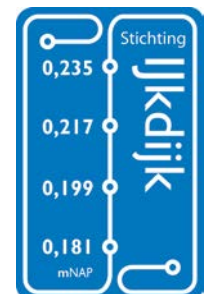


Beschrijving asset management tool waterkeringen versie 0.9

ROBAMCI fase 1: casus waterkeren



juli, 2016



Rapportnummer

1221086-000-ZWS-002

Auteurs

Wouter Jan Klerk (Deltares)

Wim Kanning (Deltares)

Martin van der Meer (FUGRO)

Foto omslag

http://www.dijkmonitoring.nl/_sitefiles/img/IMG_0241.JPG

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	Juli 2016	Wouter Jan Klerk		André Koelewijn		Gerard Blom	
		Wim Kanning					
		Martin van der Meer (FUGRO)					

Status

Definitief

**Beschrijving asset management tool
waterkeringen versie 0.9
ROBAMCI fase 1: casus waterkeren**

juli, 2016

Inhoud

SAMENVATTING	1
1 INLEIDING	3
1.1 Aanleiding	3
1.2 Doel van het project	4
1.3 Afbakening	4
1.4 Leeswijzer	5
2. ASSET MANAGEMENT VAN WATERKERINGEN	6
2.1 Asset management	6
2.1. Definities	6
3. ROBAMCI WATERKEREN TOOL VERSIE 0.9	8
3.1. Doel van de tool	8
3.1. Opzet van de tool	8
3.2. Invoer	9
3.3.1. Algemene gegevens	10
3.3.2. Beschrijving van de sterkte van de waterkering	11
3.3.3. Ondergrondscenario's	11
3.3.4. Strategie	11
3.3. Bepaling prestatieniveau	12
3.3.1. Monitoring in de ROBAMCI Tool	13
3.3.2. Toetsing	19
3.4. Handelingsperspectief: uitvoering van maatregelen	19
3.4.1. Investeringsstrategie versterken	20
3.4.2. Investeringsstrategie projectmonitoring	20
3.4.3. Investeringsstrategie lifecycle monitoring	21
3.4.4. Investeringsstrategie DMC	21
3.4.5. Uitkomsten	23
4. CASE 1: MONITORING BIJ EEN ZEEDIJK	24
4.1. Beschrijving case	24
4.1.1. Inleiding	24
4.1.2. Faalmechanisme en sterktemodel	24
4.1.3. Beslismodel	27
4.2. Case 1a: monitoring bij een afgekeurde zeedijk (hindcasting)	28
4.2.1. Doel van de case	28
4.2.2. Vergelijking strategieën	29

4.3. Case 1b: monitoring bij een afgekeurde zeedijk (forecasting)	31
4.3.1. Vergelijking strategieën	33
4.4. Case 1c: lifecycle monitoring bij een zeedijk	35
4.4.1. Inleiding	35
4.4.2. Opzet strategie lifecycle monitoring	36
4.4.3. Vergelijking strategieën	36
4.5. Gevoeligheidsanalyse balans risico en kosten	39
 5. CASE 2: INNOVATIEVE BEHEERSMAATREGEL IJSSELDIJK BIJ VEESEN	 43
5.1. Beschrijving case	43
5.2. Faalmodel	43
5.3. Vergelijking strategieën	44
5.4. Falen van een DMC-systeem	47
5.5. Conclusies & aanbevelingen	49
 6. REFLECTIE	 51
6.1. De tool in perspectief	51
6.2. Rol van beheer en onderhoud in de asset management cyclus	52
6.3. Verbeterkansen tool	54
 7. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	 55
7.1. Conclusies tool	55
7.2. Inzichten op basis van de tool	55
7.3. Aanbevelingen	56
 8. REFERENTIES	 57

Samenvatting

Bij LiveDijk XL Noorderzijlvest is door onder meer monitoring een grote hoeveelheid informatie over de sterkte van de dijk en het gedrag onder extreme omstandigheden ingewonnen. Deze nieuwe informatie resulteerde in een flinke verandering van de inschatting van de sterkte van de kering: deze bleek veel sterker dan aanvankelijk gedacht. In het kader van ROBAMCI ('Risk and Opportunity based Asset Management for Critical Infrastructures') is een tool ontwikkeld waarmee de lange termijn kosten en baten van dergelijke monitoringsacties kunnen worden geschat. Dit wordt gedaan middels een Bayesiaanse analyse waarbij een methode is ontwikkeld om het hoge informatiegehalte van gemonitorde extreme omstandigheden goed mee te nemen. Deze is geijkt op de ervaringen van LiveDijk XL. Hierin is meegenomen dat waterstanden dicht bij maatgevende omstandigheden veel meer informatie opleveren dan waterstanden bij dagelijkse omstandigheden. De tool geeft vervolgens een beeld van de totale lange termijn kosten voor verschillende strategieën: versterken zonder monitoren, versterken met projectmonitoring (tijdens de voorbereiding van de versterking) en lifecycle monitoring (halverwege de levenscyclus). Dit laatste heeft het voordeel dat er meer tijd beschikbaar is, dit resulteert erin dat een beheerder de tijd kan nemen om te monitoren en zo niet het risico loopt een versterking uit te moeten stellen, wat bij projectmonitoring wel het geval is. Bijkomend voordeel is dat hij tijdig op de hoogte is van aankomende ingrepen en zo beter kan anticiperen.

Aanvullend is een analyse gedaan naar de kosten en baten van het DMC-systeem ('Dike Monitoring and Conditioning') bij LiveDijk Veessen. Hier is in plaats van een pipingberm een DMC-systeem geïnstalleerd. Aan de hand van deze case is de bredere toepasbaarheid van de gemaakte tool getest. Hieruit blijkt de tool een geschikte opzet te hebben om als hulpmiddel te dienen voor bredere lifecycle analyses waarbij inspectie, verschillende typen versterkingen en monitoring integraal kunnen worden bekeken.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

In 2015 is het ROBAMCI-programma van start gegaan, een samenwerking tussen markt, kennisinstellingen en overheid om Risk Based and Opportunity Based Asset Management for Critical Infrastructures handen en voeten te geven (ROBAMCI, 2015). Concreet betekent dit dat aan de hand van praktische cases, methoden en kennis worden ontwikkeld, en dat het nut van kwantitatief onderbouwd asset management voor het beheer van publieke infrastructuur duidelijk wordt gemaakt. Dit nut uit zich met name in efficiënter, maar ook transparanter beheer waarbij door een asset management aanpak nieuwe kansen voor efficiencywinst en prestatieverbetering worden benut.

Een van de case studies binnen het programma is de casus waterkeren. Bij de casus waterkeren worden twee dijken beschouwd vanuit een asset management gedachte: een zeedijk waar peilbuismetingen worden uitgevoerd en een rivierdijk uitgerust met een DMC systeem. Dit zijn typische voorbeelden van 'opportunities', die in deze studie vanuit een levenscyclusperspectief worden bekeken.

De populariteit van monitoring van waterkeringen is in de laatste jaren sterk toegenomen. Door de ontwikkeling van steeds betere monitoringstechnieken is het mogelijk om een goed beeld te krijgen van wat er in een waterkering gebeurt. De toepassing hiervan is, ondanks een aantal zeer positieve pilotresultaten vooralsnog relatief beperkt. Anderzijds neemt ook de behoefte naar een levenscyclusbenadering en een verdere integratie van fasen in de levenscyclus (toetsen, versterken, beheer) toe. Dit wordt versterkt door de introductie van bijvoorbeeld de zorgplicht, waardoor dit ook steeds meer van beheerders wordt gevraagd. Binnen deze studie is een tool ontwikkeld waarmee deze baten kwantitatief kunnen worden onderbouwd. Dit is mogelijk door de ervaringen uit het LiveDijk XL project bij de Ommelanderveedijk in Groningen. Hier is, na een negatief toetsoordeel in 2011, onder andere met peilbuismetingen geconstateerd dat de waterspanningsschematisering te conservatief was. Door deze bevinding kan de benodigde investering sterk beperkt worden. De precieze baten, en wanneer wel of niet dergelijke metingen uit te voeren zijn echter vooralsnog gebaseerd op, in dit geval correct, expert judgment. Uit het project volgde de algemene wens om een kader te ontwikkelen waarin de kosten en baten van monitoring kunnen worden afgewogen. Gezien de tijdsdimensie die bij peilbuismetingen een grote rol speelt is een levenscyclusbenadering hiervoor uitermate geschikt. Een belangrijk onderdeel hierin is het ontwikkelen van een tool welke kwantitatief inzicht geeft in kosten en baten van de investeringsstrategieën in de tijd. Met behulp van deze tool kunnen beheerders in de toekomst een globale indicatie krijgen van de kosten en baten van een monitoringsproject. Door de ervaringen uit LiveDijk XL is er een praktische referentie hoe het inwinnen van informatie

gedurende een dergelijk project verloopt. Met de tool kan deze referentie kwantitatief onderbouwd worden. Het LiveDijk XL project is nader beschreven in FC IJkdijk (2016).

De hoofdvraag bij deze case is: wat zijn de kosten, baten en risico's van verschillende investeringsstrategieën vanuit een asset management perspectief? Te beschouwen investeringsstrategieën zijn bijvoorbeeld a) alleen versterken, b) een combinatie van monitoring en versterken en c) een alternatieve innovatieve, maar onderhoudsrijke, versterkingsmaatregel.

Vooraf op het gebied van de waarde van monitoring in een asset management perspectief zijn kennislacunes. Bijvoorbeeld onder welke omstandigheden monitoring het meest efficiënt is, wat de kosten en baten zijn in relatie tot de duur van monitoring, en wanneer monitoring het best ingezet kan worden. Voor de beantwoording van dergelijke vragen is de ROBAMCI waterkeren tool (verder gerefereerd aan als 'tool') ontwikkeld. De ROBAMCI memo (ROBAMCI, 2016) geeft inzicht in de voorlopige algemene bevindingen van de casus waterkeringen en schetst een breder perspectief waarbinnen de tool gebruikt kan worden. Dit rapport geeft een beschrijving van de ontwikkelde tool en enkele bevindingen voor de casussen.

1.2 Doel van het project

Het doel van de ROBAMCI waterkeringen tool versie 0.9 is om de ontwikkeling van kosten, baten en risico's in de tijd te kwantificeren voor verschillende investeringsstrategieën voor waterkeringen. Een specifiek doel hierbinnen is om de kosten, baten en risico's van monitoring te kwantificeren en hiermee inzicht te krijgen onder welke omstandigheden monitoring een goede investering kan zijn. Aanvullende hierop is het ook een doel om de tool geschikt te maken voor de afweging van alternatieve/innovatieve dijkversterkingsmethodes. Dit rapport beschrijft de opzet, werking en uitvoer van de tool, evenals de uitkomsten voor twee beschouwde dijken (de een met peilbuismetingen, de ander met DMC-systeem (Dijk Monitoring- en Conditionering)).

1.3 Afbakening

Er worden met de tool twee dijken beschouwd, een met peilbuizen en een met een DMC. Hoewel de gegevens zijn geïnspireerd door de Ommelanderveedijk en een dijk bij Veessen, zijn de invoerparameters sterk geschematiseerd en aangepast en kunnen de resultaten dus niet zondermeer lokaal worden gebruikt. De resultaten geven wel inzichten in de effecten van verschillende investeringen in types dijken: een veedijk met peilbuismetingen en een rivierdijk met een DMC systeem. De ambitie is om op de langere termijn de tool zodanig in te richten dat voor iedere waterkering de van toepassing zijnde invoerparameters kunnen worden ingevoerd, en de daar relevante faalmechanismen worden beschouwd.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk **Error! Reference source not found.** is kort de relatie tussen asset management en waterkeringen toegelicht. In hoofdstuk 3 wordt nader ingegaan op de opzet en inhoudelijke onderbouwing van de tool. Hoofdstuk 4 bespreekt de casus van monitoring bij een zeedijk en verschillende aspecten die daarbij een rol spelen, in hoofdstuk 2 wordt hetzelfde gedaan voor de afweging DMC-systeem versus bermversterking bij een IJsseldijk. In hoofdstukken 2 en 2 wordt afgesloten met een reflectie op de bevindingen en conclusies en aanbevelingen voor zowel de cases als de doorontwikkeling van de tool.

2. Asset management van waterkeringen

2.1 Asset management

Asset management is in de ISO55000-standaard gedefinieerd als: 'gecoördineerde activiteit van een organisatie om waarde te realiseren uit haar assets' (ISO, 2014). Dit is een tamelijk generieke definitie. Voor waterkeringen zou dit bijvoorbeeld geconcretiseerd kunnen worden naar: 'het gecoördineerd afstemmen van verschillende fasen in de levenscyclus van een waterkering (toetsing, beheer & onderhoud, versterking) om zo op een doelmatige manier aan de functie-eisen van de waterkering te voldoen'. Binnen deze scope valt dus een integrale benadering van monitoring, inspecties, beheersmaatregelen en versterkingen. Binnen deze studie is een deel van deze onderdelen vanuit een levenscyclusbenadering beschouwd. Een uitgebreidere visie op het asset management van waterkeringen is te vinden in ROBAMCI (2016), hierin wordt ook de positie van de gemaakte tool nader toegelicht.

2.1. Definities

Binnen het werkveld van asset management zijn een groot aantal definities in omloop. Binnen dit rapport worden de definities gehanteerd als in onderstaande tabel:

Naam	Beschrijving
Asset management	Gecoördineerde activiteit van een organisatie om waarde te realiseren uit haar assets
Risk-based asset management	Als bovenstaand, maar dan gericht op het kwantificeren in termen van risico's
Lifecycle management	Het integraal beheren van een asset over de hele levenscyclus, van 'cradle-to-grave' ¹
Lifecycle Costing (LCC)	Methodiek voor het vergelijkbaar maken van kosten in verschillende jaren over een langere periode
Netto Contante Waarde (NCW)	Zie ook bovenstaand, som van alle kosten over een bepaalde periode, vergelijkbaar gemaakt door middel van een vast prijspeil
Asset Manager	Een van de 3 hoofrolhouders in Asset Management, naast de 'service provider' en 'asset owner' (The Institute of Asset Management, 2014). In deze casus de beheerder van de waterkering
Strategie	Aanpak voor het beheer van een waterkering. Omvat alle acties van een asset manager
Scenario	Mogelijke ontwikkeling van de omgeving, autonoom van de beslissingen van de asset manager
Ondergrondscenario	Mogelijke, maar onbekende opbouw van de ondergrond.

¹ Cradle-to-grave is een term die veelal wordt gebruikt in de lifecycle van producten. Een dijk zal echter nooit volledig verwijderd worden, maar gerenoveerd. In dat geval moet 'grave' worden opgevat als het einde van de levensduur van de dijk in zijn huidige staat. Vervolgens wordt hij versterkt/gerenoveerd, en begint de cyclus opnieuw.

3. ROBAMCI waterkeren tool versie 0.9

3.1. Doel van de tool

Het doel van de tool is het ondersteunen van de integratie van verschillende fasen in de levenscyclus, met daarbij in het bijzonder aandacht voor het meenemen van baten van monitoring. Hiermee kan een beheerder aan de hand van wat eenvoudige invoer een indruk krijgen van de potentiële baten van verschillende maatregelen. In eerste instantie wordt daarin gefocust op twee typen afwegingen met een aparte casus:

- Monitoring als onderdeel van de versterkingscyclus;
- Afweging tussen een onderhoudsarme en onderhoudsrijkere maar goedkopere maatregel.

Opgemerkt dient te worden dat monitoring naast de in de tool weergegeven baten nog veel meer baten kan hebben: denk aan toegenomen kennis voor de beheerder en inzicht in crisissituaties. Daarom is de tool een hulpmiddel, maar de resultaten dienen altijd in een bredere context te worden gezien.

3.1. Opzet van de tool

De algemene opzet van de tool staat in Figuur 3.1 weergegeven.

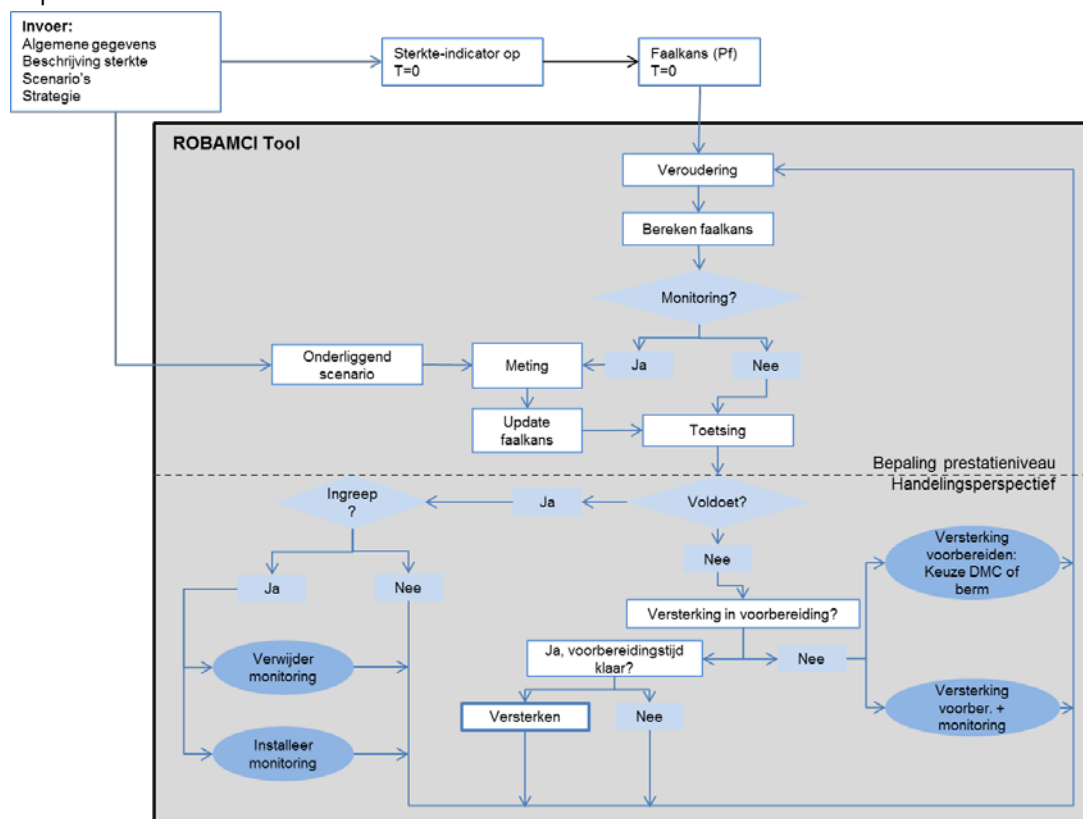
Er zijn twee versies van de tool gemaakt met daarin twee aparte afwegingen, in de eerste case monitoring in de versterkingscyclus en in de tweede case een versterking met een berm of een DMC. Beide gemaakte afwegingen passen in het schema. Grofweg zijn er 3 hoofdonderdelen van belang in de tool:

- Invoer: alles wat buiten het grijze vlak staat;
- Bepaling van het prestatieniveau: in de figuur het gedeelte boven de stippellijn;
- Handelingsperspectief: in de figuur het gedeelte onder de stippellijn.

Deze drie onderdelen worden in de komende paragrafen nader besproken.

Een van de basisprincipes van de tool is dat deze is gestoeld op een pre-posterior analyse. Een pre-posterior analyse is een handig hulpmiddel om de waarde van data te bepalen, voordat deze beschikbaar komt (Ben-Zvi et al., 1988). In feite is het een methode om strategieën met een onzekere uitkomst onderling te kunnen vergelijken. In een kosten-/baten afweging betekent dit concreet dat in een vergelijking van strategieën het inwinnen van data gesimuleerd kan worden en meegenomen kan worden in de afweging, dit terwijl de precieze consequentie van deze data onzeker en nog niet bekend is. Belangrijk onderdeel van de pre-posterior analyse is het definiëren van scenario's, in deze case studie gaat het daarbij om

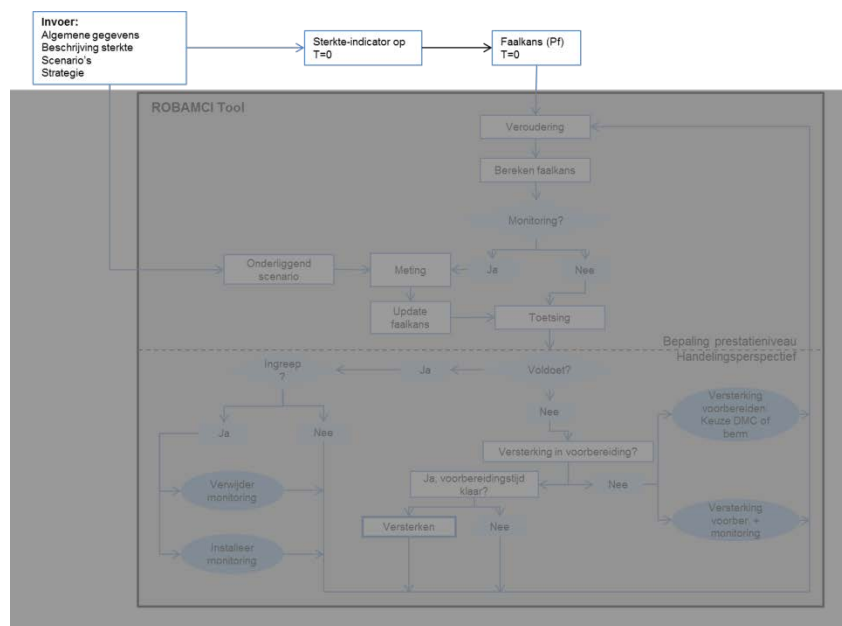
ondergrondscenario's. Deze zijn representatief voor een mogelijke uitkomst. Bij ieder scenario wordt een a priori kans geschat, ofwel de waarschijnlijkheid dat dit scenario het werkelijke scenario is. Op basis van deze a priori kansen worden mogelijke uitkomsten onderling gewogen. Voorbeelden van pre-posterior analyses voor meten en monitoring bij dijken zijn gegeven in Schweckendiek (2014). In Klerk *et al* (2015a) is in concept uitgewerkt hoe een pre-posterior analyse kan worden ingezet om de kosten en baten van monitoringsstrategieën te bepalen.



Figuur 3.1 Stroomschema ROBAMCI Waterkeringen tool 0.9

3.2. Invoer

De tool is voorzien van een invoerscherm waarin 4 hoofdcategorieën invoer dienen te worden ingegeven. In deze paragraaf zijn de invoerwaarden op een redelijk algemeen niveau beschreven (zie Figuur 3.2). In de invulling van de bestudeerde cases kan de benodigde invoer verschillen.



Figuur 3.2 Stroomschema tool, onderdeel 'Invoer'.

3.3.1. Algemene gegevens

Dit type informatie betreft algemene informatie voor de berekening. Het gaat hierbij om de volgende parameters:

- Beschrijving van de belasting
 - Beschrijving van de algemene eigenschappen van de kering
 - Lengte-effect factor: factor waarmee het effect van de lengte van de bestudeerde strekking op de faalkans in rekening wordt gebracht.
 - Lengte (afgekeurde) dijkstrekking: totale lengte van de beschouwde kering
 - Planperiode: levensduur waarvoor de kering ontworpen wordt bij versterking²
- Normfrequentie: De faalkans waaraan de kering moet voldoen (let op: deze kan anders zijn dan de kans horend bij toetspeil!)
- Beschrijving van economische parameters:
 - Gevolgschade overstroming: Consequenties van falen van de bestudeerde dijkstrekking.
 - Discontopercentage: rentepercentage wat gebruikt wordt voor het afwaarderen van toekomstige baten en kosten
 - Gemiddelde economische groei: verwachte gemiddelde economische groei voor de beschouwde periode.

² Let op: in deze studie is een vaste planperiode aangenomen. Het hanteren van een andere planperiode kan echter ook onder strategieën vallen, dan is dit geen algemene parameter maar een parameter horend bij de beschrijving van de strategieën.

3.3.2. Beschrijving van de sterkte van de waterkering

De beschrijving van de sterkte van de waterkering behelst twee delen. Allereerst een beschrijving van de relatie tussen belasting en sterkte en anderzijds de verandering van sterkte en belasting in de tijd. Dat eerste is opgesplitst in 2 relaties: De eerste is de relatie tussen belasting (waterstand) op de kering en hoe deze belasting doorwerkt in het faalmechanisme (bijv. ligging van de freatische lijn). De tweede is hoe de belasting op het faalmechanisme relateert met een sterkte-indicator, bijvoorbeeld een stabiliteitsfactor of een faalkans. Uit deze relaties kan een initiële sterkte worden uitgerekend.

Een tweede belangrijk aspect is het verloop van de sterkte (en belasting) in de tijd. Door afnemende sterkte, door bijvoorbeeld zettingen, of toenemende belastingen neemt de sterkte-indicator in de loop der tijd af, bij gelijkblijvende omstandigheden. Deze functievermindering is essentieel voor het goed bepalen van een lifecycle management strategie.

3.3.3. Ondergrondscenario's

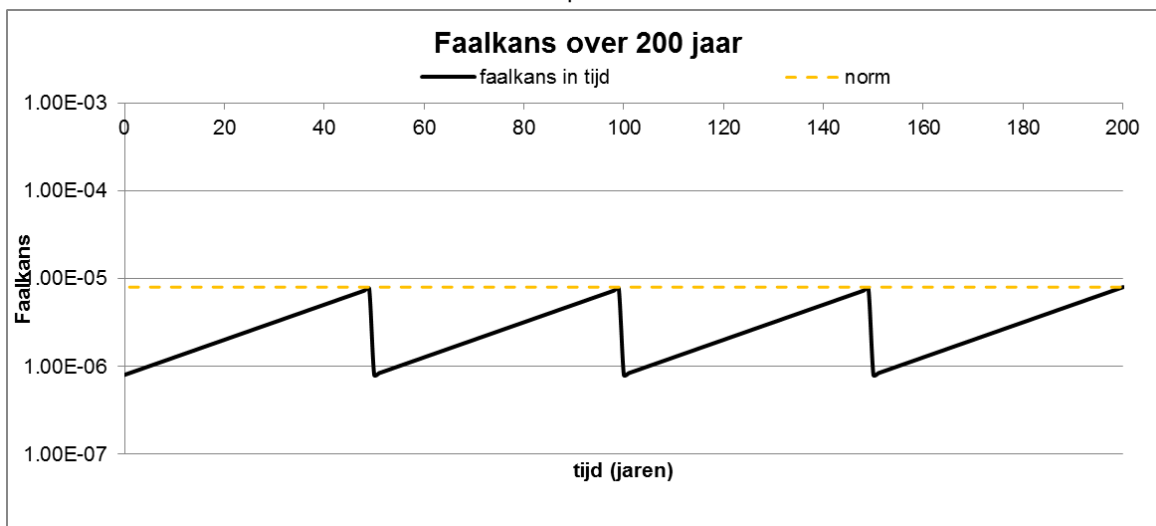
Faalkansen van waterkeringen zijn, in het bijzonder wanneer geotechnische faalmechanismen dominant zijn, sterk afhankelijk van ondergrondscenario's voor opbouw van dijklichaam en ondergrond. Deze dienen te worden ingegeven in de tool, tot op heden is ervoor gekozen om hier maximaal 3 ondergrondscenario's in te voeren. Wanneer vervolgens een kosten-baten analyse voor monitoringstrategieën wordt uitgevoerd kan aan de hand van deze scenario's worden bepaald wat de baten zijn gegeven een aantal initiële ondergrondscenario's met opgegeven scenariokans. Hierover meer in paragraaf 3.3.1.

3.3.4. Strategie

Een strategie is in de tool een bepaalde manier van handelen waarmee over een langere periode kan worden omgegaan met de kering. Een voorbeeld van een strategie is: "Bij overschrijding van de norm wordt versterkt met een planperiode van 50 jaar". Belangrijk is om te definiëren welk soort ingrepen onder de noemer van een strategie vallen. Er zijn daarin 3 hoofdcategorieën:

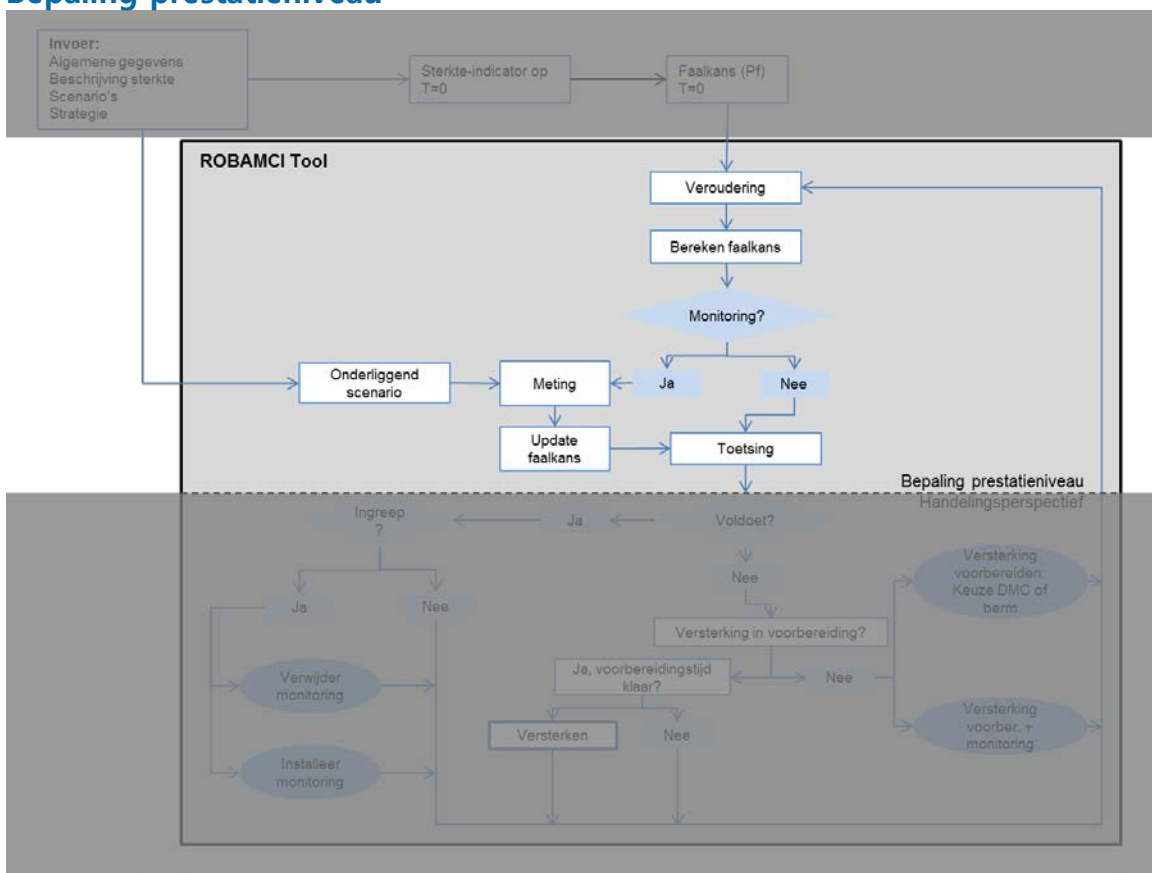
- Versterking: een stapsgewijze verbetering van de sterkte in de tijd. Een versterking heeft een aantal parameters waarmee gevarieerd kan worden:
 - Stapgrootte van de versterking (afhankelijk van inschatting veroudering en planperiode).
 - Type van versterking (onderhoudsrijk, onderhoudsarm)
- Monitoring/verkleining van onzekerheid: een ingreep waarmee de onzekerheid over de actuele sterkte van de dijk wordt verkleind.
- Onderhoudsmaatregelen: maatregelen waarmee de veroudering van de kering kan worden beïnvloed. Dit is bijvoorbeeld het vaker inwassen van een steenbekleding

waardoor de sterkte langer gegarandeerd kan worden. Onderhoudsmaatregelen blijven verder binnen deze studie buiten de scope.



Figuur 3.3 Voorbeeld figuur 'zaagtand' met versterkingsingrepen in de tijd.

3.3. Bepaling prestatieniveau



Figuur 3.4 Stroomschema tool, onderdeel 'Bepaling prestatieniveau'.

Het eerste deel van de ROBAMCI Tool draait om de bepaling van de prestatie in de tijd. Op basis van de veroudering, dus de toename van de belasting of afname van de sterkte in de tijd, wordt een nieuwe faalkans uitgerekend. Deze zal iets hoger liggen dan in het voorgaande jaar. Vervolgens kan deze faalkans vergeleken worden met de faalkanseis in de stap 'Toetsing'. Daartussen kan echter nog een belangrijke actie plaatsvinden, namelijk monitoring. Dat wordt in de volgende paragraaf nader toegelicht.

3.3.1. Monitoring in de ROBAMCI Tool

Een van de hoofddoelen bij de ontwikkeling van de ROBAMCI Tool was het kwantificeerbaar maken van de baten van monitoring. Allereerst is belangrijk om te beschrijven wat hierin onder monitoring verstaan wordt. Monitoring kan op vele verschillende manieren gedaan worden, bijvoorbeeld kruinhoogtemetingen of de inspectie van dijkbekleding. Een belangrijke monitoringsmethode is het meten van waterspanningen. Monitoring in de ROBAMCI Tool beslaat een meerjarig monitoringsprogramma van waterspanningen. In principe is dit ook op andere grootheden van toepassing, zolang de gegevensinwinning volgens hetzelfde patroon verloopt als bij waterspanningen.

Relatie tussen dagelijkse en maatgevende omstandigheid

Het doel van het meten van waterspanningen is om een betere inschatting te geven van de waterspanningen (en dus sterkte) in de kering bij maatgevende omstandigheden. Echter, doordat doorgaans slechts waterspanningen worden gemeten ver onder de maatgevende omstandigheden bestaat een grote extrapolatieonzekerheid.

Een handig kader om dit aan op te hangen is het principe van een Serviceability Limit State (SLS) en een Ultimate Limit State (ULS). Dagelijkse waterstanden vallen onder de SLS, terwijl de dijk is ontworpen om in zeer extreme omstandigheden water te keren (ULS). Een meting van de kering in de SLS is echter niet direct vertaalbaar naar de ULS. Daarom is het zo dat hoe extremer de gemeten omstandigheden, hoe dichterbij de ULS, en hoe groter de waarde van de meting voor een voorspelling van het gedrag in de ULS. Omdat hoge waterstanden minder vaak voorkomen is de duur van de monitoringsactie daarom ook van groot belang voor de opbrengst van de monitoringsactie, bij langer monitoring is de kans op een hoge waterstand immers groter. Overigens dient opgemerkt te worden dat bij een dijk er geen duidelijke scheiding tussen SLS en ULS is.

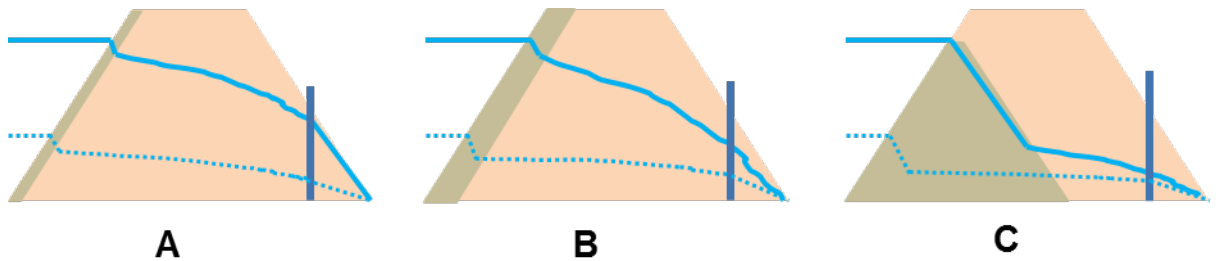
Algemene opzet meenemen metingen

Het uitgangspunt van de meting in de tool is 3 mogelijke ondergrondscenario's (θ) die elk leiden tot een andere ligging van de freatische lijn onder maatgevende omstandigheden. Dit is overeenkomstig de WTI2017 schematisering op basis van de Stochastisch Ondergrond Scenario's (SOS). In de tool wordt de initiële schatting van de kansen van de scenario's (a

priori kansen) aangepast op basis van de metingen (a posteriori kansen). Dit wordt gedaan volgens het volgende principe:

- 1 Bij een gemeten (buiten)waterstand hoort een *gemeten* niveau van het freatisch vlak met een zekere meetonzekerheid.
- 2 Bij een gemeten waterstand hoort per scenario een *voorspelling* van het van niveau van het freatisch vlak.
- 3 Hoe dichter het gemeten freatisch vlak ligt bij het voorspelde niveau van een bepaald scenario, hoe waarschijnlijker het is dat dit scenario de werkelijkheid goed beschrijft.
- 4 Echter, bij lage waterstanden is er weinig verschil tussen de scenario's in voorspelde ligging van het freatisch vlak. Hier overheerst de meetonzekerheid en levert de meting weinig extra informatie op. Pas bij hogere waterstanden levert de meting veel extra informatie op en wordt het werkelijk aanwezige scenario met grotere waarschijnlijkheid vastgesteld.

Deze aanpak wordt hieronder verder uitgewerkt, in Figuur 3.5 is dit schematisch weergegeven. Deze figuur laat drie mogelijke ondergrondscenarios zien met bijbehorende freatische lijn in maatgevende omstandigheden (doorgetrokken streep). In scenario A is er uitgegaan van weinig indringingsweerstand en een doorlatend dijklichaam wat leidt tot een hoge (conservatieve) freatische lijn. In scenario B is er uitgegaan van meer indringingsweerstand en een lagere doorlatendheid van het dijklichaam, dit levert een wat lagere freatische lijn. In scenario C is er een grote indringingsweerstand en lage doorlatendheid van het dijklichaam (bijvoorbeeld door een nog aanwezige oude dijk). Dit levert een nog veel lagere freatische lijn en er is weinig verschil meer in het meetpunt tussen dagelijkse en maatgevende omstandigheden. De doorgetrokken lijn is een schematische weergave van de ligging van de freatische lijn, horend bij het scenario, bij maatgevende omstandigheden. De gestippelde lijn is de ligging van de freatische lijn, horend bij de scenario's, onder dagelijkse omstandigheden. Te zien is dat de scenario's bij dagelijkse omstandigheden niet onderscheidend zijn in het meetpunt, voor een zinvolle meting is dus een hogere waterstand nodig, omdat pas dan onderscheid te zien zal zijn tussen de scenario's.



Figuur 3.5 Voorbeeldsituatie met 3 mogelijke ondergrondscenario's elk resulterend in een andere ligging van de freatische lijn bij toetspeil (doorgetrokken lijn), en dagelijkse omstandigheden (gestippelde lijn). Met de waterspanningsmeter (donkerblauw) kan aan de hand van een meting bepaald worden welk scenario het meest waarschijnlijk is. Hoe dichter de buitenwaterstand bij toetspeil ligt, hoe onderscheidender de scenario's zullen worden.

In de volgende paragrafen wordt de technische implementatie van metingen in de tool nader toegelicht.

Bayesian updating

Het verwerken van metingen in kansverdelingen kan door middel van "Bayesian updating." Wanneer uitgegaan wordt van een a priori verdeling $P(\theta)$ van de scenariokansen op $t=0$, geldt dat bij het verzamelen van observaties x_n op tijdstip $t = n$, voor de a posteriori verdeling $P(\theta | x_n)$ geldt dat:

$$P(\theta | x_n) = P(\theta) f(x_n | \theta) \quad (3.1)$$

Waarin $f(x_n | \theta)$ de likelihoodfunctie is, zie vgl. (3.4). Hierbij geldt voor tijdstip $t = n+1$ dat $P(x_{n+1}) = P_n(\theta) f(x_{n+1} | \theta)$. Hier is dus de posteriori verdeling van tijdstip n gehanteerd als priori verdeling op tijdstip $n+1$. Op deze manier kan in de tijd monitoringsdata worden gebruikt om een betere schatting van de kansen op de verschillende scenario's voor de ligging van de freatische lijn te geven.

Relatie niveau freatisch vlak en buitenwaterstand

In het geval van de tool hebben we 3 scenario's A, B en C voor de ligging van de freatische lijn. Elk scenario heeft een kans waarbij geldt dat $P_A + P_B + P_C = 1$.

Vervolgens wordt in jaar 1 een maximale waterstand gemeten van h meter, wat resulteert in een meting van x_{fl} meter voor de freatische lijn. Gegeven de gemeten waterstand is er voor ieder scenario (A,B en C) een verwachte freatische lijn: dus $x_{fl,A}$, $x_{fl,B}$, $x_{fl,C}$. De relatie tussen freatische lijn en waterstand wordt beschreven door de volgende functie:

$$x_{scen,fl} = h_{fl,scen} + \delta h_{fl} + FR(h - h_{fl,scen}) \quad (3.2)$$

Met:

$x_{scen,fl}$ de ligging van de freatische lijn gegeven waterstand h [m NAP]

$h_{fl,scen}$ basisligging van de freatische lijn [m NAP]

δh_{fl} infiltratie regenbui [m]

FR responsfactor stormvloed [-]

$h_{fl,scen}$, δh_{fl} en FR zijn locatie-afhankelijk en worden in de tool constant verondersteld.

Update scenario kansen

De a posteriori scenariokansen van dit scenario wordt uitgerekend met de formule:

$$P_{scen}(x_{fl}) = P_{scen}(\theta) f_{scen}(x_{fl} | \theta) \quad (3.3)$$

waarbij geldt dat $f_{scen}(x_{fl} | \theta) = L(x_{scen,fl}, \sigma_L | x_{fl})$, ofwel de likelihood functie voor een normale verdeling met als gemiddelde de voorspelde ligging van de freatische lijn van het scenario, gegeven de gemeten waterstand. Als standaardafwijking geldt hierbij de waarde volgend uit de aangepaste formule voor de standaardafwijking van de likelihood functie (vgl. 3.5). Voor de Likelihood van een scenario geldt dan:

$$L_{scen}(x_{scen,fl}, \sigma_L | x_{fl}) = (2\pi\sigma_L)^{-\frac{1}{2}} * e^{-\frac{1}{2\sigma_L^2} * (x_{fl} - x_{scen,fl})^2} \quad (3.4)$$

De scenariokansen kunnen nu geüpdatet worden met vgl. 3.4. Vervolgens worden de kansen geschaald zodat geldt voor de scenariokansen van scenario's 1 tot n , dat: $\sum_{k=1}^n \Sigma P_k = 1$. Voor de standaardafwijking van de likelihood functie (σ_L) wordt de volgende formule gehanteerd:

$$\sigma_L = \sigma_{meas} + (h_{max} - h_{meas}) * f_{extr} \quad (3.5)$$

met:

σ_L Standaardafwijking van de likelihood functie

σ_{meas} Meetonzekerheid van een waterspanningsmeter (0.2 meter)

h_{max} Extreme maatgevende waterstand, bijvoorbeeld MHW [m NAP]

h_{meas} gemeten waterstand [m NAP]

f_{extr} Een extrapolatiefactor als maat voor de representabiliteit van een meting in de SLS voor de waarde in de ULS [-]



Deze formule is gebaseerd op ervaringen met de monitoring bij LiveDijkXL en is niet uniform toepasbaar. De relatie is in dit geval afgeleid zodat deze ongeveer op de expertschattingen gedurende het LiveDijk XL project past. Andere locaties zullen leiden tot een andere relatie. In dit geval zijn de scenario's voor de freatische lijn opgehangen aan het toetspeil op deze locatie, welke 6 m +NAP bedraagt, dit is de parameter h_{max} in de formule. Deze bepaalt de mate van extrapolatie die nodig is om tot een antwoord over maatgevende omstandigheden te komen. Er is meetonzekerheid (σ_{meas}) omdat het freatisch vlak niet alleen van de buitenwaterstand afhankelijk is, maar ook bijvoorbeeld van regenval. Deze meetonzekerheid is ongeveer 0.2 m (Rozing, 2015). Daarnaast is er extrapolatieonzekerheid, die afneemt naarmate een meting dicht bij de ULS van de kering komt, deze wordt gemodelleerd met de factor f_{extr} . Deze parameter is sterk locatie-afhankelijk. De likelihood in formule 3.5 geeft dus de waarschijnlijkheid van een scenario gegeven de meting en is afhankelijk van de waterstand tijdens de meting en van de meetonzekerheid.

Monte Carlo implementatie

Het updaten van scenariokansen is in de tool geïmplementeerd met Monte Carlo simulatie.

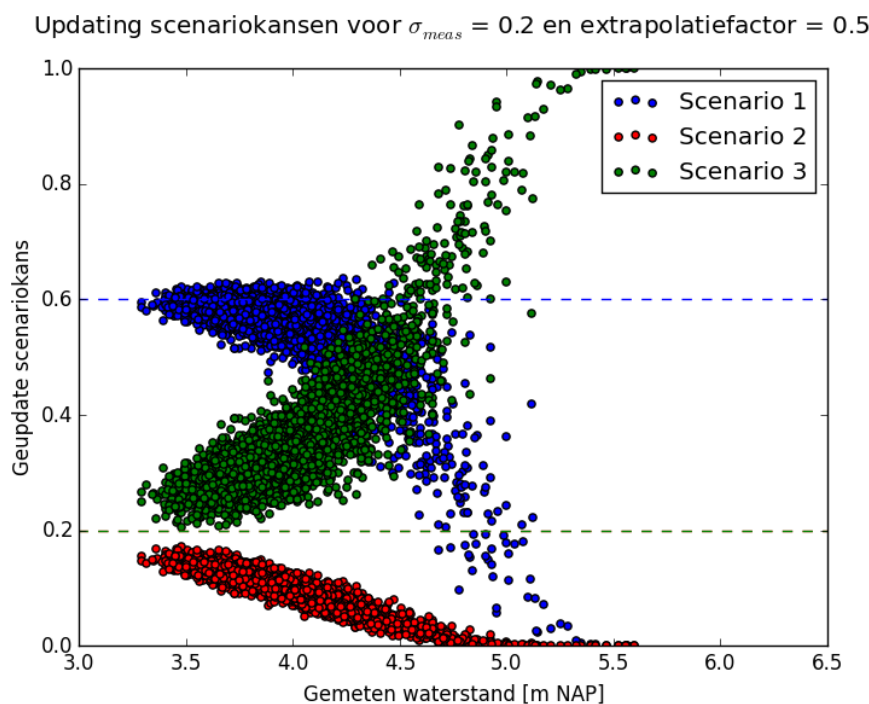
Dit wordt gedaan in de volgende stappen (gegeven dat het werkelijke scenario bekend is, als dit niet zo is, dan moet het werkelijke scenario ook nog gesampled worden):

1. Sample een waterstand.
2. Bepaal de meting van de freatische lijn bij deze waterstand met inbegrip van meetonzekerheid.
3. Bepaal de standaardafwijking van de likelihoodfunctie op basis van hoogte waterstand en meetonzekerheid (vergelijking 3.5).
4. Update de a posteriori scenario kansen met vergelijking 3.3.
5. Herhaal stappen 1 t/m 4 voor meerdere onafhankelijke waterstanden.

Het moet worden opgemerkt dat bovenstaande theorie alleen geldt voor metingen die als onafhankelijk kunnen worden beschouwd. Twee metingen van dezelfde waterstand binnen een seconde geven niet tot nauwelijks extra informatie (door de autocorrelatie van de meetpunten), terwijl twee nagenoeg gelijke metingen een jaar uit elkaar wel extra aanvullende informatie geven. Ook wordt er in bovenstaande beschouwing vanuit gegaan dat er één puntmeting van het freatisch vlak is, welke op basis van expert judgement aan een stabiliteitsfactor wordt gekoppeld. Als er daadwerkelijke stabiliteitssommen worden gemaakt, dient het hele vlak te worden bepaald op basis van de meting van de freatische lijn als geheel (dus eventueel ook meerdere punten).

Voorbeeld

Via deze methoden kunnen observaties van de freatische lijn, verkregen met waterspanningsmeters, vertaald worden naar hun invloed op de a posteriori scenariokans. Figuur 3.6 toont het effect hiervan op een casus met 3 ondergrondscenario's, waarbij telkens een freatische lijn wordt gemeten, volgend uit de waterstand op de x-as, in dit geval is aangenomen dat de werkelijkheid wordt beschreven door Scenario 3. Elke meting resulteert in een update van de ondergrondscenario's van de 3 scenario's. Dus elke meting resulteert in een nieuw blauw, groen en rood datapunt. De puntenwolk laat zien dat hoe hoger de gemeten waterstand, hoe meer informatie en hoe verder de scenariokansen convergeren naar het aanwezige ondergrondscenario. Bijvoorbeeld bij een meting van NAP + 5.2 meter is de kans op scenario 2 bijna 0, de kans op scenario 1 ongeveer 0.05 en de kans op scenario 3 0.95. Het effect van een meting bij NAP + 3.5m laat de kansen dicht bij de a priori kansen. Scenario 2 kan dus vrij snel worden uitgesloten omdat deze zeer verschilt van Scenario 3. Pas bij waterstanden rond 4.7 m NAP wordt scenario 3 daadwerkelijk onderscheidend van scenario 1. Het uitsluiten van scenario 2 gebeurt al bij lagere waterstanden. Let wel: het draait hier om enkelvoudige metingen. Wanneer vele jaren achtereenvolgende lagere waterstanden gemeten worden zal het onderscheid tussen de scenario's ook duidelijker worden omdat door de grootte van de meetreeks de onzekerheid over de metingen uitmiddelt. Dit is in de figuur niet meegenomen. Door de meetonzekerheid liggen de punten niet op een rechte lijn maar vormen deze een wolk.



Figuur 3.6 Effect van metingen van de freatische lijn op de scenariokansen van scenario's voor de ligging van de freatische lijn. De a priori kansen zijn gestippeld weergegeven, de a priori kans van scenario 2 is gelijk aan die van scenario 3. De extrapolatiefactor is f_{extr} .

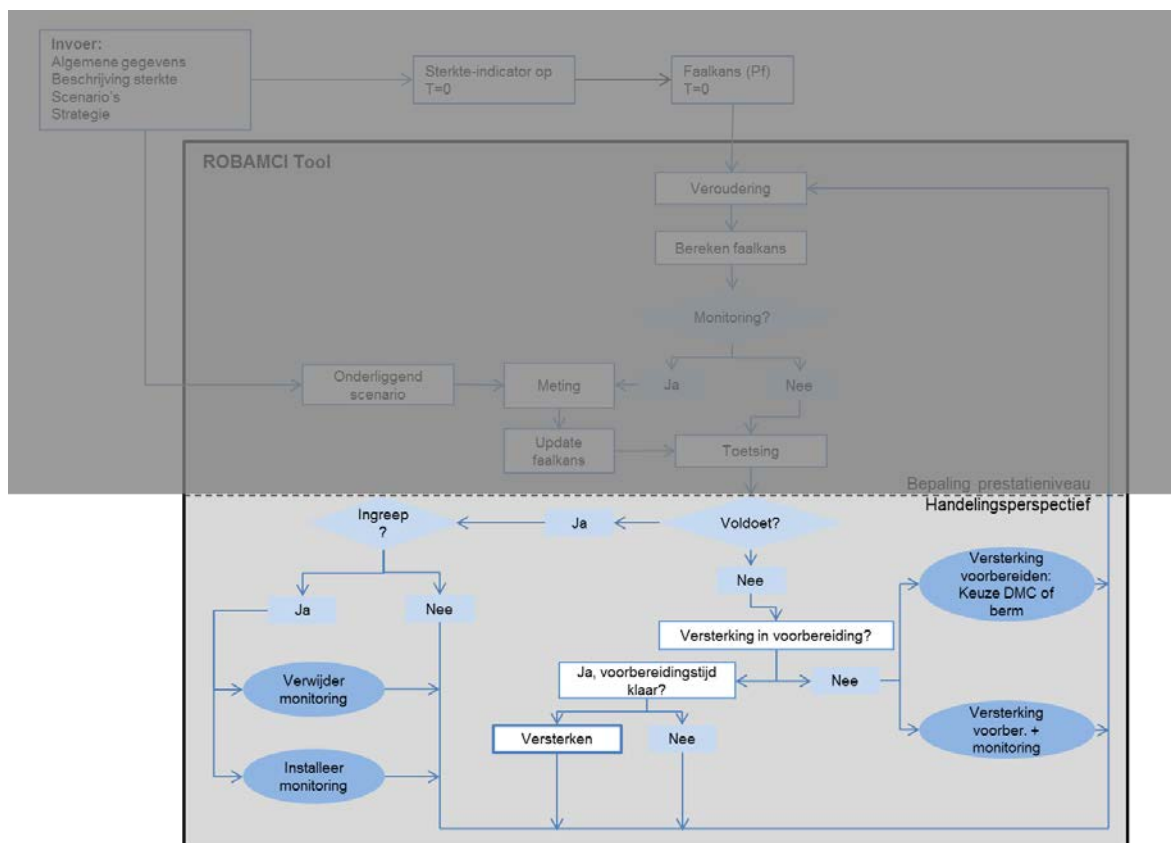
3.3.2. Toetsing

Een belangrijk onderdeel in de Tool is de toetsing. Deze wordt in de tool jaarlijks uitgevoerd en hierbij wordt beoordeeld of de faalkans van de kering de faalkanseis (middenkans-eis) overschrijdt. Indien dit het geval is wordt een maatregel getroffen.

3.4. Handelingsperspectief: uitvoering van maatregelen

Het derde deel van de ROBAMCI Tool bestaat uit de uitvoering van maatregelen om het prestatieniveau van de dijk op een acceptabel niveau te houden, Figuur 3.7 geeft dit weer.

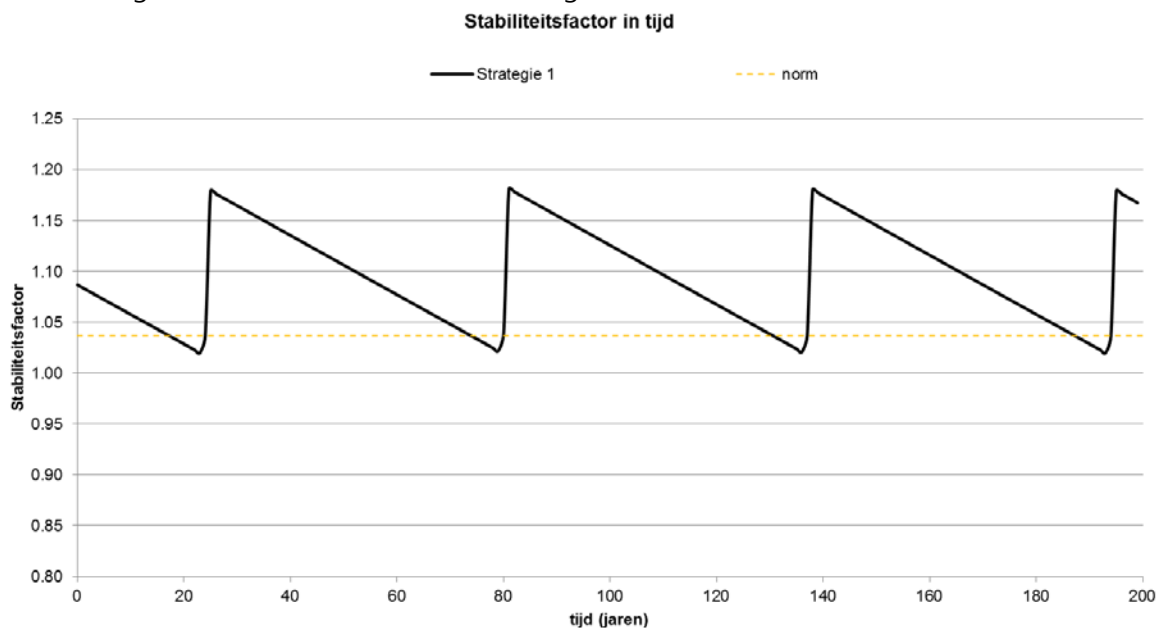
Het product van de vorige stap (Bepaling prestatieniveau) is een toetsing. Hieruit volgt ofwel het oordeel dat de dijk voldoet, ofwel het oordeel dat deze niet voldoet. Op beide toetsresultaten kan een actie volgen. Bij goedkeuren kan volgen dat monitoringsapparatuur wordt geplaatst of verwijderd, bij afkeuren kan worden versterkt met een DMC of een conventionele dijkversterking, of kan worden gestart met het voorbereiden van een versterking eventueel met monitoring tijdens de voorbereidingstijd. De precieze uitwerking van deze acties wordt in de volgende paragrafen aan de hand van de betreffende strategieën besproken.



Figuur 3.7 Stroomschema ROBAMCI tool, onderdeel 'Handelingsperspectief'.

3.4.1. Investeringsstrategie versterken

De investeringsstrategie versterken houdt in dat een dijk versterkt wordt als deze onder de norm uitkomt door veroudering. De dijk wordt in dit geval verhoogd zodat deze weer voor de hele planperiode meekan. De sterkte van een dijk kan worden uitgedrukt in bijvoorbeeld stabiliteitsfactor en faalkans. Deze zijn in principe uitwisselbaar. Onderstaande Figuur 3.8 geeft aan hoe de stabiliteitsfactor verandert in de tijd door veroudering en versterking. Overigens kan deze figuur ook voor de faalkans worden getekend.



Figuur 3.8 Ontwikkeling stabiliteitsfactor bij investeringsstrategie versterken

In deze strategie vindt 1 ingreep plaats, de versterking. Deze wordt standaard zo gedefinieerd dat, met de voorspelde veroudering, na 1 planperiode de dijk weer precies afgekeurd wordt. Vandaar de tamelijk regelmatige zaagtand.

Dijkversterkingskosten bestaan uit vaste en variabele kosten, waarbij de variabele kosten afhankelijk zijn van de grootte van de versterking. Wanneer een dijk afgetoetst wordt is er eerst een voorbereidingstijd en een bouwtijd nodig voor de versterking klaar is en de stabiliteitsfactor op het vereiste niveau. Gedurende deze tijd is het risico dus hoger dan gewenst.³

Hoe de sterkte is gemodelleerd wordt bij de specifieke cases nader besproken.

3.4.2. Investeringsstrategie projectmonitoring

Een van de doelen van de Tool is om de kosten en baten van monitoring inzichtelijk te maken. Bij het in de inleiding genoemde LiveDijk XL project Ommelanderveedijk werd na het aftoetsen

³ In de nieuwe normeringssystematiek is hiermee rekening gehouden door af te keuren op de middenkans. Deze is lager dan de maximaal toelaatbare faalkans waardoor het risico ook gedurende de voorbereidingstijd van de versterking nog acceptabel geacht wordt.

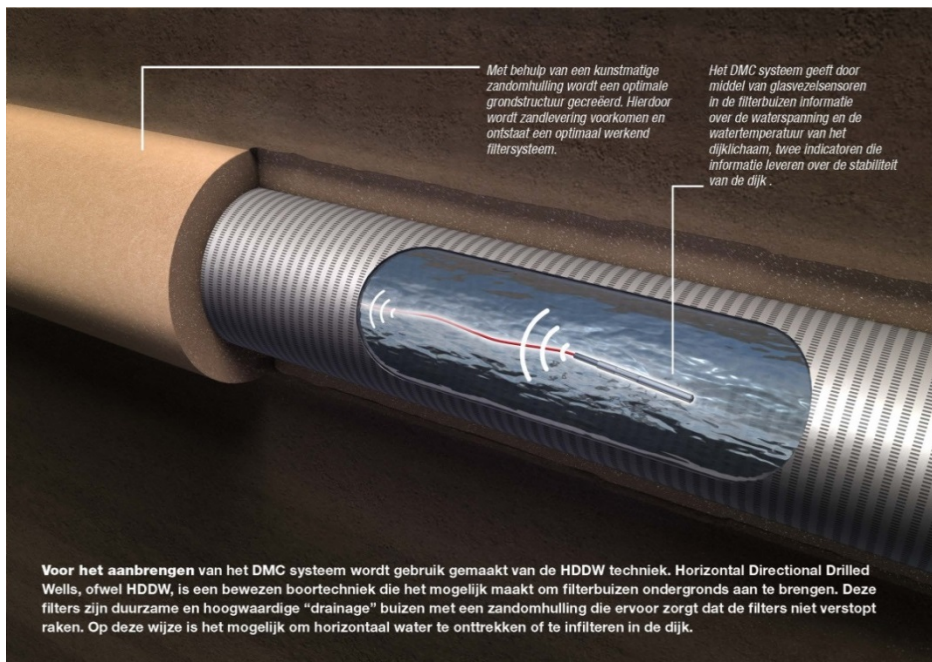
van de kering, en in feite gedurende de voorbereidingstijd op de versterking gemonitord. Hoewel dit in dit geval een verstandige keuze bleek te zijn, zit hier een bepaalde gedachtegang achter: vanuit risico-oogpunt werd in feite ingeschat dat de baten van monitoring opwogen tegen het extra risico wat eventueel zou volgen door een vertraging van de versterking. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de keuze voor monitoring niet direct tot vertraging leidde, maar de gunstige uitkomsten mogelijk wel. In het algemeen geldt echter wel dat er altijd een extra risico op uitstel van de versterking wordt genomen door te gaan monitoren, omdat aanvullende informatie de scope van een versterking flink kan veranderen. De investeringsstrategie projectmonitoring gaat uit van het standaard uitvoeren van monitoring in de jaren voor de versterking. In de tool wordt hierbij aangenomen dat er een extra 'monitoringsduur' wordt genomen voor een versterking, om gedurende die jaren te monitoren. Als monitoring worden waterspanningsmeters aangenomen, andere soorten van monitoring en bijvoorbeeld full-scale testen of extra grondonderzoek zijn niet meegenomen. De implementatie van de monitoringsdata in de faalkans van de kering wordt gedaan volgens de in paragraaf 3.3.1 beschreven routine.

3.4.3. Investeringsstrategie lifecycle monitoring

Een vergelijkbare strategie als de strategie van projectmonitoring is de lifecycle monitoring. Bij lifecycle monitoring wordt echter niet na afkeuren gemonitord maar ruim daarvoor, bijvoorbeeld standaard 20 jaar na de laatste versterking. Het voordeel ten opzichte van projectmonitoring is dat de versterking geen vertraging oploopt, en dat er meer tijd is om te monitoren wat de kans op het meten van een hoge waterstand, en daarmee de verwachte waarde van de informatie wordt vergroot.

3.4.4. Investeringsstrategie DMC

Voor de casus IJsseldijk worden beide monitoringsstrategieën niet meegenomen maar wordt het versterken door middel van een DMC-buis vergeleken met een conventionele bermversterking. Een DMC-buis, ofwel Dijk Conditionering en Monitoring systeem is een actief waterontspanningssysteem wat de freatische lijn in een dijk kunstmatig kan beïnvloeden. Het is ook als passief systeem te gebruiken en kan onder vrij verval afwateren. Figuur 3.9 toont de DMC-buis, een PVC-buis voorzien van glasvezelkabel en een kunstmatige zandomhulling. Deze wordt aangebracht middels een horizontale gestuurde boring.



Figuur 3.9 DMC-systeem (Bron: <http://studiolex.nl/portfolio/dijk-monitoring-en-conditionering-systeem/>)

In de IJsseldijk bij Veessen is een DMC-buis aangelegd als alternatief voor een pipingberm. Wanneer de rivierwaterstand stijgt wordt via de DMC-buis (passief) de freatische lijn laag gehouden. Om het systeem te testen is ook een pomp beschikbaar, deze is echter niet nodig om aan de norm te voldoen.

Bij systemen als de DMC-buis, zeker wanneer ze als actief systeem gebruikt worden wordt de faalkansbeschouwing anders dan bij een conventionele dijkversterking. Dit heeft te maken met dat er twee situaties kunnen ontstaan: een situatie waarin het systeem functioneert en een situatie waarin het niet functioneert. De faalkans wordt dan bijvoorbeeld:

$$P_{f, \text{totaal}} = P_{f, \text{DMC}} * P_{f, \text{mechanisme} | \text{DMC faalt}} + P_{f, \text{mechanisme} | \text{DMC functioneert}} \quad (3.6)$$

Oftewel de gecombineerde kans van:

- een situatie waarin de DMC-buis faalt en de dijk faalt
- een situatie waarin de DMC functioneert maar de dijk alsnog faalt.

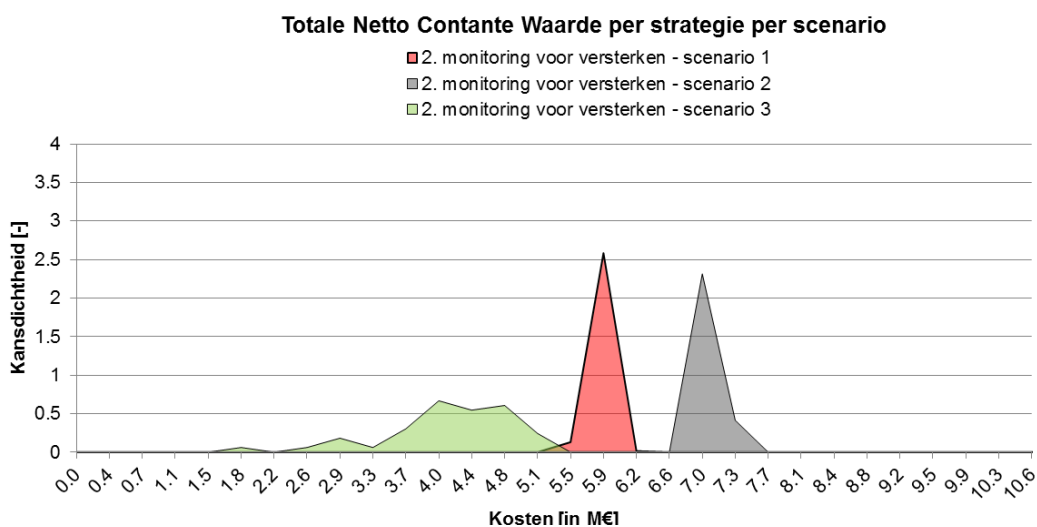
Een ander aspect van een actief systeem als het DMC, is dat het wat onderhoudsintensiever zal zijn dan een conventionele dijkversterking.

Daar staat tegenover dat de impact op de omgeving gering is, en dat, zeker wanneer het systeem in eerste instantie als passief systeem wordt geïnstalleerd, het later kan worden verbeterd door installatie van een pomp. Zo kan op een relatief goedkope manier, met weinig impact de dijk 'versterkt' worden.

3.4.5. Uitkomsten

De ROBAMCI tool geeft een aantal verschillende resultaten voor de prestaties, kosten en risico's van de strategieën. Uitkomsten zijn uitgesplitst in korte en lange termijn resultaten. Korte termijn slaat hierbij op de eerste 25 jaar, lange termijn op 200 jaar. Economische eenheden kunnen zowel direct als netto contant worden weergegeven. Voor lange termijn analyses heeft dat laatste altijd de voorkeur, maar voor korte termijn analyses kunnen directe kosten ook veel inzicht geven. Vaak sluiten directe kosten ook beter aan op het besliskader van een beheerder. De weergave van de prestatie van de kering is case-afhankelijk, waar mogelijk is uitgegaan van voor een beheerder herkenbare eenheden zoals de stabiliteitsfactor. Omdat bij monitoring een probabilistische analyse wordt gedaan van de meting is er een spreiding in de resultaten. Daarom zijn voor iedere strategie drie lijnen weergegeven voor de berekeningen die corresponderen met het respectievelijk 5-, 50- en 95-kwantiel van de totale Netto Contante Waarde. Let wel: hierdoor kunnen 2 berekeningen met dezelfde parameters resulteren in iets andere figuren (omdat 2 verschillende meetreeksen dezelfde Netto Contante Waarde kunnen hebben).

In de resultaten zijn ook figuren opgenomen die de directe kosten van de eerste versterking weergeven per scenario. Deze figuur geeft een indicatie van de spreiding van verwachte kosten per scenario. In Figuur 3.10 is bijvoorbeeld voor Strategie 2 de Netto Contante Waarde per scenario weergegeven. Dit geeft een beheerder inzicht in de verwachte kosten bij een bepaald ondergrondscenario wat hem ondersteunt bij de keuze tussen strategieën. Het voordeel van deze figuur is dat meer onderscheid zichtbaar is tussen de scenario's, waar dat bij andere figuren vaak meer geïntegreerd wordt.



Figuur 3.10 Voorbeeld figuur voor Netto Contante Waarde per strategie per scenario voor Case 1: monitoring bij een zeedijk

4. Case 1: monitoring bij een zeedijk

4.1. Beschrijving case

4.1.1. Inleiding

De eerste casus is afgeleid van de Ommelanderzeedijk in Groningen en draait om de economische effectiviteit van het monitoren van waterspanningen voor een dijk die gevoelig is voor macrostabiliteit. Er wordt uitgegaan van een drietal scenario's voor de mogelijke ligging van de freatische lijn in het dijklichaam. Binnen deze case wordt enkel macrostabiliteit beschouwd, aardbevingen zijn buiten beschouwing gelaten in bepaling van de faalkans. Daarnaast is geen rekening gehouden met eventuele effecten op de sterkte door installatie van een DMC-systeem in een deel van de Ommelanderzeedijk.

Bij het LiveDijk XL project is een belangrijk deel van de informatie afkomstig uit de meting van de Sinterklaasstorm, op 5 december 2013, waarbij de op een-na-hoogste waterstand ooit werd waargenomen. Een van de zaken waarin deze case inzicht geeft is de invloed van onzekerheid op de gerealiseerde waterstanden.

4.1.2. Faalmechanisme en sterktemodel

Voor deze casus is een vereenvoudigd sterktemodel gebruikt. Dit is gebaseerd op het stappenplan uit Figuur 4.1.



Figuur 4.1 Stappenplan om vanuit waterstanden, sterkte en faalkansen te komen tot een risicoberekening

Begonnen wordt met een waterstand, die afgeleid wordt uit een Gumbel verdeling, gebaseerd op een waterstand met overschrijdingskans en de decimeringshoogte. Hiervoor is als invoer gebruikt dat de waterstand met een overschrijdingskans van 1/4000 jaar, 6 meter NAP bedraagt. De decimeringshoogte is 60 centimeter.

De sterkte van de dijk bestaat uit twee onderdelen, te weten de eerste twee pijlen in bovenstaande figuur: de eerste is hierbij de doorwerking van de waterstand in de freatische lijn of, in algemener termen, de respons van de dijk op de belasting. De tweede geeft de relatie weer tussen freatische lijn (dus de daadwerkelijk op de dijk doorwerkende belasting) en de stabiliteitsfactor, de sterkte van de dijk. Voor de relatie tussen waterstand en freatische lijn geldt (zie ook formule 3.2):

$$x_{\text{scen,fl}} = h_{\text{fl,scen}} + \delta h_{\text{fl}} + \text{FR}(h - h_{\text{fl,scen}}) \quad (4.1)$$

Met:

$x_{\text{scen,fl}}$ de ligging van de freatische lijn gegeven waterstand h [m NAP]

$h_{\text{fl,scen}}$ basisligging van de freatische lijn [m NAP]

δh_{fl} infiltratie regenbui [m]

FR responsfactor stormvloed [-]

Voor de relatie tussen freatische lijn en stabiliteitsfactor geldt dan:

$$\text{SF}_{\text{kd}}(h) = C_1 * \ln(h) + C_2 \quad (4.2)$$

Waarin C_1 en C_2 constanten zijn die volgen uit de geometrie van de dijk. Het gaat hierbij om de karakteristieke stabiliteitsfactor (SF_{kd}).

De laatste relatie is de relatie tussen stabiliteitsfactor en faalkans, deze is nodig om een risicoberekening, en daarmee een complete kosten-/batenafweging te kunnen maken. Deze relatie is afgeleid uit de Leidraad Ontwerpen Rivierdijken, waar een algemene relatie is gegeven:

$$\beta = A_1 + \frac{\text{SF}_{\text{kd}} - 1}{A_2} \quad (4.3)$$

Waarbij β is de betrouwbaarheidsindex⁴, en A_1 en A_2 zijn constanten waarvoor in de LOR waarden van 4 en 0.13 zijn gegeven. Dit is echter een algemene relatie die per locatie zal verschillen. Idealiter wordt deze dus, middels een probabilistische berekening voor iedere locatie bepaald. Voor deze case wordt uitgegaan van de standaard waarden uit de LOR.

Voor deze case wordt telkens gerekend met een drietal scenario's. Dit betreffen ondergrondscenario's horend bij een bepaalde ligging van de freatische lijn. In

⁴ De betrouwbaarheidsindex β is een alternatief voor uitdrukken van de veiligheid in een betrouwbaarheidsanalyse. De faalkans is een functie van de betrouwbaarheidsindex.

Tabel 4.1 zijn deze weergegeven, met in kolom 2 de herkomst van de formule. In de derde kolom is telkens formule 4.1 weergegeven met ingevulde parameters. De een-na-laatste kolom geeft de freatische lijn bij toetspeil (6 m NAP), in de laatste kolom zijn de scenariokansen weergegeven. Overigens geldt voor ieder scenario dat de kering versterkt moet worden, omdat in geen geval de vereiste stabiliteitsfactor wordt gehaald.

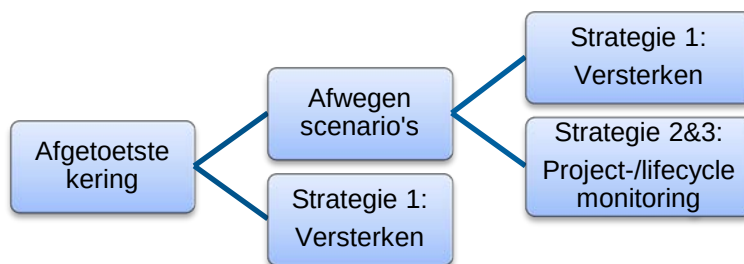
Tabel 4.1 De drie ondergrondscenario's voor de ligging van de freatische lijn, met oorsprong van het scenario en bijbehorende scenariokans.

Scenario	Oorsprong	Formule $x_{\text{scen,fl}} = h_{\text{fl,scen}} + \delta h_{\text{fl}} + FR(h - h_{\text{fl,scen}})$	FL bij toetspeil [m NAP]	Scenariokans pre-posterior
1	Verwachting LiveDijkXL	$x_{\text{scen,fl}} = 1 + 0.5 + 0.6 * (h - 1)$	4.5	0.6
2	Toetsing	$x_{\text{scen,fl}} = 1 + 0.5 + 0.8 * (h - 1)$	5.5	0.2
3	Resultaat LiveDijkXL	$x_{\text{scen,fl}} = 1 + 0.25 + 0.25 * (h - 1)$	2.5	0.2

Opgemerkt dient te worden dat de scenariokansen tot stand zijn gekomen op basis van het feit dat men het er algemeen redelijk over eens was dat de toetsing niet correct was. De kans dat het zo gunstig zou zijn als uiteindelijk bleek, was echter ook zeer klein. Daarom heeft het verwachte scenario 1 de grootste scenariokans. Opgemerkt dient te worden dat het definiëren van scenariokansen enigszins arbitrair is, er is immers geen duidelijke richtlijn of de kans op het verwachte scenario 0.5, 0.6 of 0.7 moet zijn. Overigens kan monitoring daarom ook een goede 'sanity check' zijn voor het aanscherpen van scenariokansen van verschillende ondergrondscenario's.

4.1.3. Beslismodel

Bij het vergelijken van strategieën is het van belang om scherp te definiëren welke beslissing wordt beschouwd. Figuur 4.2 geeft een beslismodel voor de strategieën uit case 1.



Figuur 4.2 Beslismodel voor de strategieën uit de eerste case. De scope van de case bepaalt de precieze vergelijking.

Het belang van de definitie wordt duidelijk uit de dubbele aanwezigheid van strategie 1 in de figuur. Er zijn immers 2 momenten waarop gekozen kan worden voor strategie 1: direct na de toetsing, of na het afwegen van scenariokansen. Dat eerste komt overeen met wat redelijk gangbaar is: na afkeuren wordt een dijk versterkt omdat de toetsing en het daarin gehanteerde maatgevende ondergrondscenario betrouwbaar worden geacht. Vanuit het model gezien komt dit overeen met het toekennen van een hoge scenariokans aan het ondergrondscenario van de toetsing. Het tweede geval is de beslissing die ondersteund wordt

met de asset management tool: eerst worden scenario's afgewogen, waarna wordt beslist welke strategie gehanteerd gaat worden. Dit is ook de afweging die in de volgende cases wordt gedaan. Een uitzondering hierop is case 1a, omdat het hier een hindcasting scenario betreft waarin de totale baten van het gaan meten worden gekwantificeerd, dus ook voor het überhaupt kiezen voor monitoring. In dat geval gaat het dus om de eerste afweging.

4.2. Case 1a: monitoring bij een afgekeurde zeedijk (hindcasting)

4.2.1. Doel van de case

De eerste case is een reconstructie van het proces rondom monitoring van de Ommelanderzeedijk. Er worden 2 strategieën vergeleken: bij de eerste wordt direct na afkeuren versterkt, bij de tweede wordt de voorbereidingstijd iets verlengd t.b.v. projectmonitoring. Omdat het hier 'hindcasting' betreft, waarin wordt teruggekeken naar de gedane ingreep wordt hierbij niet met een pre-posterior analyse gerekend maar met een vast 'werkelijk' scenario. Dit betekent dat metingen afkomstig zijn uit het werkelijke scenario van de Ommelanderzeedijk (in dit geval scenario 3). Overigens is hierin niet de werkelijk gemeten tijdreeks van de freatische lijn gebruikt, in dit geval worden de waterstandsrealisaties, als toegelicht in paragraaf 3.3.1, beschreven door een stochastisch proces. Bijlage A geeft de invoerparameters voor de beide strategieën. Er zijn tussen de invoerparameters van de afzonderlijke strategieën 2 belangrijke verschillen:

- Voor strategie 1 (versterken) is een voorbereidingstijd van 3 jaar en een bouwtijd van 3 jaar aangenomen en voor strategie 2 is een voorbereidingstijd van 1 jaar aangenomen omdat hier ook 3 jaar gemonitord wordt. Aangenomen wordt hiermee dat een deel van de voorbereidingstijd samenvalt met de monitoringstijd. De vertraging door monitoring bedraagt dus 1 jaar.
- Bij de afweging om te gaan monitoren bij de Ommelanderzeedijk ging het om de keuze ofwel een versterkingstraject in te gaan, ofwel te gaan kijken of monitoren nuttig zou kunnen zijn. Hierbij hoort dus, omdat het om hindcasting gaat, de afweging of de toetsing betrouwbaar is of niet. De strategieën betekenen daarin het volgende:
 - Strategie 1: de toetsing en gehanteerd maatgevend ondergrondscenario worden betrouwbaar genoeg geacht om een versterkingstraject in te gaan. Dit zou bijvoorbeeld geïnterpreteerd kunnen worden als een kans van 90% op het scenario horend bij de toetsing.
 - Strategie 2: het in de toetsing gehanteerde maatgevend ondergrondscenario wordt niet betrouwbaar genoeg geacht om een versterkingstraject in te gaan, de verwachting is dat het werkelijke scenario gunstiger is. Dit impliceert een lage kans

voor het scenario uit de toetsing en een hogere kans voor het scenario wat verwacht wordt (bijv 60%).

Deze twee afwegingen worden in deze case vergeleken. De gebruikte scenariokansen zijn weergegeven in Tabel 4.2. Merk op dat het hanteren van verschillende scenariokansen enkel in een hindcasting studie kan, omdat hier het werkelijke scenario bekend is.

Tabel 4.2 Gebruikte a-priori scenariokansen voor case 1a: hindcasting.

Scenario	A priori scenariokans	
	Strategie 1: versterken	Strategie 2: projectmonitoring
1: verwacht LiveDijkXL	0.05	0.6
2: toetsing	0.9	0.2
3: resultaat LiveDijkXL	0.05	0.2

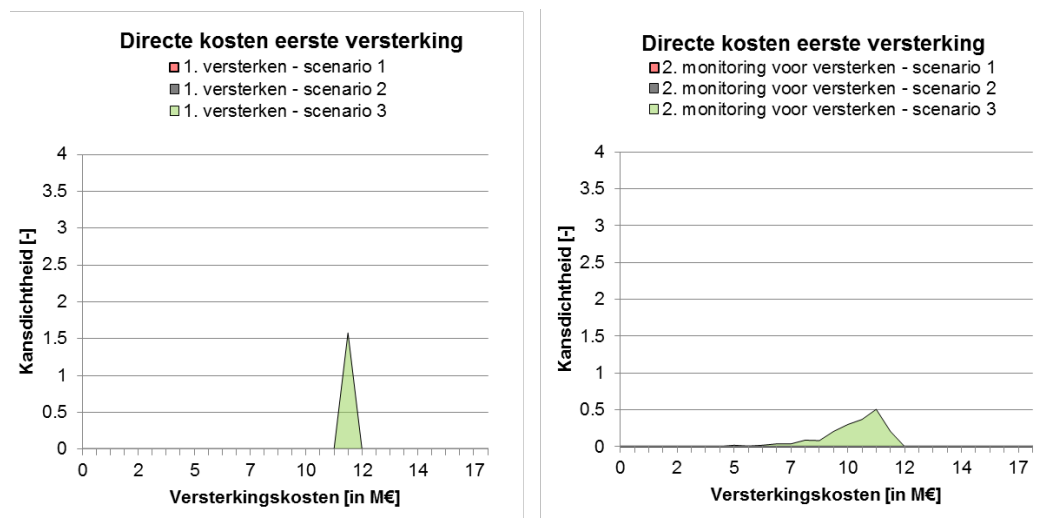
4.2.2. Vergelijking strategieën

Met behulp van de ROBAMCI Tool zijn beide strategieën vergeleken. Tabel 4.3 geeft de Netto Contante kosten, risico's en waarde voor beide strategieën voor zowel een 200 jarige als 25-jarige periode.

Tabel 4.3 Netto Contante Kosten, Risico's en Waarde voor beide strategieën voor periodes van 200 en 25 jaar.

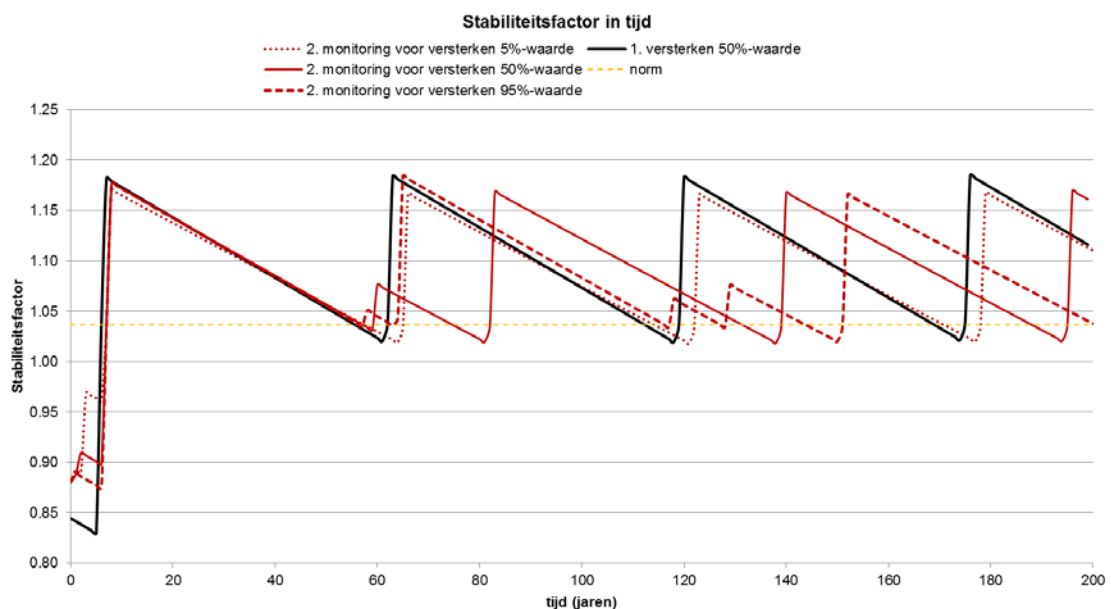
		Strategie 1		Strategie 2					
		200 jaar	25 jaar	200 jaar			25 jaar		
		50%	50%	5%	50%	95%	5%	50%	95%
Netto Contant	Kosten	11.8	10.7	8.4	10.5	11.4	6.9	9.2	10.1
	Risico	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	Waarde	11.9	10.8	8.5	10.6	11.5	7.0	9.3	10.2

Te zien is dat strategie 2 in alle gevallen goedkoper is, dit was ook in werkelijkheid het geval bij de Ommelanderzeedijk. In werkelijkheid bedroeg de besparing, niet uitgaande van gebruik van een DMC-buis en bij afwezigheid van aardbevingen, ongeveer 50% van de totale kosten. Figuur 4.3 geeft de directe kosten van de eerste versterking voor beide strategieën. Gezien de relatief grote hoeveelheid informatie uit de werkelijke meetreeks (door de Sinterklaasstorm) zal de realisatie horend bij de werkelijke situatie, in de linkerkant van de verdeling voor strategie 2 liggen. De kans dat in 3 jaar meten een dergelijke storm voorbij komt is immers zeer klein en zeer gunstig voor de kosten. De linkerstaart van deze verdeling komt grofweg overeen met een besparing van 50%.



Figuur 4.3 Directe kosten eerste versterking voor strategie 1: versterken en strategie 2: monitoring voor versterken

Figuur 4.4 geeft het verloop van de stabiliteitsfactor voor de volledige 200 jaar. Hierbij is te zien dat de eerste versterking niet kan worden uitgesteld, aangezien de dijk al behoorlijk zwaar is afgekeurd. De versterking wordt echter wel goedkoper, wat te zien is in Figuur 4.3.

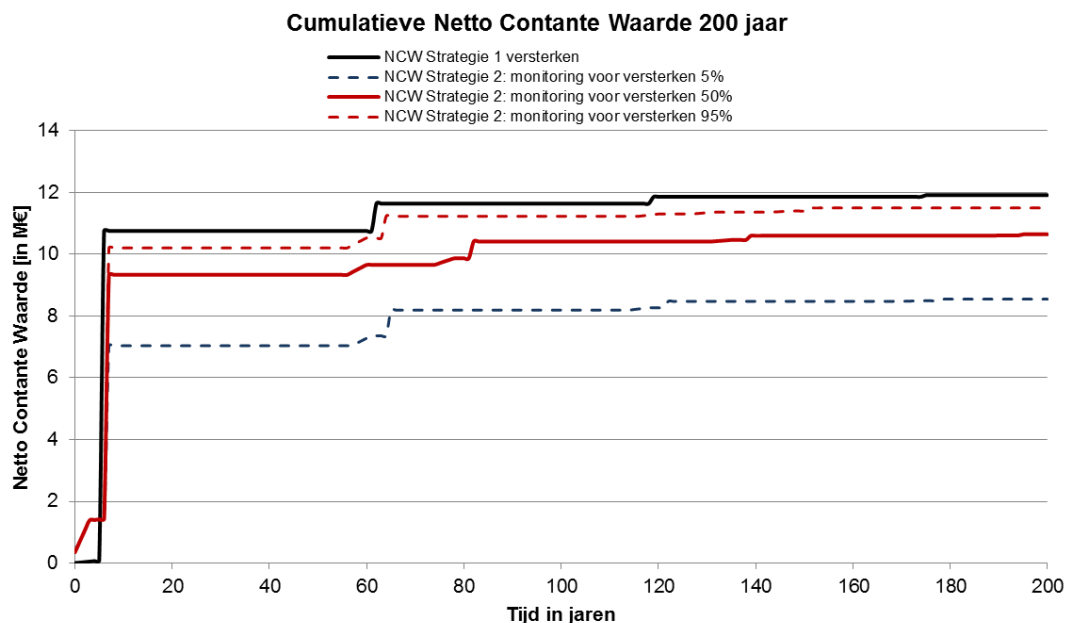


Figuur 4.4 Verloop van de stabiliteitsfactor in de tijd. Voor strategie 2 zijn 3 realisaties gegeven met verschillende monitoringsresultaten.

Bij volgende versterkingen wordt wel in sommige scenario's de versterking uitgesteld (te zien aan kleine sprongen in de zaagtand), dit betreffen echter scenario's waar na de monitoring voor de eerste versterking 'de lucht er nog niet uit was', oftewel: er was weinig bruikbare meetdata waardoor de faalkansschatting nog ver af lag van de 'werkelijke' faalkans. Wanneer

we kijken naar het verloop van de Netto Contante Waarde in de tijd geeft dat het beeld in Figuur 4.5. Hieruit blijkt ook dat de invloed van de monitoring vooral zichtbaar is in de kosten van de eerste versterking.

Wanneer in de projectmonitoring voor de eerste versterking relatief veel informatie wordt ingewonnen, zoals bij het 5% scenario, is de onzekerheid bij volgende versterkingen relatief klein, en daarmee de toegevoegde waarde van monitoring ook. Wanneer langer gemonitord zou worden voor de eerste versterking zouden de lijnen horend bij het 95% en 50% scenario in Figuur 4.5, dichter bij de ondergrens komen te liggen, omdat door de toename van de monitoringsduur de hoeveelheid bruikbare informatie toeneemt en daarmee ook voor die situaties de onzekerheid wordt verkleind. Met een aankomende versterking betekent langer monitoren echter ook dat de versterking mogelijk uitgesteld moet worden en dat een hoger risico moet worden geaccepteerd.



Figuur 4.5 Cumulatieve Netto Contante Waarde in de tijd.

Gezien de afgenomen versterkingskosten en de significant lagere Netto Contante Waarde over de gehele levensduur is duidelijk dat projectmonitoring in dit geval zeer zinvol is gebleken. In de volgende paragraaf wordt met behulp van een pre-posteriori analyse gekeken of dit op voorhand ook zo duidelijk gesteld kon worden.

4.3. Case 1b: monitoring bij een afgekeurde zeedijk (forecasting)

Wanneer voor dezelfde casus vooruit gekeken wordt en niet terug, is de kennis over het werkelijke ondergrondscenario nog niet beschikbaar. In zulke gevallen dient een zogenaamde pre-posterior analyse uitgevoerd te worden. Hierbij worden de kosten en risico's van meten bij 3 mogelijke ondergrondscenario's bepaald en hoe deze zich verhouden tot de optie versterken. Hierbij worden de scenario's, naar rato van hun scenariokansen onderling

gewogen. Voor iedere trekking wordt een onderliggend scenario getrokken, zo wordt de kennis over de scenario's zo objectief mogelijk meegenomen in de afweging. In

Tabel 4.1 zijn de scenario's met gebruikte scenariokansen weergegeven. Bij een forecasting vraagstuk gaat het in feite om de vraag of het verstandig is om te gaan monitoren. In de beantwoording van deze vraag gaat het om de balans tussen enerzijds de verminderde kosten door een goedkopere of uitgestelde versterking, en anderzijds de kosten van monitoren en het extra risico wat genomen wordt door het uitstellen van de versterking. Dit zal de afweging zijn die vaak wordt moet worden gemaakt bij een (zwaar) afgekeurde dijk.

Opgemerkt dient te worden dat wanneer een pre-posterior analyse wordt gedaan voor alle strategieën dezelfde initiële scenariokansen moeten worden gehanteerd, anders wordt überhaupt geen zuivere vergelijking gemaakt.

In deze casus worden voor de duur van voorbereiding, monitoring en versterking dezelfde aannames gedaan als in case 1a.

4.3.1. Vergelijking strategieën

Met behulp van de ROBAMCI Tool zijn beide strategieën vergeleken.

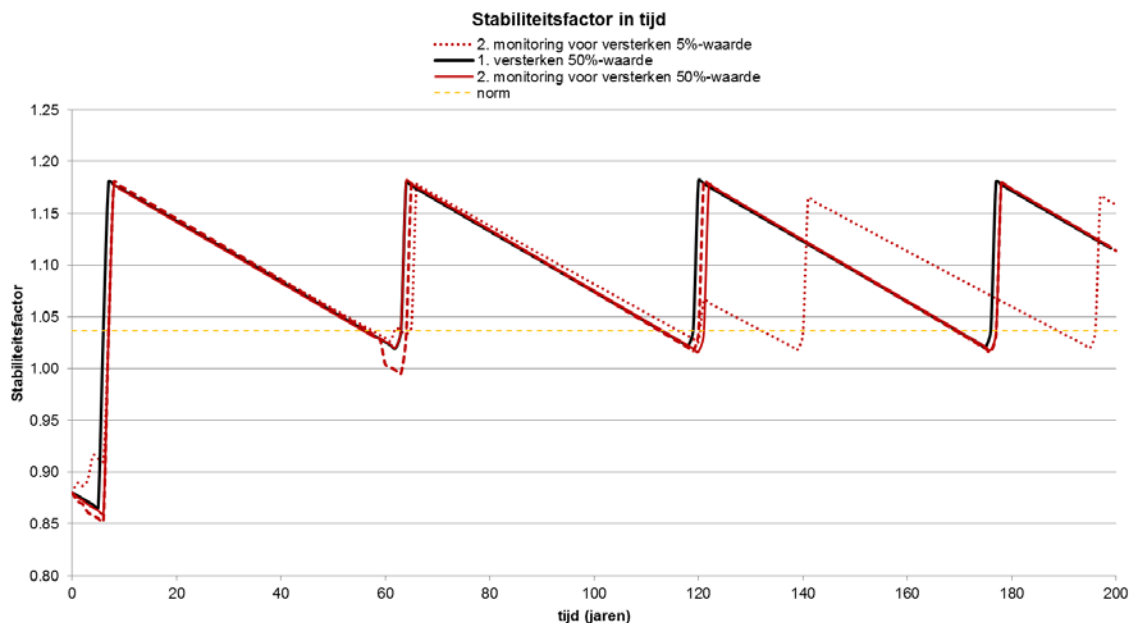
Tabel 4.4 geeft de Netto Contante kosten, risico's en waarde voor beide strategieën voor zowel een 200-jarige als 25-jarige periode.

Tabel 4.4 Netto Contante Kosten, Risico's en Waarde voor beide strategieën voor verschillende kwantielen van de totale Netto Contante Waarde.

		Strategie 1: versterken						Strategie 2: projectmonitoring					
		200 jaar			25 jaar			200 jaar			25 jaar		
		5%	50%	95%	5%	50%	95%	5%	50%	95%	5%	50%	95%
Netto Contant	Kosten	10.4	10.4	10.4	9.3	9.3	9.3	10.1	12.2	12.7	8.8	10.6	10.9
	Risico	0.1	7.0	23.6	0.1	6.9	23.4	0.1	8.4	28.0	0.1	8.3	27.9
	Waarde	10.5	17.4	34.0	9.4	16.2	32.7	10.2	20.6	40.7	8.9	18.9	38.8

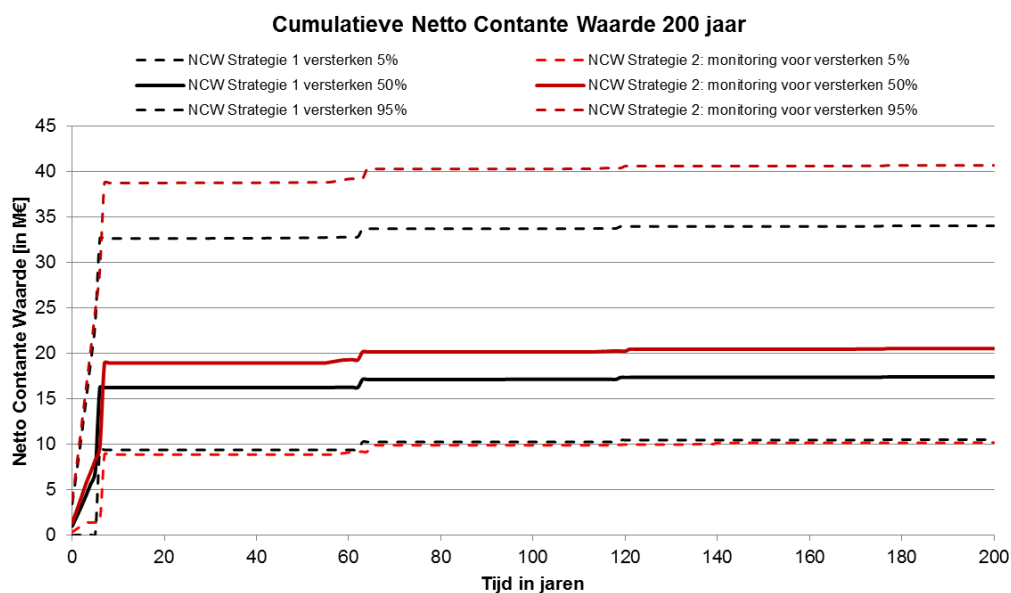
Te zien is dat enkel voor de 5%-waarde geldt dat Strategie 2 goedkoper is. Dit correspondeert met het 3^{de} scenario voor de freatische lijn, waarin de ligging veel gunstiger is dan gedacht. Voor de andere scenario's is er niet of nauwelijks winst, omdat informatie inwinnen over die scenario's een nauwelijks hoger veiligheidsniveau oplevert. Opgemerkt dient te worden dat in dit geval versterkt wordt op basis van de gemiddelde faalkans volgend uit de scenariokansen, ook voor strategie 1. In werkelijkheid is het de vraag of dit zo gebeurt, aangezien in principe de toetsing moet worden aangehouden. In dat geval zouden de kosten wel iets hoger uitvallen (orde 12 M€), maar dat is nog steeds lang niet in alle gevallen voldoende om het extra risico door uitstel te compenseren. Figuur 4.6 toont de stabiliteitsfactor in de tijd. Hieruit blijkt dat voor de 50%- en 95%-waarden er nauwelijks veiligheidswinst is. Daarom is voor dergelijke scenario's het nut van monitoren voor de versterkingskosten schijnbaar zeer beperkt, hoewel andere baten als kleinere onzekerheid en beter inzicht in het gedrag van de

dijk voor de beheerder (ook tijdens noodsituaties) natuurlijk niet in de figuur zijn opgenomen maar wel een rol spelen.



Figuur 4.6 Verloop van de stabiliteitsfactor in de tijd bij een pre-posterior analyse

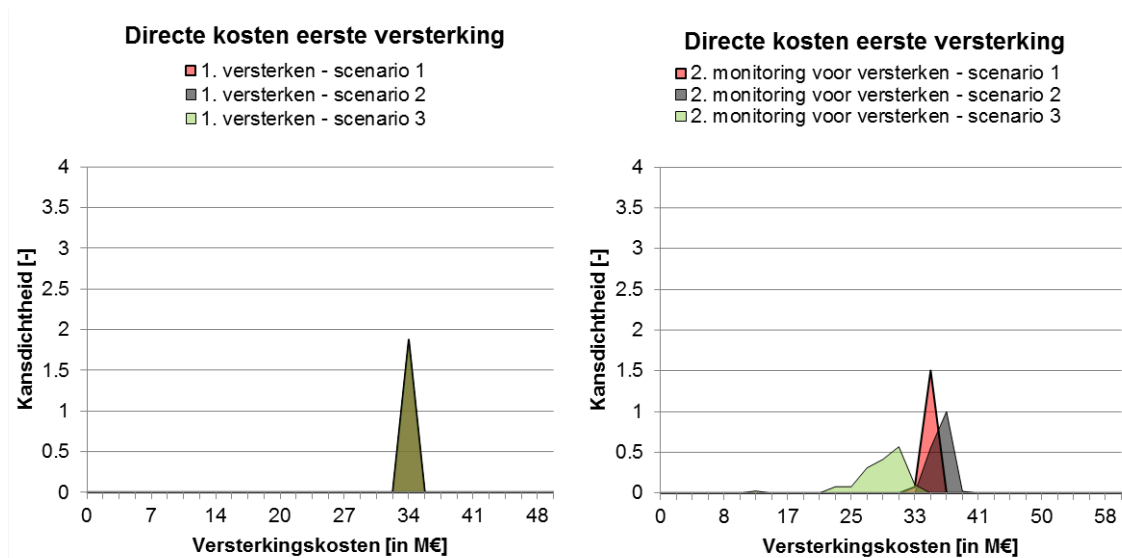
Figuur 4.7 toont de cumulatieve Netto Contante Waarde over 200 jaar. Ook hier is te zien dat er een kans bestaat dat monitoring leidt tot lagere totaalkosten, maar dat de kans groot is dat dit niet zo is. Op basis van deze analyse zou het dus niet logisch zijn om te gaan monitoren, met name ook door de hoge extra risicokosten. Wanneer de extra risicokosten gering worden wordt het echter wel interessant. Dit wordt meegenomen in de analyse van de volgende case.



Figuur 4.7 Cumulatieve Netto Contante Waarde voor 2 scenario's.

Figuur 4.8 geeft de directe versterkingskosten van de eerste versterking weer. Hieruit blijkt dat bij scenario 3 de eerste versterking, door monitoring, een stuk goedkoper wordt, maar dat dit in de andere gevallen niet het geval is. Uiteindelijk bepaalt de hoogte van het risico of monitoren de moeite waard is.

De afweging komt op het volgende neer: bij een situatie met een zeer hoog risico kan het het geval zijn dat het beter is om op basis van 3 scenario's met gelijke kansen te versterken dan een versterking uit te stellen, simpelweg omdat het risico tijdens dat uitstel ook zwaar meetelt in de economische afweging.



Figuur 4.8 Directe kosten eerste versterking voor strategie 1: versterken en strategie 2: monitoring voor versterken

4.4. Case 1c: lifecycle monitoring bij een zeedijk

4.4.1. Inleiding

Uit de voorgaande cases blijkt dat de monitoring bij de Ommelanderzeedijk duidelijk rendabel is geweest (1a) door het zeer gunstige ondergrondscenario en het optreden van een zeer hoge waterstand tijdens de monitoringsperiode. Dit zou van te voren echter niet per se uit de pre-posterior analyse zijn gevolgd (1b). Hierbij dient opgemerkt te worden dat er bij de start van de monitoring geconcludeerd werd dat bij de toetsing bepaalde informatie niet was meegenomen, en dat daarnaast uit een informatiescan bleek dat er een oude kleidijk in de dijk aanwezig was. Dit is kennis die zich lastig laat vertalen naar de scope van de tool, op dergelijke zaken wordt nader ingegaan in Hoofdstuk 2. De reden dat monitoring niet per se een voor de hand liggende oplossing is op basis van de tool, is dat de risicokosten in veel scenario's bij afgekeurde keringen relatief hoog zijn, en bij monitoring altijd de kans bestaat dat door nieuwe informatie de versterking vertraging oploopt. Door de druk van het project

wordt de monitoringsduur echter ook beperkt omdat de versterking niet te veel uitgesteld kan worden. Wanneer naar monitoring wordt gekeken vanuit een lifecycle perspectief is het niet voor de hand liggend om slechts kort voor een versterking te monitoren. Het is beter dit gedurende de levenscyclus te doen om een aantal redenen:

- De dijk is niet dermate veranderlijk dat informatie die, zeg, 20 jaar voor de versterking is ingewonnen minder waard is dan informatie die vlak voor de versterking is ingewonnen.
- Door monitoring niet afhankelijk te maken van afkeuren hoeft een versterking niet uitgesteld te worden, wat de risicokosten sterk verlaagd.
- Door niet afhankelijk te zijn van de duur van een versterkingsproject kan eenvoudig langer gemonitord worden, wat de kans op een hoge waterstand aanzienlijk vergroot. Daarnaast zullen de totale kosten niet veel hoger zijn omdat door de afwezigheid van tijdsdruk het project met een relatief eenvoudige opstelling kan worden gemonitord.

Deze 3 voordelen worden beter benut in een lifecycle monitoring strategie, waarbij niet voor de versterking maar halverwege de (geschatte) levenscyclus wordt gemonitord. In dit hoofdstuk wordt deze strategie vergeleken met de twee strategieën uit voorgaande cases middels een pre-posterior analyse van een dijk die ongeveer halverwege de levenscyclus is.

4.4.2. Opzet strategie lifecycle monitoring

Lifecycle monitoring draait om het gedurende levenscyclus monitoren. Dit wordt dan geen voorbereiding op de versterking maar een integraal onderdeel van de beheerscyclus. Dit houdt in dat met een relatief basale monitoringsopstelling wordt gemeten, en dat hooguit voor een korte periode duurdere en intensievere tests zullen worden toegepast. Daarom zijn de kosten per jaar een stuk lager, tegen 30 k€/km/jaar bij de Ommelanderzeedijk (inclusief speciale testen en alles eromheen), liggen de kosten van een monitoringsinstallatie tussen de 5 en 15 k€/km/jaar, afhankelijk van de dichtheid van het meetnet, en uitgaande van een totale lengte van ongeveer 10 km. In deze case wordt uitgegaan van 10 k€/km/jaar.

Voor lifecycle monitoring is het van belang om ruim genoeg voor de versterking te gaan meten, maar niet te ruim van te voren. Door het verdisconteren van de kosten tellen monitoringskosten ver voor de versterking immers zwaarder mee dan monitoringskosten vlak voor de versterking. Daarom wordt uitgegaan van monitoring ongeveer 30 jaar na de versterking, voor een tijdsperiode van 10 jaar.

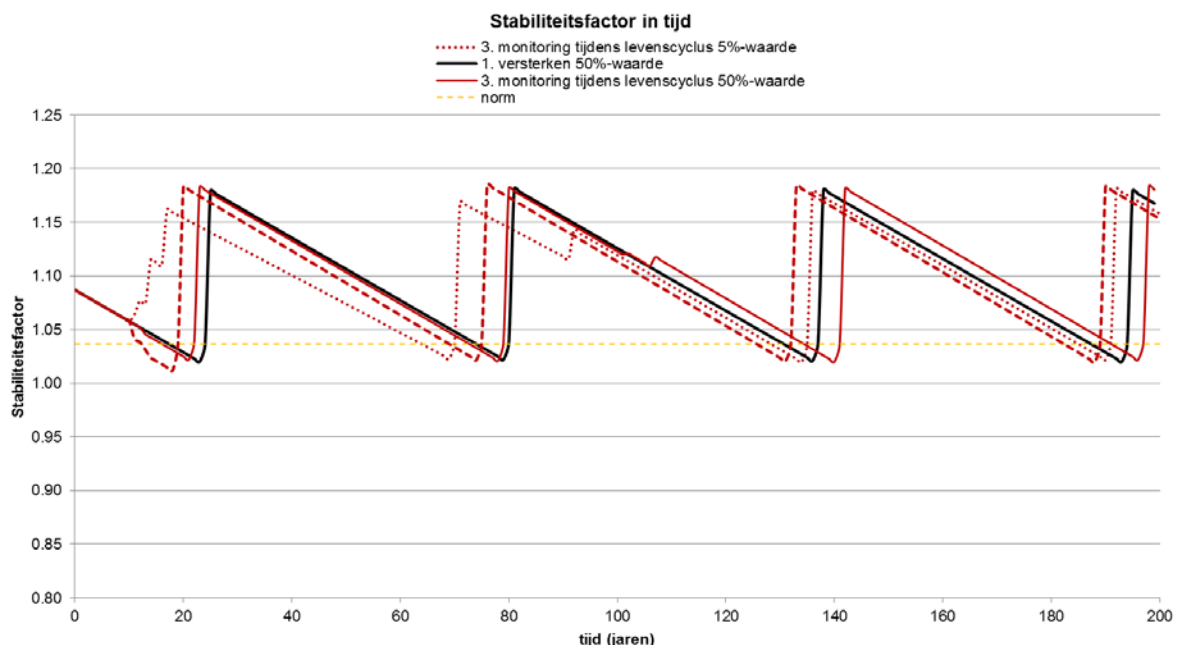
4.4.3. Vergelijking strategieën

Uitgangspunt is een dijk die ongeveer 25 jaar geleden is versterkt en nog 25 jaar restlevensduur heeft. Aangenomen wordt dat de scenariokansen van de 3 scenario's allen even groot zijn (0.33). Tabel 4.5 geeft wederom kosten, risico's en waarde.

Tabel 4.5 Netto contante kosten, risico's en waarde voor de twee beschouwde strategieën

		Strategie 1: versterken			Strategie 3: lifecycle monitoring		
		200 jaar			200 jaar		
		5%	50%	95%	5%	50%	95%
Netto Contant	Kosten	3.0	3.0	3.0	1.9	4.5	5.0
	Risico	0.0	0.1	0.5	0.0	0.1	0.3
	Waarde	3.0	3.1	3.5	1.9	4.5	5.3

Te zien is dat in sommige scenario's lifecycle monitoring een enorme besparing oplevert, maar dat het ook fors duurder kan zijn. Figuur 4.9 geeft de stabiliteitsfactor weer en hierin is dat beeld goed te herkennen: bij het 5%-scenario van strategie 3 wordt de eerste versterking uitgesteld tot ongeveer jaar 50, derhalve de fors lagere kosten (ondanks de kosten voor monitoring). In andere cases, met andere scenario's wordt de versterking zelfs duurder of in ieder geval niet uitgesteld. Uiteindelijk geldt hier ook voor bijvoorbeeld het 95%-scenario van strategie 3, dat de versterking vervroegd wordt. In dit geval levert dat geen kostenbesparing op, dat heeft echter te maken met de balans tussen kosten en risico's, wanneer het risico groter is dan zal er een punt zijn waarop de voorkomen risicokosten groter worden dan de toegenomen kosten door de monitoring en vroegere versterking. Dit tekent ook het belang van het meenemen van risico in de analyse van lifecycle strategieën voor waterkeringen.

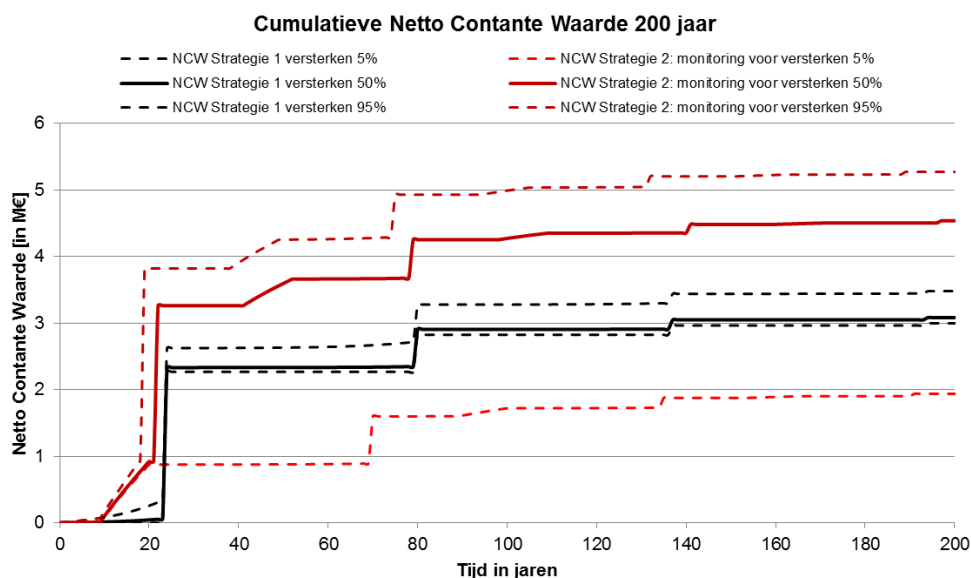


Figuur 4.9 Verloop van de stabiliteitsfactor in de tijd bij een pre-posterior analyse

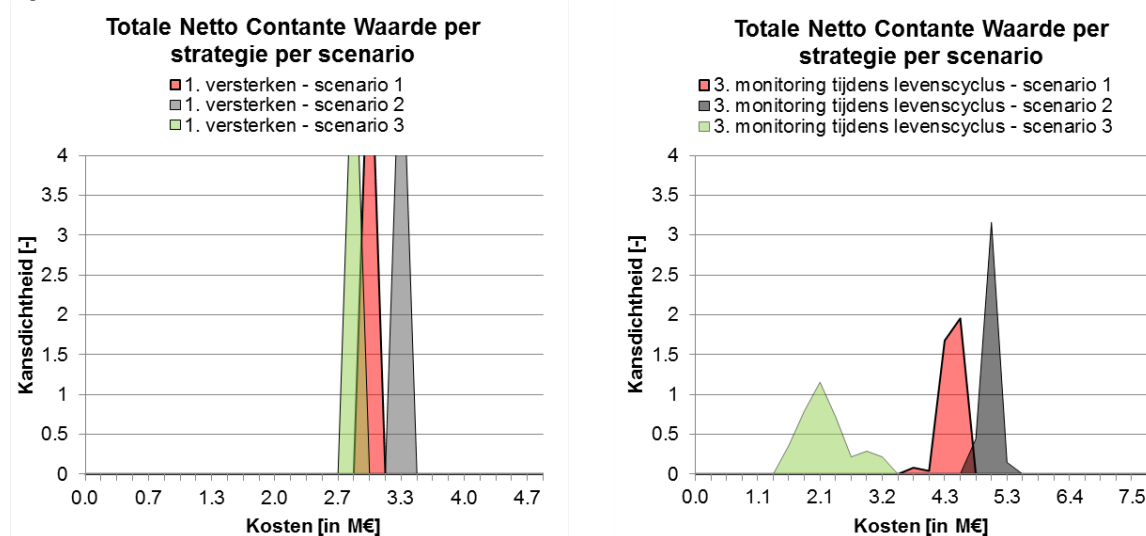
Figuur 4.10 toont de Netto Contante Waarde voor beide strategieën. Te zien is dat er voor de eerste versterking al bijna 1 M€ wordt uitgegeven aan monitoring (netto contant). De kunst in

dergelijke gevallen is dus om een balans te vinden tussen monitoringsduur, monitoringsintensiteit en daarmee kosten en tijdstip van het begin met monitoren.

Figuur 4.11 geeft de Netto Contante Waarde per strategie, hieruit blijkt dat bij scenario 3 de Netto Contante Waarde wel vrijwel gegarandeerd lager is. Voor scenario 1 kan dit in een enkel geval ook zo zijn maar bij scenario 2 levert het geen winst op. Dit heeft, zoals eerder al aangeduid te maken met het geringe risico. Scenario 2 is het scenario waarbij de kering de laagste sterkte heeft, wanneer hier grote consequenties aan verbonden zouden zijn zou monitoring voorkomen dat er onnodig risico wordt gelopen. Met de gebruikte invoerparameters is dit echter niet het geval. In de volgende paragraaf wordt nader ingegaan op de balans tussen kosten en risico's.



Figuur 4.10 Cumulatieve Netto Contante Waarde voor 2 scenario's.



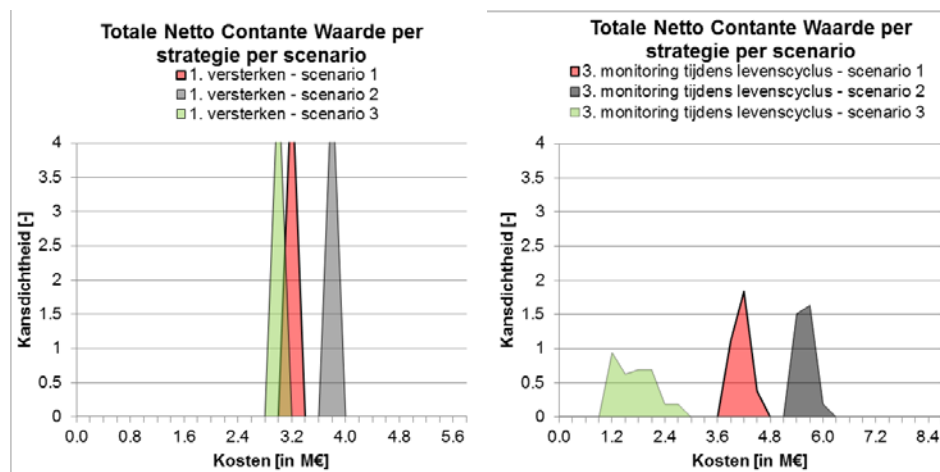
Figuur 4.11 Netto Contante Waarde voor strategie 1: versterken en strategie 3: lifecycle monitoring

4.5. Gevoeligheidsanalyse balans risico en kosten

Zoals in vorige paragraaf aangeduid is voor de kosten-/baten verhouding van monitoring vooral de verhouding tussen extra kosten door monitoring en risicoreductie van belang. Deze balans bepaalt of monitoring zinvol is. Wat hierbij ook van belang is is de mate van verschil tussen de scenario's. Wanneer 3 scenario's dichtbij elkaar liggen zal de meerwaarde van monitoring beperkt zijn. Wanneer er echter grote spreiding is in de scenario's ligt dit anders omdat er aanzienlijke kans is op ofwel een veel te vroege versterking (dus te hoge kosten) ofwel een veel te late (dus te hoog risico). Figuur 4.12 geeft een voorbeeld van een case waarbij alle invoer hetzelfde is als bij case 1c, maar waar de scenario waarden uit Tabel 4.6 zijn gehanteerd, dus een groter verschil in ligging van de freatische lijn. Dan blijkt dat met name voor scenario 3 de kosten nog een stuk lager worden. Echter blijft het zo dat het risico laag is en dat versneld versterken omdat de norm niet gehaald wordt geen winst oplevert.

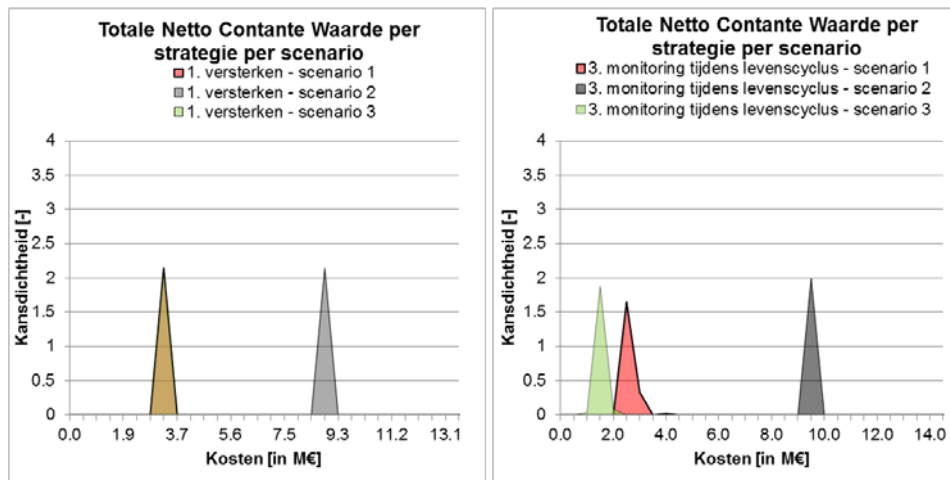
Tabel 4.6 Aangepaste scenario's voor de freatische lijn.

Respons freatische lijn bij toetspeil			
basisligging freatische lijn $h_{fr;b}$ [m tov NAP]	1	1	1
infiltratie regenbui, combinatiewaarde $dh_{fr;n}$ [m]	0.5	0.5	0.25
responsfactor stormvloed FR [-]	0.6	0.9	0.1
$h_{fr} = h_{fr;b} + dh_{fr;n} + FR (TP - h_{fr;b})$ [m tov NAP]	4.5	6	1.75



Figuur 4.12 Totale Netto Contante Waarde bij aangepaste scenario's voor de freatische lijn.

Wanneer we het risico vergroten, bijvoorbeeld door de schade te vertienvoudigen geeft dat het resultaat uit Figuur 4.13.



Figuur 4.13 Totale Netto Contante Waarde bij aangepaste schade's.



Te zien is dat hier het verschil tussen de scenario's uitgesprokener wordt. In dit geval is bij vrijwel alle scenario's strategie 3, lifecycle monitoring, voordeliger, simpelweg omdat de prijs van te laat versterken in de vorm van extra risico veel groter wordt. Overigens zal op hoofdlijnen hetzelfde gelden voor projectmonitoring, ook daar zal bij een hoger risico en een grotere spreiding van de verwachtingswaarden van de freatische lijn tussen de verschillende scenario's het nut van monitoring groter worden.

5. Case 2: innovatieve beheersmaatregel IJsseldijk bij Veessen

5.1. Beschrijving case

De tweede casus betreft een ander type vraagstuk. Hierbij wordt niet gekeken naar de baten van monitoring maar naar de baten van verschillende versterkingstechnieken. Het gaat hierbij om een kort dijkvak langs de IJssel, waar in 2013(?) een DMC-systeem ('Dijk Monitoring en Conditionering') is aangebracht. Door het gebruik van een DMC-systeem in plaats van het op traditionele wijze versterken met een berm werd voorkomen dat huizen achter dit dijkvak moesten worden gesloopt. In deze case worden de kosten en baten van beide strategieën vergeleken.

5.2. Faalmodel

Voor het faalmodel zijn een aantal vereenvoudigingen toegepast, gezien de beschikbare informatie en tijd. Allereerst wordt de faalkans opgehangen aan de waterstand die gekeerd kan worden. Dit gebeurt door aan de hand van toetspeil en decimeringshoogte een Gumbelverdeling op te stellen.

Vervolgens wordt door de initiële faalkans in te vullen in de Gumbel-verdeling een 'representatieve hoogte' van de kering verkregen. Deze representatieve hoogte wordt vervolgens jaarlijks aangepast met de netto veroudering, bestaande uit toename van de belasting en de jaarlijkse zetting. Deze is vervolgens dus om te rekenen naar een overschrijdingskans van de belasting. Omdat in de voornoemde bewerking de belasting volledig dominant is aangenomen, is deze gelijk aan de faalkans van de dijk. Hierbij is dus geen enkele vorm van sterkteonzekerheid meegenomen.

Bij een bermversterking wordt een berm aangelegd en dit dient vertaald te worden naar de representatieve hoogte. Voor piping is een gangbare maat dat 1 meter waterstandstijging correspondeert met 25 tot 40 meter berm. In deze casus is aangenomen dat 1 meter waterstandsstijging ongeveer correspondeert met 30 meter extra berm voor hetzelfde veiligheidsniveau. Aangenomen wordt dat dit een lineair verband is.

Wanneer een DMC-buis wordt gebruikt geldt de volgende relatie voor de faalkans:

$$P_f = P_{f,DMC} * P_{f,mechanisme|DMC\ faalt} + P_{f,mechanisme|DMC\ functioneert} \quad (5.1)$$

De faalkans bestaat dus uit 2 delen, doordat de DMC niet gegarandeerd altijd werkt speelt ook de sterkte van het dijklichaam nog een rol. Het kan dus nodig zijn om na verloop van tijd (bij zekere belastingsstijging/zetting) alsnog een berm aan te leggen.

De faalkans van de DMC-buis ($P_{f,DMC}$) is bepaald op 1/250 per vraag, dit is echter een zeer conservatieve schatting waarin bijvoorbeeld de uitvoering van pomptesten niet is meegenomen. In paragraaf 5.4 wordt daar nader op ingegaan. Overigens dient opgemerkt te worden dat een faalkans per vraag anders is dan een faalkans per jaar, bij kleine kansen

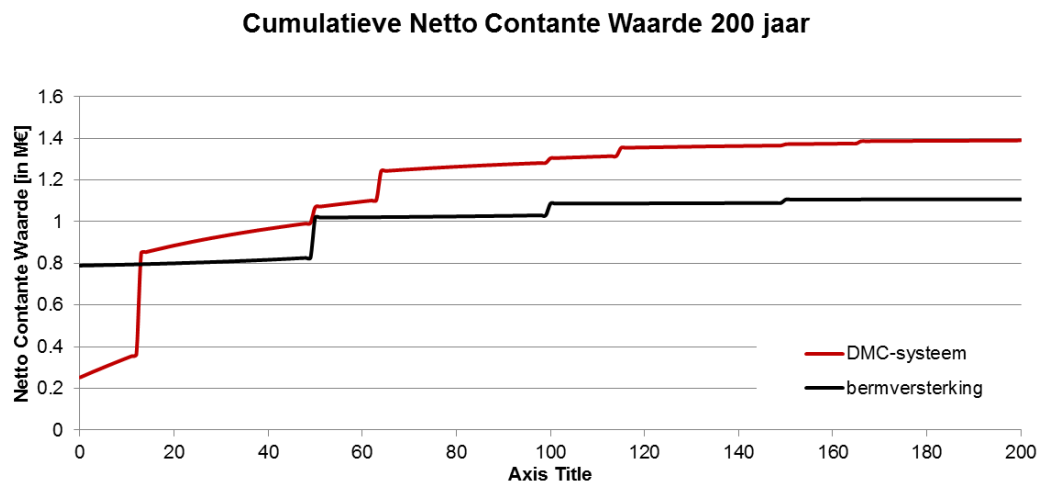
mogen deze echter wel vermenigvuldigd worden, zoals in bovenstaande formule wordt gedaan.

Speciale aandacht in de faalkansbeschouwing gaat uit naar het lengte-effect. Doordat een waterontspanner wordt geïnstalleerd, verandert de invloed van ruimtelijke onzekerheid op de totale faalkans van de dijk. Voor de vertaling van doorsnede naar vak, en van vak naar traject wordt hiervoor doorgaans een lengte-effect factor gehanteerd. Voor faalmechanisme piping is voor de vertaling van dijktraject naar dijkvak een factor $N = 10$ een redelijk uitgangspunt. Dijkvakken zijn echter doorgaans groter (orde 1 km) dan het vak wat beschouwd wordt in deze analyse (orde 150 meter). Het vak uit VNK waarin de DMC buis ligt (dijkvak 46), wordt heeft ook een lengte van ongeveer 1 km. In het VNK-rapport heeft dit vak geen faalkans gekregen voor piping, het naastgelegen dijkvak 47 heeft een faalkans van 1/890 jaar gekregen voor piping, terwijl voor vak 45 een faalkans van 1/130 jaar is gegeven.

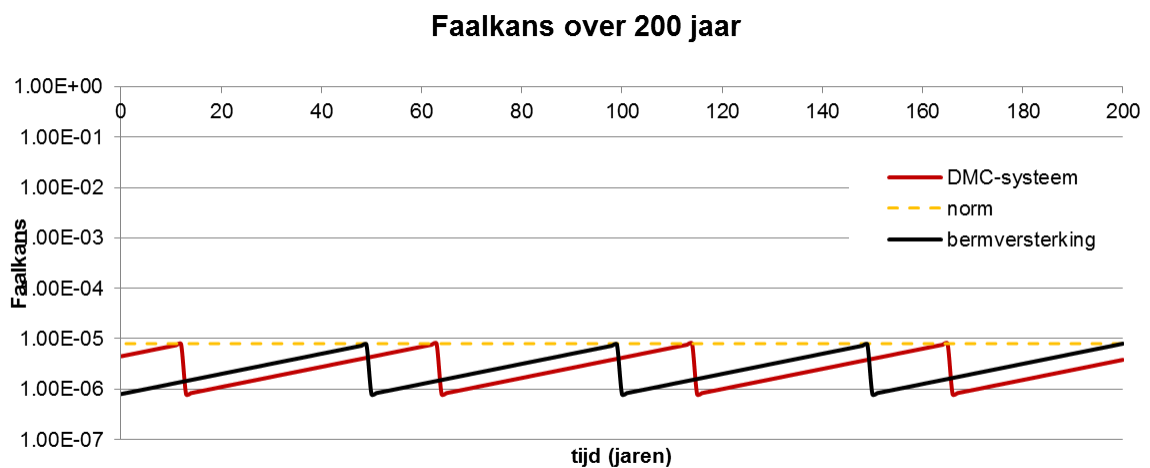
Door de aanleg van de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld is dit vak niet relevant. In dit rapport wordt er vanuit gegaan dat de faalkans voor dijkvak 47 ook voor 46 geldt. Dit is gebaseerd op het feit dat het onwaarschijnlijk is dat een vak met een kans van 1/130 niet is beschouwd in VNK (dit is bij 1/890 al enigszins twijfelachtig). Bovendien hebben in de VNK-studie de vakken 46 en 47 hetzelfde bodemvak en zijn ze geometrisch ook vergelijkbaar.

5.3. Vergelijking strategieën

In de analyse zijn twee strategieën mogelijk: ofwel versterken met een DMC-buis en later, wanneer nodig alsnog een berm aanleggen of direct enkel versterken met een berm. Aangenomen wordt dat wanneer een dijk met DMC niet meer voldoet deze dus met een berm versterkt zal worden. In werkelijkheid zijn er bij dergelijke systemen echter legio mogelijkheden om de faalkans van de DMC zelf te verlagen: denk aan het redundant uitvoeren van onderdelen die bepalend zijn voor de faalkans van het systeem. In Figuur 5.1 is de Netto Contante Waarde voor beide strategieën weergegeven, in Figuur 5.2 de faalkans in de tijd. Invoerparameters zijn te vinden in Bijlage A. Te zien is dat de Netto Contante Waarde van het DMC-systeem aan het begin fors lager is, maar dat deze na relatief korte tijd hoger wordt omdat het DMC-systeem geen voldoende lage faalkans meer kan garanderen. Rond jaar 10 moet in dit geval dus alsnog een berm worden aangelegd, wat erin resulteert dat op lange termijn een DMC-systeem duurder is dan een conventionele bermversterking. In dit geval lijkt op lange termijn een DMC-systeem dus duurder dan een conventionele bermversterking.

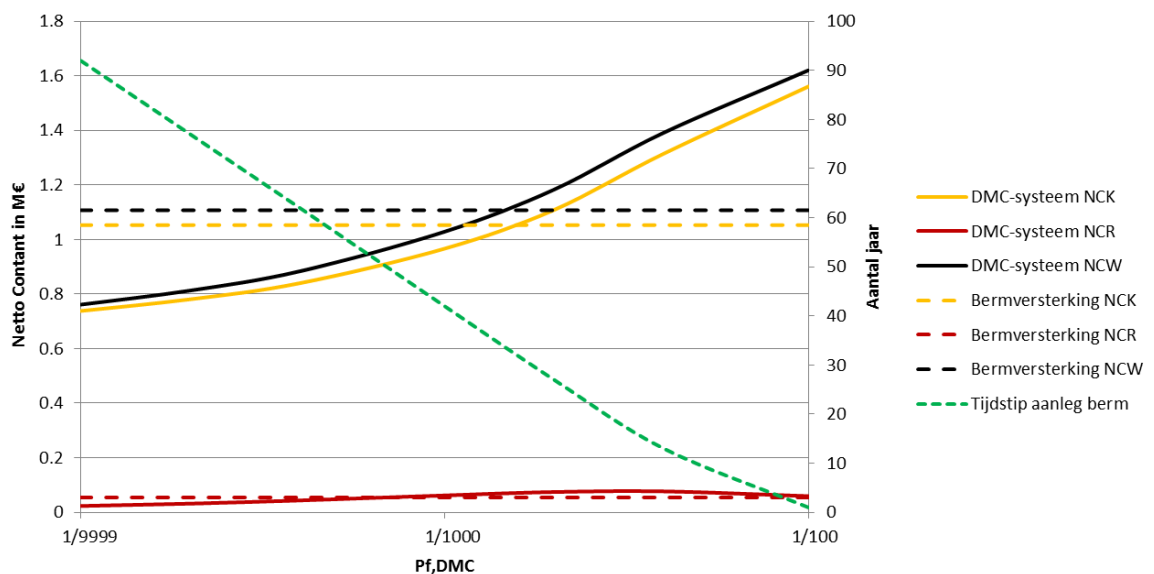


Figuur 5.1 Cumulatieve Netto Contante Waarde voor bermversterking en DMC-systeem



Figuur 5.2 Verloop van de faalkans in de tijd voor beide strategieën

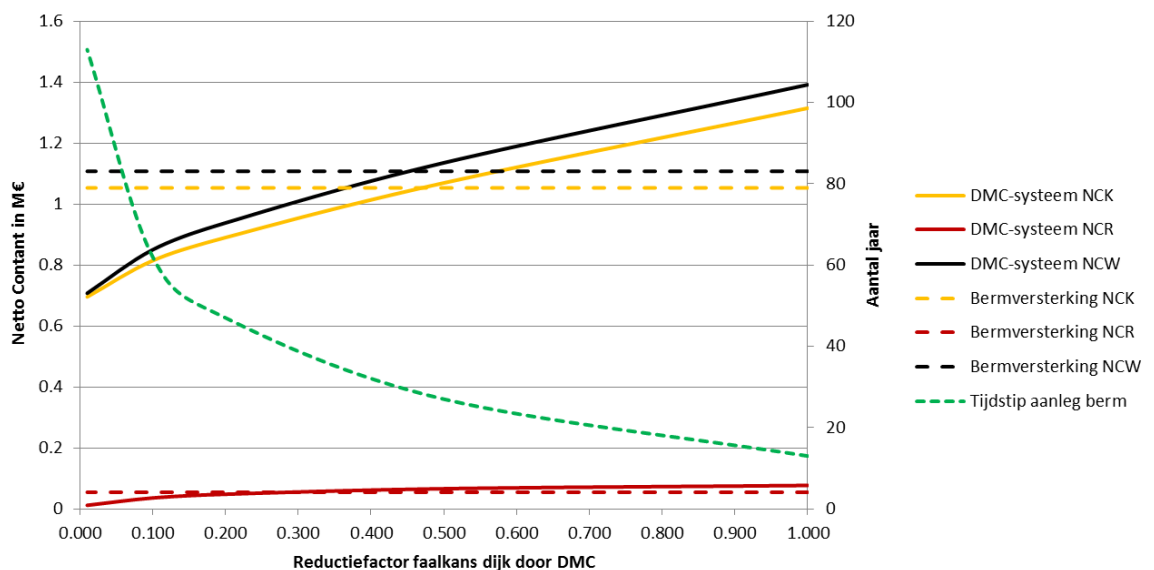
Een interessante vraag om te stellen is: vanaf welke $P_{f,DMC}$ is in deze situatie de versterking met een DMC-systeem op lange termijn goedkoper. De inschatting is immers dat de 1/250 faalkans een zeer conservatieve schatting is. Daarvoor is een reeks sommen gemaakt waarbij de faalkans van het DMC-systeem is gevarieerd, Resultaten hiervan zijn weergegeven in Figuur 5.3. Hieruit blijkt dat bij een faalkans van het DMC-systeem van ongeveer 1/750 de Netto Contante Waarde gelijk is aan die van een bermversterking. Bij een lagere faalkans wordt het DMC-systeem duidelijk goedkoper. De besparing in kosten wordt voornamelijk veroorzaakt doordat de hoe dan ook benodigde bermversterking later uitgevoerd kan worden, de groene lijn in de figuur geeft dit aan.



Figuur 5.3 Relatie tussen Netto Contante Waarde en tijdstip van aanleg berm met de faalkans van het DMC-systeem per vraag.

In het model is een tamelijk conservatieve aanname gedaan door ervanuit te gaan dat de sterkte van de kering bij niet-functioneren van het DMC-systeem gelijk is aan die van de kering zonder enige rekening te houden met het DMC-systeem.

De kans dat het DMC-systeem echter helemaal geen invloed heeft op de afwatering van de kering is nihil, aangezien het systeem in zijn huidige staat is ontworpen om passief af te kunnen wateren. De kans dat bij een hoogwater blijkt dat de zandkern van het DMC-systeem geen enkel effect heeft op de waterspanning is daarom nihil. In Figuur 5.4 wordt getoond wat de relatie is tussen de factor waarmee een DMC de faalkans van het dijklichaam verkleint en de Netto Contante Waarde. Wanneer door de aanleg van een DMC-systeem de kans $P_{f,mechanisme|DMC\ faalt}$ met ongeveer een factor 0.5 wordt vermenigvuldigd (dus 2x zo klein) is er break-even tussen DMC en bermversterking.



Figuur 5.4 Relatie tussen Netto Contante Waarde en tijdstip van aanleg berm met de faalkans van de dijk wanneer de DMC faalt.

Gezien de aard van het aangelegde DMC-systeem (passief, actieve delen enkel om het systeem te testen) is het aannemelijk dat de faalkans van de dijk, ook wanneer het DMC-systeem volgens de definitie uit de faalkansanalyse faalt, met minstens een factor 2 gereduceerd wordt.

5.4. Falen van een DMC-systeem

In de afweging tussen DMC-systeem en bermversterking is een tamelijk grove aanpak gebruikt waarin aan de hand van een aantal kentallen een beeld is geschetst van de factoren die een rol spelen bij het toepassen van DMC-systemen in een overstromingskansbenadering. Hieruit blijkt dat in de faalkansbeschouwing van een DMC-systeem, die voor een belangrijk deel bepaalt of deze kostenefficiënter is dan een bermversterking, twee factoren een zeer grote rol spelen: de faalkans van het DMC-systeem per vraag en de faalkans van de dijk bij een falende DMC. Het is aannemelijk dat de basisgegevens die gebruikt zijn voor het DMC-systeem tamelijk conservatief zijn, daarom is een aantal gevoeligheidsanalyses gedaan waarmee een indruk wordt gegeven van de werking van het systeem met andere aannames.

Actief versus passief

De faalkans van het DMC-systeem is middels een faalkansanalyse bepaald op 1/250 per vraag. Hierbij wordt echter uitgegaan van gebruik als actief systeem, waar het DMC-systeem bij Veessen in principe met enkel passieve werking zorgt dat de kering voldoet. De pompinstallatie wordt enkel gebruikt om het systeem te testen en te reinigen. Aangezien het systeem bij Veessen volledig passief werkt is een 1/250 faalkans dus zeer conservatief.

Mogelijkheid tot periodiek en bij aankomend hoogwater testen

Een ander aspect wat een belangrijke rol speelt bij dergelijke (actieve) systemen is de mogelijkheid tot testen, in de faalkansanalyse zijn de effecten van pomptesten niet meegenomen, terwijl het systeem periodiek getest wordt op capaciteit. Wanneer de capaciteit minder is dan verwacht of andersoortige afwijkingen worden waargenomen kan er direct worden ingegrepen. Hierdoor zal de werkelijke faalkans waarschijnlijk ook lager liggen dan 1/250. Ook dient opgemerkt te worden dat hersteltijden ook een rol horen te spelen bij de definitie van falen. Ter illustratie: het vervangen van een pomp kost ongeveer 30 minuten, het regenereren van het zandlichaam ongeveer 2 dagen. Langs rivieren is de waarschuwingstijd voor hoogwater echter veel langer dan 2 dagen, waardoor een eenvoudige test voor aankomst van het hoogwater kan uitwijzen of het systeem functioneert en indien dit niet het geval is kan nog ingegrepen worden.

Redundantie

Een grote bijdrage aan de faalkans komt voort uit spanningsuitval, er is echter een noodvoorziening die het DMC-systeem 48 uur van stroom kan voorzien.

Levensduur

In de analyse is uitgegaan van een levensduur van 50 jaar (gelijk aan de gangbare planperiode voor een dijkversterking). De levensduur van een DMC-systeem (los van alle eenvoudig vervangbare onderdelen) is echter ongeveer gelijk aan de levensduur van PVC onder de grond. Uit onderzoek blijkt dat dit doorgaans zeker 100 jaar is (Mesman et al., 2009). Overigens zal dit op de Netto Contante Waarde relatief beperkt effect hebben, in de analyses uit voorgaande paragraaf tussen de 50-100 k€.

Lengte-effect

Kijkend naar het lengte-effect van dijkdelen voorzien van een DMC-buis dient opgemerkt te worden dat wanneer een DMC-buis geïnstalleerd wordt een dergelijk vak als homogeen kan worden beschouwd. In dit geval is de lengte van de buis dermate kort dat dit weinig invloed heeft op het totale lengte-effect, maar wanneer langere stukken voorzien worden van eenzelfde DMC-buis kan dit voordeel opleveren omdat de lengte-effectfactor afneemt. Wanneer we dus de in formulevorm de trajectnorm relateren aan de eis van het vakdeel waar de DMC-buis ligt geeft dat:

$$\frac{P_{f, \text{traject}}}{N} = P_{f, \text{DMC}} * P_{f, \text{mechanisme} | \text{DMC faalt}} + P_{f, \text{mechanisme} | \text{DMC functioneert}} \quad (5.2)$$

Waarbij N afhankelijk is van de homogeniteit van het traject. Deze factor is afhankelijk van de lengte van afzonderlijke DMC-systemen en de correlatie van verschillende faalmechanismen van het systeem (bijv. verstoppingen van de zandkern of common cause failures door

stroomuitval). Wanneer over grotere lengten DMC-systemen worden geïnstalleerd als maatregel tegen het mechanisme piping kan niet zonder meer dezelfde factor worden gehanteerd voor het lengte-effect, de invloed van ruimtelijke onzekerheden op falen verandert immers sterk.

5.5. Conclusies & aanbevelingen

Het primaire doel van de analyse van de casus Veessen was om aan te tonen dat de ROBAMCI Tool relatief eenvoudig aangepast kon worden naar een andere case. Dit is gelukt, hoewel de structuur van de tool toch wat aanpassingen nodig had. Met name omdat de definitie van het faalmechanisme anders is en de scope van de casus Veessen ook, is de formulering van het probleem als geheel ook wat anders (geen monitoring).

In dat kader wordt aanbevolen om voor vervolgvorsies van de tool deze zo op te bouwen dat deze niet afhankelijk is van de faaldefinitie, maar dat met modules en vaste in- en uitvoerwaarden wordt gewerkt. Dan kan een faaldefinitie eenvoudig worden vervangen door een andere complexere of minder complexe. Dit is in lijn met de blauwdruk voor een generiek ROBAMCI-instrumentarium uit het ROBAMCI framework (W J Klerk et al., 2015).

Met betrekking tot de casus Veessen is een zeer algemene studie uitgevoerd waarin op basis van een eenvoudig faalmodel een aantal belangrijke factoren voor het DMC-systeem zijn bepaald. Het gaat hierbij met name om de faalkans van het systeem, de invloed van een falend systeem op de faalkans van de dijk. Verdere verkenning van deze factoren kan de economische aantrekkelijkheid van het DMC-systeem verder vergroten.

Tot slot dient opgemerkt te worden dat door het gebruik van een DMC-systeem de invloed van bepaalde ruimtelijke onzekerheden op de faalkans verandert door de invloed van het DMC-systeem. Wanneer over langere strekkingen DMC-systemen worden geïnstalleerd is het aan te bevelen om te kijken wat de invloed hiervan is op het lengte-effect. Het is mogelijk dat doordat de homogeniteit van de dijk toeneemt de lengte-effect factor die gehanteerd wordt om trajecteisen te vertalen naar doorsnede-eisen kan worden verlaagd.

6. Reflectie

6.1. De tool in perspectief

De in dit project ontwikkelde tool maakt een aantal analyses van de kosten en baten van monitoring mogelijk die tot voor kort niet konden worden gedaan. Daarnaast opent het de deur voor het meer integraal vergelijken van inspectie, monitoring, beheer en versterkingstechnieken. De tool geeft echter geen absolute waarheden en belicht slechts een deel van het spectrum van de baten van monitoring. Daarom is deze nu vooral geschikt als instrument om inzicht te verschaffen in relatieve verschillen tussen technieken en investeringsmogelijkheden. De gebruikte relaties (zoals bijvoorbeeld tussen een meting van het freatisch vlak en het freatisch vlak bij MHW) zijn zo goed mogelijk geijkt op bestaande kennis; echter, deze rusten grotendeels op expert-inschatting en dienen voor een nauwkeuriger gebruik van de tool verder onderbouwd te worden. Het doel van de tool was om een proof-of-concept te geven van een methode voor afwegen van verschillende investeringsopties. Uiteraard werkt de tool enkel wanneer deze op deskundige wijze wordt gebruikt, wanneer er onjuiste informatie wordt ingevoerd zal het resultaat niet leiden tot betrouwbare resultaten.

Het is belangrijk om in de gaten te houden dat de tool zeker niet alle baten van monitoring belicht, onderstaand zijn drie belangrijke ervaringen uit LiveDijk XL benoemd:

- Monitoring dwingt tot het verzamelen van informatie: doordat monitoringsresultaten geïnterpreteerd moeten worden dwingt monitoring tot het inwinnen van informatie die daar aan bijdraagt. Dit sluit aan op het tweede punt
- Monitoring werkt ordenend: doordat resultaten moeten worden geïnterpreteerd is het noodzakelijk dat informatie over de dijk op orde is. Daarnaast werkt monitoring ordenend op het (in het geval van LiveDijk XL) versterkingsproces, omdat het een feitelijke basis geeft.
- Monitoring geeft inzicht in crisissituaties: samen met een ordelijk en goed onderbouwd beeld van de kering geeft monitoring ook in operationeel spannende situaties veel inzicht. Op deze manier kan op het juiste moment en op de juiste plaats worden ingegrepen met bijvoorbeeld noodmaatregelen.

Van bovenstaande drie punten zijn in de tool met name de kosten en baten van de eerste twee belicht: uit de tool blijkt of het verzamelen van extra informatie zinvol is vanuit kosten/baten oogpunt. Wanneer de onzekerheid over de ondergrondscenario's klein is, zal vanzelf blijken dat de meerwaarde van monitoring op dat punt relatief beperkt is.

Door de complexe afweging van informatie, onzekerheid, kosten en baten zal een beslissing over monitoring altijd een afweging moeten zijn die op basis van kennis van de dijk en ervaring met monitoring moet worden gemaakt. De tool helpt om een deel van die afweging kwantitatief te onderbouwen.

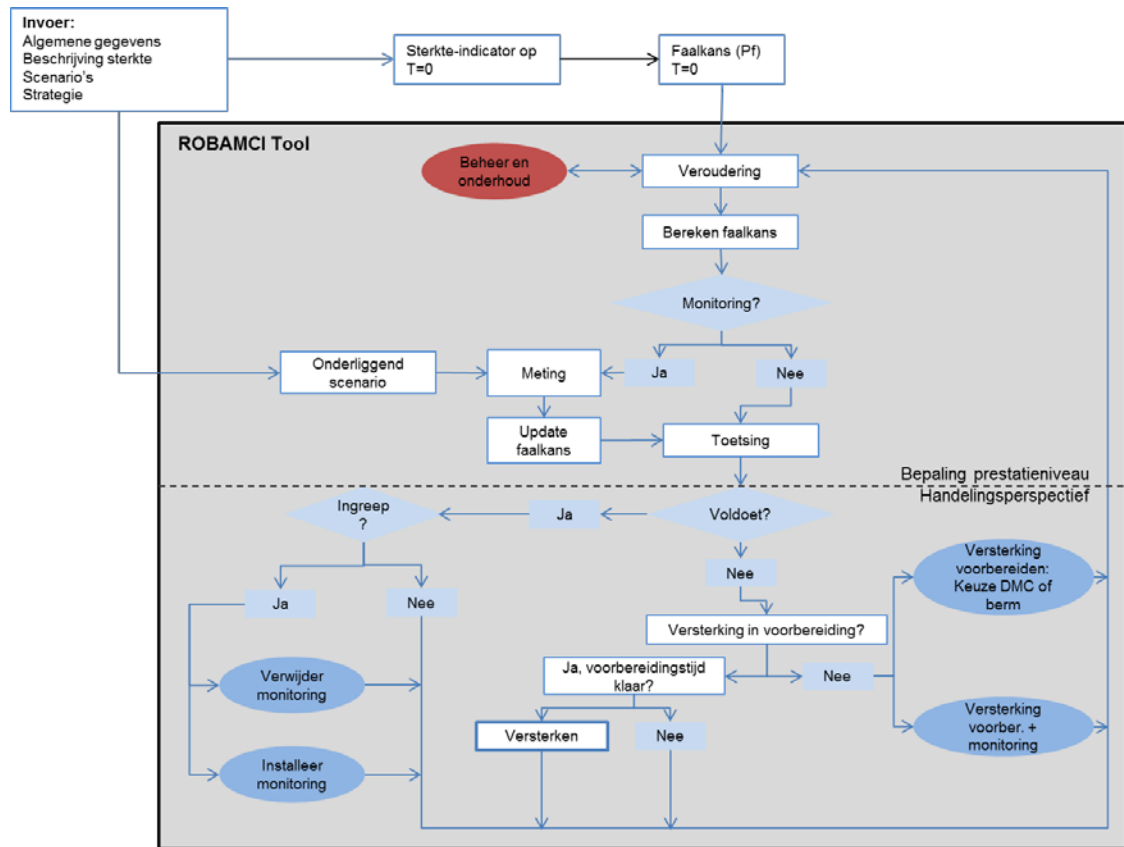
Een zeer belangrijk leerpunt uit deze studie is het moment van informatie inwinnen. Waar bij LiveDijk XL als het ware projectgestuurd (metingen vanaf het moment dat er verbetering gepland staat) is gemonitord, geldt dat bij goed asset management van een waterkering de informatie inwinning op basis van een integrale afweging van monitoringskosten, verwachte baten en extra risico gemaakt moet worden. Omdat bij afkeuren het risico al hoog is zullen, wanneer informatie inwinnen de versterking vertraagt, de risicokosten snel oplopen.

Lifecycle monitoring is hierin een voorbeeld van een oplossing: door gedurende de levenscyclus, indien nodig, aanvullende informatie in te winnen heeft een beheerder tijdig inzicht in aankomende ingrepen, en worden ingrepen minder ad hoc uitgevoerd.

Daarnaast kan, bijvoorbeeld bij verandering in rekenregels of veiligheidsnormen, een beheerder die over goede informatie beschikt snel inschatten welke consequenties dit voor zijn areaal heeft, ook in dergelijke gevallen is hij meer 'in control' over zijn areaal. Dit is een extra toegevoegde waarde van monitoring die lastig te kwantificeren is.

6.2. Rol van beheer en onderhoud in de asset management cyclus

In de gedane analyses zijn twee afwegingen in kaart gebracht: de afweging tussen twee typen versterkingen en de afweging of het zinvol is om middels monitoring informatie in te winnen. Het grootste deel van de tijd is een beheerder echter bezig met het beheer en onderhoud van een kering. Dergelijke afwegingen verdienen daarom zeker een plaats in de tool. Figuur 6.1 geeft het stroomschema en de plaats van het dagelijks beheer daarin (in rood). Dagelijks beheer en onderhoud zal er vooral zorg voor dragen dat een waterkering minder snel veroudert en bijvoorbeeld bekledingen langer in een goede staat blijven. Voor dergelijke acties is ruimte in de tool, om dit goed uit te kunnen werken is het noodzakelijk dat beheersacties kunnen worden gerelateerd aan het veiligheidsniveau. Dergelijke kennis zou echter onderdeel moeten zijn van kennisontwikkeling op het gebied van de zorgplicht.



Figuur 6.1 Stroomschema ROBAMCI Waterkeren Tool met daarin de plaats van Beheer en Onderhoud.

6.3. Verbeterkansen tool

Naast de hierboven genoemde punten zijn uit de gemaakte analyses nog een aantal verbeterpunten naar voren gekomen:

- Uit de analyse van de LiveDijk bij Veessen bleek dat de brede toepasbaarheid van de tool nog verder verbeterd kan worden. Het gaat hierbij met name om de mogelijkheid om bijvoorbeeld faalmechanismemodellen uit te wisselen. Hiervoor is een aanpak met modellen en adapters, zoals voorgesteld in de blauwdruk van het ROBAMCI Framework of Analysis aan te bevelen.
- De relatie tussen faalkans en stabiliteit (LiveDijkXL) is gebaseerd op een algemene formule en zou locatiespecifiek gemaakt moeten worden. Uit de analyses is gebleken dat deze een tamelijk grote invloed heeft op het risico. Dit geldt ook voor de bepaling van de mate van afname van de onzekerheid in ligging van de freatische lijn bij MHW, als gevolg van metingen van waterstanden met een zekere hoogte.
- De likelihoodfunctie die gebruikt wordt voor het updaten van scenariokansen is nu algemeen. Deze zou echter scenariospecifiek kunnen worden afgeleid met een model, omdat niet voor ieder scenario de waarde van de informatie bij bepaalde waterstanden gelijk zal zijn.

7. Conclusies en aanbevelingen

7.1. Conclusies tool

In dit rapport is een proof of concept gegeven van het meenemen van (verwachte) monitoringsresultaten in lifecycle kosten-/baten analyses. Dit is mogelijk door de beschikbare data vanuit LiveDijk XL. Middels de tool zijn de baten voor deze case gekwantificeerd en is ook een indicatie gegeven hoe de kosten-/baten afweging er vooraf zou hebben uitgezien. Relatieve vergelijkingen van verschillende strategieën zijn mogelijk met de gemaakte tool.

In een tweede casus is de tool op een andere afweging toegepast, wat inzicht heeft gegeven in de effectiviteit van het DMC-systeem bij LiveDijk Veessen. Vanuit de analyse is een aantal handvatten aangereikt waarmee het DMC-systeem aantrekkelijker gemaakt kan worden voor dijkversterkingen.

De gemaakte tool is nog niet breed toepasbaar, er zijn echter in hoofdstuk 6 wel een aantal voorstellen gedaan hoe dit bereikt kan worden.

Van belang is altijd om op te merken dat de tool een hulpmiddel is in een bredere afweging van asset management aspecten van een waterkering. Daarop wordt verder ingegaan in de bijbehorende oplegnotitie (ROBAMCI, 2016).

7.2. Inzichten op basis van de tool

Aan de hand van de analyses met de tool is een aantal inzichten verkregen, te weten:

- Het uitstellen van een versterking om te monitoren leidt tot een hoger risico, maar in veel gevallen ook tot lagere kosten. De afweging of monitoring in dergelijke gevallen de moeite waard is, is naast een afweging van de andere in Hoofdstuk 2 genoemde voordelen een afweging tussen monitoringskosten, verwachte kostenbesparing en extra risico.
- Waterkeringen verouderen wat van tijd tot tijd versterken nodig maakt. Door monitoring wordt een gedetailleerder beeld verkregen van de staat van de kering wat kan leiden tot economische voordelen op 3 onderdelen:
 - Voorkomen dat onnodig risico wordt gelopen
 - Verkleining van de versterkingsopgave
 - Uitstel van versterking
- Hoe hoger de waterstand bij een meting hoe meer informatie deze oplevert. Een hoge waterstand brengt echter ook een hoger risico met zich mee. Deze balans moet goed in kaart worden gebracht.

7.3. Aanbevelingen

Voor de verdere ontwikkeling van de tool worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- Generieke en modulaire opzet realiseren waar eenvoudig gewisseld kan worden tussen faalmodellen volgens de opzet van het ROBAMCI Framework of Analysis
- Toevoegen van ingrepen in dagelijks beheer en onderhoud, om zo de gehele levenscyclus van de waterkering mee te kunnen nemen.
- Scenario specifiek maken van de updating routine van scenariokansen aan de hand van faalmechanismemodellen.
- Het verder kwantitief onderbouwen van de gebruikte relaties tussen buitenwaterstand, meting en freatisch vlak bij MHW.

8. Referenties

- Ben-Zvi, M., Berkowitz, B., Kesler, S., 1988. Pre-posterior analysis as a tool for data evaluation: Application to aquifer contamination. *Water Resour. Manag.* 2, 11–20.
doi:10.1007/BF00421927
- FC IJkdijk, 2016. LivedijkXL Noorderzijlvest - State of the Art 2015. in press.
- ISO, 2014. NEN-ISO 55000: Asset management - Overview, principles and terminology (ISO55000:2014 (corr. 2014-03),IDT). Delft.
- Klerk, W.J., Heijer, F. den, Schweckendiek, T., 2015. Value of information in life-cycle management of flood defences, in: *Safety and Reliability of Complex Engineered Systems*. CRC Press, Zurich, Switzerland, pp. 931–938.
- Klerk, W.J., van Stokkum, J., Zomer, W., Bakkenist, S., 2015. Framework voor lifecycle management van publieke kritieke infrastructuur - Inventarisatie en framework versie 0. Deltares report 1220047-002-GEO-0005.
- Mesman, G., Slaats, N., Boersma, A., Schultz, B., 2009. Nieuwe methode inzetbaar bij saneringsbeslissingen PVC-leidingen. *H2O* 44–47.
- ROBAMCI, 2016. Oplegnotitie ROBAMCI Waterkeren.
- ROBAMCI, 2015. Koepelplan 2015-2018.
- Rozing, A., 2015. Schematisering waterspanningen in WTI 2017 (Ringtoets). Deltares report no. 1209434-012-GEO-0002.
- Schweckendiek, T., 2014. On reducing piping uncertainties: A Bayesian decision approach.
doi:10.4233/uuid:f9be2f7e-7009-4c73-afe5-8b4bb16e956f
- The Institute of Asset Management, 2014. *Asset Management - an anatomy*. Bristol, UK.



A. Invoer case 1a & 1b

NB: de sommen in dit rapport zijn uitgevoerd met versie 0.8. Op onderstaande figuren staat versie 0.7, het invoerscherm van 0.7 en 0.8 is echter hetzelfde

A.1 Invoer Case 1a

Strategie 1: versterken

Robamci LiveDijk: Ommelanderzeedijk v0.7	Algemeen	Scenario-afhankelijk		
		Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Algemeen effect op stabiliteitsfactor		LiveDijkXL: verwacht (gunstig)	Toetsing (ongunstig)	LiveDijkXL: resultaat (zeer gunstig)
Scenario kans		0.05	0.9	0.05
Algemene parameters Ommelanderzeedijk				
toetspeil TP [m tov NAP]	6			
overschrijdingskans toetspeil	0.00025			
normfrequentie [1/jaar]	0.00008			
decimeringshoogte DH [m]	0.6			
Lengte-effect factor [-]	8.67			
gevolgschade overstrooming GO [M€]	1250			
Lengte afgekeurde dijkstrekking LD [km]	11.5			
discontopercentage	0.025			
gemiddelde economische groei	0			
Respons freatische lijn bij toetspeil				
basisligging freatische lijn h_fr;b [m tov NAP]		1	1	1
infiltratie regenbui, combinatiewaarde dh_fr;n [m]		0.5	0.5	0.25
responsfactor stormvoed FR [-]		0.6	0.8	0.25
$h_{fr} = h_{fr;b} + dh_{fr;n} + FR (TP - h_{fr;b})$ [m tov NAP]		4.5	5.5	2.5
Stabiliteitsfactor				
constante C1 [-]	-0.246			
constante C2 [-]	1.26			
Stabfact bij toetspeil $SFkd(TP) = C1 \cdot \ln(TP) + C2$ [-]		0.89	0.84	1.03
vereiste SFkd		1.04	1.04	1.04
Faalkans STBI				
constante A1 [-]	4			
constante A2 [-]	0.13			
$\beta = A1 + (SFkd - 1) / A2$		3.15	2.77	4.27
Faalkans $Pf_STBI = \text{standnormverd}(-\beta)$ [1/jaar]		8.06E-04	2.77E-03	9.95E-06
Ontwerpmarge ivm planperiode				
Veroudering sterkte VS [m/jaar], maaiveld daling	0.001			
Belastingtoename VB [m/jaar], zeespiegelrijzing	0.005			
afname stabiliteitsfactor/jaar	0.003			
variatiecoëfficiënt afname stabiliteitsfactor [in %]	0.0001%			
Planperiode N [jaar]	50			
toename verval $dH = (VS + VB) \cdot N$ [m]		0.30	0.30	0.30
constante M1 [-]	0.1			
achteruitgang stabiliteit $dSFkd_{plan} = M1 \cdot dH$ [-]		0.03	0.03	0.03
Opgave $dSFkd_{tot} = dSFkd_{act} + dSFkd_{plan}$ [-]				
Kosten uitstel en monitoring KMT [M€]				
Duur monitoring [jaar]	3			
Startjaar monitoring na versterking(tijdens levenscyclus)	20			
Duur monitoring (tijdens levenscyclus) in jaar	10			
Directe kosten monitoring [in M€/km/jaar]	0.03			
onzekerheid waterspanningsmeters (in m)	0.2			
onzekerheid extrapolatie	0.5			
Ontwerp en realisatie				
Bfact [m]	100			
Vaste versterkingskosten [M€]	0			
Aanbormingskosten BVK [M€/km] voor 10 m aanberming	0.5			
Ontwerpduur/ voorbereidingstijd [jaar]	3			
Bouwduur/ Voorbereidingstijd [jaar]	3			
Variatiecoëfficiënt bouwduur [%]	0.01%			

Strategie 2: projectmonitoring

Robamci LiveDijk: Ommelanderzeedijk v0.7	Algemeen	Scenario-afhankelijk		
		Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Algemeen effect op stabiliteitsfactor		LiveDijkXL: verwacht (gunstig)	Toetsing (ongunstig)	LiveDijkXL: resultaat (zeer gunstig)
Scenario kans		0.6	0.2	0.2
Algemene parameters Ommelanderzeedijk				
toetspeil TP [m tov NAP]	6			
overschrijdingskans toetspeil	0.00025			
normfrequentie [1/jaar]	0.00008			
decimeringshoogte DH [m]	0.6			
Lengte-effect factor [-]	8.67			
gevolgsschade overstrooming GO [M€]	1250			
Lengte afgekeurde dijkstrekking LD [km]	11.5			
discontopercentage	0.025			
gemiddelde economische groei	0			
Respons freatische lijn bij toetspeil				
basisligging freatische lijn $h_{fr;b}$ [m tov NAP]		1	1	1
infiltratie regenbui, combinatiewaarde $dh_{fr;n}$ [m]		0.5	0.5	0.25
responsfactor stormvloed FR [-]		0.6	0.8	0.25
$h_{fr} = h_{fr;b} + dh_{fr;n} + FR (TP - h_{fr;b})$ [m tov NAP]		4.5	5.5	2.5
Stabiliteitsfactor				
constante C1 [-]	-0.246			
constante C2 [-]	1.26			
$Stabfact \text{ bij toetspeil } SFkd(TP) = C1 \cdot \ln(TP) + C2$ [-]		0.89	0.84	1.03
vereiste SFkd		1.04	1.04	1.04
Faalkans STBI				
constante A1 [-]	4			
constante A2 [-]	0.13			
$\beta = A1 + (SFkd - 1) / A2$		3.15	2.77	4.27
Faalkans $Pf_STBI = \text{standnormverd}(-\beta)$ [1/jaar]		8.06E-04	2.77E-03	9.95E-06
Ontwerpmarge ivm planperiode				
Veroudering sterkte VS [m/jaar], maaiveldalling	0.001			
Belastingtoename VB [m/jaar], zeespiegelrijzing	0.005			
afname stabiliteitsfactor/jaar	0.003			
variatiecoëfficiënt afname stabiliteitsfactor [in %]	0.0001%			
Planperiode N [jaar]	50			
toename verval $dH = (VS + VB) \cdot N$ [m]		0.30	0.30	0.30
constante M1 [-]	0.1			
achteruitgang stabiliteit $dSFkd;plan = M1 \cdot dH$ [-]		0.03	0.03	0.03
Opgave $dSFkd;tot = dSFkd;act + dSFkd;plan$ [-]				
Kosten uitstel en monitoring KMT [M€]				
Duur monitoring [jaar]	3			
Startjaar monitoring na versterking(tijdens levenscyclus)	20			
Duur monitoring (tijdens levenscyclus) in jaar	3			
Directe kosten monitoring [in M€/km/jaar]	0.03			
onzekerheid waterspanningsmeters (in m)	0.2			
onzekerheid extrapolatie	0.5			
Ontwerp en realisatie				
Bfact [m]	100			
Vaste versterkingskosten [M€]	0			
Aanbermingskosten BVK [M€/km] voor 10 m aanberming	0.5			
Ontwerpduur/ voorbereidingstijd [jaar]	1			
Bouwduur/ Voorbereidingstijd [jaar]	3			
Variatiecoëfficiënt bouwduur [%]	0.01%			

A2. Invoer Case 1b

Strategie 1: versterken

Robamci LiveDijk: Ommelanderzeedijk v0.7	Algemeen	Scenario-afhankelijk		
		Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Algemeen effect op stabiliteitsfactor		LiveDijkXL: verwacht (gunstig)	Toetsing (ongunstig)	LiveDijkXL: resultaat (zeer gunstig)
Scenario kans		0.6	0.2	0.2
Algemene parameters Ommelanderzeedijk				
toetspeil TP [m tov NAP]	6			
overschrijdingskans toetspeil	0.00025			
normfrequentie [1/jaar]	0.00008			
decimeringshoogte DH [m]	0.6			
Lengte-effect factor [-]	8.67			
gevolgschade overstroming GO [M€]	1250			
Lengte afgekeurde dijkstrekking LD [km]	11.5			
discontopercentage	0.025			
gemiddelde economische groei	0			
Respons freatische lijn bij toetspeil				
basisligging freatische lijn $h_{fr;b}$ [m tov NAP]		1	1	1
infiltratie regenbui, combinatiewaarde $dh_{fr;n}$ [m]		0.5	0.5	0.25
responsfactor stormvloed FR [-]		0.6	0.8	0.25
$h_{fr} = h_{fr;b} + dh_{fr;n} + FR (TP - h_{fr;b})$ [m tov NAP]		4.5	5.5	2.5
Stabiliteitsfactor				
constante C1 [-]	-0.246			
constante C2 [-]	1.26			
Stabfact bij toetspeil $SFkd(TP) = C1 \cdot \ln(TP) + C2$ [-]		0.89	0.84	1.03
vereiste SFkd		1.04	1.04	1.04
Faalkans STBI				
constante A1 [-]	4			
constante A2 [-]	0.13			
$\beta = A1 + (SFkd - 1) / A2$		3.15	2.77	4.27
Faalkans $Pf_STBI = \text{standnormverd}(-\beta)$ [1/jaar]		8.06E-04	2.77E-03	9.95E-06
Ontwerpmarge ivm planperiode				
Veroudering sterkte VS [m/jaar], maaiveld daling	0.001			
Belastingtoename VB [m/jaar], zeespiegelrijzing	0.005			
afname stabiliteitsfactor/jaar	0.003			
variatiecoëfficiënt afname stabiliteitsfactor [in %]	0.0001%			
Planperiode N [jaar]	50			
toename verval $dH = (VS + VB) \cdot N$ [m]		0.30	0.30	0.30
constante M1 [-]	0.1			
achteruitgang stabiliteit $dSFkd;plan = M1 \cdot dH$ [-]		0.03	0.03	0.03
Opgave $dSFkd;tot = dSFkd;act + dSFkd;plan$ [-]				
Kosten uitstel en monitoring KMT [M€]				
Duur monitoring [jaar]	3			
Startjaar monitoring na versterking(tijdens levenscyclus)	20			
Duur monitoring (tijdens levenscyclus) in jaar	10			
Directe kosten monitoring [in M€/km/jaar]	0.03			
onzekerheid waterspanningsmeters (in m)	0.2			
onzekerheid extrapolatie	0.5			
Ontwerp en realisatie				
Bfact [m]	100			
Vaste versterkingskosten [M€]	0			
Aanbormingskosten BVK [M€/km] voor 10 m aanborming	0.5			
Ontwerpduur/ voorbereidingstijd [jaar]	3			
Bouwduur/ Voorbereidingstijd [jaar]	3			
Variatiecoëfficiënt bouwduur [%]	0.01%			

Strategie 2: projectmonitoring

Robamci LiveDijk: Ommelanderveedijk v0.7	Algemeen	Scenario-afhankelijk		
		Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Algemeen effect op stabiliteitsfactor		LiveDijkXL: verwacht (gunstig)	Toetsing (ongunstig)	LiveDijkXL: resultaat (zeer gunstig)
Scenario kans		0.6	0.2	0.2
Algemene parameters Ommelanderveedijk				
toetspeil TP [m tov NAP]	6			
overschrijdingskans toetspeil	0.00025			
normfrequentie [1/jaar]	0.00008			
decimeringshoogte DH [m]	0.6			
Lengte-effect factor [-]	8.67			
gevolgschade overstroming GO [M€]	1250			
Lengte afgekeurde dijkstrekking LD [km]	11.5			
discontopercentage	0.025			
gemiddelde economische groei	0			
Respons freatische lijn bij toetspeil				
basisligging freatische lijn $h_{fr};b$ [m tov NAP]		1	1	1
infiltratie regenbui, combinatiewaarde $dh_{fr};n$ [m]		0.5	0.5	0.25
responsfactor stormvloed FR [-]		0.6	0.8	0.25
$h_{fr} = h_{fr};b + dh_{fr};n + FR (TP - h_{fr};b)$ [m tov NAP]		4.5	5.5	2.5
Stabiliteitsfactor				
constante C1 [-]	-0.246			
constante C2 [-]	1.26			
$Stabfact \text{ bij toetspeil } SFkd(TP) = C1 \cdot \ln(TP) + C2$ [-]		0.89	0.84	1.03
vereiste SFkd		1.04	1.04	1.04
Faalkans STBI				
constante A1 [-]	4			
constante A2 [-]	0.13			
$\beta = A1 + (SFkd - 1) / A2$		3.15	2.77	4.27
Faalkans Pf_{STBI} = standnormverd (-beta) [1/jaar]		8.06E-04	2.77E-03	9.95E-06
Ontwerpmarge ivm planperiode				
Veroudering sterkte VS [m/jaar], maaiveld daling	0.001			
Belastingtoename VB [m/jaar], zeespiegelrijzing	0.005			
afname stabiliteitsfactor/jaar	0.003			
variatiecoefficient afname stabiliteitsfactor [in %]	0.0001%			
Planperiode N [jaar]	50			
toename verval $dH = (VS + VB) \cdot N$ [m]		0.30	0.30	0.30
constante M1 [-]	0.1			
achteruitgang stabiliteit $dSFkd;plan = M1 \cdot dH$ [-]		0.03	0.03	0.03
Opgave $dSFkd;tot = dSFkd;act + dSFkd;plan$ [-]				
Kosten uitstel en monitoring KMT [M€]				
Duur monitoring [jaar]	3			
Startjaar monitoring na versterking(tijdens levenscyclus)	20			
Duur monitoring (tijdens levenscyclus) in jaar	10			
Directe kosten monitoring [in M€/km/jaar]	0.03			
onzekerheid waterspanningsmeters (in m)	0.2			
onzekerheid extrapolatie	0.5			
Ontwerp en realisatie				
Bfact [m]	100			
Vaste versterkingskosten [M€]	0			
Aanbermingskosten BVK [M€/km] voor 10 m aanberming	0.5			
Ontwerpduur/ voorbereidingstijd [jaar]	1			
Bouwduur/ Voorbereidingstijd [jaar]	3			
Variatiecoefficient bouwduur [%]	0.01%			

A.3 Invoer Case 1c

Strategie 1 en Strategie 3:

Robamci LiveDijk: Ommelanderzeedijk v0.7	Algemeen	Scenario-afhankelijk		
		Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Algemeen effect op stabiliteitsfactor		LiveDijkXL: verwacht (gunstig)	Toetsing (ongunstig)	LiveDijkXL: resultaat (zeer gunstig)
Scenario kans		0.33	0.33	0.33
Algemene parameters Ommelanderzeedijk				
toetspeil TP [m tov NAP]	6			
overschrijdingskans toetspeil	0.00025			
normfrequentie [1/jaar]	0.00008			
decimeringshoogte DH [m]	0.6			
Lengte-effect factor [-]	8.67			
gevolgschade overstroming GO [M€]	1250			
Lengte afgekeurde dijkstrekking LD [km]	11.5			
discontopercentage	0.025			
gemiddelde economische groei	0			
Respons freatische lijn bij toetspeil				
basisligging freatische lijn h_fr;b [m tov NAP]		1	1	1
infiltratie regenbui, combinatiewaarde dh_fr;n [m]		0.5	0.5	0.25
responsfactor stormvloed FR [-]		0.6	0.8	0.25
$h_{fr} = h_{fr;b} + dh_{fr;n} + FR (TP - h_{fr;b})$ [m tov NAP]		4.5	5.5	2.5
Stabiliteitsfactor				
constante C1 [-]	-0.246			
constante C2 [-]	1.48			
$Stabfact\ bij\ toetspeil\ SFkd(TP) = C1 \cdot \ln(TP) + C2$ [-]		1.11	1.06	1.25
vereiste SFkd		1.04	1.04	1.04
Faalkans STBI				
constante A1 [-]	4			
constante A2 [-]	0.13			
$\beta = A1 + (SFkd - 1) / A2$		4.85	4.47	5.96
Faalkans Pf_STBI = standnormverd (-beta) [1/jaar]		6.29E-07	3.98E-06	1.27E-09
Ontwerpmarge ivm planperiode				
Veroudering sterkte VS [m/jaar], maaiveld daling	0.001			
Belastingtoename VB [m/jaar], zeespiegelrijzing	0.005			
afname stabiliteitsfactor/jaar	0.003			
variatiecoëfficiënt afname stabiliteitsfactor [in %]	0.0001%			
Planperiode N [jaar]	50			
toename verval dH = (VS + VB) · N [m]		0.30	0.30	0.30
constante M1 [-]	0.1			
achteruitgang stabiliteit dSFkd;plan = M1 · dH [-]		0.03	0.03	0.03
Opgave dSFkd;tot = dSFkd;act + dSFkd;plan [-]				
Kosten uitstel en monitoring KMT [M€]				
Duur monitoring [jaar]	3			
Startjaar monitoring na versterking(tijdens levenscyclus)	20			
Duur monitoring (tijdens levenscyclus) in jaar	10			
Directe kosten monitoring [in M€/km/jaar]	0.01			
onzekerheid waterspanningsmeters (in m)	0.2			
onzekerheid extrapolatie	0.5			
Ontwerp en realisatie				
Bfact [m]	100			
Vaste versterkingskosten [M€]	0			
Aanbermingskosten BVK [M€/km] voor 10 m aanberming	0.5			
Ontwerpduur/ voorbereidingstijd [jaar]	3			
Bouwduur/ Voorbereidingstijd [jaar]	3			
Variatiecoëfficiënt bouwduur [%]	0.01%			

B. Modelling case 1

```

1.  # -*- coding: utf-8 -*-
2.  """
3.  Created on Wed Sep 16 10:40:56 2015
4.
5.  @author: klerk
6.  @version: OZD v0.8
7.  """
8.  from __future__ import division
9.  import os
10. import sys
11. import numpy as np
12. from xlwings import Workbook, Range, Chart, Sheet
13. from scipy.stats import norm, lognorm, gumbel_r, rv_discrete, histogram
14.
15.
16. def main():
17.
18.     #Connect with active workbook
19.     wb = Workbook.caller()
20.
21.     #Read input from sheet and store in dictionary
22.     input = {}
23.     input['Scenario 1'] = {}; input['Scenario 2'] = {}; input['Scenario 3'] = {}; input['Constructio
n'] = {}; input['Economic'] = {}; input['Calculation'] = {}; input['Monitoring'] = {}
24.     input['Scenario 1']['P'] = Range('E5').value; input['Scenario 1']['FL'] = Range('E17:E19'
).value;
25.     input['Scenario 2']['P'] = Range('F5').value; input['Scenario 2']['FL'] = Range('F17:F19'
).value;
26.     input['Scenario 3']['P'] = Range('G5').value; input['Scenario 3']['FL'] = Range('G17:G19'
).value;
27.     input['Construction']['P_middle'] = Range('D9').value;
28.     input['Construction']['SF_relation'] = Range('D23:D24').value;
29.     input['Construction']['ageing'] = Range('D37:D38').value;
30.     input['Construction']['T_measure'] = Range('D46').value;
31.     input['Construction']['DikeLength'] = Range('D13').value;
32.     input['Construction']['T_prep'] = Range('D57').value;
33.     input['Construction']['T_build'] = Range('D58:D59').value;
34.     input['Construction']['T_design'] = Range('D39').value;
35.     input['Construction']['Toetspeil'] = Range('D7').value;
36.     input['Construction']['d10'] = Range('D10').value;
37.     input['Construction']['P_TP'] = Range('D8').value;
38.     input['Construction']['LengthEffFactor'] = 1./Range('D11').value; # TO DO
39.     input['Economic']['C_fix'] = Range('D55').value;
40.     input['Economic']['C_var'] = Range('D54').value * Range('D56').value * Range('D11').value
/10.;
41.     input['Economic']['r'] = Range('D14').value;
42.     input['Economic']['growth'] = Range('D15').value;
43.     input['Economic']['damage'] = Range('D12').value;
44.     input['Calculation']['t_calc'] = 201;
45.     input['Calculation']['n'] = 300;
46.     input['Calculation']['Sftobeta'] = Range('D29:D30').value;
47.     input['Calculation']['Strategy'] = Range('D61').value;
48.     input['Calculation']['Type'] = Range('C81').value;
49.     input['Monitoring']['startyear'] = Range('D47').value;
50.     input['Monitoring']['duration_mon'] = Range('D48').value;
51.     input['Monitoring']['cost_mon'] = Range('D49').value;
52.     input['Monitoring']['sigma_wsm'] = Range('D50').value;

```

```

53.     input['Monitoring']['extr_factor'] = Range('D51').value;
54.     if input['Calculation']['Strategy'] == "Strategie 1":
55.         input['Calculation']['outputsheetname'] = "1.output probabilistisch"
56.         input['Construction']['T_measure'] = 0;
57.     elif input['Calculation']['Strategy'] == 'Strategie 2':
58.         input['Calculation']['outputsheetname'] = '2. output monitor bij verst'
59.     elif input['Calculation']['Strategy'] == "Strategie 3":
60.         input['Calculation']['outputsheetname'] = '3. output monitor lifecycle'
61.         input['Construction']['T_measure'] = 0;
62.     else:
63.         print "ERROR!!!"
64.
65.     #DRAW MC SEEDS FOR RANDOM PARAMETERS:
66.     #Please note: this functionality is generally not used for randomizing ageing and building time, except for drawing scenario's.
67.     samples = {}; samples['current'] = {};
68.     samples['ageing'] = np.random.lognormal(logn_moments2lambda(input['Construction']['ageing'][0],input['Construction']['ageing'][0]*input['Construction']['ageing'][1]), logn_moments2zeta(input['Construction']['ageing'][0],input['Construction']['ageing'][0]*input['Construction']['ageing'][1]), input['Calculation']['n'])
69.     samples['T_build'] = np.random.lognormal(logn_moments2lambda(input['Construction']['T_build'][0],input['Construction']['T_build'][0]*input['Construction']['T_build'][1]), logn_moments2zeta(input['Construction']['T_build'][0],input['Construction']['T_build'][0]*input['Construction']['T_build'][1]), input['Calculation']['n'])
70.     if input['Calculation']['Type'] == "Pre-posterior":
71.         samples['Scenario'] = rv_discrete(values = ([1, 2, 3], [input['Scenario 1']['P'], input['Scenario 2']['P'], input['Scenario 3']['P']])).rvs(size = input['Calculation']['n'])
72.     elif input['Calculation']['Type'] == "Scenario 1":
73.         samples['Scenario'] = rv_discrete(values = ([1, 2, 3], [1, 0, 0])).rvs(size = input['Calculation']['n'])
74.     elif input['Calculation']['Type'] == "Scenario 2":
75.         samples['Scenario'] = rv_discrete(values = ([1, 2, 3], [0, 1, 0])).rvs(size = input['Calculation']['n'])
76.     elif input['Calculation']['Type'] == "Scenario 3":
77.         samples['Scenario'] = rv_discrete(values = ([1, 2, 3], [0, 0, 1])).rvs(size = input['Calculation']['n'])
78.
79.     #Pre-allocate arrays
80.     SF_total = np.empty((input['Calculation']['t_calc'],input['Calculation']['n'])); WL_total = np.empty((input['Calculation']['t_calc'],input['Calculation']['n'])); P_f_total = np.empty((input['Calculation']['t_calc'], input['Calculation']['n'])); cost_total = np.empty((input['Calculation']['t_calc'],input['Calculation']['n'])); P_f_act_total = np.empty((input['Calculation']['t_calc'],input['Calculation']['n']));
81.     scen_probs = np.empty((input['Calculation']['t_calc'],input['Calculation']['n']*3)); first_reinf = [];
82.
83.     #LOOP OVER SEEDS
84.     for j in range(0,input['Calculation']['n']):
85.         samples['current']['ageing'] = samples['ageing'][j]
86.         samples['current']['T_build'] = samples['T_build'][j]
87.         samples['current']['Scenario'] = samples['Scenario'][j]
88.         SF_relation, beta, P_f, cost, reinf, WL, P_posteriori, P_f_act, P_scen, first_reinf_y = MC_run(input, samples) #MonteCarlo run of 1 seed
89.
90.     #Store results
91.     P_f_act_total[:,j] = np.reshape(P_f_act,(input['Calculation']['t_calc']))
92.     P_f_total[:,j] = np.reshape(P_f,(input['Calculation']['t_calc']))
93.     SF_total[:,j] = (-norm.ppf(P_f_total[:,j])-
94.         input['Calculation']['SFtobeta'][0])*input['Calculation']['SFtobeta'][1]+1
95.     cost_total[:,j] = np.reshape(cost,(input['Calculation']['t_calc']))
96.     first_reinf = np.append(first_reinf,first_reinf_y)
97.     scen_probs[:,j*3:j*3+3] = P_scen

```



```

97.         progress = j
98.         if float(progress)/10 == np.ceil(int(progress)/10) and progress>0:
99.             Range('Invoer & resultaten', 'M18').value = str(round(100*(progress+1)/(input['Calculation']
100.             )['n']))) + "% compleet"
101.
102.         #Write results to Excel, depending on used strategy:
103.         if input['Calculation']['Strategy'] == "Strategie 2":
104.             WL_total[:,j] = np.reshape(WL,(input['Calculation']['t_calc']))
105.             WriteOutput(SF_total, P_f_total, P_f_act_total, cost_total, WL_total, input, samples['Scenario']
106.             ], first_reinf)
107.         elif input['Calculation']['Strategy'] == "Strategie 1":
108.             WriteOutput(SF_total, P_f_total, P_f_act_total, cost_total, WL_total, input, samples['Scenario']
109.             ], first_reinf)
110.         elif input['Calculation']['Strategy'] == "Strategie 3":
111.             WL_total[:,j] = np.reshape(WL,(input['Calculation']['t_calc']))
112.             WriteOutput(SF_total, P_f_total, P_f_act_total, cost_total, WL_total, input, samples['Scenario']
113.             ], first_reinf)
114.
115.
116.
117.
118.
119.
120.
121.
122.
123.
124. def MC_run(input,samples):
125.     if samples['current']['Scenario'] == 1:
126.         scenario = input['Scenario 1']
127.     elif samples['current']['Scenario'] == 2:
128.         scenario = input['Scenario 2']
129.     elif samples['current']['Scenario'] == 3:
130.         scenario = input['Scenario 3']
131.     no_of_scenarios = 3
132.     # scenario = input['Scenario 3']
133.
134.     scenario_probs = np.zeros((no_of_scenarios,1))
135.     for i in range(0, no_of_scenarios):
136.         scenario_probs[i] = input['Scenario ' + str(i+1)]['P']
137.     scenario_probs = scenario_probs[:,]
138.
139.     FL = np.zeros((input['Calculation']['t_calc'], no_of_scenarios))
140.     SF = np.zeros((input['Calculation']['t_calc'], no_of_scenarios))
141.     cost = np.zeros((input['Calculation']['t_calc'], 1))
142.     beta_scen = np.zeros((input['Calculation']['t_calc'], no_of_scenarios))
143.     beta = np.zeros((input['Calculation']['t_calc'], 1))
144.     P_f = np.zeros((input['Calculation']['t_calc'], 1))
145.     P_f_act = np.zeros((input['Calculation']['t_calc'], 1))
146.     P_f_scen = np.zeros((input['Calculation']['t_calc'], no_of_scenarios))
147.     reinf = np.zeros((input['Calculation']['t_calc'], 1))
148.     SF_func = np.zeros((input['Calculation']['t_calc'], 2))
149.     WL = np.zeros((input['Calculation']['t_calc'], 1))
150.     FL_meas = np.zeros((input['Calculation']['t_calc'], 1))
151.     reinf_in_prep = 0
152.     last_reinf = -10
153.     P_posteriori = np.zeros((input['Calculation']['t_calc'],3))
154.     for i in range(0, input['Calculation']['t_calc']):
155.         #Autonomous development (ageing of dike)
156.         if i == 0:
157.             SF_func[i]= input['Construction']['SF_relation'][:,]
158.             for j in range(0, no_of_scenarios):
159.                 FL[i,j] = input['Scenario ' + str(j+1)]['FL'][0]+ input['Scenario ' + str(j+1)]['FL'][1
160.                 ] + input['Scenario ' + str(j+1)]['FL'][2] * (input['Construction']['Toetspeil'] -
161.                 input['Scenario ' + str(j+1)]['FL'][0])
162.             SF[i,j], beta_scen[i,j], P_f_scen[i,j] = FLtoP_f(SF_func[i],FL[i,j],input)
163.         #
164.         P_f[i] += P_f_scen[i,j]*input['Scenario ' + str(j+1)]['P']
165.         P_f[i] += P_f_scen[i,j]*scenario_probs[j]

```

```

153.         else:
154.             SF_func[i][0] = input['Construction']['SF_relation'][0]
155.             SF_func[i][1] = SF_func[i-1][1]-
samples['current']['ageing']
156.             for j in range(0, no_of_scenarios):
157.                 FL[i,j] = input['Scenario ' + str(j+1)]['FL'][0]+ input['Scenario ' + str(j+1)]['FL'][1
] + input['Scenario ' + str(j+1)]['FL'][2] * (input['Construction']['Toetspeil'] -
input['Scenario ' + str(j+1)]['FL'][0])
158.                 SF[i,j], beta_scen[i,j], P_f_scen[i,j] = FLtoP_f(SF_func[i],FL[i,j],input)

159. #                 P_f[i] += P_f_scen[i,j]*input['Scenario ' + str(j+1)]['P']
160.                 P_f[i] += P_f_scen[i,j]*scenario_probs[j]
161.                 P_posteriori[i,:] = np.reshape(scenario_probs,3)
162.
163.
164.         #Start preparing reinforcement:
165.         if float(P_f[i]) > input['Construction']['P_middle']*input['Construction']['LengthEffFactor'] a
nd reinf_in_prep == 0:
166.             if len(reinf)>round(i + input['Construction']['T_prep'] + samples['current']['T_build'] + i
nput['Construction']['T_measure'] )+1:
167.                 reinf[i + input['Construction']['T_prep'] + np.round(samples['current']['T_build']) + i
nput['Construction']['T_measure'] ] = 1
168.                 reinf_in_prep = 1
169.                 projmonitor_start = i
170.
171.         #MONITORING:
172.         if input['Calculation']['Strategy'] == "Strategie 2" and reinf_in_prep == 1 and i <= projmonito
r_start + input['Construction']['T_measure']:
173.             scen = {}; scen['P'] = {}; scen['FL'] = {}
174.             FL_real = scenario['FL']
175.             for j in range(0,no_of_scenarios):
176.                 scen['FL'][j]= input['Scenario ' + str(j+1)]['FL']
177.                 scen['P'][j] = scenario_probs[j]
178.                 P_posteriori[i,0], P_posteriori[i,1], P_posteriori[i,2], WL[i], FL_meas[i]= UpdatePhreaticL
evel(scen,input['Monitoring']['sigma_wsm'], input['Monitoring']['extr_factor'], FL_real, input['Constru
ction']['Toetspeil'], input['Construction']['d10'], input['Construction']['P_TP'],WL,FL_meas)
179.                 scenario_probs[0] = P_posteriori[i,0]
180.                 scenario_probs[1] = P_posteriori[i,1]
181.                 scenario_probs[2] = P_posteriori[i,2]
182.                 cost[i] += input['Monitoring']['cost_mon']*input['Construction']['DikeLength']
183.             elif input['Calculation']['Strategy'] == "Strategie 3" and i >=last_reinf + input['Monitoring']
['startyear'] and i <= last_reinf + input['Monitoring']['startyear'] + input['Monitoring']['duration_mo
n']:
184.                 scen = {}; scen['P'] = {}; scen['FL'] = {}
185.                 FL_real = scenario['FL']
186.                 for j in range(0,no_of_scenarios):
187.                     scen['FL'][j]= input['Scenario ' + str(j+1)]['FL']
188.                     scen['P'][j] = scenario_probs[j]
189.                     P_posteriori[i,0], P_posteriori[i,1], P_posteriori[i,2], WL[i], FL_meas[i]= UpdatePhreaticL
evel(scen,input['Monitoring']['sigma_wsm'], input['Monitoring']['extr_factor'], FL_real, input['Constru
ction']['Toetspeil'], input['Construction']['d10'], input['Construction']['P_TP'],WL,FL_meas)
190.                     scenario_probs[0] = P_posteriori[i,0]
191.                     scenario_probs[1] = P_posteriori[i,1]
192.                     scenario_probs[2] = P_posteriori[i,2]
193.                     cost[i] += input['Monitoring']['cost_mon']*input['Construction']['DikeLength']
194.
195.
196.         #Reinforcement:
197.         if reinf[i] == 1:
198.             if P_f[i] > input['Construction']['P_middle']*input['Construction']['LengthEffFactor']:
199.
if last_reinf <= 0:

```

```

200.         first_reinf_year = i
201.
202.         SF_des_scen = np.zeros([3])
203.         #Needed SF
204.         need_beta = -
            norm.ppf(input['Construction']['P_middle']*input['Construction']['LengthEffFactor'])
205.         beta_des = 0;
206.         while beta_des < need_beta-0.05 or beta_des > need_beta+0.05:
207.             P_f_des = 0
208.             if beta_des < need_beta:
209.                 SF_func[i][1] += 0.01
210.             else:
211.                 SF_func[i][1] -= 0.005
212.
213.             SF_des_scen = SF_func[i][0]*np.log(FL[i]) + SF_func[i][1]
214.             beta_scen[i] = input['Calculation']['SFtobeta'][0] + (SF_des_scen-
1)/input['Calculation']['SFtobeta'][1]
215.             P_f_scen_des = 1-norm.cdf(beta_scen[i])
216.             for j in range(0, no_of_scenarios):
217.                 P_f_des += P_f_scen_des[j]*scenario_probs[j] #input['Scenario ' + str(j+1)]['P'
]
218.             beta_des = -norm.ppf(P_f_des)
219.
220.             need_SF = (need_beta-
input['Calculation']['SFtobeta'][0])* input['Calculation']['SFtobeta'][1] +1
221.             SF_curr = (-norm.ppf(P_f[i])-
input['Calculation']['SFtobeta'][0])* input['Calculation']['SFtobeta'][1] +1
222.             dSF = need_SF -
SF_curr + samples['current']['ageing']*input['Construction']['T_design']*0.5
223.
224.             #reinforce
225.             SF_func[i][1] += samples['current']['ageing']*input['Construction']['T_design']
226.             P_f_scen[i] = 1-norm.cdf(beta_scen[i])
227.             P_f[i] = P_f_des
228.
229.             #pay
230.             cost[i] +=input['Economic']['C_fix'] + input['Economic']['C_var'] * dSF
231.             reinf_in_prep = 0
232.             last_reinf = i
233.             elif P_f[i] < input['Construction']['P_middle']*input['Construction']['LengthEffFactor']:
234.                 reinf_in_prep = 0
235.
236.         #Write output
237.         if scenario == input['Scenario 1']:
238.             P_f_act = P_f_scen[:,0]
239.         elif scenario == input['Scenario 2']:
240.             P_f_act = P_f_scen[:,1]
241.         elif scenario == input['Scenario 3']:
242.             P_f_act = P_f_scen[:,2]
243.
244.
245.         return SF_func, beta, P_f, cost, reinf, WL, P_posteriori, P_f_act, P_posteriori, first_reinf_year
246.
247.
248. def logn_moments2lambda(mu,sigma):
249.     zeta = logn_moments2zeta(mu, sigma);
250.     Lambda = np.log(mu) - float(zeta**2)/float(2);
251.     return Lambda
252.
253. def logn_moments2zeta(mu,sigma):
254.     Zeta = np.sqrt(np.log(1+(float(sigma)/float(mu))**2))
255.     return Zeta

```

```

256.
257. def UpdatePhreaticLevel(scen, stdev_meas, extrap_factor, FL_real, TP, d10, P_fail, WL_series, FL_series):
258.     #currently written for 3 scenarios, can be made adaptable in the future
259.     P_S1 = scen['P'][0]
260.     P_S2 = scen['P'][1]
261.     P_S3 = scen['P'][2]
262.
263.     #phreatic levels:
264.     FL_1 = scen['FL'][0]
265.     FL_2 = scen['FL'][1]
266.     FL_3 = scen['FL'][2]
267.
268.     [loc, scale] = MHWtoGumbel(TP, P_fail, d10)
269.     WL = gumbel_r(loc, scale)
270.     WL_obs = WL.rvs()
271.     WL_series[np.nonzero(WL_series)]
272.     FL = norm(FL_real[0] + FL_real[1]+FL_real[2]*(WL_obs-FL_real[0]), stdev_meas)
273.     FL_obs = FL.rvs()
274.     if WL_obs > np.max(WL_series): #MAKE NICER WITH LIKELIHOOD OF ALL OBSERVATIONS
275.         #S1: lijn onderschat
276.         sigma_lik = stdev_meas+(6-WL_obs)*extrap_factor
277.         S1_prior_FL = FL_1[0] + FL_1[1]+FL_1[2]*(WL_obs-FL_1[0])
278.         S2_prior_FL = FL_2[0] + FL_2[1]+FL_2[2]*(WL_obs-FL_2[0])
279.         S3_prior_FL = FL_3[0] + FL_3[1]+FL_3[2]*(WL_obs-FL_3[0])
280.         #
281.         P_m_S1 = (2*np.pi*sigma_lik**2)**(-1/2)*np.exp(-(FL_obs-S1_prior_FL)**2/(2*sigma_lik**2))
282.         P_m_S2 = (2*np.pi*sigma_lik**2)**(-1/2)*np.exp(-(FL_obs-S2_prior_FL)**2/(2*sigma_lik**2))
283.         P_m_S3 = (2*np.pi*sigma_lik**2)**(-1/2)*np.exp(-(FL_obs-S3_prior_FL)**2/(2*sigma_lik**2))
284.
285.         S1_posterior0 = P_S1*P_m_S1
286.         S2_posterior0 = P_S2*P_m_S2
287.         S3_posterior0 = P_S3*P_m_S3
288.         S1_post = S1_posterior0/(S1_posterior0+S2_posterior0+S3_posterior0)
289.         S2_post = S2_posterior0/(S1_posterior0+S2_posterior0+S3_posterior0)
290.         S3_post = S3_posterior0/(S1_posterior0+S2_posterior0+S3_posterior0)
291.     else:
292.         S1_post = P_S1; S2_post = P_S2; S3_post = P_S3;
293.     return S1_post, S2_post, S3_post, WL_obs, FL_obs
294.
295. def MHWtoGumbel(MHW, p, d):
296.     a = MHW + d * np.log(-(np.log(1-p))) / (np.log(-(np.log(1-p)))-np.log(-(np.log(1-p/10))))
297.     b = d / (np.log(-(np.log(1-p)))-np.log(-(np.log(1-p/10))))
298.     return a, b
299.
300. def WriteOutput(SF, P_f, P_f_act, cost, WL, input, scenario, first_reinf):
301.     t_calc = input['Calculation']['t_calc']
302.     #Costs and Discounting (Risk is based on UPSCALING of mechanism failure probability)
303.     econ_factor = np.reshape((1+input['Economic']['growth'])*np.linspace(0, t_calc-1, t_calc), (t_calc, 1)); disc_factor = np.reshape((1+input['Economic']['r'])*np.linspace(0, t_calc-1, t_calc), (t_calc, 1));
304.     risk = econ_factor*P_f_act*input['Economic']['damage']; cost_disc = cost/disc_factor; risk_disc = risk/disc_factor; NPV_total = cost_disc + risk_disc; NPV_sum = np.sum(NPV_total, axis=0)
305.
306.     #Extract percentile results based on NPV
307.     # NPV95 = np.percentile(NPV_sum, 95, interpolation='nearest'); NPV05 = np.percentile(NPV_sum, 05, interpolation='nearest'); NPV50 = np.percentile(NPV_sum, 50, interpolation='nearest')
308.     NPV95 = np.percentile(NPV_sum, 95, interpolation='nearest'); NPV05 = np.percentile(NPV_sum, 05, interpolation='nearest'); NPV50 = np.percentile(NPV_sum, 50, interpolation='nearest')
309.
310.     output = {}
311.     output['Time range'] = np.reshape(np.linspace(0, t_calc-1, t_calc), (t_calc, 1))

```

```

312.     output['Safety Factor'] = np.append(np.append(SF[:,(NPV_sum == NPV50).nonzero()[0][0]]
.reshape(t_calc,1), SF[:,(NPV_sum == NPV05).nonzero()[0][0]].reshape(t_calc,1),axis = 1), SF[:,(NPV_s
um == NPV95).nonzero()[0][0]].reshape(t_calc,1),axis=1)
313.     output['Failure Probability'] = np.append(np.append(P_f[:,(NPV_sum == NPV50).nonzero()[0][0]]
.reshape(t_calc,1), P_f[:,(NPV_sum == NPV05).nonzero()[0][0]].reshape(t_calc,1),axis = 1), P_f[:,(NPV_s
um == NPV95).nonzero()[0][0]].reshape(t_calc,1),axis=1)
314.     output['Absolute Cost'] = np.append(np.append(cost[:,(NPV_sum == NPV50).nonzero()[0][0]]
.reshape(t_calc,1), cost[:,(NPV_sum == NPV05).nonzero()[0][0]].reshape(t_calc,1),axis = 1), cost[:,(NP
V_sum == NPV95).nonzero()[0][0]].reshape(t_calc,1),axis=1)
315.     output['Total Absolute Cost'] = np.sum(output['Absolute Cost'],axis = 0)
316.
317.     output['Absolute Risk'] = np.append(np.append(risk[:,(NPV_sum == NPV50).nonzero()[0][0]]
.reshape(t_calc,1), risk[:,(NPV_sum == NPV05).nonzero()[0][0]].reshape(t_calc,1),axis = 1), risk[:,(NP
V_sum == NPV95).nonzero()[0][0]].reshape(t_calc,1),axis=1)
318.     output['Total Absolute Risk'] = np.sum(output['Absolute Risk'],axis = 0)
319.     output['Net Present Cost'] = np.append(np.append(cost_disc[:,(NPV_sum == NPV50).nonzero()[
0][0]].reshape(t_calc,1), cost_disc[:,(NPV_sum == NPV05).nonzero()[0][0]].reshape(t_calc,1),axis = 1),
cost_disc[:,(NPV_sum == NPV95).nonzero()[0][0]].reshape(t_calc,1),axis=1)
320.     output['Total Net Present Cost'] = np.sum(output['Net Present Cost'],axis = 0)
321.     output['Net Present Risk'] = np.append(np.append(risk_disc[:,(NPV_sum == NPV50).nonzero()[
0][0]].reshape(t_calc,1), risk_disc[:,(NPV_sum == NPV05).nonzero()[0][0]].reshape(t_calc,1),axis = 1),
risk_disc[:,(NPV_sum == NPV95).nonzero()[0][0]].reshape(t_calc,1),axis=1)
322.     output['Total Net Present Risk'] = np.sum(output['Net Present Risk'],axis = 0)
323.
324.     output['Net Present Value'] = output['Net Present Cost'] + output['Net Present Risk']
325.     output['Total Net Present Value'] = output['Total Net Present Cost'] + output['Total Net Present
Risk']
326.
327.     #WRITE TO EXCEL
328.     Range(input['Calculation']['outputsheetname'], 'A4').table.clear_contents()
329.     Range(input['Calculation']['outputsheetname'], 'A4').value = output['Time range']
330.     Range(input['Calculation']['outputsheetname'], 'B4').value = output['Safety Factor'] #Safety
Factor
331.     Range(input['Calculation']['outputsheetname'], 'E4').value = output['Failure Probability'] #Failur
e probability
332.     Range(input['Calculation']['outputsheetname'], 'H4').value = output['Absolute Cost']
333.     Range(input['Calculation']['outputsheetname'], 'H2').value = output['Total Absolute Cost']
334.     Range(input['Calculation']['outputsheetname'], 'K4').value = output['Absolute Risk']
335.     Range(input['Calculation']['outputsheetname'], 'K2').value = output['Total Absolute Risk']
336.     Range(input['Calculation']['outputsheetname'], 'N4').value = output['Net Present Cost']
337.     Range(input['Calculation']['outputsheetname'], 'N2').value = output['Total Net Present Cost']
338.     Range(input['Calculation']['outputsheetname'], 'Q4').value = output['Net Present Risk']
339.     Range(input['Calculation']['outputsheetname'], 'Q2').value = output['Total Net Present Risk']
340.     Range(input['Calculation']['outputsheetname'], 'T4').value = output['Net Present Value']
341.     Range(input['Calculation']['outputsheetname'], 'T2').value = output['Total Net Present Value']
342.     Range(input['Calculation']['outputsheetname'], 'X4').value = np.reshape(np.arange(1,len(scenario)+1
),(len(scenario),1))
343.     Range(input['Calculation']['outputsheetname'], 'Y4').value = np.reshape(scenario,[len(scenario), 1
])
344.     Range(input['Calculation']['outputsheetname'], 'Z4').value = np.reshape(first_reinf,[len(scenario),
1])
345.     Range(input['Calculation']['outputsheetname'], 'AA4').value= np.reshape(cost[first_reinf.astype(int
),range(0,len(scenario))], [len(scenario),1])
346.     Range(input['Calculation']['outputsheetname'], 'AB4').value= np.reshape(NPV_sum,[len(NPV_sum),1])
347.     # Make histograms
348.     cost_first_reinf = cost[first_reinf.astype(int),range(0,len(scenario))]
349.     histNPV = np.zeros((30,3)); histcost = np.zeros((30,3));
350.     for i in range(1,4):
351.         histNPV[:,i-1], NPVedges = Hist_data(i,30,[0, round(max(NPV_sum)*1.5)], NPV_sum, scenario)
352.         histcost[:,i-
1], costedges = Hist_data(i,30,[0, round(max(cost_first_reinf)*1.5)], cost_first_reinf, scenario)
353.

```

```

354.     Range(input['Calculation']['outputsheetname'], 'AD4').value= np.reshape(NPVedges,[len(NPVedges),1])
355.     Range(input['Calculation']['outputsheetname'], 'AE4').value= histNPV
356.     Range(input['Calculation']['outputsheetname'], 'AH4').value= np.reshape(costedges,[len(costedges),1
    ])
357.     Range(input['Calculation']['outputsheetname'], 'AI4').value= histcost
358.
359.
360.     if input['Calculation']['Strategy'] == "Strategie 1":
361.         #     Range('1. probabilistisch extra out', 'B2').value = "Kosten";
362.         Range('1. probabilistisch extra out', 'B' + str(input['Calculation']['t_calc']+3)).value = "Faa
    lkans";
363.         Range('1. probabilistisch extra out', 'B3').value = cost;
364.         Range('1. probabilistisch extra out', 'B' + str(input['Calculation']['t_calc']+4)).value = P_f;
365.
366.     elif input['Calculation']['Strategy'] == 'Strategie 2':
367.         Range('1. probabilistisch extra out', 'B2').value = "Kosten";
368.         Range('1. probabilistisch extra out', 'B' + str(input['Calculation']['t_calc']+3)).value = "Faa
    lkans";
369.         Range('2. monitor bij verst extra out', 'B3').value = cost;
370.         Range('2. monitor bij verst extra out', 'B' + str(input['Calculation']['t_calc']+4)).value = P_
    f;
371.     elif input['Calculation']['Strategy'] == "Strategie 3":
372.         Range('3. monitor lifecycle extra out', 'B2').value = "Kosten";
373.         Range('3. monitor lifecycle extra out', 'B' + str(input['Calculation']['t_calc']+3)).value = "F
    aalkans";
374.         Range('3. monitor lifecycle extra out', 'B3').value = cost;
375.         Range('3. monitor lifecycle extra out', 'B' + str(input['Calculation']['t_calc']+4)).value = P_
    f;
376.     else:
377.         print "ERROR!!!"
378.         Range('Invoer & resultaten', 'M18').value = "100% compleet"
379. #graph = dist.drawCDF()
380. #view = View(graph)
381. #view.show()
382. def Hist_data(scen, nbins, binrange, data, scenario):
383.     raw_data = data[np.where(scenario == scen)]
384.     hist, bin_edges = np.histogram(raw_data, bins = nbins, range = (binrange[0],binrange[1]), density =
    True)
385.
386.     return hist, bin_edges
387.
388. def FLtoP_f(SF_func,FL,input):
389.     SF = SF_func[0]*np.log(FL) + SF_func[1]
390.     beta_scen = input['Calculation']['SFtobeta'][0] + (SF-1)/input['Calculation']['SFtobeta'][1]
391.     P_f_scen = 1-norm.cdf(beta_scen)
392.     return SF, beta_scen, P_f_scen
393.
394. #This piece of code is used to call Excel from Python itself. So by running from Python it picks the in
    put values from Excel, calculates and adapts the figures in Excel.
395. #This piece is ignored when running from Excel (using the big button)
396. if __name__ == '__main__':
397.     # if not hasattr(sys, 'frozen'):
398.         # The next two lines are here to run the example from Python
399.         # Ignore them when called in the frozen/standalone version
400.     path = os.path.abspath(os.path.join(os.path.dirname(__file__), 'RobamciTool08_OZD.xlsm'))
401.     Workbook.set_mock_caller(path)
402.     main()

```

C. Modelling case 2

```

1.  # -*- coding: utf-8 -*-
2.  """
3.  Created on Wed Sep 16 10:40:56 2015
4.
5.  @author: klerk
6.  @version: Veessen v0.7
7.  """
8.  from __future__ import division
9.  import os
10. import numpy as np
11. from xlwings import Workbook, Range
12. from scipy.stats import norm, gumbel_r
13.
14.
15. def main():
16.     #READ INPUT and store in dictionary:
17.
18.     wb = Workbook.caller()
19.     #Safety standard
20.     input = {}
21.     input['Construction'] = {}; input['Economic'] = {}; input['Calculation'] = {}; input['Monitoring']
    = {}
22.     input['Construction']['P_middle'] = Range('D9').value;
23.     input['Construction']['ageing'] = Range('D24').value;
24.     input['Construction']['DikeLength'] = Range('D13').value;
25.     input['Construction']['T_prep'] = Range('D37').value;
26.     input['Construction']['T_build'] = Range('D38').value;
27.     input['Construction']['T_design'] = Range('D27').value;
28.     input['Construction']['Toetspeil'] = Range('D7').value;
29.     input['Construction']['d10'] = Range('D10').value;
30.     input['Construction']['P_TP'] = Range('D8').value;
31.     input['Construction']['FailSpace'] = Range('D14').value;
32.     input['Construction']['LengthEffFactor'] = 1./Range('D11').value;
33.     input['Construction']['P_f_initial'] = Range('D19').value;
34.     input['Construction']['P_f_n concept'] = Range('D20').value;
35.     input['Construction']['dh/dberm'] = Range('D28').value;
36.     input['Construction']['P_fDijk if DMC works'] = Range('D21').value;
37.     input['Construction']['factor DMC on P_fDijk'] = Range('D22').value;
38.
39.     input['Economic']['C_fix'] = Range('D34').value;
40.     input['Economic']['C_DMC'] = Range('D35').value;
41.     input['Economic']['Cunit_berm'] = Range('D13').value * Range('D32').value/10.; #cost per m
42.     input['Economic']['C_DMC B&O'] = Range('D42').value;
43.
44.     input['Economic']['r'] = Range('D15').value;
45.     input['Economic']['growth'] = Range('D16').value;
46.     input['Economic']['damage'] = Range('D12').value;
47.     input['Calculation']['t_calc'] = 201;
48.     input['Calculation']['n'] = 1;
49.     input['Calculation']['Strategy'] = Range('D45').value;
50.     input['Calculation']['OnlyDMC'] = Range('D39').value;
51.
52.     if input['Calculation']['Strategy'] == "Strategie 1":
53.         input['Calculation']['outputsheetname'] = "1.output DMC"
54.     elif input['Calculation']['Strategy'] == 'Strategie 2':
55.         input['Calculation']['outputsheetname'] = '2. output bermversterking'

```

```

56.     else:
57.         print "ERROR!!!"
58.         #DRAW MC SEEDS FOR RANDOM PARAMETERS: TO DO: BUILD IN AUTO RECOGNITION OF RANDOM PARAMETERS
59.         cost, P_f, reinf, h_repr = MC_run(input) #MonteCarlo run of 1 seed
60.         WriteOutput(cost, P_f, reinf, h_repr, input)
61.
62.     def MC_run(input):
63.
64.         cost = np.zeros((input['Calculation']['t_calc'], 1))
65.         P_f = np.zeros((input['Calculation']['t_calc'], 1))
66.         reinf = np.zeros((input['Calculation']['t_calc'], 1))
67.         reinf_in_prep = 0
68.         DMC_present = 0
69.
70.         h_repr = np.zeros((input['Calculation']['t_calc'], 1))
71.
72.         for i in range(0, input['Calculation']['t_calc']):
73.             [a, b] = MHWtoGumbel(input['Construction']['Toetspeil'], 1./1250, 0.4)
74.             h_dist = gumbel_r(a, b)
75.
76.             #Autonomous development (ageing of dike)
77.             if i == 0:
78.                 P_f[i] = input['Construction']['P_f_initial']
79.                 h_repr[i] = h_dist.ppf(1-P_f[i])
80.             else:
81.                 h_repr[i] = h_repr[i-1]-input['Construction']['ageing']
82.                 if DMC_present == 1:
83.                     P_f[i] = (1-
84. h_dist.cdf(h_repr[i])) * input['Construction']['P_f_DMC'] * input['Construction']['factor DMC on P_fDijk'] + input['Construction']['P_fDijk if DMC works']
85.                     cost[i] = input['Economic']['C_DMC B&O']/1000
86.                 else:
87.                     P_f[i] = (1-h_dist.cdf(h_repr[i]))
88.
89.             #Start preparing reinforcement:
90.             if float(P_f[i]) > input['Construction']['P_middle']*input['Construction']['LengthEffFactor']*input['Construction']['FailSpace'] and reinf_in_prep == 0:
91.                 if len(reinf)>round(i + input['Construction']['T_prep'] + input['Construction']['T_build'])
92. +1:
93.                     reinf[i + input['Construction']['T_prep'] + np.round(input['Construction']['T_build'])]
94. = 1
95.                     reinf_in_prep = 1
96.                 if DMC_present == 1 and i == DMC_year + input['Construction']['T_design']:
97.                     cost[i] += input['Economic']['C_DMC'] * input['Construction']['DikeLength']
98.                     DMC_year = i
99.                 #Reinforcement:
100.                 if reinf[i] == 1:
101.                     if input['Calculation']['Strategy'] == 'Strategie 1' and DMC_present == 0:
102.                         Factor_PF_ageing = input['Construction']['ageing']*input['Construction']['T_design']/input['Construction']['d10']
103.                     if input['Calculation']['OnlyDMC'] == 0:
104.                         P_f_design = (input['Construction']['P_middle']*input['Construction']['LengthEffFactor']*input['Construction']['FailSpace']/(10*(Factor_PF_ageing)))/input['Construction']['P_f_DMC']
105.                         h_design = h_dist.ppf(1-P_f_design)
106.                         dh = h_design-h_repr[i]
107.                         dberm = dh/input['Construction']['dh/dberm']
108.                     elif input['Calculation']['OnlyDMC'] == 1:
109.                         P_f_design = P_f[i]
110.                         dh = 0
111.                         dberm = 0
112.                     h_repr[i] = h_dist.ppf(1-P_f_design)

```



```

110.         P_f[i] = P_f[i] * input['Construction']['P_f_DMC'] * input['Construction']['factor DMC
on P_fDijk'] + input['Construction']['P_fDijk if DMC works'] # P_fDijk als DMC faalt *P_fDMC +P_fDijk a
ls DMC werkt
111.         reinf_in_prep =0
112.         DMC_present = 1
113.         DMC_year = i
114.         if dberm > 0:
115.             cost[i] += input['Economic']['C_fix'] + input['Economic']['Cunit_berm'] * dberm * +
input['Economic']['C_DMC'] * input['Construction']['DikeLength']
116.         else:
117.             cost[i] += input['Economic']['C_DMC'] * input['Construction']['DikeLength']
118.
119.         elif input['Calculation']['Strategy'] == 'Strategie 1' and DMC_present == 1: #IF DMC doesn
't meet standard anymore: improve with berm
120.             Factor_PF_ageing = input['Construction']['ageing']*input['Construction']['T_design']/in
put['Construction']['d10']
121.             P_f_design = (input['Construction']['P_middle']*input['Construction']['LengthEffFactor'
]*input['Construction']['FailSpace']/(10*(Factor_PF_ageing)))/input['Construction']['P_f_DMC']
122.             h_design = h_dist.ppf(1-P_f_design)
123.             dh = h_design-h_repr[i]
124.             dberm = dh/input['Construction']['dh/dberm']
125.             P_f[i] = P_f_design * input['Construction']['P_f_DMC'] * input['Construction']['factor
DMC on P_fDijk']
126.             h_repr[i] = h_dist.ppf(1-P_f_design)
127.             cost[i] += input['Economic']['C_fix'] + input['Economic']['Cunit_berm'] * dberm
128.             reinf_in_prep =0
129.         elif input['Calculation']['Strategy'] == 'Strategie 2':
130.             Factor_PF_ageing = input['Construction']['ageing']*input['Construction']['T_design']/in
put['Construction']['d10']
131.             P_f_design = input['Construction']['P_middle']*input['Construction']['LengthEffFactor']
*input['Construction']['FailSpace']/(10*(Factor_PF_ageing))
132.             h_design = h_dist.ppf(1-P_f_design)
133.             dh = h_design-h_repr[i]
134.             dberm = dh/input['Construction']['dh/dberm']
135.             P_f[i] = P_f_design
136.             h_repr[i] = h_design
137.             cost[i] += input['Economic']['C_fix'] + input['Economic']['Cunit_berm'] * dberm
138.             reinf_in_prep =0
139.
140.         return cost, P_f, reinf, h_repr
141.
142.
143. def logn_moments2lambda(mu,sigma):
144.     zeta = logn_moments2zeta(mu, sigma);
145.     Lambda = np.log(mu) - float(zeta**2)/float(2);
146.     return Lambda
147.
148. def logn_moments2zeta(mu,sigma):
149.     Zeta = np.sqrt(np.log(1+(float(sigma)/float(mu))**2))
150.     return Zeta
151.
152.
153. def MHWtoGumbel(MHW,p,d):
154.     a = MHW + d * np.log(-(np.log(1-p))) / (np.log(-np.log(1-p))-np.log(-np.log(1-p/10)))
155.     b = d /(np.log(-np.log(1-p))-np.log(-np.log(1-p/10)))
156.     return a, b
157.
158. def WriteOutput(cost, P_f, reinf, h_repr, input):
159.
160.     t_calc = input['Calculation']['t_calc']
161.     #Costs and Discounting (Risk is based on UPSCALING of mechanism failure probability)

```

```

162.     econ_factor = np.reshape((1+input['Economic']['growth'])*np.linspace(0,t_calc-
1,t_calc),(t_calc,1)); disc_factor = np.reshape((1+input['Economic']['r'])*np.linspace(0,t_calc-
1,t_calc),(t_calc,1));
163.     risk = econ_factor*P_f*input['Economic']['damage'];     cost_disc = cost/disc_factor;     risk_disc
= risk/disc_factor;     NPV_total = cost_disc + risk_disc;     NPV_sum = np.sum(NPV_total,axis=0)
164.
165.     #Extract percentile results based on NPV
166.     # NPV95 = np.percentile(NPV_sum, 95, interpolation='nearest');     NPV05 = np.percentile(NPV_sum,05,
interpolation='nearest');     NPV50 = np.percentile(NPV_sum,50,interpolation='nearest')
167.     NPV95 = np.percentile(NPV_sum, 95, interpolation='nearest');     NPV05 = np.percentile(NPV_sum,05,i
nterpolation='nearest');     NPV50 = np.percentile(NPV_sum,50,interpolation='nearest')
168.
169.     output = {}
170.     output['Time range'] = np.reshape(np.linspace(0,t_calc-1,t_calc),(t_calc,1))
171.     output['Failure Probability'] = np.append(np.append(P_f[:,(NPV_sum == NPV50).nonzero()[0][0]]
.reshape(t_calc,1), P_f[:,(NPV_sum == NPV05).nonzero()[0][0]].reshape(t_calc,1),axis = 1), P_f[:,(NPV_s
um == NPV95).nonzero()[0][0]].reshape(t_calc,1),axis=1)
172.     output['Absolute Cost'] = np.append(np.append(cost[:,(NPV_sum == NPV50).nonzero()[0][0]]
.reshape(t_calc,1), cost[:,(NPV_sum == NPV05).nonzero()[0][0]].reshape(t_calc,1),axis = 1), cost[:,(NP
V_sum == NPV95).nonzero()[0][0]].reshape(t_calc,1),axis=1)
173.     output['Total Absolute Cost'] = np.sum(output['Absolute Cost'],axis = 0)
174.
175.     output['Absolute Risk'] = np.append(np.append(risk[:,(NPV_sum == NPV50).nonzero()[0][0]]
.reshape(t_calc,1), risk[:,(NPV_sum == NPV05).nonzero()[0][0]].reshape(t_calc,1),axis = 1), risk[:,(NP
V_sum == NPV95).nonzero()[0][0]].reshape(t_calc,1),axis=1)
176.     output['Total Absolute Risk'] = np.sum(output['Absolute Risk'],axis = 0)
177.     output['Net Present Cost'] = np.append(np.append(cost_disc[:,(NPV_sum == NPV50).nonzero()[
0][0]].reshape(t_calc,1), cost_disc[:,(NPV_sum == NPV05).nonzero()[0][0]].reshape(t_calc,1),axis = 1),
cost_disc[:,(NPV_sum == NPV95).nonzero()[0][0]].reshape(t_calc,1),axis=1)
178.     output['Total Net Present Cost'] = np.sum(output['Net Present Cost'],axis = 0)
179.     output['Net Present Risk'] = np.append(np.append(risk_disc[:,(NPV_sum == NPV50).nonzero()[
0][0]].reshape(t_calc,1), risk_disc[:,(NPV_sum == NPV05).nonzero()[0][0]].reshape(t_calc,1),axis = 1),
risk_disc[:,(NPV_sum == NPV95).nonzero()[0][0]].reshape(t_calc,1),axis=1)
180.     output['Total Net Present Risk'] = np.sum(output['Net Present Risk'],axis = 0)
181.
182.     output['Net Present Value'] = output['Net Present Cost'] + output['Net Present Risk']
183.     output['Total Net Present Value'] = output['Total Net Present Cost'] + output['Total Net Present
Risk']
184.
185.     #WRITE TO EXCEL
186.     Range(input['Calculation']['outputsheetname'], 'A4').table.clear_contents()
187.     Range(input['Calculation']['outputsheetname'], 'A4').value = output['Time range']
188.     Range(input['Calculation']['outputsheetname'], 'B4').value = output['Failure Probability'] #Failur
e probability
189.     Range(input['Calculation']['outputsheetname'], 'E4').value = output['Absolute Cost']
190.     Range(input['Calculation']['outputsheetname'], 'E2').value = output['Total Absolute Cost']
191.     Range(input['Calculation']['outputsheetname'], 'H4').value = output['Absolute Risk']
192.     Range(input['Calculation']['outputsheetname'], 'H2').value = output['Total Absolute Risk']
193.     Range(input['Calculation']['outputsheetname'], 'K4').value = output['Net Present Cost']
194.     Range(input['Calculation']['outputsheetname'], 'K2').value = output['Total Net Present Cost']
195.     Range(input['Calculation']['outputsheetname'], 'N4').value = output['Net Present Risk']
196.     Range(input['Calculation']['outputsheetname'], 'N2').value = output['Total Net Present Risk']
197.     Range(input['Calculation']['outputsheetname'], 'Q4').value = output['Net Present Value']
198.     Range(input['Calculation']['outputsheetname'], 'Q2').value = output['Total Net Present Value']
199.
200.     if input['Calculation']['Strategy'] == "Strategie 1":
201.         Range('1. DMC extra out', 'B2').value = "Kosten";
202.         Range('1. DMC extra out', 'B' + str(input['Calculation']['t_calc']+3)).value = "Faalkans";
203.         Range('1. DMC extra out', 'C3').value = cost;
204.         Range('1. DMC extra out', 'C' + str(input['Calculation']['t_calc']+4)).value = P_f;
205.

```

```

206.     elif input['Calculation']['Strategy'] == 'Strategie 2':
207.         Range('2. bermversterking extra out', 'B2').value = "Kosten";
208.         Range('2. bermversterking extra out', 'B' + str(input['Calculation']['t_calc']+3)).value = "Faalkans";
209.         Range('2. bermversterking extra out', 'C3').value = cost;
210.         Range('2. bermversterking extra out', 'C' + str(input['Calculation']['t_calc']+4)).value = P_f;
211.
212. def FLtoP_f(SF_func,FL,input):
213.     SF = SF_func[0]*np.log(FL) + SF_func[1]
214.     beta_scen = input['Calculation']['SFtobeta'][0] + (SF-1)/input['Calculation']['SFtobeta'][1]
215.     P_f_scen = 1-norm.cdf(beta_scen)
216.     return SF, beta_scen, P_f_scen
217.
218. #This piece of code is used to call Excel from Python itself. So by running from Python it picks the input values from Excel, calculates and adapts the figures in Excel.
219. #This piece is ignored when running from Excel (using the big button)
220. if __name__ == '__main__':
221.     # if not hasattr(sys, 'frozen'):
222.         # The next two lines are here to run the example from Python
223.         # Ignore them when called in the frozen/standalone version
224.     path = os.path.abspath(os.path.join(os.path.dirname(__file__), 'RobamciTool07_Veessen2.xlsm'))
225.     Workbook.set_mock_caller(path)
226.     main()
227.
228. #main();

```