Deltares

Veiligheidsrendement voor kunstwerken

Toepassing op traject 16-1

Veiligheidsrendement voor kunstwerken
Toepassing op traject 16-1

Auteur(s)
Karolina Wojciechowska

Veiligheidsrendement voor kunstwerken
Toepassing op traject 16-1

Opdrachtgever	Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (Samenwerken aan Kunstwerken)
Contactpersoon	Karin Klein
Referenties	-
Trefwoorden	-

Documentgegevens	
Versie	1.0
Datum	11-12-2024
Projectnummer	11209667-010
Document ID	11209667-010-ZWS-0003
Pagina's	67
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)		
	Karolina Wojciechowska Wouter Jan Klerk Nienke Kramer Ellen Tromp	

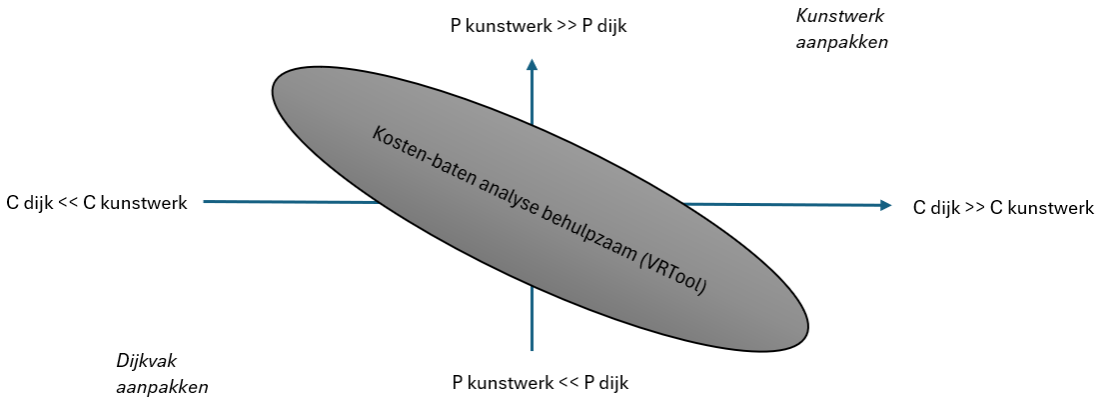
Management samenvatting

Het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) staat voor een enorme opgave: om overstromingen in Nederland te voorkomen, worden tot 2050 in heel Nederland ca. 1500 kilometer aan dijken en 328[1] waterkerende kunstwerken, zoals sluizen en gemalen versterkt.

In het kader van de HWBP-Innovaties wordt gewerkt aan de veiligheidsrendementmethode. De methode geeft een indicatie van logische versterkingsmaatregelen en de kosten daarvan, en is gebaseerd op een kosten-batenanalyse. De methode is geïmplementeerd in de VRTool en toegepast als pilot om dijkversterkingen in verschillende trajecten te optimaliseren. Tot nu toe was de veiligheidsrendementmethode gericht op dijkversterkingen.

Binnen het innovatieproject “Samenwerken aan Kunstwerken” wordt onderzocht of de methode ook voor kunstwerken toegepast kan worden en of het meenemen van kunstwerken tot andere dijkversterkingen zal leiden. Daarnaast was de wens om de conclusies van deze studie te vertalen naar een handelingsperspectief voor de kunstwerkenprogrammering en versterkingsprojecten.

Kunstwerken en dijken beschouwen met afstemming
Het kan gebeuren dat investeringen in kunstwerken investeringen in dijkvakken beïnvloeden (en andersom). Of een investering in een kunstwerk een investering in een dijkvak kan voorkomen, is naar verwachting sterk afhankelijk van: (1) de initiële faalkans van het kunstwerk in relatie tot de initiële faalkans van het dijkvak en (2) de verhouding tussen de kosten van het versterken van het dijkvak en de kosten van het versterken van het kunstwerk. Een systeembeschouwing op basis van veiligheidsrendement kan worden gebruikt om te onderbouwen of verbetering van het kunstwerk (of de dijk) doelmatig is. De toepassing van deze methode lijkt vooral interessant in situaties zoals geschetst in de onderstaande figuur[2]. In deze studie is dit figuur verder aangescherpt voor casus ‘traject 16-1’.



[1] Bron: Samenwerken aan Kunstwerken: waar staan we? Juni 2024.
[2] Hierin staat C voor “Costs” oftewel kosten en P voor de kans op falen.

De kans dat investeringen in kunstwerken investeringen in dijkvakken beïnvloeden (en andersom) is groter wanneer het faalmechanisme HTKW een rol speelt. Dit wordt naar verwachting veroorzaakt door de sterke correlatie tussen HTKW en GEKB. Vanuit het oogpunt van veiligheidsrendement is het daarom belangrijk om de versterkingen voor HTKW zo veel mogelijk samen met grondversterkingen voor GEKB te beschouwen, met name door de ontwerpeisen goed af te stemmen. Een andere belangrijke factor bij de afstemming van versterkingsprojecten (dijken en kunstwerken) is het moment waarop deze worden uitgevoerd.

Portfoliomanagement
Bij het faseren van projecten is het in de programmering doorgaans het meest (economisch) efficiënt om kunstwerken gelijktijdig met dijken te versterken. Dit levert doorgaans namelijk de grootste stijging van de veiligheid en de grootste daling van het overstromingsrisico op, en maximaliseert het rendement van de maatregelen.

Toch kan het verstandig zijn een investering in de kunstwerken in de planning naar voren te halen, als hiermee een relatief groot veiligheidstekort wordt opgelost. Een kosten-batenafweging, waarin de extra kosten van het naar voren halen van de investering worden afgezet tegen de baten van vermeden risicokosten van overstroming, kan inzicht bieden of dit economisch verstandig is.

Het uitstellen van de verbetering van kunstwerken met een groot veiligheidstekort tot ná een dijkversterking is daarentegen vanuit risicoperspectief doorgaans ineffectief en zal vaak leiden tot veel extra risicokosten, waardoor het, zelfs wanneer meekoppelen met bijvoorbeeld onderhoud tot kostenreductie leidt, economisch onrendabel wordt. In situaties waarin kunstwerken relatief kleine bijdragen aan de trajectfaalkans hebben, kan een kosten-batenafweging helpen bij het vaststellen of het uitstellen van de verbetering van kunstwerken economisch verstandig is.

Versterken van kunstwerken en veiligheidseisen
Bij het uitvoeren van projecten is het belangrijk dat de veiligheidseisen voor kunstwerken duidelijk zijn en afgestemd op de geplande dijkversterking (vooral met betrekking tot de hoogte) als onderdeel van de trajectaanpak.

De faalkansen van kunstwerken die resulteren uit de veiligheidsrendementmethode kunnen afwijken van de huidige faalkanseisen (conform LBO-1). Dit is overigens niet anders dan bij dijkvakken en komt doordat bij veiligheidsrendement sterk wordt gekeken naar de kosten voor marginale veiligheidswinst. Praktisch betekent dit dat bij het verbeteren van een kunstwerk goed naar de doelmatigheid moet worden gekeken, en dat niet te veel waarde gehecht moet worden aan de doorsnede-eisen die worden opgelegd: wanneer iets minder veiligheid kan worden gerealiseerd tegen veel lagere kosten, kan het voldoende zijn om het traject aan de wettelijke norm te laten voldoen. Andersom kan het vanuit het veiligheidsrendementperspectief ook nuttig zijn om relatief veilige kunstwerken te versterken wanneer er relatief goedkope maatregelen mogelijk zijn (bijvoorbeeld het aanbrengen van een eenvoudige lier om een deur op handkracht te sluiten of het oplassen van een extra plaat om de sterkte van een keermiddel te vergroten). Een veiligheidsrendementachtige analyse kan helpen om dergelijk maatwerk te onderbouwen.

Inhoud

	Management samenvatting	**4**
1	**Inleiding**	**8**
1.1	Context	8
1.2	Onderzoeksvraag	8
1.3	Doel	9
1.4	Terminologie	9
1.5	Leeswijzer	9
2	**Beschouwde kunstwerken in traject 16-1**	**10**
3	**Veiligheidsrendementmethode**	**13**
3.1	Versterkingsmaatregelen	14
3.2	Kosten versterkingsmaatregelen	14
3.3	Aanpak	15
3.4	Onderbouwing van de hypotheses	15
3.5	Rekenscenario's	16
4	**Resultaten**	**18**
4.1	Resultaten rekenscenario's	18
4.1.1	Scenario 1: gegevens conform LBO-1	18
4.1.2	Scenario 2: gegevens conform LBO-1 en versterking kunstwerken op T = 20 jaar	18
4.1.3	Scenario 3: faalkansen kunstwerken ruim groter dan de faalkanseisen op doorsnedeniveau bij de ondergrens	19
4.1.4	Scenario 4: faalkansen kunstwerken ruim groter dan de faalkanseisen op doorsnedeniveau bij de ondergrens en versterking kunstwerken op T = 20 jaar	19
4.1.5	Scenario 5: voldoende veiligheid voor HTKW	20
4.1.6	Scenario 6: voldoende veiligheid voor HTKW en versterking kunstwerken op T = 20 jaar	21
4.1.7	Scenario 7: faalkansen kunstwerken ruim groter dan de faalkanseisen op doorsnedeniveau bij de ondergrens en versterking dijken op T = 20 jaar	21
4.1.8	Scenario 8: faalkansen kunstwerken ruim groter dan de faalkanseisen op doorsnedeniveau bij de ondergrens en versterking dijken en kunstwerken op T = 20 jaar	22
4.2	Samenvatting rekenscenario's	22
4.3	Veiligheidseisen kunstwerken	25
5	**Handelingsperspectief**	**27**
5.1	Veiligheidsrendement binnen een traject met kunstwerken	27
5.1.1	Kunstwerken in de veiligheidsrendementmethode	27
5.1.2	Invloed investeringen kunstwerken	27
5.1.3	Veiligheid & risico op systeemniveau	30

5.2 Veiligheidseisen 32

6 Conclusies 33

A Betrouwbaarheid kunstwerken conform LBO-1 34

A.1 Grote Merwedesluis 34

A.2 Peulensluis 36

A.3 Recreatiesluis Lingehaven 37

B Betrouwbaarheid kunstwerken aangepast 39

B.1 Grote Merwedesluis 39

B.2 Peulensluis 41

B.3 Recreatiesluis Lingehaven 42

C Resultaten per scenario 44

C.1 Scenario 1 vs. Referentie 1 44

C.2 Scenario 1 vs. Referentie 2 46

C.3 Scenario 2 vs. Referentie 1 47

C.4 Scenario 2 vs. Referentie 2 49

C.5 Scenario 3 vs. Referentie 1 50

C.6 Scenario 3 vs. Referentie 2 52

C.7 Scenario 4 vs. Referentie 1 53

C.8 Scenario 4 vs. Referentie 2 55

C.9 Scenario 5 vs. Referentie 1 56

C.10 Scenario 5 vs. Referentie 2 58

C.11 Scenario 6 vs. Referentie 1 59

C.12 Scenario 6 vs. Referentie 2 61

C.13 Scenario 7 vs. Referentie 1 62

C.14 Scenario 7 vs. Referentie 2 63

C.15 Scenario 8 vs. Referentie 1 64

C.16 Scenario 8 vs. Referentie 2 65

1 Inleiding

1.1 Context

De veiligheidsopgave
Het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) staat voor een enorme opgave: om overstromingen in Nederland te voorkomen, worden tot 2050 in heel Nederland ca. 1500 kilometer aan dijken en 328[3] waterkerende kunstwerken, zoals sluizen en gemalen versterkt.

De veiligheidsrendementmethode
Op verschillende plekken binnen HWBP wordt gewerkt met de veiligheidsrendement-methodiek. Zo is binnen dijkversterkingsproject SAFE (Streefkerk-Ameide-Fort Everdingen) in de voorverkenningsfase gebruik gemaakt van de veiligheidsrendementmethode om de scope van de dijkversterking te bepalen. In de verkenningsfase is de methode uitgebreid om de optimale keuze te maken tussen de verschillende alternatieven die zijn afgewogen bij de bepaling van het voorkeursalternatief. Hierbij is zowel gekeken naar investeringen nu als over 20 jaar.

De essentie van de veiligheidsrendementmethode is dat door telkens, gegeven een uitgangssituatie, de beste volgende maatregel te bepalen een zeer effectieve investeringsvolgorde kan worden gevonden. Hoe goed een maatregel is wordt daarbij bepaald door de kosten-batenverhouding van de maatregel: hoeveel neemt het risico af per geïnvesteerde euro? Dit maakt de methode uitermate geschikt voor prioriteringsvraagstukken van systemen van waterkeringen, en daarmee ook van kunstwerken in waterkeringen. De methode geeft een indicatie van logische versterkingsmaatregelen en de kosten daarvan, en is gebaseerd op een kosten-batenanalyse. De baten zijn de reductie van het overstromingsrisico, uitgedrukt in de afname van de verwachte jaarlijkse schadekosten bij een overstroming. Het veiligheidsrendement is de veiligheidswinst die een versterkingsmaatregel oplevert ten opzichte van de kosten van de maatregelen.

De methode is geïmplementeerd in de VRTool (een rekenkernel) en toegepast als pilot om dijkversterkingen in verschillende trajecten te optimaliseren. Het is aangetoond dat het toepassen van de methode tot aanzienlijke kostenbesparingen leidt in vergelijking met de traditionele aanpak die op de faalkanseisen (elk dijkvak afzonderlijk versterken totdat aan de faalkanseis wordt voldaan) gebaseerd is.

1.2 Onderzoeksvraag

Tot nu toe was de veiligheidsrendementmethode gericht op dijkversterkingen. De vraag is of de methode ook voor kunstwerken toegepast kan worden en of het meenemen van kunstwerken tot andere dijkversterkingen zal leiden. Dat wordt in deze studie, onder de vlag van “Samenwerken aan Kunstwerken” onderzocht voor traject 16-1. Daarnaast is de wens om de conclusies van deze studie te vertalen naar een handelingsperspectief voor de kunstwerkenprogrammering en versterkingsprojecten.

[3] Bron: Samenwerken aan Kunstwerken: waar staan we? Juni 2024.

1.3 Doel

Deze studie heeft de volgende doelen:

(1) Het toepassen van de veiligheidsrendementmethode op versterkingen in traject 16-1 inclusief kunstwerken om hiermee de bruikbaarheid aan te tonen van de methode voor kunstwerken.

(2) Onderzoek naar de volgende hypotheses met behulp van de casus ‘traject 16-1’:

- De verwachting is dat het moment van investeringen in kunstwerken belangrijk is vanuit het veiligheids- en risicoperspectief.
- Vanuit de assemblagemethodiek (zoals gehanteerd in LBO-1 en LBO-2) wordt verwacht dat investeringen in kunstwerken investeringen in dijken kunnen voorkomen of uitstellen (en andersom). De kans hierop is groter als het faalmechanisme ‘Hoogte Kunstwerk’ (HTKW) een rol speelt.

(3) Vertalen van de resultaten van deze studie naar het generieke handelingsperspectief voor (i) de kunstwerkenprogrammering, (ii) versterkingsprojecten en fasering, (iii) veiligheidseisen voor kunstwerken en (iv) versterkingsmaatregelen voor kunstwerken.

1.4 Terminologie

De terminologie in dit rapport komt overeen met de terminologie die wordt gebruikt binnen LBO-1 (bijv. ondergrenswaarde, signaleringswaarde, faalkanseis op doorsnedeniveau, toetsspoor). In LBO-2 is de systematiek gewijzigd, evenals de terminologie. Omdat in dit rapport is gekozen voor consistentie met de eerdere studies over de veiligheidsrendement-methode, is ervoor gekozen om deze niet aan te passen naar de terminologie uit LBO-2.

1.5 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 presenteert de kunstwerken in traject 16-1. In hoofdstuk 3 wordt de veiligheidsrendementmethode gepresenteerd en worden de rekenscenario’s voor traject 16-1 gedefinieerd. In hoofdstuk 4 worden de resultaten van de rekenscenario’s gepresenteerd en geanalyseerd. Het handelingsperspectief wordt in hoofdstuk 5 weergegeven. De conclusies worden in hoofdstuk 6 samengevat.

2 Beschouwde kunstwerken in traject 16-1

In deze studie wordt traject 16-1, Alblasserwaard en de Vijfheerenlanden, beschouwd (zie Figuur 1). De signaleringswaarde voor het traject is 1/100,000 per jaar, de ondergrens is 1/30,000 per jaar.

Figuur 1 Ligging van traject 16-1 (bron: Waterveiligheidsportaal).

Conform de LBO-1 voldoet traject 16-1 ruim niet aan de signaleringswaarde en aan de ondergrens (veiligheidsoordeel D). Tabel 1 toont het veiligheidsoordeel per toetsspoor. Het traject is 15.06 km lang, waarvan 9.1 km niet voldoet aan Macrostabiliteit binnenwaarts (STBI), 5.8 km niet voldoet aan Grasbekleding erosie buitentalud (GEBU), en 0.3 km niet voldoet aan Piping (STPH).

Tabel 1 Veiligheidsoordeel per toetsspoor voor traject 16-1, conform LBO-1 (bron: Eerste Beoordeling Primaire Keringen Overstromingskans Veiligheidsoordeel dijktraject 16-1).

Toetsspoor	Code	Groep	Categorie
Piping	STPH	2	III_t
Grasbekleding erosie kruin en binnentalud	GEKB	1	III_t
Macrostabiliteit binnenwaarts	STBI	2	VI_t
Macrostabiliteit buitenwaarts	STBU	4	II_t
Microstabiliteit	STMI	4	II_t
Stabiliteit steenzetting	ZST	3	II_t
Grasbekleding erosie buitentalud	GEBU	3	VI_t
Grasbekleding afschuiven buitentalud	GABU	4	II_t
Grasbekleding afschuiven binnentalud	GABI	4	II_t
Hoogte kunstwerk	HTKW	1	II_t
Betrouwbaarheid sluiting kunstwerk	BSKW	1	II_t
Piping bij kunstwerk	PKW	2	II_t
Sterkte en stabiliteit puntconstructies	STKWp	1	II_t
Sterkte en stabiliteit langsconstructies	STKWl	4	II_t

In het dijktraject bevindt zich een 7-tal kunstwerken. In deze studie worden de volgende drie kunstwerken beschouwd (deze beschrijvingen komen uit de achtergrond rapporten van de LBO-1):

- **Grote Merwedesluis:** De Grote Merwedesluis is gelegen nabij Gorinchem en vormt de vaarverbinding voor beroeps- en recreatievaart tussen het Merwedekanaal en de Boven-Merwede. De sluis is dagelijks in gebruik als schutsluis voor de scheepvaart en daarnaast heeft de sluis als onderdeel van de primaire waterkering een hoogwaterkerende functie. De sluis wordt dagelijks bediend vanuit het naastgelegen bedieningsgebouw. Jaarlijks vinden ca. 10,000 schuttingen plaats. Bij buitenwaterstanden hoger dan NAP +4.20 m wordt het schutbedrijf stilgelegd. De schutdeuren en de stormvloeddeuren worden dan gesloten. Het peil tussen de stormdeuren en schutdeuren wordt opgezet (indien de waterstand lager is) tot NAP +4.20 m.

- **Recreatiesluis Lingehaven:** De Recreatiesluis Lingehaven is een schutsluis welke de Linge verbindt met de Boven Merwede en ligt in de binnenstad van Gorinchem. De sluis is dagelijks in gebruik als schutsluis voor recreatievaart in de periode van april tot en met oktober en op aanvraag in de periode van november tot en met maart. Daarnaast heeft de sluis als onderdeel van de primaire waterkering een hoogwaterkerende functie. De sluis wordt op locatie permanent bediend. Jaarlijks vinden ca. 8500 schuttingen plaats. Bij buitenwaterstanden hoger dan NAP +2.25 m wordt het schutbedrijf stilgelegd. Bij normaal bedrijf zijn de stalen schutdeuren van minimaal één van de sluishoofden gesloten. De houten deuren (2e kering) staan standaard open en worden preventief gesloten wanneer de sluis niet meer in bedrijf is als schutsluis.

- **Peulensluis:** de Peulensluis is een schutsluis welke de Beneden-Merwede verbindt met de Buiten-Giessen. De sluis wordt voor recreatiedoeleinden gebruikt, maar ook transport van goederen van en naar binnendijks gelegen bedrijven vindt plaats. De sluis is dagelijks in gebruik als schutsluis voor de scheepvaart en daarnaast heeft de sluis als onderdeel van de primaire waterkering een hoogwaterkerende functie. De sluis wordt permanent bediend vanuit het wachthuis en de lessenaars bij de schutkolk. Jaarlijks vinden ca. 3000 schuttingen plaats. Bij buitenwaterstanden hoger dan NAP +2.50 m wordt het schutbedrijf stilgelegd. Bij normaal bedrijf zijn de deuren van minimaal één van de sluishoofden gesloten.

Volgens de LBO-1 voldoen alle drie kunstwerken minimaal aan de faalkanseisen op doorsnedeniveau behorend bij de signaleringswaarde. Resultaten van de beoordeling worden in de volgende tabellen per kunstwerk weergegeven voor de vier faalmechanismen: Hoogte kunstwerk (HTKW), Betrouwbaarheid sluiting (BSKW), Piping (PKW) en Sterkte en stabiliteit puntconstructies (STKWp).

Tabel 2 Resultaten LBO-1 voor Grote Merwedesluis (bron: Eerste Beoordeling Primaire Keringen Overstromingskans Achtergrondrapportage Grote Merwedesluis).

	Signaleringswaarde		Ondergrenswaarde		Berekende		Cat.
	Faalkans	β	Faalkans	β	Faalkans	β	
Norm	1/100.000	4,27	1/30.000	3,99			
Hoogte (HTKW)	0,24*(1/100.000)/1 = 1/416.667	4,57	0,24*(1/30.000)/1 = 1/125.000	4,32	1/220.843.446	5,74	I_v
Betrouwbaarheid sluiting (BSKW)	0,04*(1/100.000)/3,5 = 1/8.750.000	5,18	0,04*(1/30.000)/3,5 = 1/2.625.000	4,95	1/87.000.079	5,59	II_v
Piping (PKW)	0,02*(1/100.000)/1 = 1/5.000.000	5,07	0,02*(1/30.000)/1 = 1/1.500.000	4,84	verwaarloosbaar	-	II_v
Sterkte en stabiliteit (STKWp)	0,02*(1/100.000)/3 = 1/15.000.000	5,28	0,02*(1/30.000)/3 = 1/4.500.000	5,05	1/39.777.826	5,45	II_v

Tabel 3 Resultaten LBO-1 voor Recreatiesluis Lingehaven (bron: Eerste Beoordeling Primaire Keringen Overstromingskans Achtergrondrapportage Recreatiesluis Lingehaven).

	Signaleringswaarde		Ondergrenswaarde		Berekende		Cat.
	Faalkans	β	Faalkans	β	Faalkans	β	
Norm	1/100.000	4,27	1/30.000	3,99			
Hoogte (HTKW)	0,24*(1/100.000)/1 = 1/416.667	4,57	0,24*(1/30.000)/1 = 1/125.000	4,32	1/646.290	4,66	IIv
Betrouwbaarheid sluiting (BSKW)	0,04*(1/100.000)/3,5 = 1/8.750.000	5,18	0,04*(1/30.000)/3,5 = 1/2.625.000	4,95	1/99.739.515	5,61	IIv
Piping (PKW)	0,02*(1/100.000)/1 = 1/5.000.000	5,07	0,02*(1/30.000)/1 = 1/1.500.000	4,84	-	-	IIv
Sterkte en stabiliteit (STKWp)	0,02*(1/100.000)/3 = 1/15.000.000	5,28	0,02*(1/30.000)/3 = 1/4.500.000	5,05	1/26.457.510	5,38	IIv

Tabel 4 Resultaten LBO-1 voor Peulensluis (bron: bron: Eerste Beoordeling Primaire Keringen Overstromingskans Achtergrondrapportage Peulensluis).

	Signaleringswaarde		Ondergrenswaarde		Berekende		Cat.
	Faalkans	β	Faalkans	β	Faalkans	β	
Norm	1/100.000	4,27	1/30.000	3,99			
Hoogte (HTKW)	0,24*(1/100.000)/1 = 1/416.667	4,57	0,24*(1/30.000)/1 = 1/125.000	4,32	1/704.175	4,68	IIv
Betrouwbaarheid sluiting (BSKW)	0,04*(1/100.000)/3,5 = 1/8.750.000	5,18	0,04*(1/30.000)/3,5 = 1/2.625.000	4,95	1/11.293.271	5,22	IIv
Piping (PKW)	0,02*(1/100.000)/1 = 1/5.000.000	5,07	0,02*(1/30.000)/1 = 1/1.500.000	4,84	voldoet	-	IIv
Sterkte en stabiliteit (STKWp)	0,02*(1/100.000)/3 = 1/15.000.000	5,28	0,02*(1/30.000)/3 = 1/4.500.000	5,05	1/368.355.278	5,83	IIv

3 Veiligheidsrendementmethode

In deze studie wordt de VeiligheidsRendement-Tool (VRTool) gebruikt voor de optimalisatie van versterkingen binnen traject 16-1. In de tool is de veiligheidsrendementmethode geïmplementeerd.

Veiligheidsrendementmethode

De veiligheidsrendementmethode geeft een indicatie van logische versterkingsmaatregelen en de kosten daarvan. De methodiek gebruikt een kosten-batenanalyse. De baten zijn de reductie van het overstromingsrisico, uitgedrukt in de afname van de verwachte jaarlijkse schadekosten bij een overstroming. Het veiligheidsrendement is de veiligheidswinst die een versterkingsmaatregel oplevert ten opzichte van de kosten van de maatregelen. Het fundament van de methode is een optimalisatiemethode die uit de vele mogelijke maatregelen op de verschillende dijkvakken de economisch optimale combinatie voor het dijktraject samenstelt. Zo bepaalt de methodiek voor ieder dijkvak welke maatregel op welk moment het meeste rendement oplevert, vanuit de waterveiligheid gezien.

Een analyse met de veiligheidsrendementmethode resulteert niet in een kant-en-klaar ontwerp van een waterkering of een kostenraming van een versterkingsproject. Zo is het ook niet bedoeld. De methodiek werkt beslisondersteunend, niet besluitnemend, en maakt de impact van verschillende keuzen duidelijk.

Bron: artikel “Bepaal rendement van dijkversterkingen”, L. Bogers & W.J. Klerk, Waterbouw, 5 september 2024

De VRTool verwacht per dijkvak/kunstwerk een lijst van versterkingsmaatregelen, de bijbehorende kosten en het effect van een versterkingsmaatregel op de veiligheid. Dat laatste wordt uitgedrukt in de faalkansen per faalmechanisme (ofwel een betrouwbaarheidsindex, beta).

In het vervolg van dit hoofdstuk presenteren we welke maatregelen voor de drie kunstwerken zijn beschouwd (paragraaf 3.1), de kosten van deze maatregelen (paragraaf 3.2), de gehanteerde aanpak (paragraaf 3.3), onderbouwing van de hypotheses (paragraaf 3.4) en de rekenscenario’s (paragraaf 3.5).

Zoals in hoofdstuk 2 al is opgemerkt, zijn de faalkansen van de drie kunstwerken kleiner dan de faalkanseisen op doorsnedeniveau bij de signaleringswaarde (conform LBO-1). Dit betekent dat deze kunstwerken nog niet versterkt hoeven te worden. In deze studie zijn verschillende rekenscenario’s beschouwd (zie paragraaf 3.5). In enkele van deze scenario’s zijn de faalkansen van de kunstwerken aangepast naar grotere fictieve waarden, om relevante conclusies in deze studie te kunnen trekken.

3.1 Versterkingsmaatregelen

In deze studie worden voor de kunstwerken de volgende versterkingsmaatregelen beschouwd:

- Verhogen kerende hoogte (+0.5 m, +1.0 m, +1.5 m)
- Verkleinen kans op niet sluiten P_{ns} (x 1/10, x 1/100, x 1/1000 per sluitvraag)
- Verbeteren constructieve sterkte (kritieke sterkte constructie volgens de lineaire belastingschematisatie +10 kN/m^2, +20 kN/m^2, +30 kN/m^2)

Ook worden verschillende combinaties van de maatregelen in overweging genomen, bijvoorbeeld: kerende hoogte +0.5 m EN kans op niet sluiten 10 keer kleiner EN de constructieve sterkte 10 kN/m^2 hoger.

Het effect van de versterkingsmaatregelen op de faalkans van de kunstwerken wordt met Hydra-Ring (BOI) doorgerekend. Hierbij wordt opgemerkt dat het verhogen van de kerende hoogte effect heeft op HTKW, het verkleinen van de kans op niet sluiten effect heeft op BSKW, en het verbeteren van de constructieve sterkte effect heeft op STKWp.

In de analyse wordt het faalmechanisme PKW niet beschouwd, en er worden dus geen versterkingsmaatregelen gedefinieerd die effect hebben op dit faalmechanisme.

3.2 Kosten versterkingsmaatregelen

De kosten van de versterkingsmaatregelen zijn op basis van expert judgement ingeschat en zijn fictief. De onderstaande tabel toont de kosten voor de Grote Merwedesluis. Aangenomen wordt dat de kosten voor de Recreatiesluis Lingehaven en de Peulensluis respectievelijk 3 en 10 keer lager zijn.

Tabel 5 Kosten van de versterkingsmaatregelen zoals aangenomen voor de Grote Merwedesluis op basis van expert judgement.

Maatregel	Kosten in euro	Toelichting
Kerende hoogte + 0.5 m	175 k	-
Kerende hoogte + 1.0 m	1 mln	-
Kerende hoogte + 1.5 m	3 mln	In dit geval moeten mogelijk ook de fundamenten worden aangepast
Pns / 10	15 k	Bijv. een extra voorziening om op handkracht te sluiten
Pns / 100	0.5 mln	Redundantie
Pns / 1000	5 mln	Extra keer middel nodig
Constructieve sterkte + 10 kN/m^2	175 k	-
Constructieve sterkte + 20 kN/m^2	1 mln	-
Constructieve sterkte + 30 kN/m^2	3 mln	In dit geval moeten mogelijk ook de fundamenten worden aangepast

3.3 Aanpak

In deze studie wordt uitgegaan van een bestaand VRTool-project voor traject 16-1. Dit project is ontwikkeld in het kader van een pilot naar de toepassing van de veiligheids-rendementmethode. Het project is gebaseerd op de LBO-1-resultaten voor STBI, GEKB en STPH en bevat verschillende versterkingsmaatregelen. In het project zijn dijkbekledingen niet meegenomen.

De VRTool is gericht op dijkvakken en biedt momenteel geen ondersteuning voor kunstwerken. In deze studie zijn de drie kunstwerken toegevoegd aan het bestaande VRTool-project voor traject 16-1 als extra dijkvakken. Voor deze nieuwe “dijkvakken” zijn versterkingsmaatregelen via de optie “custom measures” aan het project toegevoegd. Daarnaast zijn de faalkansen van de kunstwerken als volgt meegenomen in het VRTool-project: HTKW als GEKB, BSKW als STPH, en STKWp als STBI.

Voor het combineren van resultaten per vak en faalmechanisme naar een trajectfaalkans gebruikt de VRTool een methodiek die is gebaseerd op de assemblagemethodiek uit LBO-1 en LBO-2. Door de kunstwerken als dijkvakken te beschouwen, worden ze als volgt meegenomen bij het bepalen van de gecombineerde faalkansen voor GEKB, STPH en STBI:

- Bij het bepalen van de gecombineerde faalkans voor GEKB wordt uitgegaan van volledige correlatie tussen dijkvakken (de gecombineerde faalkans is gelijk aan het maximum van de faalkansen per vak). Dit impliceert een sterke correlatie tussen HTKW en GEKB, wat overeenkomt met de werkelijkheid.
- Bij het bepalen van de gecombineerde faalkans voor STPH en STBI worden dijkvakken als onafhankelijk van elkaar beschouwd (de gecombineerde faalkans is grofweg gelijk aan de som van de faalkansen per vak). Dit betekent dat BSKW en STKWp als onafhankelijk worden behandeld, wat in lijn is met de benadering binnen LBO-1 en LBO-2.

3.4 Onderbouwing van de hypotheses

In paragraaf 1.3 worden twee hypotheses genoemd. Deze worden als volgt onderbouwd.

Vanuit de assemblagemethodiek (zoals gehanteerd in LBO-1 en LBO-2) wordt verwacht dat investeringen in kunstwerken investeringen in dijken kunnen voorkomen of uitstellen (en andersom). Dijktrajecten met kunstwerken wijken conceptueel namelijk niet af van dijktrajecten zonder kunstwerken. Zowel vanuit de dijkvakken (grondlichamen) als de kunstwerkvakken worden faalkansbijdragen per faalmechanisme geleverd welke in meer (bijvoorbeeld GEKB en HTKW) of mindere (bijna alle overige faalmechanismen) mate gecorreleerd zijn. Er is vanuit de theorie van assemblage daarom geen noodzaak om dijktrajecten met kunstwerken anders te behandelen dan dijktrajecten zonder kunstwerken. Ook in de praktijk kunnen ze in de VRM-tool worden meegenomen. Zoals in de vorige paragraaf is uitgelegd, is dit in deze casestudy gedaan door ze te schematiseren als dijkvakken, hetgeen het bovenstaande onderstreept.

De kans dat investeringen in kunstwerken investeringen in dijken kunnen beïnvloeden en omgekeerd is groter als het faalmechanisme ‘Hoogte Kunstwerk’ (HTKW) een rol speelt. Dit komt doordat de faalmechanismen HTKW en GEKB sterk gecorreleerd zijn. Dat betekent dat het zwakste vak van een van beide faalmechanismen direct bepalend is voor de maximale faalkans voor het gehele faalmechanisme op trajectniveau. Omdat GEKB en HTWK relatief veel bijdragen aan de faalkans op trajectniveau, kan HTKW een aanzienlijke invloed hebben op versterkingsmaatregelen die in dijkvakken worden genomen.

Dit in tegenstelling tot BSKW en STKWp, waarin vakken als onafhankelijk worden beschouwd en daardoor minder invloed hebben. In paragraaf 5.1.2 is dit toegelicht met een rekenvoorbeeld.

3.5 Rekenscenario's

De hypotheses uit paragraaf 1.3 worden in deze studie onderzocht aan de hand van acht rekenscenario's.

Voor de eerste hypothese is het essentieel om verschillende investeringsmomenten (in dijken en kunstwerken) mee te nemen in de analyse. Voor de tweede hypothese is het belangrijk om het faalmechanisme HTKW buiten beschouwing te laten (zoals in Scenario 5 en Scenario 6), oftewel te veronderstellen dat dit mechanisme niet bijdraagt aan de trajectfaalkans.

Het is belangrijk op te merken dat Scenario 1 en Scenario 2 uitgaan van de faalkansen voor de kunstwerken volgens LBO-1; deze faalkansen zijn erg klein. In de overige scenario's zijn de faalkansen van de kunstwerken aangepast naar grotere fictieve waarden om binnen deze studie relevante resultaten te kunnen verkrijgen.

- **Scenario 1:** de faalkansen van de kunstwerken voldoen minimaal aan de faalkanseisen op doorsnedeniveau bij de signaleringswaarde (conform LBO-1).
- **Scenario 2:** gelijk aan scenario 1, behalve dat de versterking van kunstwerken in T = 20 jaar mogelijk is.
- **Scenario 3:** de invoergegevens van de kunstwerken zijn aangepast zodat de resulterende faalkansen van de kunstwerken ruimschoots groter zijn dan de faalkanseisen op doorsnedeniveau behorend bij de ondergrens.
- **Scenario 4:** gelijk aan scenario 3, behalve dat de versterking van kunstwerken in T = 20 jaar mogelijk is.
- **Scenario 5:** gelijk aan scenario 3, behalve dat de faalkansen voor HTKW ruim voldoen aan de faalkanseis op doorsnedeniveau bij de signaleringwaarde.
- **Scenario 6:** gelijk aan scenario 3, behalve dat de faalkansen voor HTKW ruim voldoen aan de faalkanseis op doorsnedeniveau bij de signaleringwaarde en dat de versterking van kunstwerken in T = 20 jaar mogelijk is.
- **Scenario 7:** gelijk aan scenario 3, behalve dat de versterking van dijken in T = 20 jaar mogelijk is.
- **Scenario 8:** gelijk aan scenario 3, behalve dat de versterking van dijken en kunstwerken in T = 20 jaar mogelijk is.

Bijlage A presenteert de betrouwbaarheid van de drie kunstwerken conform de LBO-1 (scenario's 1 en 2). Bijlage B geeft de aangepaste situatie weer, die voor scenario's 3 t/m 8 van toepassing is.

De belangrijkste aannames per scenario's worden nogmaals in de volgende tabel samengevat.

Tabel 6 Rekenscenario's zoals beschouwd in deze studie (T_{dijken} = investeringsmoment in dijkvakken, T_{KW} = investeringsmoment in kunstwerken, >> ondergrens = faalkans ruim groter dan de faalkanseis op doorsnedeniveau bij de ondergrenswaarde, << signaleringswaarde = faalkans ruim kleiner dan de faalkanseis op doorsnedeniveau bij de signaleringswaarde).

S.	T_{dijken}*	T_{KW}	Faalkans HTKW	Faalkans BSKW	Faalkans STKWp	Faalkans PKW
1	0	0	Conform LBO-1	Conform LBO-1	Conform LBO-1	n.v.t.
2	0	20	Conform LBO-1	Conform LBO-1	Conform LBO-1	n.v.t.
3	0	0	>> ondergrens	>> ondergrens	>> ondergrens	n.v.t.
4	0	20	>> ondergrens	>> ondergrens	>> ondergrens	n.v.t.
5	0	0	<< signaleringswaarde	>> ondergrens	>> ondergrens	n.v.t.
6	0	20	<< signaleringswaarde	>> ondergrens	>> ondergrens	n.v.t.
7	20	0	>> ondergrens	>> ondergrens	>> ondergrens	n.v.t.
8	20	20	>> ondergrens	>> ondergrens	>> ondergrens	n.v.t.

(*) T_{dijken} = 0 geldt voor alle maatregelen, behalve grondversterkingen (deze kunnen op T = 0 of T = 20 jaar plaatsvinden), T_{dijken} = 20 geldt voor alle maatregelen (ook grondversterkingen dus).

Om te onderzoeken hoe investeringen in kunstwerken investeringen in dijken kunnen beïnvloeden, is het noodzakelijk de resultaten van de rekenscenario's (met maatregelen voor zowel kunstwerken als dijken) te vergelijken met een referentiesituatie waarin geen investeringen in kunstwerken plaatsvinden. In deze studie maken we een onderscheid tussen twee referentiesituaties:

- **Referentie 1:** optimalisatie van investeringen in traject 16-1 wordt zonder kunstwerken uitgevoerd, de kunstwerken dus dragen niet bij aan de trajectfaalkans.

- **Referentie 2:** optimalisatie van investeringen in traject 16-1 wordt zonder versterkingsmaatregelen voor kunstwerken uitgevoerd, maar de kunstwerken dragen wel bij aan de trajectfaalkans.

4 Resultaten

In paragraaf 4.1 worden de resultaten van de veiligheidsrendementmethode gepresenteerd voor de verschillende rekenscenario's. In de analyse wordt vooral aandacht besteed aan de minimale totale kosten (het eindresultaat van de optimalisatie, bestaande uit de kosten van de genomen maatregelen en het overstromingsrisico) en aan het effect van het meenemen van maatregelen voor de kunstwerken op de optimale dijkversterking. De gedetailleerde resultaten per scenario worden in Bijlage C weergegeven. Paragraaf 4.2 geeft een samenvatting van de resultaten weer. In paragraaf 4.3 wordt aandacht besteed aan de veiligheidseisen voor kunstwerken.

4.1 Resultaten rekenscenario's

4.1.1 Scenario 1: gegevens conform LBO-1

De volgende tabel toont de minimale totale kosten voor scenario 1 en de twee referentiesituaties.

Berekening	Minimale totale kosten
Referentie 1: Zonder kunstwerken	€ 115,081,785
Referentie 2: Geen maatregelen voor kunstwerken	€ 117,439,189
Met maatregelen voor kunstwerken	€ 115,469,432

Als de kunstwerken niet bijdragen aan de trajectfaalkans (Referentie 1), bedragen de minimale totale kosten ca. 115 miljoen euro. Wanneer de kunstwerken wel worden meegenomen bij het bepalen van de trajectfaalkans, maar er geen maatregelen voor de kunstwerken worden genomen (Referentie 2), bedragen de totale kosten ca. 117 miljoen euro. Dit resulteert in een beperkte stijging van ongeveer 2 miljoen euro ten opzichte van Referentie 1, omdat de faalkansen van de kunstwerken ruim voldoen aan de faalkanseisen op doorsnedeniveau bij de signaleringswaarde.

Het opnemen van maatregelen voor de kunstwerken in de optimalisatie resulteert in minimale totale kosten van circa 115 miljoen euro. Deze optimalisatie leidt tot maatregelen voor de Recreatiesluis Lingehaven en Peulensluis – beide kunstwerken zijn zwakker dan de Grote Merwedesluis voor HTKW en hebben tegelijkertijd lagere versterkingskosten. De resulterende dijkversterkingen komen overeen met de versterkingen die zijn gevonden in zowel Referentie 1 als Referentie 2.

4.1.2 Scenario 2: gegevens conform LBO-1 en versterking kunstwerken op T = 20 jaar

De volgende tabel toont de minimale totale kosten voor scenario 2 en de twee referentiesituaties.

Berekening	Minimale totale kosten
Referentie 1: Zonder kunstwerken	€ 115,081,785
Referentie 2: Geen maatregelen voor kunstwerken	€ 117,439,189
Met maatregelen voor kunstwerken	€ 116,440,291

Het opnemen van maatregelen voor de kunstwerken in de optimalisatie resulteert in minimale totale kosten van ca. 116 miljoen euro, iets hoger dan voor Scenario 1, aangezien de versterking van kunstwerken pas in T = 20 jaar mogelijk is. De optimalisatie leidt tot maatregelen voor de Recreatiesluis Lingehaven en Peulensluis, net als in Scenario 1. De resulterende dijkversterkingen zijn echter identiek aan die voor Referentie 1 en Referentie 2.

4.1.3 Scenario 3: faalkansen kunstwerken ruim groter dan de faalkanseisen op doorsnedeniveau bij de ondergrens

De volgende tabel toont de minimale totale kosten voor scenario 3 en de twee referentiesituaties.

Berekening	Minimale totale kosten
Referentie 1: Zonder kunstwerken	€ 115,081,785
Referentie 2: Geen maatregelen voor kunstwerken	€ 1,049,360,929
Met maatregelen voor kunstwerken	€ 119,103,467

Als de kunstwerken niet bijdragen aan de trajectfaalkans (Referentie 1), bedragen de minimale totale kosten ca. 115 miljoen euro. Wanneer de kunstwerken wel worden meegenomen bij het bepalen van de trajectfaalkans, maar er geen maatregelen voor worden getroffen (Referentie 2), stijgen de totale kosten naar ca. 1 miljard euro. Dit is aanzienlijk meer dan in Referentie 1, omdat het overstromingsrisico van traject 16-1 in dit geval wordt gedomineerd door de onveilige kunstwerken. In dit scenario zijn de faalkansen van de kunstwerken namelijk ruim groter dan de faalkanseisen op doorsnedeniveau bij de ondergrens.

Het meenemen van maatregelen voor de kunstwerken in de optimalisatie resulteert in minimale totale kosten van ca. 119 miljoen euro. Er worden maatregelen voor alle drie kunstwerken toegepast. De resulterende dijkversterkingen zijn wel identiek aan die uit Referentie 1.

De optimalisatie met maatregelen voor de kunstwerken leidt, in vergelijking met Referentie 2, tot aanzienlijk andere dijkversterkingen. Zo wordt er vooral meer grondversterking toegepast, en verandert soms het investeringsmoment. Dit resultaat komt overeen met de verwachtingen. In Referentie 2 is investeren in dijken niet altijd zinvol, omdat het overstromingsrisico voornamelijk wordt bepaald door de onveilige kunstwerken. Pas wanneer deze kunstwerken worden aangepakt, renderen de dijkversterkingen ook daadwerkelijk.

4.1.4 Scenario 4: faalkansen kunstwerken ruim groter dan de faalkanseisen op doorsnedeniveau bij de ondergrens en versterking kunstwerken op T = 20 jaar

De volgende tabel toont de minimale totale kosten voor scenario 4 en de twee referentiesituaties.

Berekening	Minimale totale kosten
Referentie 1: Zonder kunstwerken	€ 115,081,785
Referentie 2: Geen maatregelen voor kunstwerken	€ 1,049,360,929
Met maatregelen voor kunstwerken	€ 233,389,413

Als de kunstwerken niet bijdragen aan de trajectfaalkans (Referentie 1), bedragen de minimale totale kosten ca. 115 miljoen euro. Wanneer de kunstwerken wel worden meegenomen bij het bepalen van de trajectfaalkans, maar er geen maatregelen voor worden getroffen (Referentie 2), stijgen de totale kosten naar ca. 1 miljard euro. Dit is in lijn met Scenario 3.

Het opnemen van maatregelen voor de kunstwerken in de optimalisatie resulteert in minimale totale kosten van ca. 233 miljoen euro. Deze optimalisatie leidt tot maatregelen voor alle drie kunstwerken, gepland op T = 20 jaar.

In vergelijking met Referentie 1 resulteert de optimalisatie met maatregelen voor de kunstwerken in iets andere dijkversterkingen en vindt de versterking vaker plaats op T = 20 jaar. Dit komt doordat de onveilige kunstwerken tot dat moment het overstromingsrisico bepalen. Het versterken van dijkvakken wordt in sommige gevallen pas interessant zodra de kunstwerken zijn aangepakt, op T = 20 jaar dus.

In vergelijking met Referentie 2 resulteert de optimalisatie met maatregelen voor de kunstwerken in aanzienlijk andere dijkversterkingen. Er wordt meer grondversterking toegepast, en de dijkversterkingen worden vaker gepland op T = 20 jaar.

4.1.5 Scenario 5: voldoende veiligheid voor HTKW

De volgende tabel toont de minimale totale kosten voor scenario 5 en de twee referentiesituaties.

Berekening	Minimale totale kosten
Referentie 1: Zonder kunstwerken	€ 115,081,785
Referentie 2: Geen maatregelen voor kunstwerken	€ 627,284,549
Met maatregelen voor kunstwerken	€ 120,398,171

Als de kunstwerken niet bijdragen aan de trajectfaalkans (Referentie 1), bedragen de minimale totale kosten ca. 115 miljoen euro. Als de kunstwerken echter wel worden meegenomen bij het bepalen van de trajectfaalkans, maar er geen maatregelen voor worden getroffen (Referentie 2), stijgen de totale kosten naar ca. 627 miljoen euro. Deze kosten ontstaan omdat de faalkansen van de kunstwerken aanzienlijk groter zijn dan de faalkanseisen op doorsnedeniveau (voor BSKW en STKWp) bij de ondergrens.

Het opnemen van maatregelen voor de kunstwerken in de optimalisatie resulteert in minimale totale kosten van ca. 120 miljoen euro. Deze optimalisatie leidt tot maatregelen voor de faalmechanismen BSKW en STKWp voor alle drie kunstwerken.

De resulterende dijkversterkingen zijn identiek aan die uit Referentie 1 en Referentie 2. De faalmechanismen BSKW en STKWp hebben geen invloed op de resultaten van de optimalisatie van dijkversterkingen. Dit komt omdat, in tegenstelling tot het faalmechanisme HTKW, beide faalmechanismen niet gecorreleerd zijn met andere (dijk)mechanismen.

4.1.6 Scenario 6: voldoende veiligheid voor HTKW en versterking kunstwerken op T = 20 jaar

De volgende tabel toont de minimale totale kosten voor scenario 6 en de twee referentiesituaties.

Berekening	Minimale totale kosten
Referentie 1: Zonder kunstwerken	€ 115,081,785
Referentie 2: Geen maatregelen voor kunstwerken	€ 627,284,549
Met maatregelen voor kunstwerken	€ 193,823,920

Als de kunstwerken niet bijdragen aan de trajectfaalkans (Referentie 1), bedragen de minimale totale kosten ca. 115 miljoen euro. Wanneer de kunstwerken echter wel worden meegenomen bij het bepalen van de trajectfaalkans, maar er geen maatregelen voor worden getroffen (Referentie 2), stijgen de totale kosten naar ca. 627 miljoen euro. Zoals verwacht, komt dit overeen met Scenario 5.

Het opnemen van maatregelen voor de kunstwerken in de optimalisatie resulteert in minimale totale kosten van ca. 193 miljoen euro. Dit is hoger dan in Scenario 5, omdat de versterking van de kunstwerken pas op T = 20 jaar kan plaatsvinden. Deze optimalisatie voorziet in maatregelen voor de faalmechanismen BSKW en STKWp voor alle drie kunstwerken, die worden toegepast op T = 20 jaar. De resulterende dijkversterkingen zijn identiek aan die uit Referentie 1 en Referentie 2.

4.1.7 Scenario 7: faalkansen kunstwerken ruim groter dan de faalkanseisen op doorsnedeniveau bij de ondergrens en versterking dijken op T = 20 jaar

De volgende tabel toont de minimale totale kosten voor scenario 7 en de twee referentiesituaties.

Berekening	Minimale totale kosten
Referentie 1: Zonder kunstwerken	€ 43,266,776,746
Referentie 2: Geen maatregelen voor kunstwerken	€ 44,034,776,044
Met maatregelen voor kunstwerken	€ 43,268,213,302

Als de kunstwerken niet bijdragen aan de trajectfaalkans (Referentie 1), bedragen de minimale totale kosten ca. 43 miljard euro. Wanneer de kunstwerken echter wel worden meegenomen bij het bepalen van de trajectfaalkans, maar er geen maatregelen voor worden getroffen (Referentie 2), stijgen de totale kosten naar ca. 44 miljard euro. De gevonden kosten zijn aanzienlijk hoger dan die in bijvoorbeeld Scenario 4, omdat het overstromingsrisico in de eerste 20 jaar zeer hoog is.

Het meenemen van maatregelen voor de kunstwerken in de optimalisatie resulteert in minimale totale kosten van ca. 43 miljard euro. Er worden maatregelen voor alle drie kunstwerken op T = 0 jaar toegepast. Er is slechts een daling van 1 miljard euro ten opzichte van Referentie 2, omdat het hier om slechts drie kunstwerken gaat die op T = 0 jaar worden aangepakt in vergelijking met ca. 20 dijkvakken welke op T = 20 jaar worden verbeterd.
De resulterende dijkversterkingen zijn identiek aan die uit Referentie 1 en Referentie 2.

4.1.8 Scenario 8: faalkansen kunstwerken ruim groter dan de faalkanseisen op doorsnedeniveau bij de ondergrens en versterking dijken en kunstwerken op T = 20 jaar

De volgende tabel toont de minimale totale kosten voor scenario 8 en de twee referentiesituaties.

Berekening	Minimale totale kosten
Referentie 1: Zonder kunstwerken	€ 43,266,776,746
Referentie 2: Geen maatregelen voor kunstwerken	€ 44,034,776,044
Met maatregelen voor kunstwerken	€ 43,351,115,016

Zoals verwacht, zijn de minimale totale kosten voor Referentie 1 en Referentie 2 gelijk aan die voor Scenario 7.
Het meenemen van maatregelen voor de kunstwerken in de optimalisatie leidt tot minimale totale kosten van ca. 43 miljard euro, met maatregelen voor alle drie kunstwerken op T = 20 jaar. Deze kosten zijn iets hoger dan die in Scenario 7, doordat de versterking van de kunstwerken in dit geval later plaatsvindt.

In vergelijking met Referentie 1 resulteert de optimalisatie met maatregelen voor de kunstwerken in dezelfde dijkversterkingen. Ten opzichte van Referentie 2 levert de optimalisatie echter iets andere dijkversterkingen op. In Referentie 2 worden de kunstwerken wel meegenomen bij het bepalen van de trajectfaalkans, maar worden er geen maatregelen voor de kunstwerken getroffen. Dit leidt er in Referentie 2 effectief toe dat de optimalisatie van dijkversterkingen niet langer effectief is, omdat de kunstwerken dan bepalend zijn voor de trajectfaalkans. Dit verklaart waarom de versterkingen in Referentie 2 verschillen van die in Referentie 1 (waar kunstwerken helemaal niet worden meegenomen).

4.2 Samenvatting rekenscenario’s

Tabel 7 presenteert per rekenscenario de minimale totale kosten en of de dijkversterkingen die resulteren uit de optimalisatie met maatregelen voor de kunstwerken overeenkomen met de dijkversterkingen die resulteren uit Referentie 1 en Referentie 2.

Tabel 7 Samenvatting van de resultaten per rekenscenario.

Scenario	Minimale totale kosten	Dijkversterking met maatregelen voor kunstwerken	
		is gelijk aan dijkversterking zonder kunstwerken? (Referentie 1)	is gelijk aan dijkversterking zonder maatregelen voor kunstwerken? (Referentie 2)
1	€ 115,469,432	✓	✓
2	€ 116,440,291	✓	✓

Scenario	Minimale totale kosten	Dijkversterking met maatregelen voor kunstwerken	
		is gelijk aan dijkversterking zonder kunstwerken? (Referentie 1)	is gelijk aan dijkversterking zonder maatregelen voor kunstwerken? (Referentie 2)
3	€ 119,103,467	✓	✗
4	€ 233,389,413	✗	✗
5	€ 120,398,171	✓	✓
6	€ 193,823,920	✓	✓
7	€ 43,268,213,302	✓	✓
8	€ 43,351,115,016	✓	✗

De voorgaande paragrafen tonen de toepassing van de veiligheidsrendementmethode voor kunstwerken en dijken in traject 16-1. Hiermee is de bruikbaarheid van de methode voor kunstwerken aangetoond. Het is daarbij interessant op te merken dat, zowel voor Scenario 1 als Scenario 2 (waarbij de faalkansen van de kunstwerken ruim voldoen aan de faalkanseisen op doorsnedeniveau bij de signaleringswaarde), het toepassen van de veiligheidsrendementmethode toch leidt tot een versterking van de Recreatiesluis Lingehaven en de Peulensluis. Dit komt doordat de kosten voor versterking bij deze kunstwerken gering zijn, waardoor de reductie in overschrijdingsrisico (orde 2 miljoen euro, zie paragraaf 4.1.1) opweegt tegen de extra kosten van de versterkingsmaatregel (zie Tabel 5 [4]).

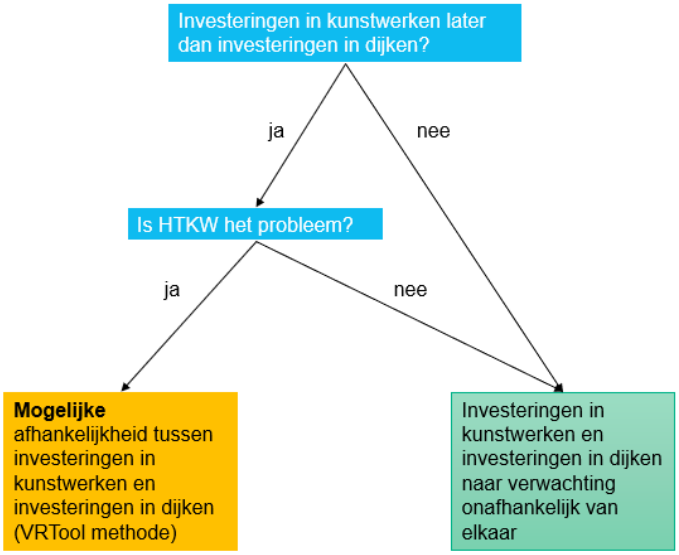
Het moment van investeringen in kunstwerken (ten opzichte van het moment van investeringen in dijken) is belangrijk vanuit zowel veiligheids- als risicoperspectief. In deze studie leidt het uitstellen van investeringen in kunstwerken (Scenario 2 versus Scenario 1, Scenario 4 versus Scenario 3, Scenario 6 versus Scenario 5 in Tabel 7) tot hogere minimale totale kosten, en dus tot minder veiligheid en een hoger overstromingsrisico. Het versterken van kunstwerken eerder dan dijken leidt slechts tot een relatief beperkte reductie van de minimale totale kosten (Scenario 8 versus Scenario 7 in Tabel 7), omdat de onveilige dijken dan bepalend zijn voor de trajectfaalkans. Vanuit economisch oogpunt is het in deze casus het meest efficiënt om de kunstwerken tegelijkertijd met dijkvakken te versterken. Dit wordt nader toegelicht in paragraaf 5.1.3.

Tabel 7 toont aan dat de dijkversterkingen die resulteren uit de optimalisatie inclusief maatregelen voor kunstwerken gelijk zijn aan de dijkversterkingen die resulteren uit de optimalisatie zonder kunstwerken (Referentie 1), met uitzondering van Scenario 4. In Scenario 4 wordt de versterking van kunstwerken uitgesteld en zijn de faalkansen van de kunstwerken ruim groter dan de faalkanseisen op doorsnedeniveau bij de ondergrens. Door de faalkansen van HTKW te verkleinen (zoals in Scenario 5 en Scenario 6), zijn de dijkversterkingen inclusief maatregelen voor kunstwerken weer gelijk aan de dijkversterkingen zonder kunstwerken. Dit leidt tot de volgende conclusie voor deze studie: wanneer investeringen in kunstwerken later plaatsvinden dan investeringen in dijken en de kunstwerken niet voldoen aan het faalmechanisme HTKW, kan de optimalisatie met maatregelen voor kunstwerken leiden tot andere dijkversterkingen dan de optimalisatie zonder kunstwerken. Een belangrijk uitgangspunt hierbij is dat het faalmechanisme HTKW volledig gecorreleerd is met GEKB, wat in lijn is met de werkelijkheid. Daardoor kan HTKW

[4] Aangenomen wordt dat de kosten voor de Recreatiesluis Lingehaven en de Peulensluis respectievelijk 3 en 10 keer lager zijn dan in Tabel 5.

een aanzienlijke invloed hebben op dijkversterkingen. Dit wordt nader toegelicht in paragraaf 5.1.2.

Op basis van de rekenscenario's is de volgende beslisboom opgesteld voor de toepassing van de veiligheidsrendementmethode. Deze beslisboom geldt alleen voor deze studie. Aangezien de methode veel vrijheidsgraden bevat, wordt aanbevolen om de beslisboom verder te verfijnen en te valideren door aanvullende rekenscenario's te beschouwen.



Figuur 2 Beslisboom voor toepassing van de veiligheidsrendementmethode voor de casus 'traject 16-1'.

In de beschouwde casus is het aantal kunstwerken (drie) veel kleiner dan het aantal dijkvakken dat versterkt moeten worden (het traject is 15.06 km lang, waarvan bijvoorbeeld 9.1 km niet voldoet aan STBI). Dit is ook in lijn met de werkelijkheid. De verwachting is dat investeringen in kunstwerken effect kunnen hebben op dijkversterkingen, indien het aantal kunstwerken en het aantal dijkvakken dat versterkt moet worden meer in balans is.
Om dit te bevestigen, is een extra analyse uitgevoerd voor Scenario 3. In deze analyse zijn de dijkvakken in traject 16-1 veiliger gemaakt door voldoende veiligheid voor STBI aan te nemen. In dit geval blijkt dat door het meenemen van maatregelen voor de kunstwerken in de optimalisatie, de grondversterking van één dijkvak plaatsvindt op T = 20 jaar in plaats van op T = 0 jaar. Dit resulteert in een besparing door het uitstellen van de investering. Het kan dus gebeuren dat investeringen in kunstwerken investeringen in dijken kunnen voorkomen of vertragen (en andersom). Dit wordt nader toegelicht in paragraaf 5.1.2.

Het definiëren van de referentiesituatie is van belang voor het trekken van conclusies in deze studie. De dijkversterkingen met maatregelen voor kunstwerken komen vaker overeen met de dijkversterkingen die zijn gevonden in Referentie 1 dan in Referentie 2. In Referentie 1 maken de kunstwerken geen deel uit van de optimalisatie. In Referentie 2 worden de kunstwerken wel meegenomen bij het bepalen van de trajectfaalkans, maar er geen maatregelen voor de kunstwerken worden getroffen. Dit leidt er in Referentie 2 effectief toe dat de optimalisatie van dijkversterkingen soms ophoudt (oftewel niet meer zinvol is), omdat de kunstwerken dan bepalend zijn voor de trajectfaalkans.

4.3 Veiligheidseisen kunstwerken

Conform de LBO-1 worden kunstwerken ontworpen op basis van de faalkanseisen die gebaseerd zijn op een faalkansbegroting. Een faalkanseis wordt per faalmechanisme per doorsnede/kunstwerk vastgesteld met behulp van de volgende formule:

$$P_{dsn,eis} = P_{traject} * f / N$$

waarin:
$P_{traject}$ – norm van het traject (signaleringswaarde of ondergrens) [1/jaar]
$P_{dsn,eis}$ – faalkanseis per doorsnede/kunstwerk [1/jaar]
f – faalkansruimtefactor [-]
N – factor voor het lengte-effect [-]
Tabel 8 presenteert de faalkanseisen voor de kunstwerken in traject 16-1 uitgaande van de signaleringswaarde van 1/100.000 per jaar en de ondergrenswaarde van 1/30.000 per jaar. Met name de faalkanseisen voor STKWp en BSKW zijn heel streng.

Tabel 8 Faalkanseisen voor de kunstwerken in traject 16-1.

Faalmechanisme	f [-]	N [-]	$P_{dsn,eis}$ [1/jaar] (signaleringswaarde)	$P_{dsn,eis}$ [1/jaar] (ondergrens)
HTKW	0.24	1	1/416,667	1/125,000
BSKW	0.04	3.5	1/8,750,000	1/2,625,000
STKWp	0.02	3	1/15,000,000	1/4,500,000

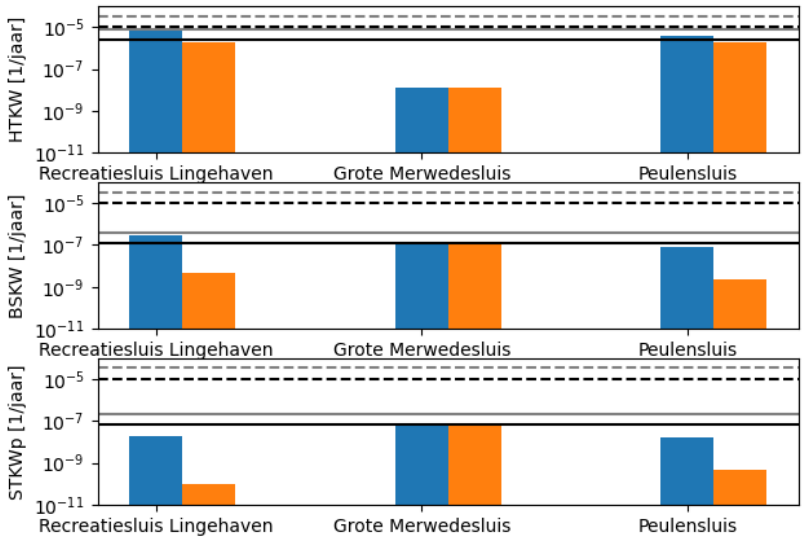
De veiligheidsrendementmethode levert faalkansen op per kunstwerk en per faalmechanisme. Dit zijn de faalkansen die voortkomen uit de maatregelen die leiden tot de minimale totale kosten. De vraag is of deze faalkansen vergelijkbaar zijn met de bovenstaande faalkanseisen. Dit is geanalyseerd voor Scenario 1 en Scenario 3.

In Scenario 1 worden de kunstwerken Peulensluis en Recreatiesluis Lingehaven versterkt. De totale LCC (*Life Cycle Cost*) voor deze kunstwerken bedraagt ca. € 0.7. Grafiek A in Figuur 3 presenteert de faalkansen van de drie kunstwerken op T = 75 jaar. Zonder de versterkingsmaatregelen liggen de faalkansen van de Peulensluis en Recreatiesluis Lingehaven redelijk in de buurt van de faalkanseisen. Na het toepassen van de veiligheidsrendementmethode worden de faalkansen met ongeveer een factor 5 (HTKW) of ongeveer een factor 100 (BSKW en STKWp) verkleind.

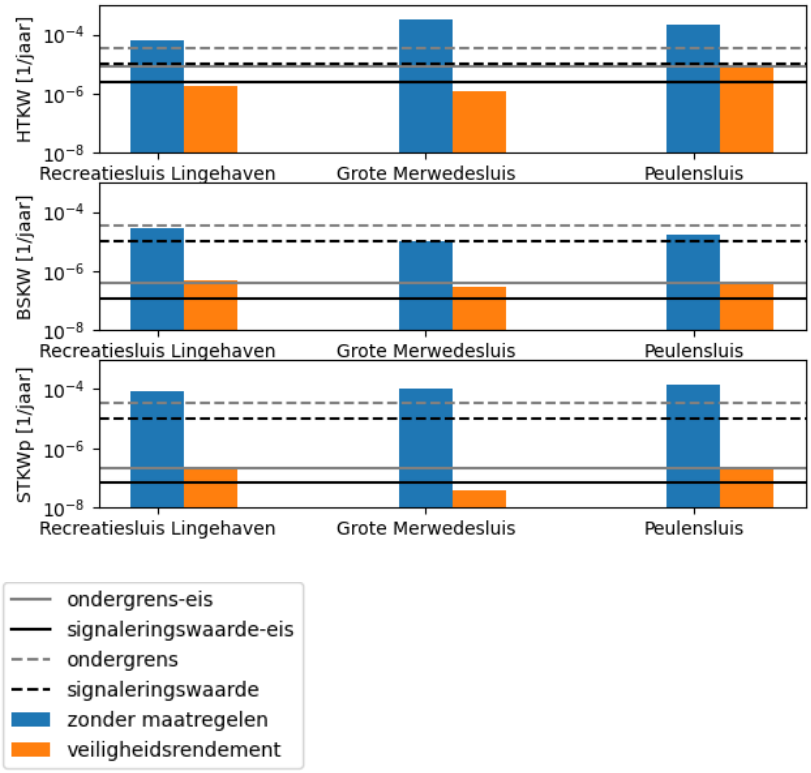
In Scenario 3 worden alle drie kunstwerken versterkt en bedraagt de LCC ca. € 3.5 mln. Grafiek B in Figuur 3 presenteert de faalkansen van de drie kunstwerken op T = 75 jaar. Zonder de versterkingsmaatregelen zijn de faalkansen een factor 100 (HTKW en BSKW) of een factor 1000 (STKWp) groter dan de faalkanseisen. Na het toepassen van de veiligheidsrendementmethode liggen de faalkansen in de buurt van de faalkanseisen.

In Scenario 1 (faalkansen conform LBO-1) zijn de oorspronkelijke faalkansen van de kunstwerken redelijk klein. Dat de veiligheidsrendementmethode in dit geval ook maatregelen oplevert, heeft te maken met de lage marginale kosten. In Scenario 3 zijn de oorspronkelijke faalkansen van de kunstwerken ruim groter dan de faalkanseisen op doorsnedeniveau bij de ondergrens. In dit geval worden in de veiligheidsrendementmethode duurdere maatregelen toegepast (ook wordt de Grote Merwedesluis versterkt) om deze faalkansen te verlagen.

De faalkansen van kunstwerken die resulteren uit de veiligheidsrendementmethode kunnen dus afwijken van de faalkanseisen conform LBO-1. Dat komt omdat bij veiligheidsrendement sterk wordt gekeken naar de kosten voor marginale veiligheidswinst, oftewel de kosten om een kunstwerk 10 keer veiliger te maken. Dit wordt nader toegelicht in paragraaf 5.2.



A)



B)

Figuur 3 Faalkansen van de kunstwerken op T = 75 jaar voor Scenario 1 (grafiek A) en Scenario 3 (grafiek B).

5 Handelingsperspectief

In dit hoofdstuk worden de resultaten van deze studie (casus ‘traject 16-1’) vertaald naar een handelingsperspectief voor kunstwerken binnen een dijktraject vanuit veiligheidsrendement (paragraaf 5.1). Ook wordt in dit hoofdstuk aandacht besteed aan de veiligheidseisen van kunstwerken (paragraaf 5.2).

5.1 Veiligheidsrendement binnen een traject met kunstwerken

5.1.1 Kunstwerken in de veiligheidsrendementmethode

Vanuit de theorie van assemblage is er geen noodzaak om kunstwerken apart te behandelen van dijkvakken (kunstwerken kunnen in feite ook als vakken in een traject worden gezien). Ook in de praktijk kunnen kunstwerken worden meegenomen in de VRTool. In deze studie is de veiligheidsrendementmethode toegepast om de optimale versterkingsmaatregelen voor dijken en drie kunstwerken in traject 16-1 te bepalen (op basis van fictieve data). Hiermee is de bruikbaarheid van de methode voor kunstwerken aangetoond.

Verder zien we in deze studie dat ook in situaties waarin de faalkansen van de kunstwerken klein zijn (minimaal voldoen aan de faalkanseisen op doorsnedeniveau bij de signaleringswaarde), er op basis van veiligheidsrendement toch soms voor een versterking van de kunstwerken wordt gekozen. Dit komt doordat de kosten van sommige versterkingsmaatregelen relatief laag zijn (denk bijvoorbeeld aan een eenvoudige voorziening om handmatig sluiten te faciliteren). Vanuit het oogpunt van veiligheidsrendement kan het dus nuttig zijn om ook ‘veilige’ kunstwerken te verbeteren, mits de kosten van de versterkingsmaatregelen laag zijn.

5.1.2 Invloed investeringen kunstwerken

Het kan gebeuren dat investeringen in kunstwerken investeringen in dijkvakken kunnen beïnvloeden (en andersom). Met veiligheidsrendement kan hierin scherper worden gekeken.

Of een investering in een kunstwerk een investering in een dijkvak kan voorkomen, is naar verwachting afhankelijk van meerdere factoren. De belangrijkste factoren zijn:

- De initiële faalkans van het kunstwerk in relatie tot de initiële faalkans van het dijkvak.
- De verhouding tussen de kosten van het versterken van het dijkvak en de kosten van het versterken van het kunstwerk.

Dat is geïllustreerd in onderstaand kader.

Illustratief voorbeeld: kunstwerk of dijk versterken?

Beschouw een fictief traject met vijf dijkvakken en een kunstwerk. Elk dijkvak heeft een faalkans van 1/10,000 per jaar. De kosten om een dijkvak 100 keer veiliger te maken bedragen €5 miljoen, terwijl de verwachte schade €20 miljard bedraagt. De vraag is of het versterken van het kunstwerk kan voorkomen dat één dijkvak versterkt moet worden (en andersom). In dit voorbeeld variëren we de initiële faalkans van het kunstwerk en de kosten om het kunstwerk 100 keer veiliger te maken. We berekenen de totale kosten, bestaande uit het overstromingsrisico en de versterkingskosten, voor twee scenario’s:

1. kunstwerk wordt wel versterkt en het dijkvak niet,
2. kunstwerk wordt niet versterkt en het dijkvak wel.

Dit leidt tot de volgende tabel, waarin $C_{dijk}/C_{kunstwerk}$ staat voor de verhouding tussen de versterkingskosten van het dijkvak (€5 miljoen) en de versterkingskosten van het kunstwerk. Een lage ratio betekent dat het versterken van het kunstwerk relatief duur is in vergelijking met het versterken van het dijkvak.

	Faalkans kunstwerk zonder versterking [1/jaar]			
	0.1	**0.001**	**0.0001**	**0.00000001**
$C_{dijk}/C_{kunstwerk}$ = 0.25 (versterking kunstwerk relatief duur)				
Totale kosten scenario 1 [M€]	62	42	42	42
Totale kosten scenario 2 [M€]	2025	45	27	25
$C_{dijk}/C_{kunstwerk}$ = 0.5				
Totale kosten scenario 1 [M€]	52	32	32	32
Totale kosten scenario 2 [M€]	2025	45	27	25
$C_{dijk}/C_{kunstwerk}$ = 1.0				
Totale kosten scenario 1 [M€]	47	27	27	27
Totale kosten scenario 2 [M€]	2025	45	27	25
$C_{dijk}/C_{kunstwerk}$ = 5.0 (versterking kunstwerk relatief goedkoop)				
Totale kosten scenario 1 [M€]	43	23	23	23
Totale kosten scenario 2 [M€]	2025	45	27	25

We zien het volgende in dit voorbeeld:

- Indien de faalkans van het kunstwerk gelijk is aan 0.1 per jaar, dan is het altijd nodig om het kunstwerk te versterken (de totale kosten van scenario 1 zijn dan lager dan de totale kosten van scenario 2). Dit geldt ook voor $C_{dijk}/C_{kunstwerk}$ = 5.0 (versterken van het kunstwerk is relatief goedkoop).
- Er is een duidelijk omslagpunt zichtbaar in de tabel. Indien de faalkans van het kunstwerk lager is dan 0.0001 per jaar (lager dan de initiële faalkans van het dijkvak) en $C_{dijk}/C_{kunstwerk} \leq 1.0$ (de versterkingskosten van het kunstwerk zijn groter dan de versterkingskosten van het dijkvak), dan het is beter om het dijkvak te versterken in plaats van het kunstwerk.

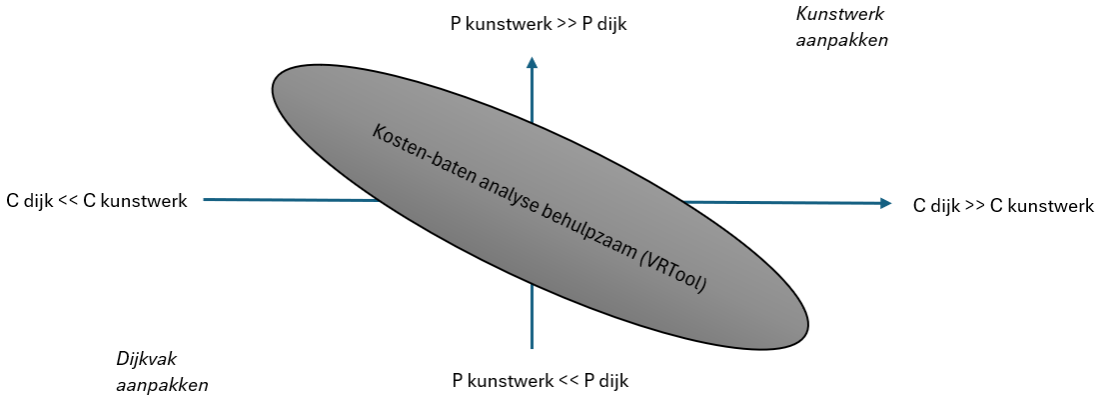
Het bovenstaande voorbeeld geldt voor een kunstwerk en een dijkvak, maar kan in feite ook worden toegepast op twee dijkvakken.

In deze studie (casus ‘traject 16-1’) zien we ook dat investeringen in kunstwerken investeringen in dijken kunnen voorkomen/uitstellen. Dit komt bijvoorbeeld naar voren in een rekenscenario waarin de dijkenopgave fictief werd verminderd.
Ook kan dit spelen bij relatief veilige trajecten, met name wanneer er bijvoorbeeld veel vakken/mechanismen in beoordelingscategorie IVv (voldoet mogelijk aan de ondergrens of aan de signaleringswaarde) vallen. In dat geval is de kans op vakniveau kleiner dan de trajecteis, maar omdat niet wordt voldaan aan de (fictieve) eis per mechanisme per vak uit het WBI worden deze vakken vaak ten onrechte als opgave beschouwd. Het kan dan bijvoorbeeld voorkomen dat door enkel de dijk te versterken al aan de norm wordt voldaan en een ingreep bij het kunstwerk helemaal niet nodig is.

De veiligheidsrendementmethode kan worden gebruikt om te bepalen of een versterking van een kunstwerk een versterking van een dijkvak kan voorkomen (en andersom). De toepassing van deze methode is naar verwachting interessant in situaties, zoals geschetst in de volgende figuur. Met andere woorden, het is naar verwachting minder interessant om de veiligheidsrendementmethode te gebruiken in de volgende gevallen:

- Wanneer de versterking van het kunstwerk relatief goedkoop is (C_{dijk}>> $C_{kunstwerk}$) en het kunstwerk relatief onveilig is ($P_{kunstwerk}$ >> P_{dijk}). In dat geval is het vaak goed om het kunstwerk aan te pakken.
- Wanneer de versterking van het dijkvak relatief goedkoop is (C_{dijk}<< $C_{kunstwerk}$) en het dijkvak relatief onveilig is ($P_{kunstwerk}$ << P_{dijk}). In dat geval is het vaak goed om het dijkvak aan te pakken.

In deze studie is deze figuur verder aangescherpt voor casus 'traject 16-1' (zie Figuur 2).



Figuur 4 Toepassingsgebied veiligheidsrendementmethode.

De kans dat investeringen in kunstwerken investeringen in dijken kunnen beïnvloeden is groter indien het faalmechanisme 'Hoogte Kunstwerk' (HTKW) een rol speelt.

Het faalmechanisme HTKW is volledig gecorreleerd met GEKB. GEKB (en daarmee ook HTKW) is een faalmechanisme dat sterk door de belasting wordt gedomineerd en daardoor een zeer klein lengte-effect heeft. Dit betekent dat het zwakste vak direct bepalend is voor de faalkansbijdrage op trajectniveau. Daarnaast draagt dit faalmechanisme relatief veel bij aan de faalkans op trajectniveau. Hierdoor kan HTKW een aanzienlijke invloed hebben op de trajectfaalkans en dus ook op dijkversterkingen. Dit is in tegenstelling tot BSKW en STKWp, waarin vakken als onafhankelijk worden beschouwd en daardoor minder invloed hebben. Dat is geïllustreerd in onderstaand kader.

Illustratief voorbeeld: invloed volledig gecorreleerde vakken

Beschouw een fictief traject dat bestaat uit 6 vakken, waarvan 5 vakken een faalkans hebben van 1/100 per jaar en één vak een faalkans van 1/20 per jaar:

- Bij volledig gecorreleerde vakken (faalmechanismen zoals GEKB en HTKW) is de trajectfaalkans gelijk aan 1/20 per jaar.
- Bij ongecorreleerde vakken (faalmechanismen zoals STBI en STKWp) is de trajectfaalkans gelijk aan 1/10 per jaar.

Indien het zwakste vak 10 keer sterker wordt gemaakt, dan verandert de trajectfaalkans:

- Voor "volledig gecorreleerde vakken" naar 1/100 per jaar.
- Voor "ongecorreleerde vakken" naar 1/19 per jaar.

Het effect van deze versterking is respectievelijk een reductiefactor van 5 (voor “volledig gecorreleerde vakken”) en 2 (voor “ongecorreleerde vakken”).
Het effect is aanzienlijk kleiner indien de faalkans van het zwakste vak kleiner is. Bij een faalkans van 1/80 per jaar wordt een reductiefactor van 1.25 (voor “volledig gecorreleerde vakken”) en 1.21 (voor “ongecorreleerde vakken”) gevonden.

Een grotere invloed van HTKW zagen we ook in deze studie voor traject 16-1. In een rekenscenario waarin investeringen in kunstwerken later plaatsvinden dan investeringen in dijken, en de kunstwerken niet voldoen aan het faalmechanisme HTKW, leidde de optimalisatie met maatregelen voor kunstwerken tot andere dijkversterkingen dan de optimalisatie zonder kunstwerken.

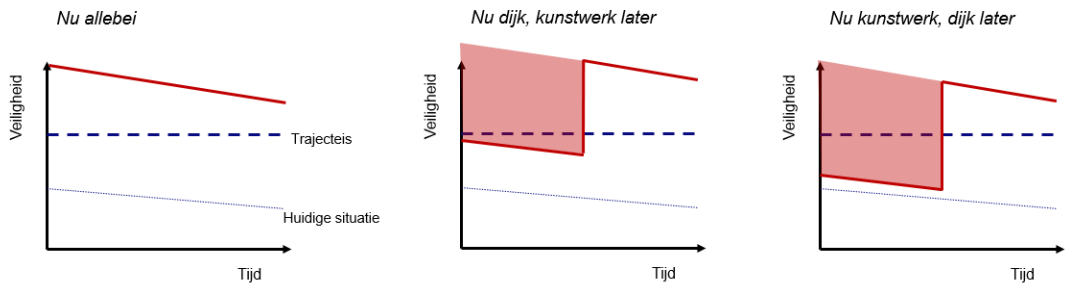
Vanuit het oogpunt van veiligheidsrendement is het daarom nuttig om de versterkingen voor HTKW zoveel mogelijk samen met grondversterkingen voor GEKB te beschouwen, met name door de ontwerpeisen goed op elkaar af te stemmen (zie ook paragraaf 5.2).

Een andere belangrijke factor bij de afstemming van versterkingsprojecten (dijken en kunstwerken) is het moment waarop deze worden uitgevoerd. Dit wordt behandeld in de volgende paragraaf.

5.1.3 Veiligheid & risico op systeemniveau

Tot 2050 wordt gewerkt aan een enorme versterkingsopgave om het overstromingsrisico in Nederland op een acceptabel niveau te krijgen (de norm). Vanuit dat perspectief is de fasering van de investeringen in dijken en kunstwerken belangrijk. Dat wordt weergegeven in Figuur 5, waarin het effect van het investeringsmoment op de veiligheid *illustratief* is weergegeven.

Tegelijkertijd versterken (links) levert de grootste stijging in veiligheid op: het traject voldoet direct aan de norm. Een andere situatie die voorkomt is dat nu een dijkversterking loopt, maar de verbetering van de kunstwerken nog op zich laat wachten. In dat geval zou bijvoorbeeld het middelste figuur kunnen gelden, en wanneer eerst het kunstwerk wordt verbeterd en daarna de dijk geldt bijvoorbeeld de rechter figuur. Interessant in deze context zijn de rood gearceerde vakken. Wanneer het kunstwerk een zwakke schakel is na de dijkversterking wordt niet alleen nog niet aan de norm voldaan, maar is ook het rendement van de dijkversterking lager: deze wordt lager doordat er een zwakke schakel blijft die het overstromingsrisico gaat bepalen. Een soortgelijke redenering gaat overigens op bij het programmeren van dijkversterkingsprojecten: door niet op veiligheidsrendement te programmeren wordt de effectiviteit van versterkingsprojecten lager.[5]



Figuur 5 Effect van de fasering versterking dijkvakken en kunstwerken op veiligheid.

[5] Binnen de veiligheidsrendementmethode worden deze kosten ook gemonetariseerd. Uit de resultaten in Hoofdstuk 4 blijkt vrij duidelijk dat de kosten van het overstromingsrisico daarin veel groter zijn dan die van versterkingen. Dit zijn kosten die we vaak niet voelen, totdat het misgaat.

Concreet betekent dit voor kunstwerken dat in de programmering wel moet worden afgestemd hoe verbetering van kunstwerken samenvalt met verbetering van de dijktrajecten waarin deze liggen, om situaties zoals in de rechterfiguur te voorkomen.

Bij kunstwerken speelt echter (net als bij dijken) een bredere afweging: De timing van de maatregelen bepaalt vaak ook sterk de kosten: wanneer bijv. meegekoppeld kan worden met andere (onderhouds)werkzaamheden zijn kosten lager dan wanneer dit niet gebeurt. Wanneer zo een kunstwerk eerder kan worden verbeterd dan de toch al geplande dijkversterking zal dit vaak verstandig zijn. Tegelijkertijd: uitstellen van kunstwerken leidt mogelijk tot veel hogere risicokosten en een economische analyse van kosten en baten is behulpzaam om te bepalen wat in economisch opzicht verstandig is. Dat is geïllustreerd in onderstaand kader.

Illustratief voorbeeld: meekoppelen of niet?

Stel een dijkversterking wordt in 2030 opgeleverd. De keuze is om nu verbetering van één van de in het traject gelegen kunstwerken te starten zodat deze tegelijk kan worden opgeleverd, of deze uit te stellen tot 2035 wanneer er toch groot onderhoud gepland staat. Bij meekoppelen met onderhoud worden de kosten € 7.5 mln in plaats van € 15 mln (door verminderde afschrijving, lagere kosten en verdiscontering).
We gaan uit van een verwachte overstromingsschade van € 20 miljard voor het betreffende dijktraject. Na oplevering van de dijkversterking zonder verbetering kunstwerk wordt de trajectfaalkans 1/1000 per jaar, inclusief kunstwerk wordt deze 1/10,000 per jaar. De kosten voor beide varianten zijn weergegeven in onderstaande tabel.

	Dijk in 2030 & kunstwerk in 2035	**Dijk & kunstwerk in 2030**
Overstromingsschade [M€]	20,000	
Kosten verbetering kunstwerk 2030 [M€]	15	
Kosten verbetering kunstwerk 2035 [M€]	7.5	
Faalkans na dijkversterking	1/1000 per jaar	
Faalkans na versterking dijk & kunstwerk	1/10,000 per jaar	
Discontovoet	1.6%	
Totaal overstromingsrisico 2030-2035 [M€]	97	9.7
Totale kosten [M€]	**112**	**17**

Te zien is dat de totale kosten voor het uitstellen van verbetering van het kunstwerk veel hoger zijn dan wanneer het kunstwerk gelijk met de dijk wordt versterkt. Hoewel dit kosten zijn die we vaak niet zien en ervaren, is het op deze wijze wel vermijdbaar risico.

Een andere situatie zou zijn wanneer er nu groot onderhoud zou zijn, maar pas over 5 jaar een dijkversterking. Los van of het overstromingsrisico afneemt (door het eerder uitvoeren van de verbetering van het kunstwerk) zou dit economisch verstandig zijn op het moment dat de kosten bij meekoppelen meer dan 8.3% lager zijn dan zonder meekoppelen (o.b.v. verdiscontering). Dus eerder uitvoeren tegen gereduceerde kosten zal bijna altijd uitkunnen.

Samenvattend kan gesteld worden dat een risico-gebaseerde kunstwerkenprogrammering zich richt op het starten met verbeteren op trajecten waar de dijk al snel op orde zal zijn. Uitstel van maatregelen aan de kunstwerken vanwege reeds geplande onderhoudswerkzaamheden kan doelmatig zijn. In dat geval moeten de baten (lagere uitvoeringskosten) expliciet worden afgewogen tegen de kosten (hoger overstromingsrisico). Bij kunstwerken met een relatief grote bijdrage aan de trajectfaalkans zal dit niet snel het geval zijn. Ook het naar voren halen van maatregelen aan de kunstwerken vanwege reeds geplande onderhoudswerkzaamheden kan overigens doelmatig zijn.

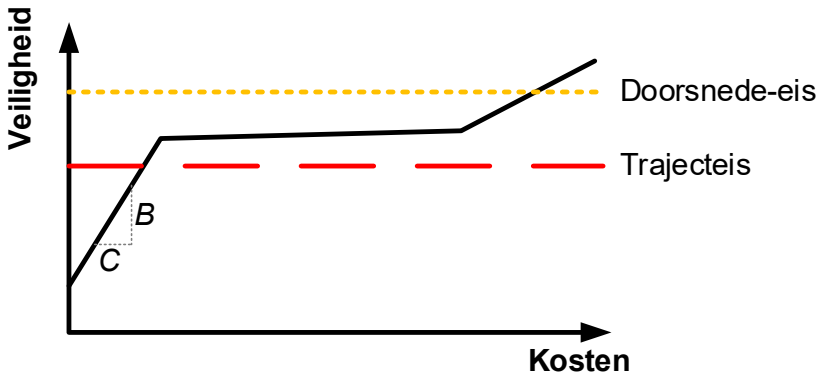
5.2 Veiligheidseisen

De faalkanseisen voor kunstwerken uit de “Werkwijzer Ontwerpen Waterkerende Kunstwerken” zijn relatief streng, met name voor BSKW en STKWp (de faalkanseisen voor HTKW zijn wel afgestemd op GEKB).

Vanuit het oogpunt van veiligheidsrendement is het belangrijk na te denken over het effect van een versterking van een kunstwerk op het overstromingsrisico van het hele traject: wegen de kosten van de maatregel op tegen de baten (reductie van het overstromingsrisico)? Indien de kosten van de maatregel de baten overschrijden, dan is het toepassen van de maatregel niet rendabel vanuit het economisch oogpunt.

De faalkansen van kunstwerken die resulteren uit de veiligheidsrendementmethode kunnen afwijken van de huidige faalkanseisen (zie paragraaf 4.3). Dat komt omdat bij veiligheidsrendement sterk wordt gekeken naar de kosten voor marginale veiligheidswinst, oftewel de kosten om een kunstwerk 10 keer veiliger te maken. De kostenfuncties voor versterking zijn vaak niet lineair: voor betrouwbaarheid sluiten kan met een extra oefening beperkt extra veiligheid worden gerealiseerd, maar voor meer kan bijv. een extra keermiddel nodig zijn. Dat veroorzaakt een sprong in de kostenfunctie zoals geïllustreerd in Figuur 6. Praktisch betekent dit dat bij het verbeteren van een kunstwerk goed moet worden gekeken naar de doelmatigheid, en dat hierin niet te sterk gehecht moet worden aan de doorsnede-eisen die worden opgelegd: wanneer iets minder veiligheid kan worden gerealiseerd tegen veel lagere kosten kan het voldoende zijn om aan de wettelijke norm te voldoen. Een veiligheidsrendementachtige analyse kan helpen met dergelijk maatwerk te onderbouwen.

Specifiek voor HTKW en GEKB geldt dat het hanteren van een strengere eis op één van beiden niet effectief is, en dat deze goed moeten worden afgestemd op trajectniveau.



Figuur 6 Kostenfunctie, kosten versus veiligheid.

6 Conclusies

In deze studie is de veiligheidsrendementsmethode toegepast op dijkvakken en drie kunstwerken (de Grote Merwedesluis, de Peulensluis en de Recreatiesluis Lingehaven) in traject 16-1. In de analyse zijn verschillende rekenscenario's onderzocht, waarbij fictieve faalkansen van de kunstwerken en fictieve kosten voor de versterkingsmaatregelen zijn gebruikt.

Het kan gebeuren dat investeringen in kunstwerken investeringen in dijkvakken beïnvloeden (en andersom). Met veiligheidsrendement kan hierin scherper worden gekeken.
Of een investering in een kunstwerk een investering in een dijkvak kan voorkomen, is naar verwachting sterk afhankelijk van: (1) de initiële faalkans van het kunstwerk in relatie tot de initiële faalkans van het dijkvak en (2) de verhouding tussen de kosten van het versterken van het dijkvak en de kosten van het versterken van het kunstwerk. Een systeembeschouwing op basis van veiligheidsrendement kan worden gebruikt om te onderbouwen of verbetering van het kunstwerk (of de dijk) doelmatig is.

De kans dat investeringen in kunstwerken investeringen in dijkvakken beïnvloeden (en andersom) is groter wanneer het faalmechanisme HTKW een rol speelt.
Dit wordt veroorzaakt door de sterke correlatie tussen HTKW en GEKB. Daardoor kan HTKW een aanzienlijke invloed hebben op de trajectfaalkans en dus ook op dijkversterkingen, in tegenstelling tot BSKW en STKWp, die als onafhankelijk worden beschouwd in de assemblage (en dus minder invloed hebben). Vanuit het oogpunt van veiligheidsrendement is het daarom nuttig om de versterkingen voor HTKW zo veel mogelijk samen met grondversterkingen voor GEKB te beschouwen, met name door de ontwerpeisen goed af te stemmen.

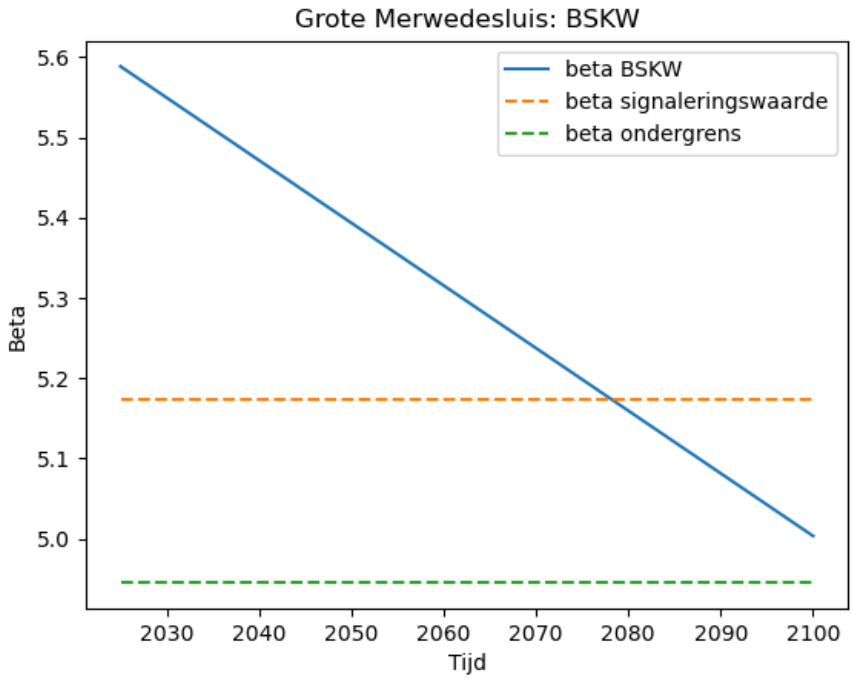
Het moment van investeringen in kunstwerken (ten opzichte van het moment van investeringen in dijken) is belangrijk vanuit zowel veiligheids- als risicoperspectief.
Het uitstellen of naar voren halen van investeringen in kunstwerken kan doelmatig zijn. Een kosten-batenafweging, waarin de extra kosten van het naar voren halen van de investering worden afgezet tegen de baten van vermeden risicokosten van overstroming, kan inzicht bieden of dit economisch verstandig is. De veiligheidsrendementmethode kan gebruikt worden om dit inzichtelijk te maken.

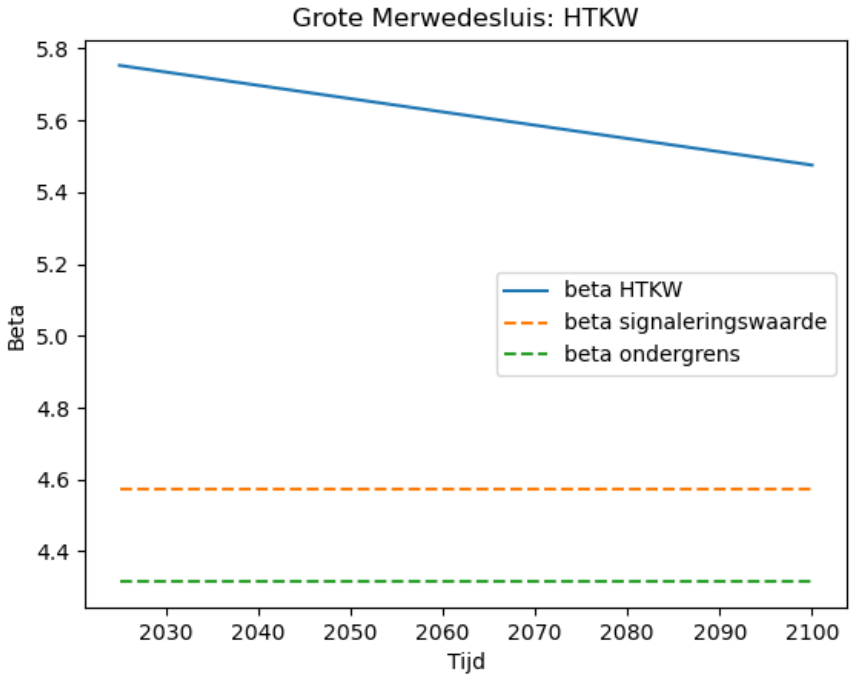
Bij het uitvoeren van projecten is het belangrijk dat de veiligheidseisen voor kunstwerken ook vanuit het perspectief van veiligheidsrendement worden onderbouwd.
De faalkansen van kunstwerken die resulteren uit de veiligheidsrendementmethode kunnen afwijken van de huidige faalkanseisen (conform LBO-1). Dit is overigens niet anders dan bij dijkvakken en komt doordat bij veiligheidsrendement sterk wordt gekeken naar de kosten voor marginale veiligheidswinst. Praktisch betekent dit dat bij het verbeteren van een kunstwerk goed naar de doelmatigheid moet worden gekeken, en dat niet te veel waarde gehecht moet worden aan de doorsnede-eisen die worden opgelegd: wanneer iets minder veiligheid kan worden gerealiseerd tegen veel lagere kosten, kan het voldoende zijn om het traject aan de wettelijke norm te laten voldoen.
Andersom kan het vanuit het veiligheidsrendementperspectief ook nuttig zijn om relatief veilige kunstwerken te versterken wanneer er relatief goedkope maatregelen mogelijk zijn (bijvoorbeeld het aanbrengen van een eenvoudige lier om een deur op handkracht te sluiten of het oplassen van een extra plaat om de sterkte van een keermiddel te vergroten). Een veiligheidsrendementachtige analyse kan helpen om dergelijk maatwerk te onderbouwen.

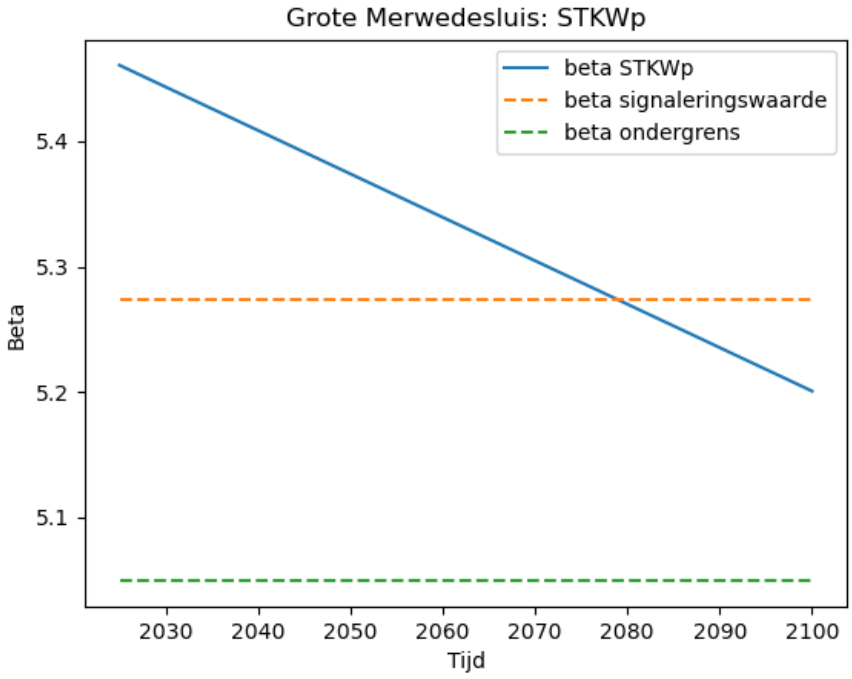
A Betrouwbaarheid kunstwerken conform LBO-1

Deze bijlage presenteert de betrouwbaarheidsindex per faalmechanisme (BSKW, HTKW en STKWp) zoals berekend voor de drie kunstwerken op basis van de LBO-1 gegevens. De betrouwbaarheidsindex is berekend voor de zichtjaren 2023, 2050 en 2100, voor de tussenliggende jaren is er lineair geïnterpoleerd.

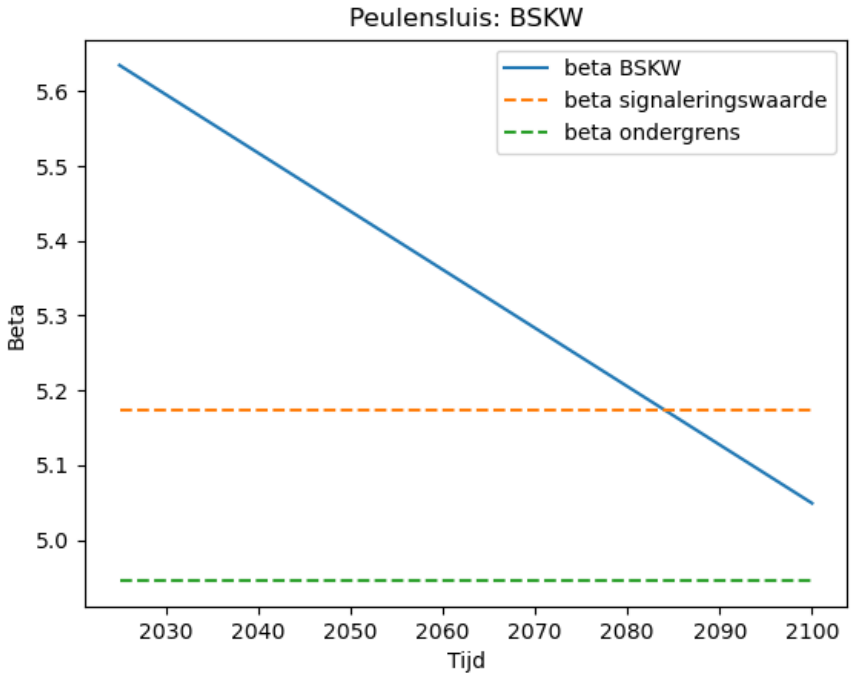
A.1 Grote Merwedesluis

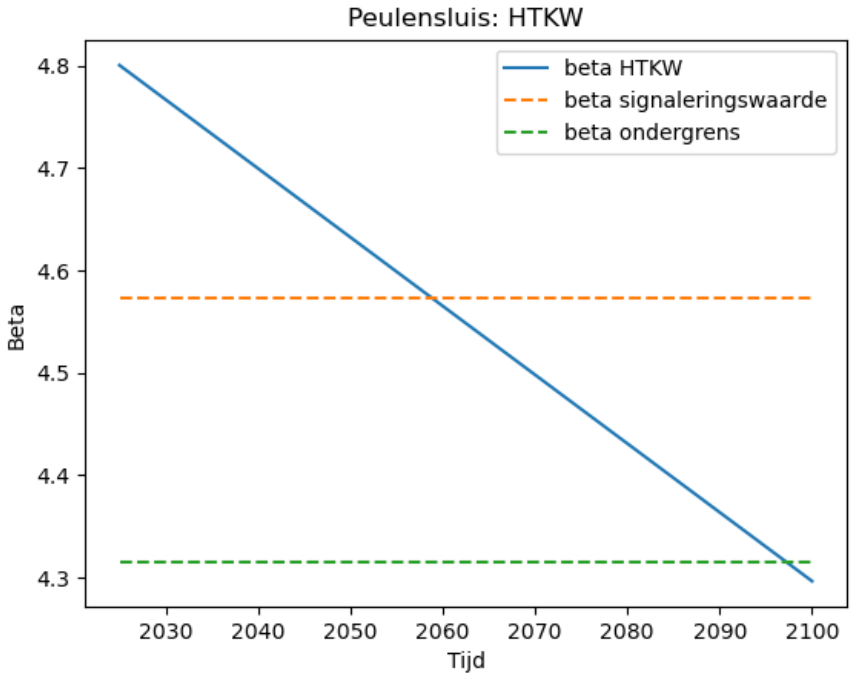


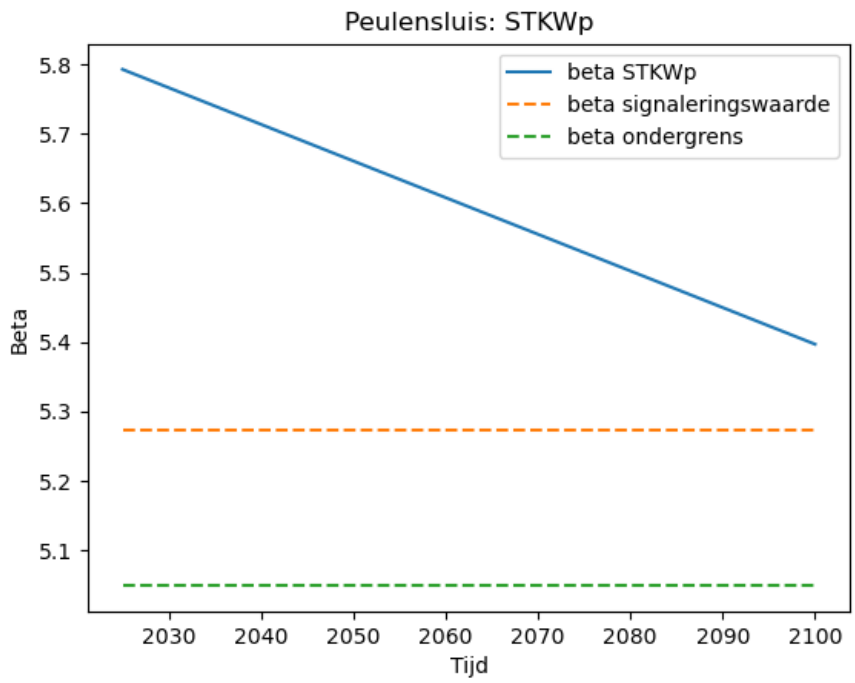

Grote Merwedesluis: HTKW
5.8
5.6
5.4
5.2
5.0
4.8
4.6
4.4
Beta
2030
2040
2050
2060
2070
2080
2090
2100
Tijd
beta HTKW
beta signaleringswaarde
beta ondergrens


Grote Merwedesluis: STKWp
5.4
5.3
5.2
5.1
Beta
2030
2040
2050
2060
2070
2080
2090
2100
Tijd
beta STKWp
beta signaleringswaarde
beta ondergrens

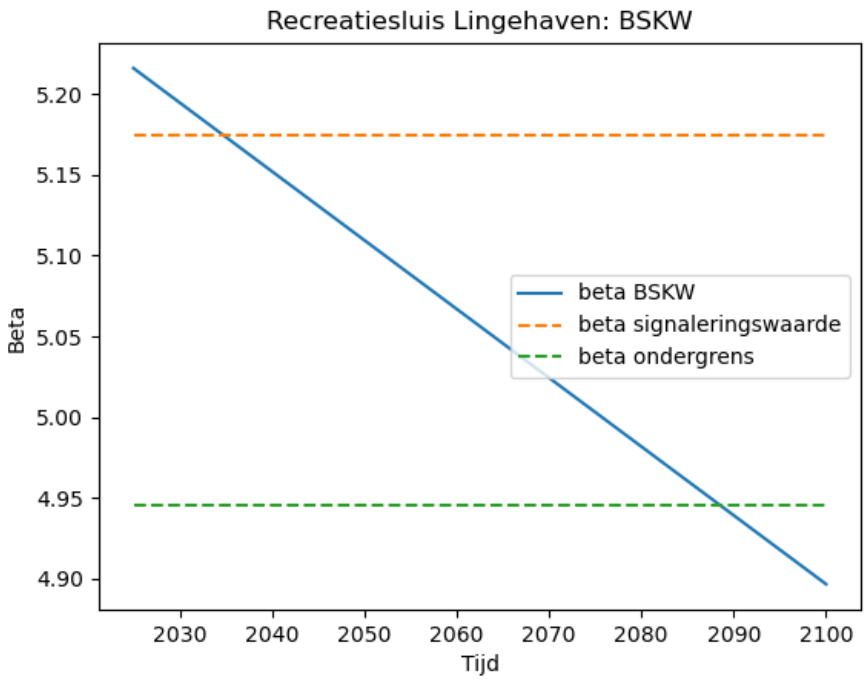
A.2 Peulensluis

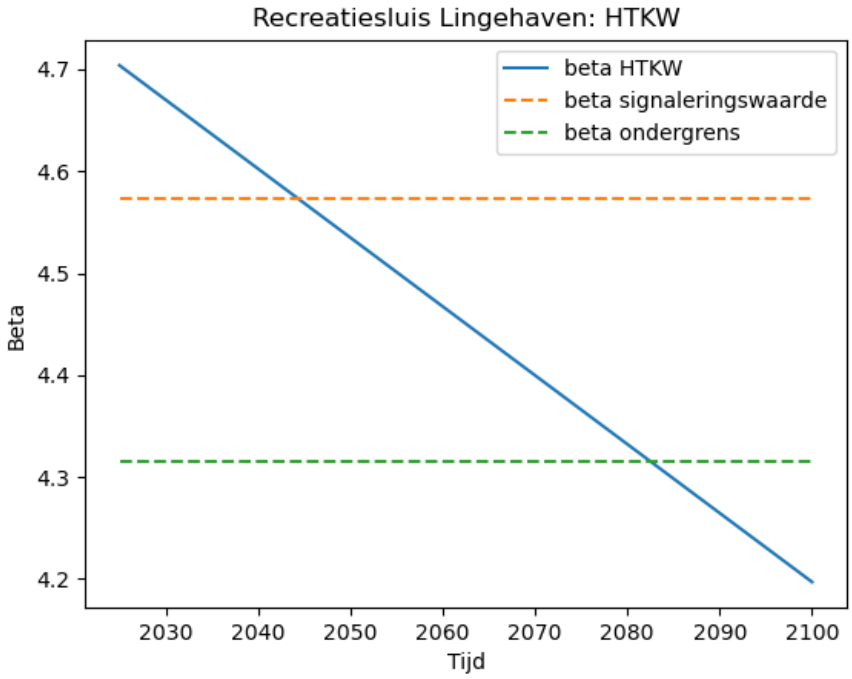


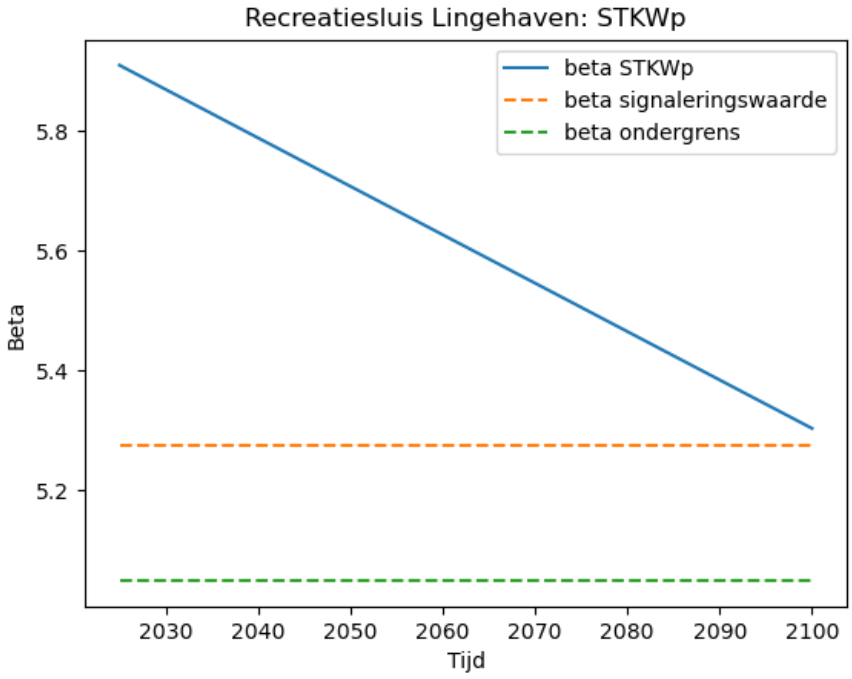




A.3 Recreatiesluis Lingehaven



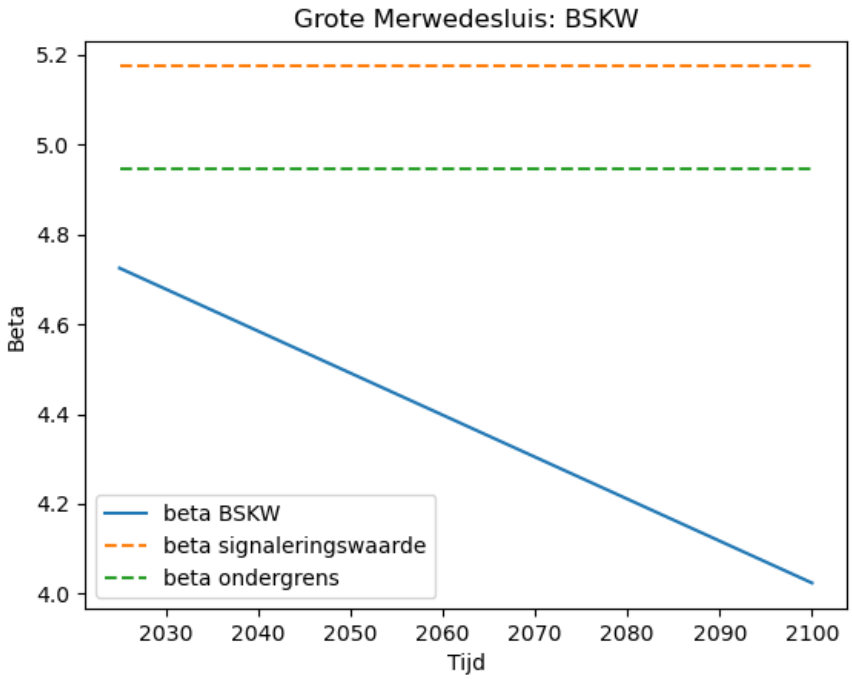

Recreatiesluis Lingehaven: HTKW
beta HTKW
beta signaleringswaarde
beta ondergrens
Beta
4.7
4.6
4.5
4.4
4.3
4.2
2030
2040
2050
2060
2070
2080
2090
2100
Tijd

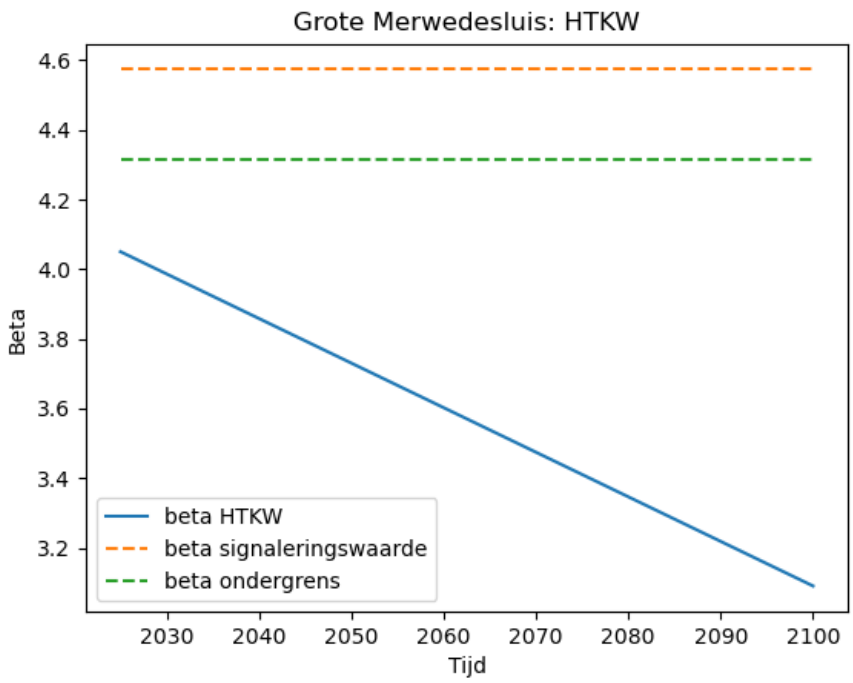

Recreatiesluis Lingehaven: STKWp
beta STKWp
beta signaleringswaarde
beta ondergrens
Beta
5.8
5.6
5.4
5.2
2030
2040
2050
2060
2070
2080
2090
2100
Tijd

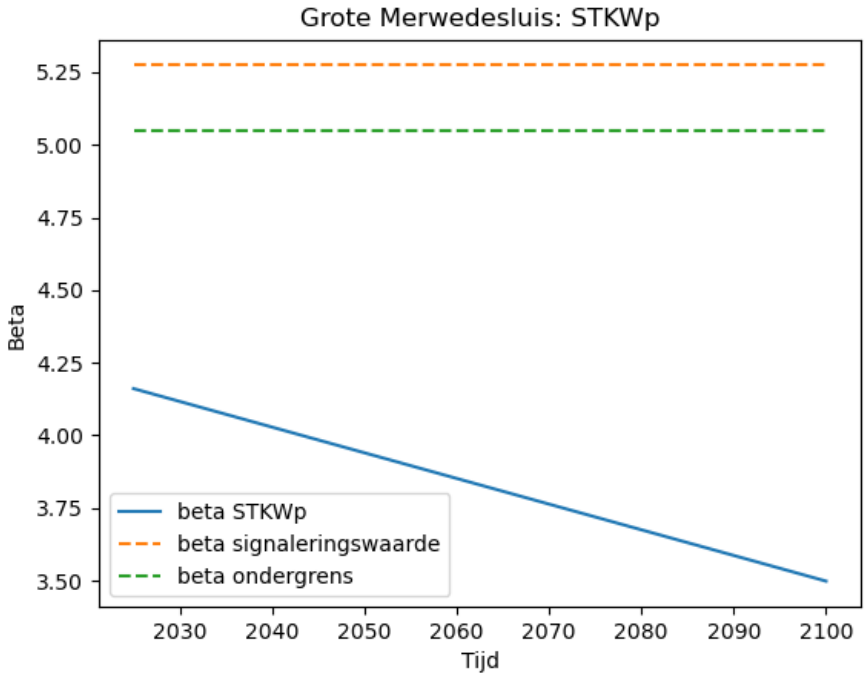
B Betrouwbaarheid kunstwerken aangepast

Deze bijlage presenteert de betrouwbaarheidsindex per faalmechanisme (BSKW, HTKW en STKWp) zoals berekend voor de aangepaste situatie. De betrouwbaarheidsindex is berekend voor de zichtjaren 2023, 2050 en 2100, voor de tussenliggende jaren is er lineair geïnterpoleerd.

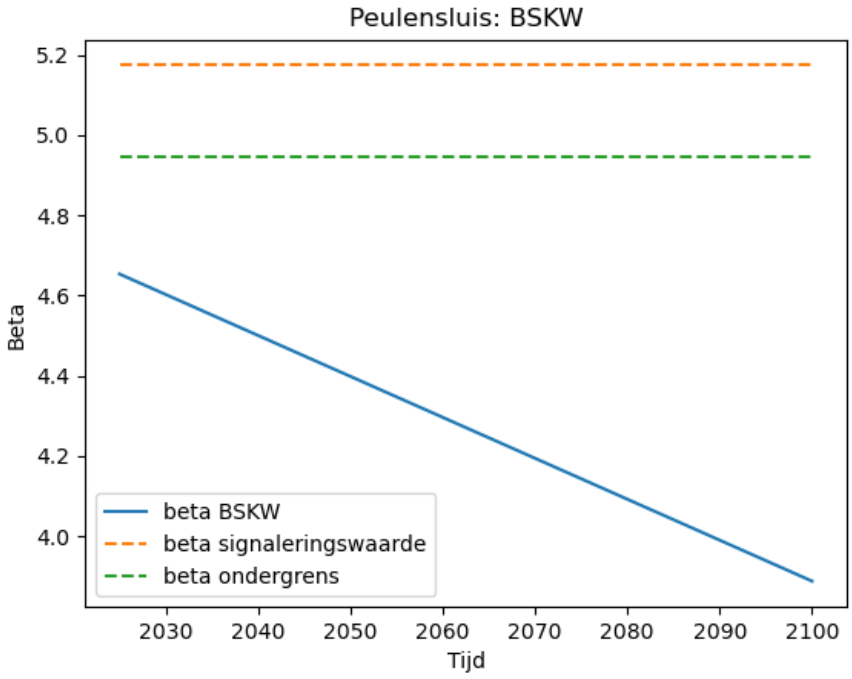
B.1 Grote Merwedesluis

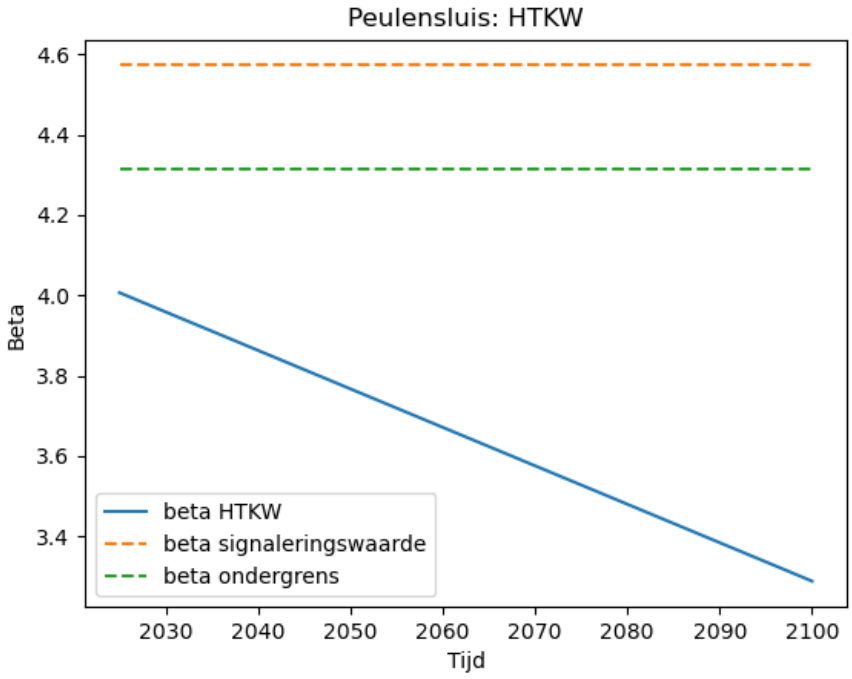


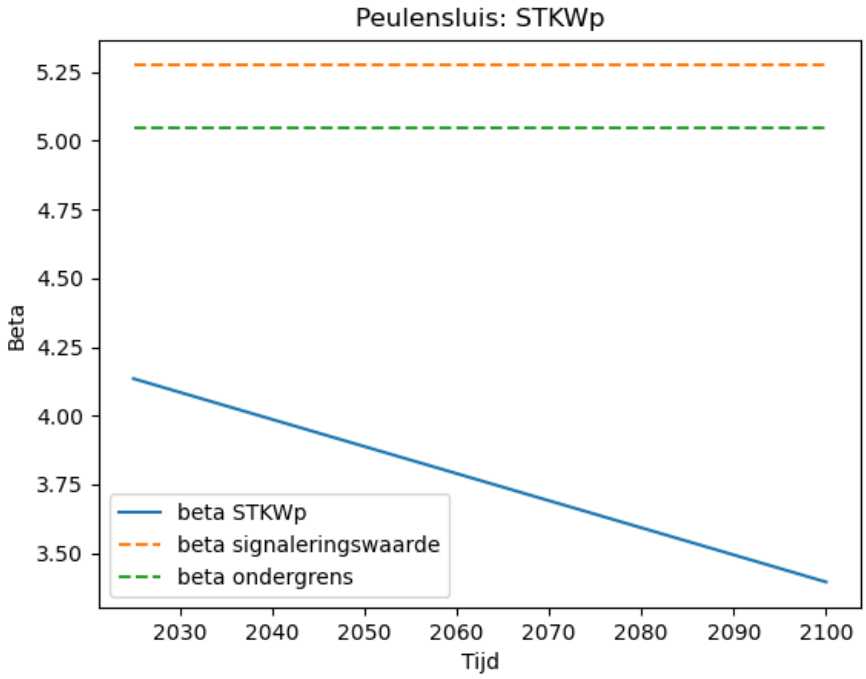

Grote Merwedesluis: HTKW
Beta
Tijd
beta HTKW
beta signaleringswaarde
beta ondergrens
4.6
4.4
4.2
4.0
3.8
3.6
3.4
3.2
2030
2040
2050
2060
2070
2080
2090
2100


Grote Merwedesluis: STKWp
Beta
Tijd
beta STKWp
beta signaleringswaarde
beta ondergrens
5.25
5.00
4.75
4.50
4.25
4.00
3.75
3.50
2030
2040
2050
2060
2070
2080
2090
2100

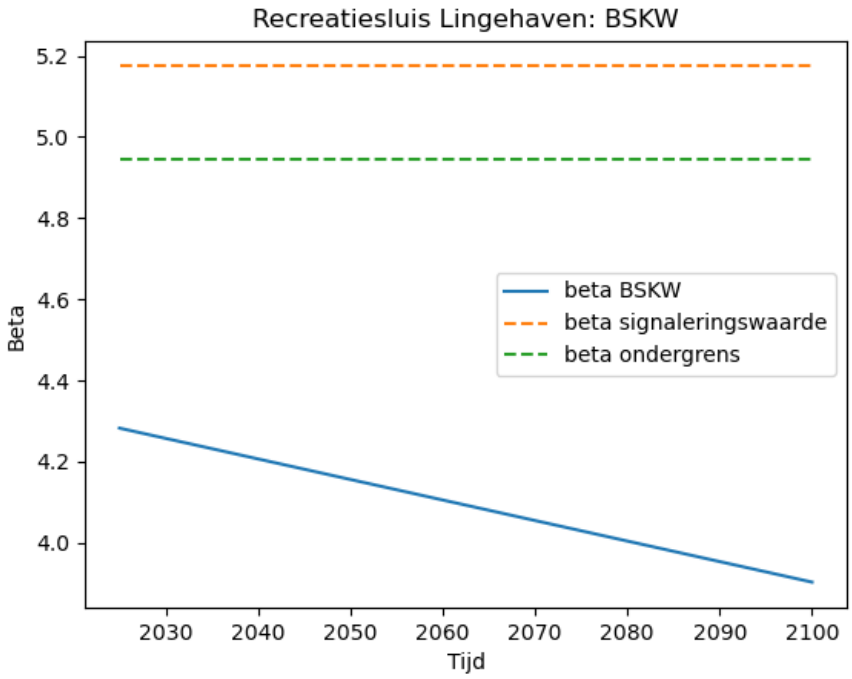
B.2 Peulensluis

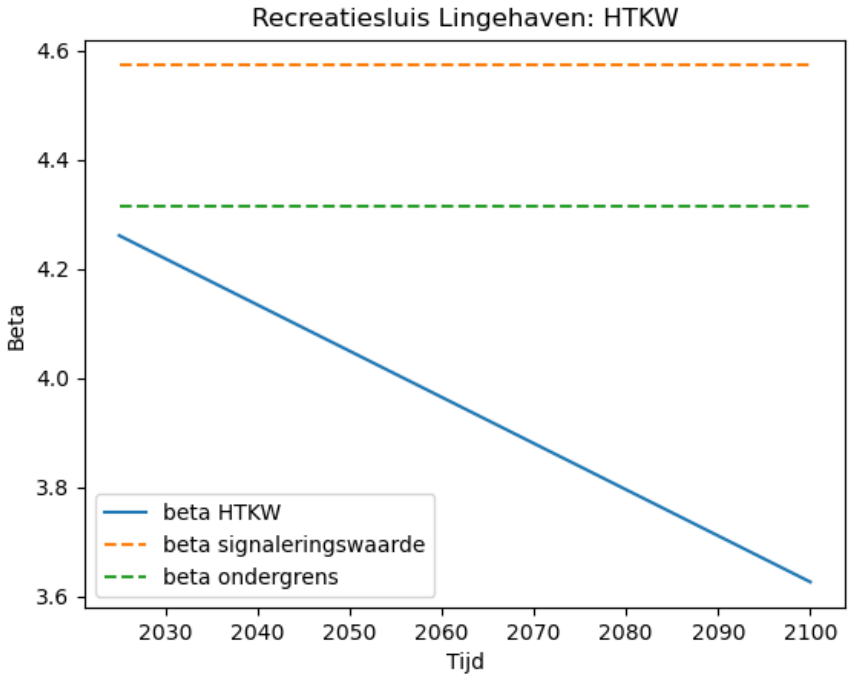


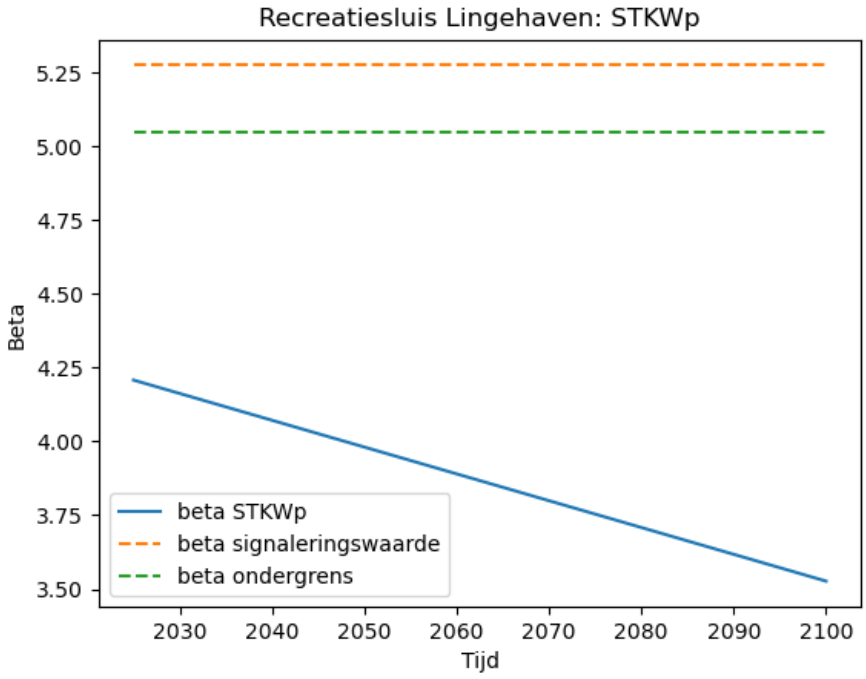




B.3 Recreatiesluis Lingehaven




Recreatiesluis Lingehaven: HTKW
4.6
4.4
4.2
4.0
3.8
3.6
Beta
2030
2040
2050
2060
2070
2080
2090
2100
Tijd
beta HTKW
beta signaleringswaarde
beta ondergrens


Recreatiesluis Lingehaven: STKWp
5.25
5.00
4.75
4.50
4.25
4.00
3.75
3.50
Beta
2030
2040
2050
2060
2070
2080
2090
2100
Tijd
beta STKWp
beta signaleringswaarde
beta ondergrens

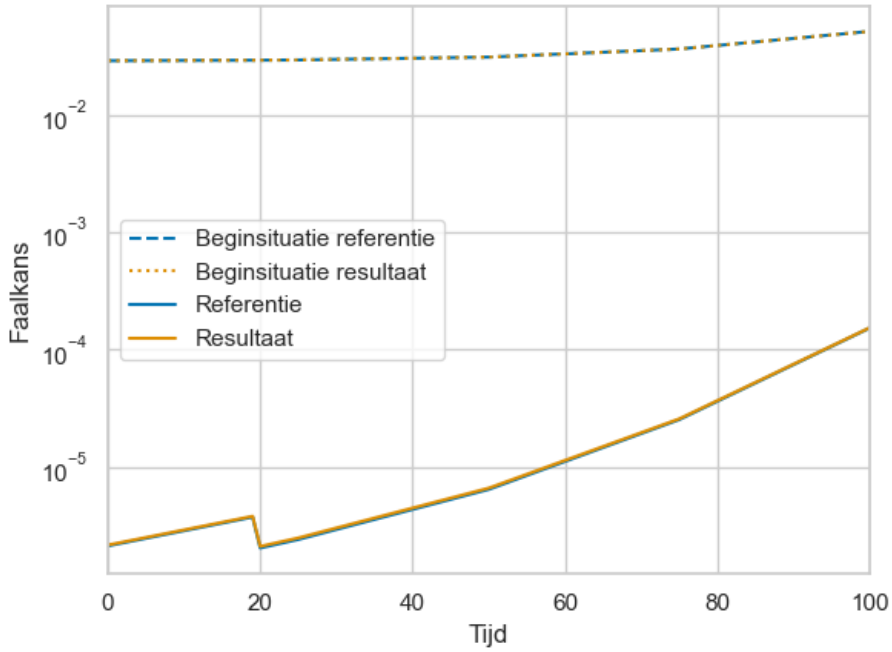
C Resultaten per scenario

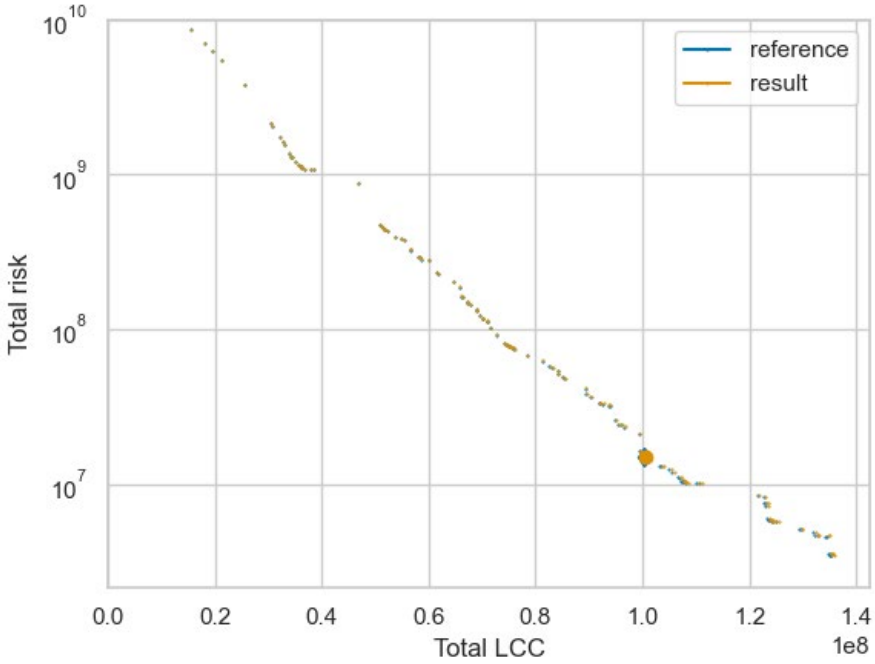
Deze bijlage presenteert een vergelijking van de scenarioresultaten met de twee referentiesituaties.

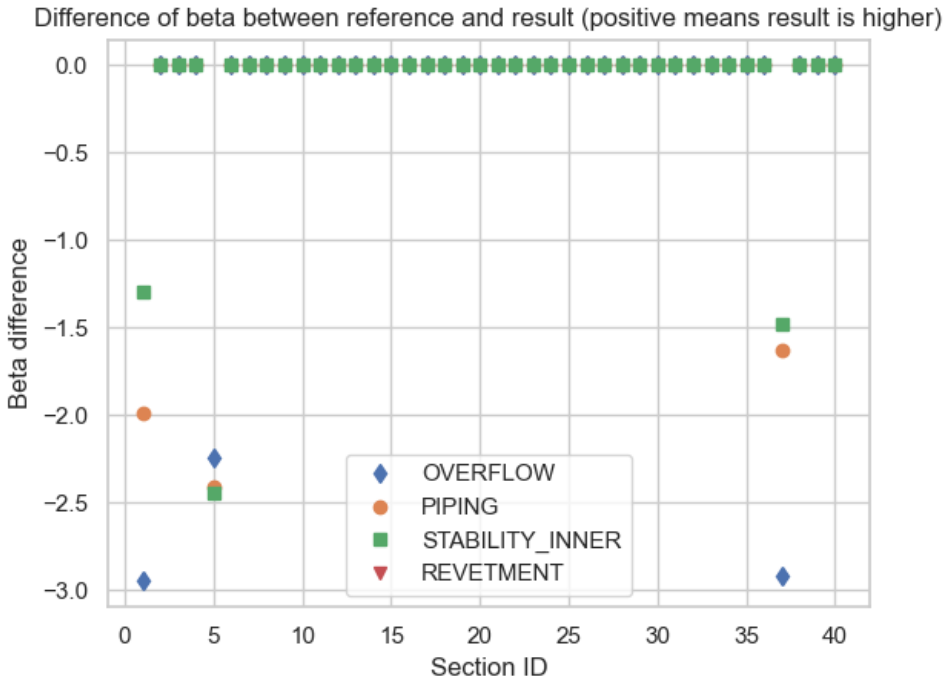
In elk paragraaf worden drie figuren weergegeven:

- Figuur 1: verloop van de trajectfaalkans over een periode van 100 jaar. De beginsituatie verwijst naar de situatie zonder versterkingen in het traject.
- Figuur 2: totale life-cycle kost (LCC) vs. het risico per optimalisatiestap; het punt in de grafiek markeert de minimale totale kosten.
- Figuur 3: het verschil per dijkvak tussen de betrouwbaarheidsindex (beta), gevonden voor het scenario en voor de referentiesituatie. Kunstwerk Grote Merwedesluis is gemodelleerd als dijkvak 5, kunstwerk Peulensluis als dijkvak 37, en kunstwerk Recreatiesluis Lingehaven als dijkvak 1. In de vergelijkingen met Referentie 1 worden er altijd negatieve beta's voor de kunstwerken gevonden. Dit komt door het feit dat in Referentie 1 de kunstwerken niet zijn meegenomen.

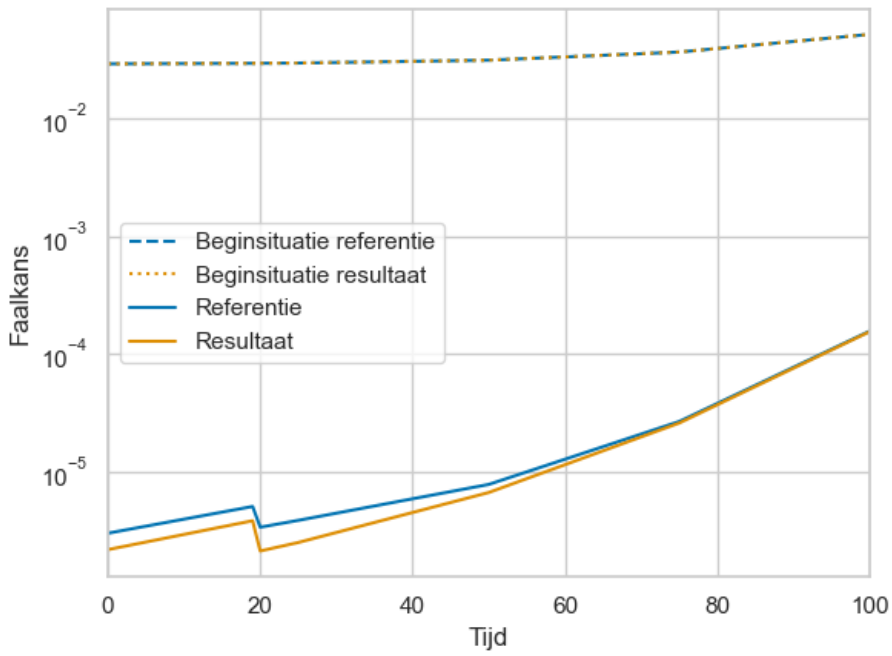
C.1 Scenario 1 vs. Referentie 1

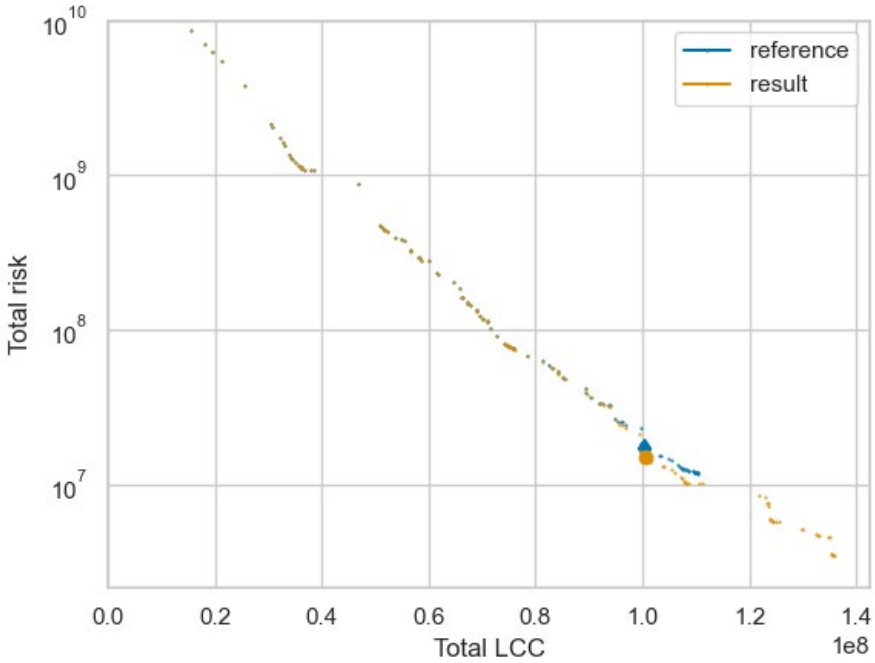


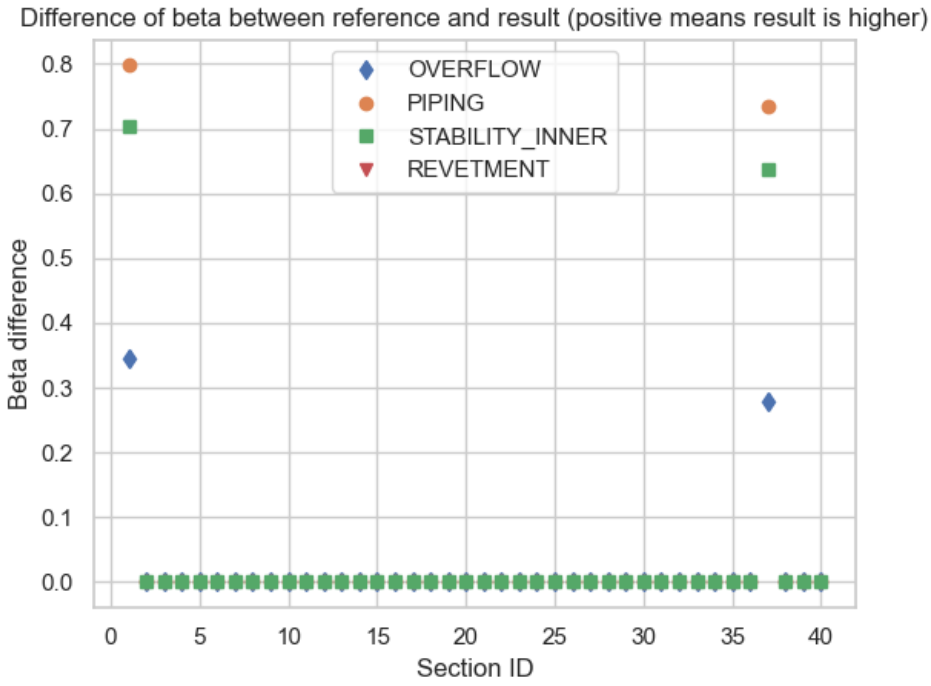

reference
result
Total risk
Total LCC
1e8


Difference of beta between reference and result (positive means result is higher)
Beta difference
Section ID
OVERFLOW
PIPING
STABILITY_INNER
REVETMENT

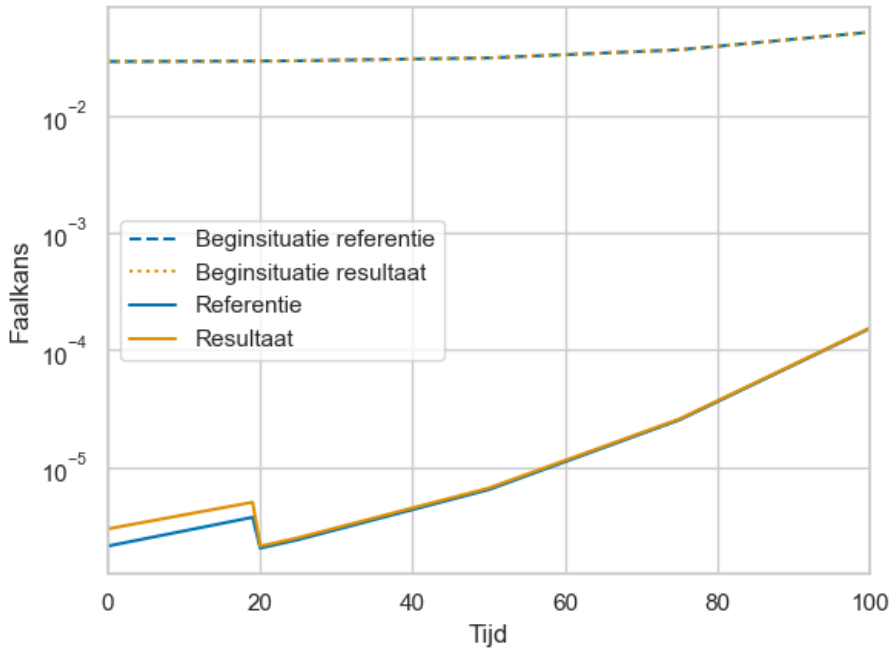
C.2 Scenario 1 vs. Referentie 2

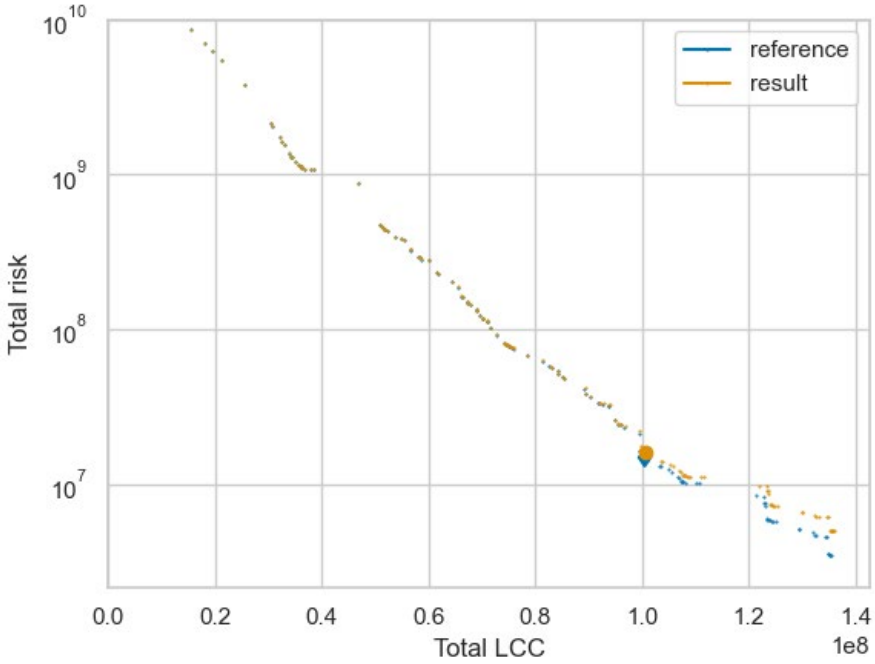


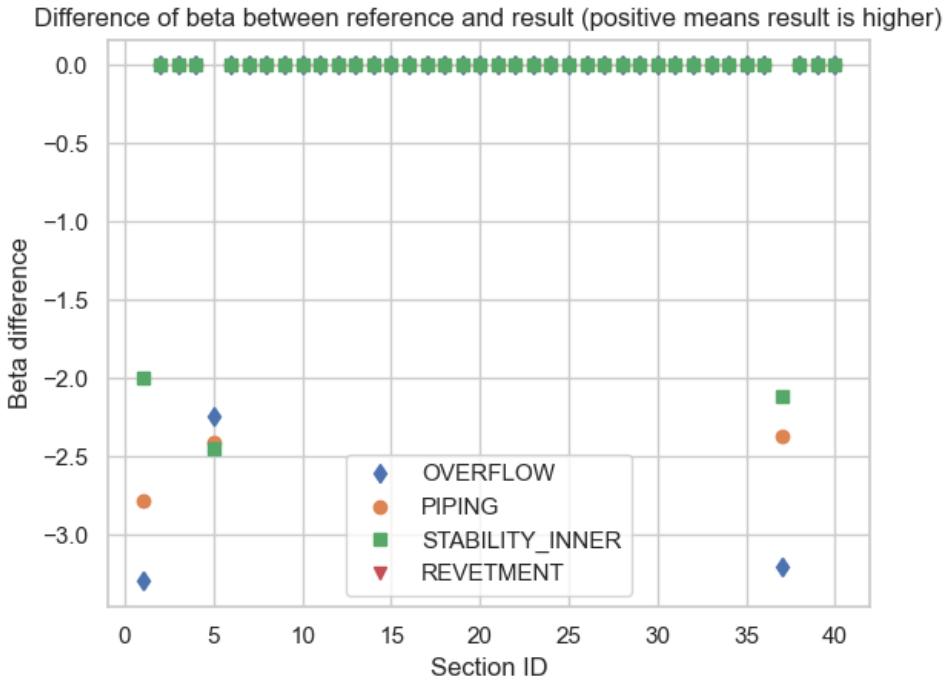




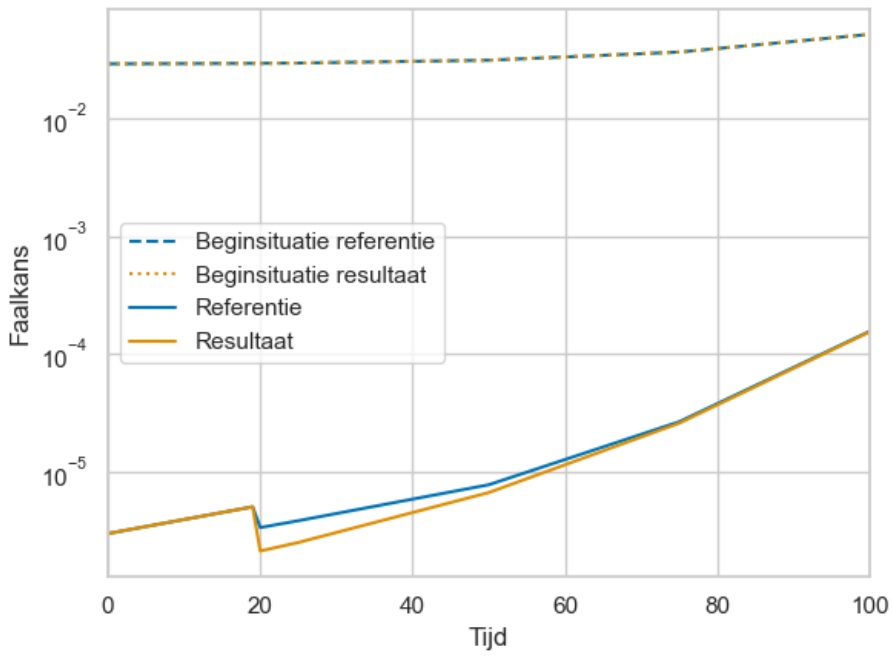
C.3 Scenario 2 vs. Referentie 1

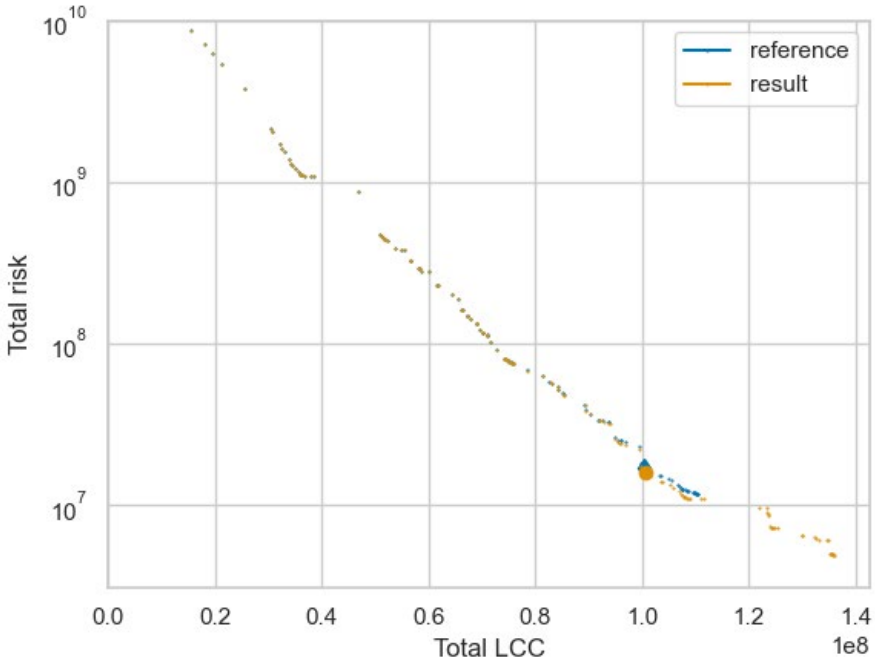


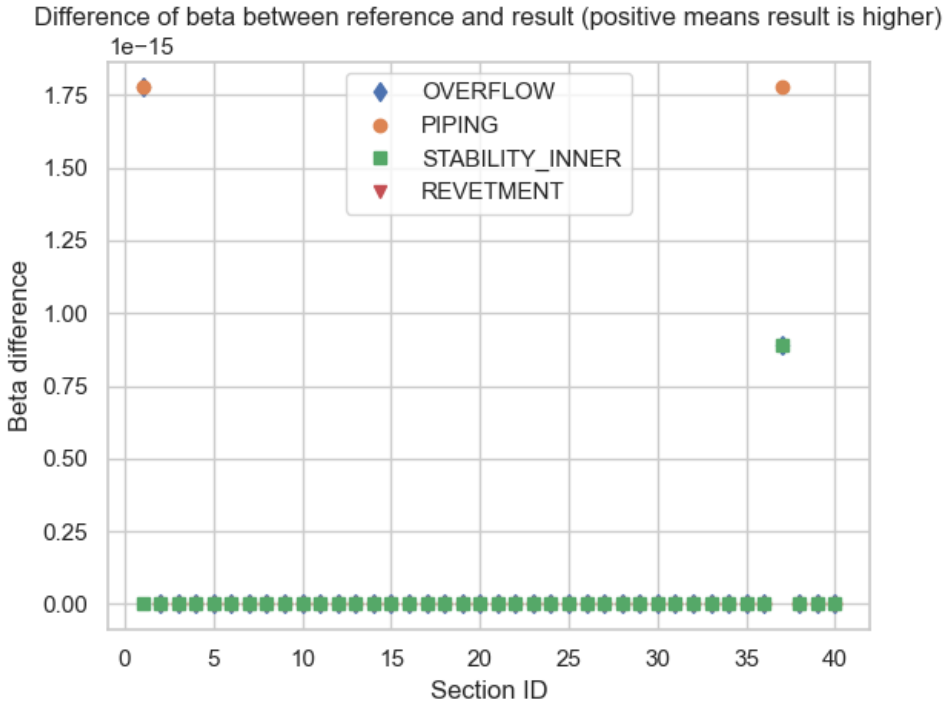

reference
result
Total risk
Total LCC
1e8


Difference of beta between reference and result (positive means result is higher)
Beta difference
Section ID
OVERFLOW
PIPING
STABILITY_INNER
REVETMENT

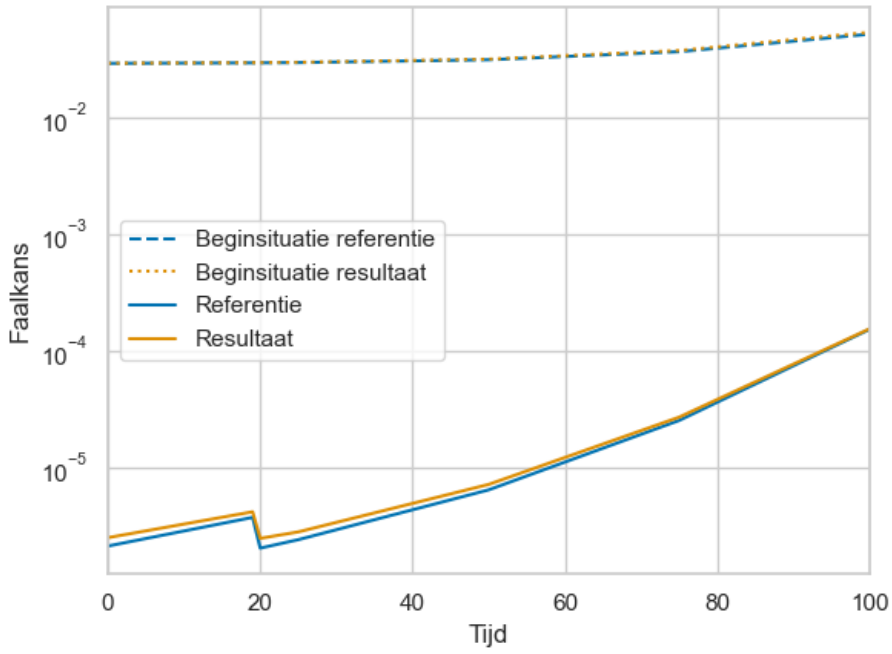
C.4 Scenario 2 vs. Referentie 2

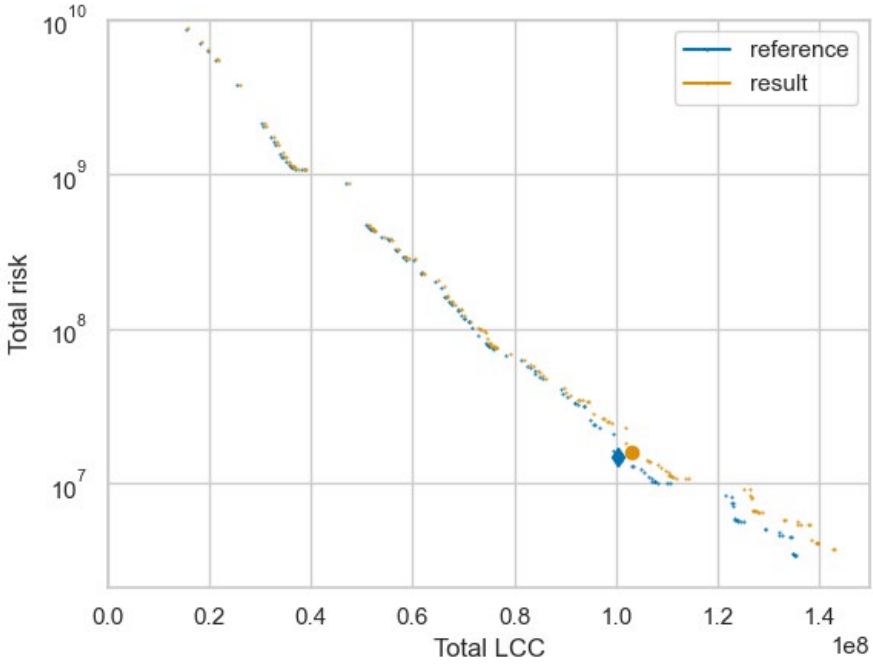


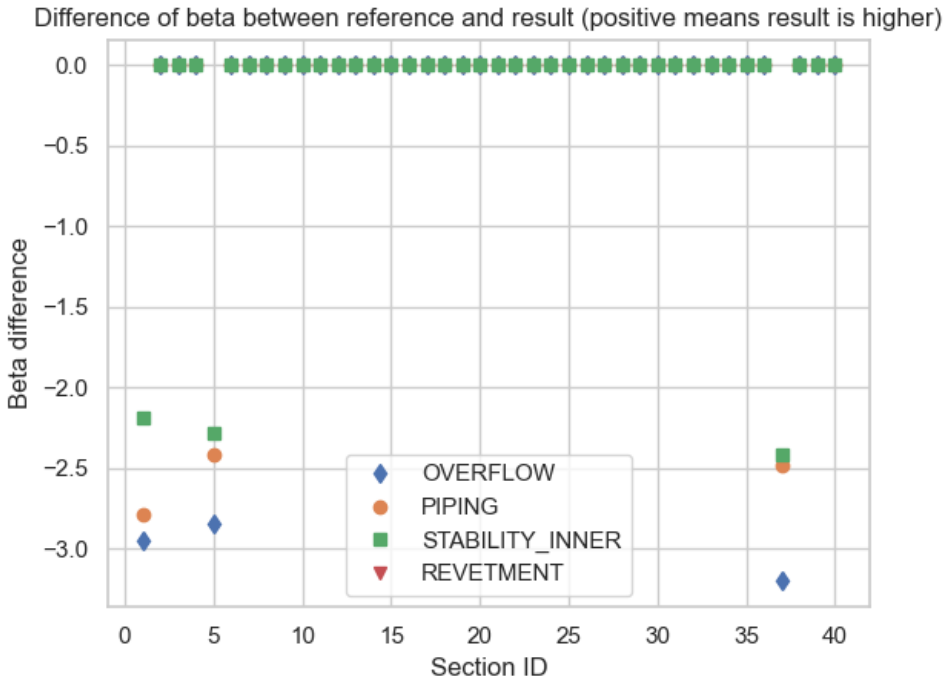




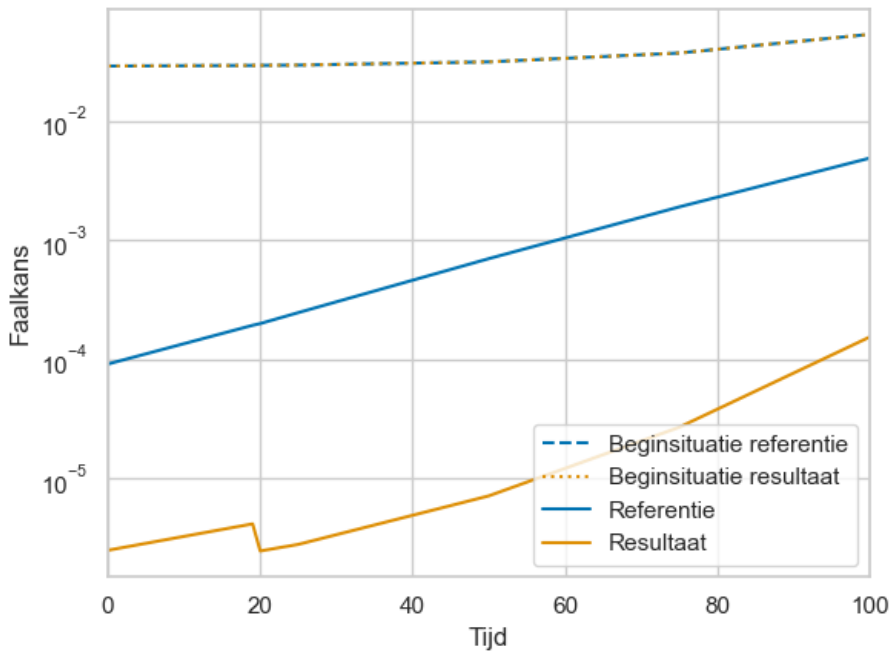
C.5 Scenario 3 vs. Referentie 1

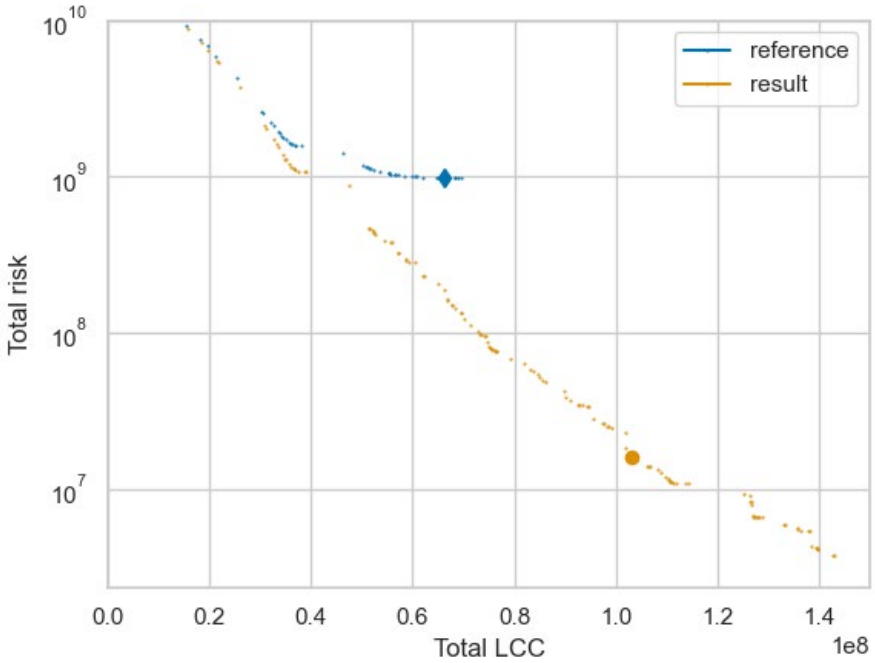


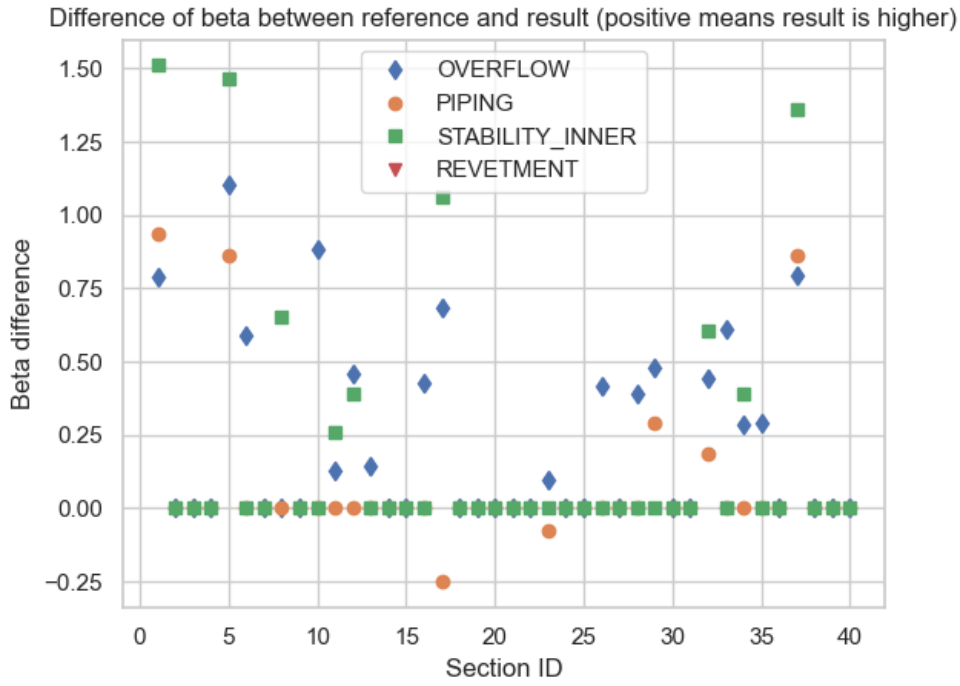

reference
result
Total risk
Total LCC
1e8


Difference of beta between reference and result (positive means result is higher)
Beta difference
Section ID
OVERFLOW
PIPING
STABILITY_INNER
REVETMENT

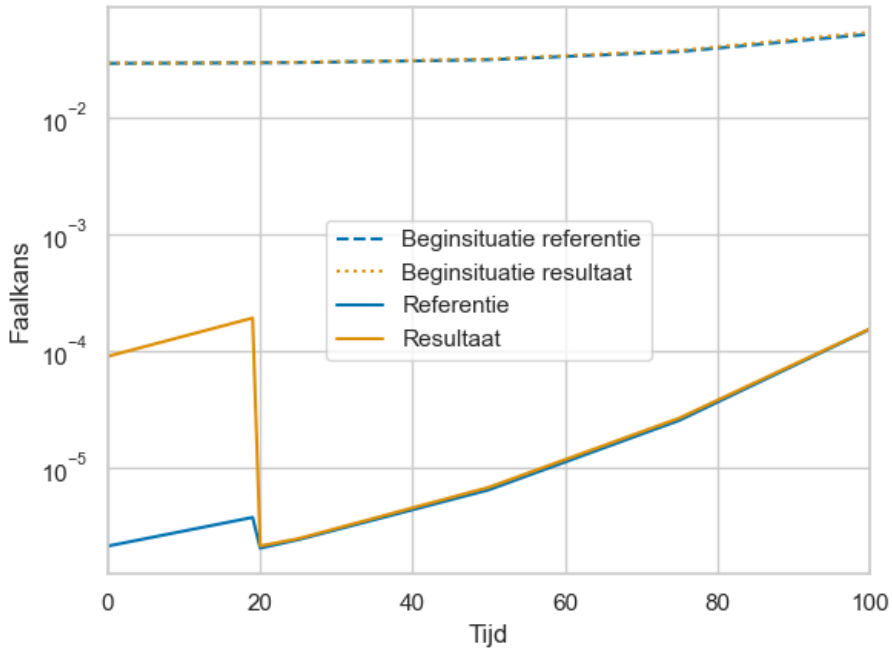
C.6 Scenario 3 vs. Referentie 2

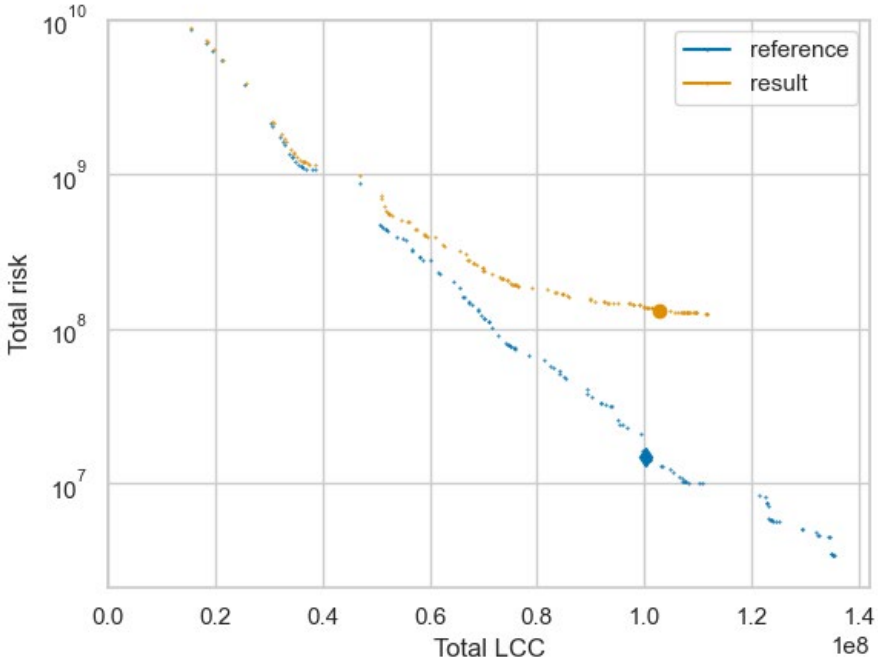


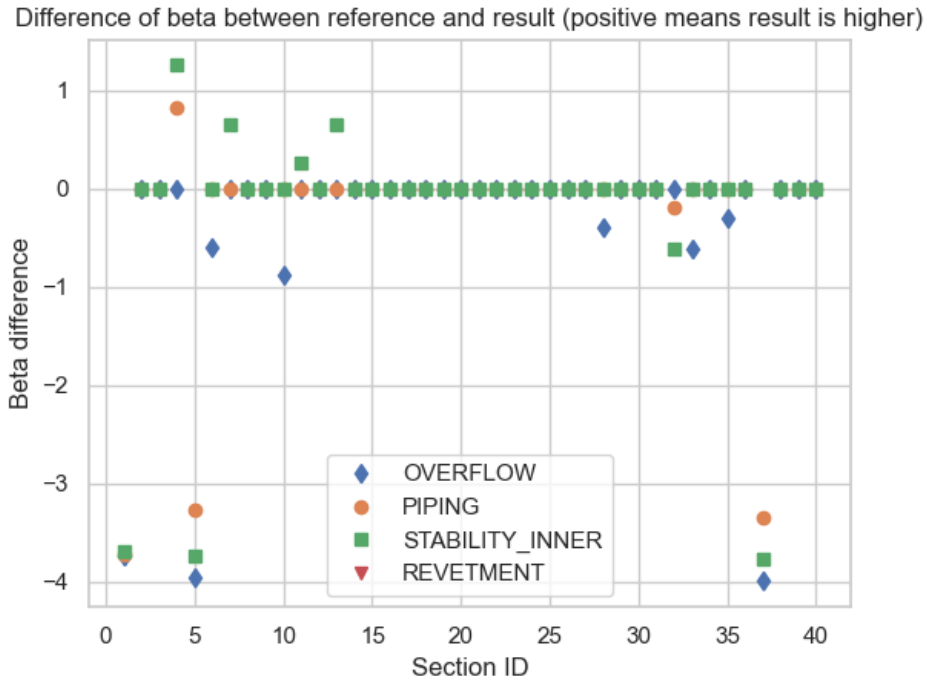




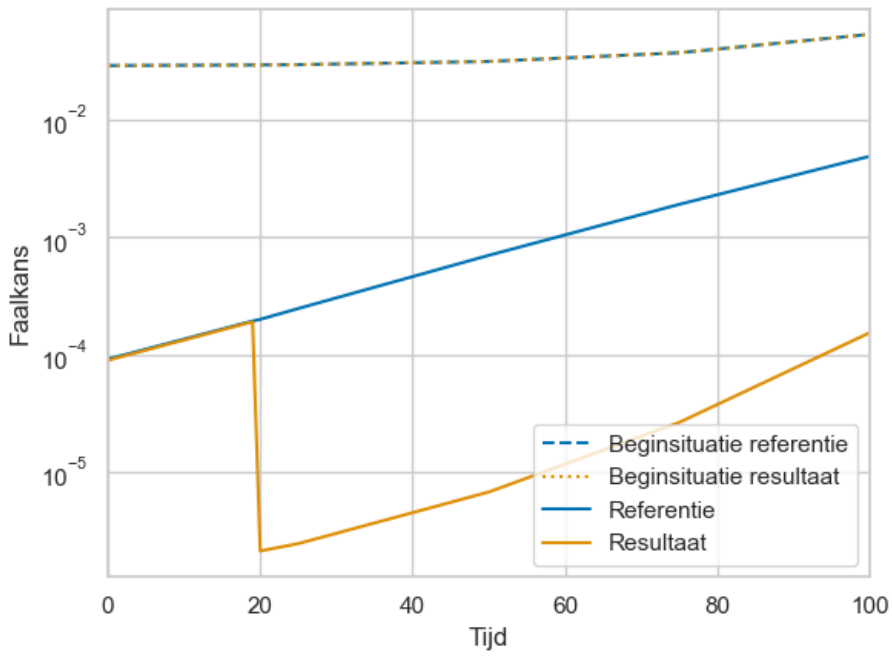
C.7 Scenario 4 vs. Referentie 1

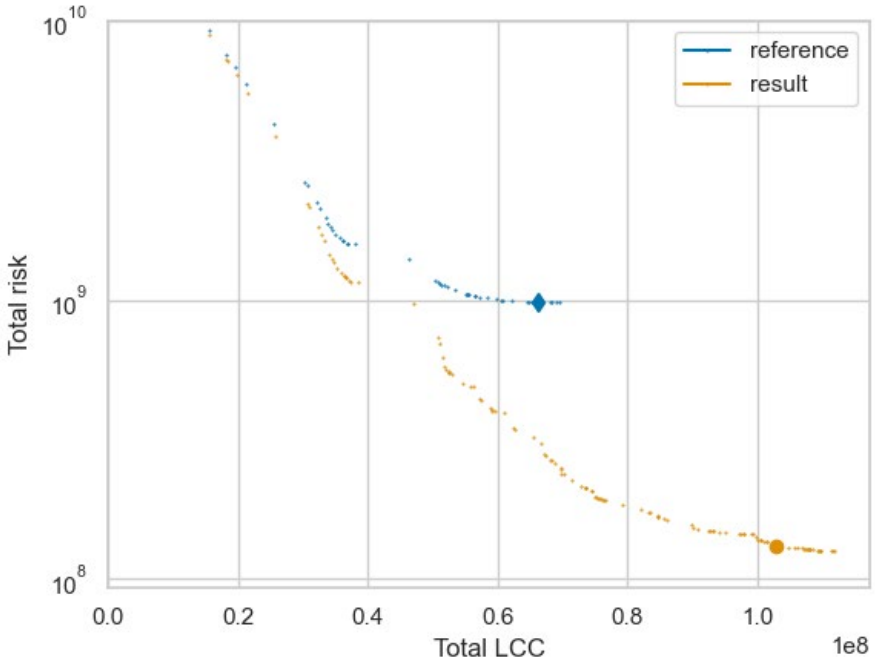


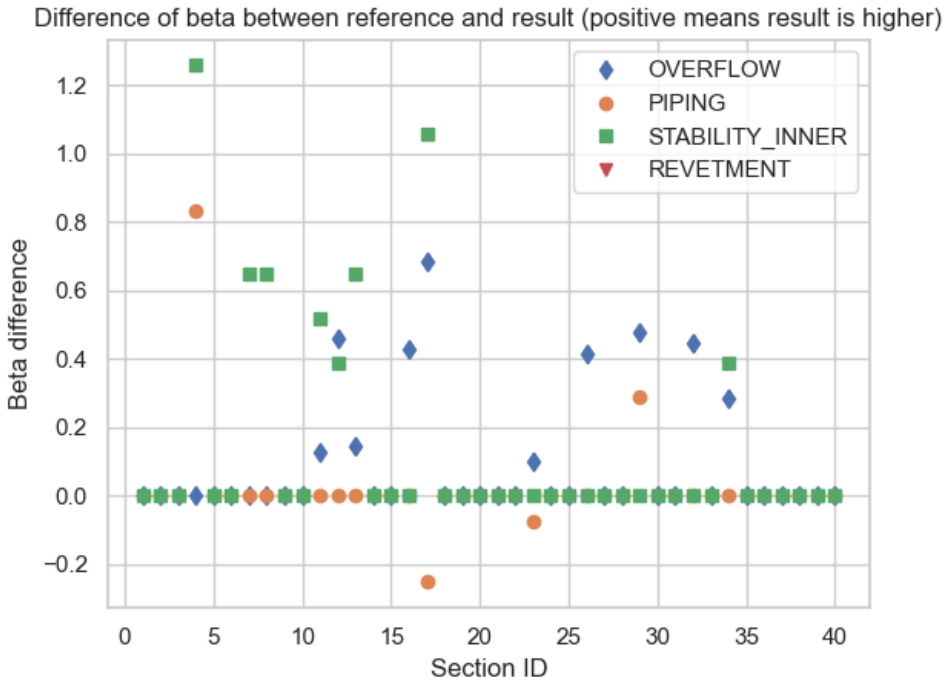

reference
result
Total risk
Total LCC
1e8


Difference of beta between reference and result (positive means result is higher)
Beta difference
Section ID
OVERFLOW
PIPING
STABILITY_INNER
REVETMENT

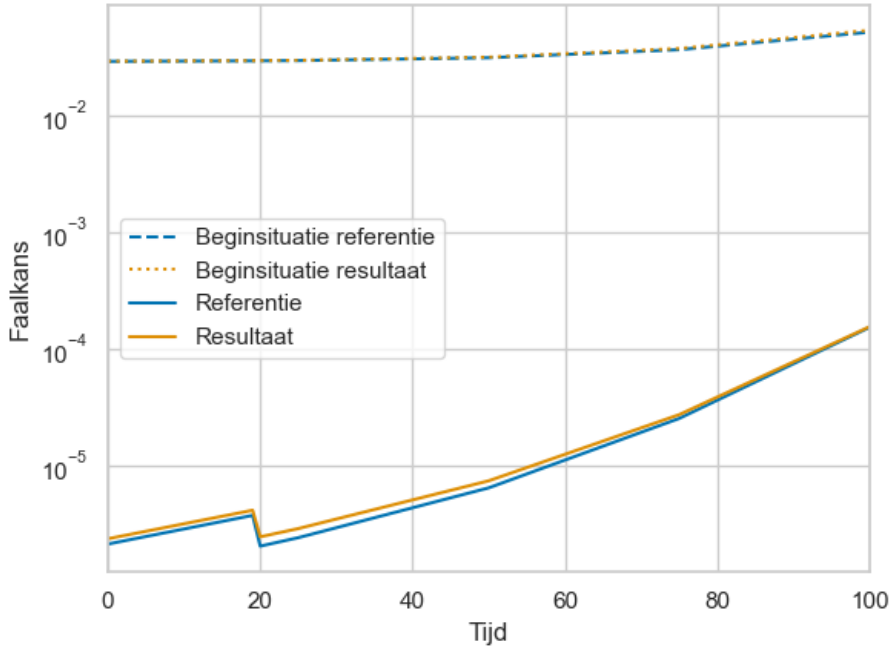
C.8 Scenario 4 vs. Referentie 2

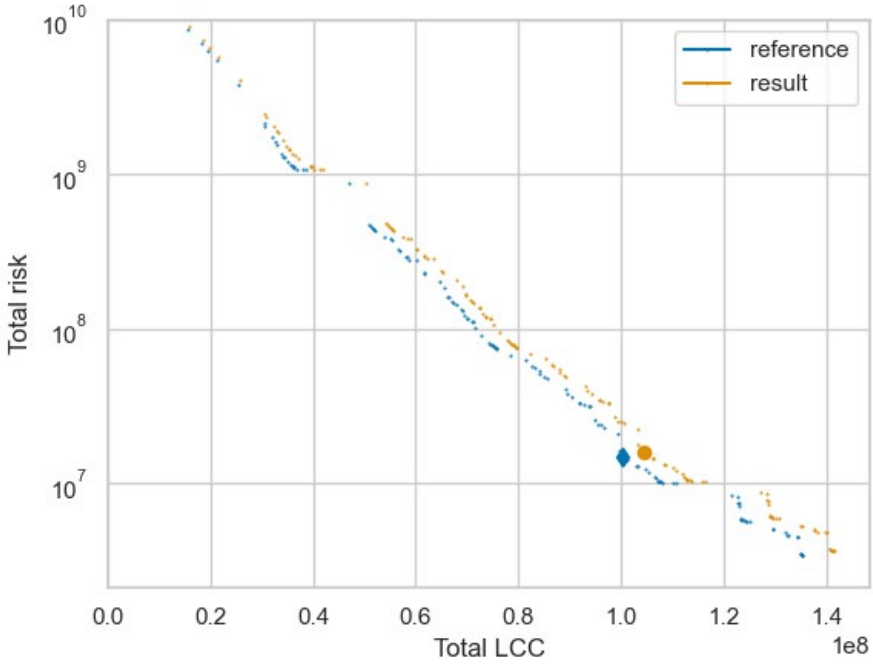


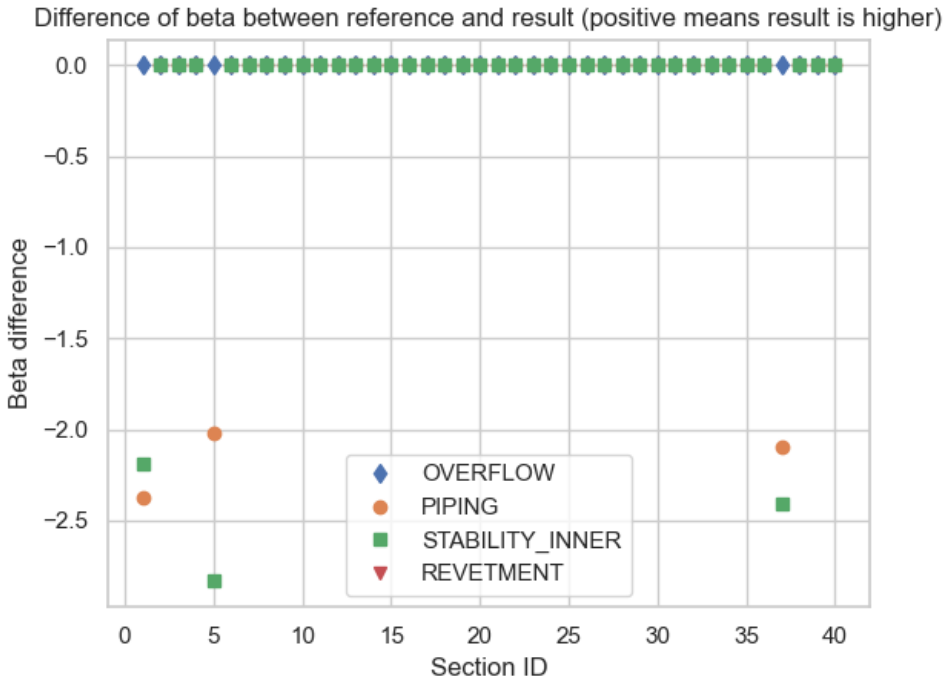




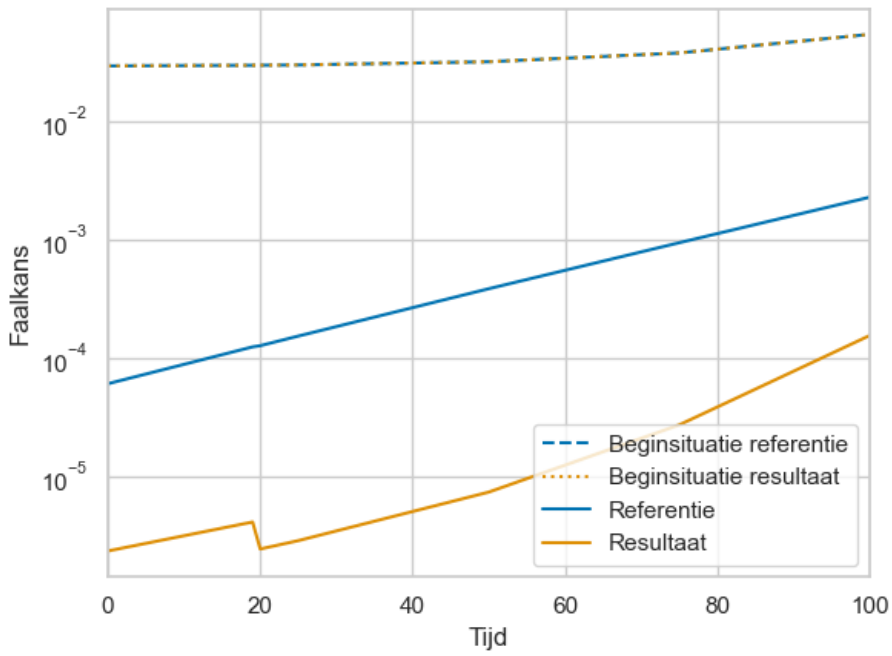
C.9 Scenario 5 vs. Referentie 1

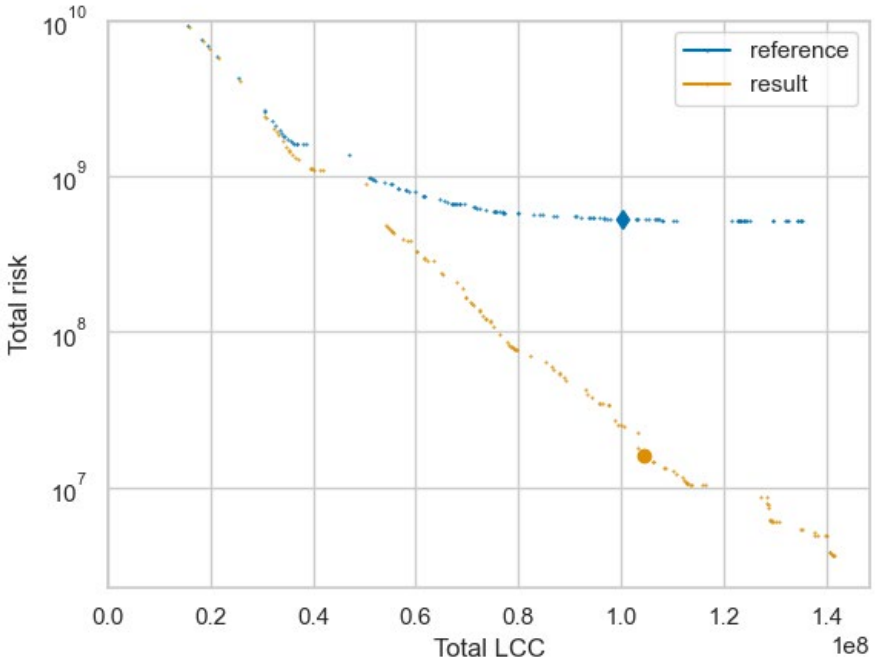


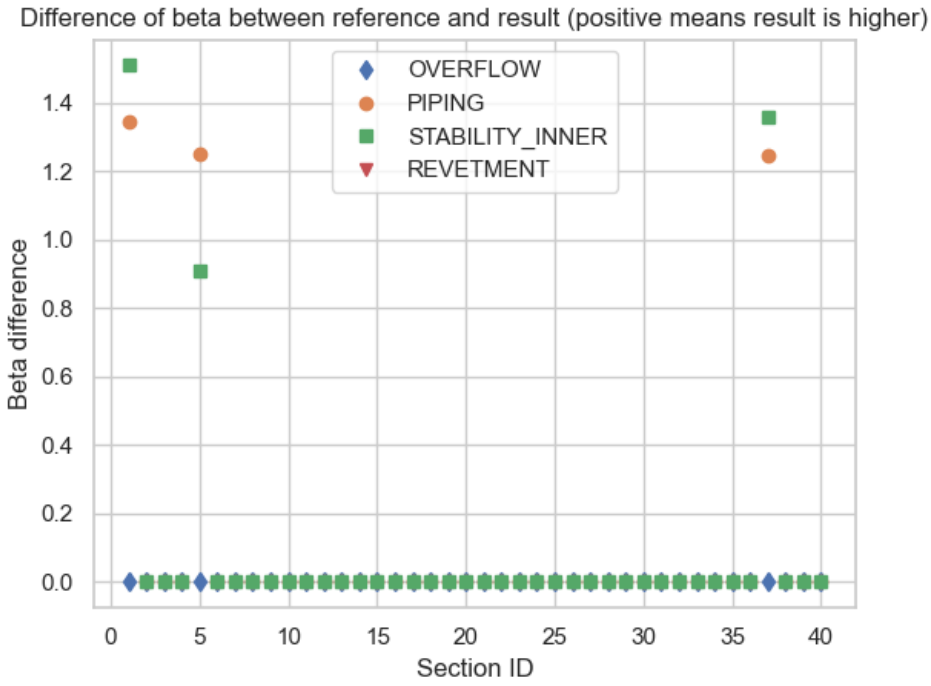

reference
result
Total risk
Total LCC
1e8


Difference of beta between reference and result (positive means result is higher)
Beta difference
Section ID
OVERFLOW
PIPING
STABILITY_INNER
REVETMENT

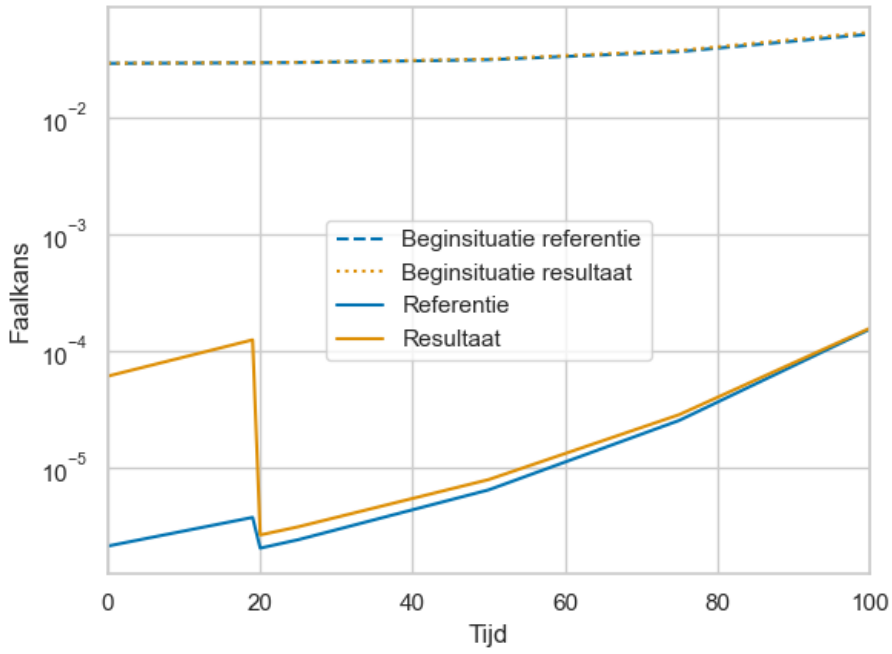
C.10 Scenario 5 vs. Referentie 2

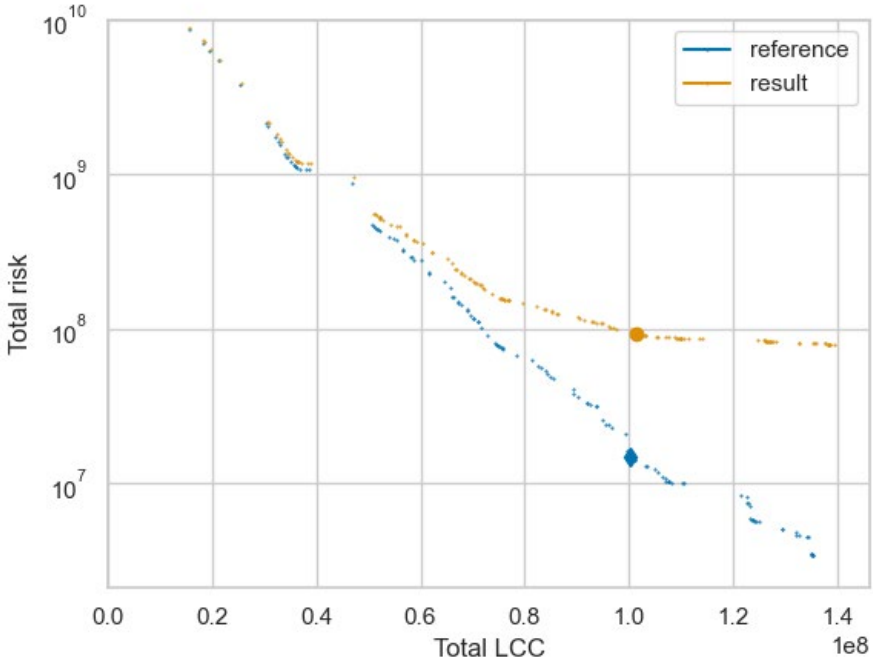


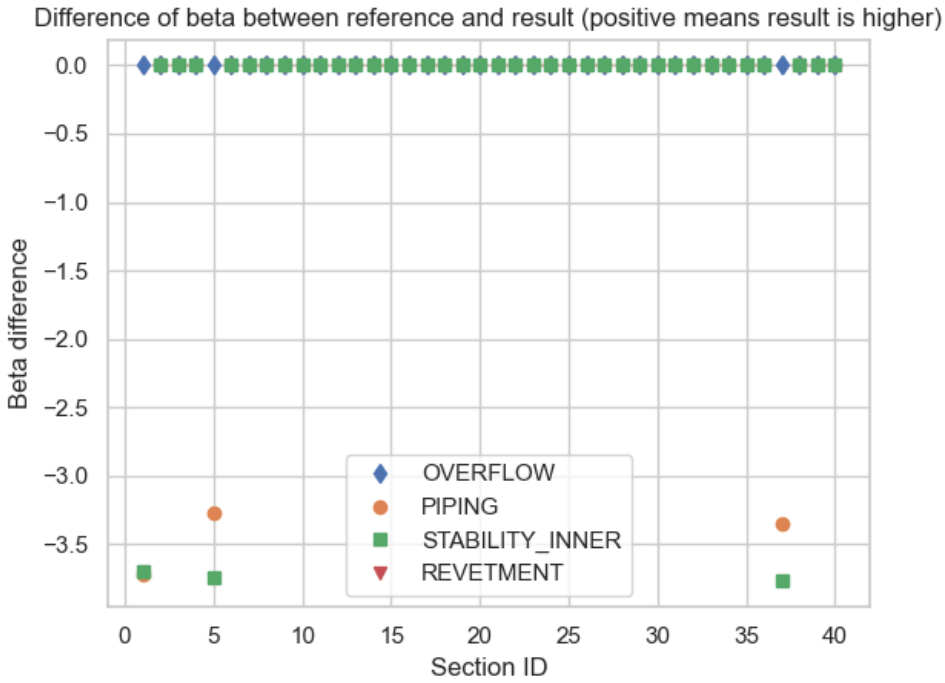




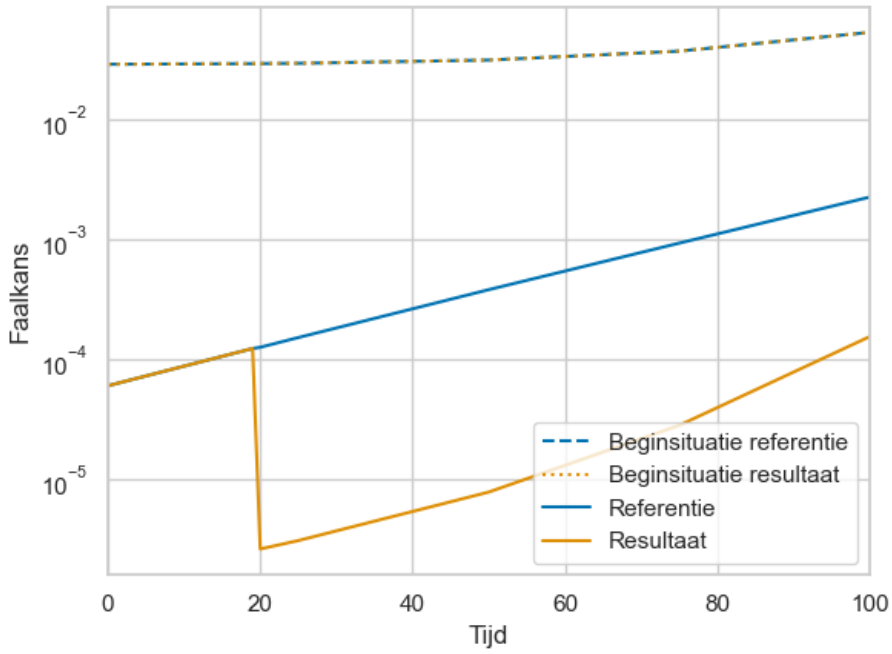
C.11 Scenario 6 vs. Referentie 1

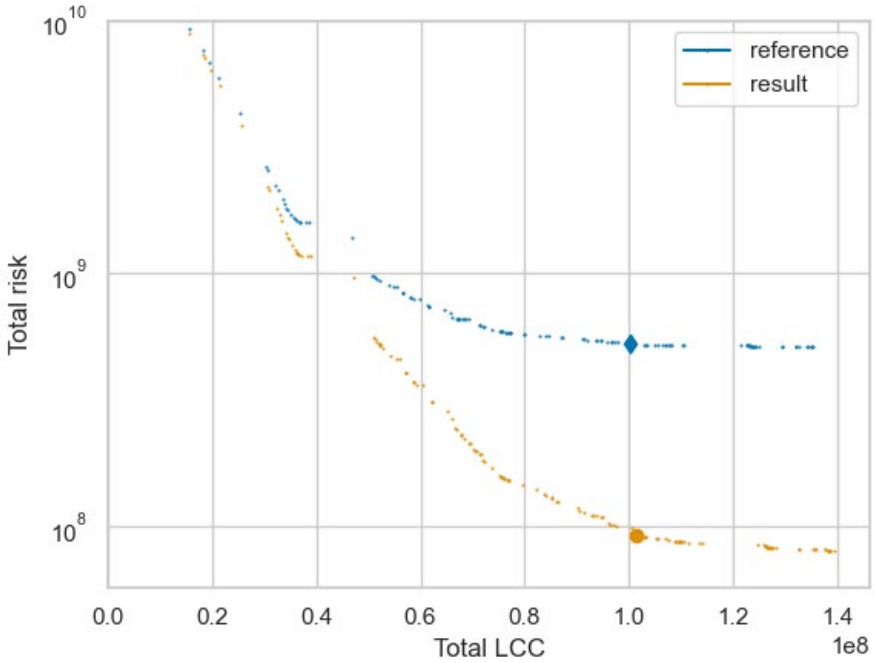


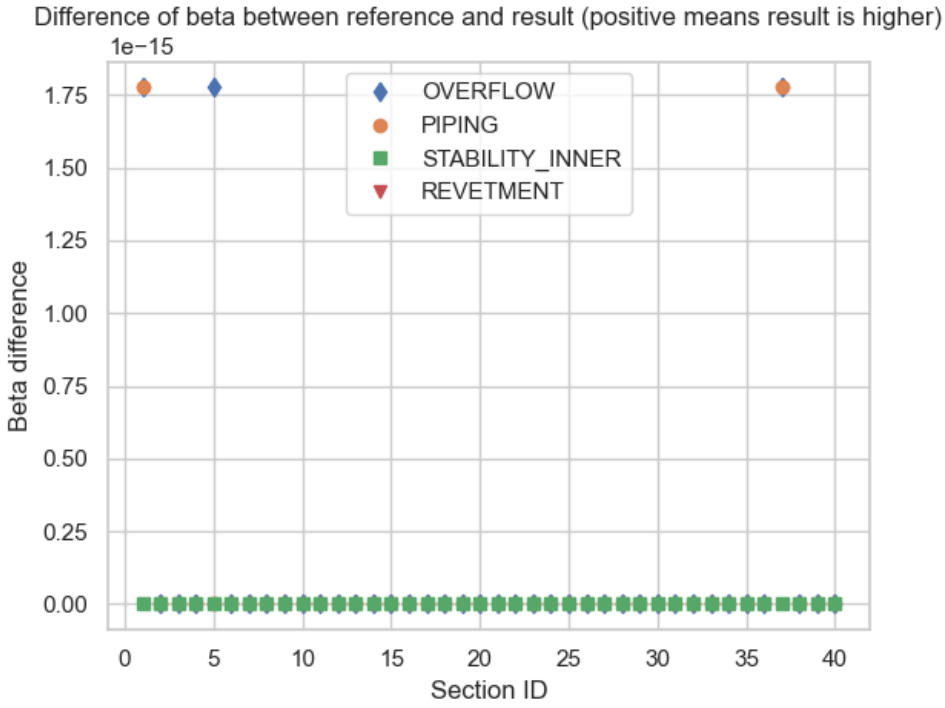

reference
result
Total risk
Total LCC
1e8


Difference of beta between reference and result (positive means result is higher)
Beta difference
Section ID
OVERFLOW
PIPING
STABILITY_INNER
REVETMENT

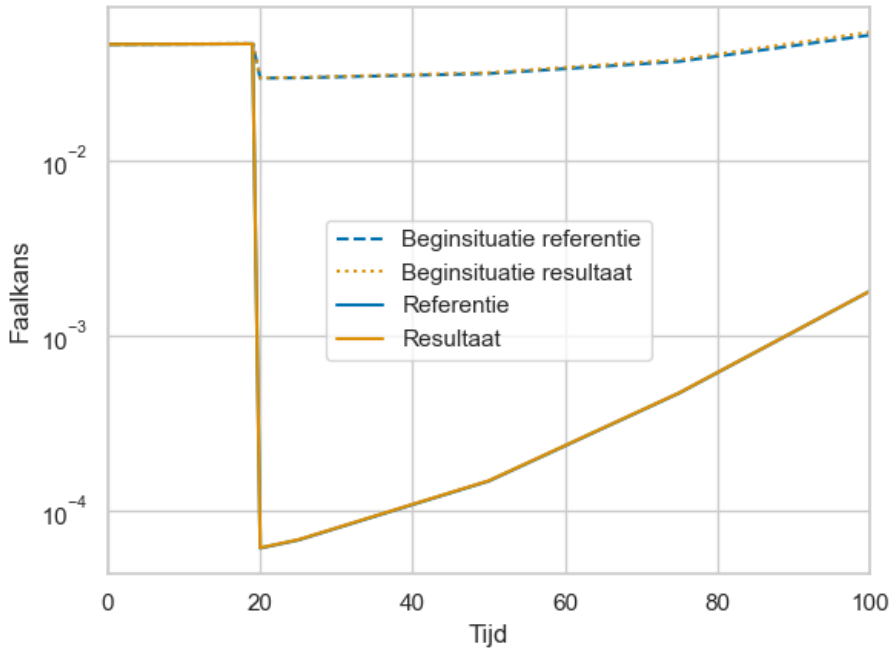
C.12 Scenario 6 vs. Referentie 2

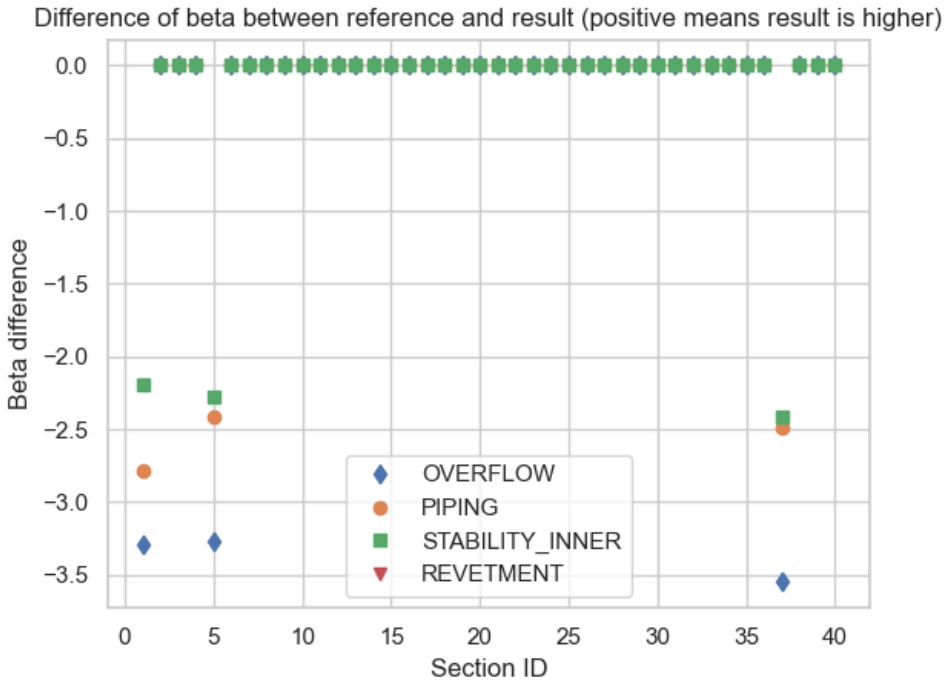




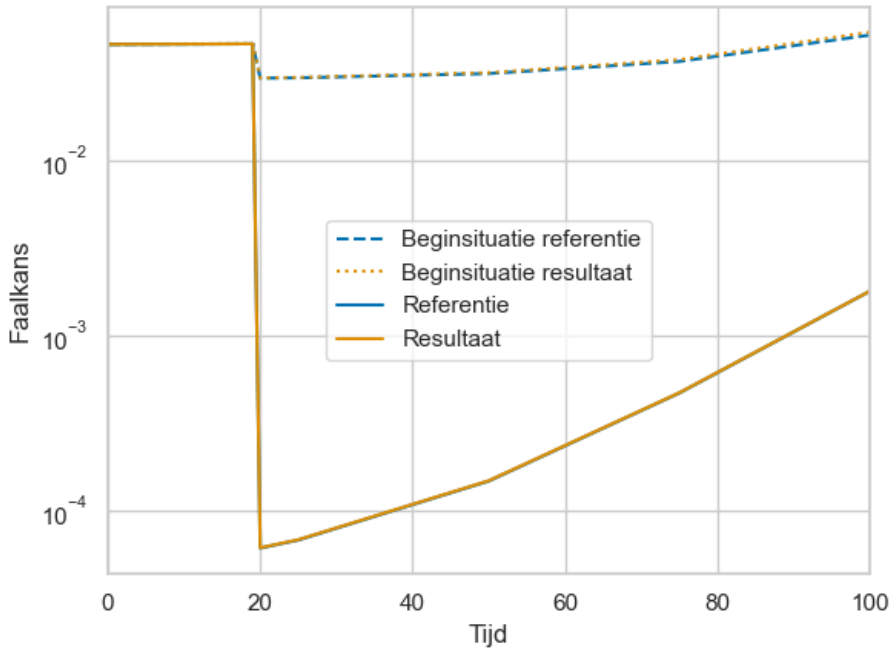


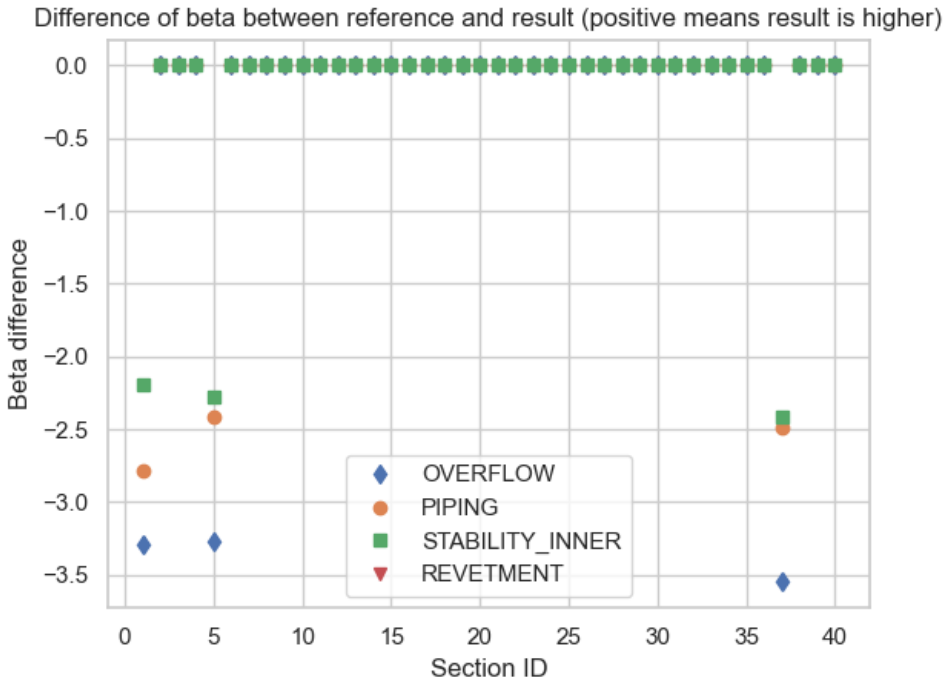
C.13 Scenario 7 vs. Referentie 1



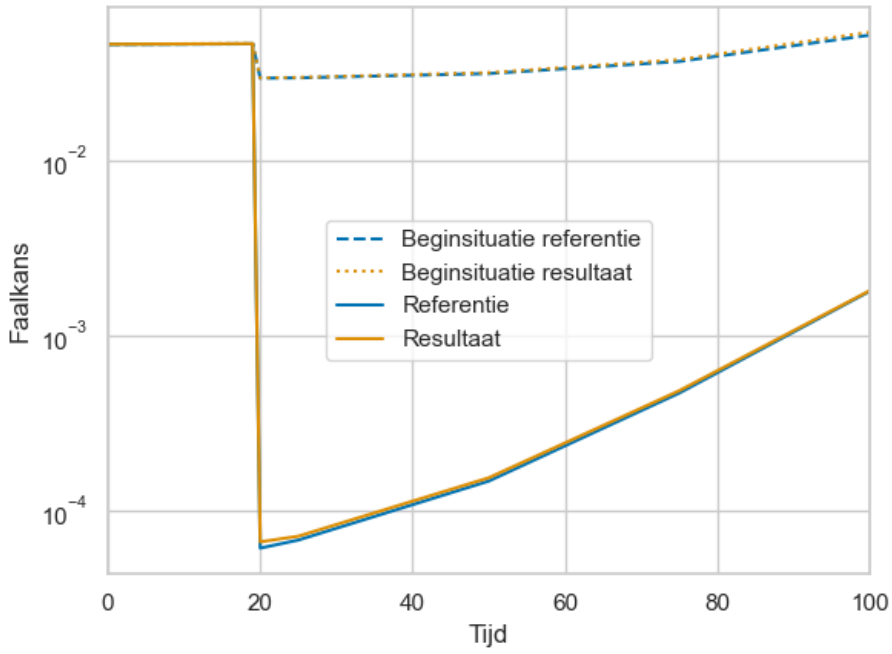


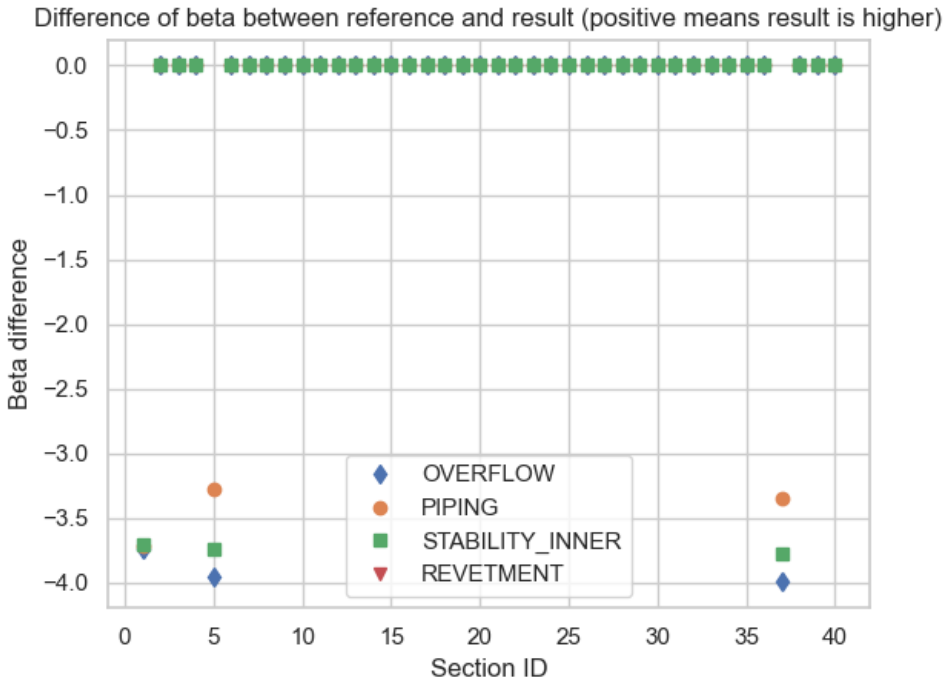
C.14 Scenario 7 vs. Referentie 2



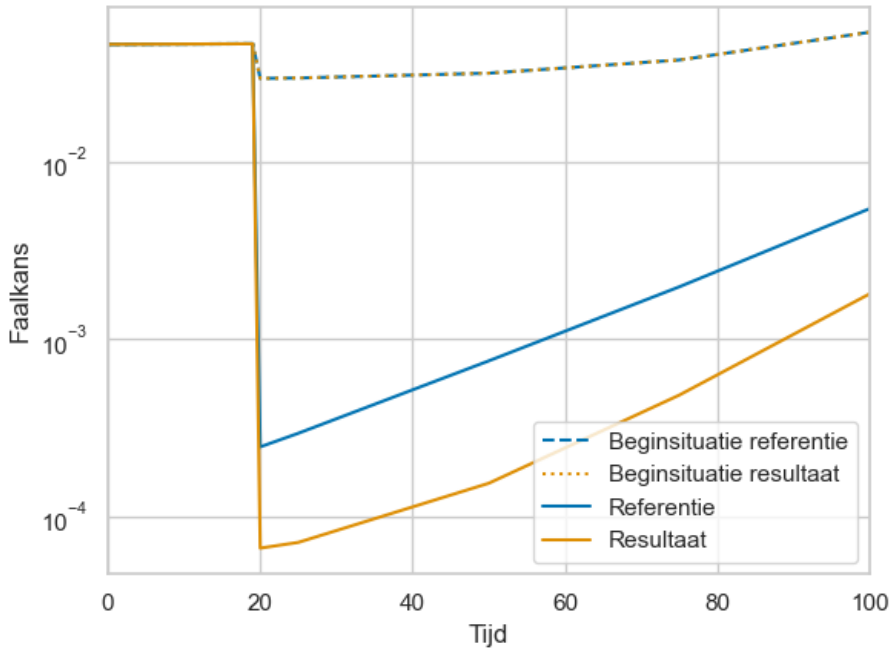


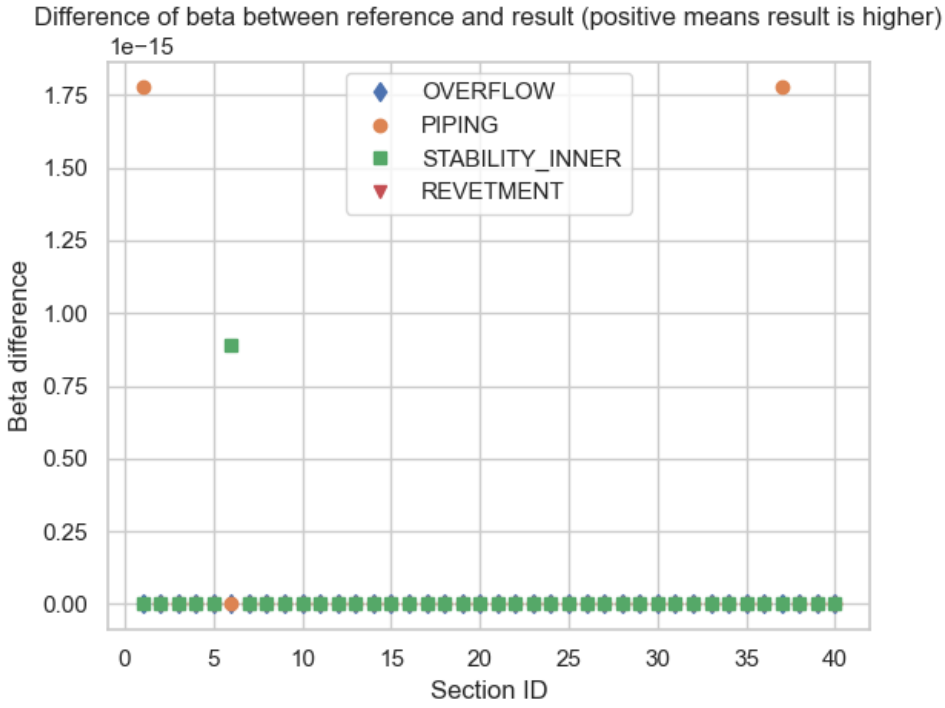
C.15 Scenario 8 vs. Referentie 1





C.16 Scenario 8 vs. Referentie 2




Difference of beta between reference and result (positive means result is higher)
1e−15
1.75
1.50
1.25
1.00
0.75
0.50
0.25
0.00
Beta difference
OVERFLOW
PIPING
STABILITY_INNER
REVETMENT
0
5
10
15
20
25
30
35
40
Section ID

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

Deltares

www.deltares.nl