

Uitwerking methode voor bepaling effectiviteit rivierverruiming

Functionele beschrijving

Otto Levelt (Deltares); Arno de Kruif (WVL); Robert Vos (WVL);
Raymond van der Meij (Deltares); Irene van der Zwan (Deltares);
Wouter ter Horst (HKV); Peter de Grave (Deltares); Nathalie
Asselman (Deltares)

1220039-000

Titel

Uitwerking methode voor bepaling effectiviteit rivierverruiming

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
WVL	1220039-000	1220039-000-VEB-0006	73

Trefwoorden

Effectiviteit rivierverruiming, Kosten-baten, Deltaprogramma, Rivieren, dijken, rivierverruimende maatregelen, faalkans, fragility curves

Samenvatting

In het kader van de uitwerking van de voorkeursstrategie Deltaprogramma Rivieren, wordt een methode ontwikkeld om het effect van rivierverruimende maatregelen op de dijkversterkingsopgave te bepalen. De voorkeursstrategie bestaat uit een combinatie van rivierverruiming en dijkversterking. Eventuele kostenbesparingen op dijkversterkingen opgenomen in het HWBP kunnen gebruikt worden voor de financiering van rivierverruiming. De ontwikkelde methode berekent kosten voor dijkversterking in een situatie zonder en met rivierverruiming. De kostenbesparing als gevolg van rivierverruiming bedraagt het verschil tussen beide ramingen. Inzicht in de kostenbesparing op dijkversterking levert een belangrijke bijdrage aan de afwegingen tussen rivierverruiming en dijkversterkingen.

Referenties

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review
3.4	juli 2015	O. Levett		J. Kind

Status

definitief

(versie zoals verstuurd aan ENW ter review van de methode)

Inhoud

1 Inleiding	3
1.1 Kader	3
1.2 Effect van rivierverruiming op overstromingskans	4
1.3 Doel van dit project	5
1.4 Verschil met Deltaprogramma Rivieren	5
1.5 Leeswijzer	6
2 Algemene opzet methode	7
2.1 Doel van de methode	7
2.2 Opzet van de methode	8
2.2.1 Stappen per dijkprofiel	8
2.2.2 Stappen per normtraject	12
2.2.3 Methode in tijd	13
2.2.4 Invloedsfeer rivierverruiming	16
2.2.5 Vormen van kostenbesparing	17
2.3 Werken met fragility curves	18
2.3.1 Faalkans	18
2.3.2 Referentie situatie	18
2.3.3 Dijkversterking en rivierverruiming	21
2.3.4 Validatie en vergelijk	23
3 Algemene uitgangspunten	25
3.1 Gebiedsgrenzen	26
3.2 Klimaat	26
3.3 Bodemdaling	27
3.4 Normen	28
3.5 Detailniveau	28
3.6 Dijken	29
3.6.1 Geometrie	29
3.6.2 Ligging	29
3.6.3 Ondergrond	30
3.6.4 Kunstwerken	30
3.7 Overige uitgangspunten	30
3.7.1 Falen	30
3.7.2 Onzekerheden	31
3.7.3 Kosten	31
4 Hydraulische belasting en rivierverruimende maatregelen	32
4.1 Algemene aanpak	32
4.1.1 Uitgangspunten	32
4.2 Modelkeuze	32
4.3 Afvoerstatistiek	32
<u>2. Opbouw onzekerheidstoelag</u>	<u>33</u>
4.3.1 Klimaatopgave en bodemdaling	34
4.3.2 Modeluitvoerpunten	34
4.4 Maatregelen	35

1 Inleiding

1.1 Kader

Met dijken zorgen we er in Nederland al honderden jaren voor dat we beschermd blijven tegen hoogwater. In Nederland is onze waterveiligheid geregeld in de wet. Eens in de 6 /12 jaar wordt met het wettelijk toetsinstrumentarium getoetst of onze dijken nog voldoen aan de vastgestelde norm. In de jaren negentig is er mede naar aanleiding van twee hoogwaters een nieuw type maatregel ten bate van hoogwaterbescherming sterker naar voren gekomen: rivierverruiming. Rivierverruimende maatregelen dragen ook bij aan het vergroten van de hoogwaterveiligheid omdat het falen van onze dijken bij de huidige overschrijdingskansnorm voornamelijk is gekoppeld aan de hoogte van het water dat tegen de dijk staat. Rivierverruiming zorgt voor een daling van de waterstand en daarmee dus voor een hogere veiligheid. Een wettelijke toets op rivierverruiming is er niet gekomen maar er volgde wel startbeslissingen Ruimte voor de Rivier en Maaswerken. Daarnaast is in de leidraad rivieren vastgelegd dat de toename van de rivierafvoer door klimaatsverandering zoveel mogelijk moet worden opgelost met rivierverruiming.

Om aan de veiligheidsnorm te voldoen kunnen dus zowel dijkversterkingen als rivierverruimende maatregelen worden uitgevoerd.

Gebruik makend van bovenstaande inzichten is tussen 2010 en 2014 het Deltaprogramma Rivieren (DPR) uitgevoerd. In het kader van DPR hebben Rijk en regio gewerkt aan een strategie die er op gericht is om de veiligheid in het rivierengebied ook in de (verre) toekomst (het jaar 2100) te waarborgen. In deze strategie werd de toekomstige klimaatsopgave vooral opgelost met rivierverruiming en de sterkteopgave van de dijken met dijkversterking. De uiteindelijke voorkeursstrategie die eind 2014 is opgeleverd bestaat uit een mix van rivierverruiming en dijkversterking. De maatregelen die deel uitmaken van de strategie zorgen er samen voor dat het effect van klimaatverandering wordt gemitigeerd en dat de dijken in het rivierengebied in 2050 voldoen aan de nieuwe normen zoals opgenomen in de nieuwe Waterwet. Een aantal van de rivierverruimende maatregelen van de voorkeursstrategie van DPR is het resultaat van samenwerking met het deelprogramma Rijnmond-Drechtsteden (bijvoorbeeld de maatregel Sleeuwijk).

Momenteel worden in het kader van het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) daarnaast verschillende dijkversterkingen voorbereid. Uiteindelijk dient er op basis van informatie uit beide programma's (Deltaprogramma Rivieren en HWBP) een gedragen pakket tot stand te komen van dijkversterking en rivierverruimende maatregelen. Overigens maakt HWBP onderdeel uit van Deltaplan Waterveiligheid.

Begin 2015 heeft de minister een brief gestuurd aan de voorzitters van de Stuurgroep Deltaprogramma Rijn en Maas met het verzoek om te komen met een onderbouwd voorstel voor een nadere selectie van rivierverruimende maatregelen en mogelijke startbesluiten voor één of meer MIRT-verkenningen naar rivierverruiming. Een van de eisen die gesteld worden bij het starten van een MIRT-verkenning is dat de rivierverruimende maatregel moet bijdragen aan de waterveiligheid en er zicht moet zijn op financiering.

Parallel aan dit traject wordt door het HWBP en de waterschappen gewerkt aan het versterken van afgekeurde dijktrajecten. Voor het dijkontwerp moeten de waterschappen zicht hebben op de rivierverruimende maatregelen die de komende jaren worden uitgevoerd.

meestal economisch aanzienlijk minder voordelig zou zijn dan dijkversterkingen (2-10x ongunstiger. Zie Kind en van der Doef, 2014).

Omdat uit de analyses in 2014 is gebleken dat rivierverruiming een significant effect heeft op de overstromingskans en daarmee op het verkleinen van de versterkingsopgave, wordt in het onderhavig project een methode ontwikkeld om de reductie van de overstromingskansen en de kostenbesparingen in meer detail te bepalen. Immers de analyses geven wel een eerste indicatie van het effect van rivierverruiming versus dijkversterkingen maar zijn niet geavanceerd genoeg voor definitieve uitspraken aangaande de kosteneffectiviteit van rivierverruiming versus dijkversterkingen. De hier beschreven methode wijkt dus af van de methodes die in bovengenoemde analyses gebruikt is.

1.3 Doel van dit project

Het doel van dit project is om een methode te ontwikkelen waarmee de afname van de kosten voor dijkversterking, als gevolg van rivierverruimende maatregelen, berekend kan worden. Om daarmee ook inzicht te bieden in de bijdrage van rivierverruimende maatregelen aan het bereiken van de nieuwe waterveiligheidsnormen.

Dit betekent dat de te ontwikkelen methode in staat moet zijn om kosten voor dijkversterking te ramen in een situatie zonder en met rivierverruiming. De kostenbesparing als gevolg van rivierverruiming bedraagt het verschil tussen beide ramingen.

Zoals eerder beschreven is de methode in eerste instantie ontwikkeld om zicht te krijgen op de financiering van rivierverruimende maatregelen vanuit de kostenbesparingen die deze tot gevolg hebben voor het HWBP. Om die reden wordt de methode in eerste instantie toegepast op een tweetal concrete maatregelen langs de Waal te weten Varik-Heesselt en Sleeuwijk aangezien hier ook de twee urgente projecten van het HWBP zijn gestart; Gorinchem-Waardenburg en Waardenburg-Tiel.

1.4 Verschil met Deltaprogramma Rivieren

De waterveiligheidsopgave zoals gehanteerd binnen het Deltaprogramma Rivieren bestond uit drie deelopgaven:

- 1) Het op orde brengen van de dijken conform de nieuwe inzichten in het faalmechanisme piping
- 2) Normaanscherping conform de werknormen zoals voorgesteld door DPR (de definitieve normen van het Deltaprogramma Veiligheid waren nog niet beschikbaar)
- 3) Toename van (maatgevende) waterstanden als gevolg van klimaatverandering en bodemdaling.

Het op orde brengen van de dijken conform de nieuwste inzichten in het faalmechanisme piping betreft vooral een versterking van de waterkering (aanleg bredere pipingberm). In verband met het fysisch maximum van de Rijn (niet meer dan 18.000 m³/s kan via Duitsland Nederland bereiken), werd aangenomen dat de nieuwe normen ook vooral zouden leiden tot een versterkingsopgave. Wanneer een toename van de waterstanden door klimaatverandering dus zou kunnen worden tegengegaan door de inzet van rivierverruimende maatregelen, zou dit betekenen dat de resterende opgave (die opgelost zou worden met aanpassingen aan de waterkeringen) vooral uit dijkversterkingen bestond en niet uit dijkverhogingen. Rivierverruiming zou in dat geval tot een aanzienlijke kostenbesparing kunnen leiden.

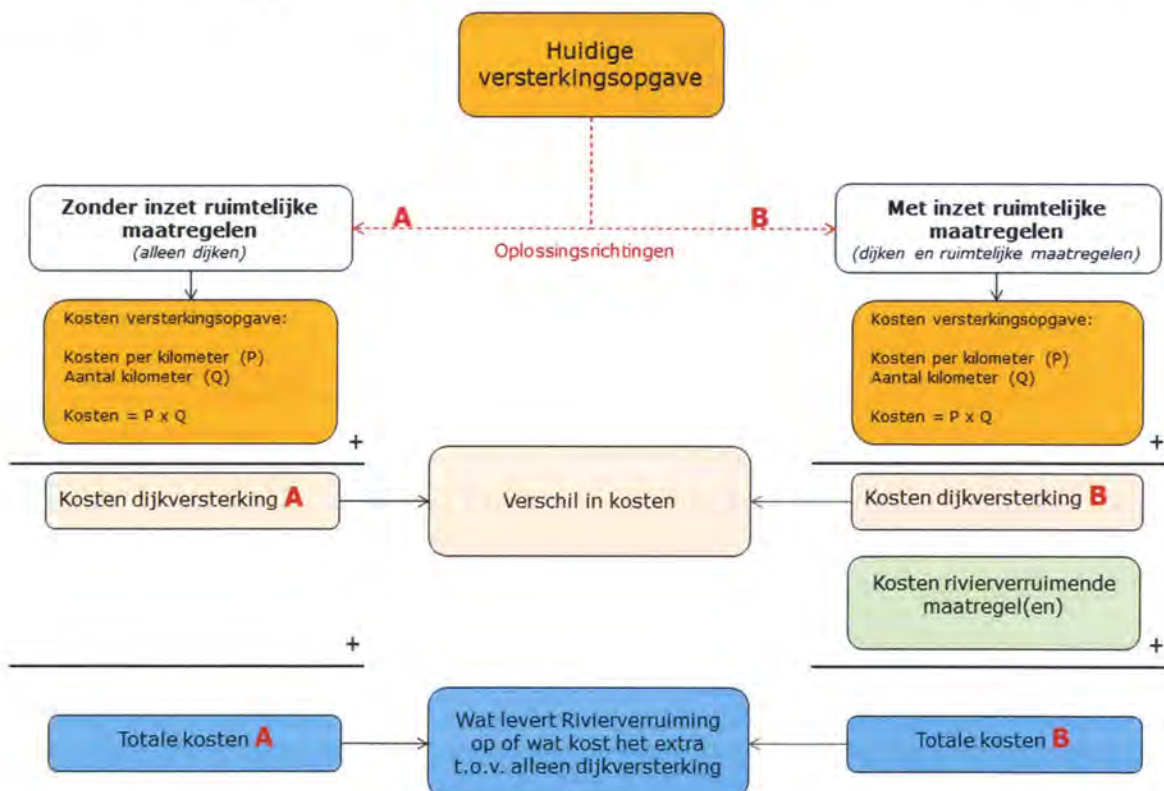
Inmiddels is er meer zicht op de nieuwe ontwerpregels voor waterkeringen (OI2014). Het blijkt dat, zelfs wanneer de klimaatopgave wordt opgelost met rivierverruiming, er naast

2 Algemene opzet methode

2.1 Doel van de methode

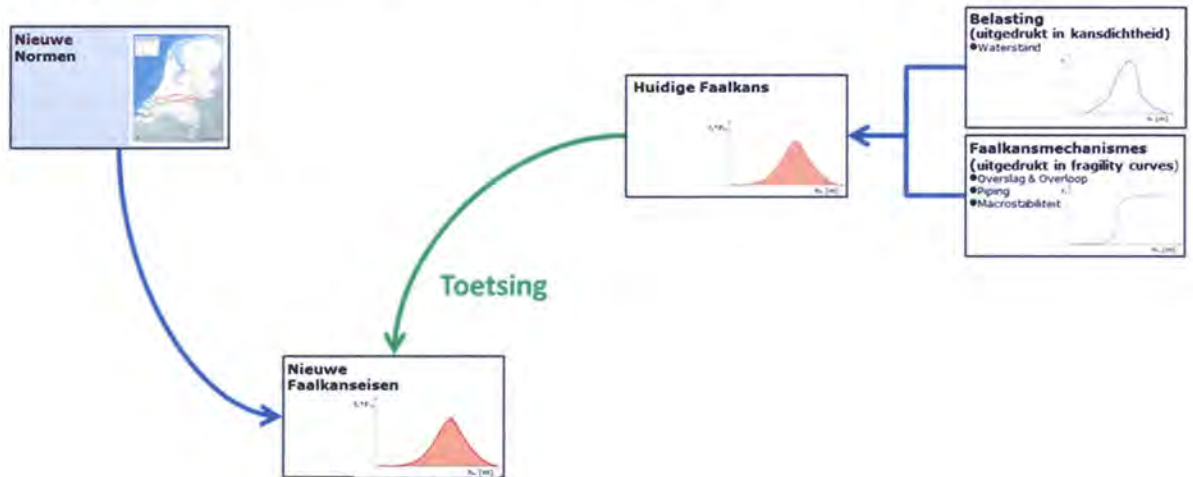
Met de overstap van een norm op basis van een overschrijdingskans van waterstanden naar een norm op basis van een overstromingskans, is het de bedoeling dat het effect van rivierverruimende maatregelen kan worden uitgedrukt in (een afname van) de overstromingskans. Een afname van de overstromingskans heeft vervolgens effect op de mate van dijkversterking en daarmee op de dijkversterkingskosten. Daarmee kan worden bepaald worden in hoeverre een maatregel kosteneffectief is, in termen de zin van een afname van de dijkversterkingskosten.

Om tot een optimale combinatie van dijkversterking en rivierverruiming te komen hebben onder andere IenM, HWBP, de Waterschappen en de Provincie behoefte aan een methode waarmee **de kostenreductie van een rivierverruimende maatregel op HWBP dijkversterkingsmaatregelen kan worden bepaald**. Deze methode maakt daarmee dus ook duidelijk hoe veel geld er uit het HWBP vrijkomt voor realisatie van de rivierverruimende maatregel en meer in algemene zin hoe veel de inzet van rivierverruimende maatregelen aan kostenbesparingen oplevert voor dijkversterkingsopgaves. In onderstaande **Error! Reference source not found.** is dit schematisch weergegeven. Het gaat hierbij dus om het verschil in kosten tussen dijkversterkingskosten A en B. De kosten van de rivierverruiming zelf worden buiten beschouwing gelaten.



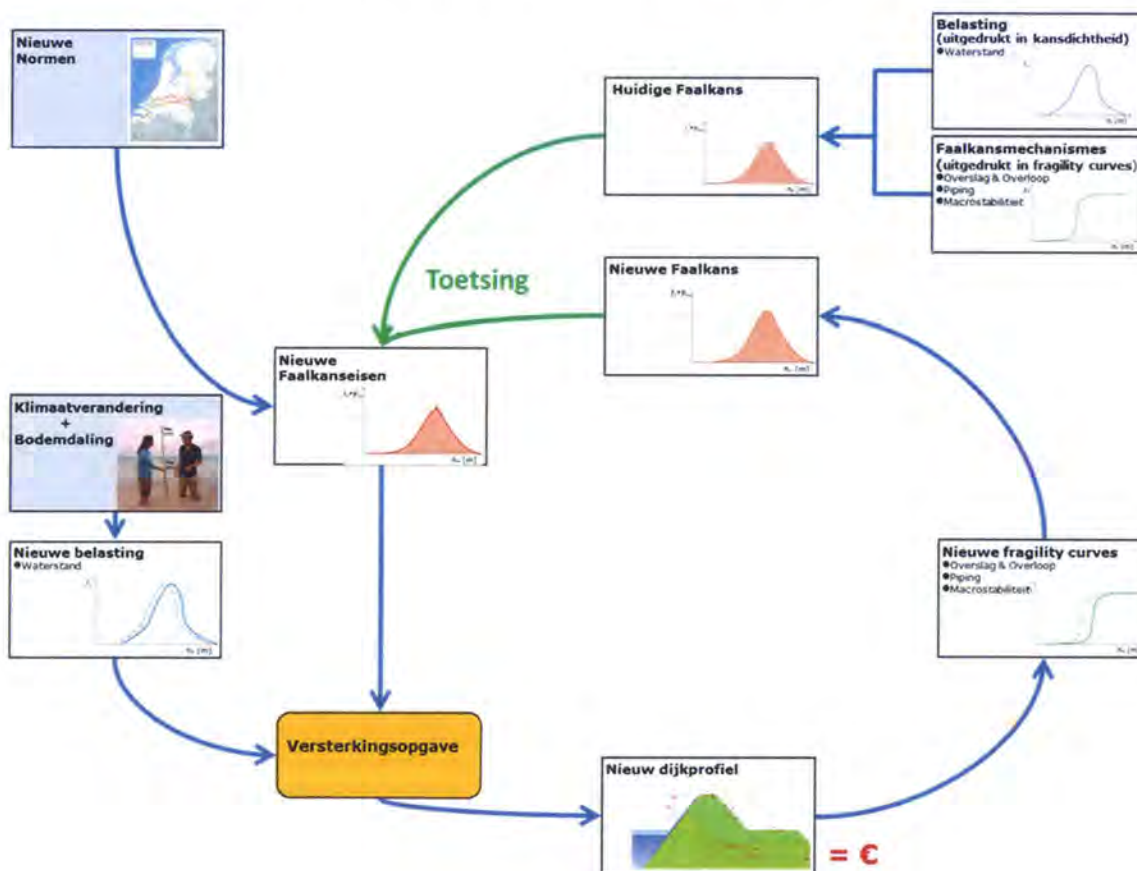
Figuur 2.1 Manier waarop de kosten voor dijkversterking met en zonder inzet van rivierverruimende maatregelen vergeleken gaat worden.

- 2 Vervolgens wordt gekeken aan welke faalkans de dijk volgens de wet zou moeten voldoen. Wanneer de faalkans kleiner of gelijk is aan de wettelijke faalkanseis hoeft de dijk niet te worden versterkt. Wanneer de faalkans te groot is, moet de dijk versterkt worden.

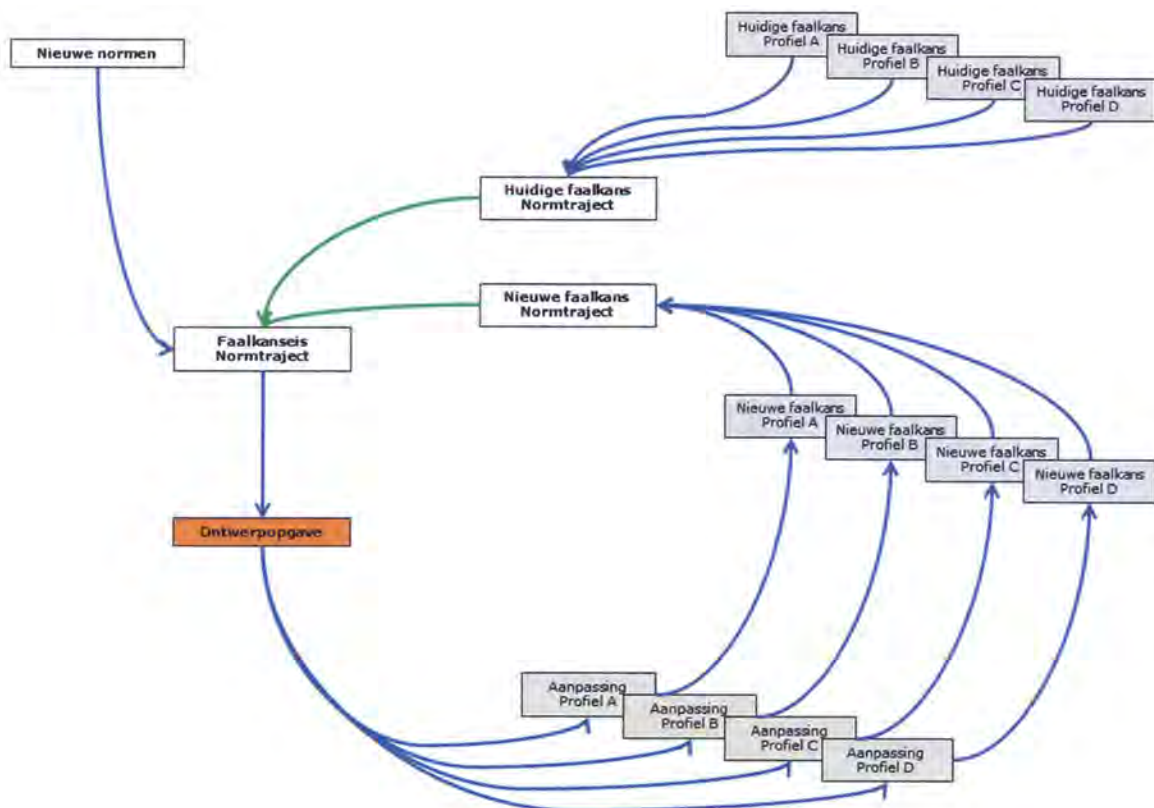


Figuur 2: Toetsing huidige faalkans aan wettelijk vereiste faalkans

- 4 Berekend wordt hoe de dijk moet worden versterkt, gegeven (de toename van) de belasting en de wettelijk vereiste faalkans. Dit betekent dat de dijk ofwel in de hoogte ofwel in de breedte ofwel in beide richtingen aangepast wordt. Omdat er in de methode gewerkt wordt op basis van fragility-curves, wordt de versterking vertaald in de benodigde fragility -curve om te voldoen aan de faalkans voor de verschillende faalmechanismen. De aanpassing van de curves laat zich vertalen in extra benodigde hoogte en breedte voor piping en macrostabiliteit. Deze extra hoogtes en breedtes zijn dan dus de benodigde dijkversterkingen om aan de norm te voldoen. In sommige gevallen de versterking in de vorm van een constructie gerealiseerd worden. De kosten voor het aanleggen van een berm of verhogen van een dijk worden voor de gegeven locatie berekend. Vervolgens kan op basis van de aanpassingen in hoogte en breedte worden geraamd hoe veel de bijbehorende versterking kost. Bovenstaande geldt voor een versterking aan de dijk zonder de inzet van een rivierverruimende maatregel.



Figuur 4: Versterking dijckprofiel zonder rivierverruiming



Figuur 3 Schema voor toetsing en versterking van dijken per normtraject.

Zoals in figuur 7 te zien is, bepalen verschillende profielen de aanpassingen die nodig zijn op een normtraject. Omdat er per profiel bij inzet van een rivierverruimende maatregel dus minder dijkversterking in hoogte en breedte nodig is of zelfs in het geheel geen versterking nodig is, betekent dit dus ook dat er mogelijk over het gehele normtraject het aantal te versterken kilometers omlaag kan gaan.

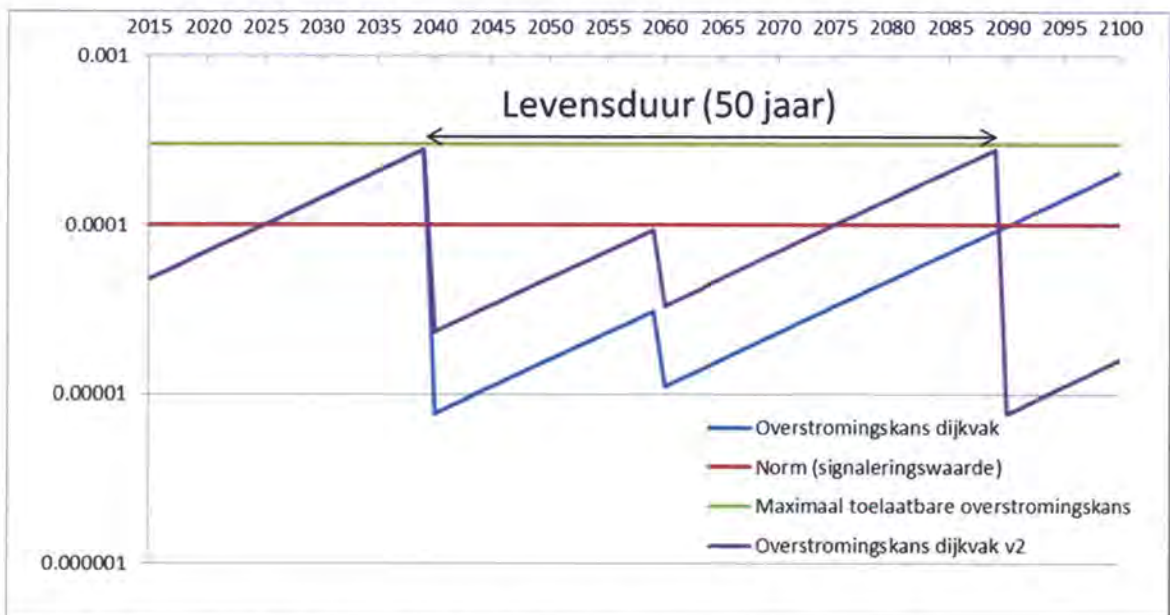
2.2.3 Methode in tijd

Zoals in bovenstaande figuren is te zien, moet een dijk altijd aan de norm voldoen. Bodemdaling en klimaatverandering zorgen ervoor dat de belasting op de dijk toeneemt terwijl de dijk even sterk blijft. Dit zorgt er voor dat een dijk die nu misschien nog voldoet over 20 jaar niet meer voldoet. Op dat moment zal de dijk versterkt (met name verhoogd) moeten worden om voor een gegeven periode weer aan de norm te voldoen.

Zoals eerder beschreven is het effect van rivierverruimende maatregelen dat de belasting op de dijk kleiner wordt. Als dus voordat de dijk wordt afgekeurd een rivierverruimende maatregel ingezet wordt, kan dit betekenen dat de dijk pas op een later tijdstip niet meer aan de norm voldoet. De inzet van rivierverruimende maatregelen kan dus naast een effect op de hoogte en breedte van de versterkingen en de lengte waarover versterkingen nodig zijn, er ook voor zorgen dat versterkingen later in de tijd nodig zijn. Het uitstellen van investeringskosten levert een kostenreductie op. In Figuur 5 en Figuur 6 is in beeld gebracht hoe de inzet van rivierverruimende maatregelen kan leiden tot uitstel van dijkversterking. Figuur 5 toont hoe een cyclus van toetsen, afkeuren en versterken verloopt wanneer geen rivierverruimende maatregel wordt uitgevoerd. Op de x-as staat de tijd en op de y-as staat de

bodemdaling neemt de faalkans vervolgens weer geleidelijk toe. Echter, inzet van de rivierverruimende maatregel heeft er voor gezorgd dat de dijk niet in 2040, maar pas in 2055 versterkt hoeft te worden.

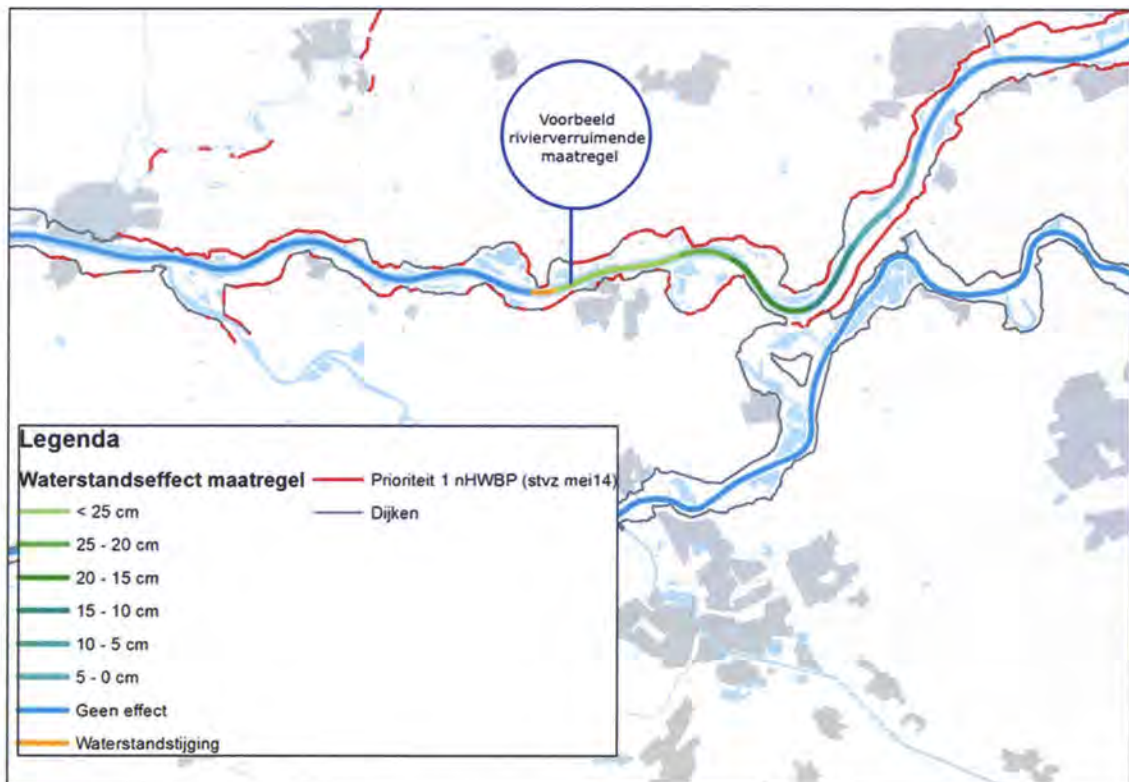
Wanneer een rivierverruimende maatregel later in de tijd wordt aangelegd, kan hiermee in het ontwerp van de dijk reeds rekening gehouden worden. Door nu in het ontwerp al rekening te houden met de ophanden zijnde rivierverruimende maatregel, kan op de dimensies (en dus de kosten) van het dijkontwerp worden bespaard, zie de paarse lijn in Figuur 7. Bij de paarse lijn is rekening gehouden met de realisatie van een rivierverruimende maatregel rond 2055. De dijk is hierdoor in 2040 minder versterkt (dit is te zien aan de minder grote afname van de overstromingskans). Omdat rekening is gehouden met de rivierverruimende maatregel blijft de levensduur gelijk aan 50 jaar.



Figuur 7: Effect van het wel of niet rekening houden met de inzet van een rivierverruimende maatregel bij het aanleggen van een nieuw dijkprofiel. In de paarse lijn is bij het versterken van de dijk wel rekening gehouden met een tussentijdse aanleg van een rivierverruimende maatregel, terwijl dat in de blauwe lijn niet gedaan is. In het eerste geval wordt de dijk minder versterkt en na 50 jaar afgekeurd, in het tweede geval wordt de afkeuring uitgesteld en voldoet de dijk dus langer dan 50 jaar aan de norm.

Wanneer een dijk wordt versterkt zonder rekening te houden met rivierverruiming, wordt de dijk veel meer versterkt, wat resulteert in een veel verdere afname van de faalkans. Dit is aangegeven met de blauwe lijn in Figuur 7. Omdat geen rekening is gehouden met de rivierverruimende maatregel is als het ware 'te veel' versterkt. De levensduur van het dijkvak neemt daardoor toe tot meer dan 50 jaar. De dijk hoeft dan pas veel later voor de tweede keer versterkt te worden.

In de huidige praktijk wordt bij het versterken van een dijk veelal alleen rekening gehouden met het waterstandverlagende effect van een in de toekomst aan te leggen rivierverruimende maatregel als die op korte termijn wordt verwezenlijkt. In de methode wordt ook rekening gehouden worden met een ruimtelijke maatregel die pas in de relatief verre toekomst aangelegd zal gaan worden. Daarmee sluit de methode niet aan op de huidige praktijk.



Figuur 8: Verbeelding van de wisselwerking dijkversterkingen en rivierverruimende maatregelen.

2.2.5 Vormen van kostenbesparing

De inzet van rivierverruimende maatregelen kan dus op de volgende wijze de dijkversterkingskosten verlagen:

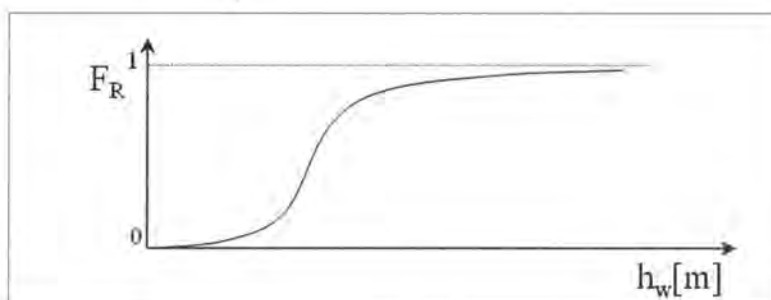
- 1 Het aantal kilometers te versterken dijken neemt af doordat afgekeurde dijken alsnog worden goedgekeurd (uit- en afstel van dijkversterkingskosten)
- 2 Aanpassingen aan de dijk in hoogte en breedte worden kleiner en vallen dus goedkoper uit.
- 3 Goedgekeurde dijken blijven langer goedgekeurd waardoor versterkingen en daarmee investeringen in de tijd naar achteren schuiven.

De methode heeft daarom ten doel antwoord te vinden op de volgende vragen:

- Wat is het effect van de rivierverruimende maatregel op het aantal afgekeurde dijken in kilometers?
- Wat is het effect van de maatregel op de mate van aanpassing van de dijk (versterkingsopgave)?
- Wat worden de aangepaste dijkdimensies (hoogte en breedte)?
- Wat is het gevolg van bovenstaande punten op de totale kosten voor dijkverbeteringen?
- Wat is de kostenreductie van dijkvakken die zijn goed gekeurd en die langer een goedkeuring blijven?

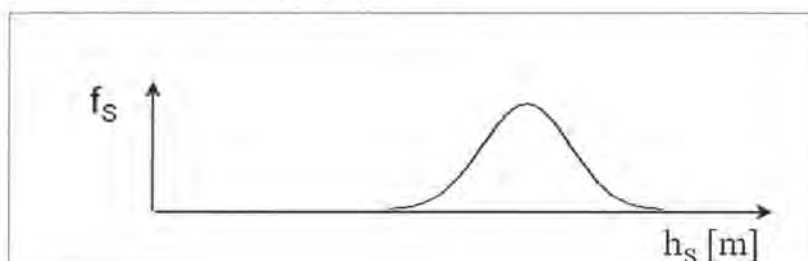
De methode dient daarmee in beeld te brengen wat de kostenbesparingen zijn voor het HWBP op de korte termijn en op de lange termijn. Dat betekent dat zowel de besparingen op de nu afgekeurde dijkvakken in beeld gebracht wordt als ook het uitstel van afkeuring van nu

gebruikt. Dit betekent dat zowel de effecten van dijkversterkende als die van rivierverruimende maatregelen op de overstromingskans in kaart gebracht moeten worden. Om de faalkans van een dijkvak te berekenen wordt gebruik gemaakt van zogenaamde fragility-curves. Een voorbeeld van een fragility-curve is te zien in Figuur 10. Een fragility-curve geeft voor een gegeven waterstand aan hoe groot de kans is dat de dijk bezwijkt. Te zien is dat bij hogere waterstanden de faalkans toeneemt. Bij zeer hoge waterstanden is het zeker dat de kering zal bezwijken. De faalkans is dan gelijk aan 1. Fragility-curves kunnen worden opgesteld voor de verschillende faalmechanismes (piping, macrostabiliteit, overloop/overslag). In hoofdstuk 5 wordt dieper ingegaan op de manier waarop fragility-curves worden bepaald.



Figuur 10: Voorbeeld van een fragility-curve met op de x-as de belasting (waterstand) en op de y-as de faalkans.

De belasting aan de dijk wordt uitgedrukt in een kansdichtheid van voorkomen van verschillende waterstanden (Figuur 11).



Figuur 11: Voorbeeld van de kansverdeling van belasting (kansdichtheid) met op de x-as de belasting (waterstand) en op de y-as de kans van voorkomen.

Deze kansdichtheidsfunctie is per dijkvak bepaald en is als volgt verkregen. Eerst is de afvoerstatistiek (werklijn) bij Lobith of Borgharen uitgedrukt in de overschrijdingskans als functie van de piekafvoer. Door middel van een relatie tussen die piekafvoer en de lokale waterstand kan de afvoer in deze kansverdeling vervangen worden door de lokale waterstand, wat de overschrijdingskans als functie van de lokale waterstand oplevert. Door te differentiëren kan hieruit de kansdichtheidsfunctie worden bepaald. Door voor een klein waterstandsinterval de kans van voorkomen van deze waterstand te vermenigvuldigen met de bijbehorende (conditionele) faalkans, wordt per waterstandsinterval de bijdrage aan de overstromingskans berekend (Figuur 13). De totale faalkans is gelijk aan het oppervlak onder deze grafiek.

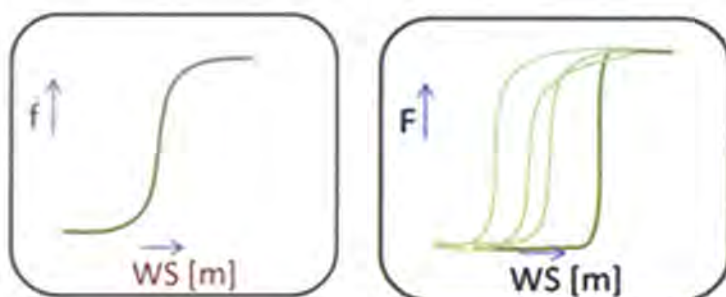
kans op zeer hoge waterstanden zal afnemen. Zowel voor de situatie dat er een ruimtelijke maatregel wordt ingezet als voor de situatie dat die niet ingezet wordt worden nieuwe fragility-curves en belastingen en de daarvan afgeleide faalkansen bepaald. In beide situaties moet de dijk immers voldoen aan de nieuwe faalkanseisen.

Ook wordt bepaald welk ruimtebeslag noodzakelijk is om de waterkering aan de gegeven faalkanseisen te laten voldoen zowel met als zonder rivierverruimende maatregelen. Aan dit ruimtebeslag worden vervolgens kosten gekoppeld.

2.3.3 Dijkversterking en rivierverruiming

Voor ieder dijkprofiel is per faalmechanisme een fragility-curve voor de uitgangssituatie bepaald. Een dergelijke kansverdeling is weergegeven in Figuur 14 links. Deze wordt opgesteld voor de faalmechanismen golf overloop-overslag (erosie binnentalud), macrostabiliteit (binnenwaartse stabiliteit) en piping. Wanneer de dijk wordt versterkt neemt

de faalkans bij een gegeven belastingniveau af.



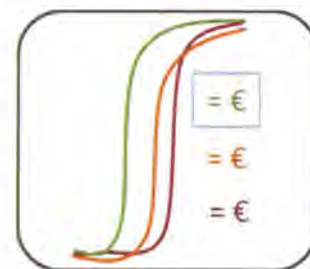
Figuur 14: In de linker figuur is een voorbeeld van een basissterkte te zien. In de rechter figuur zijn de sterktes bij verschillende ontwerpen te zien.

De fragility-curves schuiven daardoor naar rechts (Figuur 14 rechts). De mate waarin de curves veranderen is afhankelijk van de manier waarop de dijk wordt versterkt.

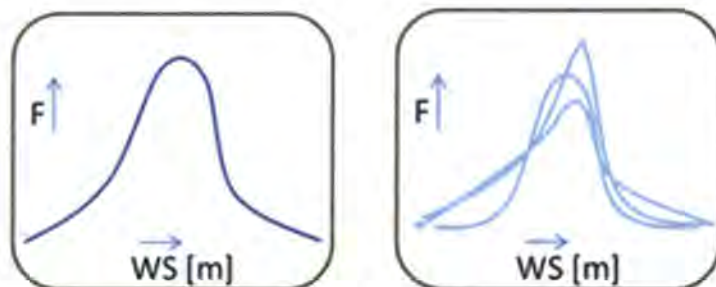
Voor alle aangepaste dijkprofielen en bijbehorende fragility-curves worden de

kosten geraamd (Figuur 15).

Rivierverruiming resulteert in een verandering in de kans van voorkomen van de verschillende waterstanden (Figuur 16). De kans van voorkomen van zeer hoge waterstanden zal afnemen. De manier waarop de kansverdeling van de waterstanden verandert verschilt per rivierverruimende maatregelen. Retentiegebieden hebben alleen effect op de kans van voorkomen van zeer hoge waterstanden. Zomerbedverdieping heeft effect op de kans van voorkomen van alle waterstanden.



Figuur 15: Per ontwerpprofiel worden de kosten berekend.



Figuur 16: Kansverdeling van de waterstand voor links de uitgangssituatie en rechts de kansverdelingen bij inzet van een aantal verschillende rivierverruimende maatregelen (WS = Waterstand).

en voor de breedte van het profiel geformuleerd wordt. Deze eisen worden gecombineerd en op basis daarvan wordt een nieuwe hoogte en breedte voor het nieuwe profiel bepaald. Daarbij worden binnen een normtraject de faalkansen evenredig verdeeld over alle vakken. Conform OI2014 zal er rekening gehouden worden met het lengte-effect.

Ieder vak zal worden versterkt tot aan de faalkanseis per faalmechanisme op doorsnedeniveau voldaan wordt. Deze is dus gelijk is voor alle vakken in het traject. Er wordt niet gekeken of het aanpakken van de zwakste vakken voldoende is. Dit levert mogelijk dijkvak op dat ruim voldoet. Het is daarmee waarschijnlijk een conservatieve aanpak.

2.3.4 Validatie en vergelijk

Het werken met fragility-curves is relatief nieuw binnen de Nederlandse waterkeringen wereld. De curves combineren met de belastingen (waterstanden en hun kans van voorkomen) op de manier die in de voorafgaande paragrafen is beschreven is nog niet eerder op grote schaal toegepast. In een studie naar de toepasbaarheid van een methode op basis van fragility-curves en belasting heeft van Zuijlen (2015) aangetoond dat de methode betrouwbare resultaten oplevert. Daartoe heeft hij de rekenresultaten van VNK uit PC-Ring vergeleken met resultaten verkregen met de aanpak waarin de fragility-curves met de belastingen worden gecombineerd. In bijlage C is een deel uit de Nederlandse samenvatting uit dit rapport overgenomen. Opgemerkt wordt hier dus nog dat de methode een volledig probabilistische methode is net als PC-Ring (en in de toekomst Hydra-Ring).

Om de hier voorgestelde methode nog extra te valideren kunnen de resultaten berekend met deze methode voor een nog groter gebied naast de overstromingskansen zoals berekend door VNK2 gelegd worden. In bijlage D is kort beschreven hoe de validatie van de resultaten aan te pakken.

Bij het gebruik van de methode voor de Waal wordt ook veel aandacht besteed aan gevoeligheidsanalyses om de robuustheid van de resultaten uit de methode te bepalen, zie rapportage "Analyse effectiviteit rivierverruiming Waal (Pol, J. et al. 2015).

Naast een vergelijking met de resultaten uit Veiligheid Nederland in Kaart (hierna: genoemd VNK2) zal ook een vergelijking worden gemaakt met de berekeningen uitgevoerd voor een vijftal dijkvakken door Waterschap Rivierenland in het kader van het HWBP. Bij deze vergelijking zal in een vervolg worden gekeken of beide methodes leiden tot een vergelijkbare versterkingsopgave. Ook zal worden gekeken of de kostenraming vergelijkbaar is. Het waterschap zal de kostenreductie van dijkversterkingen immers meer vanuit operationeel perspectief beschouwen, oftewel is een berekende kostenreductie ook een werkelijk kostenreductie als de aannemer het werk in het veld moet uitvoeren. Voor deze vergelijking zijn nog geen resultaten beschikbaar. Bij de interpretatie van de vergelijkingen zal hier dan ook rekening gehouden moeten worden evenals met de verschillen in aannames tussen VNK2, HWBP en de beschreven methode.

In afstemming met het Kennisplatform Risicobenadering zullen de resultaten verkregen met de beschreven methode ook nog eens vergeleken worden met de resultaten van een minder geavanceerde methode om tot een vergelijk tussen de kosten voor dijkversterkingen met en zonder inzet van ruimtelijke maatregelen te komen.

3 Algemene uitgangspunten

Om de methode goed te doorlopen is een aantal basisuitgangspunten nodig en de daarbij behorende basisgegevens. In onderstaande paragrafen zijn deze beschreven en onderbouwd. Belangrijk uitgangspunt is dat voor wat betreft de te gebruiken gegevens zo veel mogelijk aangesloten wordt op de schematisaties en parameters uit VNK2 en wat betreft te gebruiken programmatuur die deze gegevens vervolgens verwerkt wordt zo veel mogelijk gebruik gemaakt van de voorlopige inzichten van het Ontwerpinstrumentarium 2014 versie 2, waarin bekende fouten zijn gecorrigeerd (hierna genoemd OI2014) en WTI 2017. Daar waar dat niet mogelijk is of er bewust van afgeweken wordt zal dit dan ook onderbouwd worden. In onderstaand kader wordt de ontwikkeling van WTI 2017 en OI2014 kort toegelicht.

Ontwerpinstrumentarium 2014 (OI2014) en Wettelijk Toetsinstrumentarium 2017 (WTI 2017)

In april 2013 heeft de minister van Infrastructuur en Milieu de Tweede Kamer geïnformeerd dat zij op 1 januari 2017 de overstap wil maken van een norm voor waterkeringen gebaseerd op een overschrijdingskans van waterstanden naar een norm gebaseerd op een overstromingskans. Omdat de gevolgen van een overstroming afhankelijk zijn van de locatie van de bres, voorziet zij een situatie waarbij voor verschillende dijktrajecten binnen een dijkkring verschillende normhoogten kunnen gelden (differentiatie). Om de overstap naar de overstromingskansnormen te maken moeten alle processen die de waterveiligheid borgen hierop zijn ingericht. Voor de uitvoering van de processen dienen tegelijkertijd adequate instrumenten beschikbaar te zijn. Binnen verschillende programma's en projecten vinden hiertoe de noodzakelijke werkzaamheden plaats. Dit geldt zowel voor de toetsinstrumenten als voor de instrumenten om dijken te ontwerpen.

WTI 2017

De afgelopen jaren hebben waterkeringbeheerders via het onderzoeksprogramma VNK2 kennis kunnen maken met de overstromingskans en de bijbehorende veiligheidsbenadering. Inmiddels loopt het programma WTI 2017 dat gericht is op de ontwikkeling van het wettelijke toetsinstrumentarium. De planning van het WTI-programma is dat een concept van het nieuwe wettelijke toetsinstrumentarium 1 januari 2016 wordt opgeleverd. Dat betekent dat op dit moment WTI 2017 nog in ontwikkeling is en dat de huidige inzichten nog niet de definitieve inzichten hoeven te worden.

OI2014

In het kader van toekomstbestendig ontwerpen is het noodzakelijk dat bij het ontwerpen van waterkeringen binnen het nieuwe hoogwaterbeschermingsprogramma rekening wordt gehouden met de nieuwe norm. Voor de korte termijn is ervoor gekozen om op basis van de inzichten uit VNK2 en WTI 2017 een ontwerpinstrumentarium op te stellen dat zo goed mogelijk anticipeert op de nieuwe norm. Voor de lange termijn wordt in 2018 een nieuw ontwerpinstrumentarium voorzien.

Met het ontwerpinstrumentarium 2014 (OI2014) moet het mogelijk zijn om in de overgangsfase naar de nieuwe norm tot ontwerpen te komen voor waterkeringen. Er is voor gekozen om zoveel mogelijk aan te sluiten bij het huidige instrumentarium.

Vanuit een gegeven voorlopige overstromingskansnorm per dijktraject wordt een faalkanseis per doorsnede en mechanisme afgeleid. Bij deze faalkanseis worden hydraulische belastingen en veiligheidsfactoren afgeleid, beide zijn onderdeel van het ontwerpinstrumentarium 2014. Met de veiligheidsfactoren en hydraulische belastingen kan met de huidige leidraden en technische rapporten een waterkering worden ontworpen. Het Programmabureau HWBP zal zorgdragen voor kwaliteitsborging en evaluatie. Bij het ontwikkelen van het ontwerpinstrumentarium 2014 zijn pragmatische keuzes gemaakt. Daarbij is er nadrukkelijk naar gestreefd om afkeuren in de toetsronde die volgt direct na aanleg of versterking te voorkomen – liever een iets te zwaar ontwerp dan een later afgekeurd ontwerp. Daarbij moet worden opgemerkt dat het ontwerpinstrumentarium geen ontwerpen hard zal voorschrijven maar louter bedoeld is als leidraad bij het ontwerpen van dijken.

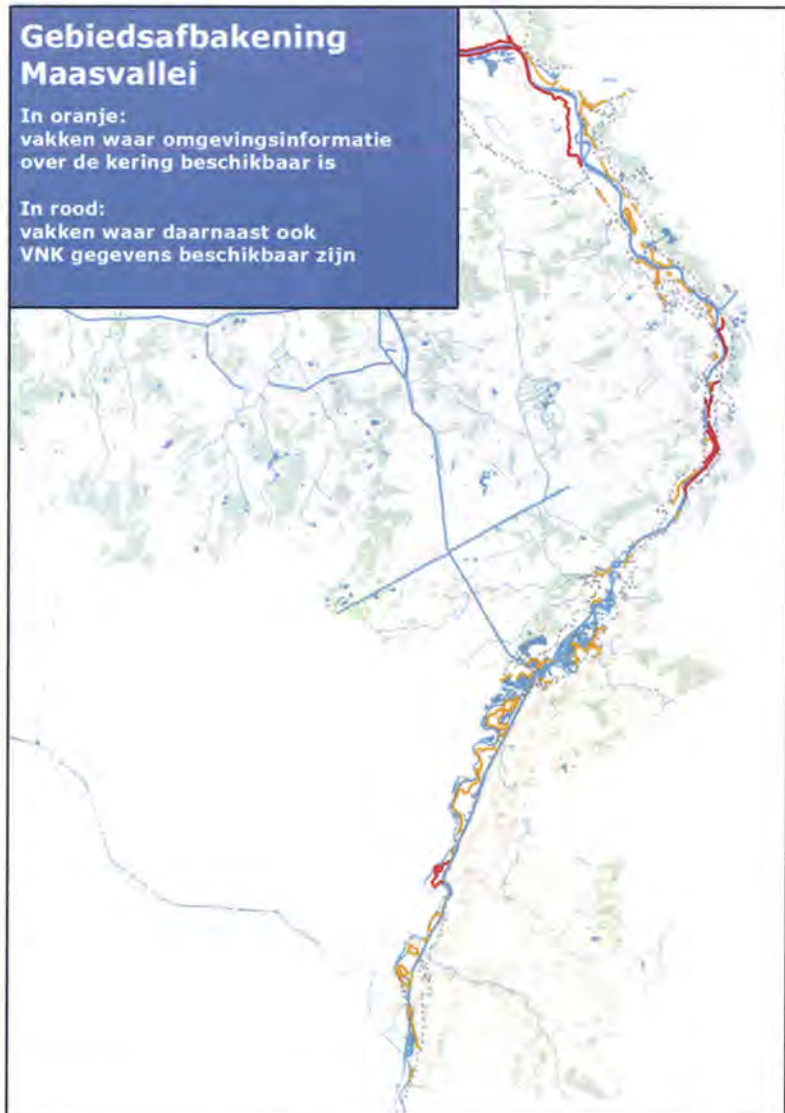
Hierbij moet worden opgemerkt dat OI2014 en WTI 2017 op dit moment nog in ontwikkeling zijn en de beschreven waarden mogelijk zullen afwijken van de in het uiteindelijke WTI 2017 en OI2018 gehanteerde waarden. Dit zal waarschijnlijk vooral gelden voor de invoergegevens voor het ongedraineerde rekenen voor het faalmechanisme macrostabiliteit. Daarvoor wordt nog een grote verandering verwacht. Voor de afvoerstatistiek met GRADE, die overgenomen is uit het OI2014-versie 3, worden nog beperkte aanpassingen verwacht.

3.3 Bodemdaling

Het optreden van bodemdaling in zettingsgevoelige delen van Nederland leidt tot zakken en kruindaling van waterkeringen. Deze daling op korte en lange termijn wordt veroorzaakt door seculaire zetting of kruip van samendrukbare bodemlagen bestaande uit klei en veen die onder waterkeringen voorkomen. Door klimaatveranderingsprocessen kan de bodemdaling versterkt optreden. Het is complex om de lokale effecten te voorspellen omdat de bodemopbouw kan variëren en het lokale waterbeheer een bepalende factor kan zijn. Ook de ouderdom en de kwaliteit van de dijkconstructie spelen een rol. De bodemdaling moet bij het bepalen van de benodigde dijkverhoging worden meegenomen in de vorm van een opgave.

Door Deltares is voor het Deltaprogramma Rivieren

na contact met de waterkeringbeheerders een aantal kaarten gemaakt met opgave over een periode van 50 dan wel 100 jaar. Hieruit blijkt dat de grootste bodemdalingsopgaves liggen in de overgangsgebieden. In de IJsseldelta bedraagt de bodemdalingsopgave bijvoorbeeld ongeveer 0,15 m tot 2050. Een vergelijkbare opgave is vastgesteld voor de benedenloop van de Maas. De opgave langs de Waal/Merwedede is iets groter en bedraagt 0,1 tot 0,3 m. De grootste bodemdalingsopgave treedt op langs de Lek en bedraagt ongeveer 0,20 tot 0,40 m tot 2050. Een uitgebreidere beschrijving van de opgave is te vinden in Asselman et al. (2014). Zoals eerder beschreven is het een complex en lokaal effect en in het genoemde rapport wordt dan ook aangeraden betere, mogelijk bij waterschappen beschikbare datasets te gebruiken bij het ijken en verbeteren van de kaarten (en achterliggende gegevens). Het gaat dan om datasets waarvoor echte metingen omtrent de daling zijn gedaan. Op dit moment zijn die data echter nog niet landelijk beschikbaar en is de dataset gebruikt voor het Deltaprogramma Rivieren de best beschikbare set. Er is dan ook voor gekozen deze (mogelijk conservatieve) gegevens voor de bodemdalingsopgave te gebruiken.



Figuur 19: Beschikbaarheid van gegevens langs de Maasvallei

deze data. VNK-vakken hebben in het rivierengebied een gemiddelde lengte van ongeveer één kilometer. De belastinggegevens en de bodemdalingsgegevens worden evenals die voor de normen dus vertaald naar dit detailniveau. Voor de belastingparameter 'waterstand' geldt dat die bepaald wordt aan de teen van de dijk ter hoogte van het binnen VNK 2 gebruikte profiel. Dit profiel wordt zoals gezegd als representatief voor het gehele VNK-vak beschouwd. Omdat de waterstand niet altijd exact ter plekke van het profiel uitgevoerd is, wordt de waterstand bij het dichtstbij het VNK-profiel gelegen WAQUA-uitvoerpunt gebruikt. Deze worden gecombineerd met de gegevens over het profiel. Hierdoor kan de belasting soms op een iets ander punt dan waar het profiel gelegen is bepaald zijn en deze iets afwijken van wat die zou moeten zijn. De fout die hierdoor gemaakt wordt is echter verwaarloosbaar klein (maximaal enkele centimeters, maar in de meeste gevallen slechts millimeters). Voor de bodemdaling zijn er zoals gezegd geen betere landelijke gegevens beschikbaar. De VNK-profielen gelegen op de verschillende normtrajecten worden hierdoor geacht allen onderhevig te zijn aan een zelfde mate van bodemdaling. Door de heterogeniteit van de ondergrond deze kan echter lokaal afwijken. Hoe groot die afwijking kan zijn is niet goed in te schatten. Daarvoor zou lokaal onderzoek nodig zijn.

Hoewel uitgegaan wordt van VNK gegevens kan het zijn dat er lokaal inmiddels betere gegevens beschikbaar zijn. Deze kunnen gebruikt worden mits ze in het juiste formaat en op tijd beschikbaar zijn. Voor de Maaskades geldt dat er binnen het vervolg van VNK nog aan gegevens gewerkt wordt. Zodra die beschikbaar zijn kunnen die ook verwerkt gaan worden.

3.6 Dijken

3.6.1 Geometrie

De huidige ligging en staat van de dijken vormt het uitgangspunt voor de berekeningen. Dit geldt echter niet voor de situatie van de dijken rond een aantal Ruimte voor de Rivierprojecten. Het gaat dan om de maatregelen hoogwatergeul Veesen-Wapenveld, de dijkverleggingen Voorsterklei en Cortenoever, de dijken rond Bypass Kampen langs de IJssel, Munnikenland langs de Waal en de Overdiepse polder langs de Bergsche Maas. Omdat er voor gebruik in de beschreven methode voor deze nieuwe dijktrajecten nog geen informatie beschikbaar is worden in de berekeningen kengetallen gebruikt in plaats van de echte dijk-informatie. Zowel voor het bepalen van de fragility-curves als voor het bepalen van de kosten bij eventuele dijkversterkingen is informatie over de geometrie van de dijk nodig. De informatie over de geometrie van de dijken zal gebaseerd worden op de VNK gegevens. Ook de effectieve strijklengtes en bodemdieptes voor de golfoplopberekeningen spelen een belangrijke rol maar zijn onderdeel van de aangeleverde WAQUA-databases.

3.6.2 Ligging

De op dit moment beschikbare gegevens over dijken lijkt niet op elkaar aan te sluiten. Zo is de toetsvakindeling en daarmee de ligging van afkeuringen (vanuit HWBP) niet gelijk aan de vakindeling die voor VNK gehanteerd is. Bij de te ontwikkelen methode wordt aangesloten op de vakindeling van VNK. Deze vakken zijn ongeveer 1 km lang.

De uiteindelijke berekeningen worden per dijkvak uitgevoerd. Normtrajecten bestaan uit een aantal dijkvakken. De belasting op de dijk wordt op een punt binnen dit vak bepaald en deze wordt als representatief voor het vak als geheel beschouwd. Voor deze berekeningen wordt echter wel rekening gehouden met de verschillen binnen het dijkvak. Zo wordt de bebouwing, de reeds aanwezige constructies, etc. wel verwerkt in de kosten die gemaakt moeten worden aan het dijkvak. Meer over de bepaling van de kosten in hoofdstuk 6 en in de systeemdocumentatie KOSWAT (2014). Afgekeurde dijkvakken uit het HWBP kunnen korter zijn dan de eerder genoemde gemiddelde lengte van de VNK vakken. Dit betekent dat de

De normering per mechanisme gaat er echter van uit dat het moment van falen exact te voorspellen is op basis van de evenwichtsbeschouwingen, namelijk als die groter dan 10 l/s/m is. De belasting is dan zodanig dat een van de faalmechanismes optreedt in een mate die groter is dan volgens dit criterium is zou worden toegestaan. Door het kiezen van een relatief hoog kritiek overslagdebiet van 10 l/s/m wordt er rekening mee gehouden dat de dijk reststerkte bezit ten opzichte van het overslagdebiet waarmee de dijk destijds is ontworpen (veelal 1 l/m/s langs de Waal). In de nieuwe overstromingskansbenadering wordt voor het falen de zogenaamde Ultimate Limit State opgezocht met relatief hoge waarden. De dijk bezwijkt dan "vrijwel". In het ontwerp is uitgegaan van standzekerheid (vaak een gebruikstoestand en geen uiterste grenstoestand) en zijn de waarden van het kritieke debiet veel lager omdat men de reststerkte niet mag opsouperen. In het OI2014, WTI 2017 mag dit volgens de voorlopige inzichten wel en zullen hoge kritieke overslagdebieten gaan worden gehanteerd. De uitdaging is dit debiet zo goed mogelijk in te schatten zonder de reststerkte (zijnde het verschil met het oude ontwerpdebiet) daarbij te overschatten.

De ultimate limit states die gebruikt worden binnen het WTI 2017 dienen dus het moment van bezwijken zo goed mogelijk te voorspellen. Historisch gezien zijn er vaak bruikbaarheidsgrenstoestanden gehanteerd. Omdat het WTI 2017 met name bestaande kennis toepast, zitten er nog veel bruikbaarheidsgrenstoestanden in de toegepaste methodiek waardoor faalkansen overschat zullen worden.

3.7.2 Onzekerheden

Voor het verwerken van onzekerheden in zowel de statistiek als de modellen en de parameters wordt OI2014 (versie 2 gecorrigeerd) gevolgd. Daarin wordt een uit GRADE afkomstige werklijn gebruikt die voor OI2014-versie 3 is afgeleid. In deze werklijn is met overstromingen en noodmaatregelen in Duitsland doch zonder aftoppen van de meest extreme afvoeren rekening gehouden. In OI2014 is er voor gekozen een werklijn te nemen waarin geen statistische onzekerheden door uitintegreren zijn meegenomen. De totale toeslag op de waterstand is derhalve de som van modelonzekerheden en statistische onzekerheden. Deze bedraagt 30cm. Dit getal wordt in OI2014 achteraf zowel aan het MHW als aan het HBN toegevoegd. De waterstanden waarbij de fragility-curve voor een zekere herhalingstijd wordt afgelezen moeten met 30cm worden verhoogd. Deze keuze is binnen OI2014 gemaakt om de toeslagen eenvoudig te houden, mede ingegeven door het feit dat de frequentieafhankelijkheid nog punt van onderzoek is en niet vast staat. Ook is nog geen rekening gehouden met een mogelijk te lage ruwheid in Duitsland waardoor de waterstanden in Nederland iets zouden worden overschat.

Mogelijkerwijs zorgen de diverse aannames voor enige overschatting van de faalkansen.

3.7.3 Kosten

Voor het ramen van de kosten voor dijkversterkingen en rivierverruimende maatregelen is gebruik gemaakt van de zogenaamde Standaardsystematiek voor Kostenraming (SSK-ramingssystematiek) gangbaar binnen de gehele grond-, weg- en waterbouwsector (GWW-sector). Daarbij is het prijspeil van 1 januari 2013 aangehouden.

Evenals binnen het Deltaprogramma gangbaar was is er een discontovoet van 5,5% aangehouden. Deze is in 2009 vastgesteld door het kabinet. Op dit moment wordt een advies aan het kabinet voorbereid waarin zal worden voorgesteld de discontovoet naar beneden bij te stellen. Om zicht te krijgen op het effect van een verandering in de discontovoet zullen erin de analyses uitgevoerd worden met verschillende lagere discontovoeten.

Daarnaast is er om beter aan te sluiten bij de praktijk, voor gekozen de dijken niet direct in 2015 te versterken. Prioritaire vakken uit het HWBP worden in 2025 versterkt. De overige vakken worden in 2035 of later versterkt.

is dat een 16000 m³/s afvoer, GRADE heeft een 15000 m³/s afvoer bij 1:1250 kans). Echter, naar de toekomst toe wordt het verschil kleiner. Bij hogere norm wordt bovendien het aftoppen in het Deltaprogramma dermate belangrijk dat de afvoer onder die van de GRADE-werklijn komt te liggen. Het verschil wordt mede verklaard uit de noodmaatregelen in Duitsland waarmee in het Deltaprogramma geen rekening is gehouden, en anderzijds doordat het Deltaprogramma zeer strikt aftopt. Voor een overstromingskans van 1:40.000 jaar-1 (ca. een trajectnorm van 1:30.000) vindt GRADE een piekafvoer van 18.900 m³/s bij Lobith in 2075 (lineair geïnterpoleerd tussen 2050 en 2100, te weten 18.200 m³/s en 19.600 m³/s). Voor het Deltaprogramma wordt gevonden 17.500 m³/s (een kruinhoogteverschil van ca. 60cm op de Waal). Een testberekening met aftoppen in GRADE op 20.000 m³/s geeft een piekafvoer van 18.650 m³/s in 2075, vrij dicht bij de niet afgetopte waarde. Het Deltaprogramma topt derhalve erg sterk af, en naar de mening van de GRADE werkgroep te fors. De GRADE lijn lijkt realistischer maar ligt mogelijk iets te hoog. Daarbij mag het verschil in afvoer echter niet zomaar 1 op 1 terugvertaald worden naar een lager kruinhoogte omdat de normeis even streng blijft. Indien wordt afgetopt zal de waterstand dalen maar moet dit vanwege dezelfde normeis gecompenseerd worden door een hardere wind met grotere golfloop. Dit effect reduceert het effect van aftoppen in de regel behoorlijk.

Concluderend: Het is zeer aannemelijk dat het Deltaprogramma te fors afkapt, de GRADE werklijn ligt mogelijk wel iets te hoog (0-20cm bij 1:40.000) maar lijkt wel realistischer.



Figuur 1. Vergelijking GRADE afvoerstatistiek met statistiek Deltaprogramma

2. Opbouw onzekerheidstoeslag

De onzekerheidstoeslag wordt opgebouwd uit de som van statistische onzekerheid en modelonzekerheid.

De modelonzekerheid is afgeleid middels een hydra-ring analyse (Deltares, 2015) van de onzekerheden in de waterstand. De onzekerheden in de golfloop worden langs de rivieren genegeerd omdat er momenteel teveel onzekerheid is over de uitkomst hiervan (deze is volgens sommigen heel klein en volgens anderen heel groot). Deze Hydra-Ring analyse laat een modelonzekerheid zien van ca. 30cm. De belangrijkste oorzaken van de modelonzekerheid zijn de ruwheid van de modelbodem, en de afvoerverdeling bij de splitsingspunten.

De statistische onzekerheid is geïnterpreteerd als de onzekerheid die zou worden gevonden in de piekafvoer bij Lobith door alle onzekerheden in GRADE uit te integreren. Deze uitkomst is sterk afhankelijk van de herhalingstijd. In OI2014 wordt nu overal uitgegaan van een onzekerheid bij een overstromingskans van 1:10000 jaar-1. De onzekerheid met betrekking tot noodmaatregelen in Duitsland is al meegenomen in de GRADE werklijn.

De resulterende statistische onzekerheid die dan wordt gevonden is voor 2050 en 2100 dan ca. 6cm.

De netto onzekerheid is dan wortel ($30^2 + 6^2$) = wortel (936) = 30,5cm. Afgerond is dit 30cm. Deze toeslag geldt momenteel voor de gehele Rijntakken (uitgezonderd. Benedenrivieren en IJsseldelta), maar niet voor de Maas.



Figuur 21: Deel van de beschikbare gegevens voor een stuk langs de Waal waarbij de HBN's aan de teen van de dijk zijn bepaald.

4.4 Maatregelen

Voor alle waterstanden wordt uitgegaan van de optelbaarheid van maatregelen zoals ook in de blokkendoos PKB en DPR gedaan is voor de MHW's. Op basis van de resultaten van berekeningen met de totale VKS in het Deltamodel bleek dat dit een acceptabele aanname te zijn. Op de Rijntakken waren de verschillen tussen de 0 en 10 cm. In de Maasvallei waren de verschillen lokaal groter. Daarbij moet worden opgemerkt dat het effect van de maatregelen met verschillende andere modellen bepaald was dan het Deltamodel. Veelal was dit een binnen het Deltaprogramma ontwikkeld model maar soms betrof het een door de regio zelf gebruikt model.

Op basis van deze resultaten wordt verwacht dat dit ook zal gelden voor de optelbaarheid van waterstandseffecten van ruimtelijke maatregelen bij waterstanden anders dan de MHW. Hoewel maatregelen elkaar onderling kunnen beïnvloeden (waterstands-verlaging door maatregel 1 kan er bijvoorbeeld voor zorgen dat maatregel 2 pas later instroomt), zal dit gezien de geringe hoeveelheid in te zetten maatregelen, die ook nog eens geen of nauwelijks overlap hebben in de situering van het waterstandseffect, waarschijnlijk niet optreden. Als er in een verdere ontwikkeling van de methode meer maatregelen tegelijk ingezet zouden moeten worden, dan is de optelbaarheidsaanname mogelijk niet meer geldig en zou hier nader naar gekeken moeten worden.

De inzet van maatregelen wordt vertaald in een verandering van de belasting aan de teen van de dijk. Inzet van maatregelen heeft echter ook effect op de lokale strijklengtes en de bodemdieptes. Binnen deze methode wordt hier rekening mee gehouden. Beiden hebben ook een effect op de faalkans van de dijk. Voor de nabij de maatregel gelegen profielen heeft de inzet van rivierverruimende maatregelen dus ook effect.

5 Sterkte van dijken

In hoofdstuk 2 is reeds ingegaan op het werken met fragility-curves. In dit hoofdstuk volgt een verdere uitleg van de bepaling van de sterkte van de dijk. Voor de bepaling van de sterkte van de dijk worden drie faalmechanismen beschouwd golfoploop en overslag (erosie binnentalud), macrostabiliteit binnenwaarts en piping.

5.1 Algemene aanpak

5.1.1 Uitgangspunten bij het bepalen van de faalkans

Met de nieuwe normering en de overgang van overschrijdingskansen naar overstromingskansen is ook de faalkansverdeling over de faalmechanismen aangepast; theoretisch was deze verdeling 90% voor golfoploop en overslag en 10% voor de overige bekende faalmechanismes. In het OI2014 wordt nu een default verdeling van de faalkans gegeven van 24% voor overloop en overslag en opbarsten en 24% voor piping. Voor macrostabiliteit is standaard 4% gereserveerd. In totaal is 70% gereserveerd voor de zogenaamde VNK mechanismen en 30% voor overige. In Tabel 5.1 is een overzicht gegeven van deze verdeling. Er mag echter worden afgeweken van deze faalkansverdeling, mits de totale faalkans aan de norm voldoet. In de beschreven methode wordt voorlopig uitgegaan van de default faalkansverdeling. De methode leent zich er toe een andere faalkansboekhouding te gebruiken. De reden om wel van de standaardboekhouding gebruik te maken is dat voor een eerste analyse hier ook binnen HWBP waarschijnlijk van uitgegaan zal worden. Pas als daar aanleiding voor is zal er in de praktijk vermoedelijk pas lokaal gerekend gaan worden met een afwijkende faalkansboekhouding.

Type waterkering	Faalmechanisme	Percentage
Dijk	Overloop en golfoverslag	24%
	Opbarsten en piping	24%
	Macrostabiliteit binnenwaarts	4%
	Beschadiging bekleding en erosie	10%
Kunstwerk	Niet sluiten	4%
	Piping	2%
	Constructief falen	2%
Overig		30%
Totaal		100%

Tabel 5.1: Faalkansbegroting – maximaal toelaatbare faalkansen als percentage van de overstromingskansnorm. (uit: Achtergrondrapport Ontwerpinstrumentarium 2014, RWS WVL, 2013)

Er wordt in de methode van uitgegaan dat een van de faalmechanismen erosie binnentalud, macrostabiliteit binnenwaarts of piping/opbarsten maatgevend zal zijn voor het bepalen van het ruimtebeslag en daarmee de kosten van de dijkversterking. Bij het bepalen van de faalkans per mechanisme wordt wel rekening gehouden met het bestaan van de overige faalmechanismen, door er voor te zorgen dat het totaal van de drie faalmechanismen slechts op 52% uitkomt. De rest van de faalkansruimte wordt toegekend aan kunstwerken, bekleding en de zogeheten niet-VNK mechanismes (overig). Er wordt echter aangenomen dat de kunstwerken, erosie bekleding en de overige faalmechanismes geen significante invloed op het verschil in kosten ten gevolge van verschillende rivierverruimende maatregelen hebben. Bij deze mechanismes leidt een hogere belasting niet of nauwelijks tot een groter ruimtebeslag van de waterkering.

Er wordt gerekend met een Matlab implementatie van deze regel. Dezelfde implementatie zal worden gebruikt door het "cluster probabilistisch" van WTI 2017 ter kalibratie van de partiële factoren en ter verificatie van de rekenkernel. Er wordt dus gebruik gemaakt van de voorlopige inzichten van WTI 2017.

Piping: Veranderingen ten opzichte van verleden

De beoogde WTI 2017 piping methodiek wijkt op een aantal punten af van de methodiek in het verleden. Om te beginnen zijn de kanseisen anders doordat de norm nu afhankelijk is van de faalkans- en lengte-effect. Het is nieuw dat het mechanisme piping hierop wordt getoetst.

Daarnaast zorgen twee wijzigingen in de rekensystematiek voor piping er voor dat de rekenresultaten veranderen:

- Ten eerste is de formule van Sellmeijer aangepast. Een constante is opnieuw gekalibreerd en de veiligheid is afhankelijk geworden van een nieuwe parameter: de Representatieve korreldiameter (de D_{70}). Bij een korreldiameter van 180 micrometer, in de pipinggevoelige zandlaag, verandert er niets. Bij een grovere korrel worden de resultaten ongunstiger, bij een fijnere korrel gunstiger. Netto blijkt dat de resultaten hierdoor significant ongunstiger worden.
- Ten tweede wordt niet uitsluitend meer gekeken naar de kans op piping, maar naar de kans op piping (het ontstaan van kwelwaterkanaaltjes onder de waterkering door), naar de kans op heave (het meevoeren van gronddeeltjes meest zand door de kanaaltjes) en de kans op opbarsten (het openbarsten van de ondergrond waardoor de gronddeeltjes naar de oppervlak komen). De kans op het optreden van de drie genoemde mechanismes worden met elkaar vermenigvuldigd. Alle drie de mechanismes moeten dus gezamenlijk optreden voordat het mechanisme tot dijkfalen kan leiden.

Er wordt uitgegaan van de ondergronddata verzameld binnen VNK, zoals ook al beschreven is in paragraaf 3.6.3. Het VNK ondergrondmodel kan twee verschillende zandlagen bevatten. In dat geval wordt de diktes van de twee zandlagen bij elkaar opgeteld en de maximale waarde voor de doorlatendheid gekozen. Voor de berekeningen wordt gebruik gemaakt van de representatieve korrelgrootte (de D_{70}) uit de bovenste laag. Er wordt rekening gehouden met dezelfde statistische onzekerheden als binnen VNK. Het lengte-effect wordt gehanteerd conform OI2014.

De berekeningen worden volledig probabilistisch uitgevoerd. Dat wil zeggen dat er in de berekeningen expliciet rekening gehouden wordt met de statistische onzekerheden van iedere parameter. In de praktijk zullen de ontwerpen semi-probabilistisch plaatsvinden, maar wanneer de kalibratie van de partiële factoren goed heeft plaatsgevonden hoort uit beide methodes een gelijksoortig ontwerp te komen. Veelal echter worden de semi-probabilistisch berekende ontwerpen iets conservatiever gedimensioneerd. Volledig probabilistisch wordt het ontwerp echter niet berekend aangezien voor iedere conditionele waterstand de faalkans bepaald wordt. De parameters vermeld in paragraaf 5.3.1 worden als stochast behandeld.

In G zijn de stappen om piping te berekenen bulletsgewijs opgesomd.

Erosie binnentalud (overslag/overloop)

Voor het bepalen van de fragility-curve voor overloop en golfoverslag wordt PC-Ring gebruikt. De faalkansen gegeven een bepaalde waterstand worden met behulp van een FORM routine bepaald in PC-Ring op basis van de Z-Functie:

$$P_f(Z=R-S<0) = m_{q,c} * q_c - m_{q,o} * q_o / P_t$$

De m-waarden $m_{q,c}$ en $m_{q,o}$ zijn de modelfactoren die standaard op 1.0 staan met een standaardafwijking van 0.5. Het overslagdebiet dat tot op heden veelal toegestaan wordt ligt tussen de 0,1 en 1 l/s/m. Aangezien de nieuwe veiligheidsbenadering uitgaat van een overstromingskans is de maatgevende situatie een situatie is waarin net wel/geen overstroming optreedt. Dit legitimeert het gebruik van een groter kritiek overslagdebiet. In het

zonering gehanteerd als in het voorlopige WTI 2017. Verder worden oplossingen voor macrostabiliteitsproblemen in de methode alleen gezocht in het aanleggen van een berm. Overige oplossingen zoals het verflauwen van het talud worden buiten beschouwing gelaten. De ondergrond wordt geschematiseerd volgens het WTI 2017 stochastische ondergrondmodel in combinatie met default ongedraineerde parameters. Maaiveldlijnen worden gebruikt conform VNK2.

Deze modellen zijn nog niet eerder op deze schaal toegepast. Echter aangezien het beeld nu is dat de modellen ook in WTI 2017 worden gebruikt om mee te gaan rekenen worden ze ook in de hier beschreven methode toegepast worden.

In G zijn de stappen om macrostabiliteit te berekening bulletsgewijs opgesomd. In onderstaande tekstblok wordt nog dieper ingegaan op de overstap van gedraineerd naar ongedraineerd rekenen.

Macrostabiliteit; van gedraineerd naar ongedraineerd rekenen

Grondsterkte hangt af van waterspanningen en korrelspanningen. Als de waterspanningen toenemen, nemen de korrelspanningen af en neemt dus de sterkte af. Dit is onder andere de reden waardoor een dijk minder sterk wordt tijdens hoogwater.

Wanneer je een glijcirkel beschouwt, vindt er langs het glijvlak vervorming plaats. Het is de vraag of deze vervorming op een dusdanig kleine schaal is dat de waterspanningen snel kunnen afvloeien (gedraineerd) of dat hier onvoldoende tijd voor is (ongedraineerd). In Nederland hebben wij dit altijd gedraineerd gedaan terwijl de wereldwijde standaard ongedraineerd was. Het idee is om nu ook hier de overstap te maken.

Het is belangrijk om te weten dat ongedraineerd rekenen zeker niet tot lagere veiligheden zal leiden. De ervaring met de Markermeerdijken is juist dat ongedraineerd rekenen leidt tot minder onzekerheden, en dus minder spreiding op de sterkte parameters en dus hogere veiligheidsfactoren. Ongedraineerd rekenen hoort preciezer te zijn, maar daarvoor is wel lokaal onderzoek nodig.

Het is van belang bij een beleidsstudie dat gekozen wordt voor sterkte-eigenschappen die representatief zijn voor het gemiddelde gedrag over een langere strekking van de waterkering. Omdat er in Nederland relatief weinig ervaring is met de ongedraineerde sterkte-eigenschappen, is het lastig hiervoor goede "representatieve" waardes te kiezen. Het toevoegen van een sondering in een dwarsdoorsnede zal de lokale onzekerheden drastisch doen verkleinen waardoor er mogelijk met een veel sterker materiaal gerekend kan worden. Nu we in deze studie met landelijke representatieve waardes rekenen zijn de onzekerheden erg groot en dit vertaalt zich in grotere faalkansen.

De impact van macrostabiliteit is dus mogelijk zo groot omdat we nog niet weten hoe om te gaan met deze nieuwe parameters in beleidsstudies. Lokale informatie is veel belangrijker geworden. Wanneer hier veilige aannames voor gedaan worden, blijken de berekeningen mogelijk conservatieve resultaten te geven. In de voorliggende beleidsstudie zijn ook conservatieve aannames gedaan met betrekking tot de ongedraineerde sterkte die mogelijk niet representatief zijn voor het gedrag over een dijktraject. Of dit daadwerkelijk het geval is blijkt pas wanneer dijktrajecten daadwerkelijk met deze nieuwe methodiek ontworpen gaan worden.

5.3 Beschikbare data

5.3.1 Piping/opbarsten

Voor het model zijn de in de onderstaande tabel genoemde parameters nodig.

Code	Parameter		VNK	SOS*
3001	Dikte cohesieve deklaag	d	Aanw.	Aanw
3002	Dikte zandlaag	D	Aanw	Aanw
3004	Kwelweglengte	L	Aanw	-
3007	Korrel diameter zandlaag	d70	Aanw	Aanw.
3015	Doorlatendheid zandlaag	K	Aanw	Aanw.

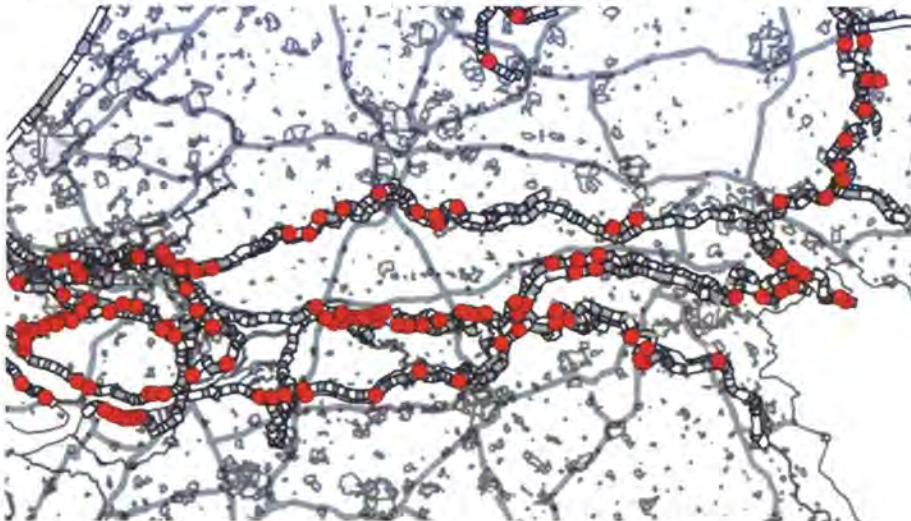
bodemhoogte en strijklengtes aangepast. De effecten van bodemdaling worden bepaald op basis van Deltares (2014).

Wanneer geen bodemhoogte of strijklengte kan worden bepaald op basis van het WAQUA model is de oorspronkelijke bodemhoogte en strijklengte uit de VNK databases gebruikt. Dit komt neer op de situatie voor uitvoering van het Ruimte voor de Rivier programma. Wanneer het effect van een nieuwe ruimte voor de rivier maatregelen worden berekend zal dit voor een aantal punten rondom de deze maatregel mogelijk leiden tot andere bodemhoogtes en strijklengtes (Sleewijk en Varik-Heesselt).

Overigens schrijven OI2014 en WTI 2017 geen overslagdebiet voor, maar mag die per dijkvak verschillen.

5.3.3 Macrostabieleit binnenwaarts

Voor macrostabieleit binnenwaarts kan eveneens gebruik gemaakt worden van de VNK database. De dekking van deze data is echter veel lager dan bij piping.



Figuur 22: Dekking van de Macrostabieleitssommen binnenwaarts in VNK

Voor het faalmechanisme macrostabieleit binnenwaarts is voor een minderheid van de VNK vakken een berekening beschikbaar. Op het traject Gorinchem-Tiel waren er slechts 3 vakken beschikbaar uit VNK. Uiteindelijk is voor een groot deel van de vakken op basis van de overige uit VNK beschikbare data een som voor de macrostabieleit gemaakt.

Tijdens VNK is een prioriteringsslag gemaakt naar de stabiliteitsgevoelige vakken conform de rekenregels en faalkansen van de derde toetsronde. Omdat de prioritering is gemaakt bij een andere dan de nieuwe normering en bij een andere stabiliteitsanalyse dan in deze methode gehanteerd zal worden, is het niet vanzelfsprekend dat de prioritering nog steeds representatief is.

Zoals in paragraaf 3.6.3 beschreven, is voor het WTI 2017 een landsdekkend stochastisch ondergrond model (SOS) opgesteld. Om stabiliteitsberekeningen uit te voeren kan dit model aangevuld worden met gegevens omtrent de geometrie vanuit VNK. De combinatie van het SOS met de VNK-gegevens heeft de voorkeur vanwege de hogere informatiedichtheid die hierdoor ontstaat. Dit betekent ook dat verschillen binnen de te analyseren dijktrajecten beter naar voren komen. Met deze informatie kan vervolgens voor ieder VNK vak een eigen fragility-curve opgesteld worden, wat zoals eerder beschreven binnen VNK niet gedaan is.

6 Kosten

6.1 Kosten van dijkversterking

6.1.1 Profielen

Om de kosten van de dijkversterkingsmaatregelen te kunnen bepalen maken we gebruik van het KOSWAT instrumentarium (**K**osten voor versterken **W**ATerkeringen). KOSWAT wordt gebruikt om over programma's en projecten heen een zelfde kostenbasis te geven aan alle geraamde maatregelen en oplossingen om zodoende ook kosten met elkaar te kunnen vergelijken. De basis voor het huidige KOSWAT is door Deltares gelegd binnen het programma 'Waterveiligheid 21e eeuw' (WV21) in de periode 2009-2010. Vanaf 2011 is KOSWAT doorontwikkeld in opdracht van het Expertise Centrum Kosten (ECK) van het Deltaprogramma met het doel het instrument voor de diverse deelprogramma's van het Deltaprogramma (waaronder DP Rivieren) te kunnen inzetten.

KOSWAT is vooral bedoeld voor het verkrijgen van een eerste indicatie van de kosten voor dijkversterkingen. Hoewel het geen onder OI2014 vallende tool is, is KOSWAT vanaf 2013 tevens doorontwikkeld en ingezet om de programmaramingen te maken voor het HWBP. Door veel Waterschappen is het daarom in meer of mindere mate gebruikt in de voorfase van de HWBP-projecten. Omdat het gebruik van KOSWAT niet voorgeschreven is vanuit OI2014 kunnen de Waterschappen als ze beschikken over betere of nauwkeuriger informatie om kosten te ramen ook van afwijkende informatie uitgaan bij het ramen van kosten voor dijkversterkingen. Echter KOSWAT is wel het enige instrument waarmee op uniforme wijze voor het gehele land ramingen gemaakt kunnen worden voor dijkversterkingsprojecten.

Bij het ramen van de kosten voor de aanleg van een dijk wordt in KOSWAT rekening gehouden met alle gemaakte kosten. Dus niet alleen de kosten voor het aan te leggen grondlichaam of constructie, maar ook de kosten voor het verwijderen van bekleding, bestrating, aan te kopen gronden, etc.. Vanuit de bekende directe kosten worden de totale investeringskosten bepaald met behulp van opslagfactoren volgens de Standaard Systematiek voor Kostenramingen in de Grond Water en Wegenbouw sector (SSK-2010).

In KOSWAT wordt van deze drie parameters een vertaling gemaakt naar een oplossing, in grond waar voldoende ruimte is, constructief waar bebouwing of andere zaken in de weg liggen. Hierbij wordt op de achtergrond een omgevingsdatabase gebruikt. In Figuur 24 is dit nog eens verbeeld met de verschillende oplossingen in volgorde van toepassing. Bij de gevonden mix van maatregelen op een dijkvak worden uiteindelijk de fragility-curvekosten bepaald. In deze analyse worden in een database allerlei vooraf berekende combinaties van de drie parameters klaargezet. Vervolgens wordt vanuit de fragility-curves per mechanisme aangegeven wat de benodigde ΔH , ΔP en ΔS zijn. Uit de database wordt vervolgens bij de juiste combinatie de bijbehorende kostenraming gekozen (al dan niet lineair geïnterpoleerd). Opmerking hierbij is wel dat er in KOSWAT kan blijken dat er lokaal een constructie nodig is waar de fragility-curve gebaseerd is op de constructie van een berm. Meer over de uitgangspunten en algemene opzet van KOSWAT is te vinden in de systeemdokumentatie KOSWAT (Deltares, 2014).

Een voorbeeld: Op een bepaald stuk dijk staan huizen vlak achter de bestaande dijk. Met dit gegeven wordt bij het construeren van een nieuwe fragility-curve (een die er voor zorgt dat aan de gegeven norm kan worden voldaan) geen rekening gehouden. Op basis van de berekeningen is een pipingberm van 25 meter nodig. Dat wordt meegegeven aan de KOSWAT database. Daarin is op deze locatie slechts (of op een gedeelte van het dijkvak) een constructieve oplossing te vinden voor piping. In dit geval komen de oplossingen uit de fragility-curves en KOSWAT niet overeen. De vraag is of dit erg is:

- In theorie ziet de fragility-curve voor een constructie er anders uit dan die voor een oplossing in grond. Dat zou betekenen dat je hier rekening mee zou moeten houden. Constructies reageren immers anders (steilere curve)
- Echter er is een curve geconstrueerd die voldoet (de dijk faalt nu niet). Aan de kostenkant blijkt dat hier de kosten voor nodig zijn die voor een constructie zijn. Kortom de kosten komen goed in beeld.
- Ga je nu de faalkans in de tijd bekijken dan zou die (door de constructie) anders verlopen dan voorspeld op basis van de fragility-curve (op basis van oplossing in grond). Dit zou pleiten voor een terugkoppeling uit KOSWAT naar de curves.

Er is echter voor gekozen dat in deze methode niet te doen aangezien:

- We hebben een dijk geconstrueerd die voldoet en de investeringskosten correct berekend.
- Het effect op de faalkans van het verschil tussen een fragility-curve voor een constructieve en een oplossing in grond is niet groot
- Omdat lange pipingbermen op een gegeven moment niet meer kosteneffectief zijn en ook een te grote impact hebben op de omgeving van de dijk (inpassing), wordt er in praktijk in het ontwerp voor gekozen om op een gegeven moment over te stappen naar een alternatieve (constructieve) maatregel. In deze analyse is dit ondervangen door de kosten van het dijkontwerp af te kappen bij een berm lengte van 100 meter. Uit analyse van de kosten is namelijk gebleken dat afhankelijk van de locatie de kosten voor een berm ten bate van het tegen gaan van piping en een constructieve oplossing tussen de 80 m en 120 m gelijk zijn. Er is op basis hiervan gekozen de maximale berm op 100 m te zetten voor alle dijkvakken. Dit betreft dan de totale breedte van de berm, het verschil tussen ΔP en ΔS in Figuur 23. Meer informatie hierover is te vinden in bijlage H.

KOSWAT ontwerpt op een dijksectie bij een versterking een mix van maatregelen. Dit betekent dat oplossingen in grond en constructief versnipperd over het een dijkvak gelegen zijn. In Figuur 24 is te zien dat de verschillende oplossingen elkaar over een dijkvak afwisselen. Deze stukjes zouden theoretisch ná de versterking ieder een eigen fragility-curve

teen ook met zware machines over de dijk gereden die wellicht wat schade aan het wegdek veroorzaken.

In de praktijk van dijkversterkingen wordt echter van bovenstaande uitgangspunten afgeweken. Er wordt bijvoorbeeld wel gekeken naar buitendijkse en innovatieve oplossingen en ook gaat men in de praktijk over op een constructie als de berekende pipingberm te breed zou worden. Dit zorgt er voor dat de KOSWAT-ramingen mogelijk een overschatting van de daadwerkelijk te maken kosten oplevert. Echter gezien het feit dat alle varianten (dus met en zonder inzet van ruimtelijke maatregelen) op basis van dezelfde uitgangspunten worden bepaald geeft het wel een goed beeld van de relatieve verschillen.

6.2 Kostenramingen rivierverruimende maatregelen en beheer en onderhoud

De kosten voor het aanleggen en beheer en onderhoud van de rivierverruimende maatregelen zijn bepaald binnen DPR. Voor meer informatie over het tot stand komen van deze ramingen wordt verwezen naar Levelt, O., S. Prins (2014).

De kosten voor het beheer en onderhoud aan de dijken (anders dan in de cyclus toetsen en indien nodig versterken) worden in deze methode niet meegenomen. Er is aangenomen dat deze verwaarloosbaar klein zullen zijn in vergelijking met de aanlegkosten en kosten voor versterking van dijken. Bovendien worden deze kosten aan de dijk sowieso gemaakt. Immers de dijk moet ook nu al onderhouden worden.

6.3 Invloed van alternatieve innovatieve pipingversterkingsmaatregelen

Omdat lange bermen zoals eerder beschreven op een gegeven moment niet meer kosteneffectief zijn en ook een te grote impact hebben op de omgeving van de dijk (inpassing), wordt er in praktijk in het ontwerp voor gekozen om op een gegeven moment over te stappen naar een alternatieve, constructieve maatregel. In deze analyse is dit ondervangen door de kosten van het dijkontwerp af te kappen bij een berm lengte van 100 meter. Voor het bedrag dat hierbij geraamd wordt in grond kan veelal ook een constructieve oplossing in de vorm van een kwelscherm gerealiseerd worden (H). De reguliere kwelschermen (CB wanden) die gebruikt worden in KOSWAT (bij overgang 100 m berm lengte) liggen in de orde van 6000-7500 €/m dijk (prijspeil 2013, totale investeringskosten, inclusief BTW).

In de project overstijgende verkenning (POV) piping uitgevoerd in opdracht van het HWBP wordt gezocht naar innovatieve maatregelen waarmee het faalmechanisme piping wellicht tegen lagere kosten duurzaam kan worden opgelost. Een aantal alternatieve maatregelen is reeds getest bij de IJkdijk, en lijken (nu of op termijn) kansrijk. Het lijkt zelfs de vraag of we de vereiste veiligheidsniveaus met traditionele kwelschermen wel kunnen bereiken.

De beschouwde maatregelen (met het bijbehorende kosten) zijn:

- DMC drainagebuizen (kosten in de orde 2500 €/m (investeringskosten, inclusief toeslagen en dergelijke))
- Verticaal ingebracht geotextiel (orde 1250 €/m)
- Verticaal ingebracht grof-zand filter (orde 400-1000 €/m)

Let wel, deze gepresenteerde alternatieve maatregelen hebben zich nog geenszins bewezen in de praktijk, en de bandbreedtes op de gepresenteerde kosten zijn een orde groter dan in KOSWAT gehanteerd.

Een voordeel van deze maatregelen zou zijn dat ze in uitvoering (binnen een bepaald bereik) onafhankelijk zijn van de belasting en norm. De kosten zijn in die zin vast, er zit geen

7 Uitgangspunten samengevat

In de hoofdstukken 3 tot en met 6 worden de uitgangspunten beschreven die bij het gebruik van de methode van toepassing zijn. De uitgangspunten wijken af van de manier waarop in de huidige systematiek dijken worden getoetst en ontworpen. Een aantal van deze uitgangspunten heeft mogelijk ook grote consequenties voor de toetsresultaten en de ontwerpen die voor de dijken gemaakt worden. In onderstaande worden de belangrijkste uitgangspunten nog eens kort beschreven.

7.1 Algemene uitgangspunten

- Begrenzing gebied: De methode is geldig voor het bovenriviereengebied (Rijntakken en Maas)
- Ligging dijken: In de analyses wordt aangenomen dat de dijken liggen op de huidige locaties. Voor de dijken rond een aantal RvdR projecten waarin dijkverleggingen zijn opgenomen wordt gebruik gemaakt van kengetallen. Over deze dijken ontbreekt op dit moment namelijk de juiste informatie.
- Kunstwerken: deze worden in de analyses voorlopig niet meegenomen
- Ligging dijkvakken: In de analyses wordt gebruik gemaakt van de VNK vakindeling.
- Norm: Er wordt getoetst en ontworpen op basis van de nieuwe norm plus norm niveau's in termen van overstromingskansen. Deze aanname heeft voor het grootste deel van het riviereengebied als consequentie dat er op een strengere norm dan nu het geval is getoetst wordt.
- Verder is in de eerste analyses een looptijd aangehouden van 2015 tot 2100 en wordt aangenomen dat de dijken ontworpen worden met een levensduur van 50 jaar.
- De restwaarde van de dijkversterking in 2100 is meegenomen in de analyse. De restlevensduur na 2100 is bepaald als percentage van de totale levensduur van 50 jaar. Dit percentage is vermenigvuldigd met de versterkingskosten van de laatste versterking om de restwaarden (de waarde van de dijkversterking buiten de analyse periode) te bepalen.
- Van bovenstaande zal de verandering in de norm naar verwachting de grootste invloed hebben op de uiteindelijke met de methode berekende resultaten. Immers een hogere norm vergroot de opgave.

7.2 Belasting op dijk

- Nieuwe normen conform DP Veiligheid (mei 2014)
- Waterstandsstatistiek: Conform GRADE-werklijn 9 maart 2015
- Om de onzekerheden in belastingen te verdisconteren wordt er bovenop de waterstanden 0,3 m gezet bij zowel het toetsen van de waterkering als het ontwerpen van de keringen.
- QH-relaties: op basis van nieuwe sommen met en zonder inzet van ruimtelijke maatregelen,
- Effect losse maatregelen op de waterstand - wordt aangenomen dat effect optelbaar is
- Klimaatscenario: In de analyses zal uitgegaan worden van klimaatscenario W+
- In tegenstelling tot WTI 2017 de methode er van uit gaat dat bij afvoeren hoger dan 18.000 m³/s de afvoerverdeling wel conform het beleidsmatige uitgangspunt gehandhaafd wordt
- Bodemdaling en zetting: In de analyses zullen daarvoor dezelfde getallen aangenomen worden als binnen DPR en DPRD ook gebruikt zijn.

Van bovenstaande heeft naar verwachting het meenemen van de nieuwe norm in combinatie met GRADE de grootste invloed.

8 Gebruik methode

8.1 Benodigde en beschikbare informatie plus toepassingsbereik methode

De methode 'Effectiviteit Rivierverruiming' maakt gebruik van de beste landsdekkend te verkrijgen informatie over: de ligging plus sterkte van de dijken, hydraulische informatie, effecten van rivierverruimende maatregelen op de waterstandsstatistiek en kennis om deze te combineren voor dijken in het bovenrivierengebied om te komen tot een faalkansbepaling. De methode bepaalt de relaties tussen sterkte van dijken aan de ene kant en hydraulische informatie aan de andere kant om een afweging te kunnen maken tussen alleen dijken of dijken plus rivierverruiming.

Deze afweging moet gemaakt worden op een ruimtelijk detailniveau waarbij het effect van losse maatregelen uit de voorkeursstrategie rivieren afgewogen kunnen worden tegen HWBP projecten. Rivierverruimende maatregelen hebben veelal een effect over een langer traject van de rivier dan een HWBP project omvat. Bovendien hebbende maatregelen aan beide zijdes van de rivier effect. Dit maakt dat de methode vooral geschikt is om berekeningen te maken voor het rivierniveau.

Ook moet worden opgemerkt dat het instrument bedoeld is voor een beleidsstudie en dus niet geschikt is voor het daadwerkelijk ontwerpen en in detail programmeren van dijkversterkingen. Daarvoor is het detailniveau uiteindelijk te gering en wordt in de methode ook geen rekening gehouden met eventuele beperkingen in budget en capaciteit. Het uitgangspunt volledig probabilistisch te ontwerpen in plaats van de praktijk waarin veelal semi-probabilistisch ontworpen wordt zou in de uiteindelijke resultaten weinig tot geen verschil moeten uitmaken, zeker als informatie van voldoende kwaliteit beschikbaar is.

Tot op heden is de methode alleen toegepast op de Waal van Gorinchem-Nijmegen. Op dit traject is de benodigde informatie op orde gebracht. Voor de riviertakken IJssel en de Nederrijn-Lek is veel van de benodigde informatie ook beschikbaar of beschikbaar te maken en kan de methode worden gebruikt. Voor de Maas en specifiek de Limburgse Maas met weinig keringen maar vooral hoge gronden is de methode op dit moment nog lastiger toe te passen. Dit heeft te maken met de beperkte beschikbaarheid van VNK informatie en daardoor beperkte informatie over de aanwezige waterkeringen (met name voor de Maasvallei). Daarnaast is er nog geen 'vastgestelde' GRADE werklijn voor de Maas en kan de methode nog geen uitspraak doen over de effecten op de hoge gronden (waarvan de grens soms zou kunnen verschuiven).

8.2 Stabiliteit uitgangspunten

Zoals beschreven maakt te methode nu gebruik van de best beschikbare landelijke data. Daarbij maakt het gebruik van het nog in ontwikkeling zijnde toetsinstrumentarium inclusief voorlopige inzichten vanuit WTI 2017 en ontwerpinstrumentarium OI2014. Dit brengt met zich mee dat een aantal parameters en instellingen die binnen de methode gebruikt worden nog in beweging zijn en dus mogelijk nog veranderen.

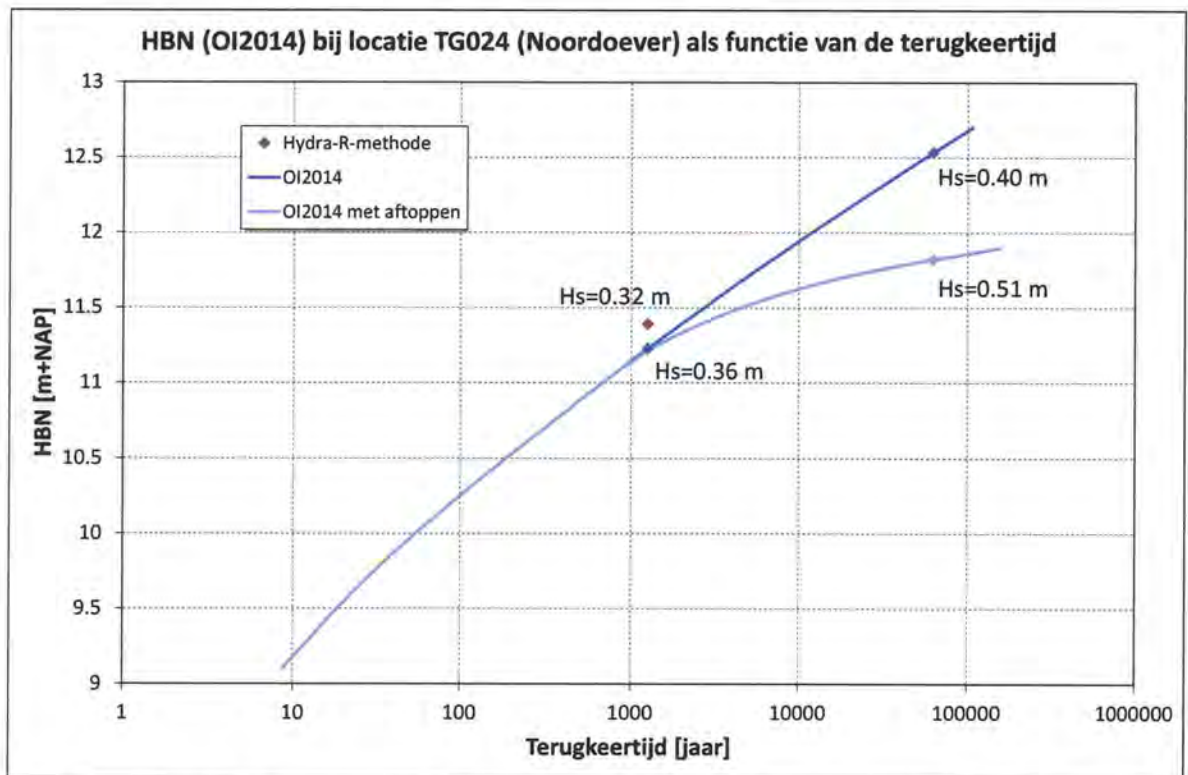
Ook zal blijken dat de toepassing van WTI 2017 en OI2014 in de praktijk tot aanscherping van parameters en instellingen zal leiden. Gevolg daarvan is dat uit de berekeningen die nu gedaan worden met de instrumenten niet anders dan voorlopige conclusies getrokken kunnen worden. Die conclusies zijn echter wel zeer gedegen en goed onderbouwd als uitgegaan wordt van de voorlopige inzichten van OI2014 en WTI 2017. De methode is dus geen beperkende factor maar de informatie op basis waarvan de methode nu werkt mogelijk wel. Middels het uitvoeren van gevoeligheidsanalyses dienen met het huidige instrument de conclusies nader te worden onderbouwd. Dit is alsnog het werk van experts.

9 Bijlages

B Memo HKV “Invloed wind in Blokkendoos instrumentarium”

Als de Rijnafvoer wordt afgetopt op $16.500 \text{ m}^3/\text{s}$, dan kan de waterstand niet hoger worden dan $11,12 \text{ m+NAP}$. Hydra-Zoet berekent een HBN van $11,82 \text{ m+NAP}$. Het verschil met de waterstand moet veroorzaakt worden door de wind. Pas bij een windsnelheid van $12,3 \text{ m/s}$ zijn de golven groot genoeg om - uitgaande van de waterstand van $11,12 \text{ m+NAP}$ - het HBN van $11,82 \text{ m+NAP}$ te realiseren. In Figuur 27 zijn de contourlijnen weergegeven voor deze situatie. De afvoer op de verticale as is de afvoer vóór aftoppen. Het weergegeven HBN is het HBN inclusief het aftoppen. Het zwarte diamantje is het door Hydra-Zoet berekende illustratiepunt. De windsnelheid hierin is gelijk aan $12,3 \text{ m/s}$. Hier hoort een relatief grote golfhoogte bij.

Bij de nieuwe inzichten wordt de berekende golfhoogte dus ook vergroot door het aftoppen van de afvoer.



Figuur 25 Hydraulische belastingniveaus bij locatie TG024 (rechteroever) voor golfoverslag met een overslagdebiet van 1 l/s/m .

waterstand in het illustratiepunt meer zakt dan de toename in benodigde kruinhoogte door golven. Het totaaleffect is dat het HBN dus lager wordt.

Windeffecten op de golven (en daarmee op het HBN en de fragility curves)

Voor oostelijke windrichtingen (NNO, NO, ..., ZZW) in het benedenriviereengebied en alle windrichtingen in het bovenriviereengebied wordt gebruik gemaakt van marginale windstatistiek. Voor de westelijke windrichtingen in het benedenrivieren-gebied, daarentegen, wordt de windsnelheid bepaald op basis van wind-waterstand statistieken.

Onderscheid wordt gemaakt tussen (wind)statistieken inclusief de zogenaamde Volkerfactor en (wind)statistieken exclusief de Volkerfactor. Statistiek inclusief de Volkerfactor impliceert dat de frequenties uit het Rijkooit-Weibull model met een factor 2 verlaagd zijn, omdat de helft van de stormen bij laag water valt en deze stormen derhalve niet meedoen in het creëren van hoge waterstanden. Dit betekent dat er voor het bovenriviereengebied geen correlatie tussen waterstand op de rivier en windsnelheid wordt aangenomen.

De marginale windstatistiek wordt middels de volgende formule beschreven:

$$p = 1 - q = \exp\left[-\exp(-K_r(u))\right]$$

met:

$$K_r(u) = au^2 + bu + c$$

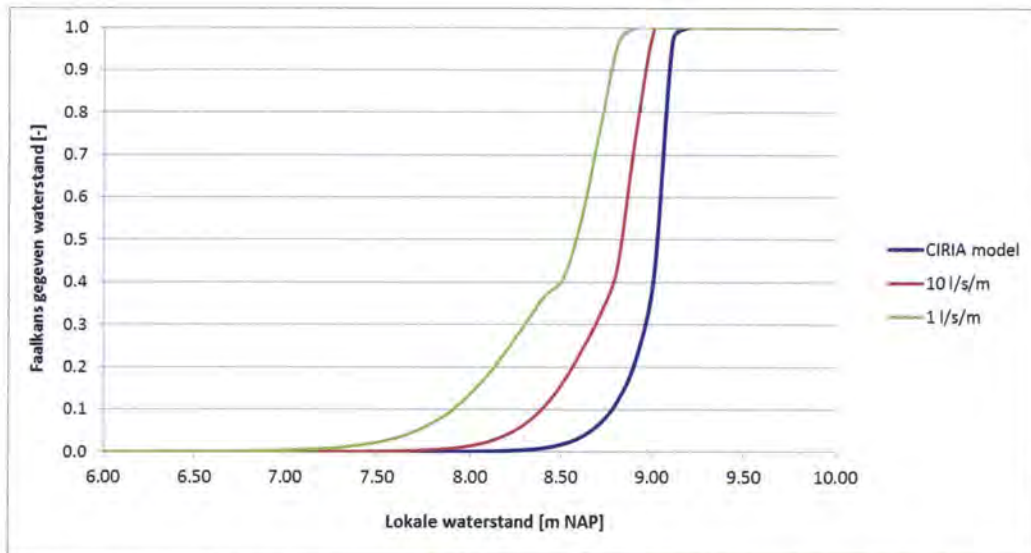
waarin:

- r is de windrichting
- p is de onderschrijdingskans van de windsnelheid
- q is de overschrijdingskans van de windsnelheid

Tabel 1 Parameters van de kwadratische functie $K_r(u)$ (exclusief Volker).

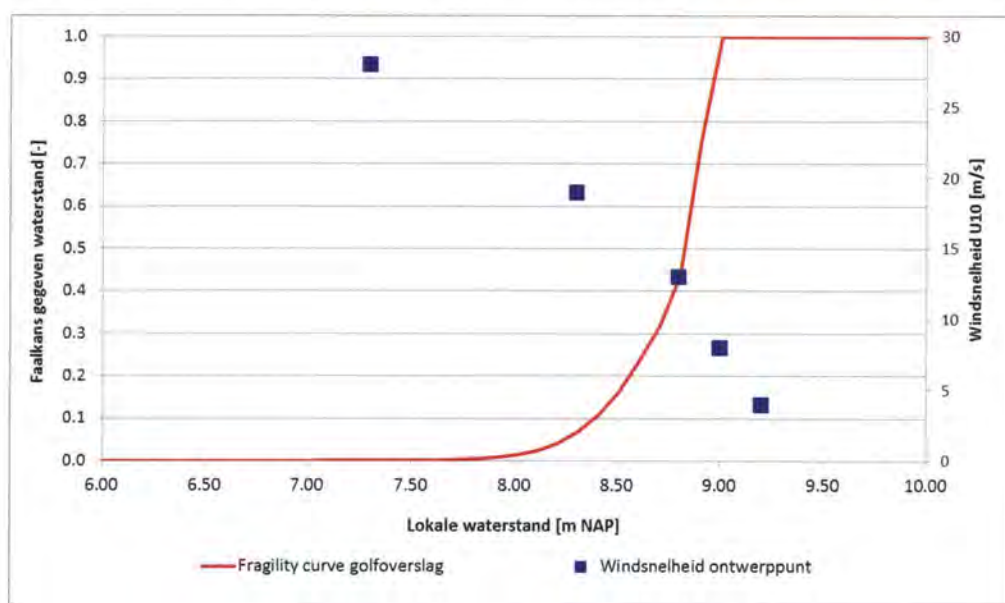
Windrichting	Parameters van $K_r(u)$ voor Schiphol		
	a [s ² /m ²]	b [s/m]	c [-]
N	1.989E-02	7.763E-02	-8.213E-01
NNO	1.960E-02	1.654E-01	-1.461E+00
NO	2.888E-02	0.000E+00	-1.248E+00
ONO	2.889E-02	0.000E+00	-1.282E+00
O	2.895E-02	2.724E-02	-1.058E+00
OZO	2.801E-02	1.013E-01	-1.160E+00
ZO	2.935E-02	6.515E-02	-1.168E+00
ZZO	1.969E-02	1.547E-01	-1.464E+00
Z	2.241E-02	0.000E+00	-8.438E-01
ZZW	1.099E-02	1.475E-01	-1.673E+00
ZW	8.264E-03	1.711E-01	-1.980E+00
WZW	6.746E-03	1.970E-01	-2.042E+00
W	5.186E-03	2.235E-01	-2.088E+00
WNW	5.497E-03	2.244E-01	-1.959E+00
NW	5.192E-03	2.613E-01	-2.008E+00
NNW	9.558E-03	2.162E-01	-1.637E+00

Iedere fragility curve is in feite een verzameling van faalkansberekeningen voor verschillende deterministische waterstanden en hierboven omschreven windstatistiek. De faalkansen worden in eerste instantie per windrichting berekend en daarna gecombineerd voor alle windrichtingen, waarbij rekening wordt gehouden met de kans dat een bepaalde windrichting voorkomt.



Figuur 30: Fragility curves voor golfoverslag voor een dijkvak bij Waardenburg (kruinhoogte is 9,3m NAP)

De bovenstaande fragility curves doen vermoeden dat voor lagere waterstanden geldt dat er in het ontwerp punt sprake is voor hogere golven en dus hogere windsnelheden. Wanneer er bij een lagere waterstand een overslagdebiet van 10 l/s/m gehaald moet worden, dan betekent dit vanzelfsprekend dat er sprake moet zijn van een hogere windsnelheid. In Figuur 31 zijn waterstanden de ontwerp punten voor de windsnelheid weergegeven. Hieruit blijkt dat er bij lage waterstanden inderdaad sprake is van hogere windsnelheden in het ontwerp punt.



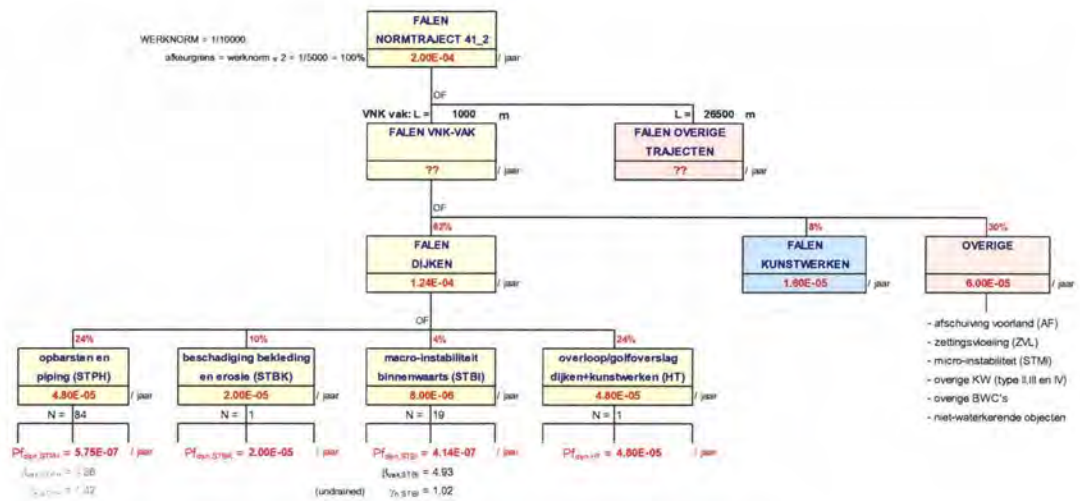
Figuur 31: Fragility curve bij 10 l/s/m en ontwerp punten voor de windsnelheid

Er is nog geen instrument beschikbaar waarmee de effectiviteit van maatregelen snel en met redelijke nauwkeurigheid kan worden afgeschat. Daarom is er voor dit onderzoek een speelinstrument ontwikkeld waarmee de verlaging van de faalkans van een riviertraject door verschillende maatregelen kan worden berekend. Dit instrument is gebaseerd op statistiek, en gaat er vanuit dat de faalkans van een dijkvak kan worden opgebouwd uit drie relaties: de 'fragility-curve' beschrijft de kans op falen gegeven een waterstand, de Q-h relatie relateert de lokale waterstand h aan een debiet Q bij Lobith en de werklijn (Q-T relatie) beschrijft de kans op overschrijden van diezelfde rivierafvoer bij Lobith. Deze drie relaties bepalen de faalkans voor één van de faalmechanismen (overloop/golfoverslag, macro instabiliteit, zandmeevoerende wellen oftewel piping en erosie van het buitentalud). Alle faalkansen per dijkvak kunnen worden gecombineerd tot een faalkans voor een traject van meerdere dijkvakken.

Deze methode is geverifieerd aan de hand van rekenresultaten van VNK uit PC-Ring. De afwijking, uitgedrukt als de verhouding tussen beide uitkomsten, is gemiddeld 1,13 per dijkvak en 1,20 voor een traject van 16 km. Dit traject is gelegen op de Waal in normtraject 43-6. De impact van klimaatverandering kan ook redelijk nauwkeurig berekend worden; de afwijking is hier 1,18.

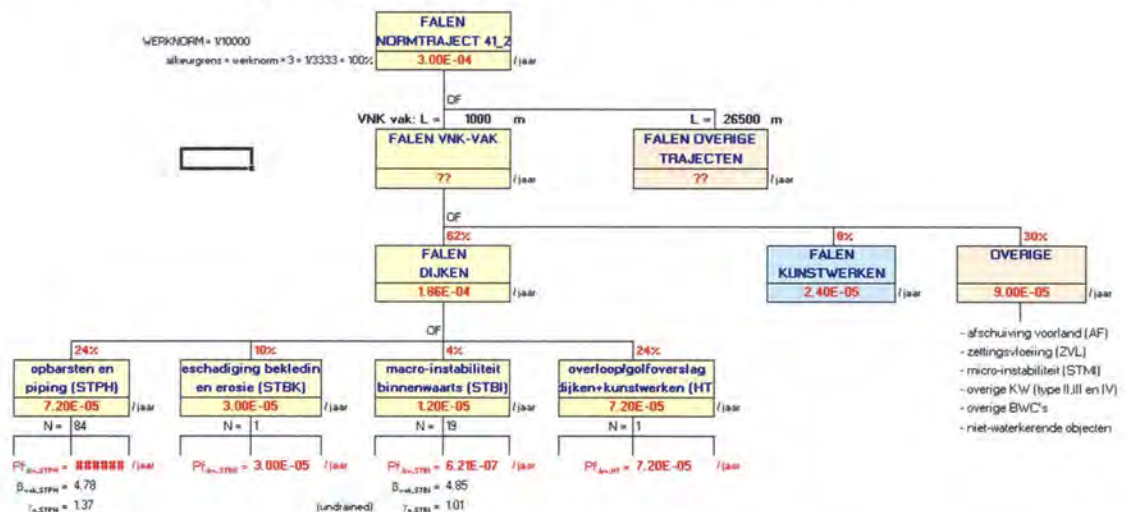
E Uitwerking bepaling faalkans voor testprofiel

In onderstaande figuur wordt een uitwerking gegeven voor een locatie in het normtraject 41-2.



Figuur 9.1 voorbeeld bepaling faalkans van dwarsprofiel (afkeurgrens is 2x werknorm)

Lengte dijktraject 41_2: L = 27500 m



Figuur Voorbeeld bepaling faalkans van dwarsprofiel (afkeurgrens is 3x werknorm)

In de figuur is de verdeling over de mechanismen (bijv 24% voor opbarsten/piping) en daarmee de kansen per faalmechanismen te zien (bijv. $4.8 \cdot 10^{-5}$ voor opbarsten/piping).

Een dwarsprofiel ligt in het normtraject 41-2. Dit traject heeft een lengte van 27500m en een werknorm van 1/10000.

De afkeurgrens is 2 x werknorm: $1/5000$, oftewel $2 \cdot 10^{-4}$ /jaar.

Voorlopige faalkansverdeling

24% overloop/golfoverslag dijken+kunstwerken (HT);

24% voor opbarsten en piping (STPH);

4 % macro-instabiliteit binnenwaarts (STBI),

F Herziene regel van Sellmeijer

De volgende herziening op de regel van Sellmeijer is voorgesteld voor het WTI-2017: (Deltares, 2010) en (Deltares, 2011).

$$\frac{H_c}{L} = F_{\text{resistance}} F_{\text{scale}} F_{\text{geometry}} \quad (0.1)$$

$$\frac{H_c}{L} = F_{\text{resistance}} F_{\text{scale}} F_{\text{geometry}} \quad (0.2)$$

$$F_{\text{resistance}} = \eta \frac{\gamma_{\text{sub,particles}}}{\gamma_{\text{water}}} \tan \theta_{\text{sellmeijer.revised}}$$

$$F_{\text{scale}} = \frac{d_{70,m}}{\sqrt[3]{\kappa L}} \left(\frac{d_{70}}{d_{70,m}} \right)^{0.4}, \quad \kappa = \frac{v_{\text{water}}}{g} k \quad (0.3)$$

$$F_{\text{geometry}} = 0.91 \left(\frac{D}{L} \right)^{\frac{0.28}{2.8} + 0.04}$$

$$F_{\text{resistance}} = \eta \frac{\gamma_{\text{sub,particles}}}{\gamma_{\text{water}}} \tan \theta_{\text{sellmeijer.revised}}$$

$$F_{\text{scale}} = \frac{d_{70,m}}{\sqrt[3]{\kappa L}} \left(\frac{d_{70}}{d_{70,m}} \right)^{0.4}, \quad \kappa = \frac{v_{\text{water}}}{g} k \quad (0.4)$$

$$F_{\text{geometry}} = 0.91 \left(\frac{D}{L} \right)^{\frac{0.28}{2.8} + 0.04}$$

Waarin:

L	Lengte horizontale kwelweg
$\gamma_{\text{sub,particles}}$	Volumegewicht korrels onder water (=16,5 kN/m ³)
η	Sleepkrachtfactor [-] (=0.25)
d_{70}	70 percentielwaarde van de korrelverdeling van de piping gevoelige laag [m]
κ	Intrinsieke doorlatendheid [m ²]
k	Darcy doorlatendheid [m/s]

G Instellingen sommen Macrostabiteit en Piping

Macrostabiteit

Programmatuur:

- WTI rekenhart, compilatie van mei 2015, ontsloten via DGeoStability

Data:

- Ondergrond en parameters conform WTI SOS, dwarsprofielen vanuit VNK, gecombineerd en klaargezet met DAM.

Statistiek:

- FORM vanuit Matlab

Relevante instellingen:

- Ongedraineerd rekenen met parameters rond de 80% landelijke ondergrens
- Waterspanningen conform WTI waternet-creator
- Berekeningen gefit op log-normale schaal om tot een faalkans bij iedere waterstand te komen
- Daar waar geen probabilistische berekening gemaakt is, faalkans geschaald op basis van semi-probabilistisch rekenresultaat

Piping

Programmatuur:

- Matlab script met de nieuwe regel van Sellmeijer, conform WTI (wordt gebruikt voor kalibratie en verificatie van de kernel)

Data:

- VNK data

Statistiek:

- FORM vanuit Matlab

Relevante instellingen:

- Doorlatende lagen samengevoegd door diktes op te tellen en maatgevende doorlatendheid te kiezen

Vraagstelling

Binnen het project Effectiviteit Rivierverruiming (Deltares project KPP 2015 - Versterking onderzoek waterveiligheid, 1220039.002) is de vraag gerezen of het vanuit het oogpunt van kosten gunstig is om de hoogte opgave bij een dijkversterking uit te stellen in de tijd, wanneer er wel een directe opgave ligt voor andere faalmechanismen.

Met de invoer van de nieuwe norm en het WT12017 ziet het er maar uit dat in de volgende toetsronde langs de Waal het merendeel van de dijken afgekeurd gaat worden op macrostabiliteit en/of piping. Wanneer een robuust ontwerp gemaakt wordt voor de komende 50 jaar, zal ook de dijkhoogte daarbij direct aangepakt gaan worden. Enerzijds om klimaatverandering (verhoogde afvoer) over de ontwerpperiode op te vangen, anderzijds om autonome bodemdaling te compenseren.

Nu blijkt op een aantal vakken dat de hoogte opgave feitelijk nog 20 jaar vooruit geschoven zou kunnen worden, de huidige kruinhoogte is in die periode nog afdoende. In het geval van de inzet van ruimtelijke maatregelen in het rivierengebied kan deze periode nog langer worden, en kan ook het aantal vakken waar dit speelt groter worden. Levert het in termen van kosten iets op om de versterking ten aanzien van macrostabiliteit en piping los te knippen van de versterking op hoogte en deze laatste 20 jaar later uit te voeren? Uitgestelde investeringen zijn in termen van contante waarde immers veelal gunstiger.

Analyse

In deze analyse zijn 16 dijkvakken langs de Waal beschouwd waar de hoogteopgave voor 20 jaar uitgesteld zou kunnen worden (vakcodes: 24003002, 24003003, 24003004, 24003005, 24003006, 24003007, 24003009, 24003010, 24003011, 38001031, 38001033, 41003031, 41003032, 41003033, 41003034 en 41003035). De vakken hebben een gezamenlijke lengte van 16 km. In de analyse gaan we ervan uit dat de opgave voor macrostabiliteit en piping direct aan de orde is.

Allereerst beschouwen we (ter referentie) de situatie dat de dijk robuust versterkt wordt voor 50 jaar. We stellen de opgave voor hoogte (ΔH) op 25cm cq 50cm. Voor de opgave voor macrostabiliteit (ΔS) bekijken eveneens 2 varianten, namelijk een ruimtebeslag van 10 meter en 25 meter. Voor piping (ΔP) rekenen we met een pipingberm van 100 meter. In praktijk zal dit vermoedelijk met een constructieve oplossing (kwelscherm) opgelost worden, voor de kostenramingen is 100 meter berm een goede benadering (KOSWAT maakt een budgetraming). In onderstaande figuur is het huidig dijkprofiel aangegeven in groen. De robuuste versterking (referentie) is weergegeven in blauw.

Besparing 1^e versterkingsronde	8.8 M€	10.8 M€
Kosten partiële versterking ronde 2 (verhoging)	23.4 M€	23.7 M€
Maatregel in grond	7.7 M€	7.8 M€
Vervangen infrastructuur kruin	15.7 M€	15.9 M€
Contante waarde versterkingsronde 2 (discontovoet 5.5%, uitstel 20 jaar)	8.0 M€	8.1 M€
Totale kosten robuuste versterking	277.4 M€	316.4 M€
Totale kosten partiële versterkingen	292.1 M€	329.3 M€
Totale netto contante kosten partiële versterkingen	276.7 M€	313.7 M€
Besparing uitgestelde investering in CW	0.7 M€	2.7 M€