



Handreiking Veiligheidsrendement

Definitief

COLOFON

Titel	Handreiking Veiligheidsrendement
Opdrachtgever	Waterschap Drents Overijsselse Delta
Auteur(s)	Derk-Jan Sluiter (DIJK53) Wouter Jan Klerk (Deltares) Lisa Bogers (Waterschap Drents Overijsselse Delta) Stephan Rikkert (Deltares) Barry Ros (DIJK53)
Foto omslag	Stadsdijken Zwolle. Waterschap Drents Overijsselse Delta
Kenmerk	Handreiking Veiligheidsrenement versie 1.0, fase 2
Inhoudelijke kwaliteitsborging	Zie versiegeschiedenis
Datum	27-03-2025
Status	Definitief

Versiegeschiedenis

Versie	Auteurs	Review	Datum
1.0 (fase 1)	Barry Ros	Adviesteam Dijkontwerp	22 mei 2024
0.1 (fase 2)	Barry Ros, Derk-Jan Sluiter, Wouter Jan Klerk		8 november 2024
0.4 (fase 2)	Barry Ros, Derk-Jan Sluiter, Wouter Jan Klerk, Lisa Bogers, Stephan Rikkert		22 november 2024
0.8 (fase 2)	Barry Ros, Derk-Jan Sluiter, Wouter Jan Klerk, Lisa Bogers, Stephan Rikkert	Adviesteam Dijkontwerp, Gebruikers- en Klankbordgroep Veiligheidsrendement	23 december 2024
1.0 (fase 2)	Derk-Jan Sluiter, Wouter Jan Klerk, Lisa Bogers, Stephan Rikkert		27 maart 2025

Inhoudsopgave

Samenvatting.....	4
1 Inleiding	7
1.1 Aanleiding	7
1.2 Doelstelling veiligheidsrendementmethode	7
1.3 Producten veiligheidsrendement en samenhang	7
1.4 Totstandkoming.....	8
1.5 Doel en doelgroep van deze handreiking en leeswijzer	8
2 Veiligheidsrendement en de overstromingskansbenadering.....	11
2.1 De context van de overstromingskansbenadering.....	11
2.2 Bepaling van de trajectfaalkans.....	12
2.3 Wat is de veiligheidsrendementmethode?	13
2.4 Veiligheidsrendement in een bredere context	15
2.5 Toepassingsbereik en algemene uitgangspunten veiligheidsrendementmethode	17
3 Toepassing in de Trajectaanpak.....	19
3.1 Inleiding	19
3.2 Veiligheidsopgave nu en in de toekomst	20
3.2.1 Waar versterken? Verschillende aanpakken en meerwaarde veiligheidsrendement	20
3.2.2 Huidige veiligheidsopgave.....	21
3.2.3 Toekomstige veiligheidsopgave	22
3.3 Van veiligheidsopgave naar versterkingsopgave.....	24
3.4 Aanpak dijktraject	27
3.4.1 Clustering maatregelen in mogelijke versterkingsprojecten.....	27
3.4.2 Effect niet-waterveiligheid gerelateerde keuzes op projectdefinities	29
3.5 Conclusies en geleerde lessen toepassing veiligheidsrendement in de Trajectaanpak	32
4 Toepassing in de programmering van versterkingsprojecten.....	33
4.1 Inleiding	33
4.2 Prioriteren met veiligheidsrendement.....	34
4.2.1 Bijdrage projecten aan overbruggen afstand tot de norm	35
4.2.2 Risicoreductie door projecten	35
4.2.3 Veiligheidsrendement per project	36
4.3 Programmeren met veiligheidsrendement.....	36
4.4 Anders programmeren met veiligheidsrendement?	38
4.5 Conclusies en geleerde lessen toepassing veiligheidsrendement bij programmeren	39

5 Toepassing binnen een versterkingsproject	41
5.1 <i>Inleiding</i>	42
5.2 <i>Top-down en bottom-up: de vertaalslag van trajectnorm naar ontwerp</i>	43
5.3 <i>Van traject naar projecten</i>	45
5.4 <i>Aanscherpen van de scope</i>	46
5.5 <i>Doeltreffende ontwerpeisen bij dijkversterkingen</i>	46
5.5.1 Tijdens ontwerp fase assembleren tot trajectfaalkans	47
5.5.2 Aanpassen faalkansruimtefactoren.....	49
5.5.3 Specifiek bepalen lengte-effectfactoren voor ontwerp.....	50
5.5.4 Optimale combinatie van faalkansruimtefactoren	54
5.5.5 Optimale ontwerpeisen op basis van veiligheidsrendement, per vak en mechanisme.	56
5.6 <i>Omgaan met onzekerheden</i>	64
5.7 <i>Inpassing in het ontwerpproces</i>	65
5.8 <i>Conclusies en geleerde lessen toepassing veiligheidsrendement in projecten</i>	65
6 Conclusies.....	67
Bibliografie.....	70
BIJLAGE I Begrippenlijst.....	71
BIJLAGE II Relatie tussen gevoelige lengte en kosten & trajectfaalkans	73

Samenvatting

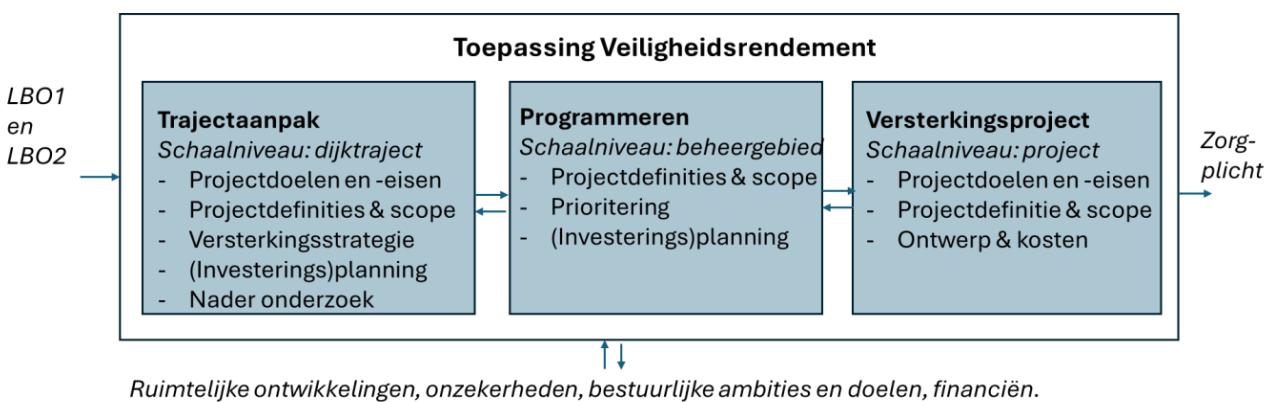
OVER DE VEILIGHEIDSRENDEMENTMETHODE

In de praktijk van beoordelen, het definiëren van projecten en ontwerpen van versterkingsmaatregelen, wordt steeds meer invulling gegeven aan de ruimte die de overstromingskansbenadering biedt. De veiligheidsrendementmethode levert hieraan ook een bijdrage en biedt een middel om de overstromingskansbenadering verder te operationaliseren. De veiligheidsrendementmethode ondersteunt het expliciet maken van keuzes over investeringen in overstromingsrisicoreductie, en het omgaan met onzekerheden hierin.

De gedachte achter de veiligheidsrendementmethode is om op basis van een optimalisatie van de totale kosten (risico en investering) de meest optimale dijkversterkingsmaatregelen voor een dijktraject te bepalen. Concreet is dit uitgewerkt in een rekenmethodiek die gebruik maakt van enerzijds locatiespecifieke informatie over de huidige veiligheid (het veiligheidsbeeld) en anderzijds de kosten en effecten van versterkingsmaatregelen voor de verschillende dijkvakken. Er wordt niet gewerkt op basis van ontwerpeisen per doorsnede zoals in het Ontwerp Instrumentarium 2014, maar stapsgewijs versterkt, waarbij telkens de kansen (inclusief getroffen maatregelen) worden geassembleerd. Zo wordt invulling gegeven aan de grondslag van de overstromingskansbenadering: het op effectieve wijze realiseren van acceptabele maatschappelijke risico's.

DOEL EN INHOUD VAN DEZE HANDREIKING

Zoals aangegeven is veiligheidsrendement een denkwijze/methodiek die de overstromingskansbenadering operationaliseert in het proces van beoordeling tot dijkversterking. In dit proces worden verschillende stappen doorlopen, waarin telkens op basis van diverse criteria keuzes worden gemaakt over zaken als: "waar te versterken?", "welk project eerst op te pakken?", "hoe mee te koppelen met de omgeving?" en "hoe af te wegen tussen verschillende ontwerpaspecten?". Bij beantwoording van elk van deze vragen kan veiligheidsrendement (extra) beslisinformatie bieden. Dit is geïllustreerd in Figuur 0-1. De basis van de methodiek is inzicht in de veiligheid, zoals volgt uit de wettelijke beoordeling.



Figuur 0-1 Fasen van beoordeling naar zorgplicht.

Deze handreiking gaat in op de toepassing van de veiligheidsrendementmethode in de Trajectaanpak, programmering en versterkingsprojecten:

- Door in de *Trajectaanpak* op basis van een beoordeling al te kijken naar een globale indicatie van maatregelen en aan te scherpen welke vakken wel of geen scope zijn door bottom-up te assembleren, kunnen scherpere projectdefinities worden bepaald.
- In de *programmering* van dijkversterkingsprojecten kan informatie over veiligheidsrendement gebruikt worden om de (qua veiligheidsrendement) meest doeltreffende programmering op te stellen met de in de Trajectaanpak gedefinieerde projecten.
- Bij de start van een *versterkingsproject* is er vanuit veiligheidsrendement al een indicatie van mogelijke maatregelen. Zeker in de verkennende fase van een versterking verandert er echter nog van alles: nieuw grondonderzoek, nieuwe inzichten in mechanismen en conditionerende onderzoeken kunnen veel invloed hebben op noodzaak, effectiviteit en kosten van maatregelen. Veiligheidsrendement biedt een mogelijkheid om vanuit doeltreffendheid na te denken over scope (bijv. complexe stukken waar versterking wellicht niet noodzakelijk is) en veiligheidseisen (welk veiligheidsniveau kosteneffectief is).

Naast deze handreiking is er software beschikbaar waarmee de veiligheidsrendementanalyses kunnen worden uitgevoerd. Ook is online¹ een *Gebruikershandleiding* beschikbaar bij de software. Tevens beschrijft de Gebruikershandleiding de inhoudelijke en technische achtergronden van de rekenmethode.

BELANGRIJKSTE BEVINDINGEN

In het algemeen is de bevinding dat het belangrijk is integrale afwegingen tijdig te maken: in de Trajectaanpak en het begin van verkenningsfase is er nog ruimte voor, maar later in projecten vaak niet meer. Toepassing van veel van de in deze handreiking beschreven afwegingen in de praktijk ligt voor de hand: de winst in termen van efficiëntie, maar ook de meerwaarde van extra beslisinformatie in het proces als geheel komt daarin duidelijk naar voren. De veiligheidsrendementmethode kan hier een invulling van zijn, maar ook andere methoden op basis van bijvoorbeeld veiligheidstekort kunnen al een grote praktische verbetering zijn voor toepassing van de overstromingskansbenadering.

Toepassing van de veiligheidsrendementmethode in de Trajectaanpak

In de Trajectaanpak is een belangrijke stap om de veiligheidsopgave te vertalen naar een stabiele (aanpak van) de versterkingsopgave. Onderscheid in trajectdelen met een hoger en lager veiligheidsrendement en de invloed van onzekerheden op de meest effectieve volgorde van versterken zijn inzichten die hierbij kunnen helpen en kunnen worden afgeleid met de veiligheidsrendementmethode. Eenvoudigere methoden op basis van bijvoorbeeld het veiligheidstekort kunnen hier ook veel informatie verstrekken, maar missen de vertaalslag naar maatregelen en indicatieve kosten, die nuttig kunnen zijn in het inschatten van de aard van projecten, en bij het programmeren.

De Trajectaanpak start met het in aanscherpen van de huidige en toekomstige veiligheidsopgave. Waar volgens LBO-1 geen sprake hoeft te zijn van een veiligheidsopgave, kan dit in de toekomst wel het geval zijn. Een veiligheidsrendementanalyse geeft inzicht in de vraag of (in dat geval) investeringen op die locaties bijdragen aan een kostenoptimale dijkversterking. Daarnaast laten we zien hoe hoekpuntenanalyses op basis van veiligheidsrendement in beeld kunnen brengen hoe gevoelig een dijkversterkingsopgave is voor wijzigingen in de (kwaliteit of dichtheid van de) onderliggende gegevens. Dit draagt bij aan een stabiel en transparant handelingsperspectief vanuit de beoordeling.

Toepassing van de veiligheidsrendementmethode in de programmering

In de programmering is het prioriteren op urgentie in de praktijk naar de achtergrond geraakt. Door enkel te kijken naar de afstand van het traject tot de norm wordt veel informatie over een efficiënte reductie van het overstromingsrisico door projecten gemist. De bijdrage van projecten aan de reductie van het overstromingsrisico is afhankelijk van het traject als geheel wanneer ook andere delen worden versterkt. Met de veiligheidsrendementmethode kan dit inzichtelijk en expliciet worden gemaakt en worden ook de

¹ <https://deltares-research.github.io/VrtoolDocumentation/index.html>

consequenties van keuzes in programmering voor het overstromingsrisico meer expliciet. Ook met eenvoudigere methoden kan dit al worden uitgewerkt, maar de veiligheidsrendementmethode geeft door de bepaling van versterkingskosten extra beslisinformatie ten aanzien van onder andere de cashflow en projectomvang in de tijd. De inzichten uit veiligheidsrendement laten ook zien dat in sommige gevallen de aard van projecten wellicht wat anders moet worden ingevuld: met relatief kleine ingrepen (bijv. verbeteren van één faalmechanisme op enkele locaties) kan veel veiligheidswinst worden geboekt, wat op programmaniveau leidt tot een veel grotere afname van het overstromingsrisico van het beheersgebied.

Toepassing van de veiligheidsrendementmethode in versterkingsprojecten

Door scherper en meer vanuit trajectperspectief naar eisen te kijken kan een doelmatiger dijkontwerp worden gemaakt. De basis daarvan is om meer vanuit assemblage en de trajectfaalkans te redeneren. Dat kan het vertrekpunt vormen voor meer maatwerk, waarvan is gebleken dat dit veel kostenbesparing op kan leveren. Deze aanpak sluit aan bij het werken vanuit het verhaal van de kering: we kijken waar en op welke wijze we vanuit het overkoepelende doel van acceptabel risico (= voldoen aan de waterveiligheidsnormen) we het beste kunnen ingrijpen.

Er is ook meer gestructureerd gekeken naar keuzes in faalkansruimtefactoren en lengte-effectfactoren. Waar in de praktijk hierin beperkt wordt gevarieerd, blijken aannames over deze factoren veel invloed te hebben op de effectiviteit van het ontwerp: door één van beide of beide trajectspecifiek te bepalen wordt meer recht gedaan aan de lokale omstandigheden. Dit leidt tot een veel goedkopere versterking met een beter onderbouwde veiligheid. De veiligheidsrendementmethode is een middel om deze optimalisatie van eisen te maken, of zelfs helemaal zonder specifieke vastgepinde eisen te werken in (met name de vroege fase van) projecten.

In hoeverre de veiligheidsrendementmethode zelf een plaats moet krijgen binnen versterkingsprojecten valt op basis van de ervaringen nog niet precies te zeggen. Wel is de potentie duidelijk naar voren gekomen, met name in vergelijking tot de aanpak dit op dit moment het meest gangbaar is. Op basis van de uitgevoerde analyses ligt het bijvoorbeeld voor de hand om meer systematisch te gaan kijken naar te hanteren factoren voor lengte-effect en faalkansruimte. De veiligheidsrendementmethode kan een zeer handig middel zijn om in de vroegere fasen van versterkingsprojecten hier handen en voeten aan te geven. Een meer algemene werkwijze vanuit veiligheidsrendement in het ontwerp heeft echter bredere consequenties voor het ontwerpproces die verdere doordenking vragen.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Uit de eerste beoordelingsronde (LBO-1) volgt een veiligheidsopgave in Nederland van bijna 2.000 km dijken en 400 kunstwerken. Het landelijke Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) staat hiermee voor een grote versterkingsopgave. Het doel van het HWBP is om in 2050 alle primaire kringen op orde te hebben. Deze opgave in combinatie met gestegen kosten door o.a. inflatie leidt naar verwachting tot (fors) hogere kosten voor het programma. Ook stelt het de sector voor een flinke organisatorische uitdaging.

De kringen kunnen niet allemaal tegelijk versterkt worden. Daarom moeten zowel waterkeringbeheerders als de alliantie prioriteren welke dijkversterkingen als eerste worden opgepakt in het versterkingsprogramma. Een belangrijk vraagstuk is wat de optimale investeringsstrategie is om het overstromingsrisico te reduceren.

De veiligheidsrendementmethode (VRM) is binnen het project SAFE (Waterschap Rivierenland) als pilot ontwikkeld om op basis van een versterkingsopgave te bepalen welke delen binnen het dijktraject op basis van kosten-baten het beste kunnen worden versterkt en op welke wijze.

Uit de toepassing bij dijkversterking SAFE is gebleken dat de veiligheidsrendementmethode potentieel tot (fors) kostenbesparing leidt ten opzichte van de toen gebruikelijke (en de op dit moment in veel gevallen nog steeds gangbare) aanpak én hele nuttige beslisinformatie geeft voor de mogelijke aanpak van de versterkingsopgave. Dit was aanleiding om binnen de Kennis- en Innovatieagenda (KIA) van het HWBP in de doorontwikkeling van de veiligheidsrendementmethode te investeren. Het Waterschap Drents Overijsselse Delta heeft dit in 2023-2024 in nauwe samenwerking met andere waterschappen, Rijkswaterstaat en Deltares opgepakt. De doorontwikkeling van de methode heeft inmiddels geresulteerd in een werkwijze en software waarmee de veiligheidsrendementmethode toepasbaar is voor de Trajectaanpak, de programmering en het ontwerpproces binnen een versterkingsproject. Deze aanpak is binnen het innovatieproject toegepast op 19 dijktrajecten in de context van Trajectaanpak, verkenningsfase en vraagstukken rond programmering van projecten. De hierin opgedane ervaringen zijn verwerkt in deze handreiking.

1.2 Doelstelling veiligheidsrendementmethode

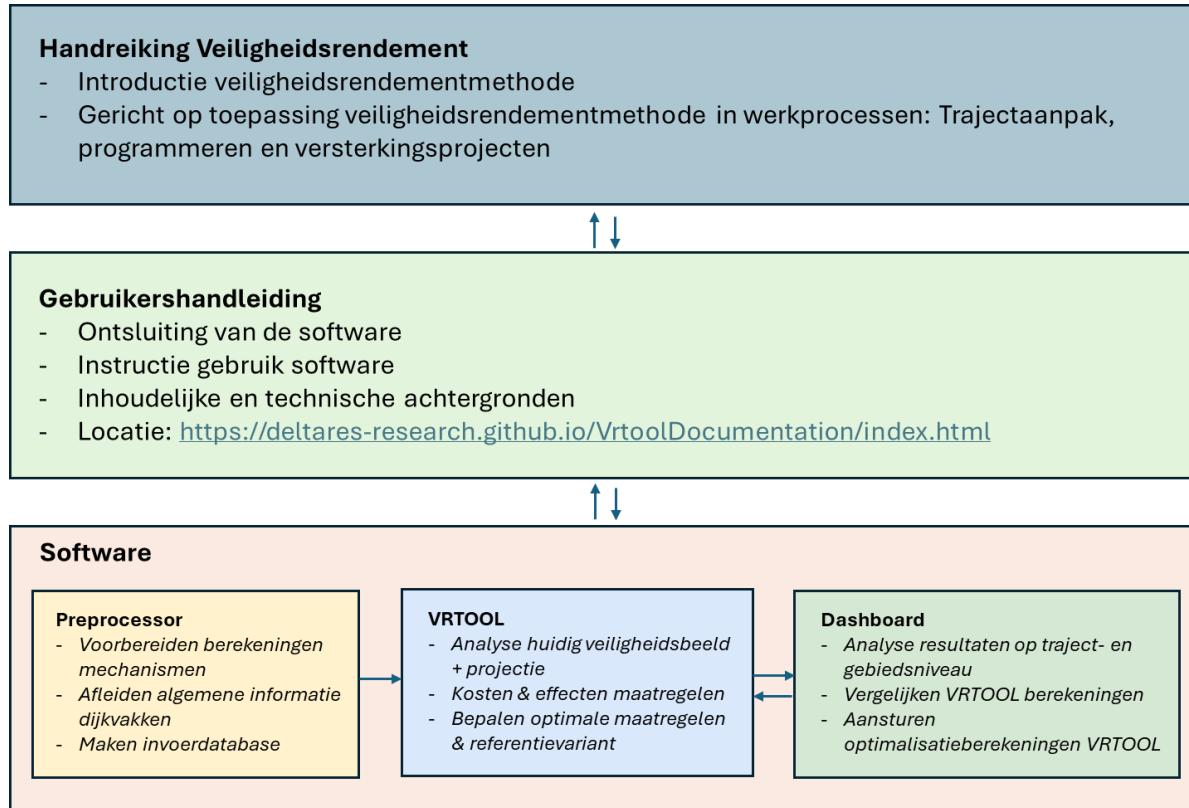
De veiligheidsrendementmethode (VRM) richt zich op het optimaliseren van investeringen in dijkversterkingsprojecten, zodat de meeste veiligheidswinst wordt geboekt per geïnvesteerde euro. Het ondersteunt in het op een consistente en herleidbare manier bepalen van een kosteneffectieve aanpak van de versterkingsopgave. De beslisinformatie die VRM oplevert kan worden meegenomen in de bredere afweging over de aanpak ten aanzien van o.a. meekoppelkansen, organisatorische aspecten (zoals personele capaciteit), kennisontwikkeling, financiën en de landelijke programmering.

1.3 Producten veiligheidsrendement en samenhang

Voor de toepassing van de veiligheidsrendementmethode in de praktijk, is een aantal producten ontwikkeld. Figuur 1-1 geeft een overzicht van de verschillende producten. Deze handreiking richt zich op de toepassing van de methode in verschillende werkprocessen die waterkeringbeheerders ter voorbereiding op en tijdens versterking van primaire waterkeringen doorlopen.

Voor een goed begrip van een aantal delen van deze handreiking is kennis van en ervaring met de andere producten (software en de gebruikershandleiding) wenselijk. Op de plekken in dit document waar sprake is van sterke samenhang met de andere producten, hebben we verwijzingen opgenomen die gemarkeerd zijn met “”. Bijlage I bevat bovendien een begrippenlijst.

 *Deze handreiking gaat beperkt in op de inhoudelijke achtergronden bij de methode en de technische uitwerking daarvan in de software. Zie daarvoor de Gebruikershandleiding op <https://deltas-research.github.io/VrtoolDocumentation/index.html>*



Figuur 1-1 Producten veiligheidsrendement en samenhang daartussen.

1.4 Totstandkoming

Deze handreiking is totstandgekomen in de periode 2023-2025, parallel aan de ontwikkeling van de (andere) producten, zie Figuur 1-1, en toepassing daarvan door verschillende beheerders bij 19 dijktrajecten. Bij de ontwikkeling van de handreiking is op verschillende momenten meegedacht en -gelezen door de gebruikersgroep en de klankbordgroep van het HWBP-innovatieproject Versterkingsaanpak vanuit Veiligheidsrendement. De leden van deze twee groepen zijn afkomstig van beheerders en de programmadirectie HWBP en vormen samen een representatieve vertegenwoordiging van de sector. Het Adviesteam Dijkontwerp heeft de tussen- en eindversie van deze handreiking van commentaar voorzien en geadviseerd over de verdere ontwikkeling.

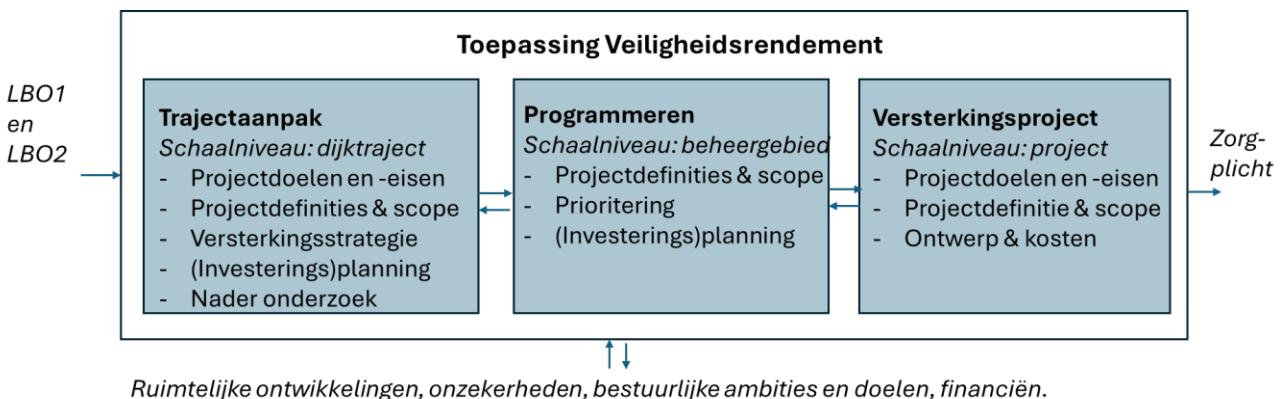
1.5 Doel en doelgroep van deze handreiking en leeswijzer

Voor de meeste waterkeringbeheerders is de VRM nog nieuw en onbekend. Ook realiseren we ons dat de materie, behalve nieuw, soms best complex is. Deze handreiking is bedoeld om de sector te laten kennismaken met de mogelijkheden van de VRM. De handreiking richt zich primair op waterkeringbeheerders en ondersteunt gebruikers bij de toepassing van de methode en de interpretatie van uitkomsten. De beoogde doelgroep is breed: van beleidsadviseurs en projectmanagers die betrokken zijn bij de Trajectaanpak en het programmeringsproces en willen weten hoe de toepassing van de veiligheidsrendementmethode kan helpen bij de daarin te nemen beslissingen, tot technisch specialisten die de inhoudelijke analyses met de methode uitvoeren. De technische diepgang van de hoofdstukken in deze handreiking varieert. Daarom is niet ieder hoofdstuk even relevant voor iedereen uit de doelgroep. Tabel 1-1 bevat een leeswijzer met een overzicht van de hoofdstukken, de globale inhoud en het karakter daarvan en de beoogde doelgroep.

Zoals gezegd adviseren we, voor een goed begrip van de materie, deze handreiking te lezen in samenvang met de gebruikershandleiding en, bij voorkeur ook ervaring op te doen met de pre-processing, de VRTOOL en het dashboard (afhankelijk van de plek binnen de doelgroep).

De methode is in principe ook geschikt voor toepassing in processen die individuele waterkeringbeheerders overstijgen, zoals de landelijke programmering van dijkversterkingsprojecten. Dat valt echter buiten de reikwijdte van deze handreiking.

Deze handreiking is opgebouwd aan de hand van de verschillende fasen tussen wettelijke beoordeling en een versterkingsproject, zie Figuur 1-2. De beslisvragen in de verschillende fasen en de beslisinformatie die VRM oplevert staan centraal. De handreiking geeft per fase voorbeelden en leerervaringen uit toepassing van de methode in verschillende cases.



Figuur 1-2 Fasen van beoordeling naar zorgplicht.

Tabel 1-1 geeft een overzicht van de verschillende hoofdstukken in deze handreiking en de beoogde doelgroep. Bij doelgroep verstaan we onder 'breed' iedereen die betrokken is bij het thema dat in het betreffende hoofdstuk centraal staat: van strategisch (bijvoorbeeld beleidsadviseurs en projectmanagers) tot operationeel (bijvoorbeeld technisch specialisten). De kolom met et verwachte kennisniveau geeft aan wat de lezer moet weten om de tekst goed te kunnen volgen. Ieder hoofdstuk start met een korte samenvatting van de inhoud en conclusies voor de gehele doelgroep van de handreiking. Daarnaast geven we in de hoofdstukken 3, 4 en 5, die ingaan op concrete toepassing van VRM, bij de introductie van ieder onderwerp aan: "Waar gaat dit over? Wat kan ik ermee? Hoe kan ik dit zelf?".

Tabel 1-1 Leeswijzer: inhoud en doelgroepen handreiking.

Hoofdstuk		Inhoud en karakter	Doelgroep en verwacht kennisniveau
1	Inleiding	Introductie op de handreiking	Breed.
2	Veiligheidsrendement en de overstromingskansbenadering	Algemene beschrijving van de veiligheidsrendementmethode en geeft een stappenplan voor de toepassing op hoofdlijnen.	Breed.
3	Toepassing in de Trajectaanpak	Praktische toepassing van de veiligheidsrendementmethode in Trajectaanpak en programmering. Geïllustreerd met voorbeelden en leerervaringen.	Breed. Voor concrete toepassing is kennis van de software nodig. Voor duiding van de resultaten is kennis van de overstromingskansbenadering nodig.
4	Toepassing in de programmering van versterkingsprojecten		

5	Toepassing binnen een versterkingsproject	Een meer beschouwend en prikkelend hoofdstuk over de mogelijke toepassing in versterkingsprojecten. Onder meer de vertaling van de trajectnorm naar ontwerpeisen komt ter sprake.	Technisch specialisten, met kennis van de overstromingskansbenadering en ervaring met het werken met ontwerpeisen.
6	Conclusies		Breed.

Voorbeelden in deze handreiking

Deze handreiking bevat verschillende voorbeelden die steeds in een kader als deze zijn weergegeven. De voorbeelden noemen bestaande dijktrajecten en waterkeringbeheerders. We willen benadrukken dat de voorbeelden speciaal voor gebruik in deze handreiking zijn opgesteld en niet noodzakelijk praktische betekenis voor de betreffende waterkeringbeheerders hebben.

De voorbeelden gaan allemaal uit van de volgende rekeninstellingen in het dashboard (tenzij anders is vermeld): trajectnorm (in onderstaand voorbeeld 1/1.000 per jaar als betrouwbaarheidsindex β) en zichtjaar 2075. Daarmee wordt de oplossing gekozen die in een zichtjaar leidt tot een bepaalde trajectkans. Deze kan anders zijn dan de economisch optimale oplossing, zie ook paragraaf 2.3. Zie onderstaande figuur.

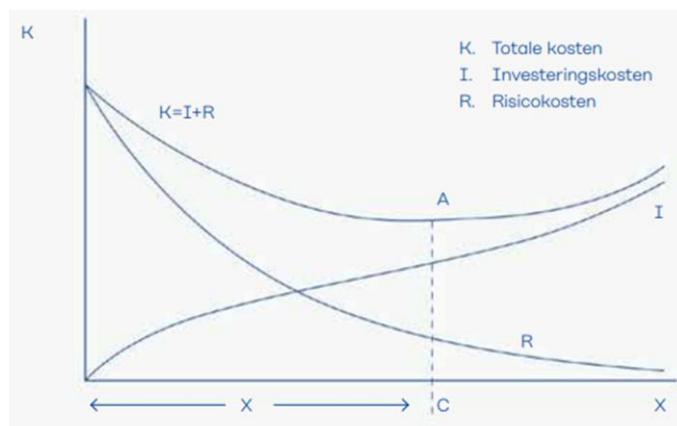
The screenshot shows the 'Dashboard Veiligheidsrendement' interface. In the 'Traject selectie' section, under 'Basisberekening', the 'Faalkans' option is selected, indicated by a red arrow labeled 'Trajectnorm in bèta'. The '3.1' value is entered in the 'jaar' field. A 'Recompute' button is visible. Below this, a 'Run naam' input field contains an empty string, and an 'Opslaan' button is present. In the 'Instellingen' section, a timeline slider is set to the year 2075, with a red arrow labeled 'Zichtjaar' pointing to it. The 'Veiligheidsrendement' option is selected in the list of metrics. Other options like 'Betrouwbaarheid', 'Faalkans', and 'Duidingsklassen' are also listed.

2 Veiligheidsrendement en de overstromingskansbenadering

2.1 De context van de overstromingskansbenadering

In Nederland gelden sinds 2017 overstromingskansnormen, oftewel maximaal toelaatbare overstromingskansen, voor de primaire waterkeringen. Deze normen zijn afgeleid op basis van criteria voor een acceptabel slachtofferrisico (Lokaal Individueel Risico (LIR) en groepsrisico) en economisch risico. Dat laatste is (in combinatie met slachtofferrisico's) meegewogen in een Maatschappelijke Kosten Baten Analyse (MKBA). Vervolgens zijn op basis van LIR, groepsrisico en MKBA de overstromingskansnormen voor verschillende normtrajecten bepaald en wettelijk vastgelegd. Bij de MKBA is gekeken naar de minimale totale maatschappelijke kosten: de norm waarbij de kosten van overstromingsrisico (economische schade + gemonetariseerde slachtoffers) en de kosten van dijkverbetering minimaal zijn. Bij het LIR is gekeken naar welke norm leidt tot een basisveiligheid voor alle locaties in het achterliggende gebied (kans op slachtoffers overal $< 10^{-5}$ per jaar).

Voor een aanzienlijk deel van de dijken in Nederland is de norm volgend uit de MKBA of MKBA/LIR leidend (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016). Voor een deel van de trajecten in het rivierengebied, de Waddeneilanden en een deel van de Zeeuwse keringen is het LIR leidend. Voor 6 trajecten is de norm één categorie strenger gekozen vanwege de kans op grote aantallen slachtoffers (groepsrisico). In de meeste van deze gevallen is het verschil tussen de norm uit de MKBA en de gekozen norm (o.b.v. LIR/groepsrisico) echter beperkt (1 normcategorie, dus ongeveer een factor 3). Dit is in lijn met (Jongejan, 2013) die onderbouwt dat normen voor verschillende risico-indicatoren (LIR/MKBA/groepsrisico) vaak dicht bij elkaar liggen. Hierdoor is het goed mogelijk om op basis van een kosten-batenanalyse de dijkversterkingsmaatregelen te optimaliseren. Ook bij trajecten genormeerd op basis van het LIR, zal de oplossing dan meestal aan de norm voldoen.² Bovendien zijn de economische optima vanuit een MKBA vaak relatief 'vlak': het verschil in totale kosten van een normcategorie hoger is vaak maar beperkt. Zodoende zal een dijkversterking op basis van een kostenoptimalisatie doorgaans leiden tot een dijk waarvan de faalkans dicht bij de norm ligt. Een resultaat van een dergelijke optimalisatie is geïllustreerd in Figuur 2-1: de economisch optimale bescherming wordt gerealiseerd op punt A. In de praktijk ligt de optimale bescherming op basis van andere criteria meestal dicht bij dat punt. Met de veiligheidsrendementmethode bepalen we voor een dijktraject welke dijkversterkingsmaatregelen bij het punt A horen.

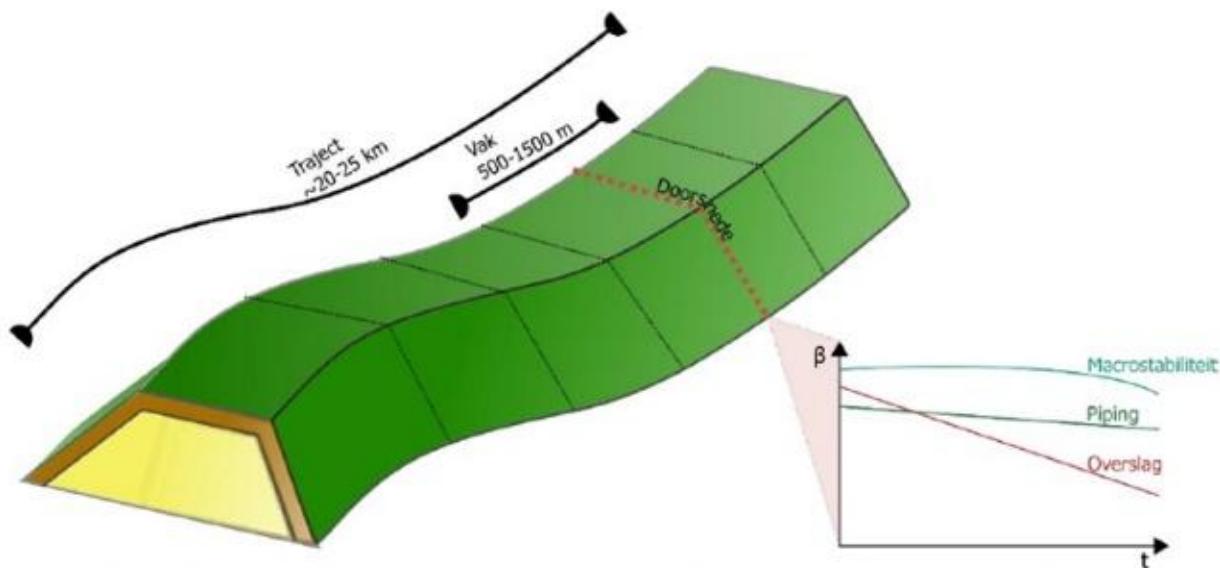


Figuur 2-1 Het basisprincipe van een economische optimalisatie. De totale kosten (K) zijn gelijk aan de investeringskosten (I) voor vergroting van de betrouwbaarheid (hier: dijkverhoging) plus de contante waarde van het risico (R). Het optimum ligt waar de totale kosten ($I+R$) minimaal zijn. Overgenomen uit figuur 4.8 uit Grondslagen voor hoogwaterbescherming (Expertisenetwerk Waterveiligheid, 2017).

2 Een uitzondering hierbij zijn trajecten waarbij de LIR-norm een orde grootte of meer strenger is dan de norm op basis van de MKBA. Landelijk betreft het slechts enkele trajecten (bijv. de Waddeneilanden) waar dit zou kunnen optreden.

2.2 Bepaling van de trajectfaalkans

Binnen een beoordeling van een dijktraject wordt voor alle (relevante) faalmechanismen een inschatting gemaakt van de faalkans van de kering, op elke relevante locatie (doorsnede) langs het traject. Een illustratie hiervan is gegeven in Figuur 2-2.



Figuur 2-2: Relatie tussen dijktraject, dijkvak en doorsnede en illustratie van de betrouwbaarheid in de tijd van een dergelijke doorsnede voor verschillende mechanismen (overgenomen uit (Klerk W., 2022)).

Zo ontstaat een veiligheidsbeeld (uit de beoordeling) waarmee in de praktijk wordt aangegeven wat de *veiligheidsopgave* langs het traject is. Een *veiligheidsopgave* is echter nog geen *versterkingsopgave*: de eis/norm geldt voor het traject en de vertaling van doorsnede naar trajectfaalkans gaat niet altijd op dezelfde manier, maar is afhankelijk van het type faalmechanisme. Soms geldt dat de zwakste schakel leidend is ("het water loopt op het laagste punt over de dijk"), en soms geldt dat lokale onzekerheden over de sterkte van de ondergrond leidend zijn ("er zitten mogelijk zwakke plekken in de grond, maar we weten niet precies waar en hoeveel"). Of er op een specifiek vak dus een *versterkingsopgave* is hangt daarmee af van de rest van het dijktraject, en welke maatregelen daar getroffen worden.

Als de zwakste schakel leidend is (bijv. bij overloop/overslag), is de trajectfaalkans gelijk aan die van het zwakste punt. Als lokale onzekerheden leidend zijn, wordt de trajectfaalkans bepaald door een combinatie van zwakke punten en is de faalkans ongeveer gelijk aan de som van de vakken. In LBO-1 zijn pragmatisch categorieën afgeleid om op basis van deze regels te komen tot een veiligheidsoordeel. In de praktijk heeft dit er ook toe geleid dat er onterecht dijkvakken als versterkingsopgave worden aangeduid, terwijl versterking op zich niet noodzakelijk is. Concreet gaat het hier over dijkvakken die in categorie IVv op vakeniveau vallen, zoals gehanteerd in LBO-1.³ Het is mogelijk dat een dijktraject met meerdere dijkvakken in deze categorie toch aan de normen voldoet. Dit is een belangrijk onderliggend motief in de veiligheidsrendementbenadering, en het beter vertalen van *veiligheids-* naar *versterkingsopgave* is een belangrijk winstpunt van de methode.

³ "Voldoet mogelijk aan de ondergrens of aan de signaleringswaarde". In specifieke gevallen kan het overigens ook voor categorie IIIv gelden ("voldoet aan de ondergrens en mogelijk aan de signaleringswaarde (op doorsnedeniveau)").

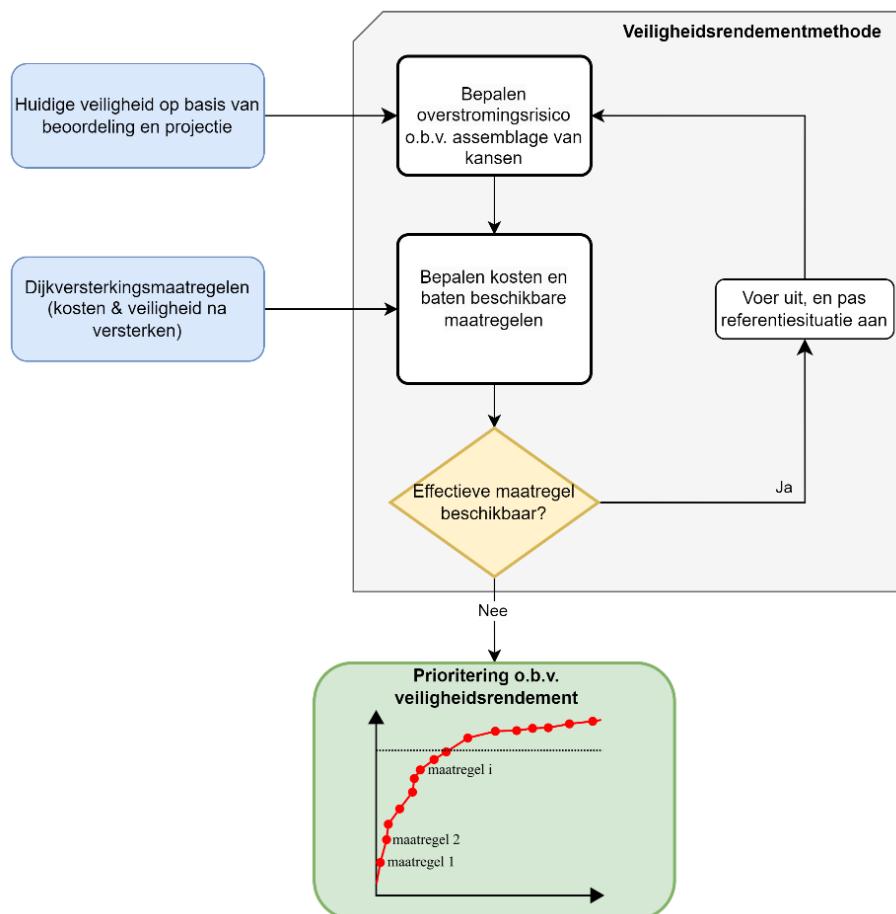
2.3 Wat is de veiligheidsrendementmethode?

De gedachte achter de veiligheidsrendementmethode is om op basis van een optimalisatie van de totale kosten (risico en investering) de optimale dijkversterkingsmaatregelen voor een dijktraject te bepalen. Concreet is dit uitgewerkt in een rekenmethode die gebruik maakt van enerzijds locatiespecifieke informatie over de huidige veiligheid (het veiligheidsbeeld) en anderzijds de kosten en effecten van versterkingsmaatregelen voor de verschillende dijkvakken. Er wordt niet gewerkt op basis van ontwerpeisen per doorsnede zoals in het OI2014, maar stapsgewijs versterkt⁴, waarbij telkens de kansen (inclusief getroffen maatregelen) worden geassembleerd. De basis van die aanpak is een in het onderzoeksprogramma All-Risk ontwikkelde methode die binnen het innovatieproject is doorontwikkeld. De hoofdwerkwijze is in Figuur 2-3 weergegeven.

In blauw zijn de twee typen invoer van de methode weergegeven: (1) informatie over de veiligheid van het dijktraject op basis van de beoordeling, met een projectie richting de toekomst, en (2) een set dijkversterkingsmaatregelen op de verschillende dijkvakken, met daarbij de kosten van versterking en de veiligheid van het betreffende dijkvak ná versterken. Vervolgens wordt geanalyseerd wat het huidige en toekomstige overstromingsrisico is en wordt op basis daarvan voor alle beschikbare maatregelen de combinatie van kosten en baten bepaald. Dit gebeurt in stappen, waarbij de maatregelen met het hoogste rendement als eerste worden geselecteerd. Door telkens de uitgangssituatie daarmee te updaten kan stapsgewijs de optimale dijkversterking worden bepaald.

Op deze manier is de veiligheidsrendementmethode een operationalisering van de overstromingskansbenadering, en dan met name de Maatschappelijke Kosten Baten Analyse (MKBA). Het verschil is dat het niet is gericht op het afleiden van een norm, maar op het met locatiespecifieke informatie afleiden van de optimale combinatie van dijkversterkingsmaatregelen. Of zoals in Figuur 2-1: de lijnen van kosten en baten worden scherper bepaald, én er wordt bepaald welke dijkversterkingsmaatregelen bij het optimale punt A horen. Het veiligheidsrendement bestaat daarmee uit twee onderdelen: (1) het *reduceren van het overstromingsrisico* tegen (2) *minimale investeringskosten*. Dijkvakken met een groot veiligheidstekort zullen dus vrijwel altijd ook een hoog veiligheidsrendement hebben, omdat het risico daar sterk gereduceerd kan worden. Daarom kan het gedachtegoed ook benaderd worden met een aanpak op basis van veiligheidstekort, of afname van de trajectfaalkans bij versterking, zoals in het verleden in diverse VNK2 studies is gedaan. Daarbij blijft echter het perspectief van een doelmatige investering deels buiten beschouwing, en wordt geen locatiespecifiek inzicht gegeven in de kosten en maatregelen.

⁴ De kering hoeft niet stapsgewijs te worden versterkt, maar de rekenmethode rekent stapsgewijs. Zie ook de volgende alinea.



Figuur 2-3 Werkwijze veiligheidsrendementmethode.

Belangrijk om op te merken is dat in de veiligheidsrendementmethode wordt gerekend met de reductie van overstromingsrisico (risico = kans x gevolg). Per dijkvak worden dus ook de gevolgen als invoer gebruikt, uitgedrukt in economische schade bij een overstroming. Daarbij wordt voor de gevolgen op het gehele dijktraject uitgegaan van het economisch schaderisico in 2050 conform de factsheets uit het Deltaprogramma Veiligheid.

De optimalisatioroutine zoekt het pad (rode lijn in Figuur 2-3) met de gunstigste verhouding tussen risicoreductie en kosten van versterking, totdat het punt waarbij de totale kosten (risico en versterking) samen minimaal zijn. Dit is de economisch optimale dijkversterking. Daarnaast wordt ook de goedkoopste combinatie van versterkingsmaatregelen om aan de norm te voldoen bepaald.⁵ Afhankelijk van het precieze niveau van de norm leidt de economisch optimale oplossing vanuit veiligheidsrendement soms tot een iets lagere, soms tot een vrijwel identieke, en soms tot een iets hogere faalkans dan de norm.⁶ Door vervolgens een keuze te maken voor de oplossing op het rode pad uit Figuur 2-3 die aan een bepaalde kans voldoet (bijv. ondergrens in 2075), kunnen de bijbehorende optimale versterkingsmaatregelen worden bepaald (zie voor een verdere toelichting paragraaf 5.6). In de praktijk blijken deze oplossingen vrijwel altijd zeer dicht bij het optimum te liggen. Dat komt voort uit optimalisatie in drie dimensies, en met name de combinatie

⁵ Bepaald is hier een wat stellig woord, omdat er met de aanpak geen gegarandeerd optimum gevonden wordt. Maar in de praktijk liggen oplossingen er wel zeer dicht bij en zijn andere onzekerheden in de inschatting van het optimum veel groter.

⁶ Om deze reden wordt in de optimalisatie doorgerekend tot een baten/kostenverhouding van 0.1 wordt bereikt: dan wordt ook in gevallen waar de norm economisch gezien te streng is (bijv. bij LIR gedomineerde trajecten) een oplossing verkregen waarmee aan de norm wordt voldaan.

daarvan, die in de praktijk niet of slechts ad hoc worden uitgevoerd. Deze drie dimensies zijn in de volgende alinea's nader toegelicht.

OPTIMALISATIE TUSSEN MECHANISMEN

Ten eerste wordt binnen VRM, door te optimaliseren over de faalmechanismen, de faalkansruimte optimaal verdeeld. Daardoor wordt de meeste veiligheidswinst geboekt per geïnvesteerde euro. Omdat er wordt gewerkt 'vanuit het veiligheidsbeeld' kan de faalkanseis per faalmechanisme én per te versterken dijkdoorsnede (of kunstwerk) verschillen. Omdat kosten voor versterken sterk kunnen verschillen tussen mechanismen, levert dit veel winst op. Zo zijn maatregelen voor verbetering van binnenwaartse stabiliteit in dichtbebouwd gebied bijvoorbeeld vaak duurder dan maatregelen voor piping. De randvoorwaarde blijft dat het traject na versterking voldoet aan de trajecteis.

OPTIMALISATIE TUSSEN VAKKEN OP DIJKTRAJECTNIVEAU

Ten tweede wordt door de optimalisatie per vak de winst van deze geoptimaliseerde faalkansverdeling groter: dure vakken met dure versterkingen voor specifieke mechanismen worden enigszins ontzien, terwijl er juist wordt geïnvesteerd in een extra sterke dijk als dat relatief voordelig is. Beide punten leveren veel winst op omdat de kostenfuncties per dijkvak vaak knikken vertonen, bijvoorbeeld in geval van bebouwing, waarbij een duurdere versterkingsmaatregel noodzakelijk is. De veiligheidsrendementmethode optimaliseert hierin: door de stapsgewijze assemblage van kansen kan steeds de veiligheid van het dijktraject optimaal worden verbeterd. Daarbij wordt dus niet aan alle vakken dezelfde eis opgelegd, maar kan deze variëren. Wel moet uiteraard op systeemniveau altijd een bepaalde (economisch effectieve) veiligheid worden gehaald.

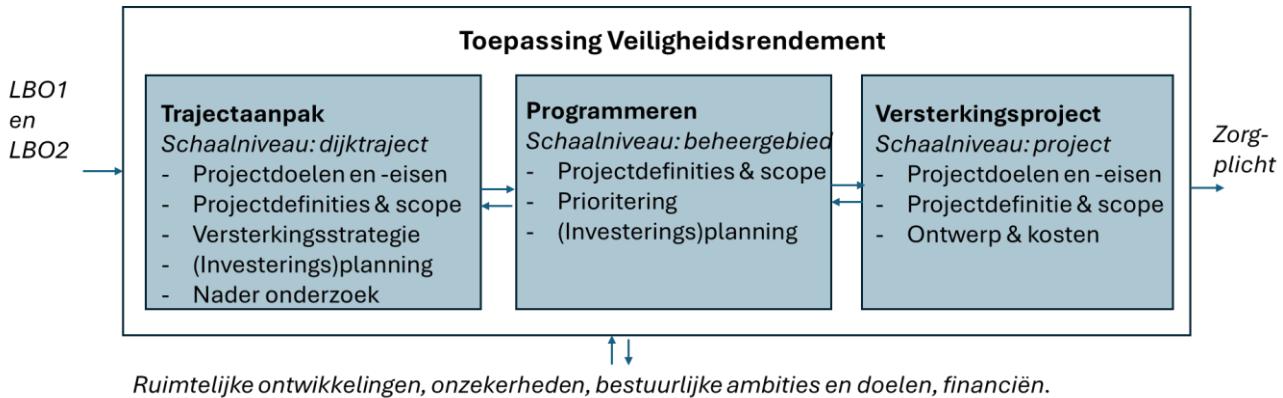
OPTIMALISATIE IN DE TIJD

Als derde kunnen door in de tijd te optimaliseren versterkingen soms worden uitgesteld, bijvoorbeeld als er nu nog geen kruinhoogtekort is, maar dit in de toekomst wel het geval zal zijn. Op deze manier kan de veiligheid worden gewaarborgd zonder onnodige investeringen te doen. Een belangrijke factor daarbij is dat de toename van faalkans in de tijd voor verschillende mechanismen niet hetzelfde is: de faalkans voor overslag neemt relatief sterk toe, maar die van macrostabiliteit maar heel beperkt. Andersom kan ook worden onderbouwd dat het aantrekkelijk is om nu voor een grotere ontwerphorizon te versterken (bijv. als de meerkosten beperkt zijn). Ten opzichte van de twee bovenstaande optimalisaties is optimalisatie in de tijd het minst belangrijk in de onderliggende berekeningen. In de toepassing van het gedachtegoed van veiligheidsrendement echter niet: in de praktijk is het vanuit programma-oogpunt noodzakelijk om ook voor (deel)trajecten met een groot veiligheidstekort versterkingen later te programmeren. Dan is deze dimensie wel zeer belangrijk. Hier gaan we in Hoofdstuk 4 over programmeren verder op in.

De kracht van veiligheidsrendement zit hem zoals gezegd in de combinatie van de bovenstaande drie dimensies. Waar in de huidige praktijk de opgave wordt bepaald of wordt ontworpen op basis van uniforme eisen (voor ieder dijkvak dezelfde eis), biedt een aanpak op basis van veiligheidsrendement de mogelijkheid om dit aan te sluiten op de assemblage van mechanismen op vakniveau tot de trajectfaalkans en daarmee direct voort te bouwen op het veiligheidsbeeld. Omdat alleen de trajectfaalkans aan de eis moet voldoen, benut het zo optimaal de vrijheid die er is binnen de overstromingskansbenadering. Uiteraard moet dit altijd in perspectief worden gezien: binnen de verschillende afwegingen in aanloop naar/rond een dijkversterking zijn andere aspecten en factoren die belangrijk zijn. In de volgende paragraaf wordt nader toegelicht wat en hoe veiligheidsrendement hier een centrale en verbindende methodische rol in kan spelen.

2.4 Veiligheidsrendement in een bredere context

Zoals aangegeven is veiligheidsrendement een denkwijze/methodiek die de overstromingskansbenadering operationaliseert in het proces van beoordeling tot dijkversterking. In dit proces worden verschillende stappen doorlopen, waarin telkens op basis van diverse criteria keuzes worden gemaakt over zaken als: "waar te versterken?", "welk project eerst op te pakken?", "hoe mee te koppelen met de omgeving?" en "hoe af te wegen tussen verschillende ontwerpaspecten?". Bij beantwoording van elk van deze vragen kan veiligheidsrendement (extra) beslisinformatie bieden. Dit is geïllustreerd in Figuur 2-4. De basis van de methodiek is inzicht in de veiligheid: momenteel op basis van de eerste landelijke beoordelingsronde (LBO-1), maar ook LBO-2 kan prima als basis dienen.



Figuur 2-4 Fasen van beoordeling naar zorgplicht.

Door in de *Trajectaanpak* op basis van een beoordeling al te kijken naar een globale indicatie van maatregelen en aan te scherpen welke vakken wel of geen scope zijn door bottom-up te assembleren, kunnen scherpere projectdefinities worden bepaald. Daarbij geldt ook dat de eisen aan projecten kunnen worden bepaald, ook wanneer deze niet tegelijk worden uitgevoerd. Wanneer er grote onzekerheden zijn in bijvoorbeeld het veiligheidsbeeld kan inzichtelijk worden gemaakt wat dit voor consequenties kan hebben voor de scope/omvang van te starten projecten. Zo kan besloten worden om eerst nader onderzoek uit te voeren alvorens verder te gaan. Met dit inzicht kunnen beheerders komen tot een onderbouwing van stabielere en beter gedefinieerde projecten per dijktraject. Een deel van deze inzichten kan al worden verkregen op basis van veiligheidstekort, maar de vertaalslag naar maatregelen, scope en onzekerheid daarin is een toevoeging waarmee veiligheidsrendement de beslisinformatie verrijkt.

Aan het einde van een *Trajectaanpak* volgt (meestal) een Ingangstoets voordat een project op het programma wordt toegelaten. In deze handreiking beschouwen we de Ingangstoets niet als een aparte fase, maar als onderdeel (eindpunt) van de *Trajectaanpak*.

De toepassing van de veiligheidsrendementmethode (VRM) levert inzicht op in de (mogelijke) versterkingsmaatregelen en de omvang daarvan. Het is belangrijk om in de communicatie met bijvoorbeeld de omgeving, duidelijk te zijn over het indicatieve karakter en betekenis daarvan. Besluitvorming over maatregelen vindt pas in de verkenningsfase plaats, na een variantenafweging en bijbehorend omgevingsproces.

In de *programmering* van dijkversterkingsprojecten kan informatie over veiligheidsrendement gebruikt worden om de (qua veiligheidsrendement) meest doeltreffende programmering op te stellen met de in de *Trajectaanpak* gedefinieerde projecten. Hierbij wordt explicet gekeken op de schaal van het beheergebied. Daarbij zijn randvoorwaarden aan de programmering uiteraard zaken als beschikbaar budget/personele capaciteit, bestuurlijke uitvoerbaarheid van projecten en de projectomvang. Met de inzichten op basis van veiligheidsrendement kan daarin scherper worden gekeken naar de prioritering van dijkvakken en welke vakken (vanuit overstromingsrisicoperspectief) als eerste zouden moeten worden versterkt. Hoewel een dergelijke prioritering ook op basis van veiligheidstekort kan worden gemaakt, voegt veiligheidsrendement hier inzicht in de kosten en het karakter van de projecten aan toe (bijv. welke maatregelen veel voorkomen, en hoe dit ruimtelijk is verdeeld), wat de onderliggende informatie verrijkt.

Bij de start van een *versterkingsproject* is er vanuit veiligheidsrendement al een indicatie van mogelijke maatregelen. Zeker in de verkennende fase van een versterking verandert er echter nog van alles: nieuw grondonderzoek, nieuwe inzichten in mechanismen en conditionerende onderzoeken kunnen veel invloed hebben op noodzaak, effectiviteit en kosten van maatregelen. Veiligheidsrendement biedt een mogelijkheid om vanuit doeltreffendheid na te denken over scope (bijv. complexe stukken waar versterking wellicht niet

noodzakelijk is) en veiligheidseisen (welk veiligheidsniveau kosteneffectief is). Dit faciliteert het iteratieve proces waarbij voor afwegingen in het veiligheidsontwerp (Rijkswaterstaat, 2024) wordt gereflecteerd op keuzes per doorsnede en het effect daarvan op project-/trajectniveau. Met een afweging vanuit veiligheidsrendement en het assembleren van de faalkansen kan dit proces worden gefaciliteerd, met daarbij als bijkomend voordeel van veiligheidsrendement dat het inzicht geeft in de effectiviteit van sommige ontwerputgangspunten.

Overkoepelend gezien sluit veiligheidsrendement aan op verschillende processen die al bestaan. De te maken keuzes kunnen worden onderbouwd en verrijkt met informatie uit veiligheidsrendementanalyses. Tegelijkertijd is de overkoepelende winst dat er meer vanuit overstromingsrisico gedacht gaat worden: door vanuit risico en effecten te denken ontstaat nieuw inzicht en een scherper beeld van de opgave, met handelingsperspectieven om die op te lossen. Veel van die inzichten zijn al beschikbaar vanuit de beoordeling, maar de structuur en aanpak op basis van veiligheidsrendement verrijkt die beslisinformatie. Hoe die informatie benut kan worden, verschilt per vraagstuk, en hoewel detail- en schaalniveau en invulling kunnen verschillen is de basis hetzelfde: op een doelmatige en effectieve manier werken aan de Nederlandse waterveiligheid.

2.5 Toepassingsbereik en algemene uitgangspunten veiligheidsrendementmethode

De veiligheidsrendementmethode is toepasbaar met informatie uit LBO-1 (eerste wettelijke beoordelingsronde), zowel voor voorlopige oordelen (VO) als definitieve oordelen (DO). De kwaliteit van de faalkansanalyses uit de beoordeling bepaalt de kwaliteit van het resultaat van de veiligheidsrendementanalyses. Als bijvoorbeeld in een VO is ingezet op het (kwalitatief) onderbouwen van het oordeel op Trajectniveau ('geen score D'), is de kwaliteit van de invoer waarschijnlijk te beperkt en is het voor het handelingsperspectief beter om eerst tot een definitief oordeel te komen. In het algemeen geldt dat de kwaliteit van informatie 'goed genoeg' is als nieuwe informatie niet leidt tot een andere oplossing voor het beslisprobleem, zie ook Handleiding Overstromingskansanalyse⁷. Daarbij kan VRM helpen om inzicht te krijgen in de gevoeligheid van besluiten voor nieuwe informatie. De navolgende hoofdstukken gaan daar verder op in.

De algemene uitgangspunten en het toepassingsbereik zijn als volgt:

- VRM is bruikbaar voor rivier-, meer- en zeedijken. Momenteel worden er 4 faalmechanismen meegenomen in de veiligheidsrendementmethode: overslag (GEKB), bekleding (GEBU, ZST), piping (STPH) en binnenwaartse macrostabilitet (STBI). Andere mechanismen worden niet ondersteund, omdat in het algemeen de beschouwde mechanismen dominant zijn voor de versterkingsopgave. In het project Samenwerken aan Kunstwerken is wel een case uitgewerkt waarbij kunstwerken zijn meegenomen⁸, maar dit is geen algemene functionaliteit.
- VRM kan als hulpmiddel worden toegepast bij het definiëren van projecten in de Trajectaanpak (trajectniveau), het programmeringsproces (beheergebiedniveau) en het formuleren van eisen aan versterkingsprojecten (projectniveau). Toepassing op het niveau van het dijktraject en beheergebied worden ondersteund door de VRTOOL en het dashboard.
- Bij veiligheidsrendementanalyses wordt geïnvesteerd op basis van kosten-batenverhouding, maar in ieder geval zo ver dat het traject in 2050 voldoet aan de ondergrens voor het traject. Bij vergelijkende berekeningen op basis van de aanpak met doorsnede-eisen wordt een ontwerp gemaakt dat in 2075 voldoet aan de doorsnede-eisen (dit is de referentievariant). Het overstromingsrisico wordt bepaald voor een horizon van 100 jaar (tot 2125). Maatregelen hebben geen specifieke levensduur, maar alleen dimensies: een verhoging van 1 meter gaat daarmee automatisch langer mee dan een verhoging van 50 centimeter. We bepalen het overstromingsrisico

⁷ Handleiding Overstromingskansanalyse, Algemeen. Rijkswaterstaat, juli 2023

⁸ Karolina Wojciechowska, Wouter Jan Klerk, Nienke Kramer, Ellen Tromp (2024) Veiligheidsrendement voor kunstwerken - Toepassing op traject 16-1. Deltares rapport no. 11209667-010-ZWS-0003

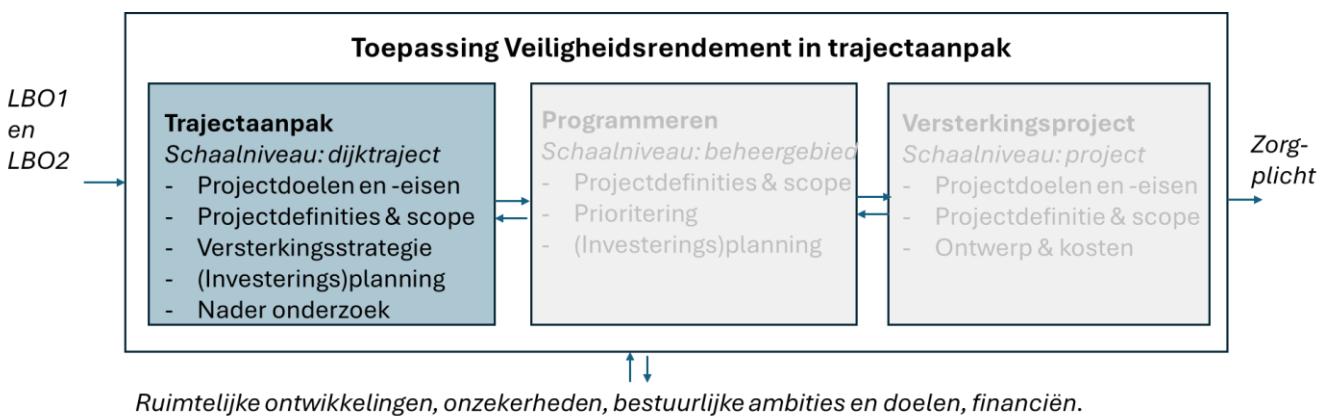
(kans x gevolg) voor een periode van 100 jaar en rekenen met discontovoet 3% (Werkgroep Discontovoet 2015).

- In de analyses met de veiligheidsrendementmethode worden aannames gedaan over de kosten. Dit zijn geen ramingen, maar inschattingen van de te verwachten kosten, die gebaseerd zijn op KOSWAT (landelijke instrument 'KOSten voor versterken WATerkeringen') en binnen SAFE (versterkingsproject Streefkerk-Ameide-Fort Everdingen) ook geverifieerd aan de hand van SSK-ramingen uit de versterking. De kostenkentallen zijn binnen het innovatieproject in 2024/2025 geactualiseerd.
- In de basis gaan we uit van een W+ scenario voor klimaatverandering (andere scenario's kunnen handmatig worden ingevoerd en gebruikt). De opgave naar de toekomst komt tot stand met Hydra-Ring afgeleide waterstands frequentielijnen voor het jaar 2023 en 2100.

 *De technische uitgangspunten van de methodiek zijn opgenomen in de [Gebruikershandleiding](#). Daar is ook meer informatie te vinden over achtergronden en onderliggende aannames.*

3 Toepassing in de Trajectaanpak

Dit hoofdstuk beschrijft hoe de toepassing van veiligheidsrendement helpt om tot een kosteneffectieve Trajectaanpak te komen. Figuur 3-1 bevat de plek van de Trajectaanpak in het proces van wettelijke beoordeling naar dijkversterking en/of zorgplicht.



Figuur 3-1 Positie Trajectaanpak in het proces van beoordelen tot zorgplicht.

SAMENVATTING VAN DIT HOOFDSTUK

Dit hoofdstuk laat zien hoe een veiligheidsrendementanalyse ingezet kan worden in de Trajectaanpak.

De Trajectaanpak start met het in aanscherpen van de huidige en toekomstige veiligheidsopgave. Waar volgens LBO-1 geen sprake hoeft te zijn van een veiligheidsopgave, kan dit in de toekomst wel het geval kan zijn. Een veiligheidsrendementanalyse geeft inzicht in de vraag of (in dat geval) investeringen op die locaties bijdragen aan een kostenoptimale dijkversterking. Daarnaast laten we zien hoe hoekpuntenanalyses op basis van veiligheidsrendement in beeld kunnen brengen hoe gevoelig een dijkversterkingsopgave is voor wijzigingen in de (kwaliteit of dichtheid van de) onderliggende gegevens.

In de Trajectaanpak is een belangrijke vraag hoe van de opgave op trajectniveau tot een indeling in projecten gekomen kan worden. Prioritering van vakken op basis van veiligheidsrendement helpt om dit kosteneffectief te doen. Ook eenvoudiger methoden geven overigens al veel inzicht in de urgentievolgorde van te versterken vakken op basis van veiligheidstekort, maar het kostenaspect wordt daarin niet meegenomen. Naast de prioritering op basis van rendement of veiligheidstekort, spelen omgevingsfactoren een rol bij de definitie van projecten. Zo kan de wens bestaan een locatie niet of minder te versterken of heeft een bepaald type maatregel bij voorbaat al sterk de voorkeur om overlast te beperken. In een voorbeeld laten we met een eenvoudige methode en met veiligheidsrendement zien wat het effect van dit type keuzes is voor de versterkingsopgave en -kosten op andere vakken.

3.1 Inleiding

Over het doel van een Trajectaanpak, zegt de Handreiking Trajectaanpak het volgende (Unie van Waterschappen, 2023): *De kern van een Trajectaanpak omvat twee fasen: het integraal inventariseren van factoren die verband (kunnen) houden met de waterveiligheidsopgave en het ontwikkelen van een daarop afgestemde aanpak voor het betreffende dijktraject. Het betreft een stap tussen het proces van beoordelen en dat van verbeteren van een dijktraject. De aanpak moet naar de eigen organisatie en de omgeving duidelijk maken welke strategische keuzes gemaakt zijn voor de aanpak gedurende de komende jaren. Het geeft inzicht in het soort maatregelen die in de loop van de tijd moeten worden genomen om uiteindelijk in*

2050 aan de norm voor het dijktraject te voldoen. Een Trajectaanpak biedt een handelingsperspectief voor de beheerder voor een dijktraject, gegeven het beoordelingsresultaat. Het instrument stimuleert de beheerder een weloverwogen scope te bepalen van versterkingsprojecten en draagt daarmee bij aan een stabiele Hoogwaterbeschermingsprogramma. De aanpak biedt ook een kader voor dialoog met de omgeving over het vervlechten van ruimtelijke opgaven met de waterveiligheidsopgave.

Gegeven de twee hierboven genoemde fasen in de Trajectaanpak, namelijk: (1) het bepalen van de veiligheidsopgave nu en in de toekomst en (2) het formuleren van een aanpak voor het dijktraject, focussen we in dit hoofdstuk achtereenvolgens op de volgende thema's en de meerwaarde van VRM daarin:

1. Van veiligheidsopgave: wat is het veiligheidstekort nu en in de toekomst en waar moet ik versterken?
2. Naar stabiele versterkingsopgave: waar moet ik wat doen?
3. Welke aanpak kies ik voor het dijktraject en wat is de invloed daarop van niet aan waterveiligheid gerelateerde keuzes?

3.2 Veiligheidsopgave nu en in de toekomst

3.2.1 Waar versterken? Verschillende aanpakken en meerwaarde veiligheidsrendement

In de huidige praktijk worden mechanismen die niet aan doorsnede-eisen (bijvoorbeeld volgens het WBI2017 of OI2014) voldoen vaak versterkt. Via een top-down aanpak wordt gekomen tot doorsnede-eisen (zie ook Figuur 5-4). Met behulp van een bottom-up aanpak op basis van veiligheidsrendement worden faalkansen gecombineerd tot trajectniveau en getoetst aan de trajectnorm. Dat geeft, ten opzichte van de top-down benadering, ruimte om andere keuzes te maken. Bijvoorbeeld vakken niet of minder (of juist meer) te versterken. Dit is weergegeven Tabel 3-1. Te zien is dat bij een top-down aanpak het handelingsperspectief verschilt van een bottom-up aanpak o.b.v. veiligheidsrendement.

Tabel 3-1 Categorisering van dijkvakken naar kans, en handelingsperspectief bij de nu gangbare aanpak, en aanpak o.b.v. veiligheidsrendement.

Situatie		Gangbaar (Top-down)	Aanpak o.b.v. veiligheidsrendement (Bottom-up)
A	Dijkvak voldoet niet aan de trajectnorm	Versterking tot doorsnede-eis noodzakelijk.	Versterking noodzakelijk. Omvang nader te bepalen.
B	Dijkvak voldoet niet aan de doorsnede-eis	Versterking tot doorsnede-eis noodzakelijk, tenzij eisen zo kunnen worden bijgesteld (door faalkansruimte te schuiven tussen mechanismen) dat het vak aan de doorsnede-eis voldoet (situatie C).	Versterking niet noodzakelijk. Verschil tussen variant met en zonder versterking betreffend vak kan worden onderbouwd.
C	Dijkvak voldoet aan doorsnede-eis	Geen versterking nodig.	Geen versterking nodig, kan wel economisch aantrekkelijk zijn (keuzevrijheid).

Bij de te beantwoorden vraag 'waar moet versterkt worden?' geldt dat bij een top-down aanpak alle vakken A & B versterkt moeten worden. Bij een bottom-up aanpak zijn dat in ieder geval vakken A en een selectie van B & C. Veiligheidsrendement kan helpen met het bepalen van de economisch optimale selectie van vakken. Zo kan worden onderbouwd wat de consequenties zijn van het ontzien van een specifiek dijkvak. Globaal gezien gelden er de volgende handelingsperspectieven:

- Wanneer op basis van nader onderzoek de faalkansinschatting van een dijkvak kan worden aangescherpt tot een kans kleiner dan een eventuele doorsnede-eis, valt dit vak weg uit de scope bij een top-down aanpak, en waarschijnlijk bij een bottom-up aanpak op basis van VRM ook. In dat laatste geval kan er dan in ieder geval voor worden gekozen om het vak niet te versterken (dus een

optimum te zoeken zonder versterking van het betreffende dijkvak). Daarnaast kan er bij een bottom-up aanpak op basis van VRM ook voor worden gekozen om het vak juist wel te versterken om een (dure) versterking in een ander vak te voorkomen of te beperken.

- Wanneer op basis van nader onderzoek de faalkansinschatting van een dijkvak kan worden aangescherpt tot een kans kleiner dan de trajecteis, maar groter dan de doorsnede-eis, valt dit vak alleen weg uit de scope bij een top-down aanpak als de faalkanseisen (fors) worden aangepast. Bij een bottom-up aanpak op basis van VRM kan worden uitgewerkt hoe een versterking met en zonder het betreffende vak er uit kan zien, en op deze manier kan de beslissing om lokaal wel/niet te versterken verder worden onderbouwd. Een vak dat nét aan de trajecteis voldoet hoeft niet noodzakelijk te worden versterkt (situatie B). Het kan wel zijn dat dit leidt tot een herverdeling in kosten omdat elders een veiligere kering moet worden gerealiseerd om aan de norm te voldoen. Dit is uitgewerkt in het voorbeeld ‘vak ontzien’ in paragraaf 3.4.2.
- Wanneer de faalkans van het dijkvak groter is dan de trajecteis zal in beide gevallen versterking nodig zijn. De precieze maatregel kan met VRM gestuurd worden (bijv. door voor een minder impactvolle maatregel te kiezen). Bij een top-down aanpak is dan een maatregel nodig die aan de doorsnede-eis voldoet.

Samenvattend kan op basis van het veiligheidstekort dus al een indeling in boven genoemde categorieën worden gemaakt. Op basis van veiligheidsrendement kan vervolgens worden uitgewerkt (voor vakken in situatie B en C) wat de meer-/minderkosten zijn van het wel/niet versterken van bepaalde dijkvakken. Bij dit alles geldt dat een goede faalkansinschatting essentieel is. Een voordeel van het werken vanuit de beoordeling is dat zo beter inzicht ontstaat in de locaties waar aanscherping/verbetering van faalkansinschatten de meeste impact heeft. Met veiligheidsrendement kan vervolgens het handelingsperspectief waar en hoeveel te versterken verder worden uitgewerkt.

3.2.2 Huidige veiligheidsopgave

Het dashboard van de VRM geeft in één oogopslag de beoordelingsresultaten (LBO-1) op basis van de betrouwbaarheid/faalkans weer voor het zichtjaar per mechanisme per vak en voor het gehele dijktraject. In de instellingen kan de gebruiker het faalmechanisme selecteren (piping, stabiliteit, overslag, bekleding) of de sectie (oordeel op vakniveau). Deze functionaliteiten zijn bruikbaar bij de Trajectaanpak als onderdeel van de inventarisatie van de veiligheidsopgave.

Bij de toepassing van de veiligheidsrendementmethode wordt de faalkans van het dijktraject (opnieuw) bepaald met de VRTOOL. Dit komt in principe dus overeen met de beoordeling. Een aanvulling hierop is dat de opgave naar de toekomst inzichtelijk wordt gemaakt. Omdat de berekening opnieuw wordt uitgevoerd, is het aan te bevelen om de uitkomsten te vergelijken met LBO-1. Eventuele inconsistenties kunnen worden veroorzaakt door bijvoorbeeld afwijkende uitgangspunten (zie Gebruikershandleiding met de uitgangspunten voor de VRM) of het gebruik van een ander model (bijvoorbeeld D-Geo Flow in LBO-1, waar VRM rekent met Sellmeijer).

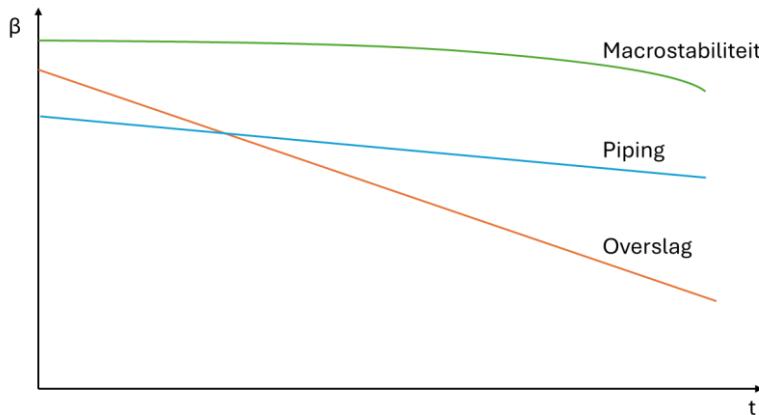
 *De pagina ‘Weergeven van resultaten op trajectniveau’ in het dashboard biedt de mogelijkheid de huidige en toekomstige veiligheid weer te geven.*

 *Zie de [Gebruikershandleiding](#) voor de werkwijze voor het uitvoeren van de berekeningen voor de huidige en toekomstige veiligheid en Achtergronden voor de inhoudelijke toelichting daarop.*

Een belangrijk onderdeel van de Trajectaanpak is inzicht verkrijgen in welke mechanismen en/of dijkvakken de grootste bijdragen leveren aan de veiligheidsopgave. Het dashboard VRM geeft de veiligheidsopgave op dijkvakiniveau voor verschillende mechanismen weer. Door te variëren tussen mechanismen ('aan-uit zetten') ontstaat eenvoudig een beeld van de faalmechanismen die bepalend zijn voor de veiligheidsopgave en de ruimtelijke omvang.

3.2.3 Toekomstige veiligheidsopgave

Het in beeld brengen van de aard en omvang van de veiligheidsopgave voor verschillende zichtjaren in de toekomst is een belangrijk onderdeel van de Trajectaanpak. Door onder meer klimaatverandering (zeespiegelstijging, hogere rivierafvoeren en/of meerpeil) en bodemdaling neemt de opgave naar de toekomst toe, zie Figuur 3-2. De precieze invloed van toekomstige ontwikkelingen verschilt per mechanisme.



Figuur 3-2 Afname betrouwbaarheid in de tijd.

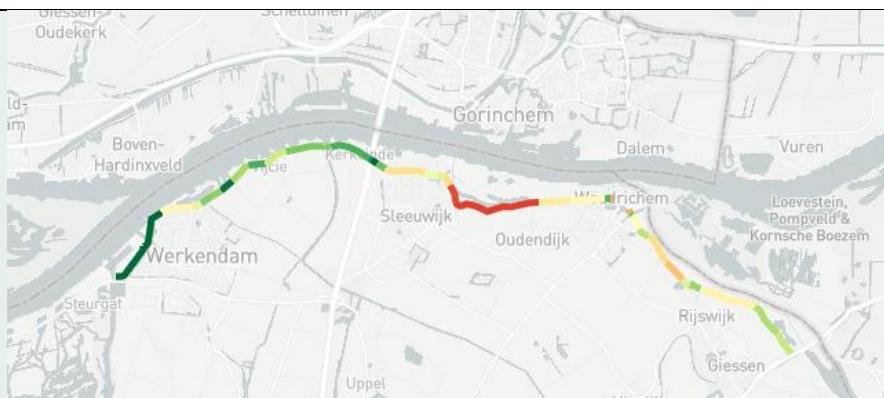
Binnen de VRM wordt gekeken naar de veiligheid van het dijktraject over de komende 100 jaar, omdat ook de toekomstige veiligheid relevant is voor de optimale beslissingen nu. In deze handreiking kijken we naar de faalkansen in 2075. Dat is een enigszins arbitraire keuze: ieder ander zichtjaar was ook mogelijk geweest. Wat de keuze voor het zichtjaar ook is, het is van belang óók andere zichtjaren over de genoemde periode van 100 jaar te beschouwen omdat een omslagpunt (van geen naar wel een opgave) enige tijd na het gekozen zichtjaar aan de orde kan zijn. Het kan doelmatig zijn die (extra) opgave dan mee te nemen in een versterkingsproject. Deze berekeningen worden binnen VRM standaard gemaakt. De VRM toont in het dashboard (onder “beoordelingsresultaten”) de veiligheidsopgave voor verschillende zichtjaren. Middels de schuifregelaar kan het zichtjaar worden aangepast en wordt voor de verschillende faalmechanismen inzicht verkregen hoe de opgave zich ontwikkelt als gevolg van bijvoorbeeld zeespiegelstijging of een verhoogde rivierafvoer in de toekomst.

Zie het dashboard voor de weergave van de veiligheidsopgave en het instellen van het zichtjaar.

Zie de [Gebruikershandleiding](#) voor de werkwijze voor het uitvoeren van de berekeningen voor de huidige en toekomstige veiligheid en [Achtergronden](#) voor de inhoudelijke toelichting daarop.

Toekomstige veiligheidsopgave dijktraject 24-3

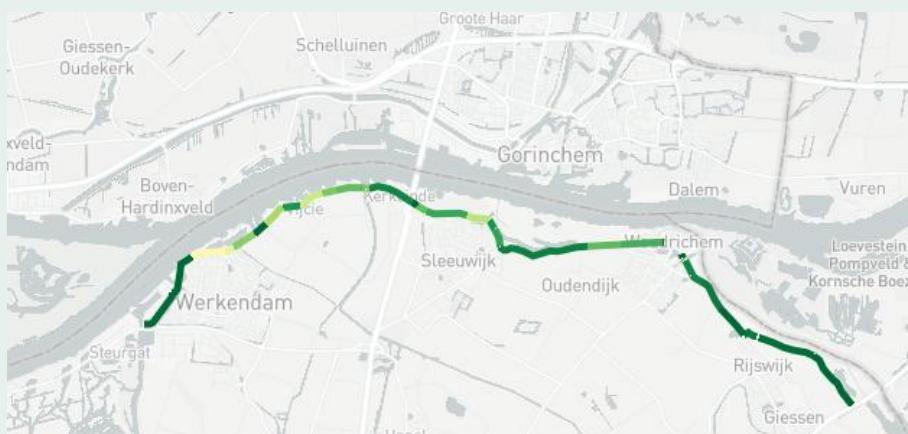
De beoordelingsresultaten van LBO-1 zijn voor dijktraject 24-3 (waterschap Rivierenland) nagerekend met de VRTOOL. Het geassembleerde beoordelingsresultaat voor het zichtjaar 2025 is weergegeven in onderstaande figuur. Voor de casus 24-3 zien we dat stabiliteit een bepalend mechanisme is voor de veiligheidsopgave. Dat faalmechanisme levert de grootste bijdrage aan de faalkans. Voor wat betreft de toekomstige opgave zien we dat ten noorden van Werkendam er voor het zichtjaar 2025 een geringe veiligheidsopgave is voor overslag. Voor zichtjaar 2075 volgt er echter wél een significante opgave voor overslag. Tegelijkertijd zien we dat er aan de oostzijde geen opgave voor overslag ontstaat. De in de figuren gehanteerde kleuren drukken de betrouwbaarheid(sindex) uit: een lage betrouwbaarheid(sindex) is roder; een hoge betrouwbaarheid(sindex) groener.



Vakkansen (faalmechanismen gecombineerd) beoordelingsresultaten dijktraject 24-3 (zichtjaar 2025).



Veiligheidsopgave 'Macrostabilitet' dijktraject 24-3 (zichtjaar 2025)



Veiligheidsopgave 'overslag' dijktraject 24-3 (zichtjaar 2025)



Veiligheidsopgave 'overslag' dijktraject 24-3 (zichtjaar 2075)

3.3 Van veiligheidsopgave naar versterkingsopgave

Uit de veiligheidsopgave blijkt waar versterkt moet worden. Vervolgens wordt in een Trajectaanpak op hoofdlijnen in beeld gebracht wat het karakter van de versterking is (een of meerdere mechanismen, mede afhankelijk van het gekozen zichtjaar). Aanvullend geeft veiligheidsrendement een eerste indruk van:

- Het type maatregelen, gegeven het mechanisme waarop versterkt moet worden.
- Dimensies van de maatregelen.
- Kosten.
- Urgentie en rendement-index.

Hierbij moet opgemerkt worden dat de feitelijke keuze voor typen maatregelen en dimensionering daarvan pas later in het versterkingsproject zijn beslag krijgt in afstemming met de omgeving. Hoofdstuk 5 beschrijft hoe de veiligheidsrendementmethode ingezet kan worden in projecten.

Dit alles levert de (beslis)informatie op voor de formulering van een Trajectaanpak (paragraaf 3.4). Om te komen tot een betrouwbare aanpak is het zinvol de stabiliteit van het karakter van de versterkingsopgave in beeld te brengen. De ervaring leert dat onzekerheden in de beoordelingsresultaten zodanig kunnen zijn dat aanscherping leidt tot het vervallen van een deel van de opgave of het wezenlijk wijzigen van de aard en kosten van de opgave. Anderzijds kunnen autonome ontwikkelingen, zoals ontwikkeling van de hydraulische belastingen of bodemdaling, leiden tot een groeiende opgave in de toekomst. De autonome ontwikkelingen kennen uiteraard ook weer hun eigen onzekerheden.

Een stabiele opgave is van belang voor een stabiel dijkversterkingsprogramma. Daarom worden binnen de Trajectaanpak de resultaten uit de beoordeling vaak aangescherpt op basis van nieuwe kennis en eventueel aanpassingen in de schematisering en de toekomstige opgave als gevolg van autonome ontwikkelingen in beeld gebracht.

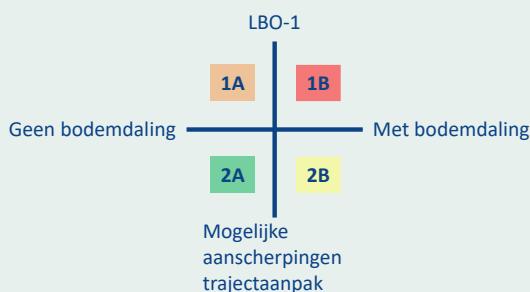
Met behulp van VRM is informatie over de stabiliteit van de opgave te genereren door te onderzoeken in hoeverre de scope (locaties waar versterkt wordt) en typen maatregelen gevoelig zijn voor onzekerheden. Met behulp van deze informatie kan effectief nader onderzoek naar aanscherpingen worden gedaan. De invloed van deze onzekerheden is bepalend voor vervolgstappen. Wanneer bijvoorbeeld ongeacht de onzekerheden hetzelfde trajectdeel als eerste moet worden opgepakt, kan een volgorde van projecten al goed worden bepaald. Wanneer de urgentie afhangt van de (dominante) onzekerheden is het beter om eerst nader onderzoek te doen alvorens de strategie richting 2050 te bepalen. Onderstaand kader bevat een voorbeeld hoe informatie op basis van veiligheidsrendement kan worden benut in een hoekpuntenanalyse.

Daarnaast kunnen de onzekerheden in de kosten ook invloed hebben op de resultaten. De in VRM gehanteerde kostenkantallen kunnen door de gebruiker worden aangepast t.b.v. gevoeligheidsanalyses.

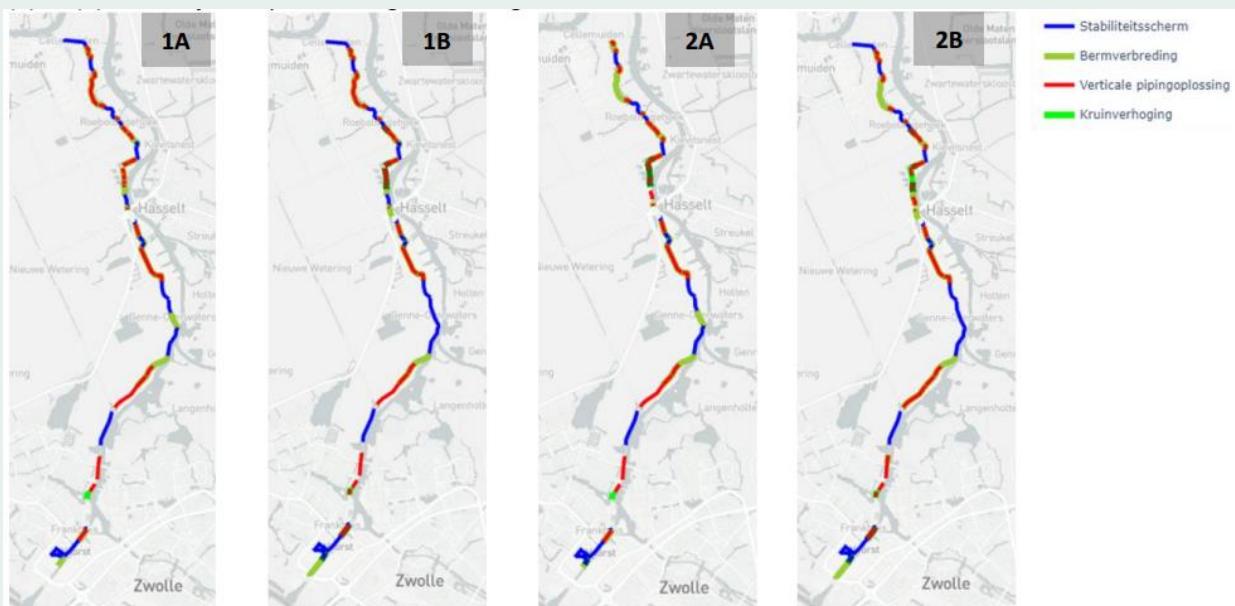
 Zie de Gebruikershandleiding ([Achtergronden](#)) voor de wijze waarop het type maatregel, de omvang en kosten bepaald worden.

Stabiliteit versterkingsopgave dijktraject 10-1

Voor de Trajectaanpak van dijktraject 10-1 is gekeken waar resultaten van de beoordeling (LBO-1) onzekerheden bevatten en welke potentiële aanscherpingen er zijn. Naast die aanscherpingen heeft bodemdaling naar verwachting een (grote) invloed op de (toekomstige) opgave. Dat leidt tot 4 scenario's, zie onderstaande figuur. Met VRM analyseren we hoe deze scenario's invloed hebben op de scope van een versterkingsproject, de maatregelen, kosten en urgentie/prioritering. De resultaten kunnen benut worden bij het bepalen van nut en noodzaak van nader onderzoek dat nodig is om de potentiële aanscherpingen te 'verzilveren'.

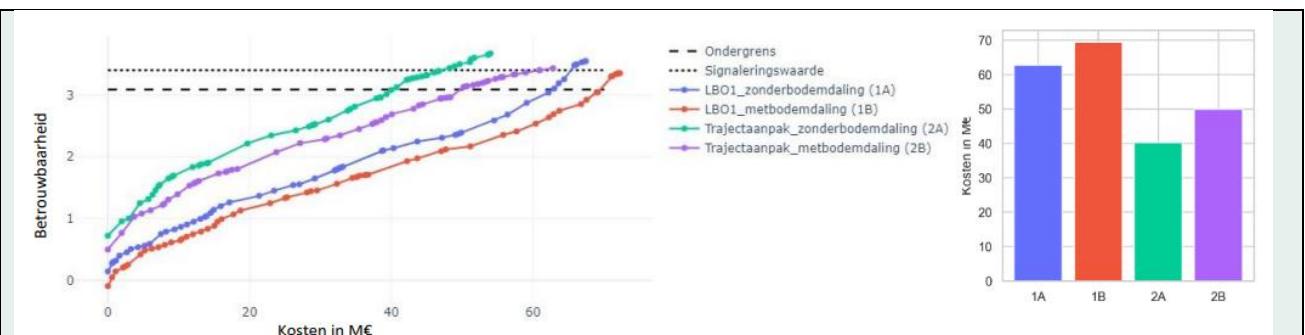


In de ruimtelijke scope zijn geen grote verschillen tussen de scenario's te zien. Ook de beoogde maatregeltypen blijven grotendeels gelijk, zie onderstaande figuur, en zijn blijkbaar relatief ongevoelig voor de verkende onzekerheden.



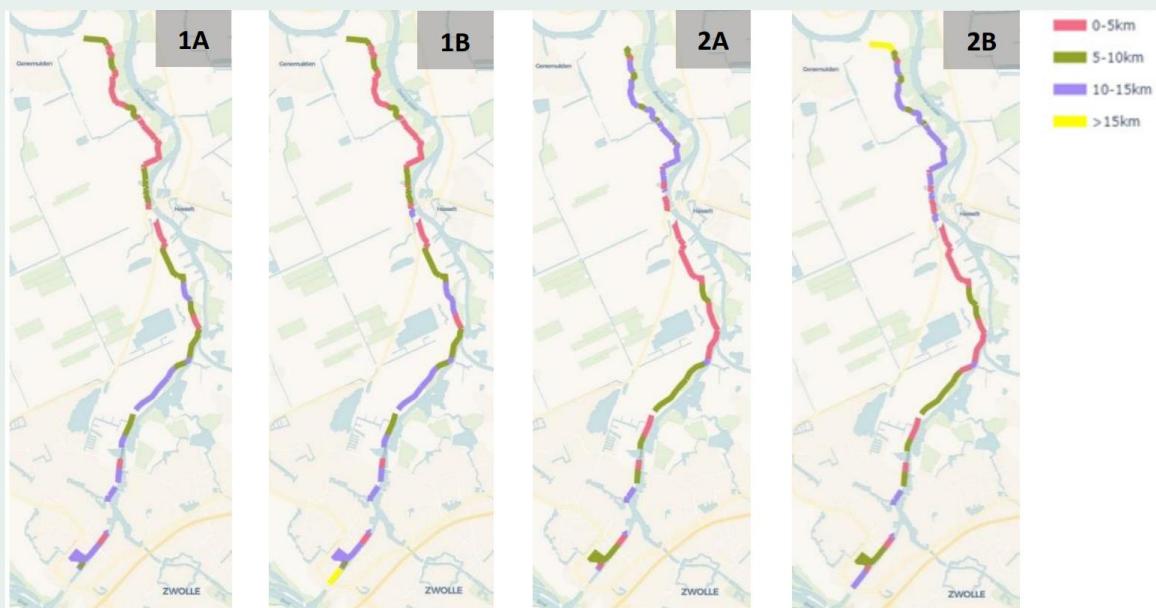
In onderstaande grafiek is de betrouwbaarheidsindex van traject 10-1 afgezet tegen de kosten van de versterking. Ieder bolletje is de versterking van één vak. Daarnaast zijn de totale kosten per scenario weergegeven. Te zien is dat bodemdaling en de aanscherping van de uitgangspunten tussen LBO-1 en de Trajectaanpak beide invloed hebben op de kosten van de versterking.

HwBP voor sterke dijken



De potentiële aanscherpingen hebben dus nauwelijks invloed op het ruimtelijk beeld van de scope, maar wel op de omvang van maatregelen en kosten. Om tot een stabiele versterkingsopgave te komen is het dus zinvol nader onderzoek uit te voeren om de potentiële aanscherpingen te 'verzilveren'.

In onderstaande figuur is de prioritering weergegeven: de eerste, tweede, derde en vierde 5 km die versterkt moeten worden volgens veiligheidsrendement zijn in aparte kleuren weergegeven. Deze informatie kan bijvoorbeeld worden gebruikt om het traject in te delen in projecten.



Bodemdalings heeft niet of nauwelijks effect op de prioritering, in tegenstelling tot de aanscherpingen van de Trajectaanpak. Die aanscherpingen zijn alleen doorgevoerd ten noorden van Hasselt, waardoor de vakken in het zuidelijke deel relatief zwakker zijn en de prioriteit dus verschuift naar het zuiden. Een interessante vervolgactie zou zijn om ook op het zuidelijke deel de opgave aan te scherpen.

Conclusies:

- De ruimtelijke scope van de versterking lijkt stabiel: bijna ieder vak moet worden versterkt. De opgave verandert door de aanscherping (Trajectaanpak) niet dusdanig dat op grote schaal andersoortige maatregelen logischer zijn.
- De kosten verschillen wel significant tussen de scenario's, doordat de dimensies van de maatregelen veranderen.
- De aanscherpingen hebben invloed op de maatregelen, kosten en prioritering. Het is voor het bepalen van de versterkingsaanpak en het indelen van traject 10-1 in projecten dus zinvol om de opgave aan te scherpen enonzekerheden in de uitgangssituatie waar nodig te verkleinen, ook op

het zuidelijke deel van het traject. De meerwaarde van VRM zit onder meer in het inzicht in waar maatregelen het beste renderen (grootste risicoreductie) en tot welke prioritering dat leidt.

De pagina 'Vergelijken berekeningen' in het dashboard biedt de mogelijkheid om verschillende analyses naast elkaar te zetten en met elkaar te vergelijken.

Zie de [Gebruikershandleiding](#) voor de werkwijze voor het vergelijken van berekeningen.

3.4 Aanpak dijktraject

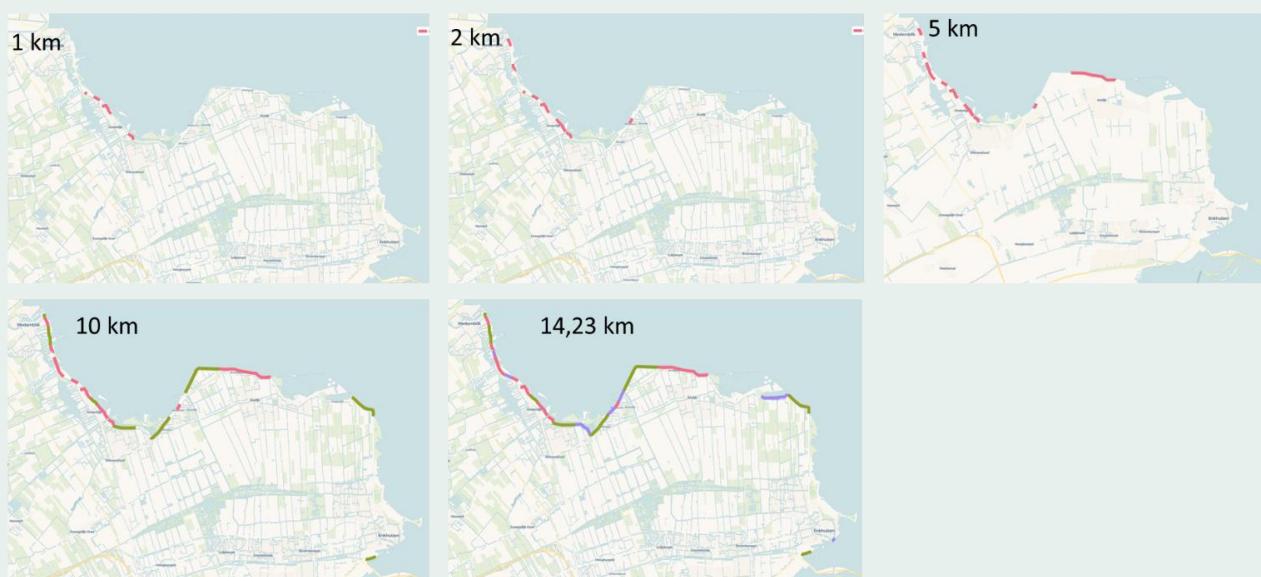
Wanneer de versterkingsopgave stabiel blijkt, moet vervolgens voor het traject een aanpak worden geformuleerd. Dit leidt vaak tot het definiëren van één of meerdere versterkingsprojecten. Maar ook andere typen maatregelen zijn denkbaar, bijvoorbeeld: monitoring en reductie van onzekerheden, tijdelijke beheersmaatregelen of onderhoudsmaatregelen. Hoewel de veiligheidsrendementmethode ook hierbij van meerwaarde kan zijn, richt deze handreiking zich op de totstandkoming van projectdefinities voor dijkversterkingen.

3.4.1 Clustering maatregelen in mogelijke versterkingsprojecten

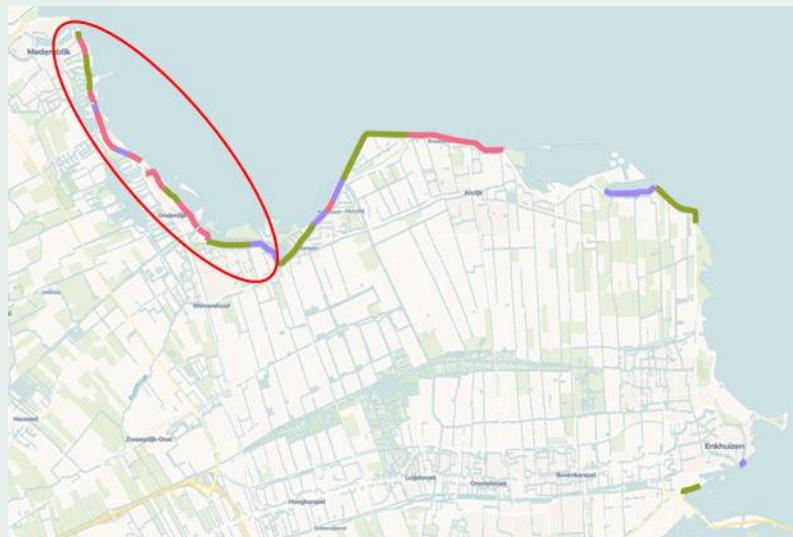
In de Trajectaanpak komen we tot één of meerdere projectdefinities door de veiligheidsopgave te knippen in logische clusters van maatregelen. De wensen en aspecten die een rol spelen bij het definiëren van projecten, kunnen van beheerde tot beheerde verschillen. Zo kan de wens leven om, vanuit het oogpunt van projectbeheersing, de omvang van een project in lengte en kosten of de mate van complexiteit te maximeren, of zijn omgevingsaspecten bepalend in de keuze voor de projectgrenzen. Vrijwel altijd speelt het veiligheidsbeeld van de locaties binnen het traject een rol: de vakken met het hoogste veiligheidstekort worden het eerst aangepakt. VRM genereert informatie over prioritering (urgentie op basis van veiligheidsrendement), kosten en maatregeltypen voor de keuze voor projectdefinities. Onderstaand kader bevat een voorbeeld op basis van die prioriteringsinformatie. We bevelen aan de projecten ook samen te stellen via de gebiedspagina in het dashboard om het kostenverloop en de bijdrage aan de risicoreductie in de tijd te onderzoeken. Zie ook hoofdstuk 4 over programmeren.

Clusteren van maatregelen op basis van prioritering dijktraject 13-6

Voor de Trajectaanpak van dijktraject 13-6, geeft VRM de prioritering volgens onderstaand figuur. Daarbij zijn telkens de urgentste kilometers om te versterken weergegeven.



Op basis van deze informatie ligt het voor de hand het traject op te delen in twee projecten (onderstaande figuur), waarbij het rood omcirkelde gebied het eerst wordt versterkt en circa 4 jaar later de overige delen.



Via de gebiedspagina in het dashboard kunnen de projecten vervolgens worden samengesteld en in de tijd geplaatst. Daarna kan bekijken worden hoe de kosten en risicoreductie in de tijd verlopen. Op grond daarvan kan, in een iteratief proces, tot een optimale indeling van projecten gekomen worden. Het kader in paragraaf 4.3 laten deze functionaliteit in het dashboard zien.

De informatie over prioritering biedt ook perspectieven om anders te kijken naar projecten: op het westelijk deel is een aaneengesloten opgave waar een integrale versterking voor meerdere mechanismen voor de hand ligt. Voor het urgente gedeelte ten noorden van Andijk (rood, midden van het traject) is primair een bekledingsopgave. Deze zou ook al sneller in een kleiner project opgepakt kunnen worden waarbij enkel de bekleding wordt verbeterd. Op dergelijke invalshoeken gaan we in paragraaf 4.4 verder in.

- De pagina 'Trajectanalyse' in het dashboard biedt de mogelijkheid de prioritering van vakken weer te geven.
- Zie de [Gebruikershandleiding](#) voor het gebruik van de pagina 'Trajectanalyse' en [Achtergronden](#) voor de totstandkoming van de prioritering.

Overigens geven andere, eenvoudigere methodes ook nuttige prioriteringsinformatie. In een werkwijze van grof naar fijn kan het verstandig zijn om daarmee te starten. Onderstaand kader geeft een overzicht van een aantal mogelijkheden.

Verschillende methodes om vakken te prioriteren

Faalkans per vak

Bij deze methode wordt de volgorde van versterken enkel gebaseerd op de faalkans van de individuele dijkvakken. De vakfaalkans is een maat voor de afstand tot de norm die, zoals eerder beschreven, in de loop van de tijd kan toenemen als gevolg van autonome ontwikkelingen. De faalkans per dijkvak is hier opgebouwd uit een faalkans voor de verschillende te beschouwen faalmechanismen (zoals overslag/overloop, piping en binnenwaartse stabiliteit), waarbij vervolgens de som wordt genomen. Deze methode is het eenvoudigst, maar het nadeel is dat er geen vertaling naar de trajectfaalkans wordt gebruikt, en het precieze effect van een versterking dus niet altijd duidelijk is.

Voorwaarts redenerend: versterking met grootste faalkansreductie

Bij deze methode wordt stapsgewijs op trajectniveau afgeleid welk dijkvak versterkt moet worden om de grootste faalkansreductie op trajectniveau te bereiken. Ook deze methode resulteert in een bepaalde volgorde van versterken. Hierbij wordt niet in specifieke versterkingsmaatregelen gedacht, maar wordt simpelweg de faalkans van een dijkvak gereduceerd tot een verwaarloosbare waarde. In elke stap wordt voor ieder dijkvak afzonderlijk dus afgeleid wat het effect van versterking is op de trajectfaalkans en het vak dat tot de grootste reductie leidt, komt als eerst aan de beurt. Vervolgens wordt deze afleiding steeds herhaald, rekening houdend met de vakken die in de eerdere stappen al zijn "versterkt" (waarvan de faalkans dus naar beneden is bijgesteld). Dit wordt net zo lang herhaald, tot alle vakken zijn "versterkt". Dit komt overeen met een aanpak die in VNK (Veiligheid Nederland in Kaart) vaak werd gebruikt voor het handelingsperspectief. Een nadeel van deze aanpak is dat de faalkansreductie onderschat kan worden van dijkvakken die een grote faalkans hebben voor een faalmechanisme waarbij afhankelijkheid is tussen vakken (met name GEKB).

Terugredenerend: versterkte vakken terugbrengen naar initiële situatie

Bij deze methode wordt juist gestart met de situatie waarin voor alle dijkvakken de faalkans naar een verwaarloosbare waarde is bijgesteld (alsof de kering is versterkt) en wordt stap voor stap een dijkvak teruggebracht naar de oorspronkelijke situatie (naar de faalkans die uit de beoordeling kwam). Daarbij wordt steeds de versterking "ongedaan gemaakt" voor het vak dat zorgt voor de kleinste trajectfaalkantename. De vakken die niet of nauwelijks invloed hebben op de uiteindelijke trajectfaalkans (als alles zou zijn versterkt) komen dan als eerst naar voren en de cruciale vakken het laatst. Door deze volgorde vervolgens om te draaien, krijg je een versterkingsvolgorde. Bij deze aanpak geldt het nadeel van de methode "voorwaarts redenerend" ten aanzien van afhankelijke vakken niet.

Veiligheidsrendement-index

In deze variant worden de resultaten van de optimale versterking op basis van de veiligheidsrendementmethode als uitgangspunt gehanteerd. Vervolgens wordt ieder vak individueel teruggebracht naar de initiële situatie (voor versterken), waarbij de toename in overstromingsrisico wordt berekend. Deze risicotename wordt gedeeld door de versterkingskosten die in het optimale versterkingspad voor dat vak zijn afgeleid. Dit geeft een verhouding tussen baten en de kosten, die we de VR-index noemen. Een hoge VR-index betekent dat het vak zorgt voor een hoge risicoreductie tegen in verhouding lage kosten. Een lage VR-index betekent dat het vak weinig bijdraagt. Dit kan komen doordat versterkingskosten daar erg hoog zijn, of omdat de risicoreductie beperkt is als het vak initieel al relatief veilig was. Een VR-index lager dan 1 komt in de optimale versterking niet voor, omdat dan de kosten hoger zijn dan de risico-reductie. Bij vakken/trajecten met grote veiligheidstekorten (veel vakken in situatie A uit Tabel 3-1) geeft deze aanpak een resultaat wat zeer vergelijkbaar is met de methode "Terugredenerend". Bij vakken met veel verschillen in kosten en vergelijkbare veiligheidsniveaus kan het wel tot een zeer andere volgorde leiden. Vanuit de geest van de norm is deze aanpak het meest logisch, maar tegelijkertijd ook het meest bewerkelijk.

3.4.2 Effect niet-waterveiligheid gerelateerde keuzes op projectdefinities

Het resultaat van de werkwijze in de vorige paragraaf is een kostenoptimale indeling in projecten. In de praktijk spelen, zoals genoemd, ook andere overwegingen een rol in de definitie van projecten of kunnen maatregelen die in het beheer worden getroffen onderdeel vormen van de Trajectaanpak. In de VRTOOL kan het effect van dergelijke keuzes op de kosteneffectiviteit van de projectindeling inzichtelijk worden gemaakt. In een iteratief proces kunnen de projectdefinities vervolgens onderbouwd en herleidbaar worden aangepast. Hoofdstuk 4 geeft hiervan een voorbeeld in de context van het programmeren.

Vak 'ontzien' en opleggen voorkeursmaatregelen

In dit fictieve voorbeeld is er een versterkingsopgave voor macrostabiliteit en piping. Belastinggedomineerde mechanismen spelen geen rol. In de omgeving bestaat de wens om één vak niet te versterken. Het vak voldoet (net) aan de trajectnorm, maar niet aan de doorsnede-eis volgens het WBI217 / OI2014 (zie situatie B in paragraaf 3.2.1). De vraag is of dit vak ontzien kan worden en wat het effect daarvan is op de andere vakken: moeten elders duurdere maatregelen worden getroffen? Deze analyse kan met behulp van VRM uitgevoerd worden door in het dashboard een vak uit te sluiten van versterking.

 Met behulp van de pagina 'Draaien optimalisatieberekeningen' in het dashboard kunnen vakken worden uitgesloten van versterking, een bepaald type standaard maatregel worden opgelegd of 'custom maatregelen' worden ingevoerd.

 Zie de [Gebruikershandleiding](#) voor het gebruik van de pagina 'Draaien optimalisatieberekeningen'.

Een eerste indruk kan echter ook op een eenvoudiger wijze verkregen worden door de initiële vakkansen, met uitzondering van het te ontziene vak, te verkleinen en vervolgens te assembleren tot de trajectfaalkans kleiner is dan de trajectnorm. De vakken zijn in dit voorbeeld onafhankelijk gecombineerd.

In dit voorbeeld zien we dat bij het volledig ontzien van een vak dat net aan de trajectnorm van 1/1.000 per jaar voldoet (vak 3, vakkans 1/1.033 per jaar), de (alle) andere vakken vele factoren veiliger moeten worden gemaakt dan de initiële situatie (Tabel 3-2). We hebben gemakshalve voor alle vakken eenzelfde factor veiliger gekozen; uiteraard is dat vakspecifiek te maken op basis van de initiële vakkans. Dat de andere vakken vele factoren veiliger moeten worden gemaakt, impliceert relatief hoge kosten voor deze vakken. Wanneer hetzelfde vak 3 echter een klein beetje veiliger wordt gemaakt dan de initiële situatie (een 'beetje' versterken), of wanneer de initiële situatie een wat kleinere faalkans heeft (1/1.667 i.p.v. 1/1.033), leidt dat tot een forse vermindering van de benodigde versterking op de andere vakken (Tabel 3-3). Met VRM kunnen aanvullend ook de (meer)kosten expliciet worden gemaakt.

Vak	Pf_vak initieel	Pf_vak na versterken	Factor veiliger
1	1,38E-03	1,26E-05	110
2	6,09E-06	5,54E-08	110
3	9,68E-04	9,68E-04	1
4	2,81E-04	2,55E-06	110
5	4,87E-05	4,43E-07	110
6	4,81E-05	4,38E-07	110
7	5,05E-05	4,60E-07	110
8	4,81E-05	4,38E-07	110
9	5,32E-04	4,84E-06	110
10	4,80E-05	4,36E-07	110
11	4,84E-05	4,40E-07	110
12	4,91E-05	4,46E-07	110
13	4,80E-05	4,36E-07	110
14	4,21E-04	3,83E-06	110
15	4,21E-04	3,83E-06	110

Pf_traject initieel 4,39E-03
T_traject initieel 228
Pf_traject na versterken 9,99E-04
T_traject na versterken 1.001

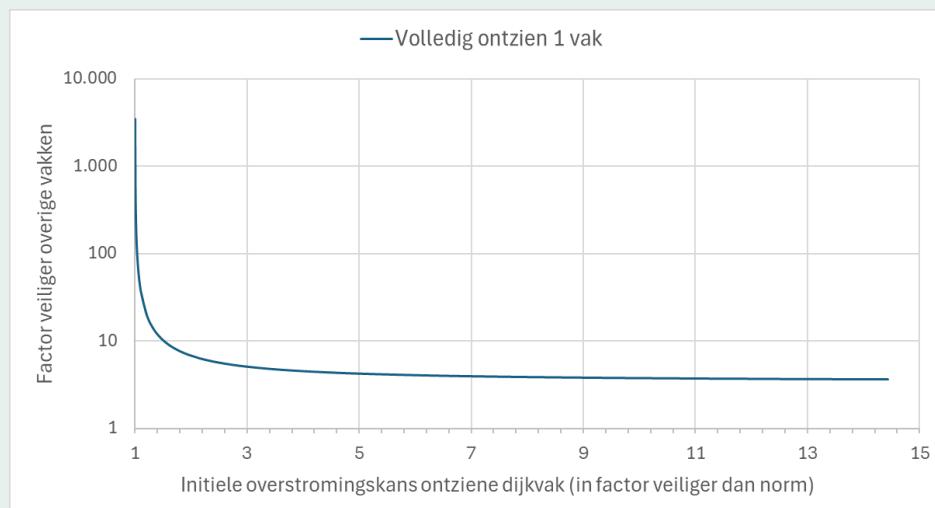
Tabel 3-2 Vak 3 ontzien bij initiële vakkans van 1/1.033 per jaar.

Vak	Pf_vak initieel	Pf_vak na versterken	Factor veiliger
1	1,38E-03	1,54E-04	9
2	6,09E-06	6,77E-07	9
3	6,00E-04	6,00E-04	1
4	2,81E-04	3,12E-05	9
5	4,87E-05	5,42E-06	9
6	4,81E-05	5,35E-06	9
7	5,05E-05	5,62E-06	9
8	4,81E-05	5,35E-06	9
9	5,32E-04	5,92E-05	9
10	4,80E-05	5,33E-06	9
11	4,84E-05	5,38E-06	9
12	4,91E-05	5,45E-06	9
13	4,80E-05	5,33E-06	9
14	4,21E-04	4,68E-05	9
15	4,21E-04	4,68E-05	9

Pf_traject initieel 4,03E-03
T_traject initieel 248
Pf_traject na versterken 9,81E-04
T_traject na versterken 1.019

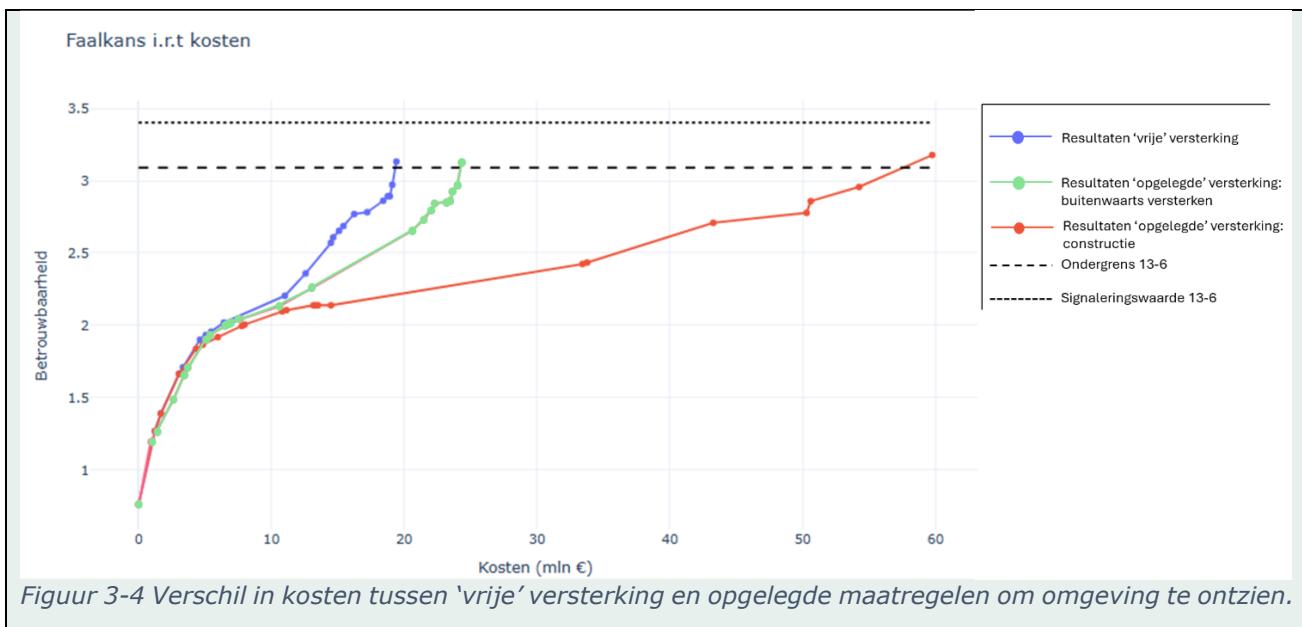
Tabel 3-3 Vak 3 ontzien bij initiële vakkans van 1/1.667 per jaar.

Het gegeven dat de mate waarin de andere vakken minder hoeven te worden versterkt toeneemt, naarmate de initiële kans van het 'te ontziene' vak kleiner is, is ook geïllustreerd in Figuur 3-3. De trajectnorm is ook hier 1/1.000 per jaar.



Figuur 3-3 Factor veiliger overige vakken als functie van de initiële kans van het 'te ontziene' vak.

Een ander voorbeeld speelt bij het eerder genoemde dijktraject 13-6. In het kader van de Trajectaanpak is in de optimalisatieberekeningen met VRM in veel vakken een (aanpassing van de) binnendijkse berm als versterkingsmaatregel bepaald. In een aantal van die vakken bevindt zich een weg op de huidige binnendijkse berm, voorzien van erfontsluitingen naar de aanliggende woningen. Het vermoeden bestaat dat VRM de kosten van de gekozen maatregel onderschat vanwege de benodigde aanpassingen aan de aanwezige weg, erfontsluitingen en ondergrondse infrastructuur. Daarom is onderzocht wat het effect op de versterkingskosten is van het ontzien van de huidige binnenberm door een ruimtebesparende binnendijkse constructieve maatregel en een buitenwaartse versterking in grond. Figuur 3-4 geeft het kostenverschil tussen de maatregelen weer (blauwe lijn, links: 'vrije' versterking (geen maatregelen opgelegd), waarin VRM een binnendijkse berm kiest waarvan de kosten vermoedelijk onderschat worden; groene lijn, midden: 'opgelegde' buitenwaartse versterking in grond; rode lijn, rechts: 'opgelegde' constructieve oplossing). Een buitendijkse versterking blijkt vanuit kostenoogpunt een aantrekkelijk alternatief.



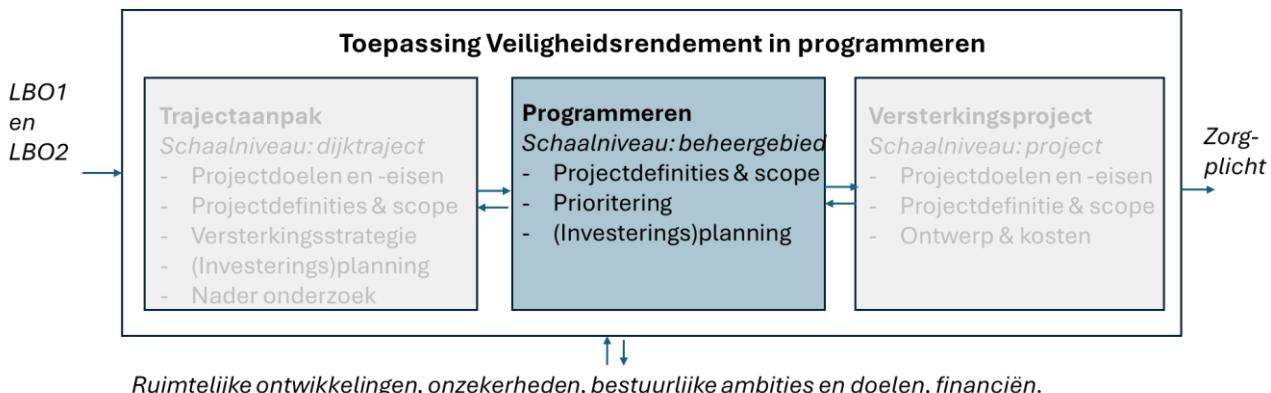
3.5 Conclusies en geleerde lessen toepassing veiligheidsrendement in de Trajectaanpak

In de Trajectaanpak is een belangrijke stap om de veiligheidsopgave te vertalen naar een stabiele (aanpak van) de versterkingsopgave. De belangrijkste conclusies en leervaringen zijn:

- Uit de analyse van de huidige en **toekomstige veiligheidsopgave** leren we dat, waar in LBO-1 geen sprake hoeft te zijn van een veiligheidsopgave, dit in de toekomst wel het geval kan zijn en dat investeringen in die vakken kunnen bijdragen aan een kostenoptimale dijkversterking.
- De **kwaliteit van de gegevens** waarmee een veiligheidsrendementanalyse wordt uitgevoerd is een belangrijk aandachtspunt. De vraag daarbij is: wat is goed genoeg? In het algemeen luidt het antwoord: als nieuwe informatie niet leidt tot een ander antwoord op de beslisvraag. Met behulp van een veiligheidsrendementanalyse is het eenvoudig om met hoekpuntenanalyses de kwaliteit van de informatie te onderzoeken gegeven de vraag: (waar) heb ik een versterkingsopgave? Hiermee wordt het effect van onzekerheden op de te versterken locaties, type en omvang van maatregelen en prioritering overzichtelijk in beeld gebracht en nut en noodzaak tot aanscherping van de onderliggende faalkansanalyses duidelijk gemaakt.
- De resultaten van een veiligheidsrendementanalyse geven inzicht in de **prioriteringsvolgorde** van dijkvakken. Dit ondersteunt het komen tot logische eenheden en projectdefinities (en de programmering). Ook zonder een volledige veiligheidsrendementanalyse kan echter al, op eenvoudigere wijze, gekomen worden tot een goede prioritering van dijkvakken.
- Veiligheidsrendement geeft, in aanvulling op het veiligheidstekort per dijkvak, inzicht in versterking van welke dijkvakken het **effectiefst is om de trajectfaalkans te verlagen** tot onder de trajectnorm.
- Zowel eenvoudige methoden als met een veiligheidsrendementsanalyse helpen om na te gaan of een **vak kan worden 'ontzien'**. Dat wil zeggen: niet of minder versterken, waarmee bijvoorbeeld overlast in de omgeving voorkomen of beperkt kan worden. Voorwaarde is uiteraard dat de faalkans van het vak dat ontzien wordt minimaal kleiner is dan de trajectnorm. Daarnaast kan een veiligheidsrendementanalyse inzicht geven in de kosteneffectiviteit van het **opleggen van een bepaald maatregeltype** ten opzichte van de situatie waarin geen maatregelen worden opgelegd.

4 Toepassing in de programmering van versterkingsprojecten

Dit hoofdstuk beschrijft de toepassing van veiligheidsrendement in het programmeren van versterkingsprojecten. Figuur 4-1 bevat de plek van de programmering in het proces van wettelijke beoordeling naar dijkversterking en/of zorgplicht.



Figuur 4-1 Positie programmeren in het proces van beoordelen tot zorgplicht.

SAMENVATTING VAN DIT HOOFDSTUK

In dit hoofdstuk laten we zien hoe met behulp van veiligheidsrendementanalyses een kostenoptimale programmering kan worden opgesteld. In de praktijk is de programmering het resultaat van een brede afweging, waarbij, naast veiligheidswinst, óók criteria en wensen ten aanzien van omgeving, organisatie en cashflow een rol spelen. Met behulp van de veiligheidsrendementmethode kan het effect van verschillende keuzes (op basis van de genoemde criteria en wensen) op een kostenoptimale programmering inzichtelijk worden gemaakt. Wanneer onnodig wordt afgeweken van deze kostenoptimale programmering leidt dit tot een toename van het maatschappelijk overstromingsrisico. Dat kan, vertaald naar kosten, om grote bedragen gaan. De resultaten uit veiligheidsrendement illustreren het belang van meer vanuit de geest van de overstromingsrisicobenadering te gaan prioriteren en programmeren: streven naar efficiënte en doeltreffende reductie van overstromingsrisico's, juist ook op programmaniveau.

In dat licht laten de inzichten uit de toepassing van veiligheidsrendement zien dat het efficiënt uitvoeren van bijvoorbeeld enkelvoudige versterkingsopgaven maatwerk vraagt in de inrichting van projecten en programma's. Juist het scherper definiëren van de doelstellingen van projecten (enkelvoudige versus meervoudige doelstellingen) kan helpen bij de coherentie en transparantie van het programmeerproces.

4.1 Inleiding

De belangrijkste activiteiten en te beantwoorden vragen in het programmeren van dijkversterkingsprojecten zijn:

1. Prioriteren: wat is de volgorde van versterken?
2. Plannen: hoe plaats ik de projecten in de tijd?

De keuzes bij het prioriteren en plannen worden gemaakt op basis van verschillende criteria en wensen, bijvoorbeeld:

- In 2050 voldoen alle trajecten aan de norm.
- Urgentie: projecten rangschikken op basis van de afstand tot de norm.

- Invloed van nieuwe kennis en onzekerheden: projecten waarvan de verwachting is dat nieuwe inzichten tot significant andere oordelen leiden, worden later geprogrammeerd, waardoor ruimte ontstaat om het reduceren van onzekerheden mee te programmeren.
- Stabiele cashflow: een zo gelijkmataig mogelijk financieel verloop van het programma.
- Spreiding van complexe projecten.
- Aansluiten bij omgevingsontwikkelingen.
- Behoud van gebiedskennis en (systeem)samenhang: projecten die bijvoorbeeld in hetzelfde watersysteem liggen worden bij voorkeur achtereenvolgens geprogrammeerd om de kennis uit een project maximaal te benutten in het volgende project.
- Organisatorische aspecten, zoals beschikbare kennis, capaciteit en 'leervermogen'.

Deze criteria en wensen kunnen per beheerder verschillen. In de totstandkoming van een programmering worden dus brede afwegingen gemaakt. Programmeren is een cyclisch en niet altijd lineair proces. Keringbeheerders stellen versterkingsprogramma's op met projecten waarvan de projectdefinities variëren van zeer gedetailleerd tot grof: niet voor alle projecten is altijd al een uitgebreide Trajectaanpak doorlopen. Zeker wanneer de urgentie relatief laag is en/of er nog veel onzekerheden zijn, worden projecten grover gedefinieerd en later geprogrammeerd, waarbij de beschikbare tijd benut wordt om de onzekerheden te verkleinen en de projectdefinitie aan te scherpen of te wijzigen.

Beheerders actualiseren hun programmering jaarlijks, waarbij nieuwe inzichten in het gedrag en faalkans van de waterkering, ontwikkelingen in de omgeving, organisatie en kosten kunnen leiden tot herprogrammering van projecten. Nieuwe inzichten hebben niet altijd alleen maar invloed op de programmering; ook de projectdefinities zelf kunnen als gevolg daarvan heroverwogen en (opnieuw) geprogrammeerd worden. Het is onmogelijk om in deze handreiking volledig recht te doen aan de dynamische en complexe realiteit van het definiëren van projecten, het programmeren van projecten en de wisselwerking daartussen. Daarom veronderstellen we in deze handreiking dat alle projectdefinities 'stabiel' zijn en vervolgens geprioriteerd en geprogrammeerd worden. Wel gaan we in op hoe de VRM kan helpen om het effect van deze onzekerheden, en van keuzes op grond van de genoemde criteria, in beeld te brengen in termen van kosteneffectiviteit van de programmering.

De opbouw van dit hoofdstuk is als volgt: eerst gaan we in op hoe de VRM kan helpen bij het beantwoorden van de genoemde beslisvragen: prioriteren en programmeren. Daarbij laten we ook zien wat al kan met behulp van eenvoudigere benaderingen en wat de meerwaarde van VRM is: werken van grof naar fijn. Ook beschrijft dit hoofdstuk hoe met behulp van de VRM het effect van keuzes op grond van de hierboven genoemde criteria in beeld gebracht kan worden. Afsluitend benoemen we een aantal inzichten op basis van veiligheidsrendement die kunnen helpen anders te kijken naar programmeren dan in de huidige praktijk gangbaar is.

4.2 Prioriteren met veiligheidsrendement

De projecten die volgen uit de Trajectaanpak(ken) moeten in volgorde worden geplaatst. In de praktijk worden bij het bepalen van de versterkingsvolgorde van projecten verschillende soorten informatie betrokken, zoals bijvoorbeeld reductie van onzekerheden door monitoring en kennisontwikkeling, ervaringen uit en handelingsperspectieven voor het beheer en andere wensen en criteria die de inleiding noemt. Wanneer een project relatief veel onzekerheid kent die door kennisontwikkeling en/of monitoring gereduceerd kan worden, is het aantrekkelijk dat project lager te prioriteren, ondanks de wellicht initieel hoog ingeschatte faalkansbijdrage. In deze paragraaf gaan we echter uit van een stabiele veiligheidsopgave en realistische faalkansen die aansluiten bij het verhaal van de kering.

In de huidige praktijk van prioriteren is de informatie over het veiligheidstekort (urgentie) die wordt benut in de afweging vaak beperkt tot de resultaten uit LBO-1, aangevuld met een projectie naar de toekomst die in het kader van een Trajectaanpak wordt opgesteld. Dit betreft faalkansen per mechanisme per vak en inzicht in hoe de opgave zich in de tijd ontwikelt. VRM levert aanvullende prioriteringsinformatie, die gedeeltelijk ook met eenvoudigere methodes (zie hoofdstuk 3) te verkrijgen is. Tabel 4-1 bevat een

overzicht, waarbij de prioriteringsinformatie in de lagere rijen steeds 'rijker' wordt. De subparagrafen lichten de prioriteringsinformatie verder toe.

Tabel 4-1 Typen prioriteringsinformatie.

Type prioriteringsinformatie	Veiligheidsrendement nodig?	Toegepast in praktijk van programmeren?
Afstand tot de norm van het traject en faalkansen per mechanisme per vak.	Nee	Ja
De mate waarin projecten bijdragen aan het overbruggen van de afstand tot de norm.	Nee	Niet vaak
De risicoreductie door ieder individueel project.	Nee. VRM levert wel informatie over de mate van faalkans-reductie van (combinaties van) maatregelen.	Nee
Het rendement per project, waarin ook de kosten van de getroffen maatregelen worden meegenomen: de grootste risicoreductie tegen de laagste kosten.	Ja	Nee

4.2.1 Bijdrage projecten aan overbruggen afstand tot de norm

In de huidige praktijk wordt voor de prioritering van de projecten t.b.v. het programmeren vaak teruggegrepen op de categorie (afstand tot de norm) die het dijktraject op grond van de beoordeling heeft. De individuele bijdrage aan het overbruggen van de afstand tot de norm van meerdere projecten binnen een dijktraject wordt daarmee niet automatisch meegewogen. Daarmee wordt belangrijke prioriteringsinformatie gemist. Er zijn eenvoudige methoden om de bijdrage per project in beeld te brengen, zie de informatie in het kader in paragraaf 3.4.1 die ook op projectniveau kan worden toegepast. De veiligheidsrendementmethode levert deze informatie ook. Een belangrijk verschil met eenvoudigere methodes is echter dat de informatie uit de veiligheidsrendementmethode 'rijker' is. Deze is immers gebaseerd op een relatief gedetailleerde en consistente inschatting van de faalkansreductie op basis van vak- en mechanismespecifiek gedimensioneerde maatregelen die zijn bepaald op basis van het rendement voor het dijktraject als geheel. Ook wanneer vanuit programmatisch perspectief wordt gekeken naar het gebied (meerdere trajecten) kan deze informatie waardevol zijn bij het werken naar een effectieve programmering, zie ook paragraaf 4.4.

4.2.2 Risicoreductie door projecten

Binnen een dijktraject is de afstand tot de norm nuttige informatie. Wanneer er sprake is van projecten die in meerdere dijktrajecten liggen (zoals vaak het geval is bij programmeren), neemt de waarde van informatie over de afstand tot de norm af. Verschillende trajecten hebben immers (vaak) verschillende normen en de omvang van de overstromingsschade verschilt altijd. De risicoprofielen van verschillende dijktrajecten zijn dus anders. Bij prioritering van projecten in meerdere dijktrajecten, is informatie over de bijdrage aan de afname van het overstromingsrisico door een project nuttig. Daaronder verstaan we: het initiële risico verminderd met de trajectfaalkans x verdisconteerde overstromingsschade na realisatie van het project. Ook deze informatie kan met eenvoudige methoden verkregen worden. Ook hier geldt weer dat de veiligheidsrendementmethode rijkere informatie levert om de hiervoor genoemde redenen.

 Via de 'Gebiedspagina' in het dashboard kunnen projecten worden samengesteld, waarna de mate waarin in deze bijdragen aan het overbruggen van de afstand tot de norm of de risicoreductie wordt getoond, zie het voorbeeld in paragraaf 4.3.

 Zie de [Gebruikershandleiding](#) voor de werkwijze voor het uitvoeren van analyses op gebiedsniveau.

4.2.3 Veiligheidsrendement per project

Veiligheidsrendement meewegen bij het prioriteren van projecten kan leiden tot een effectiever programma: door projecten met een hoog veiligheidsrendement eerst op te pakken reduceert het overstromingsrisico het snelst, en is het rendement van de uitgevoerde projecten het hoogst.

De resultaten van de optimale versterking op basis van de veiligheidsrendementmethode worden daarbij als uitgangspunt gehanteerd. Vervolgens wordt ieder vak individueel teruggebracht naar de initiële situatie (voor versterken), waarbij de toename in risico wordt berekend. Deze risicotename wordt gedeeld door de versterkingskosten die in het optimale versterkingspad voor dat vak zijn afgeleid. Op die manier krijg je een verhouding tussen de baten en de kosten, die we de VR-index noemen (zie ook het kader in paragraaf 3.4.1). Door de vakken te combineren is een VR-index voor het project af te leiden. Een hoge VR-index betekent dat het project zorgt voor een hoge risicoreductie tegen in verhouding lage kosten. Een lage VR-index betekent dat het project weinig bijdraagt. Dit kan komen doordat versterkingskosten daar erg hoog zijn, of omdat de risicoreductie beperkt is, als het vak initieel al relatief veilig was. Deze index wordt op vakniveau, maar nog niet op projectniveau, berekend in het huidige dashboard.

Belangrijk om op te merken is dat de informatie over het veiligheidsrendement per project ten opzichte van de risicoreductie (paragraaf 4.2.2) vooral onderscheidend is bij projecten met een relatief kleine initiële afstand tot de norm. Bij een grote afstand tot de norm is het resulterende risico namelijk groot en wegen de kosten van de maatregelen relatief minder zwaar in de totale kosten (= risikokosten + versterkingskosten). Concreet betekent dit dat voor de meest prioritaire projecten in het Hoogwaterbeschermingsprogramma een prioritering op basis van veiligheidsrendement weinig zal afwijken van een prioritering op basis van reductie van de afstand tot de norm. Anders gezegd: als de baten van versterking afnemen, neemt de waarde van veiligheidsrendement als beslisinformatie toe.

4.3 Programmeren met veiligheidsrendement

Bij het programmeren worden de geprioriteerde projecten in de tijd geplaatst. Hierbij zijn de verwachte doorlooptijd van projecten en het uitgangspunt dat in 2050 alle trajecten aan de norm moeten voldoen de belangrijkste principes. In deze paragraaf laten we zien hoe op basis van veiligheidsrendement een programmering kan worden opgesteld die kostenoptimaal is en waarbij de grootste veiligheidswinst of risicoreductie vroeg wordt behaald en projecten met een lager rendement later worden uitgevoerd. Idealiter is dus in de kostenoptimale programmering grofweg dezelfde ontwikkeling te zien als in het optimalisatiepad op trajectniveau, zie Figuur 2-3.

 De 'Gebiedspagina' in het dashboard ontsluit onder meer informatie over de volgorde en doorlooptijd van de versterkingsprojecten, kosten per jaar, overbrugging van de afstand tot de norm en risicoreductie in de tijd.

Door vervolgens de in de inleiding genoemde criteria en wensen in te brengen in de analyses, wordt het effect hiervan op de kostenoptimale programmering in beeld gebracht, wat helpt bij het maken van keuzes omtrent deze criteria.

Onderstaand kader geeft een voorbeeld, waar de hierboven beschreven stappen andersom zijn doorlopen. In het voorbeeld was de programmering in eerste instantie het resultaat van een brede afweging waarin de in de inleiding genoemde criteria en wensen bepalend waren. Vervolgens is met behulp van veiligheidsrendement gereflecteerd op de kosteneffectiviteit. Daarbij is ook de relatie met de initiële projectdefinities gelegd, waarmee iets zichtbaar wordt van de interactie die in de praktijk tussen Trajectaanpak (projectdefinities) en programmeren plaatsvindt.

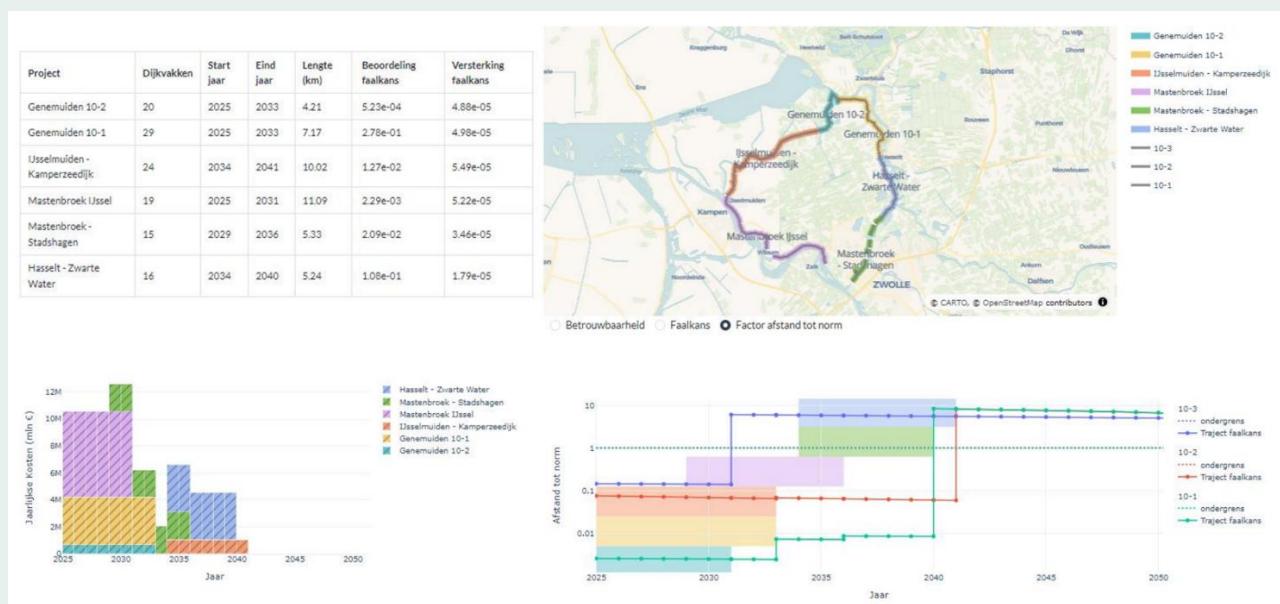
Programmering dijktrajecten Mastenbroek

De polder Mastenbroek in de IJsseldelta wordt beschermd door de dijktrajecten 10-1, 10-2 en 10-3. Op dijktraject 10-3 is inmiddels de verkenningsfase van het project Mastenbroek-IJssel gestart, maar ook op de andere trajecten volgt een opgave uit LBO-1. Bij WDODelta zijn de beoogde versterkingsprojecten nu ingedeeld en geprogrammeerd op basis van een mix van criteria, waaronder urgentie (de afstand tot de norm), het aantal gemeenten binnen één project en mogelijke meekoppelkansen. Veiligheidsrendement van de versterking is daarbij (nog) niet beschouwd.

Bij het programmeren van versterkingsprojecten wordt doorgaans niet expliciet gekeken naar het veiligheidsrendement, terwijl het verhogen van de veiligheid wel de aanleiding is om een dijk te versterken. Het meewegen van het veiligheidsrendement kan leiden tot een effectiever programma: door delen met een hoog veiligheidsrendement eerst te versterken wordt het overstromingsrisico het snelst verlaagd, en is het rendement van de uitgevoerde projecten het hoogst. Uiteraard moet dit voor de programmering als onderdeel van een bredere afweging worden gezien: uitvoerbare, behapbare en goed gedefinieerde projecten zijn een randvoorwaarde voor een effectieve aanpak van de opgave.

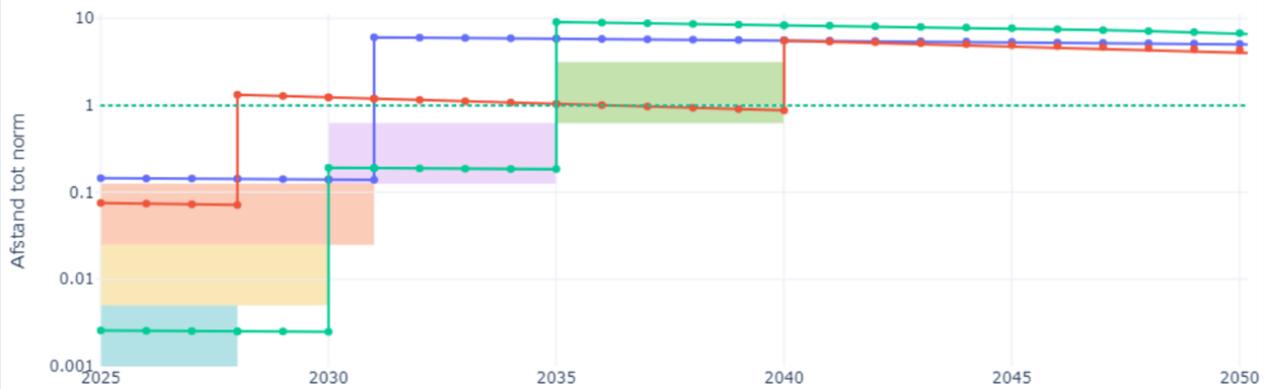
In dit voorbeeld vergelijken we twee programma's: één op basis van het huidige programma van WDODelta, en een ander waarbij op basis van veiligheidsrendement een onderverdeling in projecten is gemaakt en de projectdefinities ook (gedeeltelijk) zijn herzien.

In onderstaande figuur (uitsnede uit de 'Gebiedspagina' in het dashboard) is dit voor het huidige programma weergegeven. Linksboven is de lijst met projecten te zien, inclusief basisinformatie en de periode dat de projecten in uitvoering zijn. Rechtsboven zijn deze op kaart weergegeven. De onderste figuren geven de kosten in de tijd weer, en de afstand tot de norm van de verschillende dijktrajecten. Te zien is dat bijvoorbeeld traject 10-1 pas relatief laat voldoet aan de norm (rond 2040, grafiek linksonder, turquoise lijn), en dat dit pas gebeurt na uitvoering van het project Mastenbroek - Zwarte Water. Iets soortgelijks geldt voor traject 10-2.



In de onderstaande figuur is ook weergegeven wat de afstand tot de norm in de tijd is, maar dan voor een set projecten op basis van veiligheidsrendement, waarbij de projecten gedeeltelijk opnieuw zijn gedefinieerd, mede op basis van aanscherpingen in het kader van een Trajectaanpak. Te zien is dat de afstand tot de norm voor de verschillende trajecten veel sneller afneemt omdat hierbij meer focus is op het versterken van de stukken met het hoogste rendement. De resultaten kunnen ook worden gepresenteerd als afname van het overstromingsrisico.

 De Gebruikershandleiding ([Achtergronden](#)) beschrijft de wijze waarop (de afname van) het overstromingsrisico wordt bepaald.



Legenda

	Project IJsselmuiden-Kamperzeedijk, 10-2		Faalkans traject 10-1
	Project Mastenbroek Stadshagen, 10-1		Faalkans traject 10-2
	Project Mastenbroek IJssel, 10-3		Faalkans traject 10-3
	Project Genemuiden en Zwarde Water, 10-1		
	Project Genemuiden, 10-2		
			Ondergrens 10-1, 10-2 en 10-3

 Via de 'Gebiedspagina' in het dashboard kunnen projecten worden samengesteld, waarna de mate waarin in deze bijdragen aan het overbruggen van de afstand tot de norm of de risicoreductie wordt getoond.

 Zie de [Gebruikershandleiding](#) voor de werkwijze voor het uitvoeren van analyses op gebiedsniveau.

4.4 Anders programmeren met veiligheidsrendement?

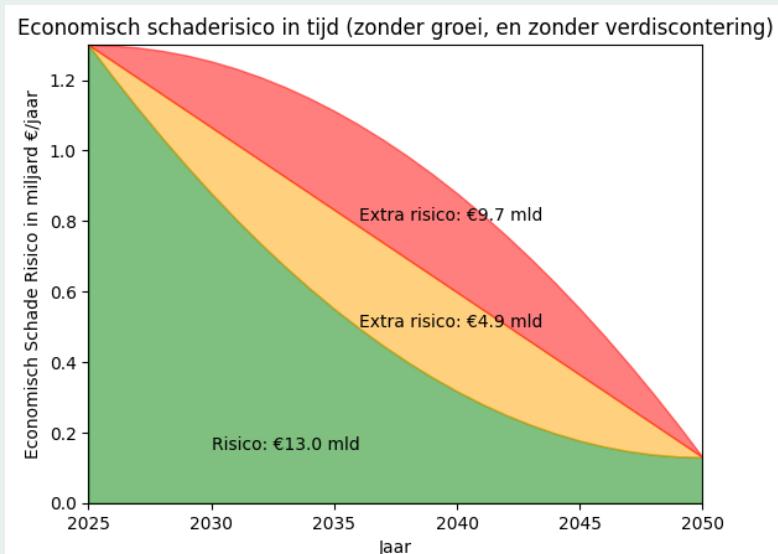
Bovenstaande paragrafen gaan uit van de huidige praktijk van dijkversterkingen: vaak integraal met een beoogde levensduur van 50 jaar voor groene keringen en volgens een vaste projectinrichting en -fasering (verkenning tot en met realisatie). Deze projecten worden vervolgens geprogrammeerd om uiterlijk in 2050 aan de normen te voldoen. De veiligheidsrendementmethode laat zien dat er typen versterkingsopgaven zijn waarbij een ander type projectinrichting en programmering passender kan zijn. Te denken valt bijvoorbeeld aan enkelvoudige versterkingsopgaven van gelijke aard (één mechanisme of type maatregel) die ruimtelijk verspreid zijn. Bijvoorbeeld: in verschillende dijktrajecten in een beheergebied hoeft op basis van veiligheidsrendement in verspreid liggende vakken alleen een verticaal zanddicht geotextiel voor piping aangebracht te worden. Met dat inzicht is het denkbaar dat deze maatregelen vak- en dijktrajectoverstijgend in één project worden samengebracht en geprogrammeerd. De uitvoering van het project vraagt om een andere projectinrichting en -organisatie, een ander omgevingsproces, andere timing (doorlooptijd, planning) en wellicht andere financiering. Het is zelfs denkbaar dergelijke opgaven in een beheergebiedoverstijgend project van meerdere waterkeringbeheerders te vatten.

Kern van het programmeren met veiligheidsrendement is daarbij dat we meer werken vanuit de geest van de overstromingsrisicobenadering: versterken van dijken is een van de belangrijkste maatregelen om dit risico beheersbaar te houden, en elke concessie hieraan en inefficiëntie hierin leidt tot een toename van het maatschappelijke overstromingsrisico. In onderstaand kader is hier een voorbeeld van gegeven.

Eventuele aanpassingen aan de nu gangbare werkwijzen en processen bij waterkeringbeheerders en de alliantie HWBP die daarvoor nodig zijn, vallen buiten het bestek van deze handreiking.

De relevantie van risico op programmaniveau

Wanneer we op programmaniveau kijken naar het risico zal elke versterking bijdragen aan een reductie van het risico. Zoals we echter hebben gezien verschilt de mate van risicoreductie sterk per traject. Op gebieds- (of zelfs landelijk) niveau betekent dit dat de volgorde van HWBP-projecten veel doet met het overstromingsrisico tot 2050. We illustreren dat met een voorbeeld. Stel dat de huidige overstromingskans van een traject met een norm van 1/1.000 per jaar is ingeschat op 1/100 per jaar. Uitgaande van een overstromingsschade van 5 miljard € betekent dit dat het jaarlijks overstromingsrisico $5.000.000.000 * 1/100 = 50$ miljoen €/jaar bedraagt. Uitstel van een versterking met 5 jaar betekent dus grofweg 250 miljoen € extra overstromingsrisico. Wanneer we dus op grotere schaal de projecten met de grootste risicoreductie als eerste uitvoeren scheelt dit veel geld. Geld dat wellicht niet jaarlijks betaald wordt, maar op een dag wel wordt geïncasseerd. In Figuur 4-2 is dit conceptueel op landelijk niveau weergegeven: programmeren op basis van veiligheidsrendement leidt tot grofweg de groene curve. Daarbij worden de projecten die het snelst het risico reduceren het eerst uitgevoerd. Een programmering waarin dat minder of niet wordt meegenomen (oranje/rood) leidt tot een orde grotere hoger overstromingsrisico en dus hogere kosten.



Figuur 4-2 Conceptuele afname van het risico bij verschillende programma's. Groen correspondeert met de grondslag van veiligheidsrendement. Getalswaarden voor risico zijn puur ter illustratie.

4.5 Conclusies en geleerde lessen toepassing veiligheidsrendement bij programmeren

Met behulp van veiligheidsrendementanalyses kan een kostenoptimale programmering kan worden opgesteld. De belangrijkste conclusies en leervaringen zijn:

- Veiligheidsrendementanalyse geven inzicht in:
 - De overbrugging van de afstand tot de norm door projecten. In de huidige praktijk wordt bij het prioriteren vaak teruggegrepen op de initiële afstand tot de norm op trajectniveau. Daarmee wordt belangrijke prioriteringsinformatie gemist. Informatie over overbrugging van

de afstand tot de norm en de mate van risicoreductie is ook zonder toepassing van de veiligheidsrendementmethode te verkrijgen.

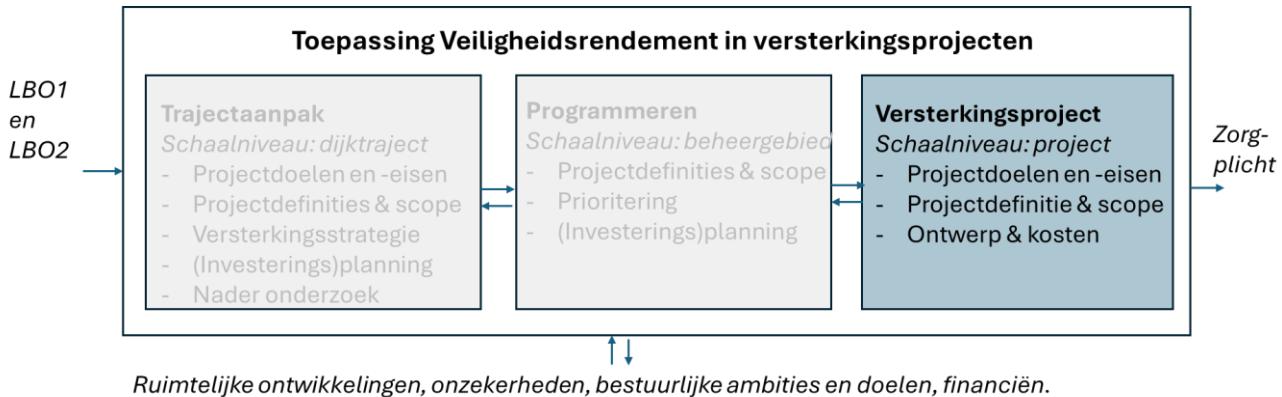
- Risicoreductie door projecten.

Met behulp van de informatie uit de bovenstaande punten kan een kostenoptimale programmering worden opgesteld.

- In de praktijk is de programmering het resultaat van een brede afweging, waarbij, naast ook criteria en wensen ten aanzien van omgeving, organisatie en cashflow een rol spelen. Met behulp van de veiligheidsrendementmethode kan het effect van verschillende keuzes (op basis van de genoemde criteria en wensen) op een kostenoptimale programmering inzichtelijk worden gemaakt. Wanneer onnodig wordt afgeweken van deze kostenoptimale programmering, leidt dit tot een toename van het maatschappelijk overstromingsrisico en dus kosten, wat om grote bedragen kan gaan. De resultaten uit veiligheidsrendement illustreren het belang van meer vanuit de geest van de overstromingsrisicobenadering te gaan prioriteren en programmeren: streven naar efficiënte en doeltreffende reductie van overstromingsrisico's, juist ook op programmaniveau.
- Kern van het programmeren met veiligheidsrendement is dus dat we meer werken vanuit de geest van de overstromingsrisicobenadering: versterken van dijken is een van de belangrijkste maatregelen om dit risico beheersbaar te houden, en elke concessie hieraan en inefficiëntie hierin leidt tot een toename van het maatschappelijke overstromingsrisico.
- De inzichten uit de toepassing van veiligheidsrendement laten zien dat het efficiënt uitvoeren van bijvoorbeeld enkelvoudige versterkingsopgaven maatwerk vraagt in de inrichting van projecten en programma's. Juist het scherper definiëren van de doelstellingen van projecten (enkelvoudige versus meervoudige doelstellingen) kan helpen bij de coherentie en transparantie van het programmeerproces. Eventuele aanpassingen aan de nu gangbare werkwijzen en processen bij waterkeringbeheerders en de alliantie HwBP die daarvoor nodig zijn, vallen buiten het bestek van deze handreiking.
- Belangrijk om op te merken is dat de informatie over het veiligheidsrendement per project ten opzichte van de risicoreductie vooral onderscheidend is bij projecten met een relatief kleine initiële afstand tot de norm. Bij een grote afstand tot de norm is het resulterende risico namelijk groot en wegen de kosten van de maatregelen relatief minder zwaar. Concreet betekent dit dat voor de meest prioritaire projecten in het HwBP een prioritering op basis van veiligheidsrendement weinig zal afwijken van een prioritering op basis van reductie van de afstand tot de norm. Anders gezegd: als de baten van versterking afnemen, neemt de waarde van veiligheidsrendement als beslisinformatie toe. Aangezien dit naar verwachting voor steeds meer projecten/trajecten geldt (omdat trajecten met de grootste afstand tot de norm in het HwBP prioriteit hebben gekregen en dus veelal al zijn of worden versterkt), neemt de relevantie van veiligheidsrendement voor de programmering dus ook toe.

5 Toepassing binnen een versterkingsproject

Dit hoofdstuk beschrijft de toepassing van veiligheidsrendement in dijkversterkingsprojecten. Figuur 5-1 bevat de plek van een versterkingsproject in het proces van wettelijke beoordeling naar zorgplicht.



Figuur 5-1 Positie versterking in het proces van beoordelen tot zorgplicht.

SAMENVATTING VAN DIT HOOFDSTUK

In dit hoofdstuk is uitgewerkt hoe de overstromingsrisicobenadering meer een plaats kan krijgen in de afwegingen rond ontwerp van waterkeringen. Hieronder zijn de belangrijkste inzichten uit dit hoofdstuk alvast samengevat. In het algemeen is dit hoofdstuk wat beschouwender van karakter, waarbij wordt gefocust op de omgang met ontwerpeisen vanuit het perspectief van de risicobenadering, en specifiek de invulling daarvan vanuit veiligheidsrendement.

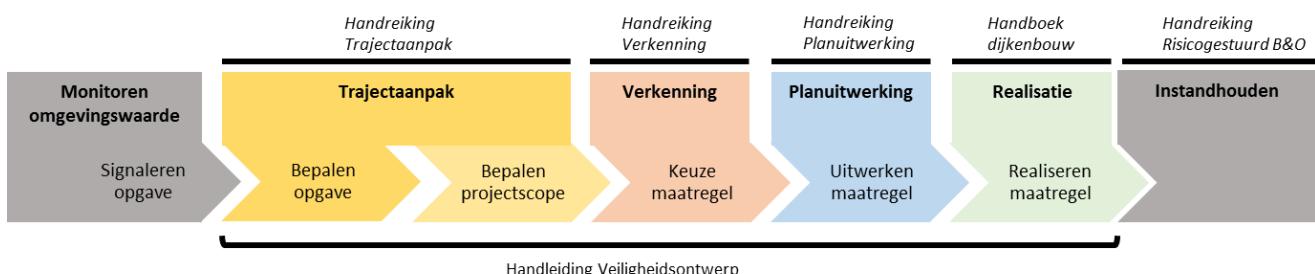
Uit de analyses in dit hoofdstuk blijkt dat door scherper en meer vanuit trajectperspectief naar eisen te kijken een doelmatiger dijkontwerp kan worden gemaakt. Een basis daarvan is om meer vanuit assemblage en trajectfaalkans te redeneren. Dat kan al de basis gegeven om meer maatwerk toe te passen, waarvan blijkt dat dit veel kostenbesparing op kan leveren. Dit kan zowel 'handmatig', als meer gestructureerd met veiligheidsrendement of afgeleide aanpakken daarvan.

In dat kader is er ook meer gestructureerd gekeken naar keuzes in faalkansruimtefactoren en lengte-effectfactoren. Waar in de praktijk hierin beperkt wordt gevarieerd, blijken aannames over deze factoren veel invloed te hebben op de effectiviteit van het ontwerp: door één van beide of beide trajectspecifiek te bepalen wordt meer recht gedaan aan de lokale omstandigheden en dit leidt tot een veel goedkopere versterking met een beter onderbouwde veiligheid. De veiligheidsrendementmethode is een middel om deze optimalisatie van eisen te maken, of zelfs helemaal zonder specifieke vastgepinde eisen te werken in (met name de vroege fase van) projecten.

In hoeverre de veiligheidsrendementmethode zelf een plaats moet krijgen binnen versterkingsprojecten valt op basis van de ervaringen nog niet precies te zeggen. Daarbij is wel de potentie duidelijk naar voren gekomen, met name in vergelijking tot de aanpak dit op dit moment het meest gangbaar is. Op basis van de uitgevoerde analyses ligt het bijvoorbeeld voor de hand om meer systematisch te gaan kijken naar te hanteren factoren voor lengte-effect en faalkansruimte. De veiligheidsrendementmethode kan een zeer handig middel zijn om in de vroegere fasen van versterkingsprojecten hier handen en voeten aan te geven. Een meer algemene werkwijze vanuit veiligheidsrendement in het ontwerp heeft echter bredere consequenties voor het ontwerpproces die verdere doordenking vragen.

5.1 Inleiding

Om de denkwijze van veiligheidsrendement goed te benutten is een vertaling naar gebruik in projecten essentieel. Dat is immers pas de fase waarin concrete maatregelen worden uitgewerkt. Zoals aangegeven in Figuur 5-1 relateert dat aan vragen rond doelstellingen/eisen van een project, de precieze scope en projectdefinitie, en de uiteindelijke ontwerpen en bijbehorende kosten. Dijkversterkingsprojecten duren vaak lang en bestaan uit meerdere fasen met hun eigen detailniveau. E.e.a. is weergegeven in Figuur 5-2. Elke fase heeft zijn eigen handreiking of handleiding. Veiligheidsrendement is een concept dat al deze fasen raakt, aangezien het een onderliggend principe is van het veiligheidsontwerp van een kering: hoe vertalen we de veiligheidseisen naar een doeltreffend ontwerp?

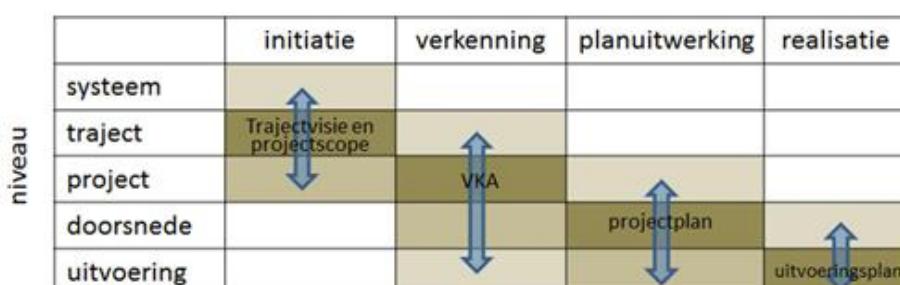


Figuur 5-2 Fasering dijkversterkingsprojecten, overgenomen uit de BOI Handleiding Veiligheidsontwerp (Rijkswaterstaat, 2024).

In de verschillende fasen wordt op steeds hoger detailniveau toegewerkt van een Trajectaanpak/-visie naar een uitvoeringsontwerp en de daadwerkelijke versterking op vak-/doorsneden niveau. In de basis is veiligheidsrendement, met name door de sterke focus op systeem-/trajectniveau, het meest van belang in de beginfasen van een project (initiatie en verkenning). In latere fasen zal het belang en de relevantie wat afnemen. Vragen die in deze beginfase onder andere spelen, en waarbij veiligheidsrendement kan helpen, zijn:

- Aanscherpen van de scope: Waar moeten we precies versterken? Kunnen bepaalde vakken worden ontzien of niet?
- Bepalen van ontwerpeisen: Hoeveel/tot welke eisen moeten we versterken? Welke eisen leiden tot een doeltreffend ontwerp?

Door deze vragen vanuit veiligheidsrendement te beantwoorden wordt de relatie tussen trajectnorm en dijkversterkingsontwerp expliciter en beter gemaakt. De wisselwerking tussen de ruimtelijke schaalniveaus bij een versterking wordt zo uitgewerkt. Dit sluit aan op Figuur 5-3, overgenomen uit de Handreiking Verkenningen (Hoogwaterbeschermingsprogramma, 2017). De ervaring leert dat deze relatie binnen huidige versterkingsprojecten maar beperkt wordt gelegd. Daardoor krijgen de optimalisaties van veiligheidsrendement, zoals toegelicht in paragraaf 2.3, zo niet of nauwelijks een plaats. Daarmee wordt een kans gemist om de overstromingskansbenadering in dijkversterkingsprojecten ten volle te benutten.



Figuur 5-3 Relaties schaalniveaus en projectfasen.

Gedurende een versterkingsproject verandert er vaak veel: conditionerende onderzoeken kunnen invloed hebben op de mogelijke maatregelen op verschillende dijkvakken, aanvullend grondonderzoek leidt vaak tot nieuwe inschattingen van de faalkans en keuzes over gehanteerde toekomstscenario's kunnen veel invloed hebben op de ontwerpdimensies. Dit is altijd een belangrijk aandachtspunt, ongeacht welke methodiek voor het veiligheidsontwerp wordt gebruikt. Zonder goede begininformatie is het immers per definitie lastig om goede beslisinformatie te genereren en besluiten te nemen. De VRM geeft wel een extra middel om eenvoudig gevoeligheden in beeld te brengen.

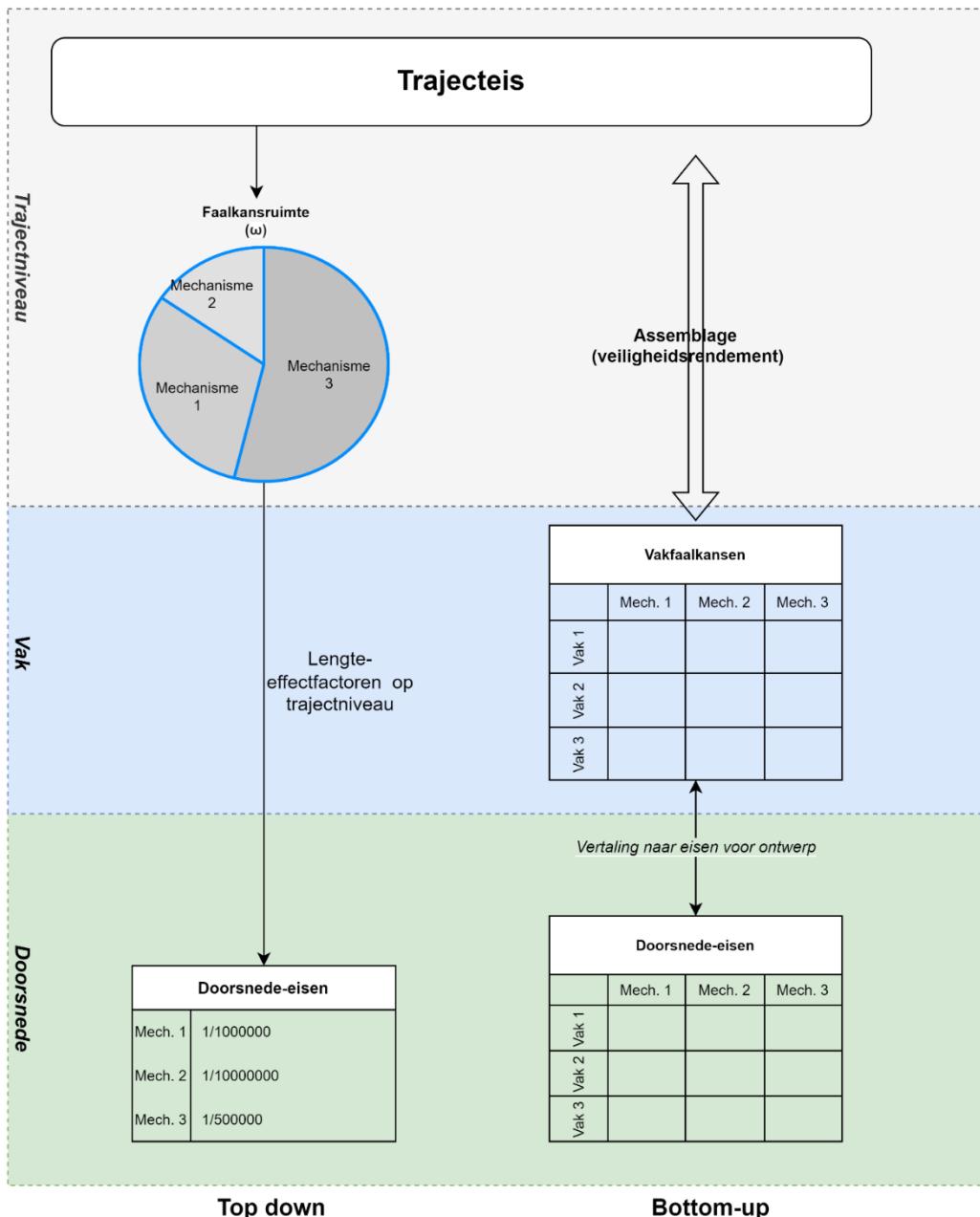
In dit hoofdstuk wordt een voorzet gedaan hoe de toepassing van veiligheidsrendement technisch vorm kan krijgen tijdens een versterkingsproject, en welke keuzes daarbij gemaakt kunnen worden en logisch zijn. Paragraaf 5.2 geeft context bij verschillende manieren om de trajectnorm naar een ontwerp(eis) voor het traject te vertalen. Paragraaf 5.3 schetst beknopt hoe trajectnormen kunnen worden vertaald naar projecteisen. Dit vormt de basis voor het handelingsperspectief voor aanscherping van de scope (paragraaf 5.4) en het definiëren van doeltreffende ontwerpeisen (paragraaf 5.5).

5.2 Top-down en bottom-up: de vertaalslag van trajectnorm naar ontwerp

In de Handleiding Veiligheidsontwerp (Rijkswaterstaat, 2024) wordt voor het ontwerp en afleiden van eisen onderscheid gemaakt tussen een top-down en een bottom-up aanpak. In de huidige praktijk van het ontwerp wordt gewerkt op basis van een top-down aanpak, in de beoordeling is een bottom-up aanpak in het BOI voorgescreven. In Figuur 5-4 zijn beide aanpakken en de gelaagdheid daarin geïllustreerd.

Bij een top-down aanpak worden de eisen stapsgewijs afgeleid, door de trajecteis te vertalen naar eisen per mechanisme op trajectniveau, en vervolgens deze mechanisme-eisen op trajectniveau te vertalen naar eisen op doorsnedeniveau. In de eerste stap wordt de faalkansruimte verdeeld over de mechanismen. In de tweede stap wordt op basis van lengte-effectfactoren op trajectniveau de vertaling gemaakt van traject naar doorsnede. Deze factoren zijn gebaseerd op studies uit het verleden (Alblasserwaard) en worden in de praktijk eigenlijk nooit specifiek voor een traject of project bepaald. Het resultaat van deze aanpak is een eis per mechanisme per doorsnede, op basis waarvan vervolgens een ontwerp wordt gemaakt. In de praktijk is er zelden sprake van een vertaling terug naar trajectniveau (d.w.z. een bepaling van de trajectfaalkans na versterking). Daarnaast is de top-down aanpak redelijk binair: een ontwerp voldoet wel of niet aan de gestelde eis. Daardoor is het lastig om op project-/trajectniveau af te wegen wat de consequenties van een wat zwaardere of minder zware versterking zijn.

Een alternatieve aanpak is om bottom-up te werken, waarbij het beoordelingsresultaat het startpunt is. Dat is in het ontwerpen nog geen gemeengoed, maar gebeurt in de beoordeling al wel. Kansen van doorsneden voor verschillende mechanismen worden gecombineerd tot een trajectkans (na versterking), waarna kan worden bepaald of de kering aan de trajecteis voldoet. Veiligheidsrendement biedt een invulling om dit te doen in de context van een ontwerp.



Figuur 5-4 Top-down versus bottom-up aanpak.

UITGANGSPUNTEN ANALYSES

In het vervolg van dit hoofdstuk leggen we uit hoe veiligheidsrendement kan worden toegepast in het ontwerp en wat hier bij komt kijken. Daarbij onderscheiden we 3 soorten dijkvakken:

- Vakken waarbij de faalkans van alle mechanismen groter is dan de trajecteis
- Vakken waarbij de faalkans van een of meerdere mechanisme(n) kleiner is dan de trajecteis, maar groter dan een eventuele doorsnede-eis.
- Vakken waarbij de faalkans van een mechanisme kleiner is dan een eventuele doorsnede-eis.

We gaan er verder vanuit dat de faalkansinschattingen stroken met het verhaal van de kering (in de praktijk vaak een aandachtspunt).

Het doel van een versterking is om te zorgen dat de trajectfaalkans P_{traject} kleiner is dan de trajectnorm P_{\max} . Qua formules sluiten we aan bij de uitgangspunten van de assemblage zoals beschreven in de Rode Draad Assembleren van het Adviesteam Dijkontwerp (Adviesteam Dijkontwerp, 2024).

In ontwerpen worden doorgaans doorsnede-eisen gehanteerd $P_{\text{eis,drsn}}$ die per mechanisme verschillen. In het algemeen geldt dat

$$P_{\text{eis,drsn}} = \frac{\omega P_{\max}}{N_{\text{traject}}}$$

waarbij geldt dat ω een factor is op de faalkans die de faalkansruimte in rekening brengt (in de huidige praktijk meestal conform het OI2014). N_{traject} vertaalt het lengte-effect op trajectniveau zodanig dat met een doorsnedaalkans redelijkerwijs voldaan wordt aan de trajecteis. Daarbij geldt voor belastinggedomineerde mechanismen (overslag en bekleding) een vaste N -waarde, en voor piping en stabiliteit binnenwaarts wordt deze bepaald middels de volgende formule:

$$N_{\text{traject}} = \frac{a_{\text{traject}} \cdot L}{b}$$

waarbij a_{traject} het deel is van een traject met de lengte L dat significant bijdraagt aan de overstromingskans, en b de lengte van een onafhankelijke strekking. Defaultwaarden zijn gegeven in het kader van het OI2014 en BOI.

Wanneer vanuit een reeks doorsnedaalkansen de trajectfaalkans berekend wordt, geldt dat specifieke doorsneden moeten worden opgeschaald naar vakfaalkansen, en vervolgens gecombineerd tot een trajectfaalkans. Daarbij gaan we uit van de regels uit de assemblage (Adviesteam Dijkontwerp, 2024), waarbij voor geotechnische mechanismen geldt dat de vakfaalkans $P_{f,\text{vak}}$ kan worden bepaald uit de faalkans van de doorsnede $P_{f,\text{drsn}}$ middels:

$$P_{f,\text{vak}} = 1 - (1 - P_{f,\text{drsn}})^{N_{\text{vak}}} \quad \text{met } N_{\text{vak}} = \max(1, \frac{a_{\text{vak}} \cdot L_{\text{vak}}}{b})$$

waarbij a_{vak} de gevoelige lengte binnen een vak voorstelt. Vervolgens worden de vakken als onafhankelijk gecombineerd (grofweg de som van de vakfaalkansen). Een belangrijk aandachtspunt is dat in de praktijk de parameter a_{vak} zelden wordt bepaald. Deze kan zeer sterk verschillen per vak, en is daarom zeer belangrijk bij de juiste vertaling van trajectfaalkans naar doorsnede en vice versa. Voor overslag en bekleding gaan we uit van de maximale faalkans van alle doorsneden.

5.3 Van traject naar projecten

Een belangrijke stap in de Trajectaanpak is het bepalen van de scope van projecten, en het inschatten van de veiligheid na versterking. Hoewel je ontwerpeisen prima in een project kunt vaststellen, zoals we in de navolgende paragrafen zullen zien, is er wel een verband tussen projecten binnen een traject. Met name voor mechanismen waar afhankelijkheid is tussen de faalkansen van vakken die in verschillende projecten worden versterkt, moeten de eisen hiervoor met elkaar in lijn zijn (met name dus voor overslag en bekleding). Ter illustratie: wanneer een dijktraject in drie losse projecten wordt versterkt, zouden zich de volgende situaties kunnen voordoen:

- Wanneer bij het eerst uitgevoerde project een zeer strenge eis wordt gehanteerd voor overloop/overslag en in latere projecten soepelere eisen, leidt dit tot overhoogte op het trajectdeel van het eerste project. In projecten 2 en 3 is het dan beter om een vergelijkbare eis te hanteren voor overloop/overslag. De eisen voor geotechnische mechanismen kunnen dan soepeler worden.
- Wanneer bij het eerst uitgevoerde project een soepele eis wordt gehanteerd voor overloop/overslag, leidt dit tot strengere eisen aan geotechnische mechanismen. Een mogelijk gevolg zijn hogere kosten in projecten 2 en 3, omdat daar deze strengere eisen voor geotechnische mechanismen wellicht tot significant hogere kosten leiden.

Daarom is het raadzaam om eisen voor overloop/overslag en andere mechanismen waarbij sprake is van afhankelijkheid al in de Trajectaanpak te bepalen, en deze alleen in uitzonderlijke situaties nog aan te passen. Anders kan dit leiden tot inconsistenties tussen projecten. Voor geotechnische mechanismen is dit veel minder aan de orde, omdat hier de ruimtelijke variabiliteit binnen een project veel meer invloed heeft dan de precieze faalkansruimtefactor.

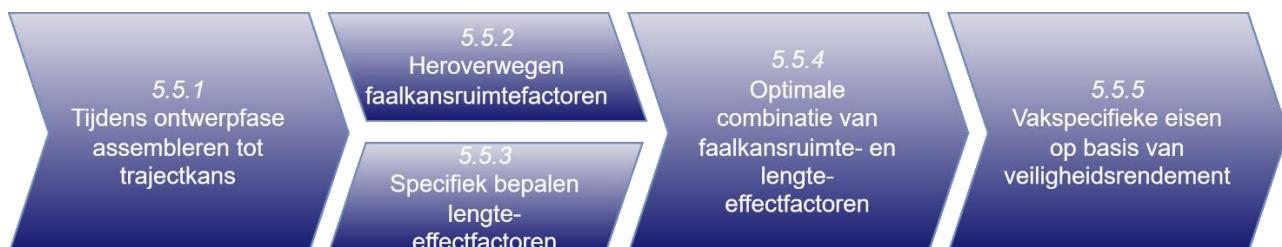
Bovenstaande is ook in lijn met analyses met veiligheidsrendement in het kader van Samenwerken aan Kunstwerken. Daar bleek niet of nauwelijks samenhang tussen de optimale maatregelen voor kunstwerken en geotechnische faalmechanismen te zijn, maar een duidelijke samenhang wanneer er afhankelijkheid is in de faalkansen van overloop/overslag en hoogte kunstwerken.⁹

5.4 Aanscherpen van de scope

Bij een dijkversterking is het streven in het algemeen om een project aan te vangen met een stabiele scope. De praktijk is echter weerbarstig en er zal altijd sprake zijn van onzekerheid in de scope van een startend project. Binnen een project kan het daarnaast onwenselijk zijn om specifieke vakken te versterken, bijvoorbeeld omdat versterking zeer veel impact heeft op de omgeving. De mogelijkheden om een dergelijk vak te ontzien (dus niet te versterken, zie ook het voorbeeld in paragraaf 3.4.2) hangen af van het veiligheidsbeeld én hoe de vertaalslag van trajectnorm naar ontwerpeisen wordt gemaakt. Hoe veiligheidsrendement kan helpen bij het aanscherpen van de projectscope is nader uitgewerkt in het hoofdstuk over de Trajectaanpak.

5.5 Doeltreffende ontwerpeisen bij dijkversterkingen

Een tweede vraag waarbij de veiligheidsrendementmethode kan helpen is het bepalen van doeltreffende ontwerpeisen. In principe is, gegeven dat de invoer juist is (en alle onzekerheden goed zijn meegenomen), het resultaat van een veiligheidsrendementanalyse de economisch meest optimale dijkversterking. Er zijn echter verschillende onderdelen daarin die bijdragen aan het doeltreffender omgaan met ontwerpeisen, en waarmee ook al veel winst kan worden geboekt. Bij de paragrafen is als leeswijzer steeds de structuur in Figuur 5-5 weergegeven. Daarbij geldt dat de stappen in de paragrafen steeds opbouwen, behalve de overweging van faalkansruimtefactoren en lengte-effectfactoren die los (paragraaf 5.5.2 en 5.5.3) of gezamenlijk (5.5.4) kunnen worden gedaan.



Figuur 5-5 Stapsgewijze opbouw ontwerpeisen zoals beschreven in de verschillende subparagraphen.

Niet voor alle stappen is de veiligheidsrendementmethode nodig. Voor assembleren en het heroverwegen van de faalkansruimtefactoren en lengte-effectfactoren is dit niet het geval, hoewel de beslisinformatie wel kan helpen, bijvoorbeeld bij het inschatten hoe zinvol dit is. Voor het bepalen van de optimale factoren in 5.5.4 zijn wel gegevens over kosten en effecten van maatregelen (zoals berekend met de VRTOOL) nodig. Voor eisen op basis van veiligheidsrendement in 5.5.5 wordt de volledige veiligheidsrendementmethode benut. In de huidige ontwerppraktijk wordt assemblage zelden toegepast in het ontwerp. Faalkansruimtefactoren worden vaak wel heroverwogen, maar binnen relatief beperkte grenzen. De overige stappen worden niet toegepast in de praktijk, hoewel t.a.v. heroverweging van lengte-effectfactoren wel ontwikkelingen zijn in een nieuw Kennis & Innovatie project van het HWBP.

⁹ Karolina Wojciechowska, Wouter Jan Klerk, Nienke Kramer, Ellen Tromp (2024) Veiligheidsrendement voor kunstwerken - Toepassing op traject 16-1. Deltares rapport no. 11209667-010-ZWS-0003

5.5.1 Tijdens ontwerp fase assembleren tot trajectfaalkans



Op dit moment is het geen standaardpraktijk om tijdens de ontwerp fase de faalkansen na versterking te assembleren tot een trajectfaalkans. Vanuit de samenhang tussen doorsnede en project/traject zoals die in de Handreiking Verkenningen (Hoogwaterbeschermingsprogramma, 2017) staat beschreven is dit echter wel aan te bevelen: het geeft veel inzicht in het effect van de uiteindelijke versterking, en is gelijk een ontwerpverificatie die als een soort 'eerste beoordeling' na versterking kan worden beschouwd (wanneer dit wordt gedaan bij het uiteindelijk gerealiseerde ontwerp). Ook in eerdere fasen heeft het echter zin, om twee redenen die we nader uitwerken:

1. Verifiëren dat een ontwerp daadwerkelijk tot een voldoende veilig dijktraject leidt (in geval van een project op een deel van het traject: verificatie aan de eisen op projectniveau).
2. Mogelijkheden bieden om bij knelpunten met de faalkanseisen te spelen, of vakken uit situatie B (dijkvak voldoet niet aan de doorsnede-eis, zie Tabel 3-1) gericht uit te sluiten van de scope.

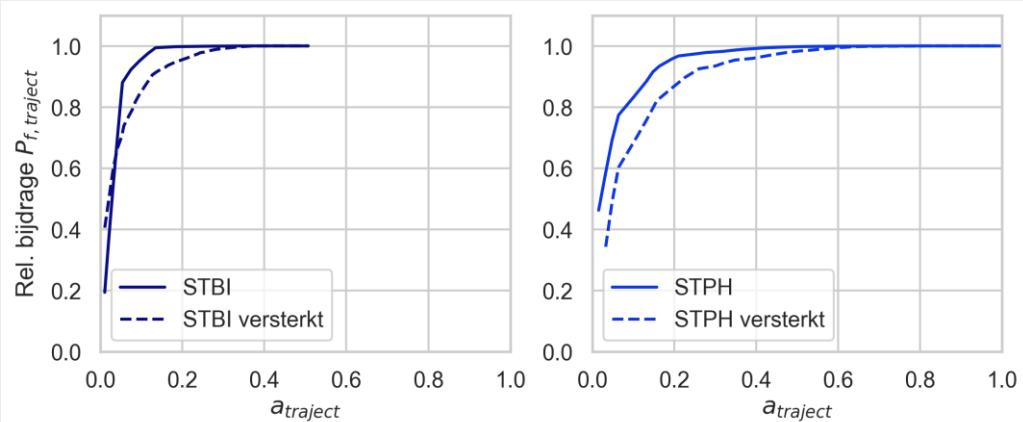
Wat betreft het eerste punt geldt dat de vaak gehanteerde factoren voor faalkansruimte en lengte-effect uit het OI2014v4 gebaseerd zijn op gemiddelde waarden (sterk gebaseerd op de Alblasserwaard). Uit analyses met veiligheidsrendement blijkt dat de 'juistheid' van de gangbare factoren in de praktijk sterk kan verschillen per traject. Hoewel de ontwerpeisen die meestal worden gehanteerd vaak wel tot een ontwerp leiden dat aan de norm voldoet, is dit niet per se het geval. Dit is afhankelijk van hoe toepasbaar de gehanteerde factoren voor faalkansruimte en lengte-effect zijn voor een specifiek traject, en dat hangt weer af van de bijdrage van verschillende vakken en de mate waarin doorsneden opschalen binnen het vak waarop ze betrekking hebben. In onderstaand kader is een voorbeeld gegeven van de bijdragende lengte voor en na versterking van een specifiek traject. Daarbij is te zien (zoals verwacht) dat na versterking de bijdragende lengte groter wordt. Dat komt omdat er na een versterking meer dijkvakken zijn met een vergelijkbare faalkans die significant bijdragen aan de trajectfaalkans (anders gezegd: er zijn minder zwakke schakels).

Opschaling binnen de assemblage – hoe groot is het effect?

Om meer gevoel te krijgen voor de mate van opschaling in de praktijk is een drietal analyses gedaan met de resultaten van dijktraject 10-1 (versie Trajectaanpak, met bodemdaling, zie het kader in paragraaf 3.3). Daarbij kijken we naar het deel van het dijktraject (de bijdragende lengte) die relatief het meeste bijdraagt aan de totale faalkans van het traject. We kijken daarbij naar 3 varianten: een variant waarbij niet wordt opgeschaald binnen dijkvakken (doorsnedekans = vakfaalkans, $N_{vak}=1$), een variant waarbij volledig wordt opgeschaald ($a_{vak}=1$) en een tussenvariant die als meest realistisch wordt gezien waarbij maximaal 4 onafhankelijke doorsneden in een vak zitten ($N_{vak}=4$). Hierbij geldt zoals in paragraaf 5.2 toegelicht dat: $N_{vak} = \max(a_{vak} * L_{vak}/b, 1)$

In onderstaande figuur is de bijdragende lengte voor versterken (doorgetrokken lijn) en na versterken (onderbroken lijn) weergegeven voor het geval met $N_{vak}=4$. Daarbij is op de x-as de bijdragende lengte weergegeven, en op de y-as de relatieve bijdrage van dit deel aan de trajectfaalkans. Te zien is dat de trajectfaalkans voor STBI door een veel kleiner deel van het dijktraject wordt bepaald dan voor STPH. Ook is te zien dat voor STBI de trajectfaalkans bepaald wordt door 10% (voor versterking) en ca. 30% (na versterking) van de trajectlengte. Voor STPH volgt eigenlijk een vergelijkbaar beeld (van 20% naar ~50%).

HwBP voor sterke dijken



Wanneer niet of volledig wordt opgeschaald verandert het beeld enorm. In onderstaande tabel is de fractie van het traject wat een relatieve bijdrage van 90% van de trajectkans heeft weergegeven.

Te zien is dat:

- De bijdragende lengte bij STBI zeer sterk afhankelijk is van de mate van lengte-effect binnen de (maatgevende) vakken. Na versterking valt deze veel hoger uit dan de standaardwaarden in het OI2014.
- De bijdragende lengte bij STPH veel lager uitvalt dan de standaardwaarden die in het OI2014 worden beschreven.
- Het effect van opschaling verschilt tussen de situatie voor en na versterking, wat pleit voor het apart onderbouwen van het lengte-effect in beoordeling en in ontwerp.

Opgemerkt moet worden dat bij STPH wel wordt aangenomen dat er per vak maximaal 4 keer 300 meter bijdraagt aan de faalkans. De ervaring uit bijv. SAFE (Klerk, Kanning, van der Krogt, & Hauth, 2024) is dat dit vaak veel kleiner is omdat vaak enkele maatgevende uittredepunten de faalkans van een dijkvak bepalen. Daar werd gevonden dat ongeveer 2 van de 16 km significant bijdroegen aan de faalkans (wat eigenlijk meer strookt met de variant 'geen opschaling').

Bovenstaande bevindingen laten zien dat het tijdens projecten assembleren van de faalkansen een belangrijke stap is in de verificatie van het ontwerp, én dat het mogelijkheden kan bieden voor optimalisaties in het ontwerp.

Mate van opschaling	$a_{traject}$ voor $0,9 * P_{f,traject}$			
	STBI		STPH	
	Voor versterking	Na versterking	Voor versterking	Na versterking
Geen opschaling in vakken Nvak=1	1%?	3%	10%	20%
Maximaal Nvak=4	5%	10%	12%	30%
Volledig ($a_{vak}=1$)	<5%	50%	12%	30%

Een belangrijk voordeel van assembleren is dat er meer inzicht ontstaat in de relatieve bijdrage van bepaalde vakken. Door specifiek te kijken naar de kansen na versterking en óf en in welke mate de trajectnorm wordt gehaald, kan het ontwerp verder geoptimaliseerd worden. Te denken valt aan:

- Aanscherpen van doorsnedekansen/lengte-effectfactoren voor de meest bijdragende vakken, om zo aan te tonen dat aan de trajectnorm wordt voldaan (zie voor een voorbeeld (Klerk, Kanning, van der Krogt, & Hauth, 2024)). Te zien is dat de opschaling per mechanisme anders doorwerkt. Dat heeft consequenties voor het ontwerp en de trajectfaalkans na versterking.
- Versoepelen van eisen op een lokaal 'lastig' dijkvak, zodanig dat met een goedkopere oplossing alsnog aan de trajectnorm wordt voldaan.
- Versoepelen van eisen voor een mechanisme, zodat een grote (extra) opgave wordt voorkomen.

Opgemerkt moet worden dat deze acties zinvol zijn, maar in de huidige praktijk vaak een ad hoc en ongestructureerd karakter hebben. In de volgende paragrafen wordt uitgewerkt hoe dergelijke optimalisaties gestructureerder kunnen worden opgepakt.

5.5.2 Aanpassen faalkansruimtefactoren



Door te assemblieren kan worden bepaald of er faalkansruimte 'over' is. Ook is het mogelijk om gestructureerder de faalkansruimte-factoren te heroverwegen. Daarvoor geven we in deze paragraaf handvatten.

In de huidige ontwerppraktijk is het vrij gangbaar om bij aanvang van een project de faalkansbegroting tegen het licht te houden. Gangbare aanpassingen zijn bijvoorbeeld het omwisselen van de faalkansruimte voor piping (STPH) en stabiliteit binnenwaarts (STBI) en/of het samen beschouwen van bekleding op binnen- en buitentalud (GEKB en GEBU). Dit levert in principe wat winst op, maar er wordt maar relatief beperkt gebruik gemaakt van de ruimte die er is.

In sommige gevallen is een aanpassing duidelijk en volkomen logisch, zoals het herverdelen van de faalkansruimte van piping over andere mechanismen wanneer een traject hier ongevoelig voor is. Dergelijke aanpassingen kunnen zeer zinvol zijn, omdat anders per definitie een deel van de faalkansruimte niet wordt benut. In veel gevallen zal de afweging echter ook minder duidelijk zijn. Dan kan informatie over kosten en effecten van maatregelen helpen. In onderstaand kader is inzicht gegeven in de kosten van versterking voor verschillende faalkansruimtefactoren. Daaruit leren we dat:

- Een herverdeling van faalkansruimte veel uit kan maken, maar dat dit niet per se hoeft.
- De optimale faalkansruimteverdeling sterk kan verschillen per traject.

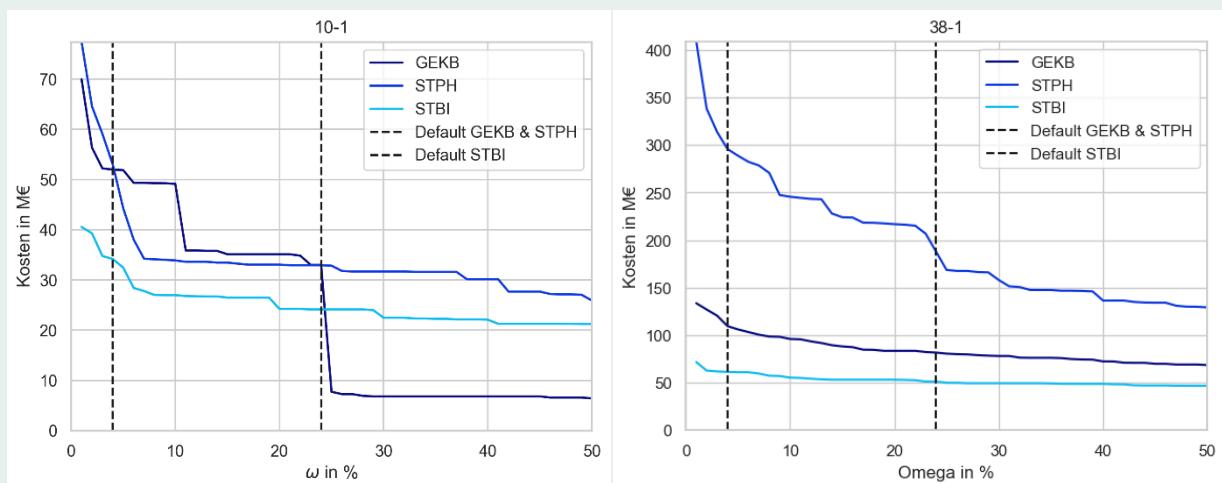
De belangrijkste uitkomst is echter dat het erg variabel is en dus meer maatwerk vereist om tot een doelmatige faalkansverdeling over de mechanismen te komen. Een belangrijke andere factor daarin is de mate van lengte-effect die in rekening wordt gebracht, waar we in de volgende paragraaf op ingaan.

Aanpassing faalkansruimte – effect op versterkingskosten

Een andere faalkanseis kan leiden tot een ander kostenplaatje bij versterking. Per dijktraject kan dit enorm verschillen, ook al worden in de praktijk veelal dezelfde waarden gehanteerd. Zowel op dijktraject 10-1 als dijktraject 38-1 is een opgave op overloop/overslag, piping en stabiliteit binnenwaarts (GEKB, STPH en STBI). Om goed inzicht te krijgen in de impact van het wijzigen van de faalkansruimte factor ω , kijken we per mechanisme naar de kosten om de opgave voor dat mechanisme op te lossen. In de praktijk leidt een strengere eis voor het ene mechanisme natuurlijk tot een soepelere eis voor een ander mechanisme, en sommige maatregelen hebben effect op meerdere mechanismen. We gaan uit van de default lengte-

effectfactoren voor beide trajecten. In onderstaande figuren is links de relatie tussen faalkansruimte ω en kosten voor 10-1 te zien, en rechts voor 38-1. Daarbij is per eis de goedkoopste set maatregelen gekozen die aan de eis voldoet.

Voor 10-1 is te zien dat de huidige defaulteis voor GEKB ($\omega = 24\%$) tot veel hogere kosten leidt dan een iets soepelere eis. Voor STBI en STPH zijn voor een ω van $>8\%$ de kosten redelijk constant. Voor 38-1 zijn de kosten voor STPH dominant, en zijn er voor GEKB geen grote sprongen te zien. Hieruit leren we dat de hoogte van de faalkansruimtefactor ω veel kan uitmaken, maar soms ook weinig verschil maakt in versterkingskosten. Het voornaamste is echter dat dit per traject enorm kan verschillen. Zo is 24% faalkansruimte voor GEKB op traject 38-1 prima, maar op traject 10-1 zeer ongunstig. 24% faalkansruimte voor piping is op 10-1 dan weer prima, maar op traject 38-1 kan iets meer faalkansruimte tot een behoorlijke kostendaling leiden. Dit pleit voor meer maatwerk per traject. Opgemerkt moet worden dat met de informatie gebruikt voor onderstaande grafiek ook een volledige veiligheidsrendementoptimalisatie kan worden uitgevoerd.



5.5.3 Specifiek bepalen lengte-effectfactoren voor ontwerp



Naast de faalkansruimtefactoren hebben ook de lengte-effectfactoren veel invloed op de ontwerpeisen. In paragraaf 5.5.1 is al aan de orde gekomen dat bij assembleren de gevoelige lengte van het dijktraject anders is dan wordt aangenomen in de default factoren uit het OI2014v4. Voor een doeltreffend ontwerp is het uiteraard raadzaam om de werkelijkheid zo goed mogelijk mee te nemen: te lage of te hoge factoren voor het lengte-effect kunnen er toe leiden dat er een onnodig veilig of juist te onveilig dijkontwerp wordt gerealiseerd.

Een belangrijke notie is dat de gevoelige lengte verschilt tussen beoordeling en ontwerp. Dat is een onderscheid waar we in dit project niet op in gaan, maar dit verdient aandacht door bijvoorbeeld voor een aantal representatieve vakken uit te werken hoe, na versterking, de gevoelige lengte verandert. In deze paragraaf gaan we in op de doorverwerking van aannames over het lengte-effect in het ontwerp.

In de default lengte-effectfactoren wordt voor STBI aangenomen dat de gevoelige lengte van het traject 3,3% bedraagt, en de onafhankelijke strekkinglengte gelijk is aan 50 meter. Voor STPH wordt aangenomen dat de gevoelige lengte 90% (bovenrivieren) of 40% (benedenrivieren) is. Afhankelijk van het traject kunnen deze waarden anders zijn, en ook worden aangepast. De praktijk is dat dit eigenlijk niet of nauwelijks gebeurt. De relevante vraag is echter in hoeverre de keuze voor lengte-effectfactoren leidt tot een ontwerp met onnodig hoge kosten of een te hoge trajectfaalkans na versterking. In onderstaand voorbeeld kijken we voor traject 10-1 en traject 38-1 naar de relatie tussen kosten en gehanteerde gevoelige lengte voor STBI en STPH, en de relatie tussen trajectfaalkans na versterking en de gehanteerde gevoelige lengte voor STBI en STPH.

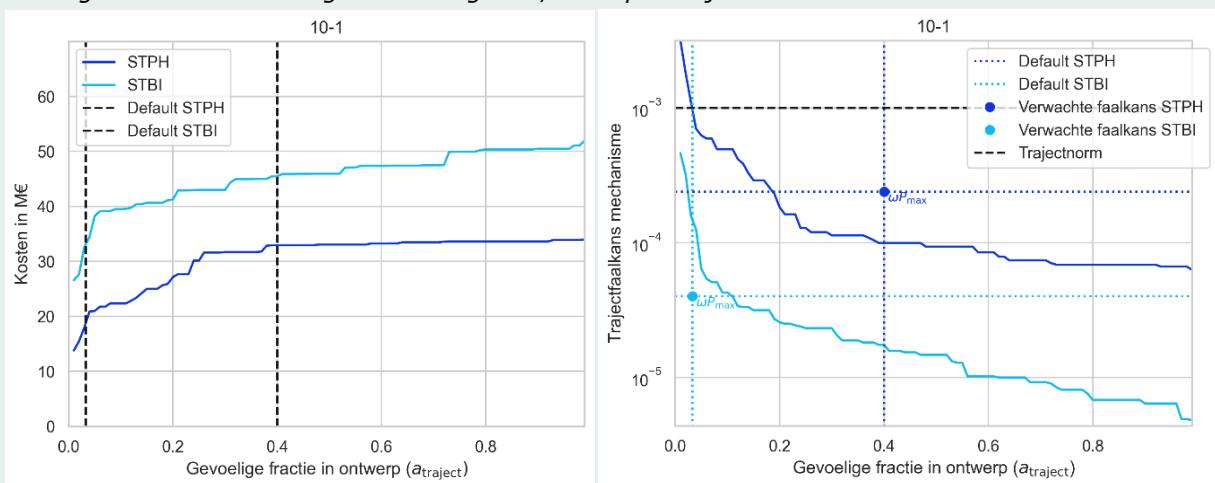
Specifieke bepaling lengte-effectfactoren – consequenties voor veiligheid en ontwerp

Bij het ontwerpen op basis van doorsnede-eisen wordt voor de mechanismen piping en macrostabiliteit binnenwaarts de volgende formule gehanteerd:

$$P_{\text{eis,drsn}} = \frac{\omega P_{\max}}{N_{\text{traject}}} \quad \text{met} \quad N_{\text{traject}} = \frac{a_{\text{traject}} \cdot L}{b}.$$

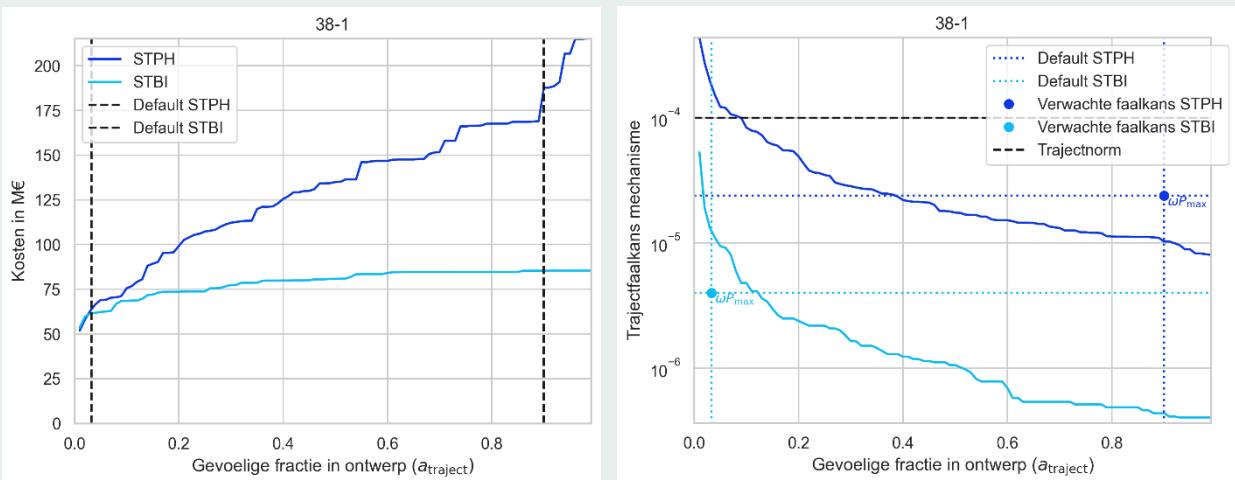
Daarbij is P_{\max} de ondergrens van het traject, ω de faalkansruimte van het mechanisme, N_{traject} de lengte-effectfactor, a_{traject} de gevoelige lengte van het traject, L de trajectlengte, en b de lengte van een strekking waarop onafhankelijk falen kan optreden. We hebben gezien dat in de praktijk de gevoelige lengte van een traject nogal kan verschillen. Afgaande op die resultaten is de verwachting dat de standaard gevoelige lengte voor STBI van 3,3% wat aan de lage kant is, en voor piping de 40 of 90% juist wellicht wat aan de hoge kant. Dat kan leiden tot een onveilig of juist een onnodig duur ontwerp. Daarom kijken we voor 10-1 en 38-1 naar de relatie tussen versterkingskosten en trajectfaalkans voor beide mechanismen. We beschouwen de variant met een opschatting van maximaal $N=4$ per dijkvak (resultaten voor de onder- en bovengrens zijn te vinden in bijlage II).

Figuur 5-6 geeft het resultaat voor 10-1, met links de kosten voor het versterken per mechanisme, afhankelijk van de gehanteerde gevoelige fractie in het ontwerp. Het valt op dat de kosten relatief constant zijn voor alle $a_{traject}$ -waarden tussen grofweg 0.2 en 1.0. Voor lagere waarden zijn de kosten duidelijk lager. In de rechterfiguur is de relatie tussen $a_{traject}$ en de trajectfaalkans weergegeven. De stip geeft daar aan welke trajectfaalkans op basis van bovenstaande formule verwacht mag worden (ωP_{max}). Als deze stip boven de lijn ligt is het ontwerp veiliger dan verwacht, wanneer deze er onder ligt is de daadwerkelijke faalkans groter dan de verwachting. Voor STBI zien we dat de faalkans groter wordt dan de gereserveerde faalkansruimte (lichtblauwe stip ligt onder de blauwe lijn), voor STPH juist kleiner. In dit geval leidt voor STBI en STPH samen de gehanteerde lengte-effectfactor dus tot een veilig ontwerp, maar dit berust op toeval omdat het conservatisme in de inschatting van de gevoelige lengte bij STPH het optimisme bij STBI compenseert. Hierbij moet worden opgemerkt dat de opschaling per dijkvak op uniforme en niet nader onderbouwde wijze is uitgevoerd, maar het laat wel zien dat de standaardfactoren die gehanteerd worden wellicht gemiddeld een aardige indicatie geven, maar per traject tot flink andere resultaten kunnen leiden.



Figuur 5-6 Resultaten voor 10-1 (opschaling met $N=4$ per vak). Links relatie tussen gevoelige fractie van het traject en kosten voor STBI en STPH. Rechts relatie van gevoelige fractie met de resulterende trajectfaalkans voor beide mechanismen.

In Figuur 5-7 zijn dezelfde figuren voor traject 38-1 weergegeven. Hieruit volgt hetzelfde beeld, hoewel de kosten voor oplossen van de pipingopgave hier sterker afhankelijk zijn van de gevoelige fractie (donkerblauwe lijn links loopt steiler), vermoedelijk omdat een groter deel van het traject pipinggevoelig is. Te zien is ook dat de defaultfactoren tot een onevenwichtige balans in de kosten leiden: de kosten voor een veiliger dan verwacht pipingontwerp zijn relatief hoog, voor een onveiliger dan verwacht ontwerp voor stabiliteit juist laag. Dit pleit voor maatwerk bij het bepalen van de te hanteren lengte-effectfactoren in ontwerpen. In Bijlage II zijn de figuren opgenomen voor beide trajecten zonder opschaling en met volledige opschaling. Uit de figuren zonder opschaling (optimistisch uitgangspunt) blijkt dat zelfs in dat geval voor STBI de trajectfaalkans na versterking maar net 'binnen de gestelde faalkansruimte past'.



Figuur 5-7 Resultaten voor 38-1 (opschaling met $N=4$ per vak). Links relatie tussen gevoelige fractie van het traject en kosten voor STBI en STPH. Rechts relatie van gevoelige fractie met de resulterende trajectfaalkans voor beide mechanismen.

Uit bovenstaande analyses blijkt het volgende:

- De bij het afleiden van ontwerpeisen gehanteerde standaardwaarden voor gevoelige lengte ($a_{\text{trajectory}}$) voor piping (STPH) en macrostabiliteit (STBI) zijn voor beide trajecten verre van optimaal:
 - Voor STBI lijken deze structureel aan de lage kant, wat leidt tot een onverwacht hoge trajectfaalkans.
 - Voor STPH lijken deze structureel aan de hoge kant, wat leidt tot onnodig hoge kosten.
- De relatie tussen kosten en gehanteerde waarden voor gevoelige lengte in ontwerp zijn niet hetzelfde per traject.

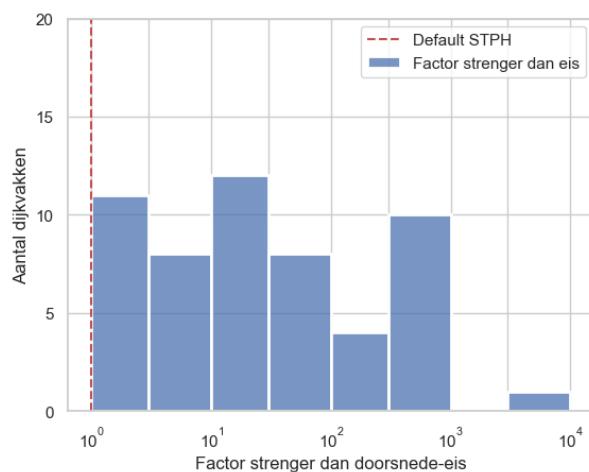
Deze bevindingen pleiten voor het integraal kijken naar faalkansruimtefactoren (zoals geïllustreerd in de voorgaande paragraaf) en lengte-effectfactoren. Daarbij gaan we niet alleen op zoek naar een goede lengte-effectfactor, maar kijken we in samenhang met de faalkansruimtefactor ω , eerder beschouwd in paragraaf 5.5.2. Daar gaat de volgende paragraaf nader op in.

5.5.4 Optimale combinatie van faalkansruimtefactoren en lengte-effectfactoren



Zoals uit de voorgaande paragrafen is gebleken, is de beste keuze voor faalkansruimteverdeling en lengte-effectfactoren afhankelijk van het specifieke traject. In een ontwerpcontext zijn beide waarden aan elkaar gerelateerd: wanneer meer faalkansruimte wordt ingeruimd voor een mechanisme, is de faalkanseis soepeler en wordt daarmee het deel van het traject wat hier significant aan bijdraagt korter. Daarom is het logisch om in de context van ontwerpeisen beide waarden per traject in samenhang te beschouwen, om een onnodig dure/zware versterking en/of een versterking die niet aan de trajectnorm voldoet te voorkomen. Anders gezegd zoeken we naar eisen per mechanisme die er voor zorgen dat eisen op doorsnedeniveau per faalmechanisme zodanig worden gesteld dat deze (a) leiden tot een voldoende kleine trajectfaalkans en (b) zo laag mogelijke kosten.

In de praktijk worden uniforme eisen per mechanisme gebruikt: elke doorsnede van een traject mag maximaal een bepaalde faalkans hebben. Uit de analyses van lengte-effecten in voorgaande paragrafen blijkt dat na versterking een groot deel van het traject een veel kleinere faalkans heeft dan de eis, het draagt immers niet of nauwelijks bij aan de totale trajectfaalkans. Een uniforme eis betekent dus niet dat elke doorsnede dezelfde veiligheid heeft na versterking: in sommige gevallen is de effectiefste methode om piping op te lossen middels een verticale constructie, die bijvoorbeeld een veel kleinere faalkans heeft omdat de meerkosten van extra veiligheid heel beperkt zijn. Bij veiligheidsrendement worden vakken niet aan/uit gezet, maar wordt gekeken welke maatregel voor welk(e) mechanisme(n) de meeste veiligheid oplevert in verhouding tot de investering. Er worden dus geen faalkanseisen gehanteerd. Dit is terug te zien in Figuur 5-8. Hier is voor piping voor één van de trajecten inzicht gegeven in de verschillende vakken en hoeveel veiliger dan de gehanteerde doorsnede-eis de representatieve doorsnede wordt (in dit geval voor piping). Te zien is dat voor ca. 11 dijkvakken de uiteindelijke faalkans minder dan een factor 3 strenger is dan de eis, maar dat voor het grootste deel van de vakken het ontwerp orde groottes veiliger is. Dat is een werkelijkheid die met het afzonderlijk 'draaien aan' lengte-effectfactoren en faalkansruimte lastig recht te doen valt.



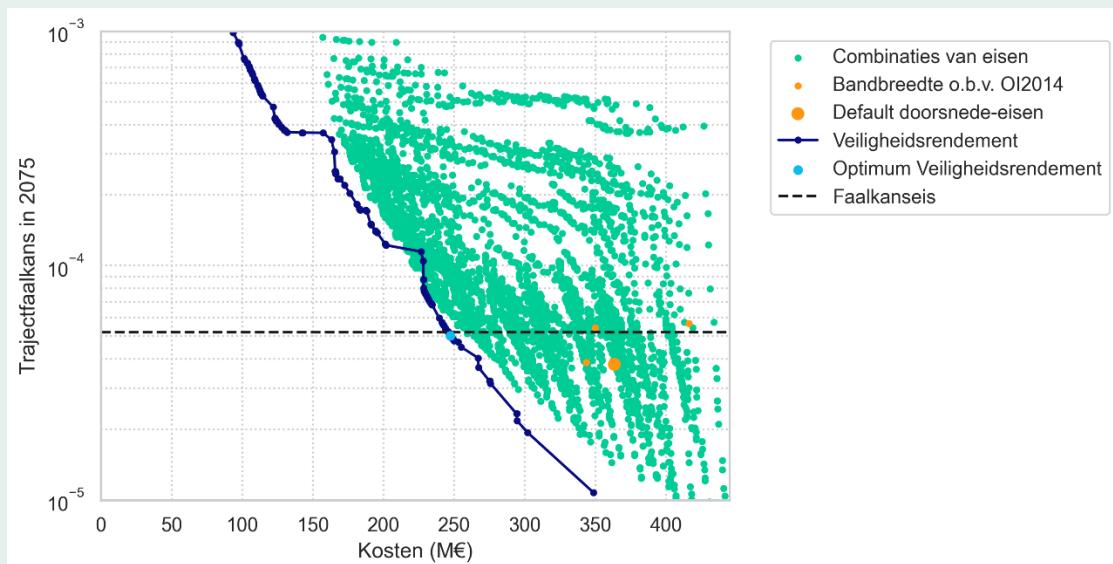
Figuur 5-8 Resulterende doorsnedaafalkansen na versterking voor STPH op traject 10-1.

Op basis van de maatregelen die met de VRTOOL zijn doorgerekend kan worden bepaald wat een optimale combinatie is van ontwerpeisen, waarbij we integraal kijken naar de lengte-effectfactor N_{traject} en faalkansruimtefactor ω . Dit kan vervolgens inzicht geven in welke eisen zouden leiden tot het meest doelmatige ontwerp (met de beperking dat eisen altijd uniform moeten zijn per faalmechanisme). In onderstaand kader kijken we voor traject 38-1 telkens naar de goedkoopste combinatie van maatregelen waarmee voldaan wordt aan een set doorsnede-eisen voor overslag, piping en stabiliteit binnenwaarts. Dat geeft inzicht in de kosten en trajectfaalkans die horen bij een set uniforme ontwerpeisen per mechanisme.

Optimaliseren van uniforme ontwerpeisen

In Figuur 5-9 is voor traject 38-1 gekeken naar de kosten en resulterende trajectfaalkans van in totaal ca. 3000 verschillende combinaties van doorsnede-eisen voor overslag, piping en stabiliteit binnenwaarts. Deze zijn weergegeven in de groene puntenwolk. Daarbij is telkens voor die set doorsnede-eisen de goedkoopste versterkingsmaatregel per dijkvak geselecteerd. De blauwe lijn geeft de relatie tussen trajectfaalkans (in 2075) en versterkingskosten van de bijbehorende veiligheidsrendementanalyse. De oranje punten geven gangbare variaties op basis van het OI2014 (bijvoorbeeld het uitwisselen van STPH en STBI). De dikke oranje punt geeft het resultaat bij de defaultwaarden aan. De zwarte lijn geeft de faalkanseis volgend uit de standaard voor deze faalmechanismen gereserveerde faalkansruimte (52% van de ondergrens van 1/10.000 per jaar). Uit deze figuur valt het volgende op te maken:

- De vertaling van trajectnorm naar faalkanseisen voor mechanismen kan zeer veel invloed hebben op de resulterende trajectfaalkans en de kosten om deze te bereiken.
- De op dit moment gehanteerde bandbreedte (oranje punten) ligt ver van de optimale combinatie van eisen voor dit traject. Dit kan per traject verschillen maar een situatie waarin de huidige aanpak optimaal zou zijn is toeval.



Figuur 5-9 Kosten en trajectfaalkans voor veiligheidsrendement en diverse combinaties van uniforme ontwerpeisen voor traject 38-1. In oranje zijn de meest gangbare variaties weergegeven. Uitgangspunt is dat binnen vakken het lengte-effect leidt tot een maximale opschaling met een factor 4.

De resulterende optimale uniforme eisen zijn weergegeven in Tabel 5-1. Daarbij is iteratief een combinatie van ω en $a_{traject}$ bepaald die (ook op basis van bijv. Figuur 5-9) leidt tot een 'sluitende begroting'.¹⁰ Te zien is dat met een relatief simpele bepaling van de gevoelige lengte en herverdeling van faalkansruimte ω eenvoudig 20% bespaard kan worden op de versterkingskosten.

Tabel 5-1 Optimale en default uniforme eisen 38-1.

	Geoptimaliseerd			Default	
Mechanisme	N_{LE}/ω uit optimalisatie	ω	$a_{traject}$	ω	$a_{traject}$
GEKB	6	16,7%	n.v.t.	24%	n.v.t.
STPH	120	24%	30%	24%	90%
STBI	640	11,3%	12,5%	4%	3,3%
Totaal		52%		52%	
Versterkingskosten	227 M€			291 M€	

Uit bovenstaande analyses blijkt het volgende:

- Door gezamenlijk te zoeken naar een optimale combinatie van faalkansruimteverdeling en lengte-effectfactor (hier uitgedrukt in gevoelige/bijdragende lengte) kan een grote kostenbesparing op de dijkversterking worden gerealiseerd zonder dat er serieus wordt afgeweken van de huidige werkwijze.
- Uniforme eisen stellen per mechanisme kan tot een oplossing qua kosten en trajectfaalkans leiden die slechts marginaal minder effectief is dan een ontwerp op basis van veiligheidsrendement. Daarvoor is wel een uitgebreide analyse nodig van de kosten en resulterende faalkans (vergelijkbaar met veiligheidsrendement).
- In aanvulling daarop moet wel worden opgemerkt dat het stellen van uniforme eisen er niet toe leidt dat overal waar versterkt wordt de faalkans rond de gestelde eis ligt, vaak is het economisch aantrekkelijk om juist een wat veiligere oplossing te kiezen (bijv. in geval van constructieve oplossingen).

5.5.5 Optimale ontwerpeisen op basis van veiligheidsrendement, per vak en mechanisme



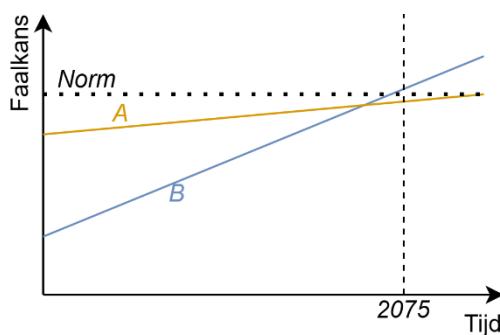
¹⁰ Merk op dat dit strikt genomen niet nodig is: er zou ook direct met een formulering als $P_{eis,dsn} = P_{max}/N$ kunnen worden gewerkt, waarbij in dit geval geldt dat $N=120$ voor bijv. STPH.

In voorgaande paragrafen is geredeneerd vanuit de bestaande systematiek van faalkansbegroting en lengte-effectfactoren. Vanuit het perspectief van trajectfaalkansen is dit echter een keuze, en niet per se nodig. De veiligheidsrendementmethode werkt zonder eisen te stellen aan mechanismen en/of dijkvakken, en optimaliseert puur op basis van veiligheid (risico in de tijd) en kosten welke maatregelen het beste kunnen worden getroffen. Dat leidt in principe in alle gevallen tot een voordeliger dijkversterking dan het stellen van uniforme eisen, doordat er altijd meer speelruimte is om de opgave op te lossen. Zoals in Figuur 5-9 te zien is kan het verschil wel zeer klein zijn: de groene punten liggen daar dicht bij de blauwe lijn van veiligheidsrendement.

Bij een versterking kunnen vanuit veiligheidsrendement verschillende doelstellingen worden geformuleerd. In deze paragraaf gaan we uit van de volgende twee doelstellingen:

- Minimale kosten om te voldoen aan de eis in 2075,
- Minimale totale kosten van overstromingsrisico en versterkingskosten(economisch optimum).

Doelstelling A is in de voorgaande paragrafen gebruikt en is meestal uitgangspunt bij dijkversterkingen (met de hiervoor gemaakte kanttekeningen). Doelstelling B is de basis van de veiligheidsrendementmethode. Het verschil tussen die twee wordt geïllustreerd in Figuur 5-10. Daar is te zien dat de oplossing A (oranje lijn) met de laagste faalkans in een specifiek jaar (2075) niet per definitie ook de oplossing is met het laagste overstromingsrisico, omdat het tijdsverloop van de faalkans sterk kan verschillen per mechanisme. Het kan dus voorkomen dat de economisch optimale oplossing tot een grotere faalkans leidt dan de eis in 2075 (oplossing B), of juist een kleinere. In de praktijk ligt dit meestal wel dicht bij elkaar. Bovendien geldt dat oplossingen voor veiligheidsrendement die aan een bepaalde eis in een gegeven jaar voldoen de optimale oplossing gegeven die eis goed benaderen. Dit is bijvoorbeeld zichtbaar in Figuur 5-6 en Figuur 5-7, waar de veiligheidsrendementoplossing inclusief tussenstappen het Pareto front¹¹ voor totale versterkingskosten en faalkans in 2075 vormt.



Figuur 5-10 Illustratie van het verschil tussen criteria A en B.

In deze paragraaf werken we verder uit hoe veiligheidsrendement kan worden gebruikt om te komen tot doeltreffende dijkontwerpen, en hoe uitkomsten van veiligheidsrendementanalyses kunnen worden gebruikt in een ontwerp.

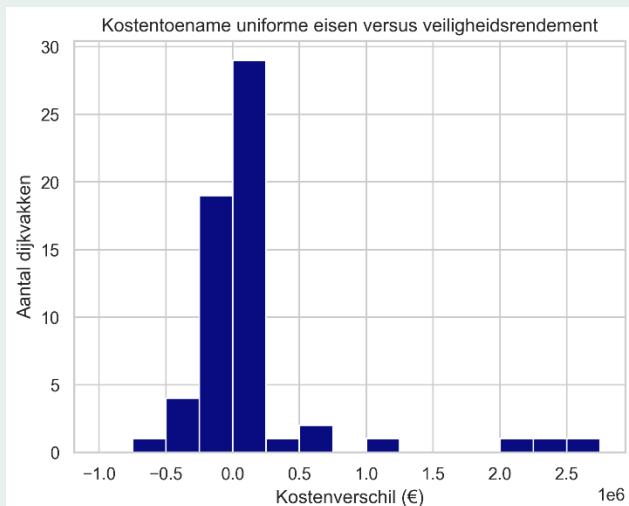
In de basis kijkt de veiligheidsrendementanalyse alleen naar de totale trajectfaalkans (in de tijd) en hoe dit vertaalt naar risico. Daardoor is het mogelijk dat in een traject met een norm van 1/10.000 per jaar, één dijkvak een faalkans van 1/9.999 per jaar heeft en alle andere dijkvakken een faalkans van bijv. 10^{-9} . Dan wordt alsnog aan de trajecteis voldaan. In de praktijk is dit natuurlijk niet aan de orde, maar een verschil met de uniforme eisen uit de vorige paragraaf is dat doorsneden wel een relatief groot deel van de

¹¹ Een Pareto front wordt gevormd door de punten waarvoor geldt dat er geen combinatie van parameters is waarvoor beide (in dit geval) kleiner worden. Dus in dit geval de dijkversterkingsoplossingen waarvoor geen alternatief is met een lager totaal risico én lagere kosten.

faalkansruimte kunnen gebruiken, wanneer het rendement van verder versterken erg laag is. In onderstaand kader is dit voor traject 38-1 verder uitgewerkt. Daaruit blijkt dat inderdaad voor een aantal vakken voor het faalmechanisme piping de faalkansen groter zijn dan de optimale uniforme eis, omdat op deze vakken het rendement van verder versterken beperkt is. Wat met name opvalt is dat een heel groot deel van de dijkvakken, in beide gevallen, sowieso veel veiliger wordt dan volgens de eis noodzakelijk.

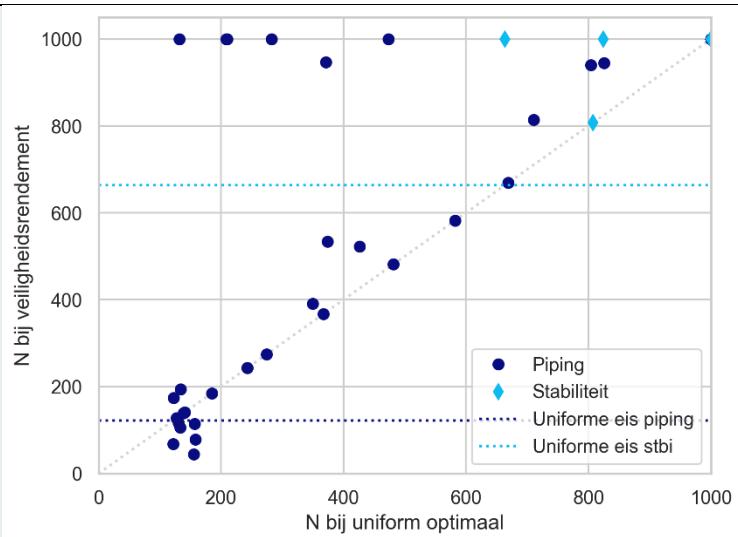
Uniforme eisen en kansen uit veiligheidsrendement voor traject 38-1

In principe bieden eisen op basis van veiligheidsrendement de mogelijkheid om lokaal nog efficiënter om te gaan met complexe situaties (bijv. bij bebouwing). Er zullen dus bij veiligheidsrendement vakken kunnen zijn waar, zoals in de hoofdtekst geïllustreerd, relatief veel faalkansruimte wordt 'gebruikt'. Voor dijktraject 38-1 zien we dat de versterkingskosten bij optimale uniforme eisen (zie vorige paragraaf) en veiligheidsrendement respectievelijk 228 en 222 M€ zijn, een beperkt verschil van slechts ~3%. Onder de motorkap is dat verdeeld als in volgend histogram. Te zien is dat er voor het overgrote deel van de dijkvakken zeer beperkte verschillen zijn (orde enkele meters berm), maar dat er enkele vakken zijn waar bij veiligheidsrendement wel een significant goedkopere oplossing wordt gekozen, mét een soepelere veiligheidseis. Dit is speelruimte die er bij veiligheidsrendement wel is, maar bij uniforme eisen niet.



Figuur 5-11 Verschil in kosten tussen een veiligheidsrendementoptimalisatie en de optimale combinatie van uniforme eisen.

Wanneer we kijken naar wat dit impliceert in termen van kansen kunnen we kijken naar de verdeling van kansen over de vakken. We drukken dit uit als de verhouding tussen de doorsnede-kans van een dijkvak en de norm (waarbij geldt dat $P_{eis,drsn} = P_{max}/N$). Figuur 5-12 geeft deze N-waarden voor de optimale uniforme eisen en de oplossing op basis van veiligheidsrendement. N-waarden groter dan 1000 zijn niet weergegeven, maar deze hebben sowieso weinig impact op de trajectfaalkans en zijn dus niet onderscheidend tussen beide gevallen. Te zien is dat er bij veiligheidsrendement voor piping (donkerblauw) voor een aantal vakken een kleinere faalkans volgt dan bij uniforme eisen, te zien aan de bolletjes boven de neutrale (grijze stippel)lijn. Voor een aantal vakken volgt juist een grotere faalkans (onder de neutrale lijn). Die laatste zijn de vakken waar in de vorige figuur een groter kostenverschil zichtbaar was en waar veiligheidsrendement dus leidt tot een aanvullende optimalisatieslag.



Figuur 5-12 Verschil in verhouding N tussen norm en doorsnede-eis voor optimale uniforme eisen en veiligheidsrendement per dijkvak.

In algemene zin is te zien dat beide methoden niet enorm onderscheidend zijn qua kosten en maatregelen, en beide leiden tot een ontwerp met lagere kosten. Qua aanpak vallen echter wel vraagtekens te zetten bij het hanteren van een uniforme eis: te zien is dat deze in werkelijkheid maar voor heel weinig vakken toegepast wordt. Dit werd eerder al zichtbaar in Figuur 5-: ook al wordt er een uniforme eis gehanteerd, de resulterende faalkans varieert sterk en maar een klein deel van de doorsneden wordt ontworpen op of rond de gestelde eis. In dat licht is een indeling in categorieën wellicht passender. Daarbij is wat meer diversiteit tussen vakken, naar gelang de omstandigheden. Daar gaat het vervolg van de hoofdtekst verder op in.

In de eerdere paragrafen van dit hoofdstuk is het belang van assemblage in het ontwerp, en het beter (in samenhang) onderbouwen van lengte-effect en faalkansruimtefactoren in de voorbeelden uitgewerkt en ook redelijk duidelijk: de kostenbesparing is enorm, en met de huidige aanpak bestaat het risico dat we onder- of overdimensioneren. Bij de keuze om eisen te bepalen op basis van veiligheidsrendement óf op basis van optimale uniforme eisen voor een heel traject is het onderscheid echter minder duidelijk: het verschil in kosten is relatief beperkt (zeker in het licht van andere onzekerheden zoals bijv. de keuze voor het te hanteren klimaatscenario of zichtjaar), en de consequenties voor de uiteindelijk aangelegde dijk zijn meer een kwestie van smaak. Per saldo zijn er in dit speelveld twee keuzes te maken: (1) uniforme of niet-uniforme eisen per mechanisme hanteren, en (2) deze eisen stellen aan dijkvakken of aan doorsneden. In Tabel 5-2 zijn de voor- en nadelen van deze keuzes benoemd.

Tabel 5-2 Voor- en nadelen typen eisen.

		VoordeLEN	NadeLEN
(1) Uniformiteit	Uniforme eisen	<ul style="list-style-type: none"> - Helderder in ontwerpfase doordat er 1 set eisen per mechanisme kan worden gehanteerd - Geen "zwakke(re)" schakels na versterking¹² 	<ul style="list-style-type: none"> - In de praktijk is een dijktraject verre van uniform, ook na versterking. - Hogere versterkingskosten (verschilt per traject)
	Niet-uniforme eisen (o.b.v. veiligheidsrendement)	<ul style="list-style-type: none"> - Meest efficiënt qua kosten - Sluit van nature aan op assemblagegedachte, die belangrijk is voor verificatie ontwerp 	<ul style="list-style-type: none"> - Lokaal relatief "zwakkere" vakken. - Bewerkelijker door verschillen in eisen tussen vakken/doorsneden en per mechanisme. - Eisen kunnen veranderen bij veranderingen in systeem.
(2) Schaalniveau	Eisen op doorsneden niveau	<ul style="list-style-type: none"> - Brengt uniformiteit in ontwerpproces: alle doorsneden (minimaal) even veilig 	<ul style="list-style-type: none"> - Vertaling naar vakfaalkans en traject afhankelijk van ontwerp. Voor verificatie dus hoe dan ook assemblage nodig.
	Eisen op vakiniveau	<ul style="list-style-type: none"> - Lengte-effect explicet in ontwerp: doorsnedefaalkans wordt direct vertaald naar vakeis/vakfaalkans 	<ul style="list-style-type: none"> - Minder uniform: zelfs bij uniforme eisen aan vakken zijn eisen aan doorsneden verschillend door verschillen in lengte-effecten binnen vakken. - Keuzes in vakindeeling werken door in verandering in eisen aan ontwerp.

Ten aanzien van de uniformiteit, kunnen vanuit veiligheidsrendement ook doorsnede-eisen (of vakeisen) worden afgeleid per dijkvak, door de faalkansen uit veiligheidsrendement te vertalen naar een eis. Het ligt voor de hand om dit bijvoorbeeld te doen aan de hand van een aantal categorieën. Een voorbeeld is gegeven in Tabel 5-3, waarbij telkens per categorie een eis is bepaald (per dijkvak, maar dit zou evengoed per doorsnede kunnen). Werken met categorieën maakt de werkwijze minder bewerkelijk. Voor de dijkvakken met de grootste faalkans (dus de "zwakkere" schakels) wordt de kans uit de veiligheidsrendementmethode wel 1-op-1 overgenomen. Vaak zullen dit ook dijkvakken zijn die relatief complex zijn om te versterken.

12 Een veelgehoord misverstand is dat we zo vakken krijgen die niet aan de norm voldoen, maar dat is onjuist. Er wordt altijd aan de norm voldaan op trajectniveau, en daarmee ook door alle individuele dijkvakken. Daarbij kan variatie zijn tussen dijkvakken, net als er nu in de beoordeling (en in ontwerpen) variatie is tussen de faalkans van verschillende dijkvakken.

Tabel 5-3 Mogelijke categorieën eisen o.b.v. veiligheidsrendement.

Faalkans veiligheidsrendement (vak)	Afgeleide eis per vak
$P_{VRM} < P_{max}/1000$	$N > 1000$
$P_{max}/300 > P_{VRM} > P_{max}/1000$	$N > 300$
$P_{max}/100 > P_{VRM} > P_{max}/300$	$N > 100$
$P_{max}/30 > P_{VRM} > P_{max}/100$	$N > 30$
$P_{VRM} > P_{max}/30$	$N > P_{max}/P_{VRM}$

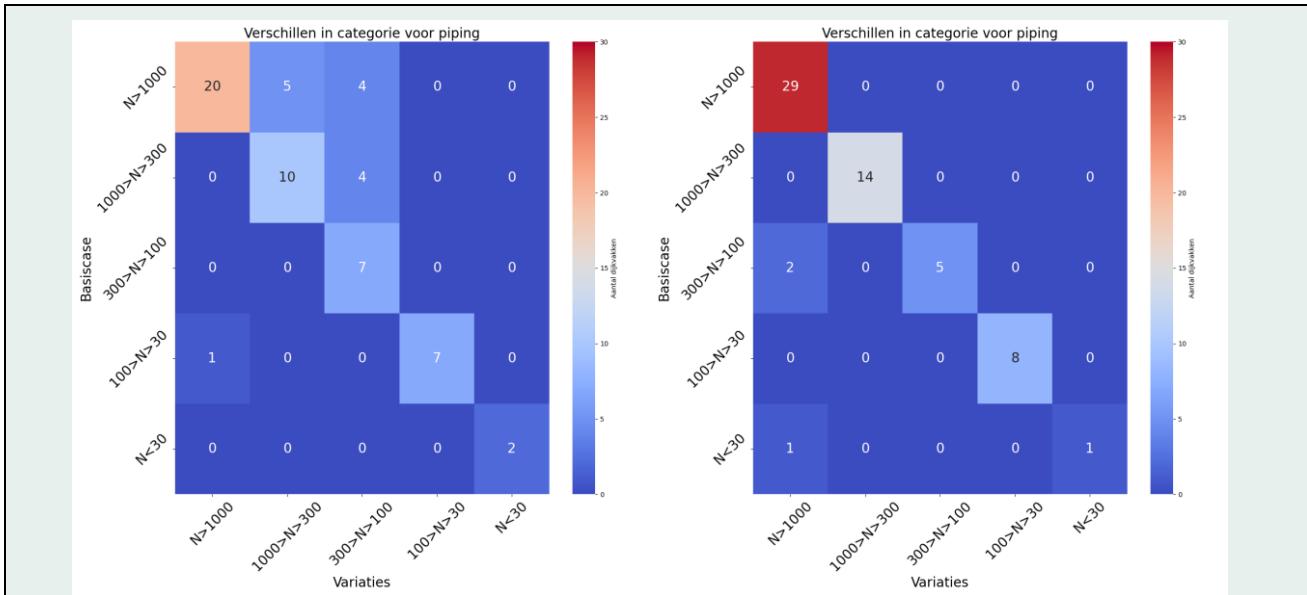
Voor traject 38-1 is de bovenstaande tabel vertaald naar ontwerpeisen, en vervolgens doorgerekend. Daaruit blijkt dat de vakspecifieke eisen leiden tot een vrijwel identieke oplossing als op basis van veiligheidsrendement (verschil in kosten ~1,5 %). Het categoriseren van eisen leidt dus tot nauwelijks verlies van efficiëntie.

Een belangrijke vraag bij vakspecifieke eisen (maar eigenlijk ook bij geoptimaliseerde uniforme eisen) is in hoeverre deze stabiel zijn gedurende een project. Nieuwe kennis, andere kosten en andere maatregelen kunnen allemaal leiden tot een verandering van eisen. Aangezien het systeemgedrag ook expliciet wordt meegenomen bij het bepalen van de eisen, zou er zelfs een soort ‘waterbed-effect’ kunnen ontstaan: door tegenvallers op het ene dijkvak moeten de eisen voor het andere dijkvak worden aangescherpt. Als er meer op systeemniveau wordt gedacht (en dus meer vanuit de geest van de risicobenadering gewerkt) is dit een reële zorg binnen projecten.

In onderstaand kader is een voorbeeld uitgewerkt voor traject 38-1. Daaruit blijkt dat het ‘waterbed-effect’ meevalt: doordat de meeste versterkingskosten gemaakt worden met het oplossen van de stabiliteits- en pipingopgave heeft het assembleren van dijkvakken als onafhankelijk automatisch een dempend effect. In dat opzicht zal een systeem sterker reageren op wijzigingen in de veiligheid voor overloop en overslag: aangezien hierbij vakken onderling afhankelijk zijn, is een forse kostentegenvaller voor dijkverhoging of ongunstig uitvallend klimaatscenario mogelijk wel van grotere invloed op de te hanteren ontwerpeisen, omdat dit tot een andere optimale faalkansruimteverdeling leidt. In de uitgevoerde gevoelighetsanalyses is wel zichtbaar dat er bijvoorbeeld bij duurdere verticale pipingoplossingen soms andere keuzes worden gemaakt (meer berm, of een stabiliteitsscherm). Dat kan lokaal wel tot een wijziging in eisen leiden.

Stabiliteit van eisen op basis van veiligheidsrendement

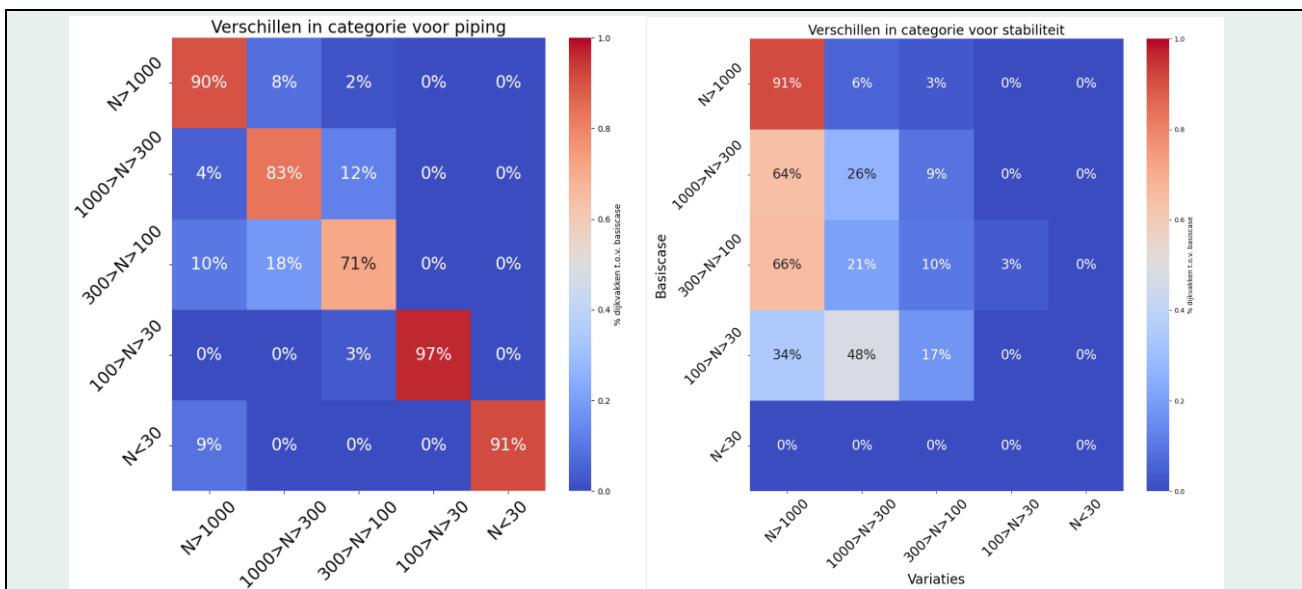
Om een beeld te krijgen van de mate waarin eisen beïnvloed worden door andere invoer is gekeken naar twee relevante variaties. Als eerste kijken we naar de invloed van kosten voor verticale pipingmaatregelen. Ten opzichte van de basissituatie zijn in Figuur 5-13 de categorieën voor afgeleide eisen (conform Tabel 5-3) weergegeven. Op de verticale as is de categorie in de basiscase weergegeven, en op de horizontale as de categorie bij een aangepaste kostenfunctie. Categorieën zijn uitgedrukt in N, waarbij geldt dat $P_{eis}=P_{max}/N$. Bij de linker figuur zijn de kosten van de verticale pipingmaatregelen 3x hoger, bij de rechterfiguur 2x lager. In het geval met hogere kosten zien we dat er voor een deel van de vakken wat soepelere eisen worden gehanteerd. Bijvoorbeeld: van de oorspronkelijk 29 vakken met $P_{eis} < P_{max}/1000$ geldt na aanpassing van de kosten voor 5 vakken $P_{eis} < P_{max}/300$ en voor 4 vakken $P_{eis} < P_{max}/100$. Maar voor in totaal 46 vakken blijft de eis in dezelfde categorie (alle vakken in de diagonaal: 20+10+7+7+2). Voor de variant met 2x lagere kosten volgt op enkele vakken een nog wat strengere eis uit de veiligheidsrendementanalyse, maar blijft dit goeddeels gelijk.



Figuur 5-13 Categorisering van eisen in de basiscase, versus met 3x duurdere verticale pipingmaatregelen (links) en 2x goedkopere (rechts). Getallen geven het aantal dijkvakken aan, de diagonaal betekent dat de eisen niet veranderen met veranderende kosten van maatregelen.

Een andere beschouwde variatie is een casus waarbij de β uit de beoordeling voor STBI is gevarieerd. Daarbij zijn 30 cases doorgerekend waarbij voor elk vak de β is gevarieerd volgens een standaardnormale verdeling ($\mu=0$, $\sigma=1$). Dit geeft een indicatie van de gevoeligheid voor variaties in beoordelingsresultaat. In Figuur 5-14 zijn de categorieën voor piping en stabiliteit binnenaarts weergegeven. Daarbij is het percentage veranderingen weergegeven per categorie: wanneer in de originele berekening de sterkste eis gold voor piping is dit bij de 30 cases in 90% van de gevallen zo (linker figuur, linksboven), en is de kans dat één categorie lager wordt gehanteerd ongeveer 8%. Voor stabiliteit valt op dat er bij de variaties veel meer dijkvakken in de sterkste categorie vallen. De logische verklaring hiervoor is dat op veel meer dijkvakken gekozen wordt voor een constructieve maatregel (damwand/diepwand) waardoor automatisch een veel hoger veiligheidsniveau wordt gehaald. Dit laat zien dat, hoewel er wel degelijk variaties zijn en die lokaal best impactvol kunnen zijn voor de versterking (zie rechter figuur: matrix voor stabiliteit), in het algemeen de eisen afgeleid uit veiligheidsrendement niet leiden tot enorme consequenties op systeemniveau (zie linker figuur: matrix voor piping, waar resultaten redelijk gelijk blijven). Soortgelijke conclusies zullen gelden voor de gevoeligheid van uniforme eisen.

HwBP voor sterke dijken



Figuur 5-14 Percentage van de 30 cases waarin dezelfde (diagonaal), of een andere categorie wordt gehanteerd voor de eis. Links voor piping, rechts voor STBI.

In algemene zin geldt ook dat het te verwachten valt dat het waterbedeffect voor geotechnische mechanismen meevalt. Dat is eenvoudig te illustreren met een voorbeeld: wanneer we uitgaan van een ontwerp dat 5% veiliger is dan de trajectkans bij een trajectnorm van 1/1.000 geeft dat een totale trajectfaalkans na versterking van 9.5×10^{-4} . We nemen aan dat een enkel vak met een oorspronkelijke eis van $P_{max}/300$ door tegenvallers een grotere faalkans krijgt. De faalkans van de rest van het traject houden we gelijk. In onderstaande tabel is de relatie tussen faalkans van het vak en de trajectfaalkans weergegeven. De eerste kolom geeft aan hoeveel groter de faalkans van het betreffende vak wordt. Te zien is (rode cellen) dat pas vanaf een 30 keer grotere faalkans het traject niet meer aan de trajectnorm voldoet. Lokale wijzigingen zullen daarom niet snel tot compleet andere eisen op trajectniveau leiden. Zoals in paragraaf 5.5.2 aangegeven is dit voor mechanismen met afhankelijkheid een ander verhaal.

Factor grotere faalkans	Faalkans vak	Faalkans rest	Trajectfaalkans
1	3.17×10^{-6}	9.49×10^{-4}	9.52×10^{-4}
3	9.52×10^{-6}	9.49×10^{-4}	9.59×10^{-4}
10	3.17×10^{-5}	9.49×10^{-4}	9.81×10^{-4}
30	9.52×10^{-5}	9.49×10^{-4}	1.04×10^{-3}
100	3.17×10^{-4}	9.49×10^{-4}	1.27×10^{-3}

In het algemeen blijkt dat vakspecifieke eisen niet zo gevoelig zijn voor het waterbedeffect: door het systeemgedrag, en het feit dat de bijdragen van veel vakken relatief beperkt zijn, dempen wijzigingen uit. Uiteraard kunnen grote kostenstijgingen of grote wijzigingen in veiligheidsoordeel wel tot een heel ander

ontwerp leiden, maar dat is in de huidige situatie en zonder veiligheidsrendement niet anders. Wat wel een belangrijke vraag is, is in hoeverre de hier uitgewerkte optimalisaties in het bredere palet van onzekerheden nog relevant zijn. Waarbij er natuurlijk geen reden is om “omdat A en B onzeker zijn, bij C zomaar iets te doen”. In de volgende paragraaf gaan we daar wat verder op in.

5.6 Omgaan met onzekerheden

In de vorige paragraaf is al van een aantal onzekerheden verkend hoe ze de ontwerpeisen beïnvloeden. De effecten van onzekerheden als de huidige faalkans en de effecten en kosten van maatregelen zijn goed in beeld te brengen. Hoewel er logischerwijs in alle gevallen een verschuiving ontstaat als faalkansen veranderen of maatregelen duurder worden, zijn deze effecten door het systeemgedrag niet significant anders wanneer wordt uitgegaan van eisen op basis van veiligheidsrendement versus (geoptimaliseerde) uniforme eisen. Aan de andere kant is het overal hanteren van gestandaardiseerde factoren voor faalkansruimte en lengte-effect juist een voorbeeld van niet in de geest van de risicobenadering omgaan met onzekerheden. Door de grote praktische variaties is er (veel) conservatisme nodig in de diverse factoren, om tot voldoende veilige keringen te komen. Óf, wanneer met meer gemiddelde waarden wordt gewerkt, zou het kunnen dat er een dijk wordt aangelegd die niet aan de norm voldoet.

In de vertaalslag van trajectkans naar ontwerpeisen spelen ook andere onzekerheden een grote rol, waarvan we er nu twee specifiek benoemen.

Ten eerste wordt in de praktijk het lengte-effect binnen vakken (met name bij STBI) meestal niet expliciet meegenomen. Dit lengte-effect heeft veel invloed op de benodigde versterkingsmaatregelen, én de lengte-effectbijdrage verandert na versterking. Dit is iets wat niet wordt meegenomen in veiligheidsrendementberekeningen, maar waarvan wel nader moet worden bekeken hoe belangrijk dit in de praktijk is. De Handleiding Veiligheidsontwerp lijkt een logische plek om ontwerpers daarvoor praktische handvatten aan te reiken.

Ten tweede wordt er veelal standaard uitgegaan van een ontwerphorizon van 50 jaar en een klimaatscenario W+. Aangezien aannames over toename van hydraulische randvoorwaarden vooral doorwerken in belastinggedreven mechanismen, met name overloop en overslag, kan de aannname van een klimaatscenario en zichtjaar veel invloed hebben op de (optimale) eisen aan de kering. Dit effect kan met veiligheidsrendement wel worden meegewogen door bijv. een hoekpuntenanalyse uit te voeren met verschillende scenario's, maar is niet standaard. In het voorbeeld in paragraaf 5.5.2 is te zien dat een iets andere combinatie van faalkans (in 2075) en eis voor overloop en overslag tot significant andere versterkingskosten kan leiden.

Een scherpe beoordeling van de huidige situatie is altijd een belangrijke basis voor een goed ontwerp: weten waar en in welke mate er versterking nodig is. Het kan dan lijken of het denken in rendement in de ontwerpcontext ook leidt tot “scherpe ontwerpen” waarvan de vraag is of de geplande levensduur wordt gehaald. Dat is echter niet het geval: werken vanuit veiligheidsrendement maakt alleen de relatie tussen lokale maatregelen en de betekenis op systeemniveau duidelijker, wat juist kansen biedt om slimme keuzes te maken.

Hoewel enigszins buiten de scope van deze handreiking, kunnen we ten aanzien van het robuust ontwerpen de volgende aspecten onderscheiden:

- Robuust ontwerpen op trajectniveau heeft bijv. betrekking op de ontwerphorizon en is afhankelijk van de meerkosten voor een extra lange ontwerphorizon. Vanuit een overstromingsrisicobenadering kan dit alleen bepaald worden door op trajectniveau te kijken, omdat de functionele eis (overstromingskans) voor dijktrajecten ook op trajectniveau is gespecificeerd. Veiligheidsrendement kijkt hiernaar vanuit een afweging tussen kosten en risicoreductie over 100 jaar, en kan dus helpen een ontwerphorizon te onderbouwen. Concreet: in sommige cases leidt de economisch optimale oplossing op basis van veiligheidsrendement tot een hoger veiligheidsniveau dan “ondergrens in

2075". Dit is een indicatie dat het niet alleen robuust maar juist ook doelmatig kan zijn om voor een langere horizon te versterken.

- Ten aanzien van onzekerheid over aannames (richting de toekomst) is met name de vraag of deze onzekerheden de kans (onacceptabel) vergroten dat het traject eerder dan de geplande horizon opnieuw versterkt moet worden. Op vakniveau kan dit verder geduid worden wanneer er vakken zijn die daaraan een onevenredig grote bijdrage leveren (bijv. als er lokaal veel onzekerheid is over bodemdaling). In zulke gevallen is lokaal extra veiligheid in het ontwerp innemen aantrekkelijk.

Ten aanzien van bovenstaande punten kan een veiligheidsrendementanalyse helpen met het kwantificeren, bijvoorbeeld door in een hoekpuntenanalyse te kijken naar verschillende klimaatscenario's en de doorwerking hiervan op ontwerphorizon, type maatregelen en dimensionering, vanuit de context van de trajectnorm.

5.7 Inpassing in het ontwerpproces

In voorgaande paragrafen zijn stapsgewijs de keuzes die voorliggen bij het stellen van eisen aan ontwerpen uitgewerkt. Het hoofdadvice is om in ieder geval assemblage meer centraal te zetten in ontwerp. Dat vereist sowieso een wat andere aanpak dan nu en sluit aan bij Handleiding Veiligheidsontwerp (Rijkswaterstaat, 2024).

Wat dit precies betekent voor het ontwerpproces moet verder worden uitgewerkt, maar we schetsen een aantal scenario's hoe dit vorm zou kunnen krijgen:

- Scenario 1: Op basis van een analyse in de Trajectaanpak worden indicatieve uniforme (paragraaf 5.5.4) of vakspecifieke eisen (paragraaf 5.5.5) bepaald. Dat kan met veiligheidsrendement o.b.v. indicatieve kosten voor versterking of op basis van expert judgement. Deze worden meegegeven in ontwerp, en waar relevant wordt er lokaal van afgeweken, met onderbouwing vanuit assemblage.
- Scenario 2: Gedurende het ontwerpproces worden er meerdere keren eisen bepaald op basis van de meest recente informatie over beoordeling en maatregelen. Soms leidt dit tot een herziening van eisen, en een nieuwe ontwerpiteratie. Op basis van de uitgevoerde analyses is de verwachting dat het aantal herzieningen beperkt zal zijn.
- Scenario 3: In het ontwerp worden eisen (uniform of vakspecifiek, zie Tabel 5-2) meegegeven, maar worden altijd (parametrische) ontwerpvarianten bepaald (kosten en faalkans) voor soepelere en strengere eisen, waarmee vervolgens op systeemniveau gekeken wordt hoe deze verschillende varianten op trajectniveau tot een doeltreffende combinatie leiden. Uiteraard kan er dan vanuit andere overwegingen/criteria meer of minder worden versterkt (bijv. robuustheid, omgeving), maar de relatie tussen ontwerp en veiligheid is dan volledig helder en transparant.

Welk scenario het meest passend is hangt af van de fase van het project en de precieze situatie.

5.8 Conclusies en geleerde lessen toepassing veiligheidsrendement in projecten

In dit hoofdstuk is uitgewerkt hoe de overstromingsrisicobenadering meer een plaats kan krijgen in de afwegingen rond ontwerp van waterkeringen. Door scherper en meer vanuit trajectperspectief naar eisen te kijken kan een doelmatiger dijkontwerp worden gemaakt. De basis daarvan is om meer vanuit assemblage en trajectfaalkans te redeneren. Dat kan al het vertrekpunt vormen voor meer maatwerk, waarvan is gebleken dat dit veel kostenbesparing op kan leveren. Deze aanpak sluit aan bij het werken vanuit het verhaal van de kering: we kijken waar en op welke wijze we vanuit het overkoepelende doel van acceptabel risico (= voldoen aan de waterveiligheidsnormen) we het beste kunnen ingrijpen.

Er is ook meer gestructureerd gekeken naar keuzes in faalkansruimtefactoren en lengte-effectfactoren. Waar in de praktijk hierin beperkt wordt gevareerd, blijken aannames over deze factoren veel invloed te hebben op de effectiviteit van het ontwerp: door één van beide of beide trajectspecifiek te bepalen wordt meer recht gedaan aan de lokale omstandigheden. Dit leidt tot een veel goedkopere versterking met een beter onderbouwde veiligheid. De veiligheidsrendementmethode is een middel om deze optimalisatie van eisen te

maken, of zelfs helemaal zonder specifieke vastgepinde eisen te werken in (met name de vroege fase van) projecten.

In hoeverre de veiligheidsrendementmethode zelf een plaats moet krijgen binnen versterkingsprojecten valt op basis van de ervaringen nog niet precies te zeggen. Wel is de potentie duidelijk naar voren gekomen, met name in vergelijking tot de aanpak dit op dit moment het meest gangbaar is. Op basis van de uitgevoerde analyses ligt het bijvoorbeeld voor de hand om meer systematisch te gaan kijken naar te hanteren factoren voor lengte-effect en faalkansruimte. De veiligheidsrendementmethode kan een zeer handig middel zijn om in de vroegere fasen van versterkingsprojecten hier handen en voeten aan te geven. Een meer algemene werkwijze vanuit veiligheidsrendement in het ontwerp heeft echter bredere consequenties voor het ontwerpproces die verdere doordenking vragen.

6 Conclusies

VEILIGHEIDSRENDEMENT ALS OPERATIONALISERING VAN DE OVERSTROMINGSKANSBENADERING

In de praktijk van beoordelen, definiëren van projecten en ontwerpen van versterkingsmaatregelen, wordt steeds meer invulling gegeven aan de ruimte die de overstromingskansbenadering biedt. De veiligheidsrendementmethode levert hieraan ook een bijdrage en biedt een middel om de overstromingskansbenadering verder te operationaliseren. De veiligheidsrendementmethode ondersteunt het expliciet maken van keuzes over investeringen in overstromingsrisicoreductie, en het omgaan met onzekerheden hierin. In het algemeen is de bevinding dat het belangrijk is dergelijke integrale afwegingen tijdig te maken: in de Trajectaanpak en het begin van de verkenningsfase is er procesmatig nog ruimte voor, maar later vaak niet meer in projecten.

Vanuit de geest van de overstromingskansnormen ligt toepassing van veel van de in deze handreiking benoemde thema's/onderwerpen voor de hand. De veiligheidsrendementmethode kan hier een middel voor zijn, maar ook andere methoden op basis van bijvoorbeeld veiligheidstekort kunnen al een grote praktische verbetering zijn van toepassing van de overstromingskansbenadering.

TOEPASSING IN DE TRAJECTAANPAK

In de Trajectaanpak is een belangrijke stap om de veiligheidsopgave uit de beoordeling te vertalen naar een stabiele (aanpak van) de versterkingsopgave. De belangrijkste conclusies en leervaringen zijn:

- Uit de analyse van de huidige en **toekomstige veiligheidsopgave** leren we dat, waar in LBO-1 geen sprake hoeft te zijn van een veiligheidsopgave, dit in de toekomst wel het geval kan zijn en dat investeringen in die vakken kunnen bijdragen aan een kostenoptimale dijkversterking. Alleen een beoordeling met een korte zichtduur is dus niet voldoende voor een goed onderbouwde scope.
- De **kwaliteit van de gegevens** waarmee een veiligheidsrendementanalyse wordt uitgevoerd is een belangrijk aandachtspunt. De vraag daarbij is: wat is goed genoeg? In het algemeen luidt het antwoord: als nieuwe informatie niet leidt tot een ander antwoord op de beslisvraag. Met behulp van een veiligheidsrendementanalyse is het eenvoudig om met hoekpuntenanalyses de kwaliteit van de informatie te onderzoeken gegeven de vraag: (waar) heb ik een versterkingsopgave? Hiermee wordt het **effect van onzekerheden** op de te versterken locaties, type en omvang van maatregelen en prioritering overzichtelijk in beeld gebracht en nut en noodzaak tot aanscherping van de onderliggende faalkansanalyses duidelijk gemaakt. Dit sluit aan bij de leidende principes ('stabiel en transparant handelingsperspectief') uit de Handleiding Overstromingskansanalyse van het Beoordelings- en OntwerpInstrumentarium (BOI).
- De resultaten van een veiligheidsrendementanalyse geven inzicht in de **prioriteringsvolgorde** van dijkvakken. Dit ondersteunt het komen tot logische eenheden en projectdefinities (en de programmering). Ook zonder een volledige veiligheidsrendementanalyse kan echter al, op eenvoudigere wijze, gekomen worden tot een logische prioritering van dijkvakken.
- Zowel eenvoudige methoden (o.b.v. veiligheidstekort) als veiligheidsrendementsanalyses helpen per vak met de bepaling of **versterking echt noodzakelijk is**. Dat wil zeggen: niet of minder versterken (vakken 'ontzien'), waarmee bijvoorbeeld overlast in de omgeving voorkomen of beperkt kan worden. Voorwaarde is uiteraard dat de faalkans van het vak dat ontzien wordt minimaal kleiner is dan de trajectnorm.
- Een veiligheidsrendementanalyse kan inzicht geven in de **consequenties voor kosten en trajectfaalkans** van het **opleggen of juist beperken van een bepaald maatregeltype** (bijv. alleen constructies en geen bermen, omdat er weinig ruimte is) ten opzichte van de situatie waarin geen maatregelen worden opgelegd of beperkt (bijv. wel bermen toestaan).

TOEPASSING IN DE PROGRAMMERING

Met behulp van veiligheidsrendementanalyses kunnen kosten en overstromingsrisico van programma's van dijkversterkingen inzichtelijk worden gemaakt. Zo helpt het bij het effectiever reduceren van overstromingsrisico met dijkversterkingsprojecten. De belangrijkste conclusies en leervaringen zijn:

- Veiligheidsrendementsanalyses geven inzicht in:
 - De overbrugging van de afstand tot de norm door projecten. In de huidige praktijk wordt bij het prioriteren vaak teruggegrepen op de initiële afstand tot de norm op trajectniveau. Daarmee wordt belangrijke prioriteringsinformatie gemist. Informatie over overbrugging van de afstand tot de norm en de mate van risicoreductie is ook zonder toepassing van de veiligheidsrendementmethode te verkrijgen, maar VRM voegt daar de doorkijk naar kosten en maatregelen aan toe.
 - Risicoreductie door projecten.
- Met behulp van de informatie uit de bovenstaande punten kan een kostenoptimale programmering worden opgesteld.
- In de praktijk is de programmering het resultaat van een brede afweging, waarbij ook criteria en wensen ten aanzien van omgeving, organisatie en cashflow een rol spelen. Met behulp van de veiligheidsrendementmethode kan het effect van verschillende keuzes (op basis van de genoemde criteria en wensen) op een kostenoptimale programmering inzichtelijk worden gemaakt. Wanneer onnodig wordt afgeweken van deze kostenoptimale programmering, leidt dit tot een toename van het maatschappelijk overstromingsrisico en dus kosten, wat om grote bedragen kan gaan. De resultaten uit veiligheidsrendement illustreren het belang van meer vanuit de geest van de overstromingsrisicobenadering te gaan prioriteren en programmeren: streven naar efficiënte en doeltreffende reductie van overstromingsrisico's, juist ook op programmaniveau, scheelt veel maatschappelijk risico.
- De kern van programmeren met veiligheidsrendement is dus dat we meer werken vanuit de geest van de overstromingsrisicobenadering: versterken van dijken is een van de belangrijkste maatregelen om dit risico beheersbaar te houden, en elke concessie hieraan en inefficiëntie hierin leidt tot een toename van het maatschappelijke overstromingsrisico.
- De inzichten uit de toepassing van veiligheidsrendement laten zien dat het efficiënt uitvoeren van bijvoorbeeld enkelvoudige versterkingsopgaven maatwerk vraagt in de inrichting van projecten en programma's. Juist het scherper definiëren van de doelstellingen van projecten (enkelvoudige versus meervoudige doelstellingen) kan helpen bij de coherentie en transparantie van het programmeerproces. Eventuele aanpassingen aan de nu gangbare werkwijzen en processen bij waterkeringbeheerders en de alliantie HWBP die daarvoor nodig zijn, vallen buiten het bestek van deze handreiking.
- Belangrijk om op te merken is dat de informatie over het veiligheidsrendement per project ten opzichte van de risicoreductie vooral onderscheidend is bij projecten met een relatief kleine initiële afstand tot de norm. Bij een grote afstand tot de norm is het resulterende risico namelijk groot en wegen de kosten van de maatregelen relatief minder zwaar. Concreet betekent dit dat voor de meest prioritaire projecten in het HWBP een prioritering op basis van veiligheidsrendement weinig zal afwijken van een prioritering op basis van het veiligheidstekort. Anders gezegd: als de baten van versterking afnemen, neemt de waarde van veiligheidsrendement als beslisinformatie toe. Aangezien dit naar verwachting voor steeds meer projecten/trajecten geldt (omdat trajecten met de grootste afstand tot de norm in het HWBP prioriteit hebben gekregen en dus veelal al zijn of worden versterkt), neemt de relevantie van veiligheidsrendement voor de programmering dus ook toe.

TOEPASSING IN DIJKVERSTERKINGSPROJECTEN

Door scherper en meer vanuit trajectperspectief naar eisen te kijken kan een doelmatiger dijkontwerp worden gemaakt. De basis daarvan is om meer vanuit assemblage en trajectfaalkans te redeneren. Dat kan al het vertrekpunt vormen voor meer maatwerk, waarvan is gebleken dat dit veel kostenbesparing op kan leveren. Deze aanpak sluit aan bij het werken vanuit het verhaal van de kering: we kijken waar en op welke

wijze we vanuit het overkoepelende doel van acceptabel risico (= voldoen aan de waterveiligheidsnormen) we het beste kunnen ingrijpen.

Er is ook meer gestructureerd gekeken naar keuzes in faalkansruimtefactoren en lengte-effectfactoren. Waar in de praktijk hierin beperkt wordt gevareerd, blijken aannames over deze factoren veel invloed te hebben op de effectiviteit van het ontwerp: door één van beide of beide trajectspecifiek te bepalen wordt meer recht gedaan aan de lokale omstandigheden. Dit leidt tot een veel goedkopere versterking met een beter onderbouwde veiligheid. De veiligheidsrendementmethode is een middel om deze optimalisatie van eisen te maken, of zelfs helemaal zonder specifieke vastgepinde eisen te werken in (met name de vroege fase van) projecten.

In hoeverre de veiligheidsrendementmethode zelf een plaats moet krijgen binnen versterkingsprojecten valt op basis van de ervaringen nog niet precies te zeggen. Wel is de potentie duidelijk naar voren gekomen, met name in vergelijking tot de aanpak dit op dit moment het meest gangbaar is. Op basis van de uitgevoerde analyses ligt het bijvoorbeeld voor de hand om meer systematisch te gaan kijken naar te hanteren factoren voor lengte-effect en faalkansruimte. De veiligheidsrendementmethode kan een zeer handig middel zijn om in de vroegere fasen van versterkingsprojecten hier handen en voeten aan te geven. Een meer algemene werkwijze vanuit veiligheidsrendement in het ontwerp heeft echter bredere consequenties voor het ontwerpproces die verdere doordiening vragen.

Bibliografie

1. Adviesteam Dijkontwerp. (2024). Rode draad #10 - Assembleren.
2. Expertisenetwerk Waterveiligheid. (2017). Grondslagen voor hoogwaterbescherming.
3. Hoogwaterbeschermissingsprogramma. (2017). Handreiking Verkenning, versie 2.
4. Jongejan, R. M. & Maaskant, B. (2013). The Use of Quantitative Risk Analysis for Prioritizing Flood Risk.
5. Klerk, W. (2022). Decisions on life-cycle reliability of flood defence systems. TU Delft.
6. Klerk, W., Kanning, W., van der Krogt, M., & Hauth, M. (2024). Bepalen van realistische trajectfaalkansen voor piping en macrostabiliteit - Analyses t.b.v. dijkversterking SAFE. 11208407-002-ZWS-0001. Deltares.
7. Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2016). Achtergronden bij de normering van de primaire waterkeringen in Nederland. Hoofdrapport.
8. Rijkswaterstaat. (2024). Handleiding Veiligheidsontwerp, versie 1.0.
9. Unie van Waterschappen. (2023). Handreiking Trajectaanpak, versie II.

BIJLAGE I BEGRIPPENLIJST

Begrip	Omschrijving
Assembleren / combineren	Vertalen van faalkansen per doorsnede/vak en mechanisme naar een trajectfaalkans.
Default faalkansbegroting	De faalkansbegroting (verdeling van de faalkansruimte over de mechanismen) zoals deze was opgenomen in OI2014v4.
Faalkans	De faalkans van een dijkvak of doorsnede.
Faalkanseis	De eis die werd gesteld aan de faalkans van een vak of doorsnede. Ten opzichte van de norm van het dijktraject zit hier nog een omrekenfactor tussen, die o.a. afhangt van het lengte-effect. Het WBI2017 en het OI2014 kenden deze eisen; het BOI2023 dergelijke niet meer.
Faalkansruimtefactor	Een factor die er voor dient om de trajectnorm te vertalen naar een faalkansruimte voor een faalmechanisme op trajectniveau.
Lengte-effectfactor	Een factor die er voor dient om de faalkansruimte op trajectniveau te vertalen naar een eis op doorsnede of dijkvakniveau om zo rekening te houden met de onafhankelijkheid van falen op verschillende locaties in het dijktraject.
(Traject)norm	De eis die in de Omgevingswet is gesteld aan de faalkans (per jaar) van een dijktraject. De Omgevingswet noemt deze norm de omgevingswaarde, dit is de ondergrens uit de voormalige Waterwet.
Ontwerpeis	De eis die wordt gesteld aan de maximaal toelaatbare faalkans van het ontwerp van een traject, vak of doorsnede.
Opschalen/opschaling	Omrekenen van een faalkans van een doorsnede naar de faalkans van een vak.
Overstromingskansbenadering	Veiligheidsbeoordeling op basis van overstromingskansen, die tot uitdrukking worden gebracht in de kans dat de belasting van een dijktraject groter is dan de sterkte. Sinds 2017 werken we in Nederland met de overstromingskansbenadering.
Overstromingsrisico	De verwachte schade door overstromingen per jaar, uit te drukken in bijv. slachtoffers of monetaire schade.
Trajectfaalkans	De faalkans van een dijktraject volgend uit de combinatie/assemblage van vakken en mechanismen.
Veiligheidsopgave	Het verschil tussen de huidige en gewenste veiligheidssituatie. Dit zijn ten minste de vakken die niet aan de trajectnorm voldoen.
Veiligheidsrendement	De verhouding tussen het overstromingsrisico (uitgedrukt in kosten) en de investeringskosten van dijkversterkingen. Het hoogst mogelijke veiligheidsrendement wordt behaald door het overstromingsrisico te reduceren tegen minimale investeringskosten.
Veiligheidsrendementanalyse	Een analyse met de veiligheidsrendementmethode.

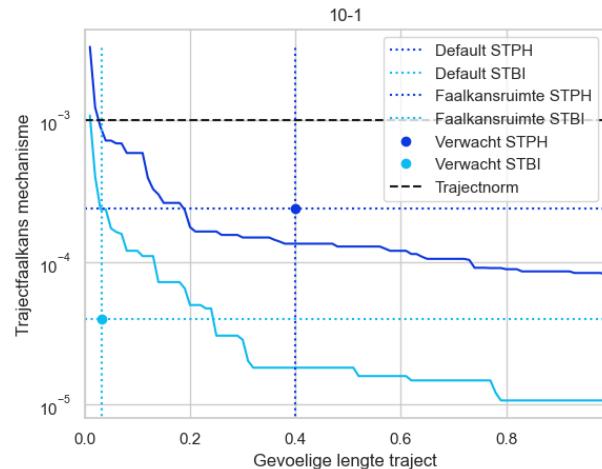
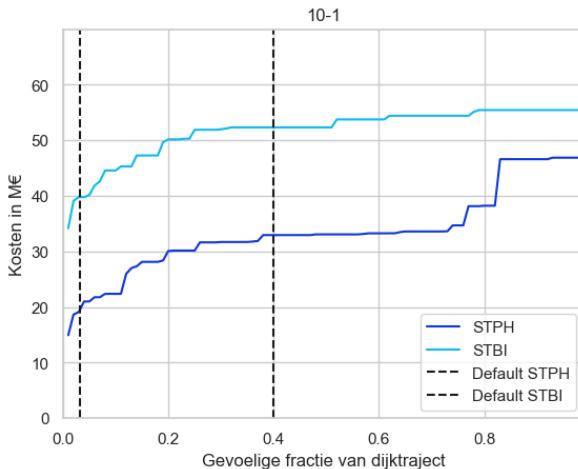
Veiligheidsrendementmethode	De methode waarmee op basis van een optimalisatie van de totale kosten (risico en investering) de meest optimale dijkversterkingsmaatregelen voor een dijktraject wordt bepaald.
Veiligheidstekort	De afstand tot de norm van een dijkvak of dijktraject bij een kering die niet aan de norm voldoet. Als er niet naar veiligheidsrendement wordt gekeken, bepaalt het veiligheidstekort vaak de urgentie van een dijkversterking.
Versterkingsopgave	De te versterken faalmechanismen voor de gekozen planperiode bij de gekozen versterkingsstrategie. De versterkingsopgave is bij veiligheidsrendement afhankelijk van de opgave en maatregelen op de andere vakken.

HwBP voor sterke dijken

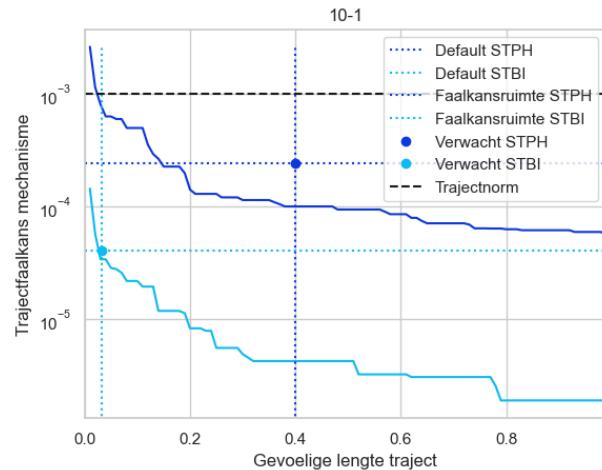
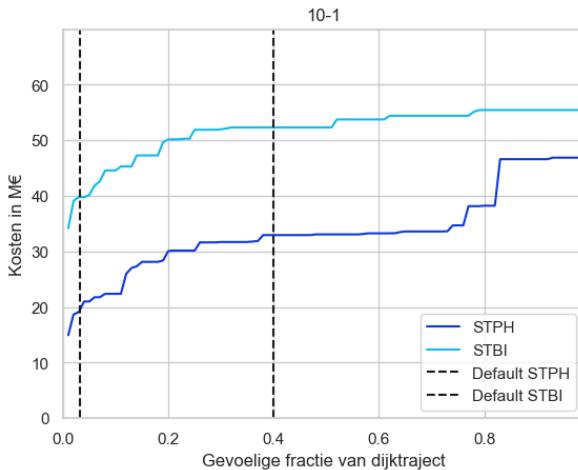
BIJLAGE II RELATIE TUSSEN GEVOELIGE LENGTE EN KOSTEN & TRAJECTFAALKANS

Traject 10-1

Volledige opschaling ($N = \max(L_{vak}/b)$)



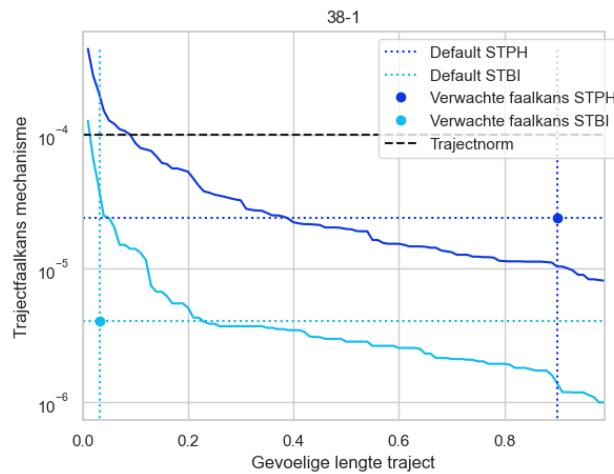
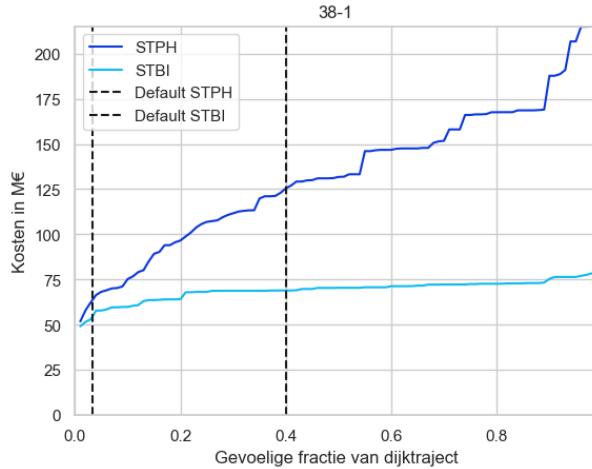
Geen opschaling ($N = 1$)



HwBP voor sterke dijken

Traject 38-1

Volledige opschaling ($N = \max(L_{vak}/b)$)



Geen opschaling ($N = 1$)

