



VolkerWessels
Telecom

SWECO



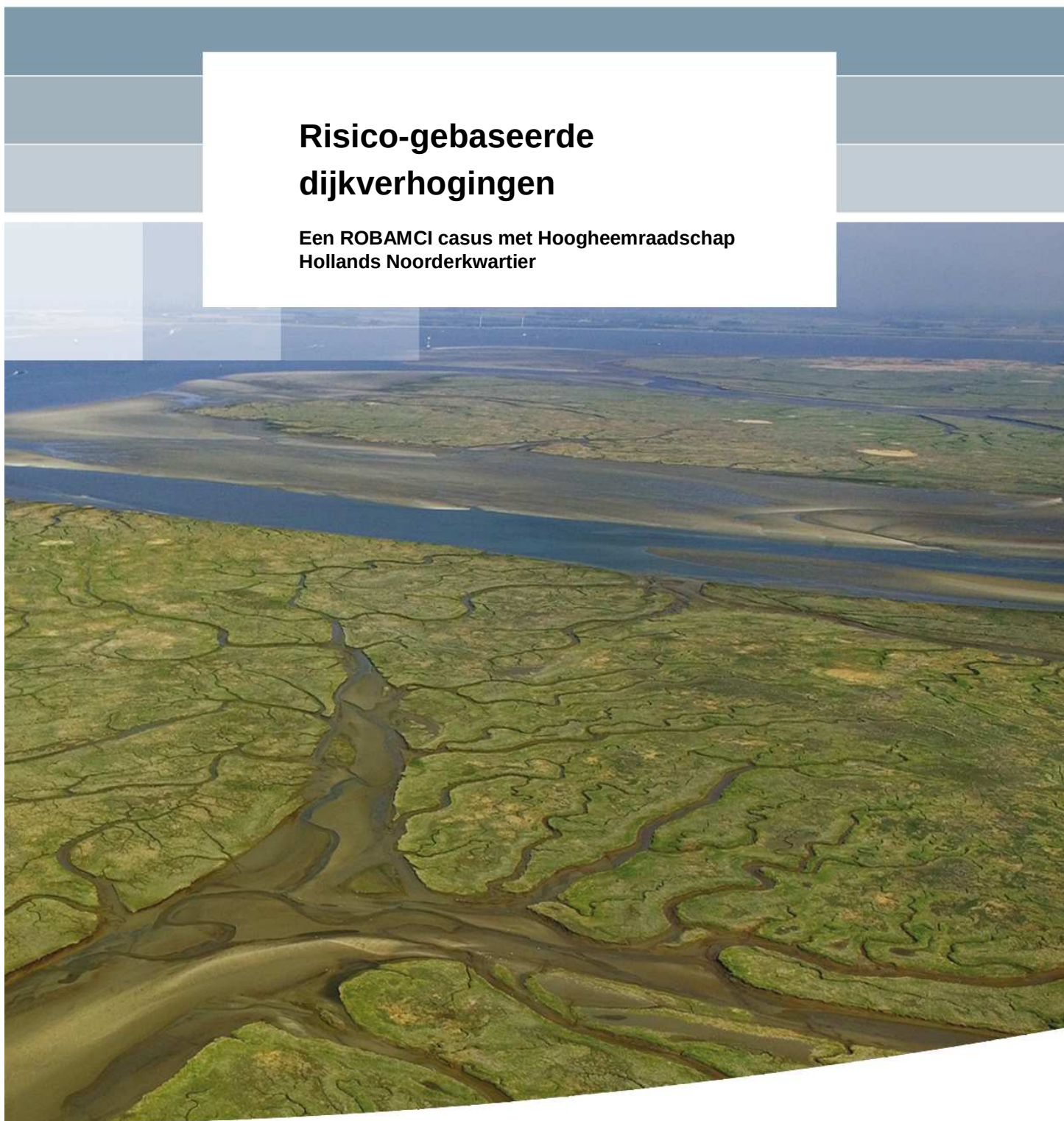
Deltares

Enabling Delta Life



Risico-gebaseerde dijkverhogingen

Een ROBAMCI casus met Hoogheemraadschap
Hollands Noorderkwartier



Risico-gebaseerde dijkverhogingen

**Een ROBAMCI casus met Hoogheemraadschap Hollands
Noorderkwartier**

Kathryn Roscoe
Nienke Lips

1230174-003

Titel

Risico-gebaseerde dijkverhogingen

Opdrachtgever

Hoogheemraadschap
Hollands Noorderkwartier

Project

1230174-003

Kenmerk

1230174-003-ZWS-0013

Pagina's

33

Trefwoorden

Risico-gebaseerde dijkversterkingen, assetmanagement, dijkverhogingen, onderhoud, risico, regionale keringen

Samenvatting

In het ROBAMCI programma wordt aan de hand van praktische cases nagegaan of er efficiëntiewinsten mogelijk zijn door het toepassen van een op risico en levenscyclus gebaseerde aanpak voor het beheren van assets. In dit rapport wordt een casus voor Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK) beschreven met het doel om onderhoudsstrategieën te vergelijken. Daartoe is een rekenmethode opgesteld voor het berekenen van investeringsbudgetten voor dijkverhoging. Deze methode is toegepast op de regionale waterkeringen (Schermerboezem) van HHNK, welke verzakken. Naast de huidige onderhoudsstrategie gebaseerd op hoogte, zijn twee alternatieve risico-gebaseerde strategieën bekeken: (1) verhogingen geïmplementeerd als grote projecten (huidige implementatiemethode) en (2) verhogingen geïmplementeerd als kleinere onderhoudsprojecten (gewenste implementatiemethode). De resultaten tonen aan dat een op risico-gebaseerde strategie in combinatie met kleine onderhoudsprojecten de meest kosteneffectieve keuze is. De huidige toegepaste hoogtestrategie is het minst effectief, met zowel de hoogste investeringskosten als de hoogste risiconiveaus.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	Aug 2018	Kathryn Roscoe Nienke Lips MMV: Ester Olij & Harry Bos		Frank den Heijer		Gerard Blom	

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 ROBAMCI	1
1.2 Casus bij Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier	1
1.2.1 Motivatie voor het onderzoek	2
1.3 Doel en opbouw van het rapport	2
2 Risico-gebaseerde methode voor dijkverhogingen	5
2.1 Methode	5
2.1.1 Risico's berekenen	5
2.1.2 Beheerstrategie op basis van risico	10
2.1.3 Constructieve maatregelen: DMC-systeem en damwanden	11
2.1.4 Kosten	12
2.2 Databehoeftes	13
3 Berekeningen	15
3.1 Groene dijken	15
3.2 Constructieve maatregelen	16
3.3 Gevoeligheidsanalyse	16
4 Resultaten	19
4.1 Hoofddresultaten (groene dijken)	19
4.2 Constructieve maatregelen en gevoeligheidsanalyse	19
5 Discussie en conclusies	21
5.1 Discussie van de resultaten voor "groene dijken"	21
5.2 Discussie resultaten constructieve maatregelen	21
5.3 Discussie gevoeligheidsanalyse	22
5.4 Aanbevelingen voor verdere ontwikkeling	22
5.5 Conclusies	23
Bijlage(n)	
A Risico gebaseerde methode in meer detail (memo)	A-1
B B Resultaat histogrammen	B-1
B.1 Resultaten voor rentevoet = 0,0%	B-1
B.1.1 B.1.1 Strategie 1 ('Huidige methode')	B-1
B.1.2 Strategie 2 (Risico, grote projecten)	B-2
B.1.3 Strategie 2b (Risico, onderhoud)	B-3
B.2 Resultaten voor rentevoet = 2,5%	B-4
B.2.1 Strategie 1 ('Huidige methode')	B-4
B.2.2 Strategie 2 (Risico, grote projecten)	B-5
B.2.3 Strategie 2 (Risico, grote projecten)	B-6
B.2.4 Strategie 2b (Risico, onderhoud)	B-7

1 Inleiding

1.1 ROBAMCI

In het programma Risk- and Opportunity-Based Asset Management for Critical Infrastructure (ROBAMCI) wordt voor de publieke infrastructuur in de grond-, weg- en waterbouwsector gekeken of een risico en systeem gebaseerde aanpak efficiëntie kansen biedt. Assetmanagement omvat de gehele levenscyclus van infrastructuur, inclusief ontwerp, constructie, beheer en onderhoud, versterking, en vervanging. Het gaat om grote budgetten en te beheren arealen zijn omvangrijk. Daarom is het prioriteren van onderhoud of vervanging, en het identificeren van het beste moment om te investeren belangrijk.

Het ROBAMCI-programma is een samenwerkingsverband van kennis/onderzoeksinstituten, de particuliere sector en de overheid.

ROBAMCI concentreert zich in zijn huidige fase op infrastructuur gerelateerd aan de watersector. Op het gebied van beheer en onderhoud van waterkeringen is de belangrijkste vraag: "Wat is de beste investeringsstrategie met betrekking tot kosten, kwaliteit en kwetsbaarheid (risico). Om deze overkoepelende vraag te beantwoorden, voert ROBAMCI een aantal casussen uit in samenwerking met waterschappen in Nederland. Daardoor worden expertise, methoden en hulpmiddelen ontwikkeld en toegepast om een significante efficiëntiewinst van beheer en onderhoud te bereiken.

1.2 Casus bij Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier

De casus beschreven in dit rapport gaat over de strategische versterking (verhoging) van waterkeringen binnen de jurisdictie van het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK). De casus richt zich op de ruim 1000 km regionale waterkeringen van de Schermerboezem die het polderlandschap en hierin liggende dorpen en steden beschermen tegen overstroming vanuit de grote kanalen/boezems. Deze waterkeringen verzakken door bodemdaling en inklinking, waardoor hun prestaties op het gebied van hoogwaterbescherming afnemen en het risico toeneemt. De snelheid van de zetting is geschat, maar is onzeker, grotendeels als gevolg van onzekerheid in de ondergrondse bodemsamenstelling. Elke dijktraject binnen het portfolio heeft een veiligheidsnorm (IPO-klasse), die wordt gegeven als een maximaal acceptabele faalkans. De normen zijn zodanig afgeleid dat ze overeenkomen met aanvaardbare risiconiveaus, die zijn berekend als onderdeel van een nationale overstromingsrisicobeoordeling.

1.2.1 Motivatie voor het onderzoek

Momenteel is de beslissing om de regionale waterkeringen van HHNK te verhogen gebaseerd op een criterium dat niet direct is gekoppeld aan de veiligheidsnorm, namelijk: wanneer de kering onder maalstoppeil + waakhoogte daalt, komt deze in aanmerking voor een project (verhoging). Maalstoppeil is het waterpeil waarbij pompen van polder naar boezem niet langer is toegestaan, en wordt verondersteld een zeldzaam (extreem) waterniveau te zijn. Waakhoogte is een buffer die wordt toegewezen om rekening te houden met golven. Het probleem met deze aanpak is dat de beheerders het daadwerkelijke risico niet kunnen vaststellen, waardoor het onduidelijk is of hun investeringen in dijkverhoging een groot of klein risico afdekken.

Wanneer een dijk moet worden verhoogd, wordt dit in de huidige systematiek gedaan als een groot Verbetering Boezemkades (VBK) project, dat substantiële vergunningen vereist en waarin een versterking de levensduur krijgt van 30 jaar, rekening houdend met een geschatte autonome bodemdaling (zetting). Er zijn voordelen aan een overgang naar onderhoud-gebaseerde dijkverhoging, waarbij de levensduur korter is (~15 jaar). De voordelen van deze strategie zijn de volgende: het vergunningen traject is eenvoudiger, er is minder (snelle) zetting als gevolg van minder ophoging, en de beheerders houden meer gevoel met hun dijk, omdat ze vaker terugkomen. Op basis hiervan werd verondersteld dat de op onderhoud gebaseerde strategie meer kosteneffectief is dan de huidige strategie, maar er was geen tool of methode om die hypothese te kunnen beoordelen.

Op basis van de bovenstaande behoefte is de casus bij HHNK tot stand gekomen. In deze casus wordt een methode ontwikkeld voor het risico-gebaseerd afwegen van verschillende strategieën voor het versterken van regionale waterkeringen. Er wordt alleen gekeken naar hoogte van de keringen, en er is rekening gehouden met onzekerheid van de autonome bodemdaling (zakkingen). De methode is in een tool gebouwd, die vervolgens werd gebruikt om de kosteneffectiviteit te beoordelen van de volgende strategieën: (1) de huidige dijkverhogingsstrategie, (2) de op risico gebaseerd strategie met grote projecten, en 3) de op risico-gebaseerde strategie met onderhoudsprojecten.

Tot slot is er een vraag over alternatieve methodes voor plekken waar weinig tot geen ruimte is om een dijk te verbreden (NB: verhogingen eisen ook verbredingen zodat de helling niet te steil wordt). Hiervoor zijn damwanden gebruikt. In dit rapport, kijken we naar een innovatieve alternatieve methode (dike monitoring and conditioning), en analyseren het verschil in efficiëntie met het gebruik van traditionele damwanden.

1.3 Doel en opbouw van het rapport

Het doel van dit rapport is om HHNK een toegankelijke beschrijving te geven van de risico-gebaseerde methode voor verhogingen van regionale keringen, inclusief de financiële voordelen of nadelen van drie dijkverhogingsstrategieën. Dit rapport is bedoeld om HHNK te ondersteunen bij hun beslissingen voor toekomstige beheerstrategieën.

Het rapport is als volgt gestructureerd: Eerst wordt de risico-gebaseerde methode voor dijkverhoging beschreven, inclusief de benodigde gegevens om de analyse uit te voeren. Hierin wordt ook uitleg gegeven over de constructieve maatregelen die toegepast kunnen worden. Vervolgens worden de berekeningen beschreven die zijn gemaakt om elk van de drie strategieën te beoordelen, en om een gevoeligheidsanalyse uit te voeren. Vervolgens worden de resultaten gepresenteerd. Tot slot wordt het rapport met discussie en conclusies afgesloten. De huidige en risico-gebaseerde strategieën zijn ingebouwd in een probabilistisch tool om de kosten en risico's van verschillende strategieën te kunnen berekenen; de beschrijving van de tool valt buiten de scope van dit rapport.

2 Risico-gebaseerde methode voor dijkverhogingen

Een risico-gebaseerde strategie voor dijkverhoging in het systeem van regionale keringen van HHNK, houdt in dat de dijken worden verhoogd om ervoor te zorgen dat het risico voor het gehele systeem niet groter wordt dan een toelaatbare risicodrempel. De selectie van te verhogen dijken is gebaseerd op de meest kosteneffectieve keuze die resulteert in een toelaatbaar systeem-risico.

In dit hoofdstuk wordt de methode toegelicht om het risico voor het systeem te schatten, en de kosteneffectieve strategie voor jaarlijkse dijkverhoging. Hiernaast worden ook de gegevens besproken die nodig zijn om de analyse uit te voeren. Een Engelstalige memo met meer technische details over de methode wordt gegeven in Bijlage A.

2.1 Methode

Deze methode richt zich op het laag houden van het risico voor het hele systeem. De definitie van risico die gebruikt is in deze analyse is als volgt:

$$\text{Risico} = \text{Faalkans} \times \text{Gevolg} \quad (1)$$

Er wordt gefocust op drie vragen:

1. Welk risico wordt geaccepteerd?
2. Hoe wordt het werkelijke risico berekend?
3. Hoe wordt een strategie op basis van risico's gekozen?

Deze vragen worden hieronder afzonderlijk behandeld.

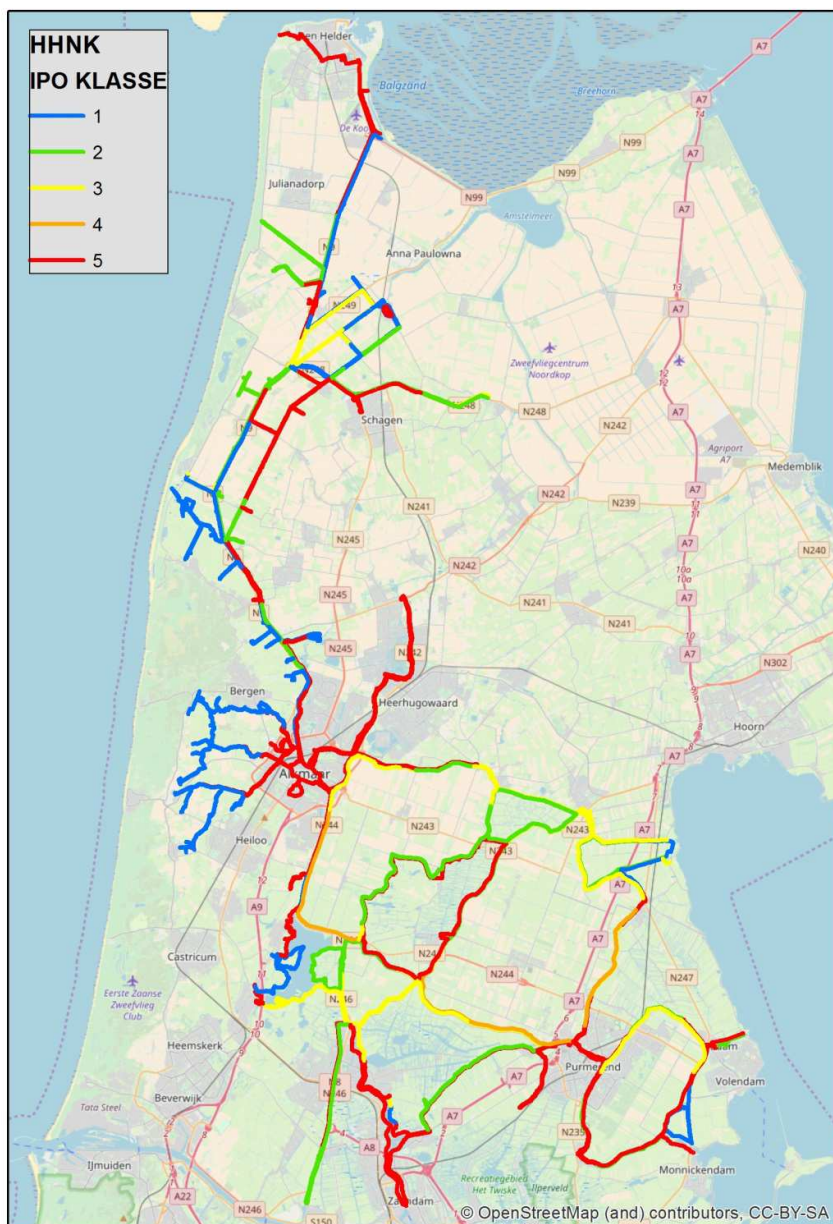
2.1.1 Risico's berekenen

In deze sectie wordt de methode gepresenteerd om het toelaatbare risico en het werkelijke risico voor het regionale dijksysteem te berekenen.

2.1.1.1 Toelaatbaar risico

Om de vraag 'welk risico wordt geaccepteerd?' te beantwoorden wordt gebruik gemaakt van de veiligheidsnormen die zijn afgeleid voor de regionale dijken in Nederland. Deze zijn gebaseerd op toelaatbaar risico. De normen worden gegeven als een maximale overschrijdingskans voor de dijken.

Figuur 2.1 toont de HHNK-portefeuille van regionale waterkeringen voor de Schermerboezem en de IPO-klasse die is gekoppeld aan elk 'gevolgtraject'. Een gevolgtraject is een dijktraject waarlangs de gevolgen hetzelfde zouden zijn als de waterkering zou doorbreken ergens langs dat traject. Elke IPO-klasse bestaat uit een maximaal toelaatbare overschrijdingskans, gebaseerd op een schatting van de economische schade in het beschermde gebied als de dijk faalt.



Eerder onderzoek¹ heeft een vertaling gemaakt tussen de overschrijdingskans en de faalkans. In dat onderzoek is een vertaalfactor afgeleid die aangeeft dat de faalkans 5 keer kleiner is dan de overschrijdingskans. Als de maximale toelaatbare overschrijdingskans bijvoorbeeld 1/10 is, is de maximale toelaatbare faalkans 1/50. Tabel 2.1 geeft de waarden van de maximale overschrijdingskansen, faalkansen en gevolgen voor elke IPO-klasse². De maximale faalkansen in Tabel 2.1 omvatten alle faalmechanismen van een kering, terwijl in dit geval alleen naar falen door overslag of overloop gekeken wordt. Voor overslag/overloop is 10% van de faalkans begroot³. Dat betekent bijvoorbeeld voor IPO-klasse 1, dat in plaats van een maximale toelaatbare faalkans van 1/50, 1/500 moet worden gebruikt.

Om het toelaatbare risico te berekenen, wordt de maximale toelaatbare faalkans (voor overloop/overslag) vermenigvuldigd met de gevolgen, zoals gegeven in vergelijking (1), voor elk gevolgtraject, met behulp van de waarden in Tabel 2.1. Het toelaatbare risico voor het systeem wordt berekend door het optellen van risico's voor alle gevolgtrajecten.

Dit principe wordt geïllustreerd met het eenvoudige rekenvoorbeeld getoond in Figuur 2.2. In dit geval zijn er drie gevolgtrajecten, elk met een faalkans P en een gevolg C als de dijk faalt. Het toelaatbare (jaarlijkse) risico voor dit eenvoudige systeem kan worden berekend op €23.500, gebruikmakend van de waarden in Figuur 2.2.

Tabel 2.1 IPO klassen en de bijhorende maximale faalkansen en gevolgen

IPO Klasse	Overschrijdingskans	Faalkans	Faalkans	Gevolgen (miljoen Euros)
			Overslag/Overloop	
1	1/10	1/50	1/500	4
2	1/30	1/150	1/1.500	16.5
3	1/100	1/500	1/5.000	52.5
4	1/300	1/1.500	1/15.000	165
5	1/1.000	1/5.000	1/50.000	250

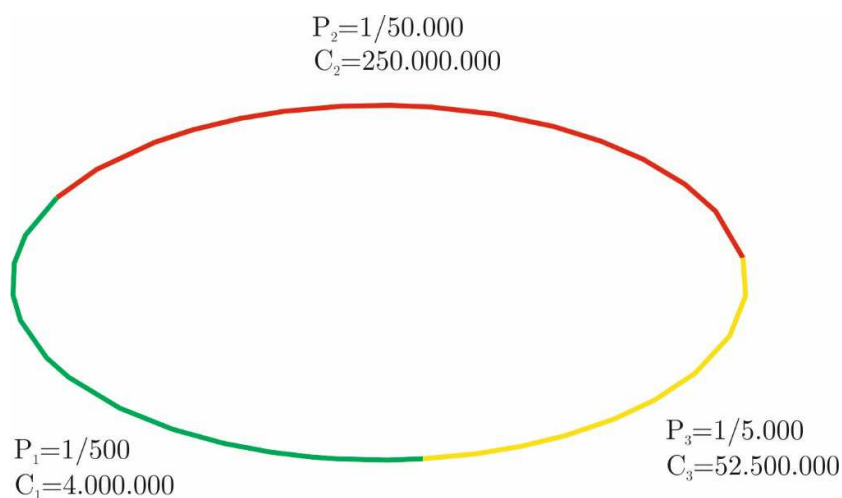
Voor het eenvoudige voorbeeld in Figuur 2.2, zou het maximaal toelaatbare risico voor het systeem uitkomen op:

$$R_{max} = \frac{1}{500} \times 4.000.000 + \frac{1}{50.000} \times 250.000.000 + \frac{1}{5.000} \times 52.500.000 = 23.500$$

¹ Zie STOWA rapport Materiaalfactoren Boezemkaden, ISBN 978.90.5773.420.5

² Officieel geeft de tabel overschrijdingsfrequenties, geen overschrijdingskansen, maar de vertaling is eenvoudig te berekenen. Verder geven de IPO-klassen reeksen van consequenties. In de tabel geven we het gemiddelde gevolg, behalve voor klasse 5, waarin we de ondergrens geven; dit zijn de waarden die we gebruiken bij de berekening van het aanvaardbare risico.

³ Hoewel overloop/overslag slechts 10% van het faalbudget krijgt toegewezen, is het feitelijk het meest relevante faalmechanisme in het gebied. Eerdere verbeteringen hebben ertoe geleid dat de faalkansen als gevolg van andere mechanismen, zoals macrostabiliteit, relatief gering worden.



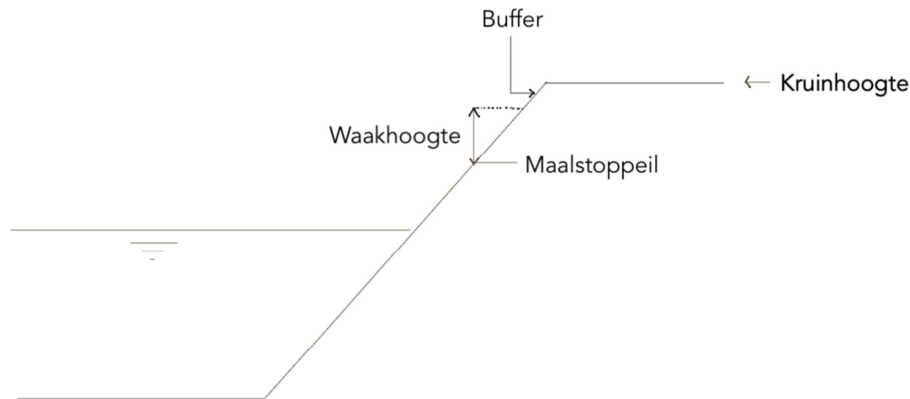
Figuur 2.2 Voorbeeld dijksysteem, om te illustreren hoe we het toelaatbare risico berekenen. Dit systeem bevat drie gevolgtrajecten, elk met maximale toelaatbare faalkans P en gevolg van falen C .

2.1.1.2 Werkelijke risico

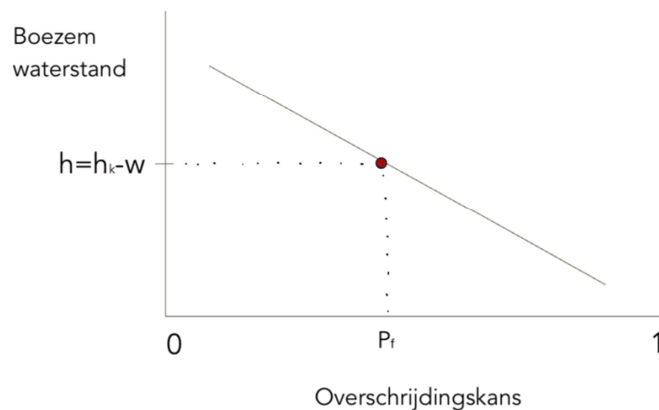
Het werkelijke risico is gekoppeld aan de hoogten van de dijken en staat volledig los van de toelaatbare faalkansen die horen bij de IPO-klassen. De berekening is echter gebaseerd op hetzelfde basisprincipe als in vergelijking (1), evenals de gevolgen in Tabel 2.1. Echter de **werkelijke** faalkansen worden geschat op basis van de werkelijke hoogten van de dijken.

Figuur 2.3 toont een schematisering van een regionale waterkering in het HHNK-systeem. Deze zijn ontworpen tot een hoogte van *Maalstoppeil (MSP) + waakhoogte + buffer*. *Maalstoppeil* is het peil waarbij de pompen vanuit het achterland naar de boezem worden uitgeschakeld, omdat anders de boezem overstroomt. *Waakhoogte* is een extra hoogte die rekening houdt met door de wind geïnduceerde golven (overslag). De *buffer* is bedoeld om een levensduur van 30 jaar te garanderen, rekening houdend met de gemiddelde jaarlijkse daling.

De faalkans van de dijk door overloop en overslag is de kans dat de waterstand de hoogte van de dijk overschrijdt. Er wordt daarom gebruik gemaakt van waterstand-kanscurves, die beschikbaar zijn voor elk dijksegment via de promotor-software die HHNK gebruikt voor het bepalen van de waterstanden op de boezems. Figuur 2.4 toont een schematisatie van de kanscurve; op de horizontale as staat de overschrijdingskans, en op de verticale as de waterstand. Het figuur laat ook zien hoe de curve gebruikt wordt om de faalkans P_f te schatten. De waakhoogte w (die rekening houdt met golven) wordt afgetrokken van de hoogte van de dijk h_k . De kans dat de waterstand de resterende hoogte (h) overschrijdt, is de faalkans.



Figuur 2.3 Schematisatie van een HHNK regionale waterkeringen bij ontwerp, met maalstoppeil (MSP), waakhoogte, kruinhoogte, en een dagelijkse boezem waterstand weergegeven waakhoogte w .



Figuur 2.4 Schematisatie van een waterstand (overschrijdings)kanscurve. De faalkans van een dijk wordt bepaald door de bijbehorende kans te zoeken van een hoogte h die gelijk is aan de kruinhoogte h_k min de waakhoogte w .

Het werkelijke risico wordt bijna hetzelfde berekend als het toelaatbare risico, behalve dat er werkelijke faalkansen gebruikt worden in plaats van maximaal toegestane faalkansen. Deze kansen kunnen verschillen binnen een gevolgtraject, omdat een traject meerdere dijksegmenten kan bevatten. In de berekeningen wordt verondersteld dat de faalkans van een gevolgtraject gelijk is aan de faalkans van het zwakste dijksegment binnen het traject. Dit is een redelijke benadering voor de overloop/overslag faalmechanisme, omdat de belastingen sterk gecorreleerd zijn⁴. Vervolgens is vergelijking (1) gebruikt om het werkelijke risico voor

⁴ Deze aanname maakt de berekende faalkans van het gevolgtraject - en daarmee het risico - gevoelig voor fouten in de faalkans van de dijksegmenten. Met andere woorden, als de faalkans van één dijksegment te hoog wordt geschat, dan wordt de risicobijdrage van het gehele gevolgtraject overschat.

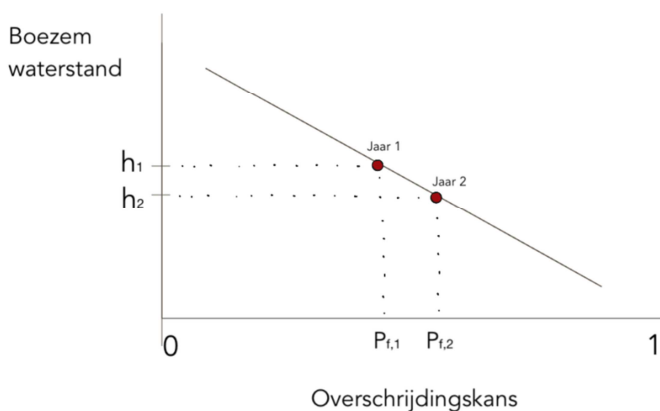
elk traject te berekenen, en het daadwerkelijke systeemrisico wordt berekend door over alle trajecten te sommeren.

2.1.2 Beheerstrategie op basis van risico

In deze sectie wordt beschreven hoe het toelaatbare en werkelijke risico worden gebruikt om beslissingen te nemen over welke keringen te verhogen en wanneer.

Een belangrijk aspect van het dijksysteem is dat de waterkeringen zakken⁵, wat betekent dat elk jaar de kruinhoogtes lager worden en de faalkans toeneemt.

De analyse beschouwt een lange periode, in dit geval is gekozen voor 100 jaar. Aan het begin van elk jaar wordt het werkelijke risico van het systeem berekend op basis van de nieuwe dijkhoogtes (rekening houdend met zakkings in het afgelopen jaar). Dus, bijvoorbeeld, als de verzakingsgraad (autonome bodemdaling) voor een bepaalde dijk 0,01 m per jaar is, en de hoogte van de dijk dit jaar 0,21 m is, dan zal de hoogte volgend jaar 0,20 m zijn. Figuur 2.5 laat zien hoe de waterstand-kanscurves zijn gebruikt om nieuwe faalkansen te berekenen voor een lagere kruinhoogte. Met de nieuwe faalkansen wordt het werkelijke risico opnieuw berekend.



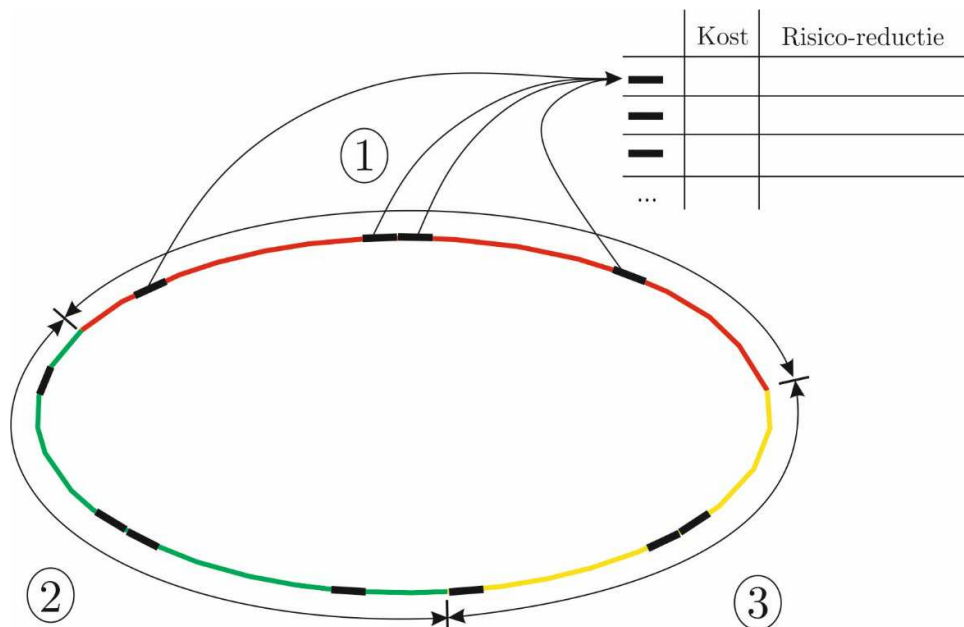
Figuur 2.5 Illustratie hoe de faalkans toeneemt met zakkende hoogtes h (kruinhoogte min waakhoogte).

Als het werkelijke risico hoger is dan het toelaatbare risico, moeten sommige keringen worden verhoogd. De risico-gebaseerde methode verhoogt alleen voldoende keringen om het werkelijke risico te verminderen zodat deze lager wordt dan het toelaatbare risico. Keringen die lager zijn dan hun kritische hoogte⁶ worden kandidaten voor verhoging.

⁵ Er wordt in de berekeningen rekening gehouden met de onzekerheid in de verzakingsgraad (autonoom bodemdaling), maar er wordt in het voorbeeld in de tekst aangenomen dat er een vaste (bekende) verzakingsgraad is voor elke kering, die aangeeft hoeveel de kruinhoogte elk jaar afneemt.

⁶ Kritische hoogten komen overeen met de hoogte behorende bij de IPO-klassennormen; een uitleg hoe de kritische hoogten berekend wordt is weggelaten om de complexiteit van het rapport te verminderen

Figuur 2.6 illustreert hoe de methode bepaald welke keringen moeten worden verhoogd. De figuur toont een eenvoudig systeem van drie gevolgtrajecten, waarvan elke traject meerdere dijksegmenten bevat die onder hun kritische hoogte vallen (afgebeeld door zwarte segmenten). Voor elk gevolgtraject berekent de methode (1) hoeveel het zou kosten om alle 'zwarte' dijksegmenten te verhogen, en (2) de verlaging in het systeemrisico als de zwarte segmenten verhoogd zouden worden. Het gevolgtraject met de hoogste verhouding van risico-reductie tot kosten wordt als eerst verhoogd. Deze procedure wordt herhaald totdat het werkelijke systeemrisico onder het toelaatbare systeemrisico is.



Figuur 2.6 Illustratie van een keringssysteem met drie gevolgtrajecten, waarbij elk gevolgtraject meerdere dijkvakken bevat die te laag zijn gezakt. De kosten en risico-reductie van elk gevolgtraject wordt berekend om te beslissen welk traject als eerst wordt verhoogd.

2.1.3 Constructieve maatregelen: DMC-systeem en damwanden

Voor locaties met veel bebouwing is verbreding van een kering (die vereist is bij het verhogen van een kering om de stabiliteit te garanderen) niet mogelijk. In deze gevallen wordt meestal een damwand geïnstalleerd voor stabiliteit, zodat de kering kan worden verhoogd zonder deze te verbreden. Als alternatief voor deze methode is het gebruik van een innovatief DMC-systeem onderzocht. DMC staat voor 'Dike monitoring and conditioning'; dit systeem kan de hoogte van de freatische lijn en de waterspanning in een dijk meten.

Het systeem gebruikt deze metingen om de waterspanning in een dijk te bewaken en bij te sturen door het onttrekken of toevoeren van water in de dijk door middel van een buizensysteem. Hiermee kan falen door macrostabiliteit en piping voorkomen worden. Keringen kunnen worden verhoogd zonder verbreding, vergelijkbaar met een damwand. De

haalbaarheid en het mogelijke voordeel van dit systeem is onderzocht en vergeleken met een traditionele damwand.

2.1.4 Kosten

De kosten voor het verhogen van een groene dijk zijn berekend met behulp van de kostenfunctie gegeven in vergelijking (2). De kost K bestaat uit drie componenten: constante planvorming kosten (opstartkosten) PV_c , variabele planvorming kosten PV_{var} , en realisatiekosten RK (de grondkosten per kubieke meter maal het aantal op te hogen kubieke meters ΔV).

$$K = PV_c + PV_{var} + RK \quad (2)$$

De variabele planvorming kosten zijn afhankelijk van hoe groot het project is, en wordt berekend als $PV_{var} = c \cdot RK$.

De kosten voor het verhogen van een dijkvak zijn afhankelijk van of het wordt uitgevoerd als een groot project of als een kleiner onderhoudsproject. De eerste heeft een levensduur van 30 jaar, terwijl de laatste een kortere levensduur heeft. Kleinere onderhoudsprojecten hebben lagere opstartkosten. De waarden van PV_c , c en RK , parameters van de kostenfunctie gegeven in Vgl. (2), worden gegeven in Tabel 2.2 voor grote projecten en kleine onderhoudsprojecten.

Tabel 2.2 Kostenfunctie parameters voor grote projecten en onderhoud

Project type	PV_c	c	RK
Grote projecten	50.000	0,14	$58 \cdot \Delta V$
Onderhoudsprojecten	10.000	0,07	$58 \cdot \Delta V$

De kost voor het aanleggen van een damwand, K_{DW} , is berekend op basis van de kosten per vierkante meter damwand (k_{dw}). Die is vermenigvuldigd met de benodigde diepte van de damwand en de lengte van het vak; zie Vgl. (3).

$$K_{DW} = k_{dw} \cdot D \cdot L \quad (3)$$

De kost voor het aanleggen van een DMC-systeem, K_{DMC} , is berekend op basis van de kosten per meter DMC-systeem (k_{dmc}). Die is vermenigvuldigd met de lengte van het vak; zie Vgl. (4).

$$K_{DMC} = k_{dmc} \cdot L \quad (4)$$

De waarden van k_{dw} en k_{dmc} zijn gegeven in Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Kostenfunctie parameters voor structurele maatregelen

Maatregel	Parameter	Waarde
Damwand	k_{dw}	205 €/m ²
DMC	k_{dmc}	2.875 €/m

2.2 Databehoeftes

Voor het uitvoeren van de analyse die in de vorige secties is beschreven, zijn verschillende gegevens gebruikt. Deze sectie vat de benodigde gegevens samen.

Ruimtelijke data

Voor het gehele keringsysteem zijn de volgende ruimtelijke gegevens gebruikt:

- Lengte van gevolgentrajecten (aansluitende IPO-klassen)
- Aantal dijkvakken

Dijkvak-gebonden data

Voor elk dijkvak is de volgende gekoppelde data gebruikt:

- Kruinhoogte
- Breedte van de kering/dijk (teen tot teen)
- Lengte van het dijkvak
- Verzakkingsgraad/autonome bodemdaling (verdeling)
 - Een kansverdeling is nodig om onzekerheid in de verzakkingsgraad mee te nemen in de analyse. Deze is gemaakt op basis van de bodemopbouw.
- IPO-klasse
- Waterstand-kanscurve
 - Dit kunnen tabellen van terugkeertijd en waterstand zijn.
- Waakhoogte
- Bebouwd gebied (ja/nee)
 - Als bebouwd gebied = 'ja', dan betekent dat een dijk niet breder kan worden, en is een damwand of DMC-systeem nodig om te verhogen.
- Diepte damwand, indien nodig

Kosten

Om de kosten van dijkverhogingen te berekenen, is de volgende informatie gebruikt:

- Opstartkosten (bijvoorbeeld voor planvorming en het vergunningentraject) van een project.
- Kosten per grondvolume
- Damwand: kosten per diepte en lengte
- DMC-systeem: kosten per lengte

3 Berekeningen

3.1 Groene dijken

De doelstelling van deze analyse is de vergelijking van de drie beheerstrategieën: (1) de huidige strategie - waarbij elke dijk die onder maalstoppeil plus waakhogte valt wordt verhoogd, (2) de risico-gebaseerde strategie voor grote projecten en (3) de risico-gebaseerde strategie voor onderhoudsprojecten. Hiervoor wordt voor de algemene vergelijking ervanuit gegaan dat het beheergebied alleen uit groene dijken bestaat en deze dijken bij de start van het toepassen van een bepaalde beheerstrategie op orde zijn. Dit houdt in dat de dijken geen stabiliteitsprobleem hebben en op hoogte zijn in het startjaar.

De drie strategieën worden vergeleken door te kijken naar de investeringskosten over een periode van 100 jaar. Tevens wordt er gekeken naar de combinatie van investeringskosten en het (rest)risico, die een weergave is van de totale kosten van de strategie. Om de strategieën te analyseren, hebben we een rentevoet toegepast die rekening houdt met de verandering in de waarde van geld in de tijd. Binnen deze studie is een rentevoet gebruikt van 2,5%. Met dit rentepercentage heeft 100 euro volgend jaar een waarde van € 97,50 vandaag. Als een project 100 euro kost, en de uitvoering wordt uitgesteld tot volgend jaar, dan is er 2,50 euro bespaard. Op grote schaal, en met rente op rente gedurende vele jaren, kan dit de waarde van het uitstellen van een project substantieel maken.

In deze studie zijn twee rentevoeten gebruikt - 0,0% en 2,5%. Een tarief van 0,0% is ongebruikelijk in economische analyses, maar werd in dit onderzoek gebruikt op verzoek van HHNK om een beeld te krijgen van de niet verdisconteerde uitgaven over de 100 jaar (cash-flow). Voor het vergelijken van strategieën met investeringen op verschillende tijdstippen, is het belangrijk om ook de huidige waarde van de uitgaven te bepalen, zodat ze eerlijk worden vergeleken. Daarom is er ook een analyse gedaan met een discontovoet van 2,5%. Het gebruik van beide analyses kan de gevoeligheid van de voorkeursstrategie voor veranderingen in de rentevoet illustreren en dient daarom ook als een gevoeligheidsanalyse.

De onzekerheid in de verzakingsgraad (autonome bodemdaling) is meegenomen in de berekening door de 100-jarige levenscyclusanalyse 1000 keer te berekenen in een zogenaamde Monte Carlo analyse, waarbij elke keer een trekking van de verzakingsgraadverdeling wordt geselecteerd (voor elk dijkvak). Dit resulteert in histogrammen van uitgaven, die de impact van de onzekerheid in de verzakingsgraad aantonen. Voor tabelrapportage is de mediaanwaarde van de uitvoer gebruikt.

Een overzicht van de berekeningen die zijn gemaakt, inclusief specifieke modelleringskeuzes die relevant zijn voor de drie opties, wordt weergegeven in Tabel 3.1. Voor elk van de zes berekeningen die beschreven zijn in Tabel 3.1, is de analyse 1000 keer herhaald om de onzekerheid in de resultaten te schatten als gevolg van onzekerheid in de verzakingsgraad.

Tabel 3.1 Overzicht van berekeningen en modelleringskeuzes; MSP = maalstoppeil, KH = kritische hoogte, WH = waakhoogte, Buffer = Levensduur x verzakingsgraad

Berekening	Verhoogd op basis van	Ophogen tot	Levensduur	Kostenfunctie	Rentevoet
$S1_0$	Hoogte	MSP + WH + Buffer	30	Grote projecten	0,0%
$S2_0$	Risico	KH + WH + Buffer	30	Grote projecten	0,0%
$S2b_0$	Risico	KH + WH + Buffer	15	Onderhoud	0,0%
$S1_{2,5}$	Hoogte	MSP + WH + Buffer	30	Grote projecten	2,5%
$S2_{2,5}$	Risico	KH + WH + Buffer	30	Grote projecten	2,5%
$S2b_{2,5}$	Risico	KH + WH + Buffer	15	Onderhoud	2,5%

3.2 Constructieve maatregelen

Er zijn berekeningen uitgevoerd inclusief het toepassen van constructieve maatregelen (zie Tabel 3.2). Deze maatregelen zijn toegepast op de locaties waar er geen ruimte beschikbaar is voor het ophogen van een kering en deze tegelijkertijd te moeten verbreden. Op de plekken waar in de data een “ja” voor bebouwd staat is voor de gehele lengte van het traject of een damwand of een DMC geplaatst.

Tabel 3.2 Berekeningen voor constructieve maatregelen

Berekening	Beschrijving
$S3_{2,5}$	Risico gebaseerd, met constructie, DMC (innovatief)
$S3b_{2,5}$	Risico gebaseerd, met constructie, damwand

3.3 Gevoeligheidsanalyse

We hebben een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd om te bepalen welke effecten de verschillende parameters hebben op de benodigde investeringen, en de voorkeurstrategie. De berekeningen die gemaakt zijn voor deze gevoeligheidsanalyses zijn weergegeven in Tabel 3.3. Voor deze berekeningen is de casus $S1_{2,5}$ uit Tabel 3.2 als basis gebruikt en is telkens een van de parameters aangepast.

Tabel 3.3 Berekeningen voor gevoeligheidsanalyse

Berekening	
G0	Base case: $S_{2,5}$
G1	Hogere rentevoet (4%)
G2	Hoger faalkansbudget (24%)
G3	Buffer (levensduur dijk) aangepast naar 15 jaar
G4	Buffer (levensduur dijk) aangepast naar 50 jaar
G5	Totale periode aangepast naar 150 jaar ipv 100 jaar

4 Resultaten

4.1 Hoofresultaten (groene dijken)

Tabel 4.1 laat de volgende resultaten zien: de mediaan van de investeringskosten en de mediaan van de investeringen + risico, over 100 jaar, voor elk van de zes berekeningstypes die worden beschreven in Tabel 3.1. De histogrammen van investeringskosten en netto contante waarde over 100 jaar worden gepresenteerd in bijlage B. De histogrammen laten de spreiding van de in de resultaten zien vanwege de onzekerheid in de verzakkingsgraad.

Tabel 4.1 Resultaten: mediaan investering over 100 jaar, mediaan investering + risico over 100 jaar, in miljoen Euro, voor de 6 berekeningen beschreven in Tabel 3.1

Berekening	Beschrijving	Rentevoet	Investeringskosten (uitgaven, mediaan)	Investeringskosten + Risico (uitgaven, mediaan)
			[M€]	[M€]
$S1_0$	Hoogte: MSP + WH	0,0%	688	6855
$S2_0$	Risico: Grote projecten	0,0%	629	722
$S2b_0$	Risico: Onderhoud	0,0%	523	618
$S1_{2,5}$	Hoogte: MSP + WH	2,5%	177	1707
$S2_{2,5}$	Risico: Grote projecten	2,5%	172	203
$S2b_{2,5}$	Risico: Onderhoud	2,5%	131	162

In Tabel 4.1 valt op dat Strategie 1 (hoogte-gebaseerd) een erg hoog risico bevat. De reden dat het risico zo hoog is, is omdat in veel gevallen de ontwerphoogte voor Strategie 1 - maalstoppeil plus waakhogte (plus buffer) – volgens de Promotor berekeningen een grotere kans heeft om door de waterstand te worden overschreden dan werd aangenomen. Daardoor is ook mogelijk dat het risico wordt overschat; want als de faalkans van één enkel dijksegment te hoog wordt geschat (gebaseerd op de Promotor software), dan wordt de risicobijdrage van het gehele gevolgtraject overschat (zie paragraaf 2.1.1.2).

4.2 Constructieve maatregelen en gevoeligheidsanalyse

De berekeningen inclusief constructieve maatregelen, en de gevoeligheidsanalyse berekeningen, hebben plaatsgevonden in een eerdere fase van het onderzoek, voorafgaand aan de correctie van sommige invoergegevens. Daarom worden de resultaten van deze analyses niet in absolute termen gepresenteerd, maar in relatieve termen in vergelijking met een referentie. De referentie is de (toen-berekende) $S2_{2,5}$ berekening, met de volgende specificaties: risico-gebaseerde strategie voor 'groene dijken', rentevoet van 2,5%, buffer van 30 jaar, faalkansbudget van 10% voor overloop/overslag, levenscyclus periode van 100 jaar.

Tabel 4.2 geeft de (relatieve) resultaten weer van de berekeningen met constructieve maatregelen.

Tabel 4.2 Mediaan investering over 100 jaar, en mediaan investering + risico over 100 jaar, ten opzichte van $S_{2,5}$ voor de risicoanalyse inclusief structurele maatregelen

Berekening	Structurele maatregel	Investering (Relatief)	Investering + risico (Relatief)
$S_{3,2,5}$	DMC systeem	2,1	1,9
$S_{3b,2,5}$	Damwand	2,0	1,9

De (relatieve) resultaten van de gevoeligheidsanalyse zijn weergegeven in Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Mediaan investering + risico over 100 jaar (of 150) ten opzichte van $S_{2,5}$

Berekening	Beschrijving	Uitgave – investering + risico (Relatief)
G1	Hogere rentevoet	0,5
G2	Hoger faalkansbudget	1,0
G3	Buffer aangepast naar 15 jaar	0,8
G4	Buffer aangepast naar 50 jaar	1,2
G5	Periode van 150 jaar ipv 100 jaar	1,1

5 Discussie en conclusies

5.1 Discussie van de resultaten voor “groene dijken”

De resultaten laten zien dat Strategie 2b – risico gebaseerde methode met onderhoudsstrategie - de meest gunstige is. Deze strategie houdt het risico onder de toelaatbare risicodrempel tegen de laagste investeringskosten. De andere voordelen van de onderhoudsstrategie - zoals een eenvoudigere projectinitiatie en meer gevoel met de keringen blijven houden- vormen samen met de kosteneffectiviteit een sterk argument om in de toekomst over te gaan naar een onderhoudsbeheerstrategie.

De huidige manier van dijken verhogen (Strategie 1 - op hoogte gebaseerde benadering), is niet kostenefficiënt. De investeringskosten zijn hoger dan de risico gebaseerde benadering, terwijl desondanks het risico de toelaatbare risicodrempel overschrijdt. De totale uitgave, die de investeringskosten en het risico combineert, is ongeveer negen keer hoger dan met de risico gebaseerde methoden. De reden dat het risico zo hoog is, is omdat in veel gevallen de ontwerphoogte voor Strategie 1 - maalstoppeil plus waakhogte (plus buffer) - een grotere kans heeft om door de waterstand te worden overschreden dan algemeen werd aangenomen. Recente hoogwaterstanden, waarbij maalstoppeil werd bereikt, bevestigen dat maalstoppeil een niet zo extreem waterniveau is als verondersteld was. De waterstand-kanscurves werden gebruikt om de overschrijdingskans van maalstoppeil te berekenen. Het is daarom belangrijk om te beseffen dat het berekende risico slechts zo betrouwbaar is als de promotor-software die de kanscurves heeft gegenereerd. Om deze reden is tijdens het onderzoek door het waterschap extra kritisch gekeken naar de kanswaarden die uit de promotor software kwamen. Er is geconcludeerd dat deze er realistisch uitzien.

Een analyse van de cash-flow maakt het mogelijk om een indruk te krijgen wat de investeringskosten zijn, in reële termen, over de gehele periode. Met een analyse van de cash-flow is het niet mogelijk om een vergelijking te maken tussen strategieën die op verschillende momenten investeren. Daarom is er ook gekeken naar een vergelijking van de strategieën met een rente van 2,5%. De analyse laat zien dat voor beide rentevoeten Strategie 2b – risico gebaseerd met onderhoudsoptie – de meest gunstige strategie is. De cash-flow analyse illustreert wel de hoogte van de uitgaven voor het waterschap in de komende jaren. De gemiddelde jaarlijkse investeringskosten zijn ongeveer 7 miljoen/jaar voor de op hoogte gebaseerde methode, 6 miljoen/jaar voor de risico-gebaseerde methode met grote projecten, en 5 miljoen/jaar voor de risico-gebaseerde methode met onderhoudsprojecten (zie ook Tabel 4.1).

5.2 Discussie resultaten constructieve maatregelen

Het toepassen van constructieve maatregelen is tweemaal zo duur als een oplossing in grond uitvoeren. Dit is logisch, omdat een constructie is toegepast en dit meer kosten met zich mee brengt. Hierbij moet de kanttekening gemaakt worden dat de maatregelen over de gehele

lengte van het dijkvak zijn genomen, terwijl het er in praktijk op neer zal komen dat vaak maatwerk geleverd zal worden over een kortere lengte, bijvoorbeeld langs een woning. De resultaten laten ook zien dat het toepassen van een DMC-systeem niet significant duurder of goedkoper is dan het toepassen van damwanden. Hieruit valt te concluderen dat een innovatieve oplossing niet hoeft af te vallen als mogelijkheid in een dijkversterkingsproject op basis van de kosten. Het zal van de specifieke eisen aan de oplossing per locatie afhangen of deze kan worden toegepast.

5.3 Discussie gevoeligheidsanalyse

De resultaten van de gevoeligheidsanalyse laten zien dat het veranderen van de rentevoet het meeste invloed heeft op de resultaten van de berekening. Dit komt door het exponentiële karakter van de kostenstijgingen als een functie van de rentevoet. Hiernaast valt te zien dat het uitvoeren van grotere projecten met een langere levensduur van de dijk resulteert in hogere kosten ten opzichte van projecten met een kortere levensduur. Hoewel een kortere levensduur vaker opstartkosten met zich meebrengt, is het effect minder dan dat van de rentevoet (in de gevoeligheidsanalyse was dat 2,5%). Door kleinere projecten uit te voeren wordt een deel van de kosten overgedragen naar de toekomst, en vanwege de omrekening naar contante waarde is een besteding in de toekomst goedkoper.

Het aanpassen van de faalkansbijdrage voor overloop en overslag heeft geen effect op de resultaten. Dit is te verklaren door het feit dat de waterstand-kanscurves uit promotor afvlakken waardoor de waterstand die hoort bij een lagere faalkanseis ongeveer even hoog is als de waterstand die hoort bij een hogere faalkanseis. Tot slot is te zien dat het doorrekenen van een strategie voor 100 jaar voldoende is om een gemiddeld budget te bepalen. De strategie die doorgerekend is voor 150 jaar komt ongeveer op hetzelfde gemiddelde uit.

5.4 Aanbevelingen voor verdere ontwikkeling

De tool en methode die voor deze analyse zijn ontwikkeld, kunnen worden aangepast om jaarlijkse (risico-gebaseerde) investeringskeuzes te ondersteunen. Hiervoor zijn twee verbeteringen nodig. De eerste heeft te maken met de eisen voor het uitvoeren van een onderhoudsproject (in tegenstelling tot een groot project). De vergunningen om een dijkverhoging uit te voeren als onderhoudsproject vereisen dat de benodigde hoeveelheid grond onder een bepaald maximum ligt. In de huidige analyse wordt uitgegaan van een levensduur van 15 jaar voor de onderhoudsstrategie. In de werkelijkheid is de levensduur variabel, en zal het afhankelijk zijn van de verzakingsgraad. Er zal dus een analyse gemaakt moeten worden van wat de levensduur van een dijk kan zijn om het maximum volume van een onderhoudsproject niet te overschrijden.

Het tweede probleem dat moet worden verbeterd, is dat momenteel het jaarlijkse risico wordt berekend nadat alle projecten voor dat jaar zijn geïmplementeerd. De projecten zijn gekozen om ervoor te zorgen dat dit post-projectrisico onder het toelaatbare risico ligt. Het probleem is dat voorafgaand aan het uitvoeren van de projecten, het risico boven de toelaatbare

risicodrempel kan liggen. Hiernaast is het in praktijk nooit zo dat als gesignaleerd wordt dat een kering te laag ligt in een bepaald jaar ook direct het project in dat jaar wordt uitgevoerd. Hier zit altijd enige tijd tussen. Een manier om dit te verbeteren in de tool is om de risicodrempel te verlagen tot een waarde die onder het toelaatbare risico ligt, zodat het risico vóór de jaarlijkse projecten zijn geïmplementeerd nooit (of zelden) het toelaatbare risico overschrijdt. Op deze manier worden de verhogingen preventief in plaats van reactief.

5.5 Conclusies

Deze studie heeft verschillende beheerstrategieën voor het beheren van de regionale waterkeringen van de Schermerboezem met elkaar vergeleken. Hieruit is naar voren gekomen dat een strategie op basis van een risicobenadering voor kleinere onderhoudsprojecten het meest kosteneffectief is. Het wordt dan ook aanbevolen om te bekijken of deze strategie geïmplementeerd kan worden.

De tools die ontwikkeld zijn voor dit project zou met kleine aanpassingen gebruikt kunnen worden om in de praktijk jaarlijkse investeringskeuzes te kunnen maken.

A Risico gebaseerde methode in meer detail (memo)

Memo

To
ROBAMCI HHNK case team

Date
2017-12-08

Reference

Number of pages
8

From
Kathryn Roscoe

Direct line
-

E-mail
kathryn.roscoe@deltares.nl

Subject
ROBAMCI case HHNK: Risk-based methodology

Copy to

1 Background

Infrastructure asset management and the ROBAMCI project

Infrastructure asset management focuses on developing strategies that can sustain public infrastructure assets, like roads, railways, and levee systems. It is concerned with the life cycle of assets, including design, construction, operation and maintenance, rehabilitation, and replacement. Because maintenance and replacement funds for infrastructure are limited, being able to sustain a large portfolio of assets means that investments must be carried out at strategic points in an asset's life cycle, taking the entire portfolio into account. This consists of prioritizing maintenance or replacement of assets, preferably based on risk, and identifying the optimal time to invest.

The ROBAMCI project was initiated to develop methods and tools to support risk-based infrastructure asset management, as well as to generate an integrated overview of the data, knowledge, and experience available for all the assets within the Dutch infrastructure portfolio. Currently, such an overview is lacking, with data, knowledge and experience divided between and even within different organizations. The ROBAMCI project is a collaboration of knowledge/research institutes, the private sector, and the government.

ROBAMCI in its current phase focuses on infrastructure related to the water sector. In the area of operation and maintenance of flood defenses, the main question is: what is the best investment strategy considering costs, quality, and vulnerability (risk). To address this overarching question, ROBAMCI is carrying out a number of case studies in collaboration with water boards in the Netherlands. Via these case studies, expertise, methods, and tools are developed and applied to achieve a significant improvement in the cost efficiency of operation and maintenance.

Current case study

The case study described in this memo is concerned with the strategic strengthening (heightening) of levees within the jurisdiction of the water board Hoogheemraadschap Noorderkwartier (HHNK).

These levees are subject to subsidence, which reduces their flood protection performance, and results in increased risk. The rate of the subsidence has been calculated, but is uncertain, largely due to uncertainty in the subsurface soil composition. Each levee section within the portfolio has a safety standard, which is given as a maximum acceptable failure probability. The standards were derived such that they correspond to acceptable risk levels, which were calculated as part of a national flood risk analysis.

2 Investment strategies for levee strengthening

In the case study we will analyze three improvement/investment strategies:

- Current strategy
- Risk-based strategy
- Innovative risk-based strategy

This memo focuses predominantly on the risk-based strategy. .

2.1 Current height-based strategy

The current strategy employed by HHNK is to annually inventory which levees fall below a critical height, and to heighten the 25 km that are considered to have the highest priority. Prioritization is done qualitatively, via discussions. The critical height is taken to be the water level at which pumping into the canal is no longer permitted (*maalstoppeil* in Dutch) plus freeboard. The latter takes into account possible waves on the water, and is 10, 20, or 40 cm depending on the location.

The current strategy is unable to identify the risk to residents, or how the improvements will impact that risk. They could be investing money for improvements that bring the risk to levels lower than required, or conversely, they could be under-investing or investing in the wrong levees so that the risk remains unacceptably high. The water board would like to make more informed decisions about levee heightening and prioritization.

2.2 Risk-based strategy

We developed a risk-based strategy which focuses on maintaining an acceptable risk level for the entire system under the HHNK jurisdiction. In this method, the risk is calculated each year and compared to a tolerable maximum risk level R_{max} . Improvements are only carried out if the risk exceeds R_{max} , and only the necessary improvements are carried out to bring the risk below R_{max} . In this way, two goals are achieved: (1) the risk is (known to be) tolerable and (2) extraneous improvements are not carried out. The first is societally responsible, and the second is economically advantageous.

To calculate the annual risk and the tolerable risk, we need information about failure probabilities of the levees and economic consequences should they breach. For this, we can make use of safety classes, to which each levee segment in the portfolio has been assigned (ref). The five classes are shown in Table 1. Each class has a maximum exceedance frequency (of water level) associated with it, F_{norm} , and a range of economic consequences, C .

The safety standards are given as maximum tolerable exceedance frequencies, which are translated into maximum tolerable exceedance probabilities using the formula given in Eq. 1.

$$P_{norm} = 1 - \exp(-F_{norm}) \quad (1)$$

We make a distinction between a levee segment i and a consequence reach k (see Figure 1). A consequence reach is a contiguous length of levee system that has the same safety class (indicated in the figure by different colors). Within a consequence reach there are numerous levee segments, each of which have different heights and subsidence rates.

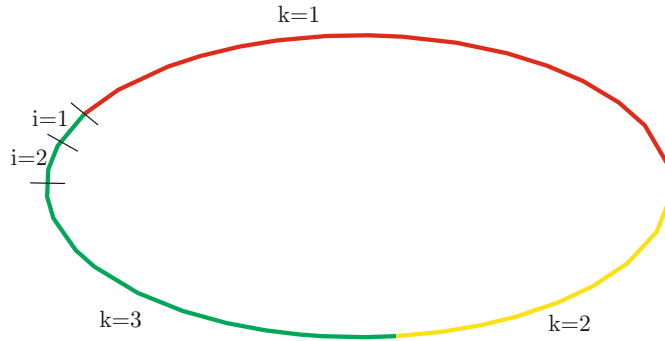


Figure 1: Cumulative investment for the risk-based strategy and the current strategy (for one realization of the subsidence rate).

Tolerable Risk

To calculate tolerable risk, we need the maximum allowed *failure* probability $P_f^{\max}$ of the levees, which is related, but not equal, to the maximum allowed *exceedance* probability P_{norm} . Previous research (ref) has derived an approximate translation between P_{norm} and $P_f^{\max}$, using a factor $\gamma = 5$ (see Eq. 2), which we use in our approach.

$$P_f^{\max} = 1/\gamma \cdot P_{norm} \quad (2)$$

Equation 3 shows how we calculate the maximum tolerable risk, R_{max} . In this equation, the safety standard for a consequence reach k is denoted as $P_{f,k}^{\max}$, as it is the maximum failure probability allowed for that reach. The quantity C_k denotes the consequences should consequence reach k fail. Each product $P_{f,k}^{\max} \cdot C_k$ gives the risk contribution of consequence reach k . The total (maximum) risk R_{max} is the summation of the individual contributions over all of the n consequence reaches in the portfolio.

$$R_{max} = \sum_{k=1}^n P_{f,k}^{\max} \cdot C_k \quad (3)$$

The consequences for each safety class are given as a range (see Table 1). In this study, we took the consequence C_k to be the average of the range, except in Class V, in which we took the lower

Safety class	Exceedance frequency	Consequence ranges (Million Euros)
I	1/10	0-8
II	1/30	8-25
III	1/100	25-80
IV	1/300	80-250
V	1/1000	>250

Table 1: Safety class and associated (maximum) exceedance probability and consequence range

Safety class	Consequences (Million Euros)
I	4
II	16.5
III	52.5
IV	165
V	250

Table 2: Safety class and economic consequences used in the current study to calculate risk

limit to be the consequence. Table 2 presents the values that were used in this study to calculate risk.

Annual risk

To calculate annual risk, we need to calculate the annual failure probability P_f for each of the segments. This probability is dependent on the height of the levee h_L , which is decreasing due to subsidence. To estimate the relationship $P_f(h_L)$, we make use of water level exceedance probability curves F_H , which we obtained from HHNK. These curves have been generated for each levee segment by the Promotor software. Because the failure mode we are considering is overflow/overtopping, we need to account for waves. HHNK has determined freeboard w (in Dutch: waakhoogte) for each levee segment based on anticipated wave heights. We have used the freeboard as a proxy for wave height. Eq. 4 describes the method to compute the failure probability for year j and segment i ; we subtract the freeboard (waves) from the levee height and then find the associated exceedance probability of the remaining height. The method is also illustrated in Figure 2.

$$P_{f,ij} = P_f(h_{L,ij}) = 1 - F_{H,i}(h_{L,ij} - w) \quad (4)$$

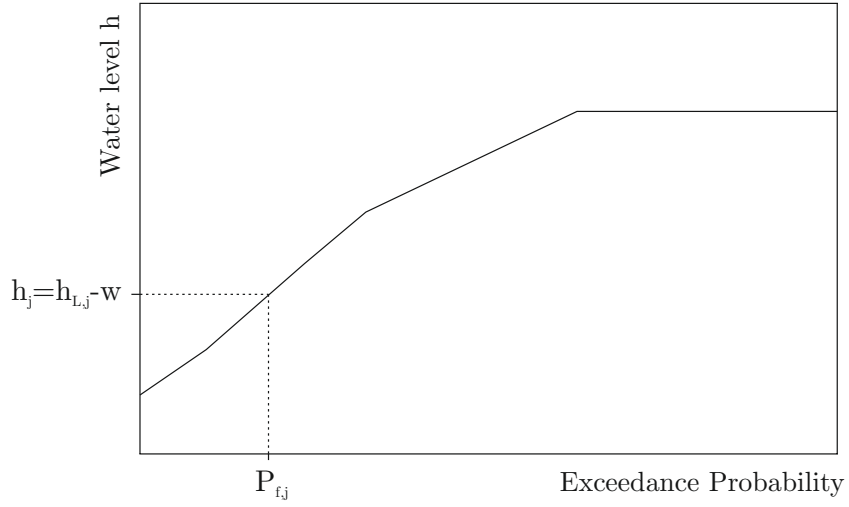


Figure 2: Cumulative investment for the risk-based strategy and the current strategy (for one realization of the subsidence rate).

Each levee segment has a subsidence rate distribution, S_i . For each life cycle analysis, we sample a value from the subsidence rate distribution for each levee segment, s_i . The height of levee segment i is then calculated for year j as given in Eq. 5. Note that the height for year zero, $h_i(j = 0)$ is equal to the current levee heights. In reality, the "current heights" were modified in the input data by HHNK to represent the heights following improvements.

$$h_{L,i}(j) = h_{L,i}(j - 1) - s_i \quad (5)$$

The failure probability for segment i in year j is calculated by using Eq. 4 with the value of $h_{L,i}$ calculated in Eq. 5. We make the assumption that the segment failure probabilities within a consequence reach are entirely correlated. So the failure probability for consequence reach k is given in Eq. 6.

$$P_{f,k} = \min(P_{f,i}), \quad i \in k \quad (6)$$

The risk contribution for consequence reach k for year j is denoted $R_k(j)$, and is calculated according to Eq. 7. The total risk for year j is denoted $R(j)$, and is the sum over all consequence reaches; see Eq. 8.

$$R_k(j) = C_k \cdot P_{f,k} \quad (7)$$

$$R(j) = \sum_k R_k(j) \quad (8)$$

Levee Improvements

If the annual risk exceeds the tolerable risk, $R(j) > R_{max}$, then action must be taken. In our method, levee segments with a high failure probability are heightened until the risk falls below R_{max} . To determine which levees are candidates for improvement, we first calculate a minimum tolerable height for each levee, using the water level exceedance probability curve and the norm probability P_{norm} . The method is illustrated in Figure 3. We must take into account that P_{norm} is the total safety standard, including all failure modes, while we are only considering overflow/overtopping. We correct for this by assigning a percentage b_{oo} of the safety-standard budget to overflow/overtopping.

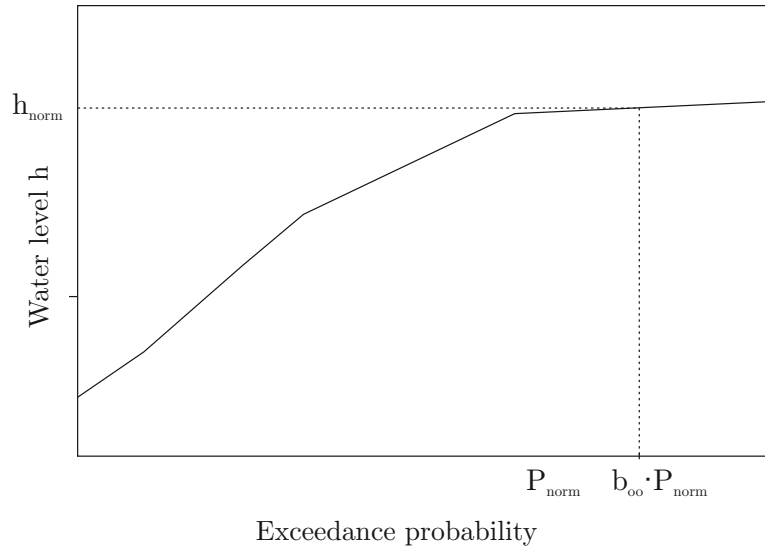


Figure 3: Cumulative investment for the risk-based strategy and the current strategy (for one realization of the subsidence rate).

The water level that corresponds with the budget-corrected safety standard for segment i is calculated according to Eq. 9.

$$h_{norm,i} = F_{H,i}^{-1}(b_{oo} \cdot P_{norm}) \quad (9)$$

The levee height that corresponds to the safety standard must also account for waves; this is done by adding the freeboard w to the water level, as expressed in Eq. 10.

$$h_{L,i}^{min} = h_{norm,i} + w \quad (10)$$

Any levee which whose height is below its minimum (i.e. $h_{L,i}(j) < h_{L,i}^{min}$) is a candidate for improvement when the annual risk falls below R_{max} . Because the failure probability of the levee segments are fully correlated, it is most effective and straight-forward to improve either all or none of the below-minimum levee segments within a consequence reach. The reaches are improved in order of the greatest risk-reduction to cost ratio.

Levees segments that are selected to be heightened are raised to a height of $h_{L,i}^{min} + b$, where b is a buffer height that ensures a lifetime of Y years given the subsidence rate s_i : $b = s_i \cdot Y$. The

increase in levee height is referred to as Δh_L . For segment i in year j , Δh_L is calculated according to Eq. 11.

$$\Delta h_{L,i}(j) = h_{L,i}^{\min} - h_{L,i}(j) + b \quad (11)$$

The costs depend on the volume of soil required to obtain a height increase of ΔH_L . The cost I has three components: an initial start-up cost I_0 , material costs I_m , and implementation costs I_{im} , as shown in Eq. 12.

$$I = I_0 + I_m + I_{im} \quad (12)$$

The material costs are determined according to Eq. 13, which depends on the cost per cubic meter C_{vol} and the required volume of soil V .

$$I_m = C_{vol} \cdot V \quad (13)$$

The implementation costs are a function of the material costs (see Eq. 14), and depend on an implementation factor ω .

$$I_{im} = \omega \cdot I_m \quad (14)$$

The required volume V is approximated according to Eq. 15, where L is the length of the levee, and b_0 is the distance between the water- and land-side toe of the levee. The approximation is shown in Fig. 4. The excess at the crown compensates for the volume that is neglected on the sides of the levee.

$$V = L \cdot b_0 \cdot \Delta h_L \quad (15)$$

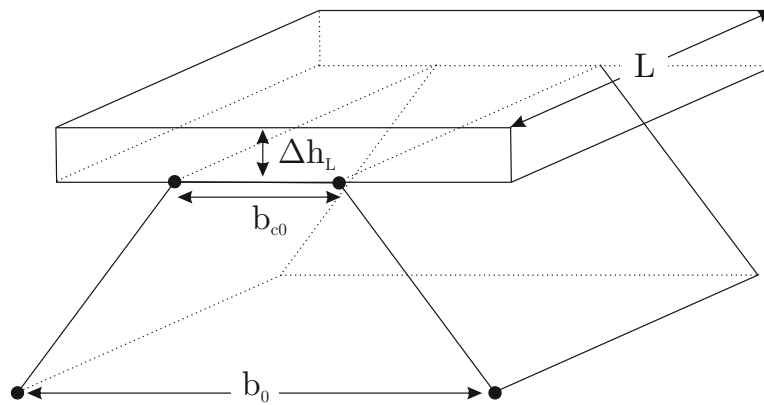


Figure 4: Approximation of the required volume to obtain a height increase of ΔH_L

The investment costs differ per levee segment and per year (due to subsidence). Putting Eqs. 12, 13, and 14 together, the cost of improvement for levee segment i in year j is given in Eq. 16. Recall that the expression for $\Delta h_{L,i}(j)$ is given in Eq. 11.

$$I_i(j) = I_0 + (1 + \omega) \cdot C_{vol} \cdot (L_i \cdot b_{0,i} \cdot \Delta h_{L,i}(j)) \quad (16)$$

The total costs for year j are a combination of the total investment costs for year j , denoted $I_{tot}(j)$, and the risk for year j . The total investment costs are calculated according to Eq. 17, where Inv_0 is an initial cost of doing improvements (start-up costs, independent of the amount to be heightened), Inv_i is the cost of improvements for segment i , which depends on the amount to be heightened, and Y is the set of segments to be improved in year j .

$$I_{tot}(j) = \begin{cases} \sum_{i \in Y} I_i(j) & R(j) > R_{\max} \\ 0 & R(j) < R_{\max} \end{cases} \quad (17)$$

Comparing strategies

To calculate the cost effectiveness of an improvement strategy, we consider the net present costs over the entire life cycle. The costs takes into account both investment costs and risk, and discounts the value of both in the future, to account for currency depreciation. The total (present value) cost is calculated according to Eq. 18.

$$Cost = \sum_{j=1}^N \frac{I_{tot}(j)}{(1+r)^j} + \sum_{j=1}^N \frac{R(j)}{(1+r)^j} \quad (18)$$

The preferred strategy would minimize the total (present value) cost. Using Eq. 18 we can compare the current and risk-based strategies.

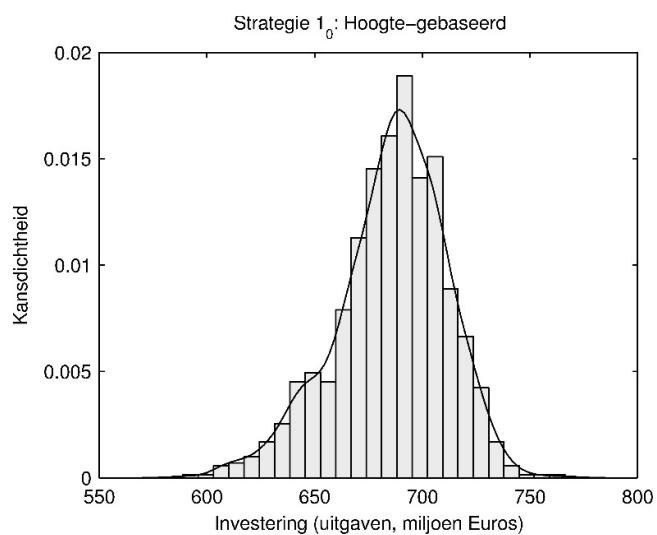
B Resultaat histogrammen

In deze bijlage, worden de resultaten als histogrammen gegeven. Dit toont de spreiding in de resultaten vanwege de onzekerheid in de verzakkingsgraad.

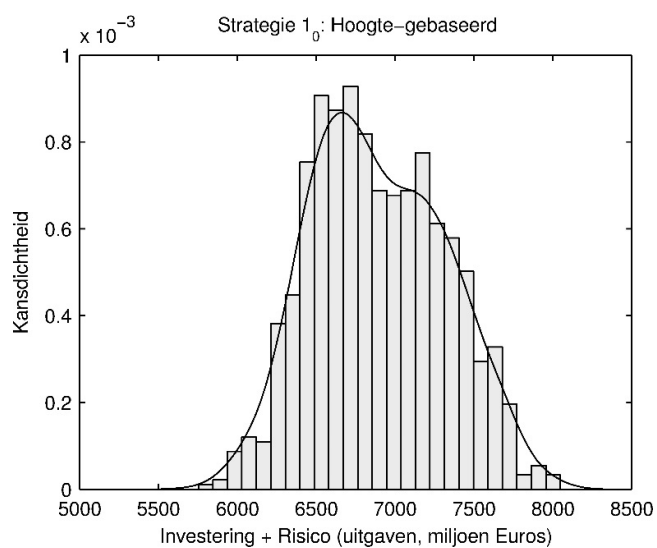
B.1 Resultaten voor rentevoet = 0,0%

B.1.1 Strategie 1 ('Huidige methode')

Investing voor $S1_0$ over 100 jaar

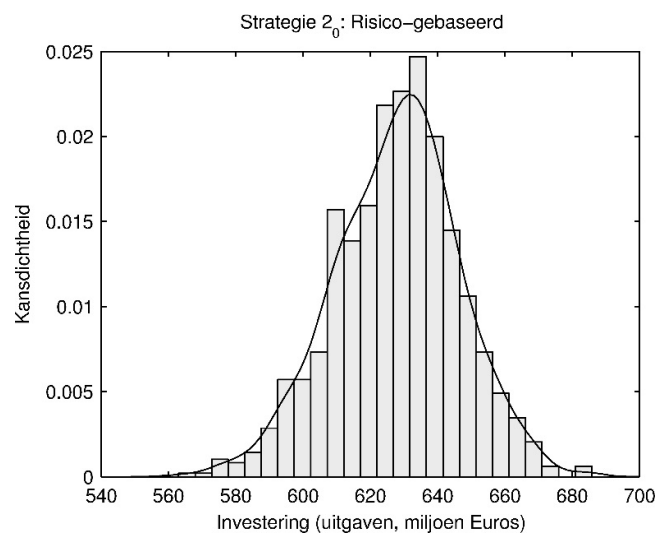


Investing + Risico voor $S1_0$ over 100 jaar

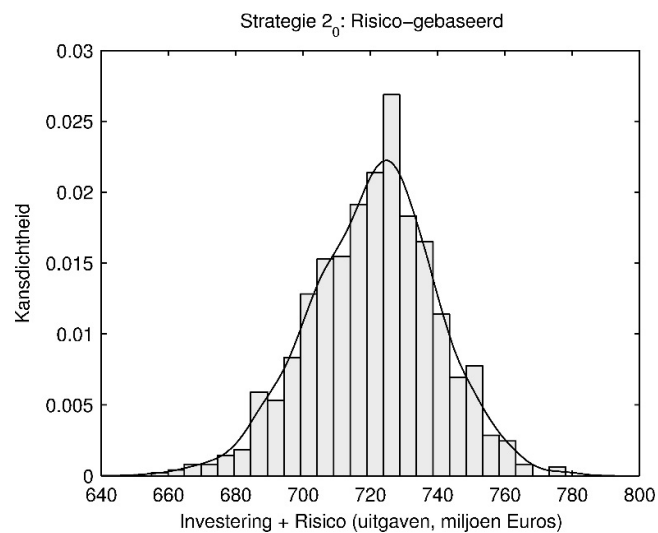


B.1.2 Strategie 2 (Risico, grote projecten)

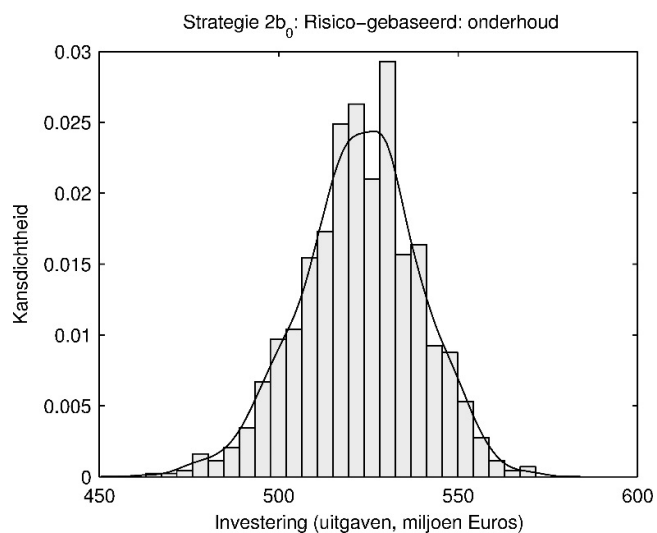
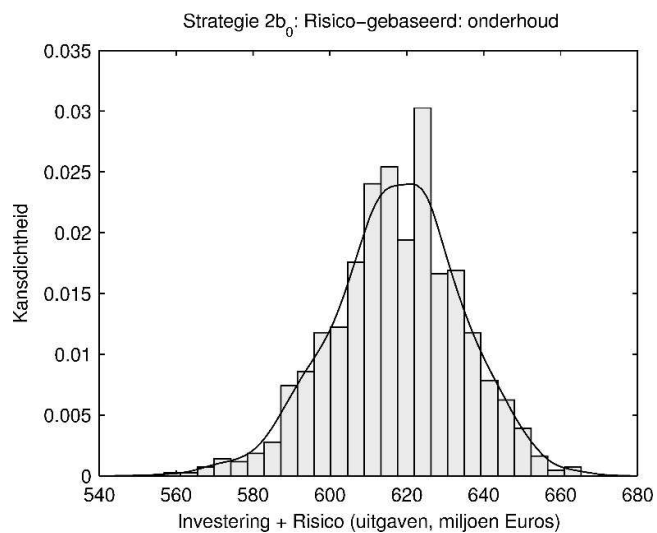
Investing voor $S2_0$ over 100 jaar



Investing + Risico voor $S2_0$ over 100 jaar



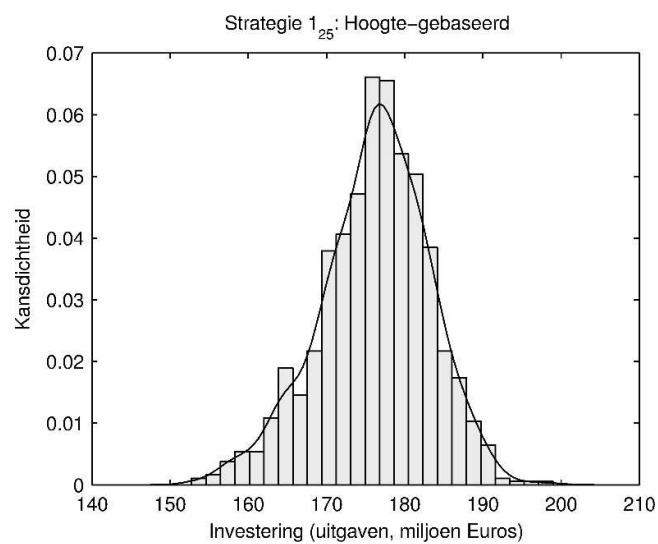
B.1.3 Strategie 2b (Risico, onderhoud)

Investerings voor $S2b_0$ over 100 jaar**Investerings + Risico voor $S2b_0$ over 100 jaar**

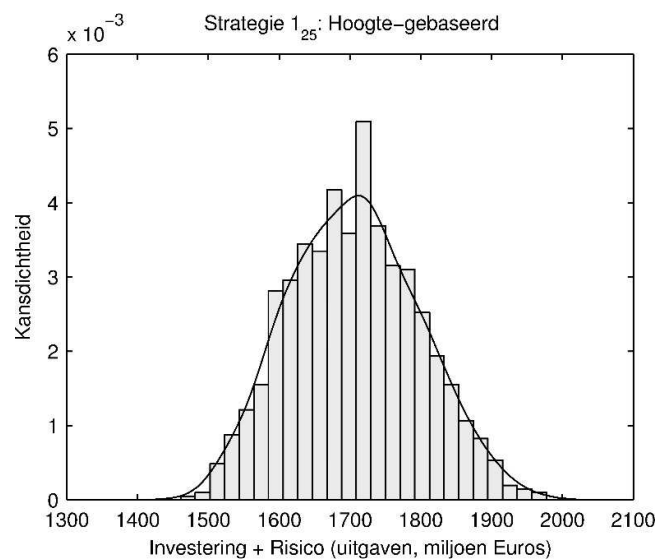
B.2 Resultaten voor rentevoet = 2,5%

B.2.1 Strategie 1 ('Huidige methode')

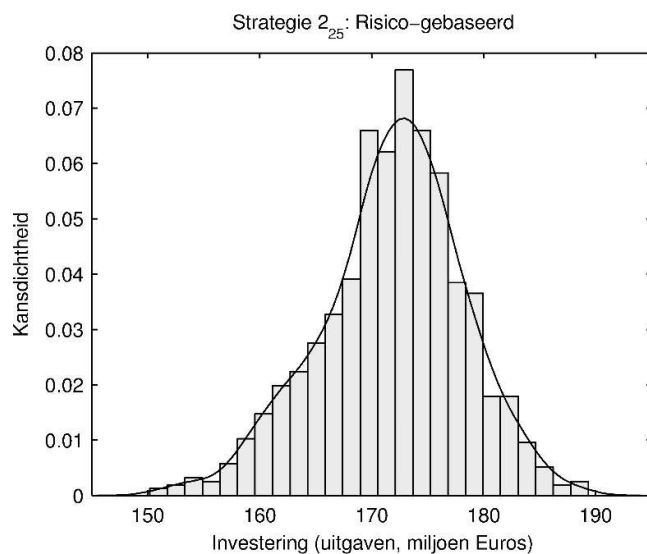
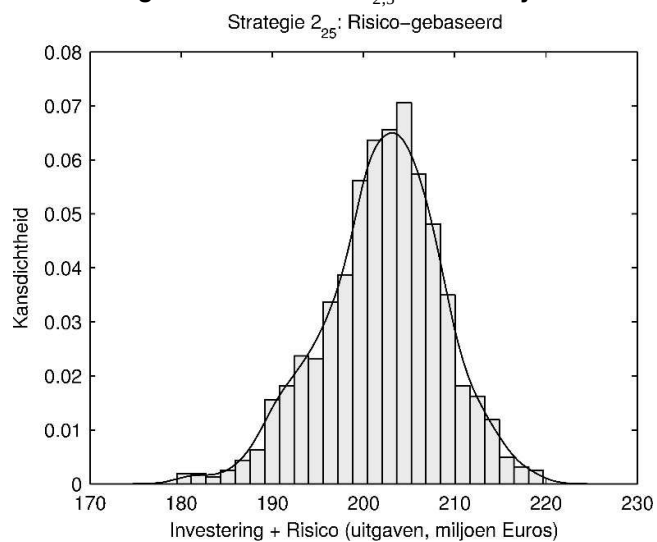
Investing voor $S_{1,2,5}$ over 100 jaar



Investing + Risico voor $S_{1,2,5}$ over 100 jaar

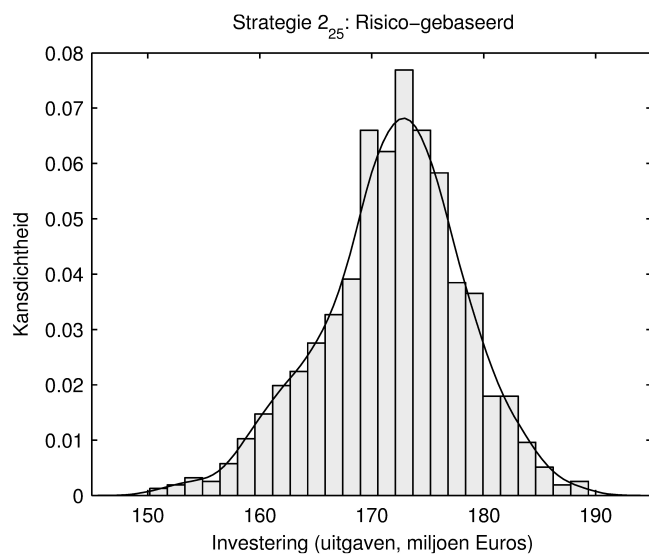


B.2.2 Strategie 2 (Risiko, grote projecten)

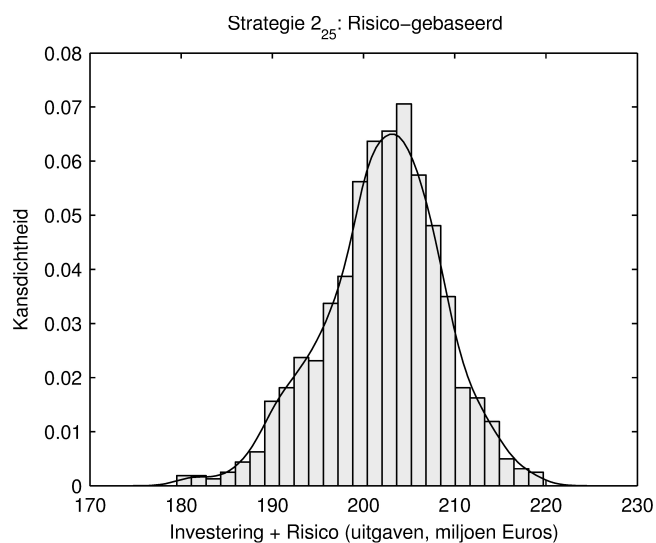
Investerings voor $S_{2,5}$ over 100 jaar**Investerings + Risiko voor $S_{2,5}$ over 100 jaar**

B.2.3 Strategie 2 (Risico, grote projecten)

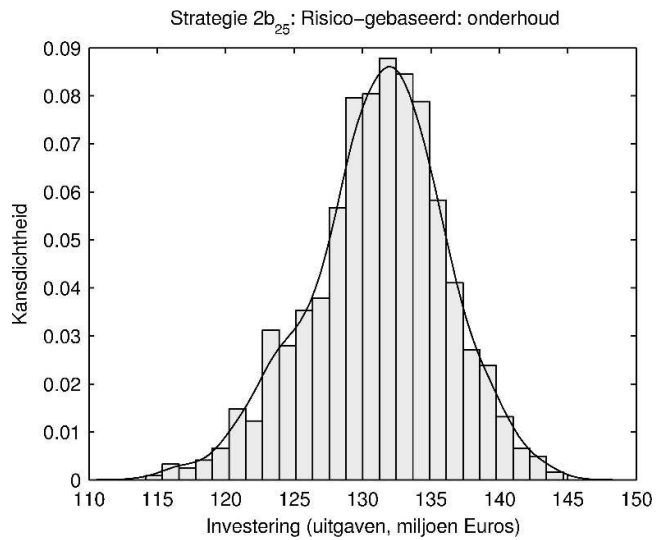
Investing voor $S2b_{2,5}$ over 100 jaar



Investing + Risico voor $S2b_{2,5}$ over 100 jaar



B.2.4 Strategie 2b (Risico, onderhoud)

Investing voor $S2b_{2,5}$ over 100 jaar**Investing + Risico voor $S2b_{2,5}$ over 100 jaar**