in werkelijkheid niet faalt en de rekenmethode dus ook niet een realistische overstromingskans oplevert.

Voor de casestudy is een hypothetische meerdijk genomen. Berekend is wanneer deze dijk volgens de beschikbare rekenkundige belasting- en sterktemodellen faalt als gevolg van golfoverslag, bij welk overslagdebiet dat gebeurt en in hoeverre dit overeenkomt met fysiek waargenomen situaties, met name uit proeven met de golfoverslagsimulator.



Uit de casestudy volgen drie hoofdconclusies en aanbevelingen:

1. De GEBU-GEKB-tool¹ wordt in de praktijk toegepast, terwijl verdere kwaliteitsverbetering gewenst is

Binnen BOI worden rekenregels voor het kritieke overslagdebiet gebruikt. Deze werkwijze zit aan de sterk conservatieve kant. Buiten BOI zijn golfoverslagproeven uitgevoerd, is de Cumulatieve Overbelasting Methode (COM) ontwikkeld en is deze geïmplementeerd in de softwaremodule GEBU-GEKB-tool. Hiermee zijn grote stappen gezet in de modellering van het faalmechanisme. De GEBU-GEKB-tool wordt al wel in de praktijk toegepast, maar bevat echter nog onjuistheden. Dit leidt ertoe dat de - met de huidige tools berekende - kansen op overstromen door golfoverslag bij meerdijken onnauwkeurig en conservatief zijn. Dit acht het ENW voor het beoordelen van waterkeringen ongewenst, omdat dit conservatisme tot (op dit moment) onnodige of te vroege investeringen kan leiden. Voor het (robuust) ontwerp van waterkeringen is enig conservatisme gewenst, al zou de mate van robuustheid van een ontwerp uiteraard het resultaat moeten zijn van een weloverwogen beslissing en niet van onvolledigheden binnen een model of rekenmethode.

Aangezien de Cumulatieve Overbelasting Methode een sterke verbetering is ten opzichte van de methode met het kritieke overslagdebiet, beveelt het ENW aan de deze op te nemen in het BOI. Daarbij is het van belang om deze op de juiste wijze in de software te implementeren en een zorgvuldige kwaliteitsborging uit te voeren.

2. De samenwerking en kwaliteitsborging kunnen verder worden versterkt

Er blijkt geen directe interactie te hebben plaatsgevonden tussen de software-implementeerder en ontwikkelaars van de COM. Individueel is goed werk geleverd en de COM en de GEBU-GEKB-tool zijn grote stappen vooruit, maar dit voorbeeld laat zien dat het ontbreekt aan samenwerking, regie en kwaliteitsborging.

Het ENW beveelt aan bij de ontwikkeling van dergelijke modellen een onafhankelijke review uit te voeren. Tevens beveelt het ENW aan om testbanken met bekende cases te definiëren en na elke aanpassing of ontwikkeling aan een model de modelberekeningen voor deze cases te herhalen.

3. Er is geen inherente tegenstelling tussen de fysische benadering en de probabilistische benadering

Zowel de fysische als de probabilistische benadering zijn nodig om tot geloofwaardige uitkomsten te komen. Ze versterken elkaar, mits ze op een correcte manier worden toegepast en met een passend proces worden uitgevoerd. Dit is geen verrassende uitkomst, maar bevestigt dat een goede samenwerking vereist is.

Het ENW is van mening dat de hierboven beschreven casestudy ook illustratief kan zijn voor de rekenkundige beoordelingen van andere faalmechanismen. Daarom beveelt het ENW aan om dit met een dergelijke aanpak ook voor andere faalmechanismen uit te zoeken en daarbij aandacht te schenken aan zowel modelmatige als organisatorische aspecten. Met name is een onafhankelijke kwaliteitsborging van groot belang voor het berekenen van geloofwaardige overstromingskansen, zoals de casestudy heeft bewezen.

In de bijlage van dit advies treft u uitgebreidere achtergrondinformatie en de resultaten van de casestudy in meer detail.

Hoogachtend,
Ir. H.C. Klavers
Voorzitter van het Expertise Netwerk Waterveiligheid (ENW)

¹ GEBU staat voor Graserosie buitentalud, GEKB staat voor graserosie kruin en binnentalud



Bijlage: Achtergrondinformatie en resultaten casestudy in meer detail

1. Achtergrond

De benodigde hoogte van een dijk bij golfoverslag werd in de vorige eeuw bepaald door het berekenen van het niveau waarbij 2% van de golven de kruin bereikten. Dan werd de dijk als voldoende veilig gezien voor dat mechanisme. In de laatste 25 jaar zijn we overgegaan naar een rekenwaarde van het overslagdebiet, omdat de grootte van de overslaande volumes afhangen van de golfhoogte en daardoor het onderscheid tussen zee- en meerdijken (grote golven) werd gemaakt met rivierdijken (kleine golven). We zijn in gaan zien dat golven een belasting geven en dat we eigenlijk ook naar de sterkte moeten kijken: de sterkte van een grasbekleding op kruin en binnentalud.

Vanaf 2007 zijn er veel proeven uitgevoerd met de golfoverslagsimulator. Uitgangspunt bij de simulatie is een golfhoogte en periode vóór de dijk met een bepaald talud. Afhankelijk van de vrije kruinhoogte kan het overslagdebiet variëren, en dit kan worden ingesteld in de simulator (van 0,1 l/s per m tot meer dan 100 l/s per m). Daarna wordt het gekozen overslagdebiet verdeeld in een aantal overslaande golfvolumes en deze worden random uit de simulator losgelaten. De simulator is zo ontworpen dat de snelheden op de kruin redelijkerwijs met die van een overslaand volume overeenkomen, zoals dat bij echte golven ook gebeurt. Zeer grote snelheden kunnen echter niet worden gesimuleerd. De oorspronkelijke simulator is ook maar ontworpen op een maximum overslagdebiet van 50 l/s per m en een maximum volume per golf van 3500 l/m. De gedachte in 2007 was dat elke grasmatten dan allang gefaald zou zijn. Met dit onderzoek is echter aangetoond dat gras veel sterker is en ook grotere overslagdebieten aankan.

Door langjarig onderzoek is de Cumulatieve Overbelasting Methode (COM) ontwikkeld. Hierbij wordt de sterkte van de grasbekleding alleen aangesproken door golven die een grotere frontsnelheid hebben dan de kritische snelheid (de sterkte) van het gras. Elke golf boven de grens telt mee en daarvan wordt de cumulatieve belasting bepaald. Als een bepaalde grens wordt bereikt, faalt de grasbekleding. De vele proeven hebben laten zien dat bij een redelijke grasbekleding een doorbraak niet mogelijk is bij een golfoverslagdebiet in de buurt van 10 l/s per m. Vaak moeten we naar 50 l/s per m of veel meer en faalt de grasbekleding zelfs dan nog niet altijd.

De COM is gebaseerd op de frontsnelheid van een overtrekkende golf, maar deze is bij de proeven altijd gekoppeld geweest aan het overslaande volume. Dus bij grote snelheden ging die gepaard met grote overslaande volumes. De Z-functie van de COM beschrijft niet de realisaties van de golfoverslagsimulator, maar het gedrag van echte golven op en over een dijk. Er is een procedure opgesteld voor zowel golfoploop op het buitentalud (GEBU) als voor golfoverslag (GEBK). Deze procedure is gebruikt om verschillende softwaremodules te ontwikkelen (voor GEBU, GEBK en de combinatie van GEBU en GEBK). Gebruik van de softwaremodule binnen Riskeer levert dan bijvoorbeeld de condities waarop het gras faalt.

Bij het formuleren van de procedures is een grote stap gemaakt, omdat alleen de frontsnelheden van oplopende en overslaande golven worden berekend op basis van de 2%-oploop. De koppeling naar een gemiddeld golfoverslagdebiet en naar overslaande volumes is daarbij verlaten. Dit is ook logisch, omdat de COM alleen de frontsnelheden nodig heeft. Toch zijn bij de proeven met de golfoverslagsimulator en daardoor ook in de COM impliciet het overslaand golfvolume en de frontsnelheid wel gekoppeld (een grote snelheid hoort bij een groot overslaand volume). Bij de proeven kwamen geen grote snelheden voor bij kleine overslaande volumes. Daarnaast wordt meegenomen dat er veel kleine golven overslaan, die geen directe schade geven, maar wel bijdragen aan vermoeiing van het gras en daardoor ook meedoen in de uiteindelijke faalkans.



Wij weten van oudsher vrij veel over het 2%-oplooppniveau en ook van overslagdebieten, maar redelijk weinig van snelheden bij golfoploop en -overslag zelf. Er zit dus onzekerheid in de oploopsnelheden en mogelijk ook een discrepantie tussen extreme snelheden in een golfveld en de maximale snelheid die de simulator op de kruin kan realiseren. Een validatie van de resultaten van berekeningen is dan ook noodzaak.

In de rekenmethode voor BOI moet een overstromingskans worden berekend, dus de kans op het doorbreken van de dijk door golfoverslag (de dijk moet niet met een zekere veiligheid blijven staan onder de rekenwaarde van de belasting, waar vroeger vanuit werd gegaan).

Voorafgaand aan de oplevering van het WBI2017, het instrumentarium voor de eerste landelijke beoordeling met overstromingskansen, is een ontwerpinstrumentarium (OI2024) opgeleverd. Dit OI2014 bevatte grof afgeleide, conservatieve ontwerpregels om de consequenties van de verwachte overstromingskansnormen te kunnen verkennen in lopende of aanstaande dijkversterkingsprojecten. In het OI2024 is voor GEKB gekozen voor een semiprobabilistische werkwijze met rekenwaarden van kritieke overslagdebieten. Deze rekenwaarden waren gebaseerd op probabilistische berekeningen met kansverdelingen van kritieke overslagdebieten. Die kansverdelingen waren afgeschat door experts die bij overslagproeven betrokken waren geweest. Hoewel uit de probabilistische analyses bleek dat rekenwaarden van het kritieke overslagdebet van bijvoorbeeld 50 l/s per m zouden kunnen worden gehanteerd, is destijds (met het oog op de toepassing) gekozen voor meer behoudende rekenwaarden, van 1 l/s per m tot hoogstens 10 l/s per m, afhankelijk van de kwaliteit van de grasmat en de aanwezigheid van overgangen.

De bovengenoemde kansverdelingen van kritieke overslagdebieten zijn in het WBI2017 overgenomen. De rekenwaarden uit het OI2014 werden geleidelijk aangescherpt. De COM is echter nog niet opgenomen in het BOI. Om een minder conservatieve aanpak mogelijk te maken, heeft een adviseur van het Adviesteam Dijkontwerp op eigen initiatief de COM geïmplementeerd, uitgaande van de beschrijvingen van de COM in wetenschappelijke rapporten en publicaties. Deze implementatie is intern door het Adviesteam getoetst, waarbij niet is gekeken naar de onderliggende rapporten en publicaties. De reden daarvoor was dat (de kansverdelingen van) de kritieke overslagdebieten uit BOI hierop zijn gebaseerd. Het leek weinig productief om die vanuit het Adviesteam ter discussie te stellen, nog los van het feit dat het Adviesteam daartoe geen directe aanleiding zag om te twijfelen aan de kwaliteit van het basismateriaal van het BOI.

In 2021 is de aldus ontwikkelde 'GEBU-GEKB-plugin' door het Adviesteam gebruikt in diverse HWBP-ingangstoetsen en in adviezen aan dijkversterkingsprojecten. Hiermee zijn grote besparingen gerealiseerd. De COM heeft hierdoor aan bekendheid gewonnen. De plugin wordt inmiddels soms ook door waterschappen zelf toegepast. De software van het BOI (Riskeer) werkt echter nog altijd met kansverdelingen van het kritieke overslagdebet. In dijkversterkingsprojecten wordt nog vaak gerekend met kritieke overslagdebieten van 5 l/s per m of 10 l/s per m, een keuze die dan veelal door waterschappen op programmaniveau is vastgelegd.

Het voorliggende advies richt zich op de huidige implementatie van de COM in de GEBU-GEKB-plugin. Dit is momenteel de 'scherpst beschikbare' methode om de kans op initiatie van het faalmechanisme GEKB te bepalen, ook al is deze methode nog niet in BOI-software geïmplementeerd.

Bij een berekening met de COM is het mogelijk om een ontwerppunt te berekenen, wat gebruikt kan worden om te bepalen wat dan het kritieke golfoverslagdebet met de grootste kansdichtheid moet zijn geweest. De ervaring leert dat die kritieke overslagdebieten, waarbij de dijk dus rekenkundig zou doorbreken, bij meerdijken vaak in de buurt van 10 l/s per m liggen volgens de huidige rekenmethode. Dit is niet in lijn met de



vele jaren aan onderzoek met de golfoverslagsimulator. Bovendien hoeft de initiatie van het bezwijken van de grasmat nog niet direct te leiden tot een overstroming, zoals in de LBO-1 praktijk wel standaard werd aangenomen. Een nadere analyse moet duidelijkheid geven of de huidige implementatie van de COM onnodig conservatief is. Indien dit zo is, dan geldt dit uiteraard in nog sterkere mate voor de beoordelingen en ontwerpen waarin nog met (relatief kleine) kritieke overslagdebieten wordt gewerkt.

2. Berekeningsresultaten

Met de GEBU-GEKB-plugin, die werkt met Hydra-Ring, zijn berekeningen gemaakt voor een hypothetische meerdijk met een buitentalud van 1:3 (zonder berm), een kruinhoogte van 6,80 m +NAP, een binnentalud van 1:3 en een goede grasbekleding met een bijbehorende stochastisch kritische frontsnelheid met een verwachtingswaarde van 8,0 m/s en een standaardafwijking van 1,0 m/s. De dijk heeft een zandkern met een 80 cm dikke kleilaag op de kruin en binnentalud. Voor de hydraulische belastingen is de nieuwste versie van de WBI2017-databases voor traject 8.3 genomen, de IJsselmeerdijk langs Flevoland bij Lelystad. Berekend is wanneer deze dijk, die een andere geometrie heeft dan de IJsselmeerdijk, doorbreekt. Vanuit het illustratiepunt is berekend bij welke hydraulische belastingen en welk overslagdebiet dat dan gebeurt. En ten slotte, of dit klopt met fysiek waargenomen situaties (zoals proeven met de golfoverslagsimulator).

Uit het illustratiepunt van de berekeningen volgt een significante golfhoogte $H_{m0} = 3,07$ m, een spectrale golfperiode $T_{m-1,0} = 5,67$ s en een waterstand $h = 1,80$ m+NAP. Het bijbehorende golfoverslagdebiet is $q = 11,8$ l/s per m.

Met name het golfoverslagdebiet laat zien dat er een grote discrepantie is tussen het berekeningsresultaat en waarnemingen bij proeven. Bij een goede grasbekleding met een kritische snelheid van 7,5 m/s in het ontwerp punt/illustratiepunt is een golfoverslagdebiet van minimaal 50 - 100 l/s per m nodig om de grasbekleding (de eerste 20 cm - 30 cm) te laten falen. Dan moet de onderlaag van klei nog doorbroken worden en als de zandkern bereikt is, moet via kliferosie de kruin worden bereikt, waarna de dijk inderdaad op het punt staat van doorbreken. Dit alles is in werkelijkheid onmogelijk bij een overslagdebiet van 11,8 l/s per m.

Als er bij een groot overslagdebiet (orde 50 - 100 l/s per m of meer) een gat in de grasbekleding ontstaat, dan is er niet veel sterkte meer in de onderliggende kleilaag. Die breekt dan ook snel door, waardoor de zandkern wordt bereikt. Maar voor kleinere overslagdebieten heeft de onderliggende kleilaag weldegelijk sterkte. En als de kleilaag uiteindelijk wel is doorgebroken, dan moet kliferosie het gat nog tot de kruin brengen.

3. Oorzaken voor de discrepanties

Na analyse in deze casestudy zijn de volgende verklaringen gevonden. Deze hebben betrekking op de schematisatie van het faalmechanisme en de interpretatie van de norm, het proces rondom de totstandkoming van de rekenmodellen en de inhoud van de rekenmodellen zelf.

3.1. De schematisatie van het faalmechanisme

Er kan pas sprake zijn van een overstroming als de grasbekleding faalt, de kleilaag doorbreekt en middels kliferosie het gat de kruin bereikt. Modellen hiervoor ontbreken in het BOI. Daarom worden de kansen op deze vervolgebeurtenissen in de praktijk vaak genegeerd. Dit betekent dat de kans op een dijkdoorbraak gelijk wordt gesteld aan de kans op een gat in de grasmat. Met andere woorden, de berekening stopt bij het initieel mechanisme en de kans op de vervolgprocessen wordt gelijkgesteld aan 1.

Het gat zelf ontstaat bij de teen van de dijk, omdat daar het water op het binnentalud is versneld en een zwaardere belasting ontstaat, doordat de waterstroom moet worden omgebogen naar horizontaal. De dijk wordt als doorgebroken beschouwd als er een gat bij de teen van de dijk is ontstaan. In de huidige methodiek wordt daarom een belastingfactor 1,1 voor overgangen gebruikt. Door het gebruik van deze factor, zal falen



van de grasbekleding altijd bij de teen optreden. In werkelijkheid neemt de kans op falen van de toplaag toe richting de teen, maar de kans op bezwijken van de dijk af richting de teen. Het kritieke punt bevindt zich in werkelijkheid ergens halverwege het talud.

De foto's in Figuur 1 t/m 3 geven voorbeelden van een 'doorgebroken dijk' volgens de rekenmethode en bij gelijkstellen van de kans op de vervolgmechanismen aan 1, die in werkelijkheid nog (lang) niet is doorgebroken. Hoewel het ontoelaatbaar is om het falen van de teen van de dijk gelijk te stellen aan het doorbreken van de dijk, is hiermee de discrepantie tussen het overslagdebiet dat wordt berekend en de praktijk overigens nog niet opgelost, want ook een gat bij de teen van de dijk ontstaat niet bij het berekende overslagdebiet.



Figuur 1. Proeven bij Kattendijke met de golfoverslagsimulator die een 'doorgebroken dijk' weergeven volgens de huidige implementatie van het faalmechanisme. Een gravelweg erodeerde tot een 10 m breed en 2 m diep gat. Hierna ontstond kliferosie.



Figuur 2. Proeven op St. Philipsland met de golfoverslagsimulator die een 'doorgebroken dijk' weergeven volgens de huidige implementatie van het faalmechanisme.



Figuur 3. Proeven op Tholen met de golfverslagsimulator die een 'doorgebroken dijk' weergeven volgens de huidige implementatie van het faalmechanisme.

3.2. Interpretatie van de norm

Een ander aspect van de beoordeling of de dijk voor een specifiek mechanisme voldoende veilig is, is de interpretatie van de norm. De norm is in de Omgevingswet weergegeven als trajectnorm. Dat betekent dat de bijdrage van alle mechanismen en alle dijkvakken tezamen niet hoger mogen zijn dan de trajectnorm. Gezien de complexiteit om al deze bijdragen samen te stellen tot een faalkans, wordt de trajectnorm bij het ontwerp ontleden in faalkansen per mechanisme op doorsnedeniveau. Deze aanpak is ook in de beoordelingsronde LBO1 (cf. WBI2017) gevolgd. In het WBI 2017 werd voor de kruinhoogte 24% van de trajectnorm gerekend, rekening houdend met een lengte-effect, die opgezocht kon worden in een tabel. Voor de bekleding op het buitentalud was dit 5%. In de praktijk werd voor het gras op het boventalud dezelfde lengte-effectfactor gebruikt als voor de kruin. In LBO-2 is deze default-faalkansbegroting losgelaten en wordt men geacht om de overstromingskans van het dijktraject te vergelijken met de norm (zonder default-faalkansbegroting en default-lengte-effectfactoren).

Voor de bekleding geldt dat die veelal bestaat uit verschillende materialen, bijvoorbeeld uit een strook steenzetting onderop het talud, asphalt vanaf de hoogwaterlijn tot net boven de berm en gras erboven tot aan de kruin en op de kruin en het binnentalud. Voor elk van deze typen bekleding zijn er aparte rekenmodellen. Het is gebruikelijk dat bij het ontwerp van bekledingen wordt gewerkt met faalkanseisen op doorsnedeniveau (zoals in LBO1 ook in de beoordeling is gedaan). Deze faalkanseisen zijn relatief streng. Zo wordt voor het gras op het buitentalud bijvoorbeeld het volgende bepaald:

- norm op trajectniveau (ondergrens): $P_{\max} = 1/3.000$ per jaar;
- maximaal toelaatbare faalkans voor de bekledingen: $P_B = 0,1 \cdot P_{\max} = 1/30.000$ per jaar;
- maximaal toelaatbare faalkans voor gras voor het traject: $P_G = 0,5 \cdot P_B = 1/60.000$ per jaar;
- maximaal toelaatbare faalkans voor graserosie voor het traject: $P_{GE} = 0,9 \cdot P_G = 1/67.000$ per jaar;
- maximaal toelaatbare faalkans voor graserosie voor een specifieke locatie op de dijk (dijkdoorsnede):
 $P_T = P_{GE}/3 = 1/200.000$ per jaar. Hierin is de factor 3 de lengte-effectfactor voor de hoogte van de waterkering (zie bijvoorbeeld bijlage A in OI2014v4, 2017).

De bovenstaande procedure om tot een toelaatbare faalkans van het gras en de klei te komen, berust op verschillende benaderingen/aannamen: 1) afhankelijkheden tussen faalmechanismen worden genegeerd, 2) elk faalmechanisme wordt verondersteld exact het beschikbare faalkansbudget te benutten en 3) de standaard lengte-effectfactoren zijn voorzichtige inschattingen die niet berusten op wat daadwerkelijk passend is om in een specifiek dijktraject op voldoende kleine faalkansen op trajectniveau per faalmechanisme uit te komen. Elk van deze aspecten zorgt voor conservatisme en dat leidt tezamen tot relatief strenge eisen, zoals te zien is in bovenstaand voorbeeld, waar een norm voor de beoordeling van het gras op het boventalud van



1/200.000 per jaar wordt gebruikt bij een trajectnorm van 1/3.000 per jaar. Dit leidt tot ontwerpverificaties waarin wordt gerekend met extreem hoge waterstanden en extreem hoge golven, waarbij wellicht allang een ander faalmechanisme optreedt. Dit leidt ook tot onnodig conservatieve ontwerpkeuzes, zoals het optrekken van het asfalt op het buitentalud tot aan de kruin. Daarnaast wordt veel tijd en energie gestoken in het modelmatig aannemelijk maken dat nauwelijks relevante faalmechanismen inderdaad een verwaarloosbare faalkans bezitten. Dit is inefficiënt en gaat ten koste van de aandacht voor de dingen die er wel toe doen.

Het eerste aspect (afhankelijkheden tussen faalmechanismen negeren) is met name conservatief voor faalmechanismen die sterk afhankelijk zijn. Dit is in de praktijk het geval bij faalmechanismen waarbij de hydraulische belasting veruit de bepalende onzekere grootte is, wat geldt voor GEKB, HTKW, GEBU, ZST en AGK, en mogelijk STBI als de stabiliteit pas in het geding komt bij infiltratie door overloop/overslag. Het negeren van afhankelijkheden leidt alleen bij zeer hoge correlaties tot een wezenlijke overschatting ('hockeystickeffect'), in andere gevallen blijft het conservatisme gering, bijvoorbeeld voor STPH, STBI en BSKW.

In de GEBU-GEKB-plugin worden GEBU en GEKB in de doorsnede gecombineerd, rekening houdend met de afhankelijkheden binnen de doorsnede. Dit komt er praktisch op neer dat 'GEBU-GEKB' in de doorsnede als een enkel faalmechanisme wordt behandeld. Het resultaat is dat de afhankelijkheid tussen GEBU en GEKB in rekening wordt gebracht, en dat de totale faalkansruimte tussen GEBU en GEKB automatisch optimaal wordt invuld (enige nuance ten aanzien van het combineren van doorsnede-eisen daargelaten).

Voor het combineren van GEBU en GEKB in een doorsnede wordt in de GEBU-GEKB-plugin gebruikgemaakt van de combineroutine ('combin') uit Hydra-Ring. Met deze routine zijn in beginsel ook de faalkansen van alle andere faalmechanismen en alle doorsneden met elkaar te combineren. Een praktische userinterface daarvoor is van belang voor de beoordeling en het ontwerp van dijktrajecten. Dit is door het HWBP onderkend en in het kader van het HWBP-innovatieproject 'lengte-effecten' wordt de combin-routine aan de Pythonwrapper voor Hydra-Ring toegevoegd, waarmee geïnteresseerde gebruikers makkelijker met Hydra-Ring berekeningen zullen kunnen maken.

3.3. De inhoud van de rekenmodellen

Ter controle van het huidige rekenmodel is een berekening gemaakt met de plugin op Hydra-Ring, waarbij enkele parameters als deterministisch zijn aangehouden. Met het illustratiepunt is vervolgens nagerekend of inderdaad bij dit overslagdebiet een gat in de bekleding kan ontstaan (als een D-waarde van 7.000 m²/s² wordt bereikt in een storm). De deterministische berekening geeft aan dat bij ordegrootte $q = 12$ l/s per m falen van de bekleding wordt bereikt volgens de rekenmethode bij een equivalente belastingduur bij constante condities van 5,4 uur.

Analyse geeft aan dat dit voor relatief kleine overslaande golfvolumes gebeurt. Het grootste overslaande volume is 4000 l/m en er zijn maar 13 golven met een volume groter dan 2.000 l/m. Bij deze volumes worden echter erg grote snelheden op de kruin berekend van 8,5 m/s - 10 m/s. Deze snelheden zijn nooit gesimuleerd bij de proeven met de overslagsimulator. Het blijkt dat de grote berekende snelheden op de kruin een zeer grote invloed hebben op de cumulatieve D-waarde. Dit komt omdat de snelheden op het binnentalud 40% hoger worden dan op de kruin en vervolgens kwadratisch meetellen.

Het is dus de procedure, waarbij de 2%-golfoploop de basis is voor de frontsnelheid, die tot erg grote snelheden leidt bij relatief kleine overslaande golfvolumes. De vraag is of dit resultaat wel reëel is. Bij een validatie van berekeningsresultaten van het model had deze vraag naar boven moeten komen.

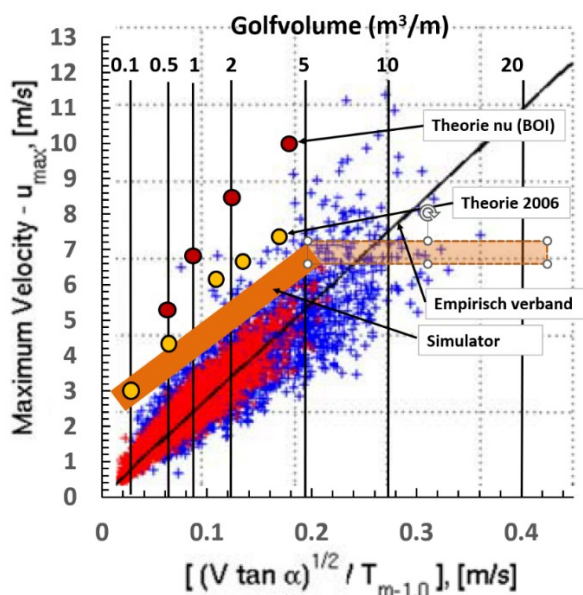


Uit gepubliceerd onderzoek, nadat de procedures voor de COM waren opgesteld, blijkt nu dat er metingen zijn van overslaande volumes van golven, gekoppeld aan de frontsnelheid op de kruin (zie Figuur 4). Dit onderzoek (Hughes, 2015) laat zien dat snelheden op de kruin afhankelijk zijn van het overslaand golfvolume en dat kleinere volumes geen extreem grote snelheden kunnen hebben. De belangrijkste conclusie is dat dit onderzoek wijst op een relatie tussen overslaand golfvolume en snelheid op de kruin en dat erg grote snelheden alleen voorkomen bij grote overslaande golfvolumes. De grootste gemeten snelheid op de kruin is ruim 11 m/s, maar dit is dan wel bij een overslaand golfvolume van 10.000 l/m (ongeveer tweemaal zo groot als wat de golfoverslagsimulator aankan).

Figuur 4 geeft een bewerkte versie van de figuur met de metingen. De figuur geeft ongeveer 5.000 meetpunten van acht proeven, waarbij het buitentalud 1:3 was (blauwe punten) of 1:6 (rode punten). Dit dekt redelijk de situaties in Nederland. De golfhoogte varieerde van 2 m - 3 m en de golfsteilheid van 2,5% - 5%. Dit sluit aan op de ontwerpcondities voor zee- en meerdijken. Wel was altijd een groot overslagdebiet aanwezig, van 50 - 400 l/s per m. In de figuur wordt een lineair verband gevonden als (op de horizontale as) ook de hellingshoek van het buitentalud wordt meegenomen en de spectrale golfperiode.

Voor een specifieke omstandigheid zijn in Figuur 4 ter verduidelijking verticale lijnen getekend met de te verwachten overslaande golfvolumes. Voor het bepalen van deze lijnen is een golfhoogte van 3 m en een spectrale periode van 6,5 s aangehouden.

De figuur illustreert welke de empirische relatie is tussen overslagvolume en grootst gemeten golfsnelheid op kruinhoogte (zwarte lijn, empirisch verband) en welke de in de GEBU-GEKB-tool aangenomen rekenkundige relatie is (theorie nu). De empirische relatie volgt uit de metingen: een lineair verband met een spreidingsband (de blauwe kruisjes). De rekenkundige relatie in de huidige tool is weergegeven door middel van de rode bolletjes. Het blijkt dat de rekenkundige relatie een zeer conservatieve relatie is: bij een bepaald overslagdebiet ligt de aangenomen golfsnelheid ver boven de gemiddelde werkelijke golfsnelheid en zelfs nog boven de gehele empirische spreidingsband. Dit is hieronder nog verder toegelicht.



Figuur 4. Recente metingen van snelheden op de kruin gekoppeld aan het overslaande golfvolume. Blauwe punten geven een 1:3-buitentalud en rode een 1:6-talud. De verticale lijnen voor golfvolumes gelden alleen voor een golfhoogte van 3 m met een spectrale periode van 6,5 s en een 1:3-buitentalud. De relaties voor de golfoverslagsimulator en de theorieën zijn ook gegeven.



De figuur laat de gemiddelde relatie en de spreiding zien die in de metingen aanwezig is. Bij een overslaand golfvolume van 2.000 l/m (2 m³/m) is de snelheid op de kruin gemiddeld iets meer dan 3 m/s, maar de variatie is van minder dan 2 m/s tot een maximum van bijna 7 m/s. Bij een groot overslaand volume van 5.000 l/m (5 m³/m) is de gemiddelde snelheid op de kruin 5,5 m/s met een minimum en maximum van 2,5 m/s en 9 m/s. Het is dit beeld dat in een eventuele procedure moet worden meegenomen: een formule voor de gemiddelde snelheid op de kruin met een grote spreiding rondom de formule.

De golfoverslagsimulator is ontwikkeld op basis van de theorie van overslaande volumes en snelheden uit 2006 (de gele punten, theorie 2006). Een groter overslagvolume dan 3.500 l/m werd niet verwacht. De daadwerkelijk te realiseren relatie met de simulator is ook in de figuur gegeven (simulator) en blijft voor de grotere volumes (groter dan 5.000 l/m) iets achter met betrekking tot de theorie. Maar, in zijn algemeenheid geeft de golfoverslagsimulator snelheden op de kruin die redelijk overeenkomen met de grootste snelheden uit de metingen in de figuur.

Door de jaren heen is de theorie aangepast (de rode punten, theorie nu) en in de figuur geven ze duidelijk een discrepantie tussen de werkelijke snelheden op de kruin uit metingen. De grote berekende snelheden op de kruin bij relatief kleine overslaande volumes, geeft de oorzaak waarom in de berekening met Hydra-Ring momenteel falen optreedt voor relatief kleine golfoverslagdebieten.

3.4. De wijze van samenwerken en het proces rondom de totstandkoming van de rekenmodellen

De Cumulatieve Overbelasting Methode (COM) is op basis van proeven met de golfoverslagsimulator ontwikkeld. Daarna zijn procedures opgeschreven, waarbij golfoploop (GEBU) op het buitentalud en golfoverslag (GEKB) op de kruin en binnentalud tot falen van de grasbekleding (de eerste 20 cm - 30 cm) leiden. Dit is uitgewerkt tot een procedure die volledig afhankelijk is van de golfoploop en daaraan gekoppelde snelheden. De rechtstreekse koppeling met het overslagdebiet en volumes van overslaande golven is daarbij noodgedwongen verloren gegaan, omdat deze destijds niet bekend was.

De procedures zijn opgenomen in softwaremodules die aan Hydra-Ring zijn gekoppeld. Daar komen nu echter golfoverslagdebieten bij falen uit, die gevoelsmatig (veel) te klein zijn. Een onafhankelijke, externe review of validatie van de uitkomsten van het complete model is niet uitgevoerd. Door het gebrek aan regie op het totaal is ook geen terugkoppeling geweest naar het team dat de COM heeft ontwikkeld. Er is gescheiden gewerkt: het ene team ontwikkelt de methode en beschrijft de procedure, een ander team werkt aan de formules en ontwikkelt de software. Individueel is goed werk geleverd, maar het ontbreekt aan samenwerking in de keten. Door het niet valideren en terugkoppelen van de resultaten van de modules GEBU en GEKB zijn er onvolkomenheden in de tools geslopen, die tot onjuiste resultaten leiden. De consequentie hiervan is dat vele zee- en meerdijken mogelijk met een te conservatieve berekening zijn beoordeeld of ontworpen.

4. Conclusies en aanbevelingen

Binnen BOI worden rekenregels voor het kritieke overslagdebiet gebruikt. Buiten BOI is de Cumulatieve Overbelasting Methode (COM) ontwikkeld en deze is - op eigen initiatief - door een adviseur van het Adviesteam Dijkontwerp in een softwaremodule geprogrammeerd, de GEBU-GEKB-tool. Dit was een goede stap, omdat de COM een sterke verbetering is ten opzichte van de methode met een kritiek overslagdebiet. Uit onderhavige casestudy blijkt dat deze tool echter nog onjuistheden bevat, maar wel in de praktijk wordt toegepast. Dit betekent dat de met de huidige tools berekende kansen op overstroom door golfoverslag bij meerdijken onnauwkeurig en conservatief zijn. Dit acht het ENW voor het beoordelen van waterkeringen ongewenst, omdat dit conservatisme tot (op dit moment) onnodige of te vroege investeringen kan leiden. Voor het (robuust) ontwerp van waterkeringen is enig conservatisme gewenst, al zou de mate van robuustheid van een ontwerp uiteraard het resultaat moeten zijn van een weloverwogen beslissing en niet van onvolledigheden binnen een model of rekenmethode. Aangezien de COM een sterke verbetering is, ten opzichte van de methode met het kritieke overslagdebiet, beveelt het ENW aan de COM op te nemen in BOI. Daarbij is het



van belang deze op de juiste wijze te implementeren in de software en de kwaliteitsborging zorgvuldig uit te voeren.

De verdere conclusies en aanbevelingen kunnen worden opgedeeld in conclusies met betrekking tot 1) de schematisatie van het faalmechanisme en de interpretatie van de norm, conclusies met betrekking tot 2) de inhoud van de rekenmodellen, en conclusies met betrekking tot 3) het proces rondom de totstandkoming van deze rekenmodellen.

1) Schematisatie van het faalmechanisme en interpretatie van de norm

a) Gebeurtenissen in het faalpad worden overgeslagen

Op dit moment is er in het rekeninstrumentarium geen model waarbij een gat in de grasbekleding door golfoverslag wordt opgevolgd door een gat in de kleibekleding (onderlaag van binnentalud) en vervolgens door kliferosie tot aan de kruin van de dijk. In het instrumentarium worden de kansen op de vervolgprocessen op 0 of 1 gesteld. Dit betekent dat situaties kunnen voorkomen, waarin het huidige model een gat bij de binnenteen (hiel) van de dijk aan het eind van de storm (het initieel mechanisme) ten onrechte gelijkstelt aan een dijkdoorbraak. Doordat voor het eroderen van de onderlaag en kliferosie, de vervolgmechanismen in het faalpad, geen modellen beschikbaar zijn, worden de kansen op deze gebeurtenissen namelijk vaak (onterecht) gelijk aan één gesteld. Door het gelijkstellen van het falen van de grasbekleding aan falen van de dijk, wordt onnodig conservatief beoordeeld en ontworpen.

Het wordt daarom aanbevolen om de vervolgmechanismen wel mee te nemen. Rekenkundige modellen zijn voor de kortere termijn niet altijd de oplossing, vanwege de tijdsduur van ontwikkelen. Het advies is daarom op korte termijn te zorgen voor een betere aanpak met betrekking tot het al dan niet meenemen van de vervolgprocessen (dus niet door het gelijkstellen van de kans op deze processen aan 0 of 1), gebaseerd op expert judgement, waarbij op pragmatische wijze een schatting van de kans op het vervolgproces wordt gegeven. Het schatten van kansen op basis van expert judgement is internationaal gangbaar en hiervoor zijn methodes beschikbaar. Er kunnen ook simpele modellen worden gemaakt, die beter een kans tussen 0 en 1 geven. Voor de langere termijn wordt aanbevolen gedetailleerdere modellen voor de vervolgmechanismen te ontwikkelen.

b) De maatgevende locatie voor falen is het binnentalud en niet de teen

In werkelijkheid ontstaat een gat in de grasbekleding veelal bij de binnenteen van de dijk, omdat daar het water op het binnentalud is versneld en een zwaardere belasting ontstaat doordat de waterstroom moet worden omgebogen naar horizontaal. Dat is echter niet doorslaggevend voor het falen van de dijk. Door de belastingfactor voor deze overgang in het model aan te passen, wordt vastgesteld wanneer de bekleding op het binnentalud zelf faalt, hetgeen veel relevanter is voor het doorbreken van de dijk. En als dit hoger op het talud zit, is deze situatie gevaarlijker dan een gat bij de teen. Doordat overslaand water vanaf de kruin door de zwaartekracht versnelt, vindt de maatgevende belasting plaats ordegrootte 5 m vanaf de kruin tot aan de teen. Na het ontstaan van schade aan het gras in deze zone zal er eerst nog falen van de onderlaag en kliferosie moeten optreden voordat de dijk faalt (zie ook conclusie 1).

c) Het negeren van afhankelijkheden tussen faalmechanismen leidt tot conservatisme

De huidige procedure van de vertaling van de trajectnorm naar doorsnede-eisen per faalmechanisme, waarmee de dijkbekleding in de praktijk wordt ontworpen (en in LBO1 is beoordeeld), leidt tot ontwerp-eisen die strenger zijn dan nodig is. Bij het ontwerp van bekledingen leidt dit vervolgens tot rekenexercities met onrealistisch hoge waterstanden en golfcondities, waarbij de dijk al zou falen door een ander mechanisme. In het verleden heeft dit bij dijkversterkingen geleid tot bekledingen die onnodig hoog zijn opgetrokken. Dit komt door het verwaarlozen van afhankelijkheden, terwijl er methodes beschikbaar zijn om die wel goed mee te nemen.



Aanbevolen wordt om dit conservatisme te vermijden door in dijkversterkingsprojecten te evalueren welke faalkanseisen daadwerkelijk nodig zijn om te voldoen aan de overstromingskansnorm voor een bepaald dijktraject. Dit kan stapsgewijs worden gedaan, door te starten met een set faalkanseisen en die bij te stellen als blijkt dat ze tot overmaat leiden.

Voor het combineren van GEBU en GEKB in een doorsnede wordt in de GEBU-GEKB-plugin gebruikgemaakt van de combineroutine ('combin') uit Hydra-Ring. Met deze routine zijn in beginsel ook de faalkansen van alle andere faalmechanismen en alle doorsneden met elkaar te combineren. Een praktische userinterface ontbreekt echt op dit moment, maar is van belang voor de beoordeling en het ontwerp van dijktrajecten. Daarom wordt aanbevolen deze routine beter toegankelijk te maken voor gebruikers. Vanuit het HWBP-onderzoek naar lengte-effecten zal de combin-routine aan de Pythonwrapper voor Hydra-Ring worden toegevoegd.

Opvallend is dat de GEBU-GEKB-plugin (waarin de COM is geïmplementeerd) in het Adviesteam Dijkontwerp is ontwikkeld, dat Hydra-Ring en de belastingmodellering deel uitmaken van BOI (de COM is nog niet in BOI-software geïmplementeerd) en dat vanuit het HWBP (buiten het BOI) de combin-routine voor Hydra-Ring toegankelijker wordt gemaakt. Zoals hierboven betoogd, zijn deze onderdelen echter niet los van elkaar te zien. Idealiter maken zij allemaal deel uit van hetzelfde Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (BOI), waarvan gebruikers mogen aannemen dat de kwaliteit op orde is. Voor goede kwaliteitsborging is meer regie dan ook essentieel.

2) Inhoud van de rekenmodellen

- a) De implementatie van de cumulatieve overbelastingbenadering voor het faalmechanisme GEKB bevat onvolkomenheden

De cumulatieve overbelastingbenadering is ontwikkeld op basis van proeven met de golfoverslagsimulator, waarbij grote snelheden gekoppeld waren aan grote overslaande volumes. Bij de implementatie van de methode was het nodig uit te gaan van berekende snelheden op het buitentalud bij de kruin, waarbij toen de koppeling met het overslaand golfvolume niet kon worden gelegd. Concluderend blijkt uit de casestudy dat de oorzaak van het probleem van het falen bij kleine overslagdebieten vooral ligt in een niet gevalideerde en -achteraf bekeken - niet juiste rekenmethode om snelheden op de kruin te bepalen. Doordat de methode voor het bepalen van de snelheden op de kruin niet gekoppeld is aan het volume van de overslaande golf, worden de snelheden bij de grootste berekende volumes veel te groot. Deze grote snelheden domineren het berekende moment waarop de grasbekleding faalt. Dat falen gebeurt daardoor volgens het huidige rekenmodel bij relatief kleine overslaande golfvolumes, met als resultaat een relatief klein overslagdebiet bij falen. Onderzoek toont aan dat er inmiddels een koppeling mogelijk is tussen het overslaand golfvolume en de snelheid op de kruin en dat de snelheden in werkelijkheid (veel) lager liggen. Het ENW beveelt aan voort te bouwen op de in dit memo voorgestelde werkwijze voor de koppeling.

3) Proces rondom de totstandkoming van de rekenmodellen

- a) De organisatie rondom en het samenwerkingsproces t.a.v. de ontwikkeling van modellen verdienen verbetering

De procedure voor het falen van de grasbekleding door golfoverslag met de COM is, op eigen initiatief door een adviseur van het Adviesteam Dijkontwerp, in een softwaremodule geprogrammeerd. Er heeft echter geen terugkoppeling naar de ontwikkelaars van de methode plaatsgevonden. Er is niet gecontroleerd of uitkomsten van het relatief ingewikkelde model wel leidden tot resultaten die vanuit de onderzoekspraktijk verwacht mochten worden. En dat blijkt niet het geval te zijn. De consequentie hiervan is dat vele dijken mogelijk met een te conservatieve berekening zijn beoordeeld of ontworpen. Het huidige voorbeeld toont aan hoe zaken mis kunnen gaan als de werelden van fysica, statistiek en software gescheiden van elkaar werken en niet in samenhang worden beschouwd.



Het issue zit nadrukkelijk niet in de expertise van individuen, maar juist in het samenwerkingsproces. Individueel is goed werk geleverd, maar het ontbreekt aan samenwerking in de keten. Daarom wordt aanbevolen de samenwerking tussen onderzoekers en ontwikkelaars tijdens de ontwikkeling van (probabilistische) modellen te verbeteren. Daarbij is het van groot belang dat het beschrijven van onzekerheden (probabilistiek) als een integraal onderdeel van de modellering van de fysica wordt gezien, en niet als een 'losse toevoeging achteraf' en dit in de softwareontwikkeling ook zo gekoppeld te benaderen.

Daarnaast is het van belang bij de ontwikkeling van dergelijke modellen een onafhankelijke review uit te voeren, waarbij het formulepark en de implementatie hiervan onafhankelijk wordt getoetst en de software wordt getest op plausibele uitkomsten. Tevens beveelt het ENW aan om testbanken met bekende cases te definiëren en na elke aanpassing of ontwikkeling aan een model de modelberekeningen voor deze cases te herhalen als 'sanity check' (is wat uit het model komt nog logisch?).

Ten slotte mag niet van de gebruikers verwacht worden dat ze alle achtergronden en aannames kennen. Zorg er daarom voor dat de uitgangspunten en aannames van een model duidelijk beschreven staan, met rekenvoorbeelden.

Oorspronkelijk is de casestudy opgestart naar aanleiding van vragen vanuit het ENW over de relatie tussen fysica en statistiek binnen de BOI-modellen, aangezien rekenresultaten – volgend uit een keten aan metingen, modellen en statistiek - ogenschijnlijk geen recht deden aan fysiek waargenomen situaties. De casestudy heeft laten zien dat er in dit geval geen tegenstelling bestaat tussen de fysica en de statistiek, maar dat ze elkaar juist versterken, mits ze op een correcte manier worden toegepast en met een passend proces worden uitgevoerd. Het ENW is van mening dat de hierboven beschreven casestudy ook illustratief kan zijn voor de rekenkundige beoordelingen van andere faalmechanismen. Zij beveelt aan dit met een dergelijke aanpak ook voor andere faalmechanismen uit te zoeken en daarbij aandacht te schenken aan zowel modelmatige als organisatorische aspecten. Dit is noodzakelijk voor het berekenen van geloofwaardige overstromingskansen.

Behandeling adviesvraag en totstandkoming advies

De casestudy is uitgevoerd door een afvaardiging vanuit de ENW-werkgroepen Techniek (Jentsje van der Meer en Mark Klein Breteler) en Veiligheid (Raphaël Steenbergen en Ruben Jongejan). De berekeningen zijn uitgevoerd door Martijn Huis in 't Veld van HKV. De casestudy is begeleid door Patrick Oosterlo (secretaris ENW-Techniek).

Referenties

Hughes, S.A. (2015). *Hydraulic parameters of individual overtopping wave volumes*. Report Colorado State University.