

Faalpaden combineren rekening houdend met afhankelijkheden

Case traject 8-4



Faalpaden combineren rekening houdend met afhankelijkheden
Case traject 8-4

Auteur(s)

A.J. Smale

R. Jongejan




B. van der Kolk

Faalpaden combineren rekening houdend met afhankelijkheden

Case traject 8-4

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	mevrouw drs. A.L.T.C.M. Bizzarri
Referenties	
Trefwoorden	Kennis voor Keringen, faalpaden, overstromingskans, assemblage

Versie	1.0
Datum	06-07-2022
Projectnummer	11206817-005
Document ID	11206817-005-GEO-0001
Pagina's	30
Classificatie	
Status	definitief

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	A.J. Smale  R. Jongejan B. van der Kolk	H. Knoeff 	G. de Vries 	

Samenvatting

In deze studie is nagegaan hoe een overstromingskans is te bepalen rekening houdend met de afhankelijkheden/correlaties tussen doorsnedes en mechanismen. Hiertoe is voor een geselecteerde case een volledig probabilistische analyse opgezet voor de mechanismen GEKB, GEBU en STBI. Deze volledig probabilistische som is uitgevoerd met behulp van reeds beschikbare instrumenten, waardoor een dergelijke analyse ook mogelijk is voor andere trajecten en meerdere faalmechanismen. Opgemerkt wordt dat de proof-of-concept analyse zich beperkt heeft tot de bepalende mechanismen voor het betreffende dijktraject en dat alleen de kans op initiatie van elk faalmechanisme is beschouwd.

Analyse van de resultaten van de volledig probabilistische berekening laat zien dat afhankelijkheden/correlaties tussen doorsnedes en mechanismen van invloed zijn op de berekende overstromingskans. De analyse laat zien dat het voor een nauwkeurige bepaling van de overstromingskans vooral van belang is om rekening te houden met correlaties tussen doorsnedes (per faalmechanisme). Dit geldt in beperkte mate voor het combineren van faalmechanismen.

De resultaten van de studie zijn ook vergeleken met het assemblageprotocol dat op dit moment gebruikt wordt voor het bepalen van de gecombineerde faalkans. De vergelijking heeft laten zien dat het protocol zowel tot een onder- als een overschatting van de faalkans leidt als gevolg van de combinatie van doorsnedes naar trajectniveau. De aanname in het assemblageprotocol van geen correlatie tussen mechanismen lijkt voor dit traject wel een passende vereenvoudiging te zijn.

Aanbevolen wordt om de toegepaste methodiek zodanig te ontsluiten dat beheerders en bureaus hier zelf mee kunnen gaan experimenteren.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Achtergrond	7
1.2	Doelstelling van deze studie	7
2	Aanpak	9
3	Selectie van de case	10
3.1	Interpretatie LBO-1 resultaten en dominante faalpaden	10
3.2	Conclusie en discussie	11
4	Kansinschatting per mechanisme	12
4.1	Algemeen: Hydra-Ring en Z-functies	12
4.2	Keuze vakindeling en doorsnedes	12
4.3	Mechanisme GEKB	14
4.3.1	Modellering falen door GEKB	14
4.3.2	Faalkansberekening GEKB – doorsnedeniveau	14
4.4	Mechanisme GEBU-golfoploop	15
4.4.1	Mechanismebeschrijving GEBU-oploop	15
4.4.2	Faalkansberekening GEBU-oploop - doorsnedeniveau	15
4.5	Mechanisme GEBU-golfklap	16
4.5.1	Mechanismebeschrijving GEBU-golfklap	16
4.5.2	Faalkansberekening GEBU-golfklap - doorsnedeniveau	16
4.6	Mechanisme STBI	17
4.6.1	Mechanismebeschrijving STBI	17
4.6.2	Faalkansberekening STBI - doorsnedeniveau	17
4.7	Samengevat	18
5	Combineren mechanismen/doorsnedes	19
5.1	Aanpak	19
5.2	Opschalen per mechanisme (doorsnede naar vak)	21
5.3	Combineren vakken en mechanismen	23
5.4	Duiding resultaten	23
6	Vergelijking met de assemblage-tool	26
6.1	Combineren van doorsnede naar traject per mechanisme	26
6.2	Combineren van trajectkans per mechanisme	27
7	Conclusies en aanbevelingen	28

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In 2019 is een casus over werken met faalpaden bij de Grebbedijk opgeleverd, Deltares (2020). Hierbij is explorierend onderzocht hoe de faalpaden aanpak kan werken indien deze gebruikt wordt bij het beoordelen van waterkeringen. In 2020 is daarop de conceptuele analyse van het gebruik van de faalpadenmethodiek uitgevoerd om een structuur aan te brengen in definities en aanpak. Hierbij is een gestileerde casus uitgewerkt, Deltares (2020).

Ondanks dat het werken met faalpaden niet nieuw is, zijn er wel vragen bij het werken met faalpaden, zoals: Hoe werkt de aanpak in de praktijk? Welke instrumenten zijn er al beschikbaar om met de faalpaden aanpak te werken? Wat kan er mis gaan in de aanpak? Welke instrumenten en methodes passen niet in het bepalen van overstromingskansen met behulp van faalpaden? Welke instrumenten ontbreken? Bij die laatste vraag hoort ook: welk Programma van Eisen kan gedefinieerd worden voor de (ontbrekende) instrumenten?

Om die reden is binnen Kennis voor keringen 2021 ruimte gecreëerd om een praktijkcasus uit te werken met bestaande kennis en instrumenten. In het eerste deel van 2021 is ook gewerkt aan de invulling van de knopenkaart, zie Deltares (2020). Bij het invullen van de knopenkaart (vooral de afstemming met de omgeving) werd duidelijk dat er verschillende beelden zijn bij het werken met faalpaden als aanscherping van het BOI. Belangrijkste (tussentijdse) conclusie betrof de observatie dat men bij faalpaden drie soorten aanscherpingen ziet: (i) meenemen vervolprocessen, (ii) het meenemen van de samenhang/afhankelijkheden tussen faalpaden en (iii) denken in scenario's voor initiële mechanismen.

Gegeven deze bevinding is het voorstel gedaan om een case uit te werken en daarbij vooral de samenhang tussen de verschillende faalpaden te beschouwen en deze te combineren tot een overstromingskans. In de case wordt dit op een zo nauwkeurig mogelijke wijze gedaan, zonder de benaderingen uit het assemblageprotocol. Bij een beoordeling die zich op de overstromingskans van het dijktraject richt, doen de faalkansbegroting en de lengte-effectfactoren niet ter zake, zoals ook wordt geïllustreerd door de huidige beoordelingspraktijk.

1.2 Doelstelling van deze studie

Gegeven het bovenstaande was het doel voor de case:

- (1) voorbeeld vormen van het aanscherpen van de beoordeling door op het combineren van individuele faalpaden, rekening houdend met de correlaties/afhankelijkheden tussen deze faalpaden en doorsnedes
- (2) waar mogelijk uitbreiden met scenario's ten aanzien van initiërende gebeurtenissen
- (3) waar mogelijk uitbreiden van de individuele faalpaden met vervolprocessen

Uiteindelijk heeft de case zich gericht op aspect (1). De aspecten (2) en (3) zijn namelijk ook afzonderlijk te onderzoeken. Uitbreidingen ten aanzien van (2) en (3) doen ook weinig af aan de voorbeeldfunctie van de case ten aanzien van aspect (1).

Een belangrijk nevendoeel van de case is het betrekken van het waterschap bij de case gedurende de uitwerking als ook het delen van de resultaten en bevindingen aan het eind met het waterschap en andere partijen.

Voor het realiseren van dit doel is het van belang dat zoveel mogelijk gebruik wordt gemaakt van bestaande (en voor waterschappen beschikbare) tools en analysemethoden. Dit draagt bij aan de overdraagbaarheid van de aanpak en voorkomt een onnodige inspanning.

2 Aanpak

Ten behoeve van de uitwerking van de case Faalpaden is de onderstaande aanpak gevolgd. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen (i) de selectie van een relevante case en (ii) de uitwerking van de case.

Selectie van relevante case:

Voor de selectie van de case is gekeken naar de volgende criteria:

1. interesse bij beheerder
2. inschatting dat sprake is van substantiële afhankelijkheden tussen mechanismen en/of doorsnedes
3. een traject dat representatief is qua lengte (niet extreem lang of extreem kort) en veiligheidsissues (van belang dat er meerdere issues spelen)
4. informatie over kering en ondergrond beschikbaar (bijvoorbeeld omdat er al een (gedeeltelijke) beoordeling is uitgevoerd.
5. Indien er al een beoordeling of ontwerp is: ruimte om met andere uitgangspunten te werken en andere resultaten te kunnen publiceren dan de beheerder zelf tot nu toe al heeft gerapporteerd.

Uitwerken case:

Voor de uitwerken van de case zijn de volgende aanpak/stappen doorlopen:

1. beoordelingsrapportage LBO-1 inlezen/interpreteren;
2. relevante faalpaden identificeren;
3. faalkans per (relevant) faalpad bepalen;
4. faalkansen per faalpad en doorsnede combineren met Hydra-Ring tot:
 - faalkansen per faalmechanisme (alle doorsnedes in het dijktraject samen)
 - faalkansen op vakniveau (alle mechanismen en doorsnedes in een vak samen),
 - overstromingskans (alle doorsnedes en alle mechanismen samen);
5. Duiden resultaten en opstellen rapportage met bevindingen, aanbeveling en discussie;
6. Vergelijken resultaten met de assemblage-tool.

3 Selectie van de case

Waterschap Zuiderzeeland is bereid gevonden mee te werken en in overleg met het waterschap is besloten om traject 8-4 als case te gebruiken. Dit traject is het noordoostelijk deel van Flevoland en loopt van Ketelbrug bij Swifterbant in het westen tot aan de Reevedam bij Dronten. Het traject heeft een lengte van ongeveer 20 km (17.5 + 2.5 km nieuwe dijk aan het Drontermeer). In Figuur 3-1 is de ligging van het traject weergegeven.

De dijktrajecten van waterschap Zuiderzeeland liggen grotendeels langs het IJsselmeer, Markermeer, Ketelmeer of Randmeren. Hiervoor geldt dat met name windbelasting een bepalende belasting is en die is voor veel doorsnedes gelijk. Zo ook voor traject 8-4. Daar komt bij dat de dijk in dit traject over een grootte strekking uniform is qua opbouw, oriëntatie en geometrie. Beide aspecten zorgen ervoor dat de ruimtelijke afhankelijkheid van faalpaden binnen traject 8-4 relatief groot zal zijn.

Het traject is recent beoordeeld op basis van het WBI 2017 waardoor veel informatie beschikbaar is gedeeld is. Ook is er ruimte om te onderzoeken wat het hanteren van andere uitgangspunten voor invloed heeft op het beoordelingsresultaat.



Figuur 3-1: Ligging traject 8-4

3.1 Interpretatie LBO-1 resultaten en dominante faalpaden

Door Waterschap Zuiderzeeland is een beoordelingen van traject 8-4 uitgevoerd en het veiligheidsoordeel van dijktraject 8-4 is categorie D. De met het WBI2017-instrumentarium bepaalde overstromingskans van het dijktraject is veel groter dan de signaleringswaarde en de ondergrens, ondanks dat het traject in de periode 2000 – 2005 is versterkt.

De grootste bijdrage aan de overstromingskans wordt geleverd door mechanismen gerelateerd aan steenbekleding (ZST, ZST incl. TBS), specifiek voor locaties waarvoor sprake is van hoge golfbelastingen. De overstromingskans wordt in mindere mate beïnvloed door de mechanismen gras erosie kruin en binnentalud (GEKB) en gras erosie buitentalud (GEBU).

Het waterschap geeft aan dat het resultaat voor de bekledingsmechanismen is te wijten aan de gehanteerde ontwerpbelastingen ten tijde van de versterking. Die waren lager dan waar in de beoordeling mee gerekend is, omdat de voor het ontwerp gehanteerde norm lager is dan de nu geldende norm volgens de overstromingskansbenadering.

De overstromingskans op trajectniveau is het resultaat van het combineren van overstromingskansen als gevolg van individuele mechanismen/vakken. Alleen de gecombineerde overstromingskans kan feitelijk vergeleken worden met de norm (signaleringswaarde en/of ondergrens). Het combineren is in de wettelijke beoordeling gedaan met de assemblagetool. In deze tool wordt gebruik gemaakt van benaderingen. Zo wordt in de assemblagetool verondersteld dat alle faalmechanismen onafhankelijk van elkaar zijn. Ook wordt gewerkt met veronderstellingen ten aanzien van het lengte-effect binnen vakken. Deze zijn binnen het traject 8-4 relatief groot zodat eventuele afwijkingen relatief zwaar kunnen doorwerken.

3.2 Conclusie en discussie

Het waterschap heeft het traject beoordeeld met als resultaat dat de bekledingsmechanismen (GEKB, ZST, AGK, AWO, GEBU) in combinatie met macro-stabiliteit binnenwaarts (STBI) de grootste bijdragen leveren aan de bepaalde overstromingskans.

Tussen de bekledingsmechanismen zijn -vanwege de uniforme geometrie en oriëntatie- relatief grote afhankelijkheden te verwachten. Door deze mechanismen probabilistisch te beschouwen en hun onderlinge en ruimtelijke afhankelijkheden in rekening te brengen kan mogelijk een verscherping in het beoordelingsresultaat worden verkregen.

4 Kansinschatting per mechanisme

4.1 Algemeen: Hydra-Ring en Z-functies

Voor het combineren van individuele faalpaden is gebruikt gemaakt van het in het kader van WBI2017 ontwikkelde probabilistische model Hydra-Ring, zie Deltares (2021a). Hydra-Ring is het rekenhart van de beoordelingssoftware Riskeer en bepaalt de kans dat de sterkte kleiner is dan de belasting. Dit doet het programma per faalmechanisme op basis van een zogenaamde grenstoestandfunctie voor het betreffende mechanisme, ook wel “Z-functie” genoemd. De “Z-functie” is niets anders dan een indicatorfunctie die een negatieve waarde aanneemt als de belasting groter is dan de sterkte, zodat de kering faalt. Veelal is de Z-functie gedefinieerd als de sterkte minus de belasting¹, waarbij een waarde van “0.0” precies het grensvlak van falen beschrijft. Dit is een gangbare wijze om de belastingen en de sterkte met elkaar te vergelijken.

In principe wordt de “Z-functie” geëvalueerd per doorsnede (vrijwel alle faalmechanismemodellen zijn 2D-modellen), waarbij de doorsnede een lengte wordt toegedicht overeenkomstig de schaal van het betreffende faalmechanisme. Voor een afschuiving behorende bij STBI betekent dit bijvoorbeeld de typische afmeting van een glijvlak in langrichting van de dijk van 30 tot 50 meter.

In dit hoofdstuk worden de gehanteerde Z-functies voor de mechanismen GEKB, GEBU en STBI nader toegelicht en worden de berekende faalkansen per mechanisme per doorsnede gepresenteerd. Voorafgaand aan de toelichting op de bepaling van de faalkans per doorsnede wordt de in deze studie gehanteerde vakindeling toegelicht.

4.2 Keuze vakindeling en doorsnedes

Een vak is idealiter een dijkstrekking dat (voor het betreffende faalmechanisme) statistisch homogeen is. Dit betekent dat elke doorsnede idealiter op dezelfde wijze geschematiseerd zou worden en dus ook dezelfde betrouwbaarheid bezit. Dit betekent ook dat er per dijkvak slechts één profiel hoeft te worden doorgerekend.

In realiteit zijn dijkstrekkingen zelden over grote lengtes statistisch homogeen. Er moet dan een keuze worden gemaakt tussen het hanteren van een groter aantal, kleinere (statistisch homogene) vakken of het hanteren van grotere vakken die slechts bij benadering statistisch homogeen zijn. In het laatste geval is de rekeninspanning kleiner (er worden minder profielen doorgerekend) maar ontstaat een benaderingsfout indien de parameters die voor delen van het traject te conservatief zijn (sterk) bijdragen aan de overstromingskans. Bij de vertaling van de faalkans van de doorgerekende doorsnede naar de faalkans van het vak wordt immers de veronderstelling gedaan dat elke profiel identiek is. De benaderingsfout blijft het kleinst als het doorgerekende profiel een min of meer ‘gemiddeld profiel’ is. Als wordt uitgegaan van het slechtste profiel wordt een overschatting van de faalkans van het vak verkregen, omdat dan feitelijk wordt verondersteld dat elk profiel in het dijkvak zo zwak is als het zwakste profiel.

In de case zijn vijf vakken gedefinieerd, welke voor alle beschouwde mechanismen hetzelfde zijn. In werkelijkheid is dit wellicht niet optimaal (d.w.z. niet goed passend bij de

¹ Een ander voorbeeld is: $Z = \text{Sterkte} / \text{Belasting} - 1$.

eigenschappen van de waterkering), maar ten behoeve van het doel van deze studie volstaat de gehanteerde indeling. De vakindeling is weergegeven in Figuur 4-1. Er is voor gekozen om per vak uit te gaan van de minst betrouwbare doorsnede. Deze doorsneden zijn weergegeven in tabel 6-1. Het omzetten van een semi-probabilistische stabiliteitsanalyse naar een probabilistische analyse is bewerkelijk en om die reden zijn vakken niet gesplitst in kleinere, meer homogene vakken. Dan zouden er namelijk aanvullende profielen beschouwd moeten worden.

Voor de bepaling van de overstromingskans van STBI wordt met verschillende ondergrondscenario's gerekend. Er is in de case per profiel één ondergrondscenario gehanteerd, het gekozen scenario is opgenomen in de naam van het rekenbestand.

Dwarsprofiel	Rekenbestand
1.1	1.1_basis_maatgevend_8040_1D3b_HKV.stix
7.6	7.6_basis_maatgevend_8037_1D1_HKV.stix
9.7	9.7_basis_maatgevend_8036_1D1b_HKV.stix
10.5	10.5_basis_maatgevend_8036_1D1b_HKV.stix
14	14_basis_maatgevend_8036_1D1b_HKV.stix

Tabel 4-1 Geselecteerde dwarsprofielen.

In het kader van deze studie is voor de mechanismen GEKB en GEBU gemakshalve dezelfde doorsnede gehanteerd als zijnde representatief voor het vak. Bij een daadwerkelijke overstromingskansanalyse hoeft dit natuurlijk niet het geval te zijn, maar ten behoeve van deze case is aangenomen dat het hanteren van de betreffende profielen een goede benadering is. Gelet op de uniformiteit van de dijk lijkt deze aanname hier overigens redelijk.



Figuur 4-1: Gehanteerde vakindeling voor deze verkennende case

4.3 Mechanisme GEKB

4.3.1 Modelling falen door GEKB

In het WBI2017 wordt voor het mechanisme GEKB gebruik gemaakt van een benadering van de cumulatieve overbelasting methode. In de WBI2017-benadering wordt gebruik gemaakt van kansverdelingen van kritieke overslagdebieten om de sterkte van de grasmat te beschrijven. Bij het opstellen van deze kansverdelingen -op basis van berekeningen met de cumulatieve overbelastingmethode- zijn een aantal conservatieve aannames gedaan, waaronder de aanname met betrekking tot de taludhelling van het buitentalud (uniform, geen berm).

In het kader van deze studie wordt direct gebruik gemaakt van de cumulatieve overbelasting methode voor GEKB, dus zonder de benadering. Dit betekent dat de sterkte van de grasmat beschreven wordt door een kritieke stroomsnelheid (U_c) en een kritieke cumulatieve belasting (D_{crit}). Voordeel van deze aanpak is dat de aanwezigheid van een berm expliciet meegenomen kan worden, omdat de golfoploophoogte (welke onderdeel is van de cumulatieve overbelasting methode) met inbegrip van de aanwezigheid van een berm bepaald kan worden. Voor een andere toelichting van de cumulatieve overbelasting methode voor GEKB en de implementatie ervan wordt verwezen naar Deltares (2021b).

Het gebruik van deze mechanisme beschrijving betekent dat de gevonden kans voor het mechanisme GEKB kan afwijken van de LBO-1 resultaten. Ondanks de afwijking van de LBO-1 aanpak is gebruik gemaakt van deze beschrijving omdat deze onderdeel is van het pakket waarmee GEBU volledig probabilistisch kan worden meegenomen. Het volledig probabilistisch meenemen van GEBU maakt het mogelijk om een de afhankelijkheden en correlaties expliciet in rekening te brengen. Om deze reden wordt de aangepaste aanpak voor GEKB gehanteerd.

Een bijkomend voordeel is dat het gebruik van de cumulatieve overbelastingmethode een nauwkeurigere inschatting van de faalkans voor GEKB oplevert dan het gebruik van de WBI2017-benaderingsmethode met kritieke overslagdebieten.

4.3.2 Faalkansberekening GEKB – doorsnedeniveau

Voor het mechanisme GEKB is de faalkans op doorsnedeniveau bepaald door het profiel zoals gehanteerd in de LBO-1 van de beschouwde doorsnede over te nemen. Voor de sterktebepaling is in de LBO-1 uitgegaan van een “open zode”, wat in deze studie is overgenomen. Vanwege het gebruik van de cumulatieve overbelasting benadering is geen gebruik gemaakt van de kansverdelingen van kritieke overslagdebieten behorende bij “open zode”, maar is de bijbehorende kritieke stroomsnelheid gehanteerd.

De cumulatieve overbelasting methode maakt het mogelijk om de te analyseren locatie in de doorsnede te specificeren (kruin of binnenteen) en om aan te geven of sprake is van overgangen. Ten behoeve van deze studie is gekozen voor de binnenteen (zwaarste belasting van de grasmat vanwege versnelling van het overslaande water op het binnentalud) en een geometrische overgang. Vanwege het feit dat de cumulatieve overbelasting methode tijdsafhankelijk rekent (en niet enkel naar de piekbelasting kijkt) dient ook een tijdsverloop van de belastingen gedefinieerd te worden. Ten behoeve van deze studie is een tijdsverloop van windopzet en golven gekozen dat een trapeziumvorm heeft met een basisduur van 48 uur en een piekduur van 4 uur.

De resulterende faalkansen op doorsnedeniveau, per vak, is getoond in Tabel 4-2. Te zien is dat de grootste faalkansen gevonden worden voor doorsneden behorende bij vak 7.6 en 14. Dit betreft een faalkans van orde 1/1000 jaar.

We herhalen hier voor de volledigheid dat de gevonden kansen afwijken van de resultaten van LBO-1 omdat hier een ander faalmechanismemodel (oftewel: een andere grenstoestandfunctie) is gehanteerd.

Dwarsprofiel	Faalkans [1/jaar]
1.1	4.79E-05
7.6	1.04E-03
9.7	3.22E-04
10.5	2.22E-04
14	1.02E-03

Tabel 4-2: Berekende faalkans op doorsnedeniveau per doorgerekend dwarsprofiel

4.4 Mechanisme GEBU-golfoploop

4.4.1 Mechanismebescrijving GEBU-oploop

In het WBI2017 is voor het mechanisme GEBU-golfoploop (onderdeel van GEBU) een semi-probabilistische aanpak beschikbaar. Een dergelijke aanpak leent zich niet voor probabilistische analyses. In het kader van het HWBP-project Dijkversterking traject 8-3 is echter een volledig probabilistisch model ontwikkeld voor dit mechanisme, zie Deltares (2021b).

Dit probabilistisch model gaat uit van dezelfde beschrijving van de grenstoestandfunctie ("Z-functie") als dat in de Basis Module gras wordt gehanteerd.

Normaliter wordt deze "Z-functie" gebruikt in combinatie met een synthetische storm welke bestaat uit statistiek van piekwaarden van stormgebeurtenissen. De piekwaarden worden met behulp van het probabilistische model van Hydra-Ring afgeleid. Door het introduceren van een tijdsverloop van de belastingen in het belastingmodel kan gegeven de piekwaarden een volledig probabilistische som gemaakt worden en wordt de tussenstap, welke tot het semi-probabilistische format leidde, overgeslagen. Een belangrijke aanname welke daarmee komt te vervallen is dat voor het bepalen van de golfcondities gedurende de hele storm de piekwindsnelheid wordt gehanteerd.

Met dit probabilistisch model voor GEBU-oploop kan met behulp van de Hydra-Ring de samenhang/correlatie met andere mechanismen (bijvoorbeeld met GEKB) meegenomen worden. Het gebruik van dit model, dat geavanceerder is dan het WBI2017-model, betekent echter ook dat de resultaten met betrekking tot GEBU-oploop kunnen afwijken van de resultaten van de LBO-1.

4.4.2 Faalkansberekening GEBU-oploop - doorsnedeniveau

Voor het mechanisme GEBU-oploop is de faalkans op doorsnedeniveau bepaald door het profiel zoals gehanteerd in de LBO-1 van de beschouwde doorsnede over te nemen. Voor de sterktebepaling is in de LBO-1 voor delen uitgegaan van een "open zode" en voor delen is uitgegaan van "gesloten zode". Ten behoeve van deze studie wordt in lijn met GEKB voor alle doorsnedes "open zode" gehanteerd.

In deze studie is voor GEBU-oploop een tijdsverloop van windopzet en golven gekozen dat een trapeziumvorm heeft met een basisduur van 48 uur en een piekduur van 4 uur, net zoals bij GEKB.

De resulterende faalkans op doorsnedeniveau, per vak, is getoond in Tabel 4-3. Te zien is dat de grootste faalkansen gevonden wordt voor doorsnede behorende bij vak 9.7. Dit betreft een faalkans van orde 1/50 per jaar. Dit wijkt af van het oordeel uit de LBO-1 vanwege de in deze studie gehanteerde “open zode” voor alle dijkprofielen, maar ook vanwege de hier gehanteerde probabilistische aanpak van het mechanisme.

Dwarsprofiel	Faalkans [1/jaar]
1.1	7.25E-06
7.6	5.04E-03
9.7	1.98E-02
10.5	1.25E-02
14	1.50E-02

Tabel 4-3: GEBU-oploop, berekende faalkans op doorsnedeniveau per vak

4.5 Mechanisme GEBU-golfklap

4.5.1 Mechanismebeschrijving GEBU-golfklap

Ook voor het mechanisme GEBU-golfklap geldt, net als voor GEBU-oploop, dat in het WBI2017 een semi-probabilistische beoordeling is opgenomen. Net als voor GEBU-oploop is in het kader van het HWBP project dijkversterking traject 8-3 een volledig probabilistische aanpak ontwikkeld. Hierbij is dezelfde werkwijze gevolgd als voor GEBU-oploop: de “Z-functie” uit de Basis Module Gras is ongewijzigd overgenomen en er is een tijdsverloop van de belastingen toegevoegd. Net als voor GEBU-oploop komt hiermee een belangrijke aanname te vervallen: het hanteren van de piekwindsnelheid voor het bepalen van de golfcondities gedurende de hele storm.

Met dit probabilistisch model voor GEBU-golfklap kan met behulp van de Hydra-Ring de samenhang/correlaties met andere mechanismen (bijvoorbeeld met GEKB) meegenomen worden. Dit betekent echter ook dat de resultaten met betrekking tot GEBU-golfklap kunnen afwijken van de resultaten van de LBO-1.

4.5.2 Faalkansberekening GEBU-golfklap - doorsnedeniveau

Voor het mechanisme GEBU-golfklap is de faalkans op doorsnedeniveau bepaald door het profiel zoals gehanteerd in de LBO-1 van de beschouwde doorsnede over te nemen. Voor de sterktebepaling is in de LBO-1 voor delen uitgegaan van een “open zode” en voor delen is uitgegaan van “gesloten zode”. Ten behoeve van deze studie wordt in lijn met GEKB voor alle doorsnedes “open zode” gehanteerd.

Ten behoeve van deze studie wordt een tijdsverloop van windopzet en golven gekozen dat een trapeziumvorm heeft met een basisduur van 48 uur en een piekduur van 4 uur, zoals ook bij de andere bekledingsmechanismen is gedaan.

De resulterende faalkans op doorsnedeniveau, per vak, is getoond in Tabel 4-4. Te zien is dat de grootste faalkansen gevonden wordt voor doorsnede behorende bij vak 9.7. Dit betreft een faalkans van orde 1/5000 jaar. Dit wijkt af van de in de LBO-1 gerapporteerde kansen vanwege enerzijds de gekozen “open zode” en anderzijds de probabilistische beschrijving van het mechanisme.

Dwarsprofiel		Faalkans [1/jaar]
1.1		3.01E-05
7.6		4.67E-06
9.7		2.20E-04
10.5		1.03E-04
14		1.12E-04

Tabel 4-4: GEBU-golfklap, berekende faalkans op doorsnedeniveau per vak

4.6 Mechanisme STBI

4.6.1 Mechanismebeschrijving STBI

Sinds D-Stability versie 2021.02 is het mogelijk probabilistische stabiliteitsanalyses uit te voeren en Fragility curves (kans op falen gegeven waterstand en overslagdebiet) te maken. In D-Stability wordt voor verschillende waterstanden een probabilistische analyse uitgevoerd met de sterkte en state (POP) parameters als stochastische variabelen. Het resultaat is een Fragility curve (conditionele faalkans bij verschillende waterstanden en overslagdebieten). In deze curve zijn bestaande uit betrouwbaarheidsindices, β 's, uitgezet tegen de waterstand (voor een reeks gegeven overslagdebieten). Daarbij worden ook de invloedscoëfficiënten (α^2) van de verschillende parameters gegeven.

Recent is een koppeling gemaakt tussen Hydra-Ring en D-Stability [Deltares 2021c], waarbij Hydra-Ring de door D-Stability gegenereerde fragility curves gebruikt in een volledig probabilistische berekening. De Fragility curve wordt door Hydra-Ring gebruikt om voor elke mogelijke combinatie van de waterstand en het overslagdebiet een β te inter- of extrapoleren zodat de kans op instabiliteit gegeven een waterstand en/ of gegeven een overslag debiet wordt bepaald. Het gebruik van de koppeling tussen Hydra-Ring en D-Stability betekent dat de berekende faalkansen kunnen afwijken van de resultaten van de LBO-1.

4.6.2 Faalkansberekening STBI - doorsnedeniveau

Voor de geselecteerde profielen zoals getoond in Tabel 4-1 is de faalkans op doorsnedeniveau bepaald. Hiervoor zijn de semi-probabilistische D-Stability rekenbestanden uit de LBO-1 overgenomen en geschikt gemaakt voor een probabilistische analyse. In D-Stability is een probabilistische analyse met FORM (=First Order Reliability Method) worden uitgevoerd, waarbij de sterkte parameters, de state (POP) en de modelfactor, als stochast zijn gehanteerd. De gehanteerde sterkte eigenschappen zijn verkregen uit de LBO-1 rapportage, aangevuld met de waarden voor de standaardafwijking uit de schematiseringshandleiding macrostabiliteit [RWS 2019].

Om de voor Hydra-Ring benodigde Fragility curves te maken zijn verschillende buitenwaterstanden beschouwd. Steeds is de schematisatie van de freatische lijn en het stijghoogteverloop aangepast aan de betreffende waterstand. Hiervoor is een vergelijkbare schematisatie als bij WBN (semi-probabilistische beoordelingen) gehanteerd, waarbij om pragmatische redenen voor elke 1 meter lagere waterstand een verlaging van orde 20 cm op de schematisatie van de freatische lijn en de stijghoogtes is toegepast. Van alle profielen zijn met D-Stability Fragility curves gegenereerd met zowel een curve voor een situatie zonder als met overslag. Hydra-Ring gebruikt deze curves (conditionele faalkansen gegeven waterstand en overslagdebiet) om de gecombineerde faalkans te bepalen, hierbij wordt lineair geïnterpoleerd tussen waterstanden en overslagdebieten (Deltares, 2021c).

De verkregen fragility curves zijn door Hydra-Ring gebruikt om te komen tot een faalkans per doorsnede. De resulterende faalkansen zijn in Tabel 4-5 weergegeven.

Dwarsprofiel		Faalkans [1/jaar]
1.1		5.89E-10
7.6		1.57E-06
9.7		1.08E-06
10.5		6.19E-04
14		2.59E-05

Tabel 4-5: STBI, berekende faalkans op doorsnedeniveau per vak

4.7 Samengevat

Met behulp van Hydra-Ring zijn voor vier mechanismen volledig probabilistische analyses uitgevoerd voor vijf doorsnedes. Hierbij is gebruik gemaakt van de meest recente instrumenten (welke alle publiekelijk verkrijgbaar zijn). Voor het mechanisme GEKB geldt dat in tegenstelling tot de LBO-1 niet gerekend is met de benadering via kansverdelingen van kritieke overslagdebieten maar direct met de cumulatieve overbelasting methode. Voor GEBU (oploop en golfklapzone) is gebruik gemaakt van een volledig probabilistische aanpak met dezelfde sterkte-beschrijving als opgenomen in de BM-Gras. Tot slot is voor STBI gebruik gemaakt van een volledig probabilistische aanpak gebaseerd op fragility-curves.

De resulterende faalkansen op doorsnedeniveau zijn gepresenteerd in Tabel 4-6. Vanwege de keuze voor representatieve profielen en generieke keuzes met betrekking tot de sterktebeschrijvingen wijken de faalkansen af van de faalkansen gepresenteerd in de LBO-1 rapportage. De resultaten van de LBO-1 wijken dan ook af van resultaten van deze studie. Dit is niet problematisch omdat het in deze studie vooral over samenhang/afhankelijkheden tussen mechanismen en doorsnedes gaat. In de hiernavolgende hoofdstukken worden de resultaten uit dit hoofdstuk gebruikt voor nader analyses van samenhang/correlaties.

Wel is het goed om te benadrukken dat dit de faalkansen op doorsnedeniveau zijn. De faalkans van een vak (oftewel: de kans dat ergens in een vak een profiel faalt) kan hier substantieel van afwijken. In de hiernavolgende hoofdstukken worden de afhankelijkheden tussen mechanismen en doorsnedes in rekening gebracht.

Dwarsprofiel		GEKB	GEBU-oploop	GEBU-golfklap	STBI
1.1		4.79E-05	7.25E-06	3.01E-05	5.89E-10
7.6		1.04E-03	5.04E-03	4.67E-06	1.57E-06
9.7		3.22E-04	1.98E-02	2.20E-04	1.08E-06
10.5		2.22E-04	1.25E-02	1.03E-04	6.19E-04
14		1.02E-03	1.50E-02	1.12E-04	2.59E-05

Tabel 4-6: Samengevat, berekende faalkans op doorsnedeniveau per vak per mechanisme

5 Combineren mechanismen/doorsnedes

5.1 Aanpak

Het bepalen van de faalkans per doorsnede per mechanisme is beschreven in het voorgaande hoofdstuk en wordt typisch ook al toegepast voor verschillende mechanismen bij een reguliere overstromingskansanalyse. Het vertalen van deze kansen naar een kans gecombineerd over doorsnedes en mechanismen is minder vanzelfsprekend omdat hier afhankelijkheden/correlaties een rol spelen.

De gecombineerde faalkans op trajectniveau ligt ergens tussen de volgende twee uitersten:

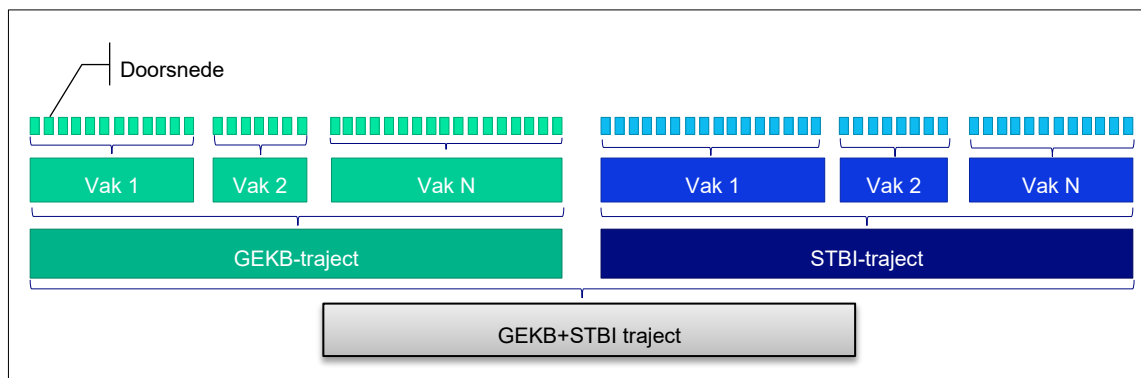
- Volledig gecorreleerde doorsnedes en mechanismen: kans op trajectniveau is de grootste faalkans van individuele doorsnedes en mechanismen
- Volledig ongecorreleerde doorsnedes en mechanismen: kans op trajectniveau is vrijwel gelijk aan de som van alle kansen van individuele doorsnedes en mechanismen

Als deze uitersten ver uiteen liggen, wat snel zo zal zijn bij een groot aantal doorsnedes, wordt het van belang om afhankelijkheden nader te bepalen en in rekening te brengen.

In voorkomende gevallen zal er altijd sprake zijn van enige correlatie omdat de buitenwaterstand bij praktisch alle faalmechanismen een relevante variabele is. De correlatie is echter zelden perfect door variaties in geometrie, oriëntatie en de relevante belasting- en sterkte-eigenschappen. (verschillende dijk oriëntaties). Dat betekent dat de gecombineerde faalkans ergens tussen de elementaire ondergrens (volledig gecorreleerd) en de elementaire bovengrens (volledig ongecorreleerd) in zal liggen.

Als de faalkansen per faalmechanisme op doorsnedeniveau eenmaal zijn vertaald naar faalkansen per faalmechanisme op vakniveau, dan kan de relevantie van het meenemen van de afhankelijkheden tussen mechanismen en vakken worden ingeschat door het verschil in de faalkans onder aanname van volledige correlatie ($P_{\text{traject}} = \text{Max}\{P_{\text{vak 1, mech 1}}, P_{\text{vak2, mech 1}}, \dots, P_{\text{vak N, mech M}}\}$) en de faalkans van volledig ongecorreleerd ($P_{\text{traject}} \approx \text{Som}\{P_{\text{vak 1, mech 1}}, P_{\text{vak2, mech 1}}, \dots, P_{\text{vak N, mech M}}\}$). Indien het verschil tussen deze waarden klein is of indien beide waarden tot eenzelfde oordeel leiden dan heeft het uitwerken van deze aanscherping (meenemen afhankelijkheden) een beperkte toegevoegde waarde).

Met Hydra-Ring is het mogelijk om op basis van probabilistische sommen van individuele doorsnedes en mechanismen de gecombineerde faalkans te bepalen. Hiervoor zijn de individuele probabilistische analyses benodigd omdat deze de informatie bevatten aangaande de bepalende stochastische variabelen die benodigd is om de correlatie met andere doorsnedes en/of mechanismen te bepalen. Vervolgens worden de volgende stappen doorlopen: (i) van doorsnede per mechanisme naar vak per mechanisme en (ii) van vak per mechanisme naar traject voor alle mechanismen. Figuur 5-1 toont dit in een schematische weergave.

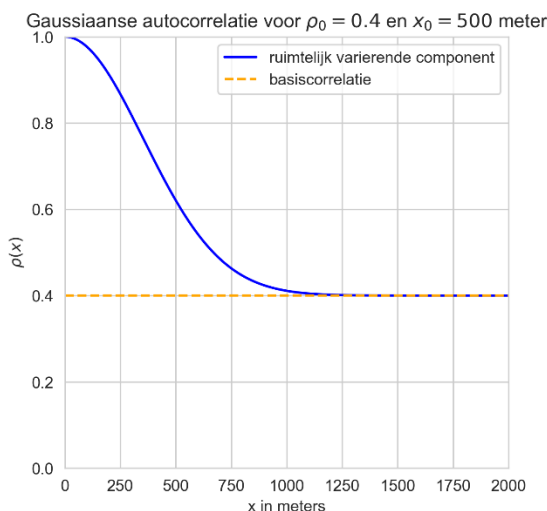


Figuur 5-1: schematische weergaven opschalen van doorsnede naar vak naar traject

Stap 1: Per mechanisme van doorsnede naar vak

De berekende faalkans per doorsnede (met afmeting gelijk aan typische afmeting van het faalmechanisme) per mechanisme wordt per mechanisme opgeschaald naar een vak. De ruimtelijke variabiliteit ten aanzien van de stochastische variabelen wordt beschreven met een auto-correlatiefunctie. Deze auto-correlatiefunctie geeft aan hoe traag of snel de werkelijke (maar ons onbekende en dus onzekere) waarde van een stochastische variabele fluctueert. De hydraulische belasting is binnen statistisch homogene vakken zeer sterk ruimtelijk gecorreleerd. Sommige sterkte-eigenschappen kunnen echter over korte afstanden variëren.

Voor elke stochastische variabele is een auto-correlatiefunctie gespecificeerd. De auto-correlatie wordt per variabele beschreven met de correlatielengte (x_0) en het niet-ergodische deel van de correlatie (ρ_0), ook wel basiscorrelatie genoemd. Deze auto-correlatiefuncties beschrijven hoe snel de waarde van een grenstoestandfunctie binnen een dijkvak fluctueert (of: hoeveel een meting iets zegt over de waarde op toenemende afstand). Hoe sneller de fluctuaties, des te groter de kans dat de grenstoestandfunctie ergens een waarde aantikt die kleiner is dan nul (=falen). Aldus vertaalt/verschaalt Hydra-Ring de faalkans voor een willekeurige doorsnede in een vak tot de faalkans van het complete vak. Voor meer details aangaande deze opschaling wordt verwezen naar sectie A.4.1 in Deltares (2021d).



Figuur 5-2: Voorbeeld van een Gaussische auto-correlatiefunctie, overgenomen uit Deltares (2021e)

Stap 2: combineren van vakken en mechanismen

De tweede stap bestaat uit het combineren van vakken en mechanismen. Dit kan enerzijds door (i) eerst de vakken per mechanisme te combineren en vervolgens de mechanismen te combineren of (ii) omgekeerd. Veelal zal volgorde (i) de beste schatting geven van de gecombineerde kans vanwege de relatief grote correlaties tussen de vakken per faalmechanisme.

Bij het combineren van de vakken en mechanismen wordt gebruik gemaakt van de methode van Hohenbichler, zie Deltares (2021d). Hierbij wordt voor de correlatie van de belasting en sterktevariabelen uitgegaan van de niet-ergodische correlatie (basiscorrelatie). Deze aanpak veronderstelt dat vakken zodanig groot zijn dat de auto-correlatiefunctie van de grenstoestandfunctie (= de 'gewogen optelsom van de auto-correlatiefuncties van de individuele stochastische variabelen) bij benadering daalt tot de basiscorrelatie binnen de vaklengte. Bij hele korte vakken wordt de correlatie tussen vakken dus wat onderschat.

5.2 Opschalen per mechanisme (doorsnede naar vak)

De eerste stap bij het combineren betreft het combineren van doorsnedes tot een vak (ofwel: opschalen van doorsnede naar vak), per mechanisme. Voor deze opschaling zijn de correlatielengte (x_0) en het niet-ergodische deel van de auto-correlatiefunctie (ρ_0) van belang. Tabel 5-1 toont de gehanteerde waarden per sterkte stochastische variabelen, welke overeenkomstig de WBI instellingen zijn. Voor de overige sterkte variabelen is een deterministische waarde gehanteerd en is er dus geen sprake van autocorrelatie (een deterministische variabele fluctueert niet op onvoorspelbare wijze).

Mechanisme	Stochast	ρ_0 [-]	x_0 [m]
GEKB	D_{crit}	1.0	300
	U_{crit}	1.0	300
GEBU-oploop	-	-	-
GEBU-golfklap	-	-	-
STBI	Factor f_b	1.0	300
	Factor f_n	1.0	300
	Model factor 2% wave runup	1.0	300
	Exponent of the model factor $f_{shallow}$	1.0	300
	Cohesion (U-variable)	0.0	50
	Frictional angle (U-variable)	0.0	50
	Dilatancy angle (U-variable)	0.0	50
	Shear strength ratio (U-variable)	0.0	50
	Strength increase exponent (U-variable)	0.0	50
	POP (U-variable)	0.0	50
Model factor (U-variable)	0.0	vaklengte	
SU table multiplier (U-variable)	0.0	50	

Tabel 5-1: gehanteerde niet-ergodische correlatie (ρ_0) en correlatielengte (x_0)

Uit Tabel 5-1 valt op te maken dat de sterktevariabelen welke gerelateerd zijn aan GEKB beide een basiscorrelatie hebben van 1.0, wat betekent dat verondersteld wordt dat al deze sterkte-eigenschappen binnen het vak ruimtelijk volledig gecorreleerd zijn (niet variëren).

Dit betekent dat de autocorrelatie, zoals bijvoorbeeld geplot in Figuur 5-2, een constante lijn is met een waarde van 1. Omdat de hydraulische belastingen binnen het vak ook als volledig gecorreleerd worden verondersteld, betekent dit dat alle doorsnedes perfect gecorreleerd worden verondersteld: als ze falen, dan falen ze allemaal tegelijkertijd. Als gevolg hiervan zijn de kansen doorsnedeniveau voor GEKB gelijk aan de kansen op vakniveau voor GEKB, zie Tabel 5-2.

Voor de mechanismen GEBU-oploop en GEBU-golfklap geldt dat er geen stochastische variabelen deel uitmaken van de faalmechanismemodellen dan de hydraulische belastingen. Omdat ook hier de hydraulische belastingen binnen het vak volledig gecorreleerd worden verondersteld, wordt ook hier gevonden dat de kansen op doorsnedeniveau gelijk zijn aan de kansen op vakniveau, zie Tabel 5-2.

Voor het mechanisme STBI geldt dat de basiscorrelatie voor diverse variabelen gelijk is aan 0.0 (geen correlatie), met een correlatielengte van 50 meter. Dit betekent dat de waarden van deze variabelen binnen een dijkvak relatief snel kunnen fluctueren. Als deze variabelen relatief belangrijk zijn voor de berekende faalkans van een doorsneden, dan neemt de kans dus sterk toe dat een willekeurige doorsnede in het vak faalt als een vak groter is.

Stel dat de ruimtelijke variaties voor STBI zodanig zijn dat elke 50m grofweg als onafhankelijk beschouwd kan worden, dan bevat een vak met een lengte van orde 1000 meter 20 onafhankelijke strekkingen. In Monte Carlo termen: de kans dat voor 1 van de doorsnedes een ongunstige waarde wordt getrokken is dan orde 20 keer groter dan de kans dat precies die ene doorsnede een ongunstige waarde trekt. Als gevolg hiervan is de faalkans op vakniveau voor STBI dan een orde factor 20 keer groter dan de kans op doorsnedeniveau.

Het bovenstaande is duidelijk zichtbaar in de resultaten van de casestudie voor STBI. De faalkansen op vakniveau zijn steeds fors groter dan de faalkansen op doorsnedeniveau. Uitzondering hierop is vak 1.1, daar is het verschil tussen doorsnede en vakniveau 'slechts' een factor 5. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat STBI daar overslag-gedomineerd is en dat de onzekerheid in de sterktevariabelen nauwelijks van belang is. Dit betekent dat de ruimtelijk zwak gecorreleerde stochastische variabelen nauwelijks bijdragen aan de ruimtelijke variabiliteit van de grenstoestandfunctie voor STBI (het verschil tussen sterkte en belasting). Oftewel: als er een afschuiving optreedt in vak 1.1 dan gebeurt dat waarschijnlijk tijdens een situatie met veel overslag over een relatief grote lengte.

Vak	GEKB	GEBU-oploop	GEBU-golfklap	STBI
1.1	4.79E-05 (4.79E-05)	7.25E-06 (7.25E-06)	3.01E-05 (3.01E-05)	3.14E-09 (5.89E-10)
7.6	1.04E-03 (1.04E-03)	5.04E-03 (5.04E-03)	4.67E-06 (4.67E-06)	1.31E-04 (1.57E-06)
9.7	3.22E-04 (3.22E-04)	1.98E-02 (1.98E-02)	2.20E-04 (2.20E-04)	5.27E-05 (1.08E-06)
10.5	2.22E-04 (2.22E-04)	1.25E-02 (1.25E-02)	1.03E-04 (1.03E-04)	1.75E-02 (6.19E-04)
14	1.02E-03 (1.02E-03)	1.50E-02 (1.50E-02)	1.12E-04 (1.12E-04)	1.28E-03 (2.59E-05)

Tabel 5-2: Berekende faalkans op vakniveau per vak per mechanisme, met tussen haakjes de kans op doorsnedeniveau

De resultaten in tabel 7-2 zijn verkregen door Hydra-Ring te voeden met een invoerbestand met daarin de uitkomsten van de probabilistische berekeningen die per profiel zijn uitgevoerd.

Alle overige berekeningen zijn door Hydra-Ring volautomatisch uitgevoerd, uitgaande van de correlatieparameters uit tabel 7-1.

5.3 Combineren vakken en mechanismen

Na het opschalen van de resultaten van doorsnede- naar vakniveau kunnen de vakken en mechanismen gecombineerd worden. Voor de ruimtelijke correlatie van de stochastische variabelen tussen de vakken wordt gebruik gemaakt van de basiscorrelatie (ρ_0).

Door Hydra-Ring is de gecombineerde faalkans per mechanisme voor het gehele traject bepaald (onderste rij van Tabel 5-3), als ook de gecombineerde faalkans per vak (laatste kolom van Tabel 5-3). Tot slot zijn deze twee gecombineerd tot de overall faalkans voor dit traject (rode waarde rechts onderin Tabel 5-3). Deze combinatieberekeningen zijn door Hydra-Ring volautomatisch uitgevoerd, uitgaande van het invoerbestand dat ook bij de vorige stap is gebruikt.

Vak		GEKB	GEBU-oploop	GEBU-golfklap	STBI	gecombineerd
1.1		4.79E-05	7.25E-06	3.01E-05	3.14E-09	7.03E-05
7.6		1.04E-03	5.04E-03	4.67E-06	1.31E-04	5.27E-03
9.7		3.22E-04	1.98E-02	2.20E-04	5.27E-05	1.99E-02
10.5		2.22E-04	1.25E-02	1.03E-04	1.75E-02	2.97E-02
14		1.02E-03	1.50E-02	1.12E-04	1.28E-03	1.64E-02
gecombineerd		1.62E-03	1.89E-02	3.44E-04	2.83E-02	4.67E-02

Tabel 5-3: Gecombineerd faalkansen per vak en/of per mechanisme

De hier getoonde overstromingskans is relatief (zeer) groot in verhouding tot de verwachting op basis van beheerervaringen. Dit is in belangrijke mate het resultaat van de faalkansberekeningen op doorsnedeniveau voor GEBU-oploop en STBI in enkele dijkvakken. Een verdere verfijning van deze berekeningen (bijv. uitvoeren complete faalpadanalyses, nadere blik op schematiseringen en parameterkeuzes) is ongetwijfeld nog mogelijk. Dit is echter niet gedaan omdat dit weinig relevant is voor het doel en de conclusies van de voorliggende studie.

5.4 Duiding resultaten

Het doel van deze studie was het verkrijgen van een scherpere bepaling van de overstromingskans door het meenemen van de afhankelijkheden/correlaties tussen doorsneden en mechanismen. Daartoe zijn berekeningen uitgevoerd met Hydra-Ring. Hoe zijn de berekeningsresultaten te begrijpen?

De resultaten getoond in Tabel 5-3 kunnen gebruikt worden om inzichtelijk te maken hoe relevant het meenemen van afhankelijkheden/correlaties tussen vakken en mechanismen is.

Als eerste kan gekeken worden naar het effect van correlatie tussen de verschillende vakken per mechanisme. Tabel 5-4 toont per mechanisme de faalkans indien de vakken niet gecorreleerd zouden zijn: dan zou de som van de faalkansen van de vakken overeen komen met de gecombineerde faalkans. De tabel toont ook de gecombineerde faalkans indien er is sprake van volledige correlatie.

Het effect van correlatie is bepaald door het verschil te nemen tussen de som van faalkansen en de met Hydra-Ring berekende gecombineerde faalkans. Dit verschil is gedeeld door het verschil tussen wel/niet gecorreleerde faalkansen en als percentage weergegeven in de tabel.

Uit Tabel 5-4 valt af te leiden dat uitgezonderd van STBI, er sprake is van significante overlap/correlatie voor de verschillende mechanismen. Dat deze mechanismen een sterke correlatie laten zien is te verklaren door het feit dat de belasting de bepalende onzekerheid is en dat deze langs de dijk sterk gecorreleerd is. Voor het mechanisme STBI geldt dat deze vooral gedomineerd wordt door de onzekerheid in de sterkte, welke tussen de vakken niet gecorreleerd is verondersteld (zie ook Tabel 5-1). Op grond van Tabel 5-4 kan gesteld worden dat het in samenhang beschouwen van doorsnedes voor de mechanismen GEKB en GEBU tot een aanscherping van de overstromingskans leidt: de correlatie tussen vakken is voor deze mechanismen sterk.

Vak	GEKB	GEBU-oploop	GEBU-golfklap	STBI
1.1	4.79E-05	7.25E-06	3.01E-05	3.14E-09
7.6	1.04E-03	5.04E-03	4.49E-06	1.31E-04
9.7	3.22E-04	1.98E-02	2.20E-04	5.27E-05
10.5	2.22E-04	1.25E-02	1.03E-04	1.75E-02
14	1.02E-03	1.50E-02	1.12E-04	1.28E-03
gecombineerd	1.62E-03	2.83E-02	3.44E-04	1.89E-02
Som kansen (niet gecorreleerd)	1.04E-03	1.98E-02	2.20E-04	1.75E-02
Max kansen (volledig gecorreleerd)	2.65E-03	5.23E-02	4.70E-04	1.89E-02
% Reductie faalkans door meenemen correlatie tussen vakken	64%	74%	50%	2%

Tabel 5-4: Relatieve faalkansen per mechanisme en correlatie tussen vakken per mechanisme

Ook de correlatie tussen de verschillende mechanismen per vak kan nader worden beschouwd. Hiervoor zijn de som van de kansen en de maximale kans per vak vergeleken met het resultaat van de door Hydra-Ring berekende gecombineerde kans, zie Tabel 5-5. Uit de tabel valt op te maken dat de overlap tussen de verschillende mechanismen per vak substantieel kan zijn (tot wel 80%), maar voor andere vakken ook beperkt kan zijn (slechts 4%). De sterke afhankelijkheid tussen mechanismen wordt vooral gevonden als de faalkans wordt bepaald door een combinatie van GEKB en GEBU (en in mindere mate door STBI). Zodra de faalkans voornamelijk door slechts 1 mechanisme wordt bepaald (vak 10.5), dan wordt een beperkte correlatie gevonden, immers de kans wordt door slechts 1 mechanisme bepaald.

Vak	GEKB	GEBU-oploop	GEBU-golfklap	STBI	Gecombineerd	Som kansen	Max kansen	Mate van correlatie
1.1	4.79E-05	7.25E-06	3.01E-05	3.14E-09	7.03E-05	4.79E-05	8.52E-05	40%
7.6	1.04E-03	5.04E-03	4.49E-06	1.31E-04	5.27E-03	5.04E-03	6.22E-03	80%
9.7	3.22E-04	1.98E-02	2.20E-04	5.27E-05	1.99E-02	1.98E-02	2.04E-02	87%
10.5	2.22E-04	1.25E-02	1.03E-04	1.75E-02	2.97E-02	1.75E-02	3.03E-02	4%
14	1.02E-03	1.50E-02	1.12E-04	1.28E-03	1.64E-02	1.50E-02	1.74E-02	45%

Tabel 5-5: Relatieve faalkansen per mechanisme en correlatie tussen mechanismen per vak

Op grond van de bovenstaande bevindingen wordt geconcludeerd dat het vooral van belang blijkt te zijn om voor dit traject (gegeven de gekozen aannames) de samenhang tussen doorsnedes goed te beschrijven en in beperktere mate de samenhang tussen de mechanismen.

Dit is ook als volgt te begrijpen:

1. Binnen een statistisch homogeen vak is sprake van doorsnedes met een gelijke betrouwbaarheid. Een verkeerde beschrijving van de afhankelijkheden tussen de doorsnedes binnen een vak kan zodoende een grote afwijking opleveren. Anders gezegd: de elementaire boven- en ondergrenzen kunnen per dijkvak ver uiteen liggen. De berekeningen met Hydra-Ring voor STBI en bijvoorbeeld GEKB laten dit ook duidelijk zien.
2. De faalkansen per vak voor een bepaald faalmechanisme kunnen sterk variëren. Als er vakken zijn met duidelijk grotere faalkansen, dan zullen deze de faalkans voor het betreffende mechanisme op trajectniveau hoe dan ook domineren, los van de precieze correlatie tussen de minder en meer betrouwbare vakken.
3. Hetzelfde geldt voor het combineren van de faalkansen per faalmechanisme op trajectniveau tot een overstromingskans. Ook hier kunnen uitschieters zeer bepalend zijn. Bovendien is het aantal dominante faalmechanismen doorgaans klein. De elementaire boven- en ondergrenzen kunnen dan niet verder uiteen liggen. Ter illustratie: bij 4 faalmechanismen is het maximale verschil een factor 4 als alle faalmechanismen exact dezelfde faalkans op trajectniveau zouden bezitten. Zodra de faalkansen per faalmechanisme variëren, wordt deze bandbreedte al snel veel kleiner.

In generieke zin kan gesteld worden dat als de faalkans gedomineerd wordt door één mechanisme binnen één vak, dat de gecombineerde faalkans slechts beperkt beïnvloed wordt door het wel/niet meenemen van de afhankelijkheden tussen doorsnedes en/of mechanismen. Een eerste indicatie van de relevantie van het meenemen van de afhankelijkheden voor de overstromingskans kan verkregen worden door te kijken naar het verschil tussen de som van de individuele kansen (on-gecorrigeerd) en het maximum van de individuele kansen (volledig gecorrigeerd).

6 Vergelijking met de assemblage-tool

6.1 Combineren van doorsnede naar traject per mechanisme

In het kader van deze studie is nagegaan hoe de afhankelijkheden en/of correlaties tussen doorsnedes en mechanismen zuiver kunnen worden meegenomen bij het combineren van faalpaden. In het assemblageprotocol van BOI worden afhankelijkheden tussen mechanismen niet meegenomen, bijvoorbeeld als gevolg van dezelfde belastingen die tot falen leiden. Afhankelijkheden tussen doorsnedes en vakken worden op pragmatische wijze meegenomen in de assemblagetool.

De vraag is nu hoe het huidige assemblageprotocol zich verhoudt tot een probabilistische berekening met inbegrip van afhankelijkheden en/of correlaties. Om dit in beeld te brengen is het assemblage protocol (Deltares 2021f) toegepast op de bepaalde kansen op doorsnede- en vakniveau.

Tabel 6-1 toont de vergelijking tussen de resultaten van het assemblageprotocol en de aanpak met Hydra-Ring. Het assemblageprotocol gaat uit van een lengte-effect-factor (N) om de doorsnedekans op te schalen naar een kans op vak- en/of trajectniveau. Voor de mechanismen GEKB en GEBU is dit een factor welke per traject is voorgeschreven (N=1,2 of 3), terwijl het voor STBI een factor betreft welke afhankelijk is van de beschouwde vak- of trajectlengte. De relevante N-factoren voor dit dijktraject worden getoond in de eerste rij van de tabel.

In het protocol worden vervolgens twee trajectkansen afgeleid, respectievelijk uitgaande van volledig gecorreleerde vakken en onafhankelijke vakken (combi 1 en combi 2, waarbij altijd geldt dat combi 2 > combi 1). Van deze twee kansen wordt vervolgens het minimum genomen om tot de faalkans op trajectniveau te komen (kans assemblage), effectief wordt altijd combi 1 gehanteerd. De resulterende gecombineerde kans op trajectniveau kan vergeleken worden met de kans zoals bepaald met Hydra-Ring (rekening houdend met de correlaties).

Tabel 6-1 laat zien dat de faalkans voor de mechanismen GEKB en GEBU voor dit traject wordt overschat door het assemblage protocol. Ter illustratie is de lengte-effect-factor bepaald waarmee door het assemblage protocol een kans wordt verkregen gelijk aan de Hydra-Ring berekening (N_{fit}). Te zien is dat de lengte-effect-factor een factor 2 kleiner zou mogen zijn (N=1.5 in plaats van N=3). De reden hiervoor is dat de faalkans wordt bepaald door 1 à 2 specifieke doorsnedes en dat overige doorsnedes beperkt bijdragen aan de faalkans.

Voor het mechanisme STBI is het omgekeerde het geval: daar leidt de toepassing van het assemblage protocol in dit geval tot een onderschatting van de faalkans met een factor 30. De bepaling van de lengte-effect-factor in het assemblage protocol gaat uit van een aanname dat 3.3% van het dijkvak de faalkans voor STBI bepaald. Voor de hier gehanteerde case (en gehanteerde schematisatie van het traject in vakken) is dat niet juist. Hier speelt de keuze voor de vakindeling een rol (weinig relatief grote vakken). Daarnaast geldt dat de hier beschouwde dijk vrij uniform is, waardoor er niet direct 1 slechte plek aan te wijzen is en de faalkans dus niet door 1 doorsnede wordt bepaald.

		GEKB	GEBU-R	GEBU-I	STBI
N-assemblage	N	3.00	3.00	3.00	12.07
Kans - Combi 1	P	3.13E-03	5.95E-02	6.61E-04	7.47E-03
Kans - Combi 2	P	2.65E-03	5.14E-02	4.70E-04	1.87E-03
Kans - Assemblage	P	2.65E-03	5.14E-02	4.70E-04	1.87E-03
Kans - Hydra-Ring		1.62E-03	2.83E-02	3.44E-04	1.89E-02
N_{fit}		1.5	1.5	1.5	30.5

Tabel 6-1: combineren doornsedes: vergelijking analyse gebeurtenissenboom met assemblage protocol

6.2 Combineren van trajectkans per mechanisme

Binnen het assemblageprotocol worden ook de faalkansen op trajectniveau per mechanisme gecombineerd tot een overall faalkans van het traject: combineren van mechanismen. Deze combinatie wordt gemaakt onder de aanname dat de mechanismen niet gecorreleerd zijn.

Tabel 6-2 toont de gevonden faalkans van combinatie van de trajectkansen per mechanisme. De bovenste rij toont de gevonden faalkans voor alle mechanismen als de trajectkansen per mechanisme uit Tabel 6-1 (Kans – Assemblage) worden gebruikt om de gecombineerde kans te bepalen. Vervolgens wordt de kans getoond zoals deze met behulp van Hydra-Ring is bepaald, waarbij de afhankelijkheden tussen de mechanismen netjes zijn meegenomen. Te zien is dat er een verschil is in kansen, maar dat verschil is mogelijk het gevolg van de verschillen in kansen per mechanisme. Om dit verschil uit te sluiten is ook de faalkans gecombineerd over de mechanismen bepaald met behulp van de door Hydra-Ring bepaalde kansen per mechanisme. Te zien is dat de overall faalkans dan zeer vergelijkbaar is. Dit is in lijn met de verwachting omdat Tabel 5-5 reeds had laten zien dat het effect van correlatie tussen de mechanismen (voor dit dijktraject) op de overstromingskans beperkt is. Dat betekent dat de aanname in het assemblage protocol dat de mechanismen niet gecorreleerd zijn voor dit dijktraject redelijk blijkt te zijn.

	Faalkans
Gecombineerde kans - Assemblage	6.14E-02
Gecombineerde kans - Hydra-Ring	4.67E-02
Gecombineerde kans – Assemblage (Hydra-Ring kansen per mechanisme)	4.86E-02

Tabel 6-2: combineren mechanismen: vergelijking analyse gebeurtenissenboom met assemblage protocol

7 Conclusies en aanbevelingen

In deze studie is nagegaan hoe een overstromingskans is te bepalen met bestaande, beschikbare technieken, rekening houdend met de afhankelijkheden/correlaties tussen doorsnedes en mechanismen. Hiertoe is voor een geselecteerde case een volledig probabilistische analyse opgezet voor de mechanismen GEKB, GEBU en STBI. Deze volledig probabilistische som is opgezet met behulp van reeds beschikbare instrumenten, waardoor een dergelijke analyse ook mogelijk is voor andere trajecten. Opgemerkt wordt dat de analyse zich beperkt heeft tot de bepalende mechanismen en dat hierbij steeds alleen het initiërende deel van het mechanisme is beschouwd. Voor het illustreren van de mogelijkheden om afhankelijkheden zuiver mee te nemen bij de bepaling van de overstromingskans van een traject doet dit echter niet ter zake.

Analyse van de resultaten van de volledig probabilistische berekening laat zien dat afhankelijkheden/correlaties tussen doorsnedes en mechanismen van invloed zijn op de berekende overstromingskans. De analyse laat zien dat het voor een nauwkeurige bepaling van de overstromingskans vooral van belang is om rekening te houden met correlaties tussen doorsnedes (per faalmechanisme). Dit geldt in beperkte mate voor het combineren van faalmechanismen.

De resultaten van de studie zijn ook vergeleken met het assemblageprotocol dat op dit moment gebruikt wordt voor het bepalen van de gecombineerde faalkans. De vergelijking heeft laten zien dat het protocol zowel tot een onder- als een overschatting van de faalkans leidt als gevolg van de combinatie van doorsnedes naar trajectniveau. De aanname in het assemblageprotocol van geen correlatie tussen mechanismen lijkt voor dit traject wel een passende vereenvoudiging te zijn.

Aanbevolen wordt om de toegepaste methodiek zodanig te ontsluiten dat beheerders en bureaus hier zelf mee kunnen gaan experimenteren.

8 Referenties

- Deltares, 2020. Faalpaden. Conceptuele analyse van het gebruik van de faalpaden-methodiek voor het bepalen van overstromingskansen in Nederland. 11203719-024-GEO-0016.
- Deltares, 2021a. Hydra-Ring 20.1 – Technical reference manual. Reference: 1126818-015-GEO-0003
- Deltares, 2021b. Probabilistisch beoordelen en ontwerpen grasbekleding. Deltares rapport met kenmerk 11206202-002-HYE-0001. A.J. Smale en W.J. Klerk, 12 juli 2021.
- Deltares, 2021c. Handreiking Hydra-Ring - Macrostabieliteit binnenwaarts: 11206818-030-GEO-0001_v1.0.
- Deltares, 2021d. Functional design of the Probabilistic Library 20.1.1. 11206818-015-GEO-0006
- Deltares, 2021e. Inschatting lengte-effectfactoren gras op zanddijken (GEBU/GEKB). Deltares memo. W.J. Klerk.
- Deltares, 2021f. Assemblage protocol. Nadere uitwerking van het beoogde assemblage protocol voor het wettelijke beoordelingsinstrumentarium. 11205758-005-geo-0001, versie 4.
- RWS 2019. Schematiseringshandleiding macrostabieliteit, WBI 2017, 28 november 2019, Status Definitief, versie 3.0

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl