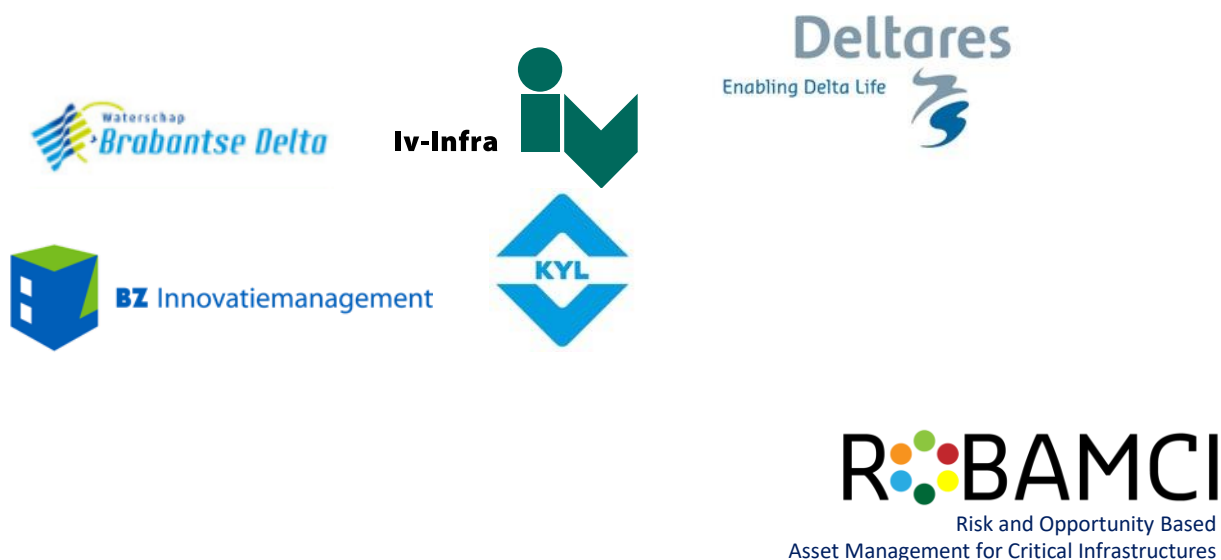


Toekomstbestendige Mark- Dintel-Vliet boezem

ROBAMCI Fase 4 (2018-2019)





Toekomstbestendige Mark-Dintel-Vliet boezem

ROBAMCI Fase 4 (2018-2019)

Wouter van der Wiel (IV-Infra)
Karolina Wojciechowska (Deltares)
Jasper Bink (BZIM)
Klaas-Jan Douben (Waterschap Brabantse Delta)
Peter Voortman (IV-Infra)
Dana Stuparu (Deltares)
Frank den Heijer (Deltares)

Titel

Toekomstbestendige Mark-Dintel-Vliet boezem

OpdrachtgeverWaterschap Brabantse
Delta, BREDA**Project**

11201843-007

Kenmerk

11201843-007-ZWS-0008 27

Pagina's**Trefwoorden**

ROBAMCI, Mark-Dintel-Vliet boezem, klimaatverandering, life-cycle management, baggeren, dijkversterking, RTC-model, Probabilistic Toolkit

Samenvatting

Deze studie is uitgevoerd binnen fase 4 van het ROBAMCI project. Dit rapport geeft beschrijving en resultaten van casus "Toekomstbestendige Mark-Dintel-Vliet boezem". In deze casus is gekeken of de ROBAMCI aanpak geschikt is voor een verkenning van de wisselwerking tussen vaarwegbeheer en het beheer van regionale keringen in de Mark-Dintel-Vliet boezem. Vier verschillende strategieën zijn beschouwd:

- 1 Niets doen
- 2 Alleen baggeren
- 3 Alleen dijken ophogen
- 4 Dijken ophogen en baggeren

Uit de analyses blijkt dat over het gehele systeem bekeken strategie 3 het voordeligst is, gevolgd door strategie 4. Als echter per dijkvak beschouwd wordt welke strategie het voordeligst is, dan is een kenmerkende ruimtelijke verdeling zichtbaar. In het westen, waar de minimale dijkhoogtes het hoogst zijn vanwege de aanwezigheid van oude zeedijken, is de strategie 'niets doen' het voordeligst. In het oosten is de voorkeursstrategie echter 'dijken ophogen en baggeren'. Deze strategie 4 is hier voordeliger dan strategie 3, aangezien het baggeren zorgt voor een kleinere toename in faalkans, waardoor pas op een later moment de duurdere investering van het dijkophogen nodig is.

Deze casus laat zien dat de ROBAMCI aanpak geschikt is om te komen tot een voordelige beheerstrategie voor de Mark-Dintel-Vliet boezem over een periode van 100 jaar. Hoewel er enkele vereenvoudigingen in deze studie doorgevoerd zijn, is de ROBAMCI-aanpak waardevol als *proof of concept*. De ROBAMCI-benadering maakt het mogelijk om het systeem als geheel te beschouwen, mogelijke toekomstige veranderingen in het klimaat mee te nemen en verschillende beheerstrategieën te combineren en optimaliseren.

Referenties

-

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
01	25-06-2019	Karolina Wojciechowska		Ben van Kester		Gerard Blom	

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	3
1.1 ROBAMCI	3
1.2 Doel van deze studie	3
1.3 Achtergrond Case Toekomstbestendige Mark-Dintel-Vliet boezem	4
2 Globale aanpak	7
3 Systeembeschrijving	9
3.1 Gebiedsomschrijving	9
3.2 Waterveiligheid	10
3.3 Sedimentatie	10
3.4 Kosten en schade	11
4 Methodebeschrijving	13
4.1 RTC-model	13
4.2 Probabilistische berekeningen	13
4.3 Overstromingsrisico en maatregelen	14
5 Resultaten	17
5.1 Analyse strategieën	17
5.2 IKM-resultaten	23
6 Conclusies en discussie	25
6.1 Algemeen	25
6.2 Reactie waterschap Brabantse Delta	26
7 Literatuur	27
 Bijlage(n)	
A Memo uitgangspunten RTC berekeningen	A-1
B Memo statistiek en klimaat	B-1
C Memo probabilistische methode	C-1
D Memo kosten berekening	D-1
E Memo analyse MDV-modelresultaten knoop N26	E-1
F Memo IKM-studie	F-1

1 Inleiding

1.1 ROBAMCI

Systematisch risico-gebaseerd beheer van publieke assets in de Grond-, Weg- en Waterbouw-sector (GWW-sector), zoals dijken, kunstwerken, waterlopen en ondergrondse infrastructuur is minder ver ontwikkeld dan in veel andere sectoren. Daarmee blijven efficiencykansen onbenut. De (financiële) afwegingen en een efficiënte inpassing van infrastructuur worden steeds complexer. Beheerders binnen en buiten Nederland zijn zich in toenemende mate bewust van de noodzaak van een systematische en transparante aanpak om het systeem van assets en hun functies te beheren, en de ermee gemoeide uitgaven te verantwoorden.

Kennis over, ervaring met en data van assets zijn versnipperd. Er is weinig integrale focus in de governance en organisatie van het beheer van de functies van publieke assets, waardoor informatie, kennisontwikkeling en besluitvorming op verschillende niveaus elkaar onvoldoende versterken.

Doel van ROBAMCI (*Risk and Opportunity Based Asset Management for Critical Infrastructures*) is om kennis, methoden en tools te ontwikkelen en implementeren, waarmee ten eerste significante efficiencywinst kan worden bereikt over de levensduur van 'publieke assets', en ten tweede de transparantie van het beslisproces over aanleg, beheer en onderhoud en verbetering/vervanging wordt vergroot. De te bereiken efficiency zal geïllustreerd worden met een business estimate voor toepassing in de GWW-sector.

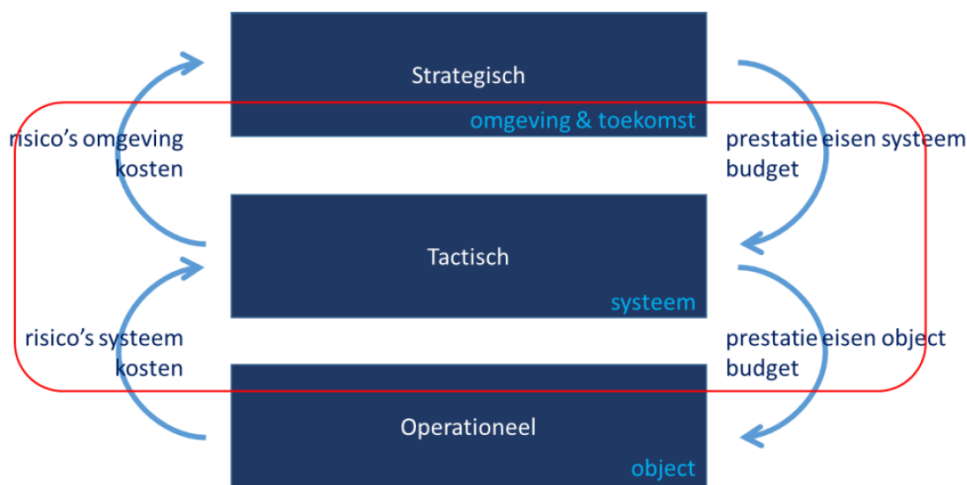
Subdoelen om dit te bereiken zijn:

- Hanteerbaar maken van complexe afwegingen over de functionaliteit en kwaliteit van het systeem en de daarin liggende assets m.b.v. informatie over risico's en kansen in relatie tot beslissingen over beheer.
- Vergroten van de transparantie van de beslismodellen en best practices voor de onderbouwing van beslissingen over de assetportfolio en het in stand houden ervan.
- Optimaal gebruiken en integreren van bestaande data en inspectietechnieken, en kennis en ervaring vanuit de verschillende stakeholders en sectoren.
- Opzetten van een business case om de efficiëntiewinst in de GWW-sector te illustreren.
- Ontwikkelen van tools om de impact van onzekerheden te integreren in het besluitvormingsproces, waardoor risicogebaseerde besluitvorming mogelijk wordt.
- Ontwikkelen van een serious game om de bewustwording in de sector t.a.v. risk-based asset management te stimuleren.

1.2 Doel van deze studie

Deze studie is uitgevoerd binnen fase 4 van ROBAMCI. In fase 4 ligt de nadruk op het doorontwikkelen van de ROBAMCI tools, zodat ze gebruikt kunnen worden om het gesprek tussen asset management op strategisch, tactisch en operationeel niveau te faciliteren (zie Figuur 1.1). Hiervoor leveren de tools op tactisch niveau een optimale planning van beheeracties in de tijd en kunnen op strategisch niveau de resultaten voor verschillende toekomstscenario's en beheerstrategieën onderling afgewogen worden.

De ROBAMCI tools zijn een generieke schil waarin fysische modellen voor case-specifieke toepassingen gekoppeld kunnen worden om (1) de consequenties van veroudering, kosten en onzekerheden voor de besluitvorming over ingrepen probabilistisch te kunnen doorrekenen, (2) de planningsvolgorde van beheeracties geoptimaliseerd kan worden en (3) het effect van verschillende beheerstrategieën en/of toekomstscenario's onderling vergeleken kunnen worden op de kosten, prestaties en risico's. De PTK (Probabilistic Toolkit) is een eerder door Deltares ontwikkelde toolkit die wordt toegepast als onderdeel van de ROBAMCI tools. Dit is een schil die ervoor zorgt dat met het rekenmodel (bijv. SOBEK de modellering van waterstroming) probabilistische berekeningen gemaakt kunnen worden.



Figuur 1.1 Reikwijdte ROBAMCI tools. Bedoeld gebruik is het faciliteren van gesprekken over besluitvorming t.a.v. asset management op operationeel, tactisch en strategisch niveau (gebied binnen de rode lijn).

Binnen fase 4 van ROBAMCI zijn drietal cases beschouwd:

- Toekomstbestendige Mark-Dintel-Vliet boezem,
- Flexibele Maatregelen als beheerstrategie,
- Opgave riolering Almere - Utopia: de regenwaterriool vrije stad!?

Dit rapport geeft beschrijving en resultaten van case "Toekomstbestendige Mark-Dintel-Vliet boezem". Deze studie is uitgevoerd in samenwerkingsverband tussen vijf partijen, dit zijn: Waterschap Brabantse Delta (probleemeigenaar), Iv-Infra, BZIM, KYL en Deltares.

1.3 Achtergrond Case Toekomstbestendige Mark-Dintel-Vliet boezem

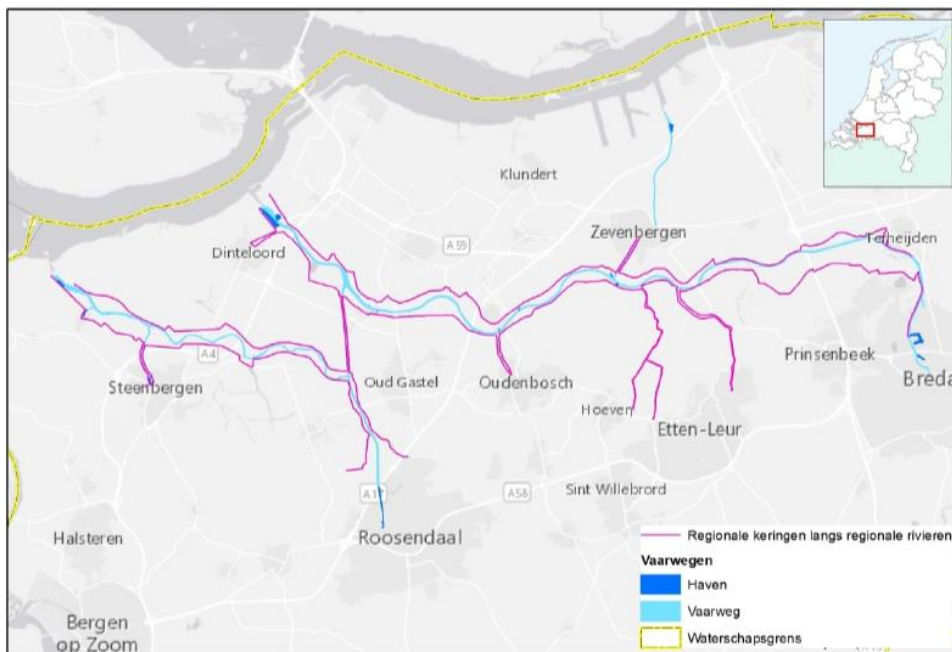
Het waterschap Brabantse Delta beheert de Mark-Dintel-Vliet boezem, zie Figuur 1.2. De boezem vervult de functie van vaarweg (klasse IV), water- en sediment afvoer, en watervoorziening van het omliggende gebied. De regionale keringen langs de boezem vervullen de waterveiligheidsfunctie en fungeren ook als drager voor de weg en voor recreatie. De boezem vervult daarnaast een ecologische en natuurfunctie. De eigenschappen van de boezem en het beheer ervan, en de bediening van de kunstwerken, vormen gezamenlijk de randvoorwaarden waarbinnen de functies worden vervuld, zoals waterveiligheid, scheepvaart en waterkwaliteit. De boezem is met een tweetal sluiscomplexen verbonden met het Volkerak-Zoommeer (VZM), waar het onder normale omstandigheden onder vrij verval op afwatert.

Veel regionale keringen langs de Mark-Dintel-Vliet boezem zijn afgekeurd. Het gaat om in totaal ca 100 km. Bij het nadenken over oplossingsrichtingen speelt nadrukkelijk de vraag welke dijkversterkings- en inrichtingsmaatregelen en welk beheer toekomstbestendig zijn.

Hoe bereiden deze voor op bijv. (onzekere) klimaatverandering, en wat bepaalt wat toekomstbestendigheid precies inhoud in het Mark-Dintel-Vliet boezem.

Ook speelt de vraag of er oplossingsrichtingen of beheerstrategieën zijn die kunnen bijdragen aan het beheer van meerdere functies, zoals het baggeren van de vaarweg ook gunstig kan zijn voor peilbeheersing en veiligheid.

Tenslotte speelt de vraag hoe interventies het beste ingepland kunnen worden in ruimte en tijd, gegeven een bepaalde oplossingsrichting of beheerstrategie.



Figuur 1.2 Kaart Projectgebied (Waterschap Brabantse Delta).

Doel van de voorliggende casus is om te onderzoeken of de ROBAMCI aanpak geschikt is voor een verkenning van de wisselwerking tussen vaarwegbeheer en het beheer van regionale keringen in de Mark-Dintel-Vliet boezem. Meer specifiek is het doel van de casus tweeledig:

- een aantal beheerstrategieën voor functie “waterveiligheid” te vergelijken op systeemlevensduurkosten, en
- binnen strategieën te kijken naar de effecten/optimalisatiemogelijkheden voor een aantal varianten van de interventieplanning (bijv. gericht op minimale risico's of maximale kwaliteit).

Bijkomend resultaat kan zijn dat er een indruk ontstaat van de, binnen de gegeven randvoorwaarden, belangrijkste onzekere systeem eigenschappen, van begrippen als toekomstbestendigheid en adaptiviteit; en mogelijk als blijkt dat er no-regret maatregelen zijn die in meerdere strategieën voorkomen.

2 Globale aanpak

Deze casus leent zich uitstekend om de ROBAMCI systematiek op door te ontwikkelen en toe te passen, waarin op systeemniveau de veroudering wordt gemodelleerd, en de interventies worden geoptimaliseerd, zie Figuur 2.1.

Het systeem wordt voor één functie, namelijk waterveiligheid, ingepast in de ROBAMCI tools. Met deze tools worden de faalkansen van waterkeringen, diepte van de watergangen, kosten van interventies (maatregelen) en overstromingsrisico's in het gebied over een periode van 100 jaar gemodelleerd.

Voor het functioneel verouderen van het systeem zijn een aantal grootheden geïdentificeerd die in de tijd variëren, zoals:

- Afvoer bij Trambrug en inzetfrequentie van het Volkerak-Zoommeer nemen toe als het gevolg van klimaatverandering,
- Baggeraanwas stijgt per jaar,
- Overstromingsschade in het gebied neemt toe als het gevolg van economische ontwikkelingen.

Het verouderen van het systeem leidt tot stijging van de faalkansen van waterkeringen, de gevolgen van een overstroming en dus ook de overstromingsrisico's (kans x gevolg) in de tijd. Om de overstromingsrisico's in het gebied te beheersen worden in deze studie twee maatregelen beschouwd, namelijk:

- Ophogen van dijken
- Baggeren van de watergangen

De maatregelen worden als volgt in de ROBAMCI tools gemodelleerd. Het ophogen van een dijkvak gebeurt zodra de faalkans van het dijkvak de veiligheidsnorm (1/100 per jaar) overschrijdt. Het baggeren gebeurt zodra een drempelwaarde in één van de watergangen wordt bereikt. Beide maatregelen brengen kosten met zich mee. Om inzicht in effectiviteit van de maatregelen te verkrijgen worden de kosten bij de bijbehorende overstromingsrisico's opgeteld. Hierbij worden vier strategieën beschouwd:

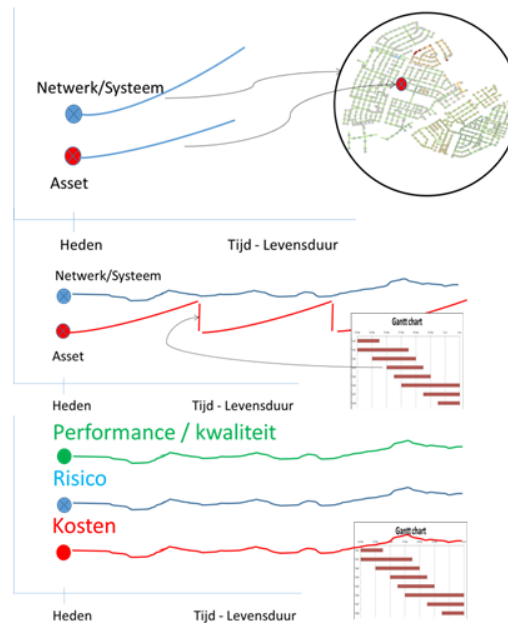
- 1 Niets doen
- 2 Alleen baggeren
- 3 Alleen dijken ophogen
- 4 Dijken ophogen en baggeren

BZIM heeft samen met Deltares een informatiekwaliteitsmodel (IKM) ontwikkeld binnen ROBAMCI. In het model wordt de betrouwbaarheid van data en informatie expliciet beoordeeld. Het waterschap Brabantse Delta heeft binnen de Mark-Dintel-Vliet boezem een flinke achterstand wat betreft het baggeren van het systeem. Dit betekent dat er veel meer bagger in het systeem aanwezig is dan gewenst. Dit heeft zowel voor de scheepvaart als voor de waterveiligheid implicaties. Met behulp van het IKM wordt de mate van baggeraanwas in de Mark-Dintel-Vliet boezem geanalyseerd.

De ROBAMCI tooling



- Van inspectie/toestand naar faalkans
- Van faalkans per asset
... naar faalkans netwerk/systeem
- Van faalkans naar Risico
... naar systeem risico in de tijd
- Van individuele/ad-hoc interventies
... naar systeem indicatoren
- ..naar systeemplanning voor duurzaam
beheersbaar systeem-functioneren



Figuur 2.1 Hoofdlijn van de ROBAMCI aanpak en tools (de aanpak verloopt van boven naar onder).

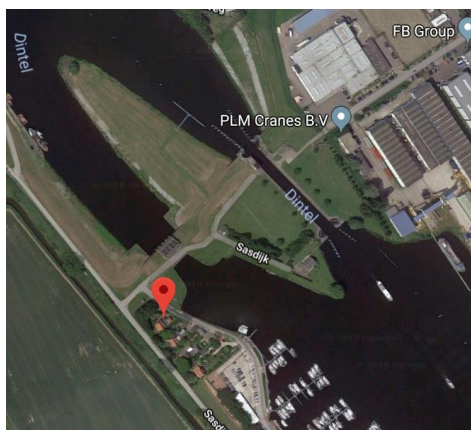
3 Systeembeschrijving

3.1 Gebiedsomschrijving

Hoge afvoeren in het gebied treden op als de bodem in het gebied verzadigd is in combinatie met een aanzienlijke neerslag (Kuijper et al., 2014). Verder worden waterstanden in het gebied ook door het waterstandsverloop op het Volkerak- Zoommeer en windcondities (windopzet) beïnvloed. Het Volkerak-Zoommeer is één van de Ruimte voor de Rivier maatregelen bedoeld als een tijdelijke waterberging in het geval van een gesloten Maeslantkering en hoge rivierafvoeren. De inzet van het Volkerak-Zoommeer zal leiden tot een sterk verhoogd meerpeil, waardoor de afvoer vanuit de West-Brabantse rivieren via de sluizen bij Benedensas en Dintelsas tijdelijk gestremd zal zijn (Kuijper et al., 2014). De huidige inzetfrequentie van het Volkerak-Zoommeer bedraagt 1/1430 per jaar. Naar verwachting stijgt de inzetfrequentie in de tijd als gevolg van klimaatverandering: 1/500 per jaar in 2050 en 1/200 per jaar in 2100. Ook neemt de rivierafvoer in de winter toe (zie Bijlage B voor nadere informatie).



Figuur 3.1 Uitzicht op de Mark bij stuw Bieberg (bron: Deltares).



Figuur 3.2 Sluizen bij Dintelsas (links) en Benedensas (rechts), bron: Google maps.

3.2 Waterveiligheid

In het benedenstroomse gedeelte van het gebied bevinden zich oude zeedijken, die voldoende sterk zijn. Problemen met de waterveiligheid treden vooral in het bovenstroomse gedeelte op, met name bij Breda (Terheijden). De veiligheidsnorm van de dijken in het gebied is recent aangepast van 1/50 per jaar naar 1/100 per jaar. Het is bekend dat de dijken bovenstrooms niet aan de nieuwe norm voldoen. Het gaat in totaal om ca. 100 km.

In deze studie wordt aangenomen dat de faalkans van een dijk gelijk is aan de kans dat de lokale waterstand inclusief de waakhoogte (30 cm) de dijkhoogte overschrijdt. Dat is een optimistische aanname, omdat in de werkelijkheid verschillende faalmechanismen aan de faalkans van een kering bijdragen. Voor de doeleinden van deze studie (verkenning ROBAMCI aanpak) is dat echter geen probleem.

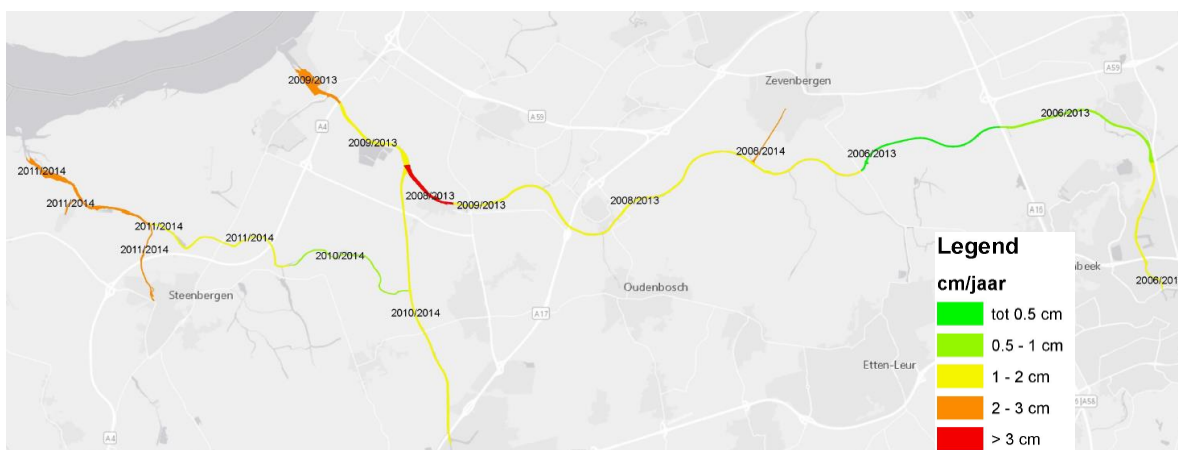
Figuur 3.3 geeft een overzicht van dijkhoogtes in het gebied. Deze dijkhoogtes zijn op basis van AHN3 afgeleid en representeren de minimale hoogtemeting binnen een dijkvak. De dijkhoogtes benedenstrooms oplopen tot 4,4 m+NAP en zijn aanzienlijk hoger dan de dijkhoogtes bovenstrooms (1,1 - 2,5 m+NAP).



Figuur 3.3 Minimale dijkhoogte per dijkvak (bron: Waterschap Brabantse Delta).

3.3 Sedimentatie

Sedimentatie verhoogt de waterstanden en reduceert de vaarwegdiepte. Figuur 3.4 presenteert de aanwassnelheid per vaarwegtraject in het gebied. De aanwassnelheid bedraagt van 0,5 cm tot meer dan 3,0 cm per jaar en is hoger benedenstrooms dan bovenstrooms.



Figuur 3.4 Aanwassnelheid per vaarwegtraject (bron: Waterschap Brabantse Delta).

3.4 Kosten en schade

De overstromingsschade in het gebied is met behulp van IPO-klassen uitgedrukt. Aan elke dijkvak in het gebied is een IPO klasse gekoppeld, zie Figuur 3.5. Elke klasse geeft informatie over de bijbehorende schade weer, zie Tabel 3.1. De gemiddelde schadebedragen zijn in deze studie gebruikt om, in combinatie met de faalkansen, het overstromingsrisico per dijkvak te bepalen. Opvallend is dat in de gebieden waar de dijkhoogtes het laagst zijn, de dijken de hoogste IPO-klasse (en dus ook de schade) hebben.

In deze studie worden twee maatregelen beschouwd: dijkophoging en baggeren. Beide maatregelen brengen kosten met zich mee. De kosten van een dijkverhoging worden in Tabel 3.2 weergegeven. De kost van het baggeren van 1 m³ zijn door het waterschap op 25-30 € ingeschat.

Naar verwachting stijgen de schade en kosten 2% per jaar¹.



Figuur 3.5 IPO-klasse per dijkvak (Roelevink et al., 2009).

Tabel 3.1 Schade per IPO-klasse. 2% indexering per jaar is toegepast om de schade 2009 naar de schade 2018 te vertalen. Bron schade klasse 2009: (Roelevink et al., 2009).

IPO-klasse	Schade klasse 2009 [mln €]	Gemiddelde schade 2009 [mln €]	Gemiddelde schade 2018 [mln €]
1	< 8	4	4,8
2	8 – 25	16,5	19,7
3	25 - 80	52,5	62,7
4	80 – 250	165	197,2
5	> 250	250	298,8

Tabel 3.2 Kosten van dijkverhoging in 2018. BTW = 21%, bron: Waterschap Brabantse Delta.

Verhoging regionale keringen [m]	Kosten dijkophoging excl. BTW, 2018 [€/m]	Kosten dijkophoging incl. BTW, 2018 [€/m]
0,0 – 0,1	1251	1514
0,1 – 0,2	1314	1590
0,2 – 0,3	1395	1688
0,3 – 0,4	1476	1786
0,4 – 0,5	1701	2058

¹ Afgestemd met het waterschap.

<i>Verhoging regionale keringen [m]</i>	<i>Kosten dijkophoging excl. BTW, 2018 [€/m]</i>	<i>Kosten dijkophoging incl. BTW, 2018 [€/m]</i>
0,5 – 0,6	1917	2320
0,6 – 0,7	1998	2418
0,7 – 0,8	2079	2516
0,8 – 0,9	2187	2646
0,9 – 1,0	2295	2777
> 1,0	2736	3311

4 Methodebeschrijving

4.1 RTC-model

Het hydraulisch model van de Mark-Dintel-Vliet boezem is opgesteld in RTC-tools. Het model is gebruik in deze studie om waterstanden in het gebied af te leiden voor verschillende combinaties van randvoorwaarden:

- Piekafoer bij Trambrug (en gerelateerd piekmeerpeil op het VZM),
- Windrichting en windsnelheid,
- Inzet van het VZM,
- Bodemdiepte.

Resultaten van deze berekeningen zijn in een look-up tabel (ofwel een database) opgenomen. Bijlage A geeft een overzicht van de RTC sommen en de gehanteerde uitgangspunten. De look-up tabel wordt vervolgens in probabilistische berekeningen gebruikt als een substituut van het RTC-model. Dat bespaart de rekentijd: in plaats van telkens nieuwe hydraulische berekeningen uit te voeren binnen het probabilistische raamwerk, worden deze van te voren klaargemaakt en de resultaten van de berekeningen in een tabel opgezocht.

Opgemerkt wordt dat het waterschap een RTC-model van het systeem voor operationele doeleinden gebruikt. Ten behoeve van deze casestudie is dit RTC-model als basis gebruikt. In vergelijking met het SOBEK-model (ook beschikbaar voor het gebied) rekent het RTC-model aanzienlijk sneller, echter is het watersysteem in het RTC-model sterk vereenvoudigd. Voor de doeleinden van deze studie (verkenning ROBAMCI aanpak) is dat geen probleem.

4.2 Probabilistische berekeningen

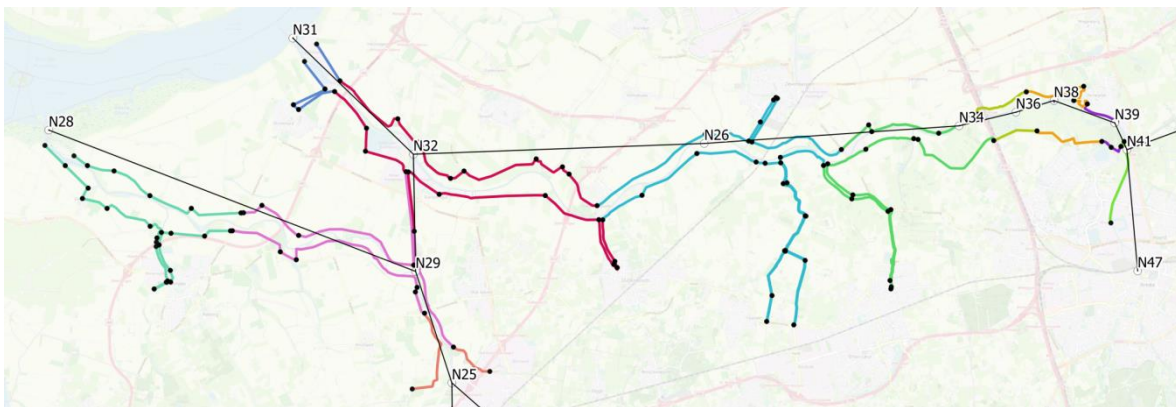
Ten behoeve van de probabilistische berekeningen zijn de volgende stochasten geïdentificeerd:

- Piekafoer bij Trambrug (en gerelateerd piekmeerpeil op het VZM),
- Windrichting en windsnelheid,
- Inzet van het VZM.

In Bijlage B wordt de statistiek van deze stochasten beschreven rekening houdend met klimaatverandering. De afvoer bij Trambrug wordt met behulp een Pareto verdeling gemodelleerd. De statistiek van het meerpeil wordt in de berekeningen indirect gebruik om een relatie tussen de piekafoer bij Trambrug en het meerpeilpiek af te leiden. In de relatie worden de gebeurtenissen met een gelijke waarschijnlijkheid aan elkaar gekoppeld. Bovendien wordt aangenomen dat het meerpeil niet hoger dan 0,5 m+NAP mag stijgen (zonder inzet van het VZM). Verder worden de probabilistische berekeningen voor twee windrichtingsectoren uitgevoerd: west en oost. De statistiek voor deze twee sectoren is gebaseerd op de WBI2017 statistiek voor station Schiphol. Op basis van (Kuijper et al., 2014) wordt in deze casestudie de kans op inzet van het VZM als functie van de afvoer bij Lobith beschreven.

Bijlage C presenteert een uitgebreide uitleg over de probabilistische methode, die grotendeels op de aanpak van (Kuijper et al., 2014) gebaseerd is. De methode is in de ROBAMCI tools (ofwel de PTK) geïmplementeerd. Kort samengevat: in de PTK worden per zichtjaar 10.000 waarden van de stochasten getrokken. Met behulp van de look-up tabel worden deze waarden naar lokale waterstanden per RTC-knoop vertaald. Vervolgens worden deze waterstanden

vergeleken met de dijkhoogte per dijkvak. Hiervoor zijn de RTC-knopen gekoppeld aan dijkvakken (zie Figuur 4.1). Een gebeurtenis waarin de waterstand (+ 30 cm waakhoogte) de dijkhoogte overschrijdt wordt beschouwd als falen van een dijkvak. Faalkans van een dijkvak wordt grofweg² gelijkgesteld aan het aantal overschrijdingen van de dijkhoogte gedeeld door het totale aantal trekkingen. Met de bovenstaande aanpak worden faalkansen van waterkeringen in het gebied afgeleid voor 100 jaar. Elk jaar wordt rekening gehouden met toekomstige ontwikkelingen: de afvoer bij Trambrug, de inzetfrequentie van het VZM en het bodemniveau³ stijgen in de tijd.



Figuur 4.1 Koppeling tussen RTC-knopen (N25, N26, N28, N29, N31, N32, N34, N36, N38, N39, N41, N47) en dijkvakken.

4.3 Overstromingsrisico en maatregelen

In deze studie wordt het overstromingsrisico door dijkophoging en/of baggeren gereduceerd. Beide maatregelen beïnvloeden de faalkansen van waterkeringen in het gebied. Dijkophoging leidt tot hogere dijkhoogtes en dus vergroot de sterkte van de kering; baggeren reduceert de lokale waterstanden en dus verlaagt de belasting op de dijk.

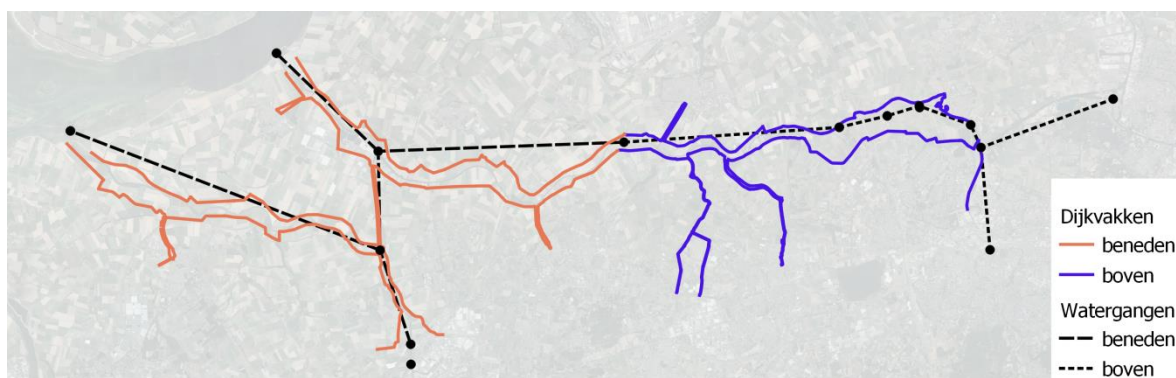
Het ophogen van een dijkvak gebeurt zodra de faalkans van het dijkvak de veiligheidsnorm (1/100 per jaar) overschrijdt. In het model wordt een dijkvak met stappen (10 cm) opgehoogd totdat het dijkvak weer aan de norm voldoet.

Voor het bepalen van de baggeraanwas is de Mark-Dintel-Vliet boezem in twee trajecten opgedeeld: bovenstrooms en benedenstrooms (zie Figuur 4.2). Aangenomen wordt dat de gemiddelde aanwassnelheid 1 cm/jaar bovenstrooms en 2 cm/jaar benedenstrooms bedraagt (zie Bijlage A). Het baggeren gebeurt per traject zodra het gemiddelde minimale vaarwegdiepte in een watergang binnen één van de trajecten wordt bereikt. Dan wordt het gehele traject naar het referentieniveau (dus zonder baggeraanwas) gebaggerd. Tabel 4.1 geeft een overzicht van de gemiddelde minimale vaarwegdieptes per watergang weer.

Het overstromingsrisico en de kosten van maatregelen worden per dijkvak en per jaar met de ROBAMCI tools afgeleid. De kosten voor het baggeren per dijkvak zijn bepaald door de baggerkosten per traject te verdelen over de dijkvakken met de dijkvaklengte als verdeelfactor. In Bijlage D wordt gedetailleerd ingegaan op het berekenen van de kosten en overstromingsrisico's.

² In de studie is rekentechniek Importance Sampling gebruikt, een speciale variant van Monte Carlo analyse.

³ Benadrukt wordt dat het bodemniveau geen stochast in deze studie is, maar als invoer gebruikt wordt bij het bepalen van de faalkansen.



Figuur 4.2 Indeling van bovenstrooms- en benedenstrooms gebied, van belang voor baggeraanwas.

Tabel 4.1 Gemiddelde minimale vaarwegdiepte per watergang (bron: Waterschap Brabantse Delta).

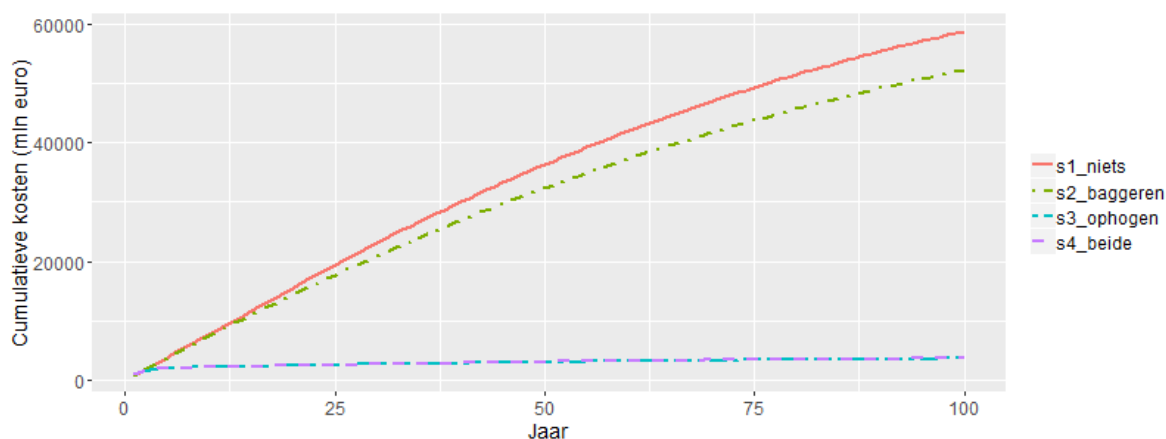
Watergang		Gemiddelde minimale vaarwegdiepte [m+NAP]	
Begin	Eind		
Mark en Dintel			
Trambrug	Markkanaal	3,4	
Markkanaal	Roode Vaart Zuid	3,4	
Roode Vaart Zuid	Haven Oudenbosch	3,55	
Haven Oudenbosch	Zwaaikom	3,9	
	Stampersgat		
Zwaaikom Stampersgat	Prinslandse brug	4,3	
Prinslandse brug	Mandersluis	4,8	
Mark-Vlietkanaal			
Splitsing RV & Mark-Vlietkanaal	Zwaaikom Stampersgat	3,75	
Roosendaalse en Steenbergse Vliet			
Splitsing RV & Mark-Vlietkanaal	Brug Dinteloordseweg	2	
Brug Dinteloordseweg	Haven Steenberg	3,4	
Haven Steenberg	Steenbergen	3	
Haven Steenberg	Benedensas	3,65	

5 Resultaten

5.1 Analyse strategieën

De resultaten van de analyse bestaan uit de faalkans⁴, de dijkhoogte en de kosten per dijkvak voor de vier strategieën (1 - niets doen, 2 - alleen baggeren, 3 - alleen ophogen, 4 - baggeren en ophogen) over een periode van 100 jaar. De kosten zijn gelijk aan de som van het overstromingsrisico en de kosten van maatregelen.

Een overzicht van de cumulatieve kosten gesommeerd voor alle dijkvakken is weergegeven in Figuur 5.1. Tabel 5.1 geeft de totale kosten weer. De strategie 'niets doen' levert het totale overstromingsrisico van bijna 59000 mln € op. Door het uitvoeren van de strategie 'baggeren' worden de totale kosten tot ca. 52000 mln € gereduceerd. De dijkophoging levert de grootste baten op: zichtbaar is hoe de kosten voor strategie 1 en 2 ca. 15-17 keer zo groot zijn als bij strategie 3 en 4.



Figuur 5.1 Cumulatieve kosten gesommeerd voor alle dijkvakken (de cumulatieve kosten van strategie 3 en strategie 4 zijn vrijwel gelijk).

Tabel 5.1 Totale kosten (over 100 jaar) van verschillende strategieën.

Strategie	Beschrijving	Totale kosten [mln €]
1	Niets doen	58925
2	Baggeren	52344
3	Dijken ophogen	3562
4	Dijken ophogen en baggeren	3592

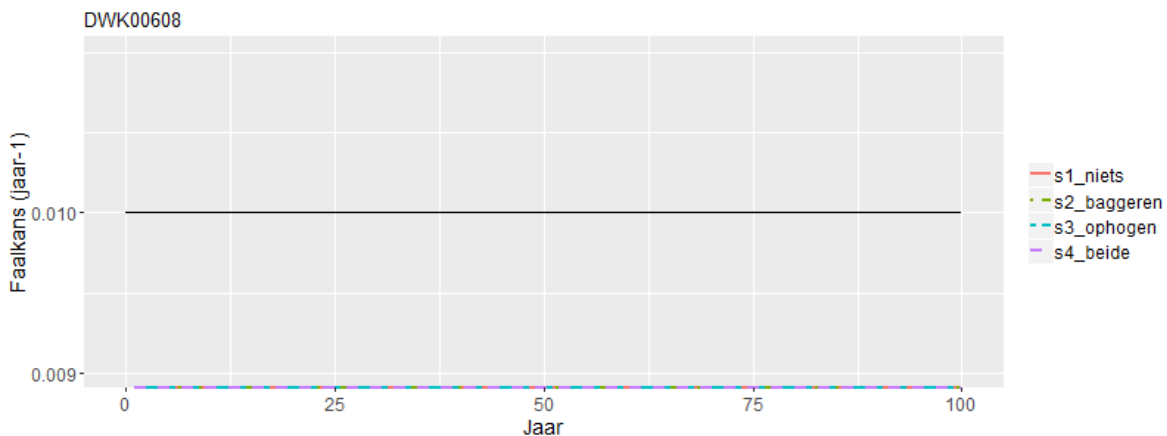
De voorkeursstrategie verschilt echter onderling per dijkvak. Om een beeld te geven zijn twee dijkvakken gekozen die representatief zijn voor het beneden- en bovenstroomse gebied, zie voor de locaties Figuur 5.2.

⁴ In deze studie berekent de PTK faalkansen gegeven een gebeurtenis (P). Deze faalkansen worden naar faalkansen per jaar vertaald met de volgende formule: $1 - \exp(-\lambda \times P)$, waar λ staat voor het gemiddeld aantal keer per jaar dat afvoer bij Trambrug 55 m³/s overschrijdt (zie ook Bijlage D). In tegenstelling tot dit zijn faalkansen in de figuren met formule $\lambda \times P$ naar faalkansen per jaar vertaald. Dat is een relatief kleine afwijking, want voor lage faalkansen $1 - \exp(-\lambda \times P) \sim \lambda \times P$. Benadrukt wordt dat risico's wel met de correcte formulering afgeleid zijn.

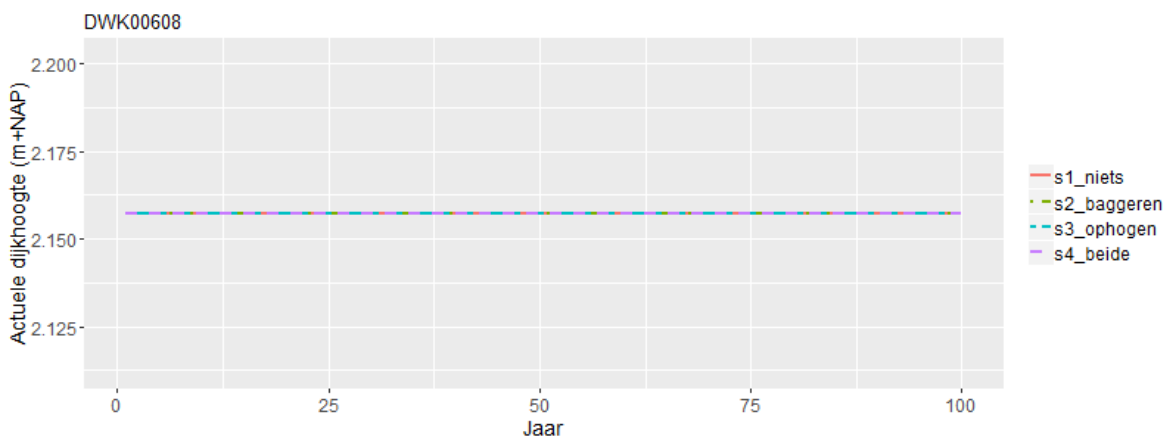


Figuur 5.2 Locaties van representatieve dijkvakken (A en B).

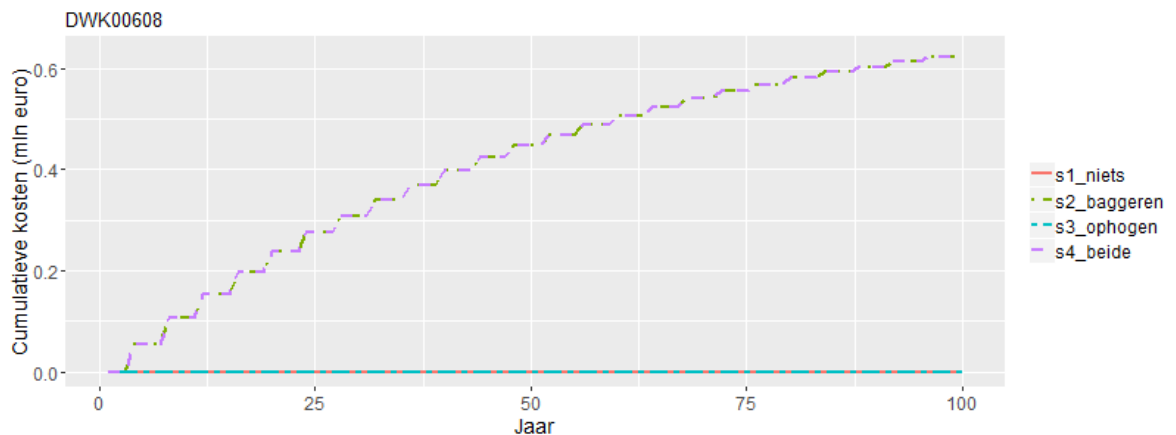
De resultaten voor locatie A (dijkvak DWK00608) zijn weergegeven in Figuur 5.3, Figuur 5.4 en Figuur 5.5. Deze resultaten zijn vrij eenvoudig te interpreteren: de minimale dijkhoogte van dit dijkvak ligt zo hoog, dat de faalkans voor alle strategieën zeer laag is (~ 0 per jaar). De dijk hoeft daarom niet opgehoogd te worden, en blijft daarom op gelijke hoogte over de jaren. Hier zijn geen kosten aan verbonden. Aangezien er zeer weinig kans tot overstroming is, is het overstromingsrisico nagenoeg gelijk aan 0. Omdat in strategieën 2 en 4 wel gebaggerd wordt, zijn deze kosten wel aanwezig.



Figuur 5.3 Faalkans voor representatieve locatie A.

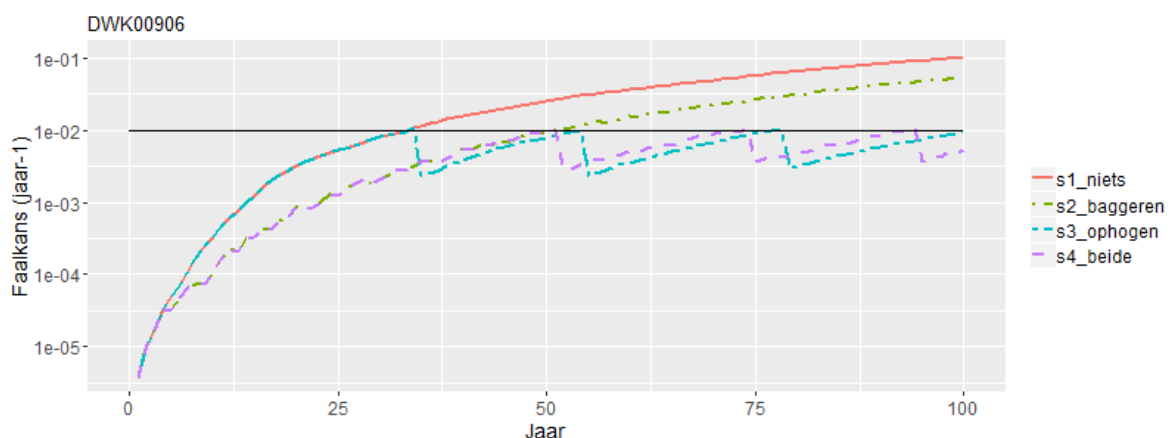


Figuur 5.4 Actuele dijkhoogte voor representatieve locatie A.

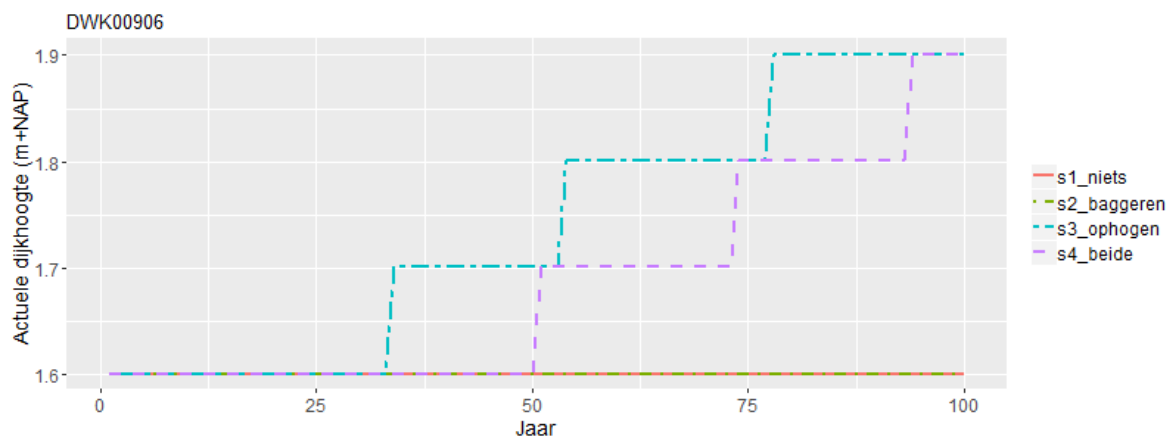


Figuur 5.5 Cumulatieve kosten voor representatieve locatie A.

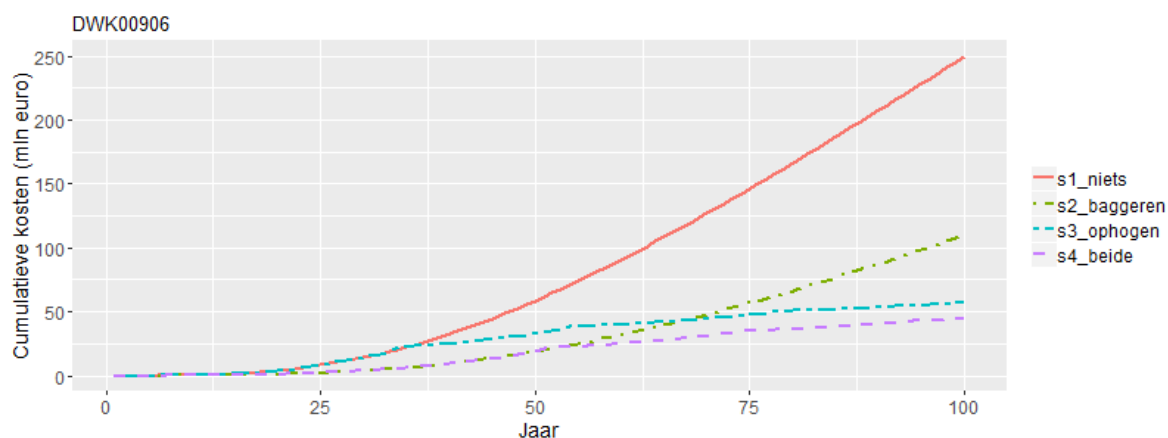
Geheel anders zijn de resultaten voor locatie B (dijkvak DWK00906), weergegeven in Figuur 5.6, Figuur 5.7 en Figuur 5.8. De faalkans voor strategie 1 loopt steeds verder op naarmate de tijd vordert: dat wordt door de stijging van rivierafvoeren, inzettfrequentie van het VZM en baggeraanwas veroorzaakt. Strategie 3 loopt in het begin mee, maar na ca. 35 jaar neemt de faalkans af. Op dit moment vindt de eerste ophoging plaats, aangezien de veiligheidsnorm van 1/100 per jaar is bereikt. Daarna volgt een zigzag-patroon waarbij de faalkans geleidelijk stijgt in de tijd, en plotseling afneemt als een ophoging plaatsvindt. Voor strategie 2 en 4 neemt de faalkans na 5 jaar af in vergelijking tot de andere twee strategieën, aangezien op dit moment de eerste keer wordt gebaggerd. Ook na deze keer wordt nog vele malen regelmatig gebaggerd, waardoor de faalkans relatief lager blijft. Het effect hiervan is duidelijk zichtbaar voor strategie 4, waar ca. 5 jaar later wordt begonnen met dijkophogen. Het uiteindelijke effect van al deze strategieën wordt getoond in de cumulatieve kosten. De kosten voor strategie 1 zijn het hoogst, aangezien hier geen maatregelen genomen worden en daardoor vaker een falen plaatsvindt. Strategie 3 is eerst nog duurder dan de strategie 2, maar na ca. 70 jaar blijkt de strategie 2 toch duurder, aangezien de grotere faalkans extra overstromingsrisico meebrengt. De goedkoopste strategie blijkt een combinatie van ophogen en baggeren (strategie 4), waarbij het baggeren ervoor zorgt dat pas later met dijkophogen begonnen dient te worden en dijkophogen ervoor zorgt dat de faalkans van het systeem onder 1/100 per jaar blijft.



Figuur 5.6 Faalkans voor representatieve locatie B.



Figuur 5.7 Dijkhoogte voor representatieve locatie B.



Figuur 5.8 Cumulatieve kosten voor representatieve locatie B.

Gebaseerd op de totale kosten verschilt dus per dijkvak welke strategie de voorkeur heeft. De ruimtelijke verdeling van de voorkeursstrategie is weergegeven in Figuur 5.9. Duidelijk zichtbaar is dat aan de westkant strategie 1 (niets doen) de voorkeur heeft, terwijl dit in het oosten voor strategie 4 (ophogen en baggeren) geldt. Strategie 2 (alleen baggeren) en 3 (alleen ophogen) komen in deze case slechts sporadisch voor.



Figuur 5.9 Ruimtelijke verdeling van voorkeursstrategie.

Voor dijkvakken waarvoor strategie 4 voorkeur geeft (paars gekleurde dijkvakken in Figuur 5.9) is de opbouw van de totale kosten nader geanalyseerd. Tabel 5.2 presenteert de totale kosten voor deze dijkvakken opgesplitst in het overstromingsrisico, kosten van baggeren en dijkophoging⁵ (de kosten zijn verdisconteerd). Ook wordt aanvullende informatie in de tabel weergegeven zoals de IPO klasse, dijkvaklengte, initiële faalkans (op tijdstip 0), aantal dijkophogingen en totale dijkophoging over een periode van 100 jaar.

Zoals te verwachten zijn de grootse overstromingsrisico's meestal te vinden voor dijkvakken met de hoogste IPO-klasse. De kosten van baggeren zijn relatief laag in vergelijking met de kosten van dijkophoging. Dat is ook logisch, want de kosten van dijkophoging veel hoger zijn dan de kosten van baggeren. De kosten van dijkverhoging zijn afhankelijk van de lengte van een dijkvak en de dijkophoging zelf. Ook speelt hier het moment van de dijkophoging een rol. Versterken van een dijkvak over 50 jaar is goedkoper dan versterken over 10 jaar, dat is het gevolg van verdiscontering van de kosten. Dijkvakken die op tijdstip 0 al niet aan de veiligheidsnorm voldoen (initiële faalkans > 1/100 per jaar) worden in het model meteen opgehoogd en dat leidt tot hogere kosten dan in het geval van dijkvakken, die later in de tijd aangepakt worden.

Voor de meeste dijkvakken heeft het overstromingsrisico het grootste aandeel in de totale kosten. Het aandeel verandert indien een dijkvak een lage IPO-klasse heeft, maar wel (snel) versterkt moet worden.

Gemiddeld worden de dijkvakken ca. 5 keer verhoogd in een periode van 100 jaar; de gemiddelde totale verhoging bedraagt ca. 60 cm. In de meeste gevallen worden de versterkingen regelmatig over de periode van 100 jaar verdeeld. Dat biedt kansen voor het gelijktijdig aanpakken van verschillende dijkvakken.

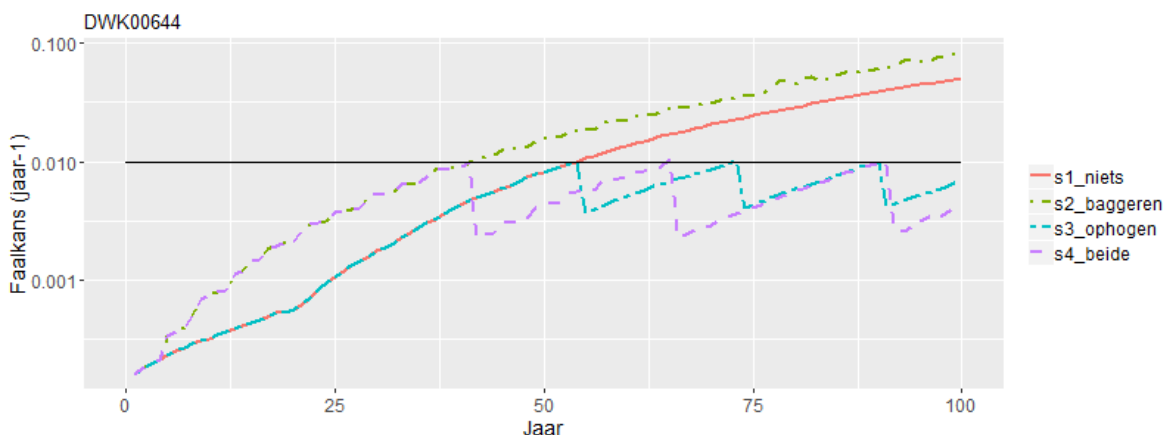
Tabel 5.2 Analyse kosten strategie 4 (IPO = IPO-klasse, L = dijkvaklengte), de totale kosten = de cumulatieve kosten over een periode van 100 jaar, de kosten zijn verdisconteerd.

Dijkvak	IPO	L	Initiële kans	Totale kosten	Totaal risico	Totale kosten baggeren	Totale kosten dijkophoging	Aantal dijkophogingen in 100 jaar	Totale dijkophoging in 100 jaar
	[–]	[m]	[1/jaar]	[mln€]	[mln€]	[mln€]	[mln€]	[#]	[m]
DWK00622	4	1317	0,137	106,2	100,3	0,20	5,7	5	0,6
DWK00632	5	3466	0,005	83,1	73,1	0,52	9,5	4	0,4
DWK00633	2	1491	0,106	19,0	13,0	0,22	5,8	5	0,6
DWK00636	4	1439	0,051	66,6	60,9	0,21	5,5	5	0,5
DWK00643	5	1205	0,114	136,8	131,8	0,18	4,9	5	0,6
DWK00645	4	2284	0,028	64,2	57,4	0,34	6,4	4	0,4
DWK00647	5	1466	0,051	96,6	90,8	0,22	5,6	5	0,5
DWK00648	5	1989	0,093	120,0	112,5	0,30	7,2	5	0,6
DWK00649	1	885	0,086	7,8	4,6	0,13	3,1	5	0,6
DWK00690	4	526	0,290	174,0	171,6	0,08	2,3	5	0,8
DWK00699	1	1524	0,230	18,4	11,2	0,23	7,0	5	0,7
DWK00806	4	216	0,408	287,8	286,7	0,03	1,0	5	0,9
DWK00807	4	96	0,004	49,6	49,3	0,01	0,2	4	0,4
DWK00842	2	2796	0,088	27,0	16,5	0,42	10,1	5	0,6
DWK00844	4	1395	8,5e-6	29,1	27,2	0,21	1,7	3	0,3
DWK00845	4	1676	0,029	60,4	55,3	0,25	4,8	4	0,4

⁵ Uit de PTK krijgen we de volgende informatie: totale kosten, kosten van baggeren, momenten en mate van dijkophoging. Omdat de kosten van dijkversterking niet direct beschikbaar zijn, zijn deze apart afgeleid (als post-processing) op basis van de momenten en mate van dijkophoging. Vervolgens is het totale risico gelijk gesteld aan het resultaat van de volgende berekening: totale kosten – kosten van baggeren – kosten van dijkophoging.

Dijkvak	IPO	L	Initiële kans	Totale kosten	Totaal risico	Totale kosten baggeren	Totale kosten dijk-ophoging	Aantal dijk-ophogingen in 100 jaar	Totale dijk-ophoging in 100 jaar
	[-]	[m]	[1/jaar]	[mln€]	[mln€]	[mln€]	[mln€]	[#]	[m]
DWK00846	4	150	0,046	58,1	57,5	0,02	0,6	5	0,5
DWK00847	2	2709	0,311	50,8	38,8	0,40	11,5	5	0,8
DWK00848	2	2414	0,329	50,0	38,4	0,36	11,2	5	0,8
DWK00849	4	1371	0,285	174,7	169,3	0,20	5,2	5	0,8
DWK00850	4	1421	0,374	272,0	265,6	0,21	6,2	5	0,9
DWK00852	4	744	0,321	199,0	195,3	0,11	3,6	5	0,8
DWK00863	1	162	0,489	7,8	7,4	0,06	0,4	2	0,5
DWK00874	5	244	0,057	94,6	93,6	0,04	1,0	5	0,5
DWK00875	2	744	0,223	20,6	17,2	0,11	3,3	5	0,7
DWK00876	5	1952	0,006	76,3	70,2	0,29	5,7	4	0,4
DWK00906	5	2427	4,0e-6	44,3	41,1	0,36	2,9	3	0,3

Opgemerkt wordt dat de resultaten voor dijkvakken verbonden met RTC-knoop N26 minder betrouwbaar zijn (dijkvakken verbonden met N26 zijn weergegeven in Figuur 4.1). In Figuur 5.10 is een voorbeeld gegeven van de faalkans voor één van deze dijkvakken. De faalkans voor de strategie 'baggeren' is hier hoger dan voor de strategie 'niets', terwijl het bodemniveau juist verlaagd wordt, wat normaliter leidt tot een lager waterpeil en dus een lagere faalkans.



Figuur 5.10 Faalkans voor een dijkvak verbonden met RTC-knoop N26.

Aanvullend onderzoek heeft aangetoond dat dit probleem door de onderliggende RTC-sommen veroorzaakt wordt. Voor knoop N26 leidt het baggeren tot hogere waterstanden in het geval van rivierafvoeren, die in de probabilistische berekeningen een belangrijke rol spelen (~170 m³/s).

RTC-berekeningen voor knoop N26 zijn nader onderzocht; resultaten van het onderzoek worden in Bijlage E gepresenteerd. De onverwachte of ongewenste resultaten voor knoop N26 zijn hydraulisch verklaarbaar. Het probleem wordt veroorzaakt door het feit dat de relatie tussen waterhoogte en doorstroomd oppervlak voor tak 17 (verbindt knopen N26 en N32) duidelijke uiterwaarden presenteert, de uiterwaarden ontbreken echter in de relatie tussen waterhoogte en volume van de aan de tak aansluitende knopen. Beide relaties zijn dus niet consistent. Bijlage E geeft enkele suggesties voor het verbeteren van het model zodat het beter op de verwachtingen aansluit.

5.2 IKM-resultaten

Met behulp van het Informatie Kwaliteits Model (IKM) is de mate van baggeraanwas in de Mark-Dintel-Vliet boezem geanalyseerd. Dit vond plaats met behulp van Multibeam-metingen, uitgevoerd door het waterschap over de afgelopen jaren. Om een strategie te bepalen waarmee de hoeveelheid bagger in het systeem zo effectief mogelijk kan worden gereduceerd, wordt bepaald waar de baggeraanwas het grootste is. De analyse is weergegeven in Bijlage F.

Uit de analyse zijn in de deelgebieden (zie Figuur 5.11) verschillende maten van gemiddelde jaarlijkse baggeraanwas gevonden met verschillende maten van variatie in ruimte en tijd. Mogelijke verklaringen gegeven voor de gevonden resultaten zijn aannemelijk en blijken ook voor het waterschap herkenbaar (zie Bijlage F). Voor het gemiddelde voldoen de deelgebieden 2 en 5 niet aan de verwachtingen, maar hier zijn verklaringen voor gevonden. Bij deelgebied 2 is een relatief hoog gemiddelde van de baggeraanwas gevonden, maar dit kan verklaard worden door hoge baggeraanwas voor de aansluiting van het Markkanaal. In deelgebied 5 is er een relatief lage mate van baggeraanwas doordat dit deel van het systeem regelmatig doorgespoeld wordt.

De ruimtelijke variatie is in de bovenstroomse gebieden het hoogst, wat kan worden toegeschreven aan de hogere stroomsnelheden en aan de aanwezigheid van scheepvaart. Stroomafwaarts gezien is aan de rechterkant van de watergang meer erosie en aan de linkerkant sedimentatie. Dit zou verklaard kunnen worden door een andere belading of intensiteit van schepen. De variatie in de tijd zegt iets over de onzekerheid van de metingen. De deelgebieden 1, 3 en 5 kunnen met een relatieve zekerheid voorspeld worden, terwijl de onzekerheid in de deelgebieden 4, en in mindere mate 2, groter is. Meer informatie hierover is te vinden in Bijlage F.

Wat betreft de betrouwbaarheid van de data, is in de toepassing van het IKM gebleken dat de kwaliteit van de data niet over de gehele Mark-Dintel-Vliet boezem gelijk is. Er zijn een aantal locaties waar de datakwaliteit goed is, maar ook een aantal locaties waar verbetering van de datakwaliteit mogelijk is. Over het algemeen geldt dat met een betere datakwaliteit de baggeraanwas nauwkeuriger en betrouwbaarder bepaald kan worden. In tabel 4 zijn de resultaten uit de analyse samengevat. Zie Bijlage F voor de indeling van de deelgebieden.



Figuur 5.11 Deelgebieden (1 - Mark van Breda tot Leursche Haven, 2 - Mark van Leursche Haven tot Standaardbuiten (start Dintel), 3 - Dintel van Standaardbuiten tot Mark-Vlietkanaal, 4 - Dintel van Mark-Vlietkanaal tot Dintelsas, 5 - Vliet van Mark Vlietkanaal tot Benedensas, 6 - Mark-Vlietkanaal).

Tabel 5.3 Samenvatting resultaten baggeraanwas.

Deelgebied	Gemiddelde [cm/jaar]	95% betrouwbaarheidsinterval [cm]	Kwaliteitsoordeel data [-]
1	1,91	1,55	☆☆☆☆
2	0,18	2,30	☆☆☆
3	2,60	1,6	☆☆☆☆
4	1,57	5,29	☆☆☆
5	1,07	1,61	☆☆☆☆
6	1,63	-	☆☆

Het kwaliteitsoordeel van de data is gebaseerd op verschillende onderdelen, zoals de beschikbaarheid van data, uitschieters in de data, de gebruikte meetmethode, validatie van de data, enz. Meer informatie hierover en over hoe het kwaliteitsoordeel tot stand komt is te vinden in Bijlage F.

Om tot betrouwbaardere resultaten te komen kan op een aantal deelgebieden meer gemeten worden om de baggeraanwas nauwkeuriger te bepalen. Met name deelgebied 6 (Markvlietkanaal/Nieuwe Roosendaalsche Vliet), verdient daarbij extra aandacht, omdat daar nu slechts twee metingen beschikbaar zijn en dus maar één maal een mate van baggeraanwas bepaald kan worden. Veranderingen in de tijd kunnen hierdoor niet worden beoordeeld. De deelgebieden 2, 4 en 5 hebben ieder 3 metingen, maar deze beslaan niet het gehele deelgebied. Daarom verdienen ook deze deelgebieden aandacht, waarin met name voor deelgebied 2 en 4 het baggeraanwas verloop over verschillende jaren relatief onzeker is door grote afwijkingen over de tijd. Wanneer hier meer metingen beschikbaar zijn kan ook hier de jaarlijkse baggeraanwas nauwkeuriger en betrouwbaarder bepaald worden.

6 Conclusies en discussie

6.1 Algemeen

In voorliggende casus is gekeken of de ROBAMCI aanpak geschikt is voor een verkenning van de wisselwerking tussen vaarwegbeheer en het beheer van regionale keringen in de Mark-Dintel-Vliet boezem.

Vier verschillende strategieën zijn beschouwd, namelijk:

- 1 Niets doen,
- 2 Alleen baggeren,
- 3 Alleen dijken ophogen,
- 4 Dijken ophogen en baggeren.

Uit de analyses blijkt dat over het gehele systeem bekeken strategie 3 (dijken ophogen) het voordeligst is, gevolgd door strategie 4 (dijken ophogen en baggeren). Als echter per dijkvak beschouwd wordt welke strategie het voordeligst is, dan is een kenmerkende ruimtelijke verdeling zichtbaar. In het westen, waar de minimale dijkhoogtes het hoogst zijn vanwege de aanwezigheid van oude zeedijken, is de strategie 'niets doen' het voordeligst. In het oosten is de voorkeursstrategie echter 'dijken ophogen en baggeren'. Deze strategie 4 is hier voordeliger dan strategie 3, aangezien het baggeren zorgt voor een kleinere toename in faalkans, waardoor pas op een later moment de duurdere investering van het dijkophogen nodig is.

Deze casus laat zien dat de ROBAMCI aanpak geschikt is om te komen tot een voordelige beheerstrategie voor de Mark-Dintel-Vliet boezem over een periode van 100 jaar.

Verder wordt het volgende geconcludeerd:

- Hoewel er enkele vereenvoudigingen in deze studie doorgevoerd zijn, is de ROBAMCI-aanpak waardevol als *proof of concept*. De ROBAMCI-benadering maakt het mogelijk om het systeem als geheel te beschouwen, mogelijke toekomstige veranderingen in het klimaat (zoals hogere afvoeren en inzetfrequentie van het VZM) mee te nemen en verschillende beheerstrategieën te combineren en optimaliseren.
- In deze studie is een RTC hydraulisch model als basis gebruikt. Naar verwachting is het model te grof om processen zoals slibaangroei of baggeren goed te kunnen modeleren. Bovendien is het RTC-model voor het 1 op 100 debiet gekalibreerd, maar het is toegepast voor meer extreme condities: de modelonzekerheid is niet meegenomen. Een meer gedetailleerd model is aan te raden voor een vervolg studie.
De resultaten voor dijkvakken verbonden met RTC-knoop N26 zijn minder betrouwbaar. Dat is veroorzaakt door inconsistentie in de invoergegevens van het RTC-model.
- In de gepresenteerde aanpak worden dijkvakken met de hoogste faalkans als eerste versterkt. Dat kan theoretisch betekenen dat dijkvakken met hoge faalkans, maar weinig schade in het achterland, als eerste versterkt worden. Alternatief voor deze aanpak is het versterken op basis van overstromingsrisico's, waarin faalkans en gevolgen gecombineerd worden.
- De inzet van het Volkerak-Zoommeer heeft vooral effect op waterstanden in het benedenstroomse gedeelte van het gebied. Het effect van de inzet is nihil op waterstanden bovenstrooms en juist dijken bovenstrooms voldoen niet aan de norm en/of beschermen een gebied met relatief veel overstromingsschade.

- In deze studie is geen rekening met eventueel falen van de sluizen bij Benedensas en Dintelsas gehouden. Falen van deze sluizen tijdens de inzet van het Volkerak-Zoommeer kan aanzienlijke waterstanden in de Mark-Dintel-Vliet boezem opleveren. Naar verwachting zou dus het meenemen van de sluizen tot een aanpassing van momenten en mate van investeringen leiden.
- In de toepassing van het IKM op de baggeraanwas is gebleken dat de kwaliteit van de data niet over het gehele Mark-Dintel-Vliet systeem gelijk is. Er zijn een aantal locaties waar de datakwaliteit goed is, maar ook een aantal locaties waar de datakwaliteit beter kan. Met een betere datakwaliteit kan de baggeraanwas nauwkeuriger en betrouwbaarder bepaald worden.

6.2 Reactie waterschap Brabantse Delta

Binnen Brabantse Delta bestond al langer de wens om op een meer integrale modelmatige manier naar de het Mark-Dintel-Vliet systeem te kijken. Brabantse Delta beheert meerdere functies (zoals waterveiligheid, waterkwaliteit, de vaarweg) van dit systeem. In de dagelijkse praktijk zijn dit uiteraard geen op zich zelf staande sporen, maar er was ook behoefte om een keer te onderzoeken of een integrale modelmatige benadering meerwaarde kan hebben bij besluitvorming. De verwachting was van wel, maar dit was nog niet onderzocht.

Uit dit project komt naar voren dat een benadering zoals die gekozen is in dit onderzoek, meerwaarde heeft ter ondersteuning voor besluitvorming. Als proof of concept is het onderzoek dus geslaagd. Op dit moment is het model nog een prototype en om echt gebruikt te worden ter ondersteuning van besluitvorming, zal er nog aanvullend onderzoek gedaan moeten worden.

7 Literatuur

Kuijper, B., Geerse, C., Stijnen, J., Botterhuis, T., Versteeg, R., Duits, M. en Vreugdenhil. *Effect waterberging Volkerak-Zoommeer op waterstanden Mark-Dintel-Vliet boezem*. HKV lijn in water, PR2904.10, Opdrachtgever: RWS, oktober 2014.

Roelevink, A., van Haaren, D. en Nederpel, A. *Normering en globale toetsing regionale keringen Brabantse Delta*. HKV lijn in water, PR1589.10, Opdrachtgever: Waterschap Brabantse Delta, mei 2009.

A Memo uitgangspunten RTC berekeningen



Memo

Datum

10 januari 2019

Aantal pagina's

14

Contactpersoon

Karolina Wojciechowska
Dana Stuparu

Doorkiesnummer

+31(0)88 335 8263

E-mail

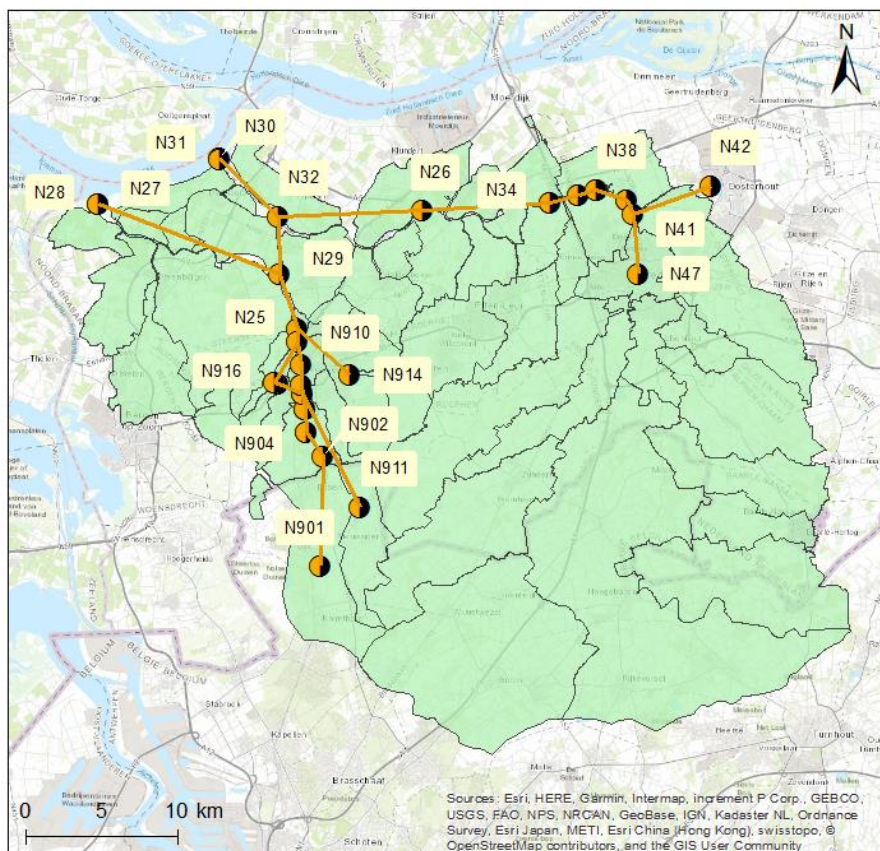
Karolina.Wojciechowska@deltares.nl

Onderwerp

Voorstel uitgangspunten RTC berekeningen

1 Voorstel uitgangspunten RTC berekeningen

Ten behoeve van de Brabantse Delta case binnen het ROBAMCI project worden berekeningen met het RTC model van de Mark-Dintel-Vliet boezem uitgevoerd, zie Figuur 1.1. Resultaten van deze berekeningen worden in look-up tabellen (ofwel databases) opgenomen. Deze tabellen worden in probabilistische berekeningen gebruikt als een substituuat van het RTC-model (*Bijlage 2 Memo statistiek en klimaat*). Dit memo geeft een overzicht van de RTC-sommen ten behoeve van de look-up tabellen en de gehanteerde uitgangspunten.



Figuur 1.1 Overzicht projectgebied.

1.1 Overzicht benodigde RTC-berekeningen

Met het RTC model worden lokale waterstanden berekend op de Mark-Dintel-Vliet boezem voor verschillende combinaties van regionale afvoergolven en waterstandsverlopen op het Volkerak-Zoommeer (VZM, met en zonder inzet als bergingsgebied).

Tabel 1.1 geeft een overzicht van de voorgestelde combinaties van de randvoorwaarden, die met het RTC model doorgerekend worden ten behoeve van één look-up tabel. Deze combinaties zijn gekozen conform de methode voor het uitvoeren van de probabilistische berekeningen binnen deze studie (*Bijlage 1 Methode*) en de statistiek (*Bijlage 2 Memo statistiek en klimaat*).

Opgemerkt wordt dat de probabilistische berekeningen voor twee windrichtingsectoren uitgevoerd worden:

- Sector West: 225° t/m 360° (t.o.v. Noord)
- Sector Oost: 22,5° t/m 202,5° (t.o.v. Noord)

Deze indeling is gebaseerd op de 16-windrichtingindeling: 22,5°, 45°, ..., 360°. In de WBI2017 benadering wordt de Maeslantkering nooit gesloten voor de windrichtingen uit Sector Oost (station Schiphol). Omdat de eventuele inzet van het VZM alleen in het geval van de gesloten Maeslantkering plaats kan vinden, is de kans op inzet van het VZM gelijk aan 0 voor de windrichtingen uit Sector Oost. Voor windrichtingen uit Sector West bestaat een kans dat de Maeslantkering sluit (kans > 0) en dus ook een kans op inzet van het VZM.

Berekeningen met het RTC-model worden uitgevoerd voor windrichtingen 90° en 270°, deze zijn aangenomen als representatief voor windrichtingsectoren Oost en West respectievelijk.

Uitgaande van deze informatie en Tabel 1.1, zijn er $6 \times 3 \times 3 \times 3 = 162$ RTC-berekeningen nodig voor windrichting 90° en $6 \times 3 \times 2 \times 3 \times 3 = 324$ voor windrichting 270°. Eén look-up tabel vereist dus 486 berekeningen in totaal. Eén RTC-berekening duurt ca. 7 seconden (20 dagen simulatietijd). Dat betekent dat de totale rekentijd gelijk is aan 60 minuten.

Tabel 1.1 Overzicht benodigde combinaties van de randvoorwaarden.

Randvoorwaarde	Eenheid	Discretisatiewaarden RTC-berekeningen	Totaal aantal
Piekafvoer bij Trambrug	m ³ /s	50, 90, 130, 170, 210, 250	6
Windrichting	Graden	90°, 270°	2
Windsnelheid piek	m/s	8, 20, 34	3
Inzet VZM	-	Zonder en met inzet	2 (voor windrichting 270°)
Bodemdiepte systeem 1	cm	Referentie bodemprofielen -25 t.o.v. referentie +40 t.o.v. referentie	3
Bodemdiepte systeem 2	cm	Referentie bodemprofielen -25 t.o.v. referentie +40 t.o.v. referentie	3

1.2 Uitgangspunten

Het RTC-model maakt gebruik van de volgende invoergegevens:

- Afvoergolf bij Trambrug
- Tijdsverloop van de laterale afvoeren
- Waterstandsverloop op het VZM (met en zonder inzet als bergingsgebied)
- Windsnelheid en windrichting
- Bodemprofielen

Hieronder worden uitgangspunten m.b.t. de invoergegevens nader toegelicht. De uitgangspunten zijn grotendeels op het rapport van (Kuijper *et al*, 2014) gebaseerd.

1.2.1 Afvoergolf bij Trambrug

De afvoergolf bij locatie Trambrug wordt met de standaard golfvorm gemodelleerd. Deze golfvorm is afgeleid op basis van 15 minuten *waterstandsmetingen*¹ vanaf 1-1-1990 t/m 2-11-2018 (28 jaar). De waterstandsmetingen zijn naar afvoerwaarden op basis van de volgende QH-relatie vertaald:

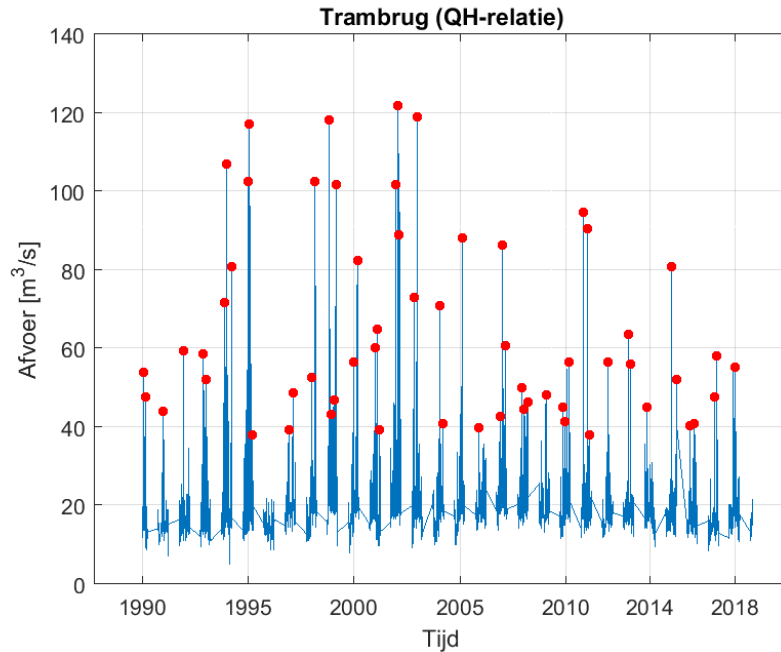
$$Q = 17,699 \cdot H^2 + 39,097 \cdot H + 14,05$$

waar H staat voor de waterstand en Q staat voor de afvoer.

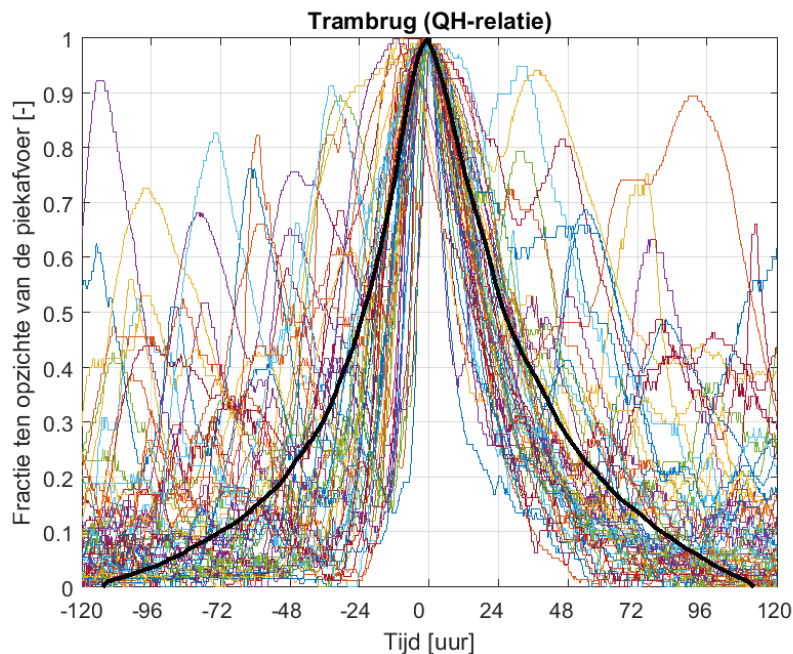
Uit de tijdreeks zijn eerst onafhankelijke afvoergolven geselecteerd. Pieken van deze afvoergolven worden in Figuur 1.2 weergegeven. Elke afvoergolf is vervolgens geschaald zodat de piek een waarde 1,0 krijgt. De geschaalde afvoergolven zijn geaggregeerd zodat alle pieken op een fictief tijdstip 0 zich bevinden. Uiteindelijk is de gemiddelde afvoergolf afgeleid: dat is de standaard golfvorm en wordt in Figuur 1.3 gepresenteerd. De methode wordt in (Kuijper *et al*, 2014) uitgelegd.

Voor elke piekwaarde bij Trambrug wordt uit Tabel 1.1 de bijbehorende afvoergolf bepaald door de standaard golfvorm met een piek-gerelateerde factor te schalen. Bovendien wordt aangenomen dat de basis van een afvoergolf bij Trambrug gelijk aan 20 dagen is.

¹ Databron 1, zie de referenties.



Figuur 1.2 Tijdreeks voor locatie Trambrug en de geselecteerde pieken (oktober t/m maart).



Figuur 1.3 Standaard golfvorm (zwarte lijn) voor locatie Trambrug.

1.2.2 Tijdsverloop van de laterale afvoeren

De afvoer bij Trambrug wordt gebruikt als een stroomopwaarts randvoorwaarde voor het RTC-model. Daarnaast krijgt het model verder extra afvoeren van de kleinere stroomgebieden langs de boezem. We stellen voor om de hoeveelheid en vorm van deze laterale afvoeren te schatten op basis van een relatie tot de (meer dominante) afvoer bij Trambrug. Daarom

Datum
12 november 2018

Pagina
5 van 14

hebben we eerst het oppervlakte van elk stroomgebied voor elk knooppunt van het RTC-model berekend. Op basis van deze informatie hebben we een factor geschat om laterale afvoeren te relateren aan de afvoer bij Trambrug.

Tabel 1.2 Overzicht van factoren voor de laterale afvoeren op basis van oppervlakte.

RTC-knooppunt	Oppervlakte [ha]	Factor t.o.v. Trambrug [-]
N26	11.902	0,161
N34	4.279	0,058
N28	14.589	0,198
N47 (Afvoer Trambrug)	73.755	1,000
N41	4.255	0,058
N39	4.646	0,063
N32	9.073	0,123
N914	4.802	0,065
N907	860	0,012
N916	847	0,011
N909	618	0,008
N901	4.627	0,063
N913	1.062	0,014
N911	2.277	0,031
N903	1.709	0,023
N25	844	0,011

Deze geschatte factoren werden verder vergeleken met een soortgelijke schatting op basis van afvoeren berekend met een SOBEK neerslag-afvoer model. Tabel 1.3 laat deze vergelijking zien voor elk RTC knooppunt: de orde grootte van de factoren is vergelijkbaar, wat vertrouwen geeft in de schattingen op basis van oppervlakte. Om deze redenen stellen we voor om de factoren berekend op basis van oppervlakte (Tabel 1.2) verder te gebruiken in de RTC berekeningen. Deze factoren gaan direct gebruikt worden om de piek en de vorm van een lateraal afvoer te bepalen op basis van de piekafvoer en afvoergolf bij Trambrug. Aangenomen wordt dat deze factoren voor allen zichtjaren gelden.

Tabel 1.3 Vergelijking geschatte factoren op basis van 1) oppervlakte en 2) Sobek resultaten.

RTC-knooppunt	Oppervlakte [ha]	Factor t.o.v. Trambrug gebaseerd op oppervlakte [-]	Factor t.o.v. Trambrug gebaseerd op SOBEK [-]
N47 (Afvoer Trambrug)	73.755	1,00	1,00
N28	14.589	0,20	0,28
N26	11.902	0,16	0,24
N32	9.073	0,12	0,21
N914	4.802	0,07	0,05
N39	4.646	0,06	0,06
N901	4.627	0,06	0,05
N34	4.279	0,06	0,07
N41	4.255	0,06	0,06
N911	2.277	0,03	0,03

RTC-knooppunt	Oppervlakte [ha]	Factor t.o.v. Trambrug gebaseerd op oppervlakte [-]	Factor t.o.v. Trambrug gebaseerd op SOBEK [-]
N903	1.709	0,02	0,02
N913	1.062	0,01	0,01
N907	860	0,01	0,01
N916	847	0,01	0,01
N25	844	0,01	0,02
N909	618	0,01	0,01

1.2.3 Waterstandsverloop op het VZM zonder inzet

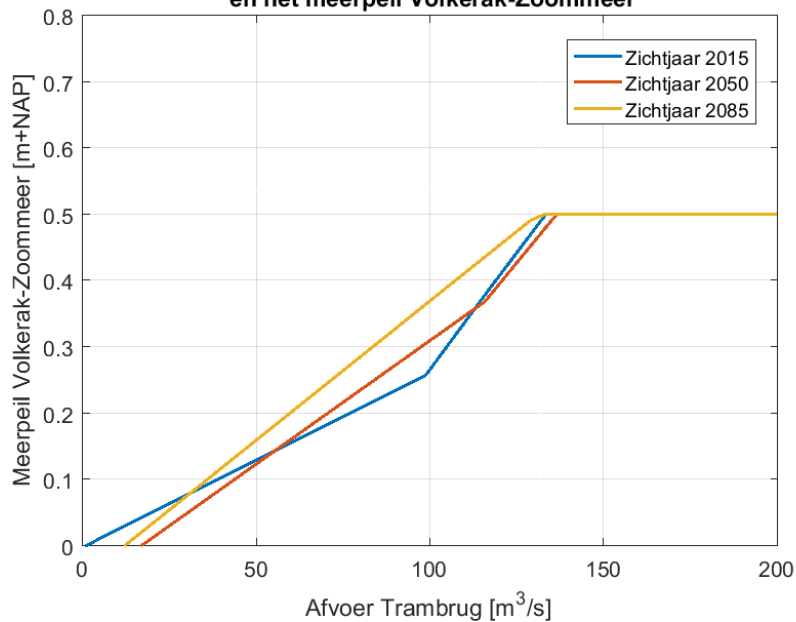
Aangenomen wordt dat de piek van het meerpeilverloop één-op-één gekoppeld is aan de afvoer bij Trambrug, zie Figuur 1.4. In de relatie wordt het piekmeerpeil op 0,5 m+NAP afgekap. Dat betekent dat er gespuid wordt vanuit het VZM om niet boven 0,5 m+NAP te komen. Deze relatie is verkregen door de gebeurtenissen met een gelijke waarschijnlijkheid aan elkaar gelijk te stellen² tot meerpeil 0,5 m+NAP. Hiervoor zijn de statistieken voor zichtjaren 2015, 2050 en 2085 uit het memo “Voorstel statistiek en klimaat” gebruikt (voor de afvoer is de Generalised Pareto verdeling gekozen).

Overige aannames m.b.t. het meerpeilverloop zijn als volgt samengevat (Kuijper *et al*, 2014):

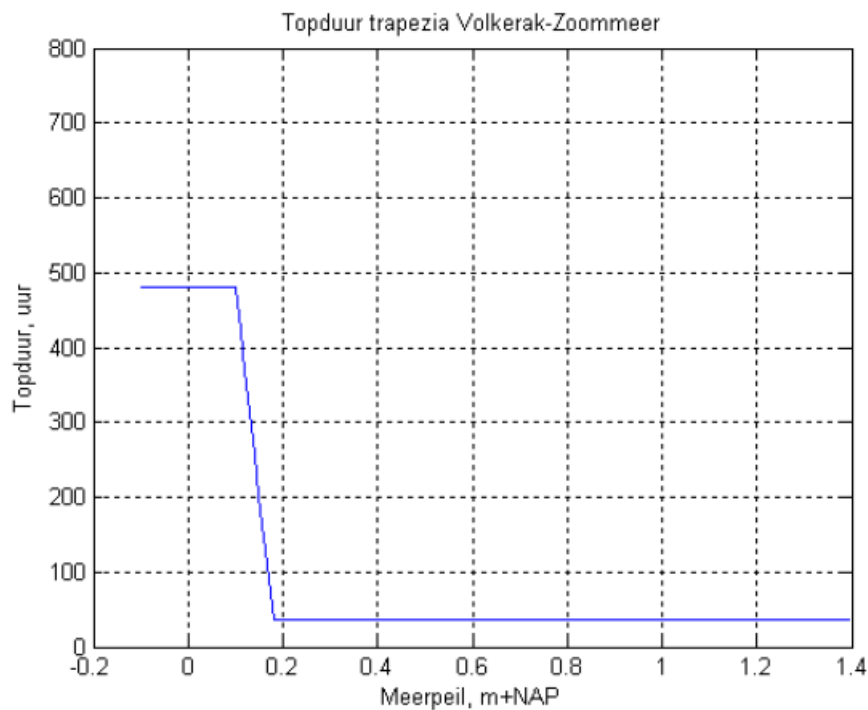
- Tijdsduur van de piek is een functie van de piekwaarde (s), de relatie wordt als volgt beschreven (zie ook Figuur 1.5):
 - Duur = 480 uur voor $-0,10 \leq s < 0,10$ m+NAP,
 - Duur = lineair aflopend van 480 tot 36 uur voor $0,10 \leq s < 0,18$ m+NAP,
 - Duur = 36 uur voor $s \geq 0,18$ m+NAP.
- De basis van het meerpeilverloop is 20 dagen.
- Het tijdsverloop wordt met geknikte trapezia gemodelleerd onder de aanname dat $a_v = 0,25$ en $a_h = 1,2$. De betekenis van deze parameters wordt in Figuur 1.6 uitgelegd. Verder geeft Figuur 1.7 een voorbeeld van het meerpeilverloop bij piekwaarde 0,6 m+NAP.
- De piek van het meerpeilverloop treedt 24 uur later op dan de piek van de afvoergolf.

² Bijvoorbeeld, aan afvoer met een overschrijdingskans van 1/1000 per jaar wordt meerpeil met de gelijke overschrijdingskans gekoppeld.

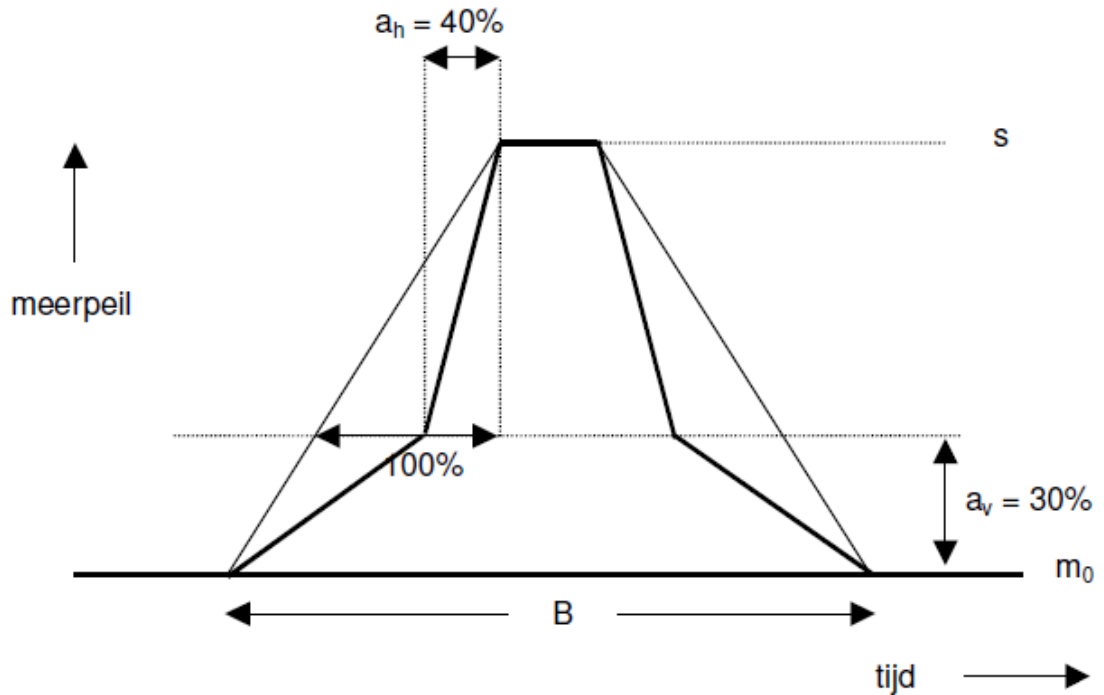
Koppeling o.b.v. overschrijdingsfrequenties voor de afvoer bij Trambrug en het meerpeil Volkerak-Zoommeer



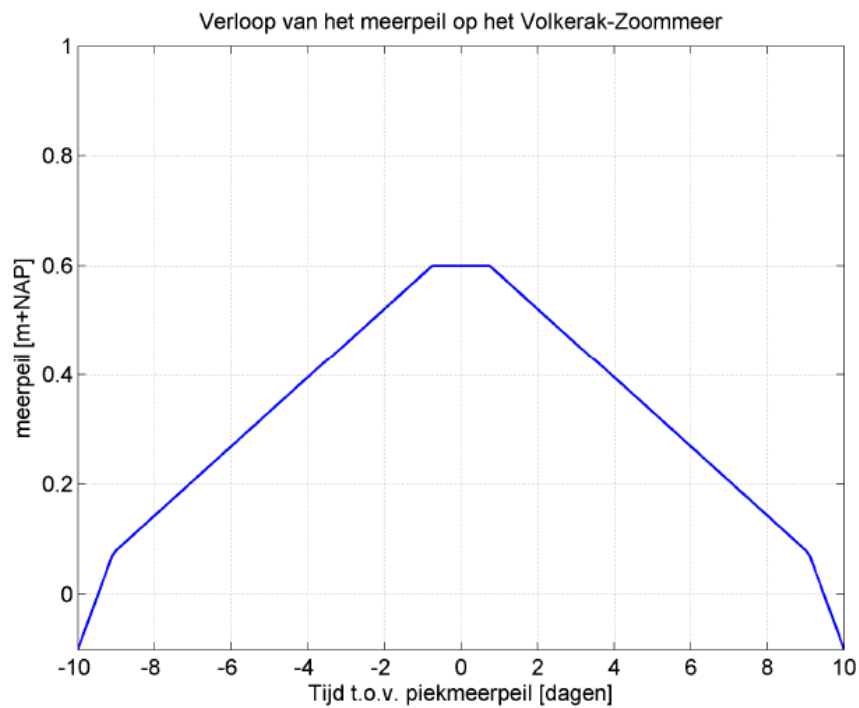
Figuur 1.4 Eén-op-één relatie tussen piekafvoer bij Trambrug en piek op het VZM (afgekapt op 0,5 m+NAP).



Figuur 1.5 Tijdsduur van het piekmeerpeil, bron: (Kuijper et al, 2014).



Figuur 1.6 Geknikt trapezium, bron: (Kuijper et al, 2014).



Figuur 1.7 Meerpeilverloop op het VZM bij piekwaarde 0,6 m+NAP, bron: (Kuijper et al, 2014).

Datum
12 november 2018

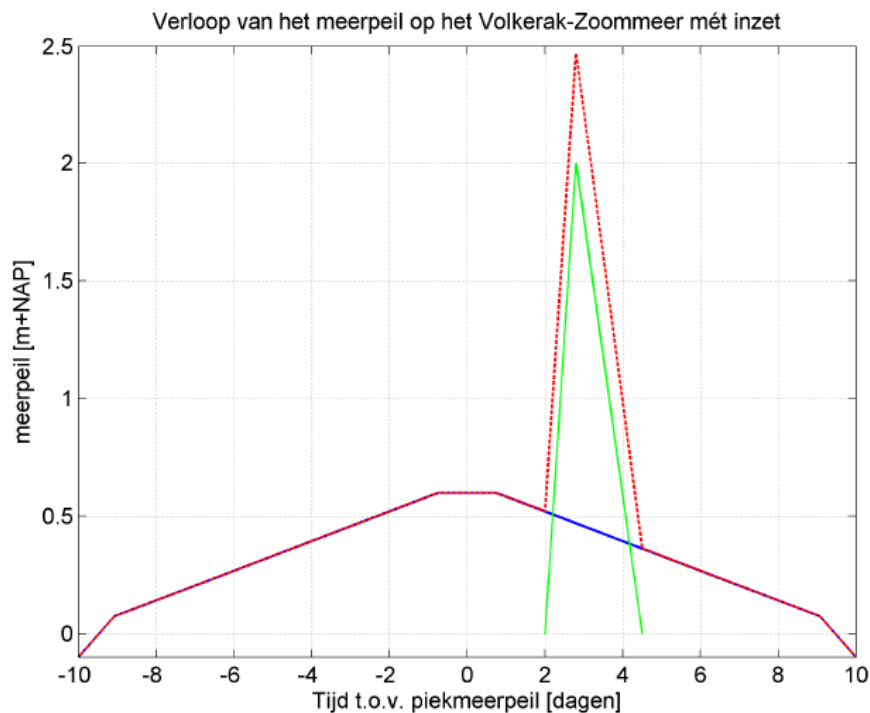
Pagina
9 van 14

1.2.4 Waterstandsverloop op het VZM met inzet

Om het meerpeilverloop op het VZM inclusief inzet te bepalen wordt het meerpeilverloop zonder inzet als basis gebruikt. Vervolgens wordt de verhoging van waterstanden als gevolg van de inzet gesuperponeerd op het verloop zonder inzet. Het idee wordt in Figuur 1.8 weergegeven en is gebaseerd op (Kuijper *et al*, 2014).

Hierbij gelden de volgende aannames (Kuijper *et al*, 2014):

- Verhoging van de waterstand als gevolg van het inzetten van het VZM voor tijdelijke waterberging duurt 2,5 dagen en is maximaal 2,0 m+NAP (groene lijn in Figuur 1.8). Deze verhoging wordt gesuperponeerd op het verloop zonder inzet (rode gestreepte lijn in Figuur 1.8).
- Het gebied wordt ingezet als waterberging 2 dagen na het originele piekmeerpeil (en dus bijna 3 dagen na de piek van de afvoer op de Mark).
- Het VZM wordt ingezet zonder voorspuien.
- Waterstand op het VZM kan maximaal tot 2,15 m+NAP stijgen.



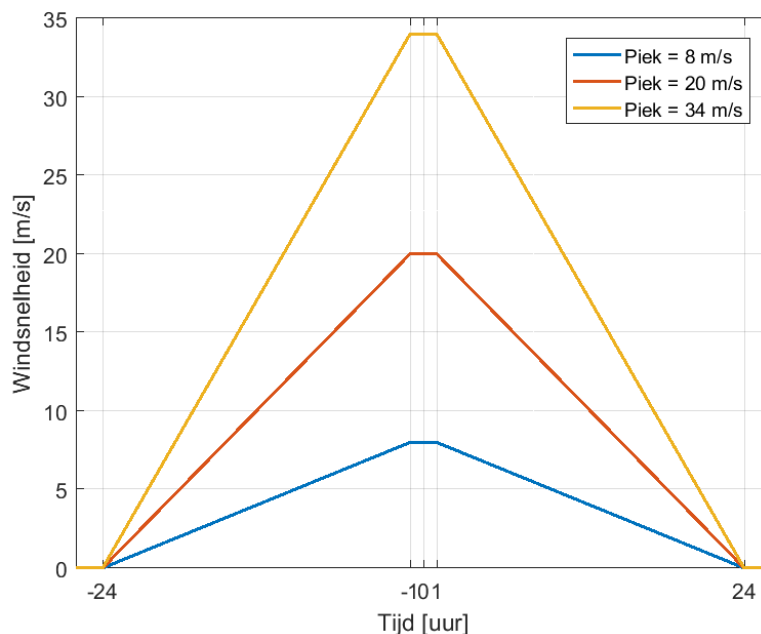
Figuur 1.8 Meerpeilverloop op het VZM bij piekwaarde 0,6 m+NAP met inzet 2 dagen na het originele piekmeerpeil, bron: (Kuijper *et al*, 2014).

1.2.5 Wind

Berekeningen met het RTC-model worden met representatieve windrichtingen per windrichtingsector uitgevoerd: 270° als representatief voor Sector West en 90° als representatief voor Sector Oost. Per windrichtingsector worden drie (piek)windsnelheden beschouwd: 8, 20 en 34 m/s.

Het tijdsverloop van de windsnelheid wordt met trapezia gemodelleerd, hierbij gelden de volgende aannames:

- Piekduur is gelijk aan 2 uur.
- Tussen tijdstip -24 en 24 uur worden een lineair verloop aangenomen tussen windsnelheid 0 m/s en de piek.
- Voor windrichting 90° en windrichting 270° zonder inzet van het VZM valt de maximale windsnelheid op hetzelfde moment als de maximale afvoer bij Trambrug.
- Voor windrichting 270° met inzet van het VZM valt de maximale windsnelheid op hetzelfde moment als de piek van het meerpeil (na inzet van het VZM).

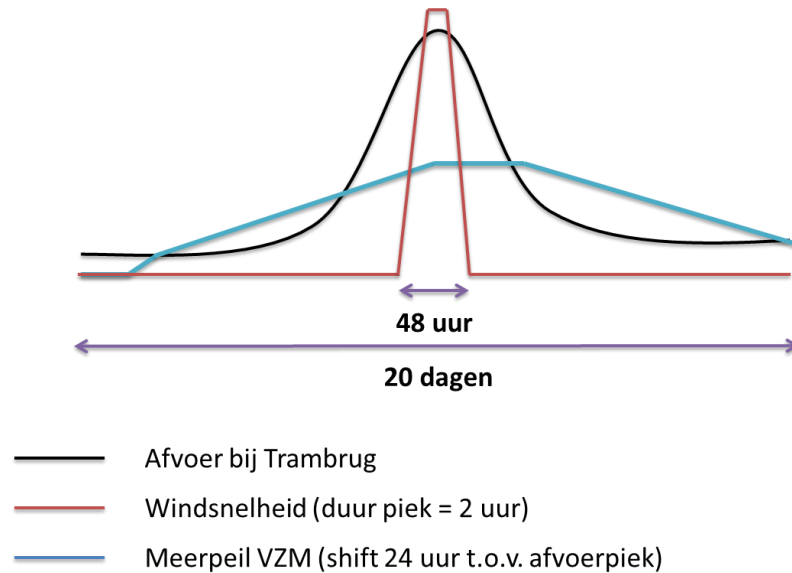


Figuur 1.9 Tijdsverloop van de windsnelheid voor drie piekwaarden.

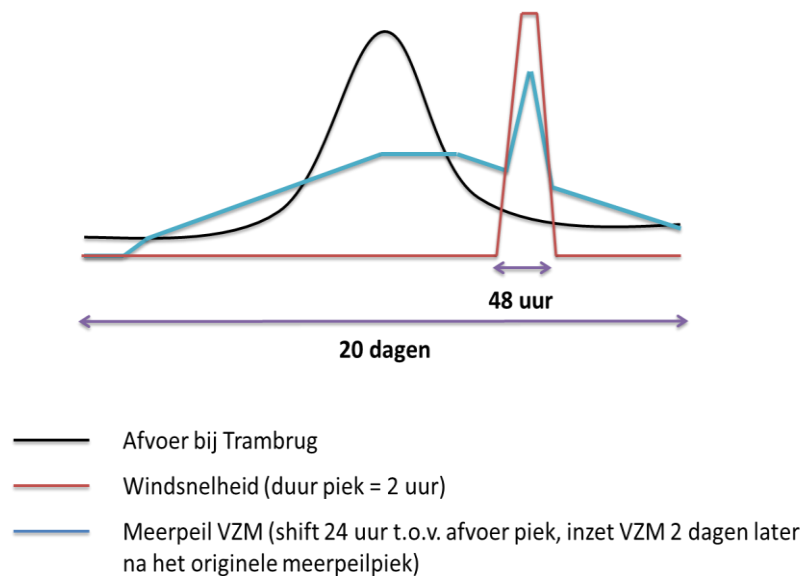
Datum
 12 november 2018

Pagina
 11 van 14

Figuur 1.10 en Figuur 1.11 presenteren een schematische weergave van de invoer voor het RTC-model en windrichtingen 90° en 270°. Voor windrichting 90° wordt het VZM niet ingezet.



Figuur 1.10 Schematische weergave invoer RTC-model voor windrichting 90° en windrichting 270° zonder inzet van het VZM.

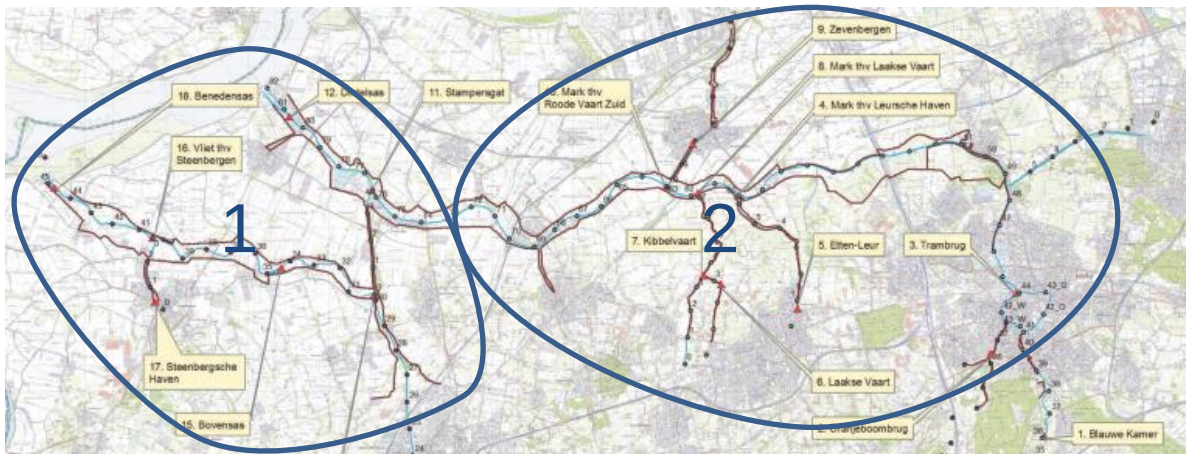


Figuur 1.11 Schematische weergave invoer RTC-model voor windrichting 270° met inzet van het VZM.

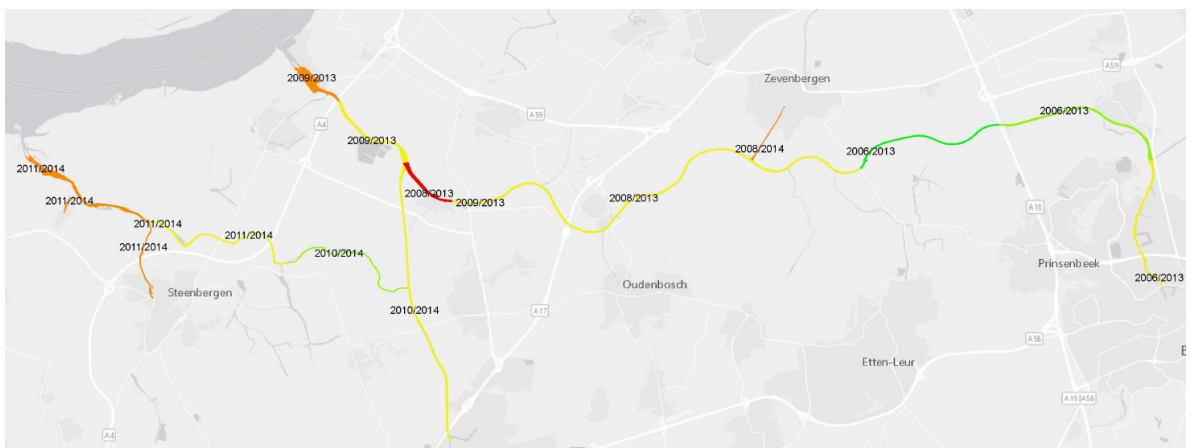
1.2.6 Bodemprofielen

In deze studie wordt de Mark-Dintel-Vliet boezem in twee systemen ingedeeld, zie Figuur 1.12. Deze indeling is gemaakt om het aantal berekeningen met het RTC-model te beperken en inzicht te krijgen in de effecten van baggeren (*Bijlage 1 Methode*).

De indeling correspondeert redelijk goed met de aanwassnelheid per vaarwegtraject, zie Figuur 1.13. In het benedenstroomse gedeelte van het gebied (systeem 1), is de aanwassnelheid namelijk hoger dan in het bovenstroomse gedeelte (systeem 2). Aangenomen wordt dat de gemiddelde aanwassnelheid in systeem 1 ca. 2 cm/jaar bedraagt en dat de gemiddelde aanwassnelheid in systeem 2 gelijk aan ca. 1 cm/jaar is. Deze aanwassnelheid wordt voor alle zichtjaren (2015 t/m 2115) gebruikt.



Figuur 1.12 Verdeling van de Mark-Dintel-Vliet boezem in twee systemen.



Legend

cm/jaar



Figuur 1.13 Aanwassnelheid per vaarwegtraject Brabantse Delta (Databron 5).

Datum
12 november 2018

Pagina
13 van 14

Per systeem worden met het RTC-model verschillende bodemdieptes doorgerekend:

- Referentie: bodemprofielen zonder aanwas, die aan de scheepvaart eisen voldoen.
- Bodemprofielen 40 cm *hoger* dan de referentieprofielen.
- Bodemprofielen 25 cm *lager* dan de referentieprofielen.

Aangenomen wordt dat de bodemprofielen, die lager zijn dan de referentieprofielen, een situatie na het baggeren met een “buffer” (dus dieper dan de referentieprofielen) representeren.

Datum
12 november 2018

Pagina
14 van 14

Referenties

Kuijper, B., Geerse, C., Stijnen, J., Botterhuis, T., Versteeg, R., Duits, M. en Vreugdenhil. *Effect waterberging Volkerak-Zoommeer op waterstanden Mark-Dintel-Vliet boezem*. HKV PR2904.10, Opdrachtgever: RWS, oktober 2014.

Waterschap Brabantse Delta (WBD). *Climate scenarios for the analysis of the reduction of the VZM calamity level*, memorandum, 2018. Toegeleverd door Klaas Jan Douben (WBD).

Databron 1: *Excel bestand Time series H Trambrug + Q-H relation.xlsx*. Toegeleverd door Klaas Jan Douben (WBD).

Databron 2: *Excel bestand Time series.xlsx*. Toegeleverd door Klaas Jan Douben (WBD).

Databron 3: *Wind speed Schiphol 16 directions.xlsx*. Toegeleverd door Karolina Wojciechowska (Deltares).

Databron 4: jaar2015_inclFalen_inclInzet.txt, jaar2050_inclFalen_inclInzet.txt en jaar2085_inclFalen_inclInzet.txt. Toegeleverd door Klaas Jan Douben (WBD).

Databron 5: Bijlage 4 Aanwassnelheden_trajecten_S_15IT010015_3.pdf. Toegeleverd door Klaas Jan Douben (WBD).

Bijlage 1 Methode, Karolina Wojciechowska, Ferdinand Diermanse, 31 oktober 2018

Bijlage 2 Memo statistiek en klimaat, Karolina Wojciechowska, Dana Stuparu, 12 november 2018

B Memo statistiek en klimaat



Memo

Datum
12 november 2018

Aantal pagina's
8

Contactpersoon
Karolina Wojciechowska
Dana Stuparu

Doorkiesnummer
+31(0)88 335 8263

E-mail
Karolina.Wojciechowska@deltares.nl

Onderwerp
Memo statistiek en klimaat

1 Voorstel statistiek en klimaatscenario's

Ten behoeve van de Brabantse Delta case binnen het ROBAMCI project worden probabilistische berekeningen met Probabilistic Tool Kit (PTK) uitgevoerd. In de berekeningen spelen de volgende stochasten een rol:

- Afvoer bij Trambrug,
- Meerpeil op het VZM,
- Windrichting en windsnelheid,
- Inzet van het Volkerak-Zoommeer (VZM) als een waterbergingsgebied.

Dit memo presenteert statistiek van de bovengenoemde stochasten. Ook wordt de statistiek van het meerpeil weergegeven, die indirect in de berekeningen gebruikt wordt. De statistiek wordt voor zichtjaren 2015, 2050 en 2085 weergegeven.

1.1 Klimaatscenario's voor afvoer en meerpeil

In deze studie worden de klimaatscenario's voor de analyse van de reductie van de calamiteiten meerpeilen van het VZM als basis gebruikt (Kuijper et al., 2018). Deze klimaatscenario's worden in Tabel 1 samengevat voor zichtjaren 2050 en 2085.

De PTK berekeningen worden over de periode van 100 jaar uitgevoerd. Uitgaande van 2015 als het referentiejaar, is het dus nodig om de klimaatscenario's voor zichtjaren 2015 t/m 2115 te definiëren. In deze studie worden deze klimaatscenario's verkregen door de (log)lineaire interpolatie/extrapolatie van de resultaten voor zichtjaren 2015, 2050 en 2085.

Tabel 1 Overzicht van de aangenomen zeespiegelstijging en factoren voor toename van de afvoer/neerslag t.o.v. het referentiejaar 2015 (WBD, 2018).

Zichtjaar	Zeespiegelstijging	Factor afvoer/neerslag
2050	20 cm	1,17
2085	45 cm	1,30

1.2 Afvoer bij Trambrug

De statistiek van de piekafvoer bij Trambrug is geanalyseerd op basis van 15 minuten *waterstandsmetingen*¹ vanaf 1-1-1990 t/m 2-11-2018 (28 jaar). In de analyse zijn alleen metingen uit de wintermanden² beschouwd. De waterstandsmetingen zijn naar afvoerwaarden op basis van de volgende QH-relatie vertaald:

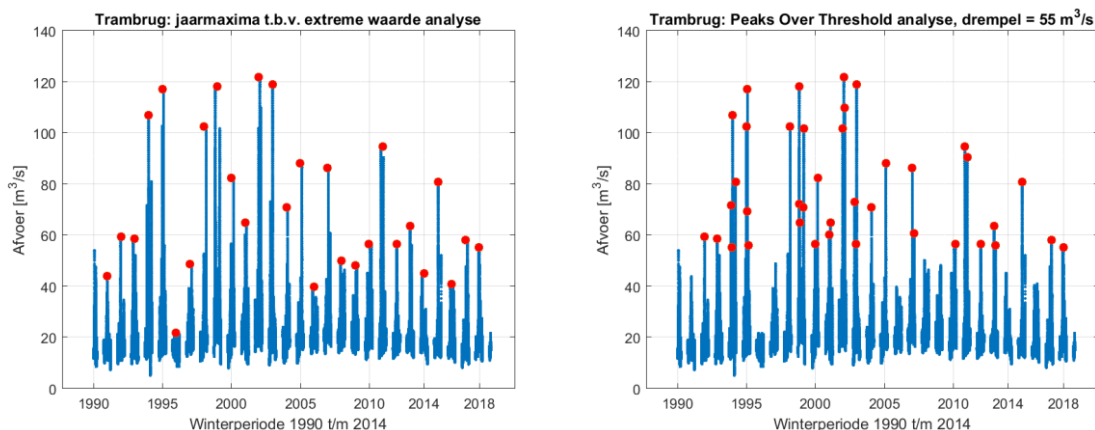
$$Q = 17,699 \cdot H^2 + 39,097 \cdot H + 14,05$$

waar H staat voor de waterstand en Q staat voor de afvoer.

De statistische analyse is op twee methoden gebaseerd:

- Analyse van de jaarmaxima,
- Peaks Over Threshold (POT).

Figuur 1 geeft een overzicht van de metingen en de geselecteerde gebeurtenissen (piekafvoeren). In de eerste methode bestaan de geselecteerde gebeurtenissen uit de jaarmaxima (maximale afvoer per jaar). Dat betekent dat er 28 waarden in de analyse beschouwd worden. In de tweede methode bestaan de geselecteerde gebeurtenissen uit alle onafhankelijke piekafvoeren boven een drempel van 55 m³/s. Om te zorgen dat de gebeurtenissen onafhankelijk van elkaar zijn, aangenomen is de afstand tussen twee pieken tenminste 7 dagen bedraagt. Uitgaande van deze aannames is de POT-analyse op 39 gebeurtenissen gebaseerd.



Figuur 1 Piekselectie voor de jaarmaxima (links) en Peaks Over Threshold (rechts).

Afhankelijk van de methode, zijn er vier verdelingstypen beschouwd:

- Analyse van de jaarmaxima:
 - Generalised Extreme Value verdeling (GEV),
 - Gumbel verdeling.
- POT-analyse:
 - Generalised Pareto verdeling (GP),

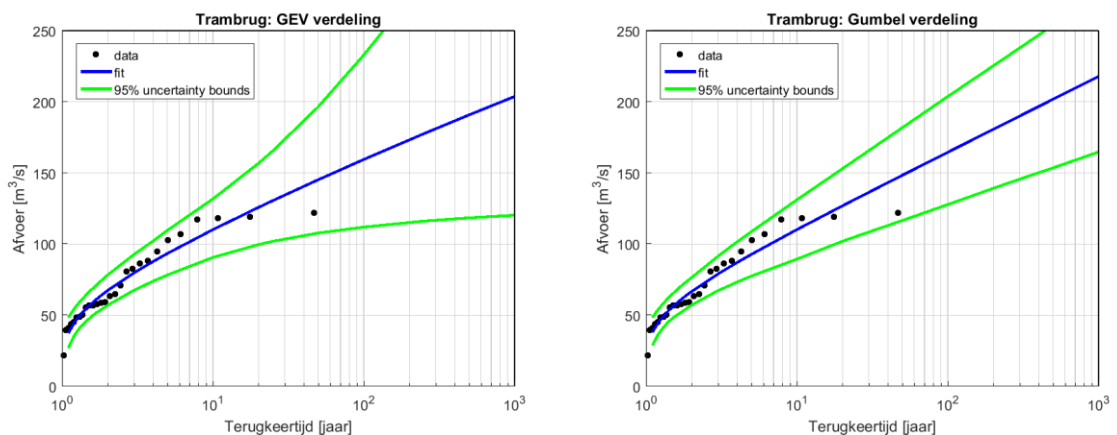
¹ Databron 1, zie de referenties.

² Oktober t/m maart.

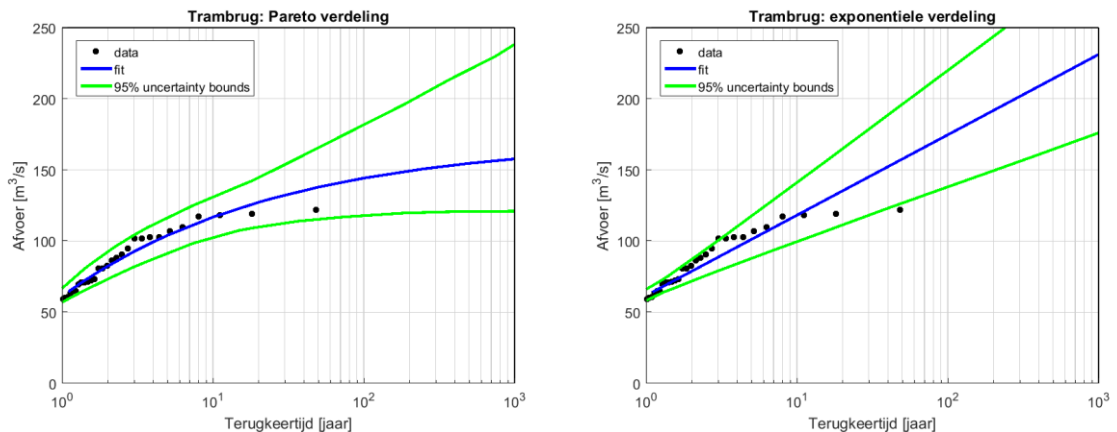
– Exponentiele verdeling.

Parameters van deze verdelingen zijn met de methode van L-momenten geschat.

Figuur 2 en Figuur 3 geven de geresulteerde fits, inclusief de empirische verdelingen (data) en 95%-betrouwbaarheidsintervallen. Tabel 2 presenteert de waarden van de piekafvoer bij Trambrug voor verschillende terugkeertijden en de vier verdelingstypen. Opgemerkt wordt dat de resultaten redelijk afwijkend van elkaar zijn. Ook zijn, in het geval van de GEV fit, de betrouwbaarheidsintervallen heel breed voor hoge terugkeertijden.



Figuur 2 GEV en Gumbel verdelingen Trambrug (jaarmaxima 1990 t/m 2014).



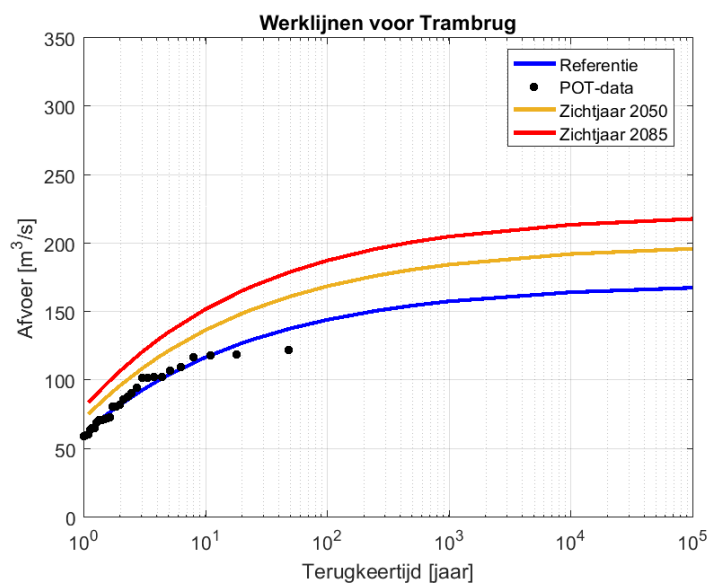
Figuur 3 GP en exponentiele verdelingen Trambrug (POT-analyse 1990 t/m 2014).

Tabel 2 Piekafvoer bij Trambrug per terugkeertijd voor de vier verdelingstypen.

Terugkeertijd [jaar]	Afvoer [m³/s] GEV	Afvoer [m³/s] Gumbel	Afvoer [m³/s] GP	Afvoer [m³/s] Exponentieel
10	110	110	117	118
100	159	165	144	175
1000	204	218	158	231
10,000	244	271	164	288
100,000	281	324	168	344

Voorgesteld wordt om de Generalised Pareto verdeling in eerste instantie te gebruiken. Deze verdeling volgt redelijk goed de empirische verdeling (data). Verder voor een terugkeertijd van 100 jaar levert deze verdeling de afvoer 144 m³/s, wat correspondeert met de maatgevende afvoer bij Trambrug (140 m³/s voor T = 100 jaar). Niettemin aanbevolen wordt om het effect van verschillende kansverdelingen op de resultaten van de PTK-berekeningen te onderzoeken.

Uitgaande van de Pareto verdeling en de neerslag/afvoer factoren voor zichtjaren 2050 en 2085 presenteert Figuur 4 de werklijnen voor Trambrug. Tabel 3 geeft een samenvatting van waarden van de piekafvoer bij Trambrug voor verschillende terugkeertijden en zichtjaren.



Figuur 4 Werklijnen voor locatie Trambrug (zichtjaar 2015, 2050 en 2085).

Tabel 3 Piekafvoer bij Trambrug per terugkeertijd voor verschillende zichtjaren.

Terugkeertijd [jaar]	Afvoer [m ³ /s] Referentie	Afvoer [m ³ /s] 2050	Afvoer [m ³ /s] 2085
10	117	137	152
100	144	169	188
1000	158	185	205
10,000	164	192	214
100,000	168	196	218

1.3 Meerpeil

De meerpeilstatistiek van het Volkerak-Zoommeer wordt in de onderstaande tabellen voor zichtjaren 2015, 2050 en 2085 weergegeven. De meerpeilstatistiek heeft betrekking op de situatie met inzet van het Volkerak-Zoommeer als bergingsgebied en een calamiteitenpeil van 0,5 m+NAP.

Opgemerkt wordt dat de meerpeilstatistiek in deze studie indirect gebruikt wordt. Namelijk wordt de statistiek gebruikt om een relatie tussen de piekafvoer bij Trambrug en het meerpeilpiek af te leiden. In de relatie worden de gebeurtenissen met een gelijke waarschijnlijkheid aan elkaar gekoppeld. Bovendien aangenomen wordt dat het meerpeil niet

Datum
12 november 2018

Pagina
5 van 8

hoger dan 0,5 m+NAP kan stijgen (dit geldt alleen als het VZM niet als waterberging wordt ingezet). Ofwel dat er volop gespuid wordt vanuit het VZM om niet boven de 0,5 m+NAP uit te komen.

Tabel 4 Meerpeilstatistiek van het VZM per terugkeertijd en verschillende zichtjaren (Databron 4).

Terugkeertijd [jaar]	Meerpeil [m+NAP] 2015	Meerpeil [m+NAP] 2050	Meerpeil [m+NAP] 2085
10	0,386	0,503	0,544
100	0,533	0,620	0,755
1000	0,736	0,920	1,103
10,000	1,856	1,892	1,934
100,000	1,969	2,010	2,061

1.4 Wind

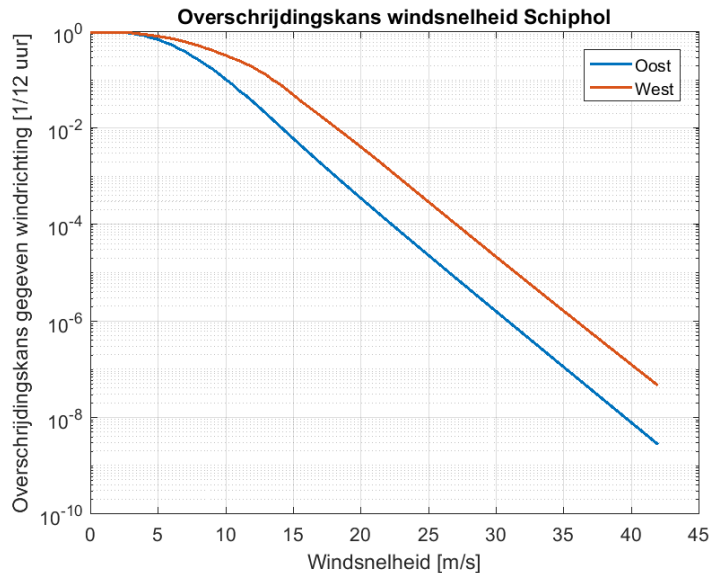
De probabilistische berekeningen worden voor twee windrichtingsectoren uitgevoerd:

- Sector West: 225° t/m 360° (t.o.v. Noord)
- Sector Oost: 22,5° t/m 202,5° (t.o.v. Noord)

Deze indeling is gebaseerd op de 16-windrichtingindeling: 22,5°, 45°, ..., 360°. In de WBI2017 benadering wordt de Maeslantkering nooit gesloten voor de windrichtingen uit Sector Oost (station Schiphol). Omdat de eventuele inzet van het VZM alleen in het geval van de gesloten Maeslantkering kan plaatsvinden, is de kans op inzet van het VZM gelijk aan 0 voor de windrichtingen uit Sector 2. Voor windrichtingen uit Sector West bestaat een kans dat de Maeslantkering sluit (kans > 0) en dus ook een kans op inzet van het VZM.

In deze studie gebruiken we de WBI2017 statistiek voor station Schiphol (Databron 3). Conform WBI2017, is de kans op een windrichting uit Sector West gelijk aan 0,45 en de kans op een windrichting uit Sector Oost is 0,55. Figuur 5 presenteert de overschrijdingskans van de windsnelheid bij Schiphol conditioneel op een windrichtingsector (west en oost). De statistiek geldt voor 12 uur.

Aangenomen wordt dat de windstatistiek voor alle zichtjaren geldt.



Figuur 5 Overschrijdingskans windsnelheid Schiphol gegeven windrichtingen uit Sector Oost en Sector West (Databron 3).

1.5 Kans op inzet van het VZM

Op basis van (Kuijper et al., 2014) wordt in deze studie de kans op inzet van het VZM als functie van de afvoer bij Lobith beschouwd.

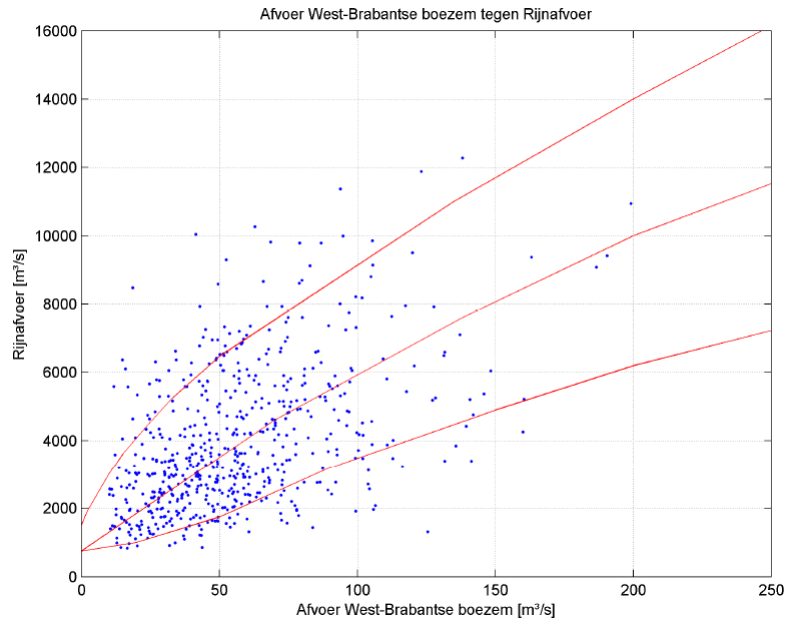
De afvoer bij Lobith wordt aan de afvoer bij Trambrug gekoppeld. Hiervoor worden drie relaties uit de studie (Kuijper et al., 2014) gebruikt. Deze relaties worden in Figuur 6 weergegeven. De kans op de middelste relatie is gelijk aan 60%, de kans op de twee uiterste relaties is gelijk aan 20% (Kuijper et al., 2014).

De relatie tussen de afvoer bij Lobith en de kans op inzet van het VZM is afgeleid op basis van de formules uit Bijlage A in (Kuijper et al., 2014). Ten behoeve van de analyse zijn berekeningen met Hydra-NL uitgevoerd voor oeverlocatie HD_1_34-2_dk_00345 gelegd in de buurt van de Volkeraksluizen.

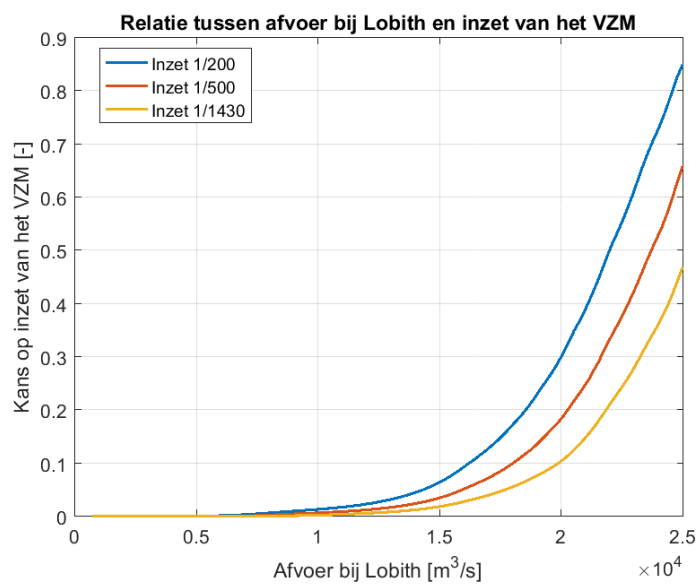
Figuur 7 presenteert de relatie voor drie inzetfrequenties van het VZM: 1/1430 per jaar (huidig klimaat), 1/500 per jaar (zichtjaar 2050) en 1/200 per jaar (zichtjaar 2100).

Datum
12 november 2018

Pagina
7 van 8



Figuur 6 Relatie tussen afvoer West-Brabantse boezem en Rijnaafvoer (Kuijper et al., 2014).



Figuur 7 Relatie tussen afvoer bij Lobith en kans op inzet van het VZM.

Datum
12 november 2018

Pagina
8 van 8

Referentie

Kuijper, B., Geerse, C., Stijnen, J., Botterhuis, T., Versteeg, R., Duits, M. en Vreugdenhil. *Effect waterberging Volkerak-Zommeer op waterstanden Mark-Dintel-Vliet boezem*. HKV PR2904.10, Opdrachtgever: RWS, oktober 2014.

Kuijper, B., Vermeulen, C. & T. Botterhuis, 2018. *KBA calamiteitenregeling 'hoge waterstanden VZM'*. Rapport PR3833.10, oktober 2018. HKV Lijn in water.

Databron 1: *Excel bestand Time series H Trambrug + Q-H relation.xlsx*. Toegeleverd door Klaas Jan Douben (WBD).

Databron 2: *Excel bestand Time series.xlsx*. Toegeleverd door Klaas Jan Douben (WBD).

Databron 3: *Wind speed Schiphol 16 directions.xlsx*. Toegeleverd door Karolina Wojciechowska (Deltares).

Databron 4: jaar2015_inclFalen_inclInzet.txt, jaar2050_inclFalen_inclInzet.txt en jaar2085_inclFalen_inclInzet.txt. Toegeleverd door Klaas Jan Douben (WBD).

Databron 5: Bijlage 4 Aanwassnelheden_trajecten_S_15IT010015_3.pdf. Toegeleverd door Klaas Jan Douben (WBD).

C Memo probabilistische methode

Memo

Datum 31 oktober 2018	Aantal pagina's 9	
Contactpersoon Karolina Wojciechowska Ferdinand Diermanse	Doorkiesnummer +31(0)88 335 8263	E-mail Karolina.Wojciechowska@deltares.nl

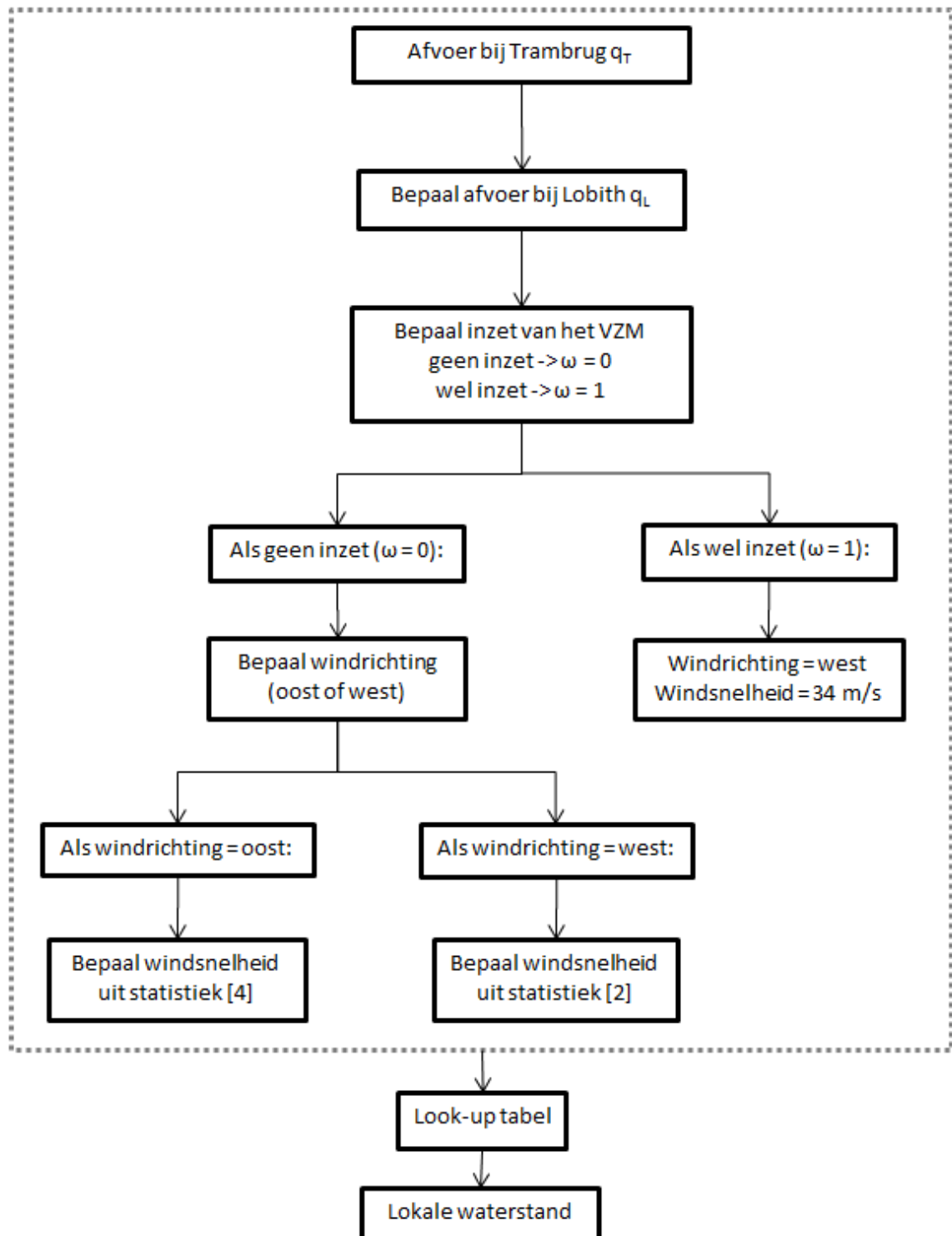
Onderwerp
Voorstel methode aangepast

1 Beschrijving probabilistische methode

1.1 Notatie

h	Lokale waterstand [m+NAP]
q_T	Piekafvoer bij Trambrug [m^3/s]
y	Piekafvoer bij Lobith [m^3/s]
ϖ	Wel of geen inzet van het VZM [-]
u	Windsnelheid boven het gebied [m/s]
r	Windrichting [$^\circ$]

1.2 Praktische uitwerking



1.3 Wiskundige beschrijving

Deze paragraaf presenteert formules voor het afleiden van overschrijdingsfrequenties van lokale waterstanden in de Brabantse Delta. De gekozen aanpak is grofweg gebaseerd op (Kuijper et al, 2014). De inbreng van de wind (richting en snelheid) is nieuw in vergelijking met (Kuijper et al, 2014).

Onder de aanname dat het winterhalfjaar 9 perioden van 20 dagen telt, wordt de overschrijdingsfrequentie van lokale waterstand h als volgt berekend:

$$F(h) = N \cdot P_{20}(H > h) \quad (1.1)$$

waar:

$F(h)$	Overschrijdingsfrequentie van lokale waterstand h [1/whjaar]
$P_{20}(H > h)$	Overschrijdingskans van lokale waterstand h in een periode van 20 dagen [1/keer]
N	Aantal perioden van 20 dagen binnen het winterhalfjaar = 9 [-]

De overschrijdingskans van de lokale waterstand wordt als volgt afgeleid:

$$P_{20}(H > h) = \int P_{20}(H > h | q_T) \cdot f_{20}(q_T) dq_T \quad (1.2)$$

waar:

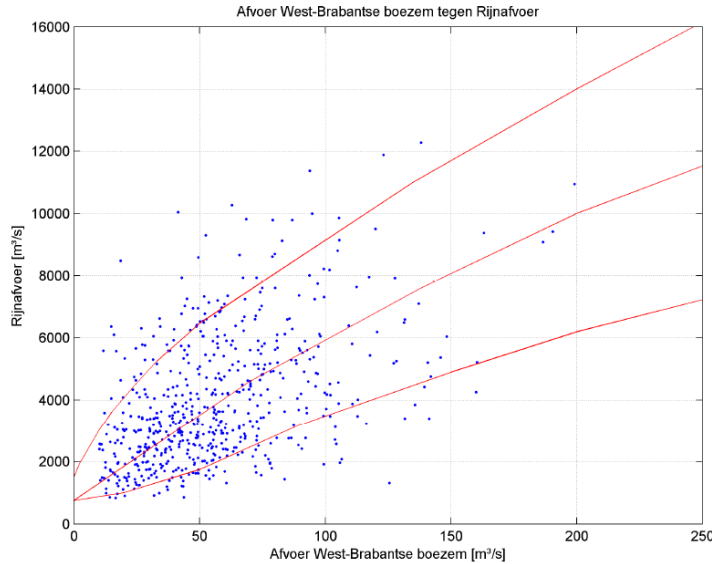
$P_{20}(H > h q_T)$	Overschrijdingskans van lokale waterstand h voor een periode van 20 dagen, gegeven de piekafvoer bij Trambrug q_T [1/keer]
$f_{20}(q_T)$	Kansdichtheid van de piekafvoer bij Trambrug voor een periode van 20 dagen [-]

Conform (Kuijper et al, 2014) is de kans op inzet van het VZM afhankelijk van de afvoer bij Lobith. Verder toont de statistische analyse aan dat de afvoer bij Trambrug met de afvoer bij Lobith gecorreleerd is (Kuijper et al, 2014). Dit betekent dat de afvoer bij Trambrug aan de afvoer bij Lobith gerelateerd kan worden en vervolgens kan de kans op inzet van het VZM aan de afvoer bij Lobith gekoppeld worden.

De correlatie tussen de afvoer bij Trambrug en de afvoer bij Lobith wordt met behulp van drie eenvoudige relaties weergegeven, zie Figuur 1.1. De kans op de middelste relatie is gelijk aan 60%, de kans op de twee uiterste relaties is gelijk aan 20%.

Datum
1 oktober 2018

Pagina
4 van 9



Figuur 1.1 Relatie tussen afvoer bij Lobith en de afvoer bij Trambrug (Kuijper et al, 2017).

De afvoer bij Lobith wordt als volgt in de overschrijdingskans $P_{20}(H > h | q_T)$ verwerkt:

$$P_{20}(H > h) = \int P_{20}(H > h | q_T) \cdot f_{20}(q_T) dq_T = \sum_{i=1}^3 P(i) \cdot \int P_{20}(H > h | q_T, y_i(q_T)) \cdot f_{20}(q_T) dq_T \quad (1.3)$$

waar:

$y_i(q_T)$	Piekafvoer bij Lobith voor relatie i (i = 1, 2, 3) gegeven piekafvoer bij Trambrug q_T [m³/s]
$P(i)$	Kans op relatie i [-]

Vervolgens wordt de overschrijdingskans $P_{20}(H > h | q_T, y_i(q_T))$ conditioneel op wel of geen inzet van het VZM berekend:

$$P_{20}(H > h | q_T, y_i(q_T)) = P_{20}(H > h | q_T, y_i(q_T), \varpi = 0) \cdot P(\varpi = 0 | q_T, y_i(q_T)) + P_{20}(H > h | q_T, y_i(q_T), \varpi = 1) \cdot P(\varpi = 1 | q_T, y_i(q_T)) \quad (1.4)$$

waar:

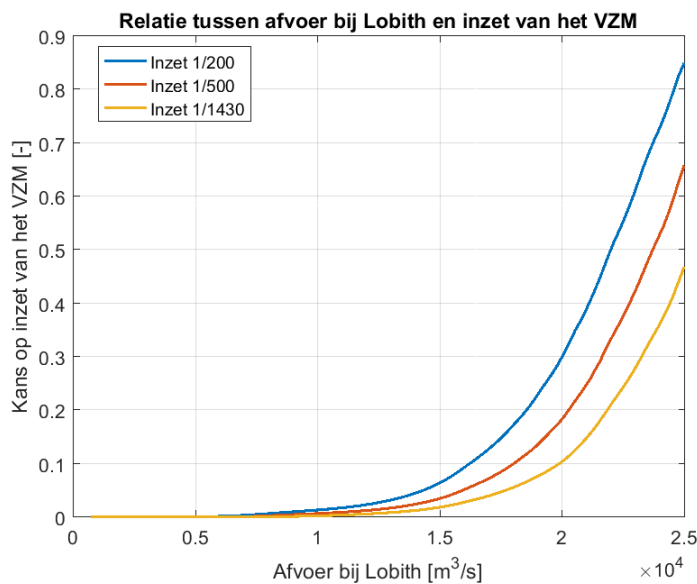
$P_{20}(H > h q_T, y_i(q_T), \varpi = 0)$	Overschrijdingskans van lokale waterstand h in een periode van 20 dagen, gegeven de piekafvoer bij Trambrug q_T , de piekafvoer bij Lobith $y_i(q_T)$ en geen inzet van het VZM [1/keer]
$P_{20}(H > h q_T, y_i(q_T), \varpi = 1)$	Overschrijdingskans van lokale waterstand h in een periode van 20 dagen, gegeven de piekafvoer bij Trambrug q_T , de

	piekafvoer bij Lobith $y_i(q_T)$ en inzet van het VZM [1/keer]
$P(\varpi = 0 q_T, y_i(q_T))$	Kans op geen inzet van het VZM, gegeven de piekafvoer bij Trambrug q_T en de piekafvoer bij Lobith $y_i(q_T)$ [-]
$P(\varpi = 1 q_T, y_i(q_T))$	Kans op inzet van het VZM, gegeven de piekafvoer bij Trambrug q_T en de piekafvoer bij Lobith $y_i(q_T)$ [-]

In de gekozen aanpak nemen we aan dat de kans op inzet van het VZM alleen van de afvoer bij Lobith afhankelijk¹ is; dat is conform (Kuijper et al, 2014):

$$P(\varpi = 0 | q_T, y_i(q_T)) = P(\varpi = 0 | y_i(q_T)) \text{ en } P(\varpi = 1 | q_T, y_i(q_T)) = P(\varpi = 1 | y_i(q_T)) \quad (1.5)$$

De conditionele kans $P(\varpi = 1 | y_i(q_T))$ is met behulp van Hydra-NL berekend voor verschillende inzetfrequenties van het VZM. De berekeningen zijn uitgevoerd op basis van formules uit Bijlage A in (Kuijper et al, 2014).



Figuur 1.2 Relatie tussen de afvoer bij Lobith en de kans op inzet van het VZM.

De conditionele kans $P_{20}(H > h | q_T, y_i(q_T), \varpi = 0)$ wordt als volgt bepaald, uitgaande van twee windrichtingsectoren (west en oost). De vergelijkingen voor $\varpi = 1$ zijn analoog.

$$\begin{aligned}
 P_{20}(H > h | q_T, y_i(q_T), \varpi = 0) = & \quad (1.6) \\
 P_{20}(H > h | q_T, y_i(q_T), \varpi = 0, r = \text{oost}) \cdot P(r = \text{oost} | q_T, y_i(q_T), \varpi = 0) + \\
 P_{20}(H > h | q_T, y_i(q_T), \varpi = 0, r = \text{west}) \cdot P(r = \text{west} | q_T, y_i(q_T), \varpi = 0)
 \end{aligned}$$

waar:

¹ Dat is fysisch gezien. Statistisch gezien is er wel een relatie met de afvoer bij Trambrug. Deze statistische relatie kan worden verwaarloosd.

Datum
1 oktober 2018

Pagina
6 van 9

$P_{20}(H > h q_T, y_i(q_T), \varpi = 0, r)$	Overschrijdingskans van lokale waterstand h in een periode van 20 dagen, gegeven de piekafvoer bij Trambrug q_T , de piekafvoer bij Lobith $y_i(q_T)$, geen inzet van het VZM en windrichting r (oost of west) [1/keer]
$P(r q_T, y_i(q_T), \varpi = 0)$	Kans op windrichting r (oost of west), gegeven de piekafvoer bij Trambrug q_T , de piekafvoer bij Lobith $y_i(q_T)$ en geen inzet van het VZM [-]

Rekening houdend met de windsnelheid-stochast leidt dit tot:

$$P_{20}(H > h | q_T, y_i(q_T), \varpi = 0, r = oost) = \quad (1.7)$$

$$\int P_{20}(H > h | q_T, y_i(q_T), \varpi = 0, r = oost, u) \cdot g_{20}(u | q_T, y_i(q_T), \varpi = 0, r = oost) du$$

en:

$$P_{20}(H > h | q_T, y_i(q_T), \varpi = 0, r = west) = \quad (1.8)$$

$$\int P_{20}(H > h | q_T, y_i(q_T), \varpi = 0, r = west, u) \cdot g_{20}(u | q_T, y_i(q_T), \varpi = 0, r = west) du$$

Verder geldt:

- De kans op een windrichting is onafhankelijk van de afvoer.
- Indien sprake is van “geen inzet” van het VZM, geeft dat feitelijk geen informatie over de kans op een windrichting (omdat inzet van het VZM zo zeldzaam is, verschaft de observatie dat er sprake is van “geen inzet” feitelijk geen informatie over de windsnelheid).

Daarom geldt:

$$P(r | q_T, y_i(q_T), \varpi = 0) = P(r) \quad (1.9)$$

Ook de windsnelheid is onafhankelijk van de afvoer bij Trambrug:

$$g_{20}(u | q_T, y_i(q_T), \varpi = 0, r) = g_{20}(u | y_i(q_T), \varpi = 0, r) \quad (1.10)$$

waar:

$P_{20}(H > h q_T, y_i(q_T), \varpi = 0, r, u)$	Kans op overschrijden van waterstand h in een periode van 20 dagen, gegeven de piekafvoer bij Trambrug q_T , de piekafvoer bij Lobith $y_i(q_T)$, geen inzet van het VZM, windrichting r en windsnelheid u [1/keer]
$g_{20}(u q_T, y_i(q_T), \varpi = 0, r)$	Kansdichtheid van de windsnelheid u , gegeven de piekafvoer bij Trambrug q_T , de piekafvoer bij Lobith $y_i(q_T)$, geen inzet van het VZM en windrichting r [-]

Datum
1 oktober 2018

Pagina
7 van 9

$P(r | q_T, y_i(q_T), \varpi = 0)$

Kans op windrichting r gegeven de piekafvoer bij Trambrug q_T , de piekafvoer bij Lobith $y_i(q_T)$ en geen inzet van het VZM [-]

$P(r)$

Kans op windrichting r [-]

Merk op dat kansen $P_{20}(H > h | q_T, y_i(q_T), \varpi = 0, r, u)$ en $P_{20}(H > h | q_T, y_i(q_T), \varpi = 1, r, u)$ onafhankelijk zijn van de afvoer bij Lobith². Verder zijn deze kansen gelijk aan 0 of 1: gegeven de piekafvoer bij Trambrug, wel of geen inzet van het VZM en windcondities boven het gebied is de lokale waterstand bekend.

Opgemerkt wordt dat inzet van het VZM alleen plaats vindt als de Maeslantkering gesloten is. Daarom kunnen we er van uitgaan dat, indien het VZM ingezet wordt, windcondities zo zijn dat deze tot extreme stormopzet leiden. Indien het VZM niet ingezet wordt, dan zijn in principe alle windsnelheden en richtingen mogelijk. De conditionele kansverdeling van de windsnelheid wordt in de volgende paragraaf uitgewerkt.

1.4 Kansverdeling van de windsnelheid

De kansverdeling van de windsnelheid is afhankelijk van drie factoren: de windrichting (r), de inzet van het VZM (ϖ) en de afvoer bij Lobith (q_L). Het VZM wordt alleen ingezet als aan de volgende twee condities wordt voldaan:

- De afvoer bij Lobith is extreem hoog. We definiëren hiervoor een drempelwaarde q_L^* .
- De Maeslantkering is gesloten. We nemen aan dat dit het geval is als de wind uit het westen waait en de windsnelheid hoger is dan u^* . Dit is in een vereenvoudiging van de werkelijkheid, maar desondanks een redelijke aanname.

In formule:

$$\varpi = 1 \Leftrightarrow q_L > q_L^* \cap r = \text{west} \cap u > u^* \quad (1.11)$$

We gaan nu de volgende conditionele kansverdeling afleiden:

$$F(u | q_L, \varpi, r) \quad (1.12)$$

Stochasten ϖ en r hebben allebei twee mogelijke uitkomsten in het model:

r : west of oost

ϖ : wel of geen inzet

We gaan de conditionele kansverdeling van windsnelheid u afleiden voor de vier combinaties van r en ϖ .

² Fysisch gezien is de waterstand in het gebied onafhankelijk van de afvoer bij Lobith. Statistisch gezien is dat niet. Deze statistische relatie nemen we niet.

[1] $r = \text{west}, \varpi = 1$

Uit vergelijking (1.12) volgt dat $u > u^*$, aangezien $\varpi = 1$. De voorwaardelijke kansverdeling is daarom als volgt:

$$F(u | q_L, \varpi = 1, r = \text{west}) = \begin{cases} 0 & ; u \leq u^* \\ \frac{F(u | r = \text{west})}{1 - F(u^* | r = \text{west})} & ; u > u^* \end{cases} \quad (1.13)$$

[2] $r = \text{west}, \varpi = 0$

Uit vergelijking (1.12) kunnen we afleiden dat in deze situatie alle combinaties van u en q_L mogelijk zijn, behalve de volgende:

$$q_L > q_L^* \cap u > u^* \quad (1.14)$$

We splitsen de af te leiden voorwaardelijke kansverdeling in twee opties voor q_L .

$$F(u | q_L \leq q_L^*, \varpi = 0, r = \text{west}) = F(u | r = \text{west}) \quad (1.15)$$

$$F(u | q_L > q_L^*, \varpi = 0, r = \text{west}) = \begin{cases} \frac{F(u | r = \text{west})}{F(u^* | r = \text{west})} & ; u \leq u^* \\ 0 & ; u > u^* \end{cases} \quad (1.16)$$

[3] $r = \text{oost}, \varpi = 1$

Uit vergelijking (1.12) volgt dat deze combinatie niet mogelijk is. We hoeven daarom ook geen kansverdeling af te leiden.

[4] $r = \text{oost}, \varpi = 0$

De kering is open en de windrichting is oost. De windsnelheid kan daarom alle mogelijke waarden aannemen:

$$F(u | q_L, \varpi = 0, r = \text{oost}) = F(u | r = \text{oost}) \quad (1.17)$$

Datum
1 oktober 2018

Pagina
9 van 9

2 Overige informatie

Beaufortschaal	Windsnelheid [m/s]
0	0 – 0,2
1	0,3 – 1,5
2	1,6 – 3,3
3	3,4 – 5,4
4	5,5 – 7,9
5	8,0 – 10,7
6	10,8 – 13,8
7	13,9 – 17,1
8	17,2 – 20,7
9	20,8 – 24,4
10	24,5 – 28,4
11	28,5 – 32,6
12	> 32,7

D Memo kosten berekening

Memo

Datum 5 april 2019 **Aantal pagina's** 3
Contactpersoon Karolina Wojciechowska **Doorkiesnummer** +31(0)88 335 8263 **E-mail** Karolina.Wojciechowska@deltares.nl

Onderwerp
Bepalen kosten in Robamci Brabatsse Delta

Dit document beschrijft het bepalen van de kosten van maatregelen (dijkophoging en baggeren) en overstromingsrisico's in de Brabantse Delta case van het Robamci project.

Totale verdisconteerde kosten van dijkophoging per dijkvak

$$Kost = \sum_{t_i} \frac{K \cdot L \cdot (1+f)^{t_i-1}}{(1+d)^{t_i-1}}$$

Waar:

- K – kost van dijkophoging afhankelijk van de ophoging incl. BTW, zie tabel, in deze studie zijn de kosten voor 2018 gebruikt [euro/m]
L – lengte van het dijkvak [m]
f – stijging van de kosten per jaar (= 2% per jaar, afgestemd met het waterschap)
d – discontovoet (= 4% per jaar, afgestemd met Jarl Kind Deltares)
t_i – moment van dijkversterking [jaar]

Verhoging regionale keringen [m]	Kosten dijkophoging excl. BTW, 2018 [euro/m]	Kosten dijkophoging incl. BTW, 2018 [euro/m]
0.0 - 0.1	1251	1514
0.1 - 0.2	1314	1590
0.2 - 0.3	1395	1688
0.3 - 0.4	1476	1786
0.4 - 0.5	1701	2058
0.5 - 0.6	1917	2320
0.6 - 0.7	1998	2418
0.7 - 0.8	2079	2516
0.8 - 0.9	2187	2646
0.9 – 1.0	2295	2777
> 1.0	2736	3311

* BTW = 21%

** Bron kosten dijkophoging excl. BTW: Waterschap Brabantse Delta.

Datum
5 april 2019

Pagina
2 van 3

Totale verdisconteerde kosten van baggeren per traject

$$Kost = \sum_{t_i} \frac{K \cdot V \cdot (1+f)^{t_i-1}}{(1+d)^{t_i-1}} \text{ en } V = L \cdot B \cdot \Delta b$$

Waar:

- K – kost van het baggeren van m³ incl. BTW (= 28 euro per m³, dit is gemiddelde van de kosten van het baggeren zoals aangegeven door het waterschap)
- V – weggebaggerd volume [m³]
- L – lengte van het traject [m]
- B – gemiddelde breedte van het traject [m]
- Δb – maximaal weggebaggerd diepte [m]
- f – stijging van de kosten per jaar (= 2% per jaar)
- d – discontovoet (= 4% per jaar)
- t_i – moment van baggeren [jaar]

Totale verdisconteerde overstromingsrisico per dijkvak

$$Risico = \sum_{t=1}^{100} \frac{P_f(t) \cdot S(t)}{(1+d)^{t-1}}$$

$$S(t) = D \cdot (1+f)^{t-1}$$

$$P_f(t) = 1 - \exp(-\lambda \cdot P(t))$$

Waar:

- P_f(t) – faalkans van het dijkvak in jaar t [1/jaar]
- S(t) – overstromingsschade als gevolg van falen van het dijkvak in jaar t [euro]
- D – overstromingsschade in jaar 0, afhankelijk van de IPO-klasse van het dijkvak, zie tabel, in deze studie zijn de gemiddelde schades voor 2018 gebruikt [euro]
- P(t) – kans op falen van het dijkvak gegeven afvoer bij Trambrug groter dan 55 m³/s [-]
- Λ – gemiddeld aantal keer in een jaar dat afvoer bij Trambrug groter is dan 55 m³/s [1/jaar] (= 1,3532)
- f – stijging van de kosten per jaar (= 2% per jaar)
- d – discontovoet (= 4% per jaar)
- t – jaar

Datum
5 april 2019

Pagina
3 van 3

IPO-klasse	Schade klasse 2009 [mln euro]	Gemiddelde schade 2009 [mln euro]	Gemiddelde schade 2018 [mln euro]
1	< 8	4	4.8
2	8 – 25	16.5	19.7
3	25 - 80	52.5	62.7
4	80 – 250	165	197.2
5	> 250	250	298.8

* 2% indexering per jaar is toegepast om de schade 2009 naar de schade 2018 te vertalen.

** Bron schade klasse 2009: HKV rapport, Normering en globale toetsing regionale keringen Brabantse Delta (2009).

E Memo analyse MDV-modelresultaten knoop N26



Memo

Aan
mevrouw D.E. Stuparu

Datum

16 mei 2019

Aantal pagina's

9

Contactpersoon

Bernhard Becker

Doorkiesnummer

+31(0)88 335 8507

E-mail

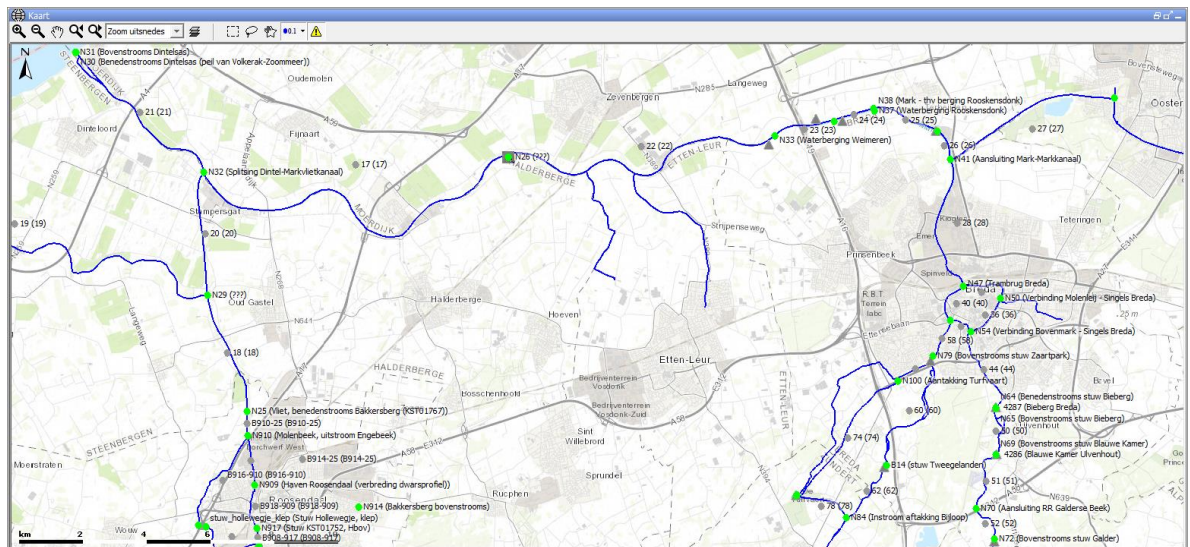
Bernhard.Becker@deltares.nl

Onderwerp

Analyse van MDV-modelresultaten node N26

1 Aanleiding

In de berekeningen voor waterschap Brabantse Delta in het kader van het ROBAMCI-project is gebruik gemaakt van een bestaand RTC-Tools-model. Figuur 1 toont een uitsnede van het modelgebied.

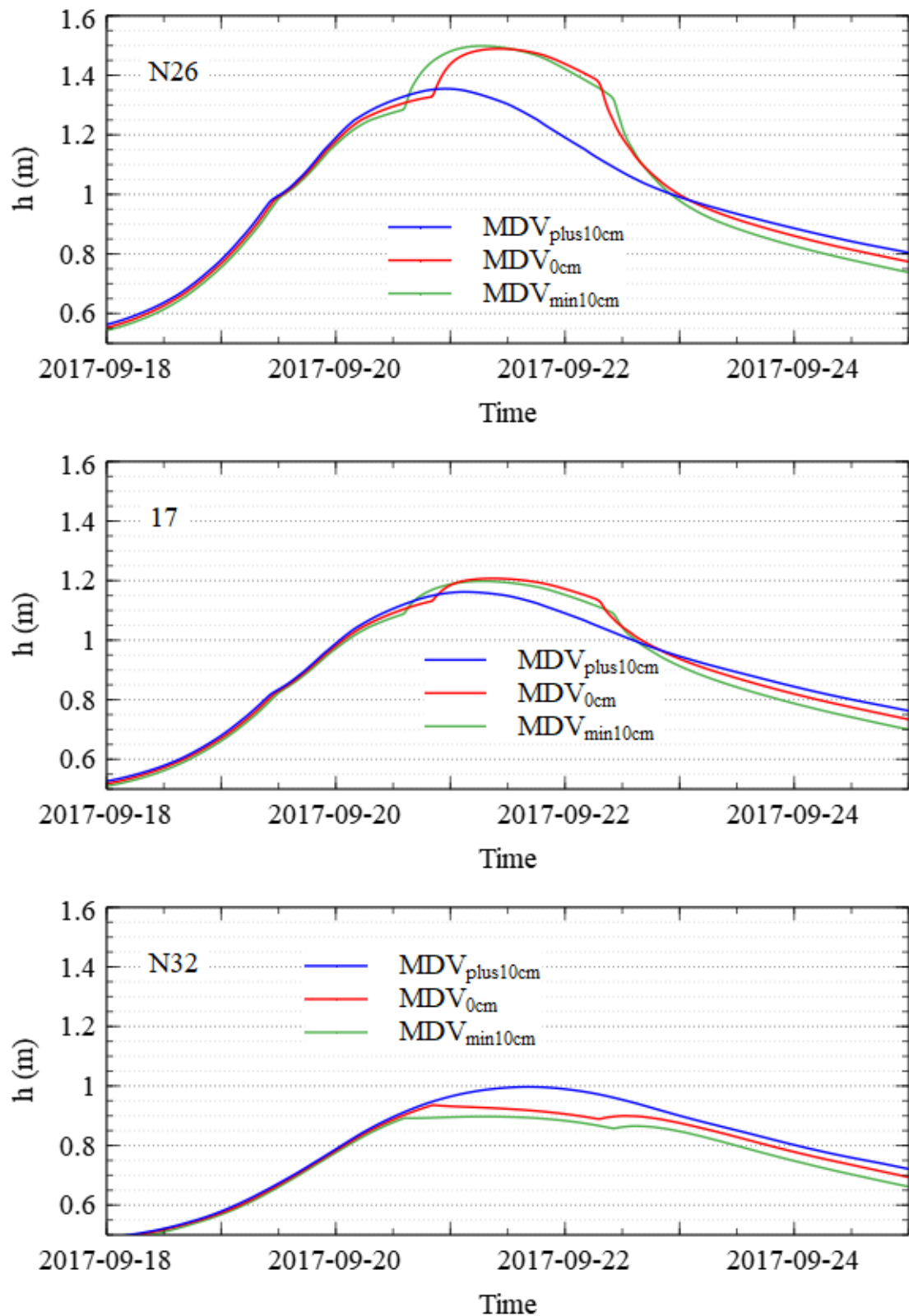


Figuur 1: Uitsnede van het modelgebied op de kaart (beeldschermfoto van het Delft-FEWS-systeem)

In het beneden staand diagram van Figuur 2 zijn de waterstanden voor knoop N26 getoond voor drie scenario's:

- MDV 0 cm: de referentie
- MDV plus 10 cm: de bodemligging is met 10 cm verhoogd (slibben)
- MDV min 10 cm: de bodemligging is met 10 cm verlaagd (baggeren).

De maximale waterhoogte voor het scenario MDV min 10 cm ligt hoger dan de referentie, en de waterhoogte voor het scenario MDV plus 10 cm ligt lager dan de referentie. Intuïtief zou men verwachten dat de maximale waterhoogte met de bodemligging stijgt en niet daalt, zoals het voor knoop N32 in het onderste diagram van Figuur 2 het geval is.



Figuur 2: Waterstanden over tijd voor drie scenario's voor knopen N26 en N32 en tak 17.

Verder valt een knik op in de tijdreeks van de waterhoogte voor knoop N26 voor de scenario's MDV 0 cm en MDV min 10 cm.

In dit document wordt een verklaring voor het modelgedrag gegeven.

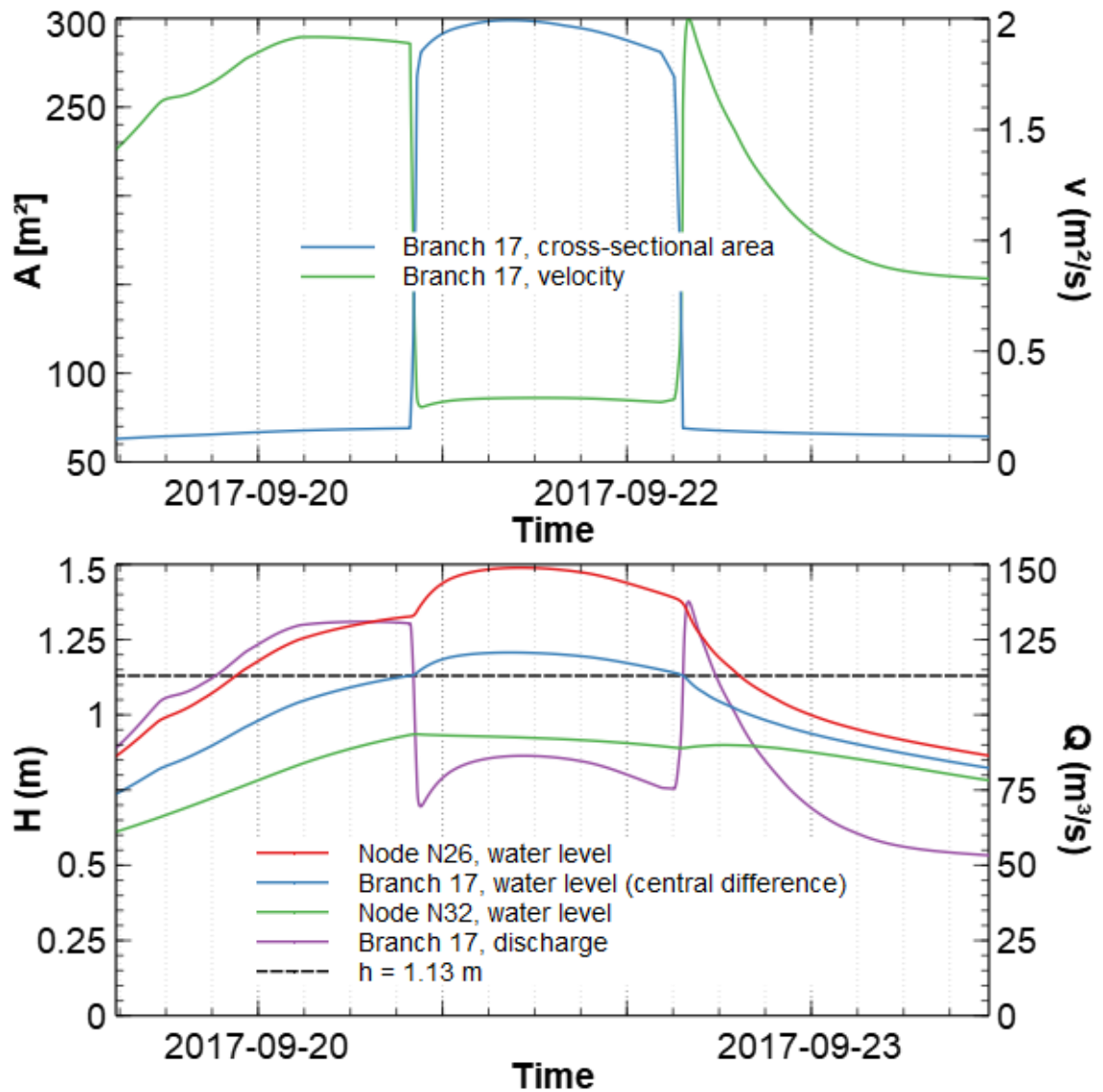
2 Reference scenario: MDV 0 cm

Figuur 3 toont doorstroomd oppervlak, debiet en waterhoogte voor branch 17 over de tijd (boven), de waterhoogte voor de twee aan tak 17 aansluitende knopen N26 en N32, de uit deze als central difference berekende waterhoogte voor tak 17 en het voor tak 17 berekend debiet.

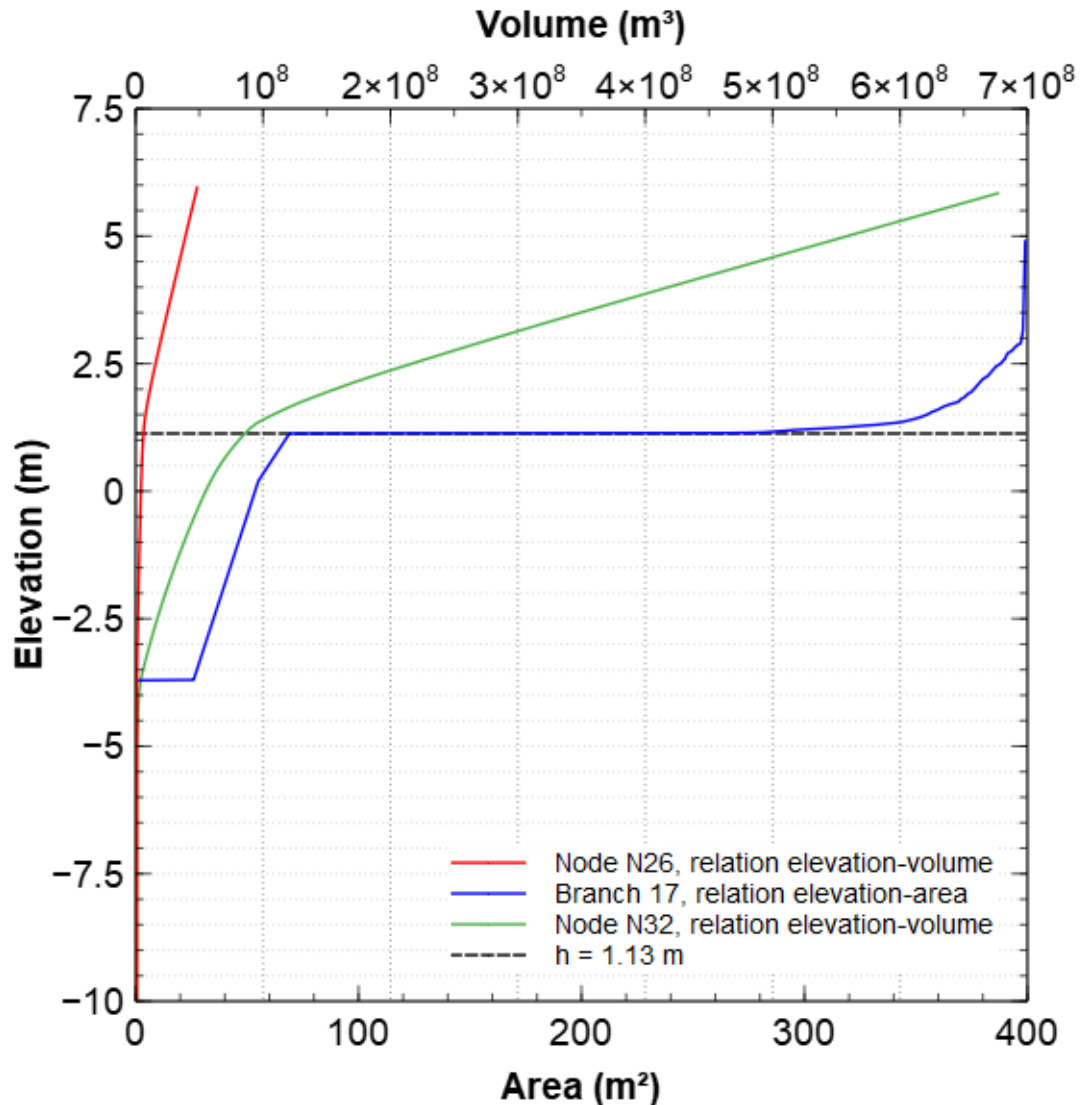
De knik in de waterhoogtelijn van N26 is ook in de waterhoogtekromme van tak 17 te zien. Hij gaat samen met een sprong naar boven van het doorstroomd oppervlak. De verhoging van het doorstroomd oppervlak resulteert in een sprong van de snelheid naar beneden. Dit betekent weer een reductie van momentum en uit zich ook in een reductie van het debiet dat door tak 17 stroomt. Minder water stroomt dus af van N26, wat een stijging in de waterhoogte verklaart.

De sprong in de kromme van het doorstroomd oppervlak heeft zijn oorzaak in de voor tak 17 opgegeven tabel met de relatie tussen waterhoogte en doorstroomd oppervlak. Deze is in Figuur 4 getoond. Deze relatie toont grote uiterwaarden: bereikt de waterhoogte 1,13 m, dan verhoogt het doorstroomd oppervlak buiten verhouding sterk.

Deze uiterwaarden komen echter niet terug in de waterhoogte-volume-relatie van de aan tak 17 aansluitende knopen, die eveneens in Figuur 4 zijn getoond. Met bereiken van 1,13 m neemt het volume niet in gelijke mate toe als in de waterhoogte-oppervlak-relatie van beide knopen. Nu representeren de knopen niet alleen branch 17, maar ook andere takken. Gezien de lengte van tak 17 van 13 km zouden de grote uiterwaarden toch in de tabellen van de knopen zichtbaar moeten zijn.



Figuur 3: Doorstroomd oppervlak en debiet voor tak 17 over tijd (boven) en waterhoogtes en debiet over tijd voor N26, 17 en N32 voor scenario MDV 0 cm (referentie).

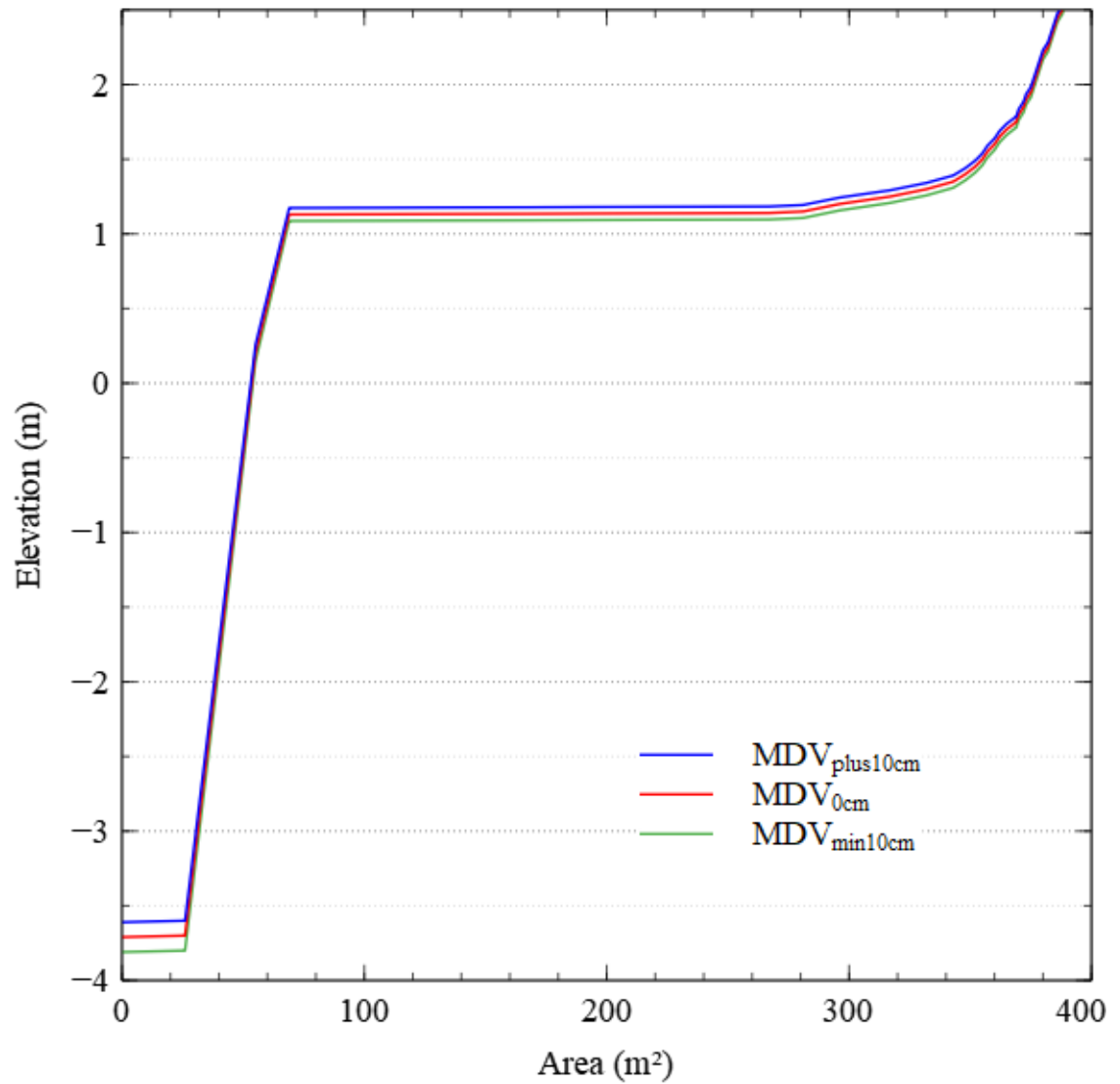


Figuur 4: Relatie tussen waterhoogte en doorstroomd oppervlak voor tak 17 en relatie tussen waterhoogte en volume voor de knopen N26 en N32 (scenario MDV 0 cm).

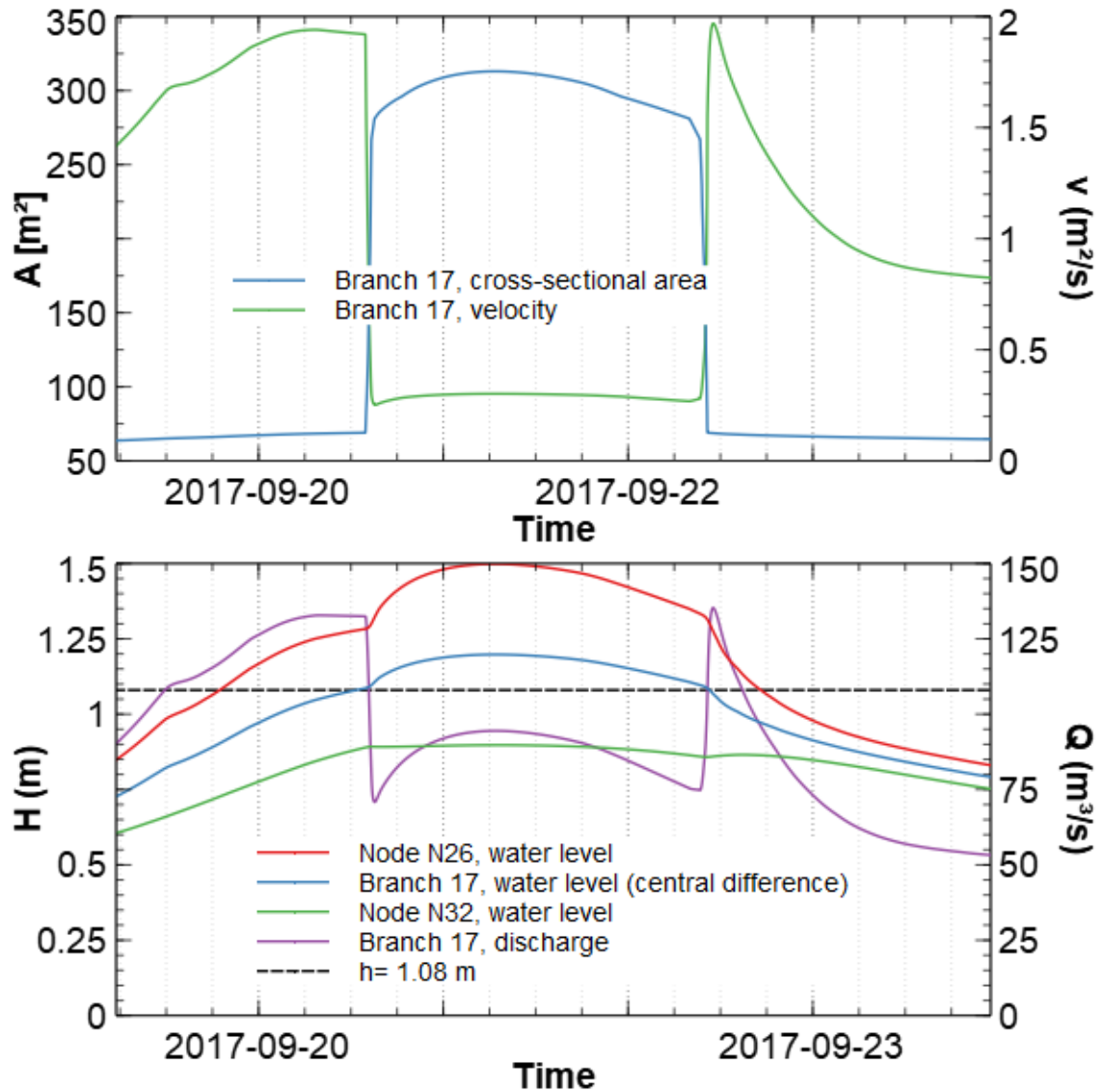
3 Scenario's MDV min 10 cm en plus 10 cm

De scenario's MDV min 10 cm en MDV plus 10 cm onderscheiden zich van de referentie door het dwarsprofiel, dat als relatie van waterhoogte en doorstroomd oppervlak is opgegeven voor tak 17 (Figuur 5). Zowel de bodemligging als de ligging van de uiterwaarden verschillen, respectievelijk met 10 en 5 cm. De tabellen met de relatie tussen waterhoogte en volume zijn echter in alle scenario's dezelfde.

Zoals in Figuur 2 al te zien verschijnt de knik in de waterhoogtekromme voor scenario MDV min 10 cm vroeger in de tijd dan in de referentie. Dat is omdat het water de uiterwaarden in verband met hun lagere ligging eerder bereikt, namelijk bij 1,08 m (Figuur 6). De fase met laag momentum duurt daarom langer, en dit resulteert uiteindelijk in een hogere maximale waterstand voor dit scenario.

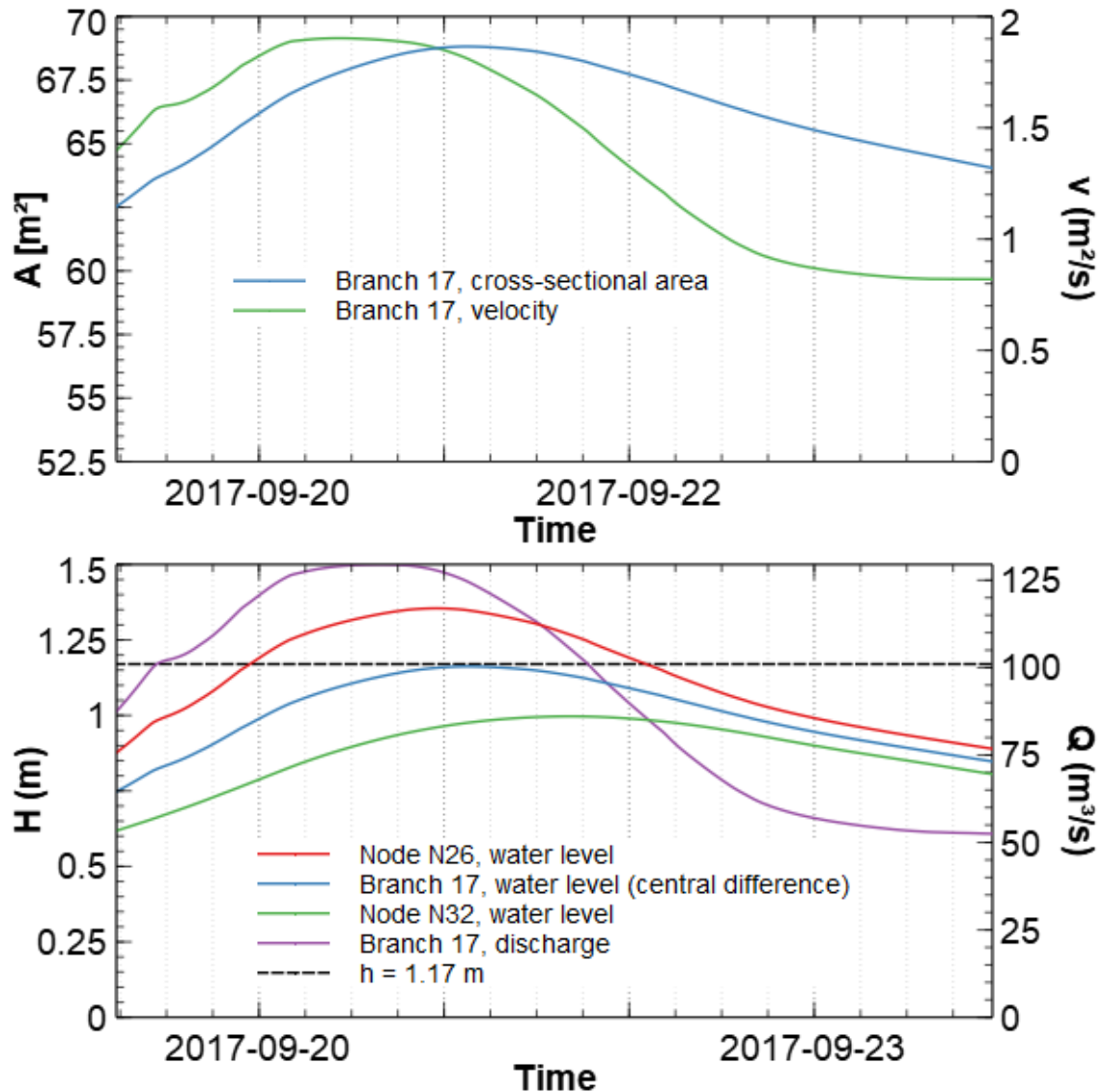


Figuur 5: Relatie waterhoogte en doorstroomd oppervlak voor de drie scenario's.



Figuur 6: Doorstroomd oppervlak en debiet voor tak 17 over tijd (boven) en waterhoogtes en debiet over tijd voor N26, 17 en N32 voor scenario MDV min 10 cm.

In het scenario MDV plus 10 cm is de bodemligging van de uiterwaarden met 1,17 m zodanig hoog dat de uiterwaarden helemaal niet worden bereikt (Figuur 7). Er ontstaat daarom ook geen sprong in het doorstroomd oppervlak en ook geen sprongachtige reductie in snelheid en momentum.



Figuur 7: Doorstroomd oppervlak en debiet voor tak 17 over tijd (boven) en waterhoogtes en debiet over tijd voor N26, 17 en N32 voor scenario MDV plus 10 cm.

4 Conclusies

De knikken in de waterhoogtekrommes van N26 voor de twee scenario's MDV 0 cm en MDV min 10 cm hebben hun oorzaak in de tabellen die voor tak 17 zijn opgegeven voor de relatie tussen waterhoogte en doorstroomd oppervlak. Deze tabellen representeren duidelijke uiterwaarden. Met bereiken van de uiterwaarden stijgt het doorstroomd oppervlak en dalen snelheid en momentum. Minder water stroomt door tak 17, en dit resulteert in meer volume in knoop N26 en daarmee in een hogere waterstand.

In de corresponderende relaties tussen waterhoogte en volume van de aan de tak aansluitende knopen komen de uiterwaarden niet terug. Dit lijkt niet consistent, de waterhoogte wordt dus mogelijk te hoog berekend.

Dat een grotere waterhoogte voor een lagere bodemligging wordt berekend en andersom heeft met de tabellen voor de waterhoogte-oppervlakte-relatie te maken, die voor de verschillende scenario's zijn opgegeven. Niet alleen de bodemligging van de waterloop, maar ook de positie van de uiterwaarden verandert. In het scenario MDV min 10 cm bereikt de waterstand de uiterwaarden daarom eerder dan in de referentie, en in het scenario MDV plus 10 cm bereikt de waterhoogte de uiterwaarden niet.

De onverwachte of ongewenste resultaten voor knoop N26 zijn hydraulisch verklaarbaar. Het volgende hoofdstuk bevat suggesties om het model te verbeteren en de modelresultaten beter te laten aansluiten bij de verwachtingen.

5 Suggesties

5.1 Consistentie tussen knopen en takken voor volume en doorstroomd oppervlak

Het numerieke schema van RTC-Tools baseert op een zogeheten staggered grid, een verschoven rooster. Op de knopen wordt de continuïteitsvergelijking opgelost, en op de takken de vergelijking voor momentum. Dat betekent, dat voor knopen een bergingsvolume wordt berekend en voor takken een snelheid. Bergingsvolume wordt vertaald naar waterhoogtes door middel van een relatie tussen waterhoogte en volume. Deze relatie moet daarom voor knopen worden opgegeven. Voor de momentum-vergelijking die op de takken wordt berekend is het doorstroomde oppervlak relevant, die met behulp van de waterhoogte uit een relatie tussen waterhoogte en doorstroomd oppervlak wordt berekend. De waterhoogte in een tak is of de gemiddelde waterhoogte van zijn begin- en eindknoop (central difference, gekozen voor het in onderhavige studie gebruikte model), of de waterhoogte op de bovenstroomse knoop (upwind).

De geometrie van een tak wordt dus gerepresenteerd door de voor de tak opgegeven relatie tussen waterhoogte en doorstroomd oppervlak én de voor zijn begin- en eindknoop opgegeven relatie tussen waterhoogte en volume. De voor een knoop opgegeven relatie tussen waterhoogte en volume representeert alle aan deze knoop aangesloten takken.

De aanbeveling is om de tabellen voor de relaties tussen

- waterhoogte en volume en
- waterhoogte en doorstroomd oppervlak

op consistentie te controleren en indien nodig aan te passen.

5.2 Implementatie van de maatregelen

De scenario's MDV min 10 cm en MDV plus 10 cm representeren een "baggeren" en "slibben". Mogelijk geven de gebruikte tabellen de processen niet voldoende weer, want beide processen richten zich in het algemeen op de waterloop en niet noodzakelijkerwijs ook op de uiterwaarden. De invoerdata (de tabellen) is voor de scenario's geautomatiseerd aangemaakt, het bijhorend programma zou eventueel moeten worden aangepast.

Naast de relatie tussen waterhoogte en doorstroomd oppervlak voor de takken moet ook de relatie tussen waterhoogte en bergingsvolume voor de knopen moeten worden aangepast, om consistentie te waarborgen.

F Memo IKM-studie

Project : ROBAMCI
Kenmerk : Fase 4; Case Toekomstbestendige Mark-Dintel-Vliet boezem (WBD)
Datum : mei 2019
Onderwerp : IKM toepassing Mark-Dintel-Vliet boezem

Algemeen

Het ROBAMCI-programma ('Risk and Opportunity Based Asset Management for Critical Infrastructures') richt zich op het ontwikkelen van de tools en technieken, en heeft als doelstelling om methoden, tools en best practices te genereren die de implementatie van kwantitatief onderbouwd assetmanagement mogelijk maken.

BZIM heeft samen met Deltares een Informatie Kwaliteits Model (IKM) ontwikkeld binnen het onderzoeksprogramma. In het model wordt de betrouwbaarheid van data en informatie expliciet gemaakt. Door de informatie expliciet te maken kan de betrouwbaarheid worden meegenomen in de overweging van de beslissing die ten aanzien van de kering gemaakt wordt, bijvoorbeeld ten aanzien van versterken door zowel beheerders als directie en bestuur.

Inleiding

Het Waterschap Brabantse Delta heeft binnen het Mark-Dintel-Vliet-systeem een flinke achterstand wat betreft het baggeren van het systeem. Dit betekent dat er veel meer bagger in het systeem aanwezig is dan gewenst. Dit heeft zowel voor de scheepvaart als voor de waterveiligheid implicaties.

Met behulp van het IKM is voor de Mark-Dintel-Vliet-boezem geanalyseerd waar de baggeraanwas het grootste is. Dit vindt plaats met behulp van Multibeam-metingen, uitgevoerd door het waterschap over de afgelopen jaren. Om een strategie te bepalen waarmee de hoeveelheid bagger in het systeem zo effectief mogelijk kan worden gereduceerd, wordt bepaald waar de baggeraanwas het grootste is.

Toepassing Informatie Kwaliteits Model (IKM)

Het IKM bestaat uit verschillende stappen, die hieronder toegelicht worden en vervolgens toegepast zijn op de case Mark-Dintel-Vliet-systeem.

Stap 1: Bepaal relevante variabele

De relevante variabele voor het bepalen van de baggeraanwas per jaar is de bodemhoogte ten opzichte van NAP. Wanneer hier over meerdere jaren gegevens van beschikbaar zijn, kan dit vertaald worden naar een baggeraanwas per jaar.

Stap 2: Beschikbaarheid gegevens

In de case Mark-Dintel-Vliet heeft het Waterschap Brabantse Delta gegevens beschikbaar uit Multibeam-metingen uit de jaren 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2013 en 2014. Er is niet elk jaar in het hele Mark-Dintel-Vliet systeem gemeten, maar in deze jaren is het hele systeem overal minimaal 2 keer bemeten, waardoor overal een baggeraanwas bepaald kan worden. Uiteraard zal de onzekerheid op locaties met minder metingen groter zijn dan op locaties met meer metingen.

Volgens gegevens van het waterschap is in het systeem niet gebaggerd sinds 2007, waardoor dit geen invloed kan hebben op de metingen en hier in de analyse geen rekening mee gehouden hoeft te worden.

Stap 3: Visualiseer, kwantificeer en interpreteer data

Het visualiseren en kwantificeren van de data is opgesplitst in 3 stappen, namelijk:

Stap 3A: het visualiseren van de ruwe data en het filteren van uitschieters

Stap 3B: het visualiseren van de resterende dataset

Stap 3C: het interpreteren van de data.

Deze zijn hieronder nader toegelicht.

Stap 3A: Plot ruwe data en filter op uitschieters

De ruwe data is gevisualiseerd in GIS en gecontroleerd op uitschieters. Daaruit is gebleken dat er geen significante uitschieters aanwezig zijn. Hier en daar zijn wel uitschieters aanwezig, maar dit zijn slechts enkele punten op het totaal van miljoenen datapunten, waardoor dit geen invloed heeft op de resultaten. Daarom is er voor gekozen deze datapunten in de dataset te laten zitten en hier niet uit te filteren.

De beschikbare data is geplot en opgeknipt in 6 delen die zo veel mogelijk overeenkomen met betrekking tot hun eigenschappen en baggeraanwas. De deelgebieden zijn als volgt, zie ook Figuur 1:

1. Mark van Breda tot Leursche Haven
2. Mark van Leursche Haven tot Standaardbuiten (start Dintel)
3. Dintel van Standaardbuiten tot Mark-Vlietkanaal
4. Dintel van Mark-Vlietkanaal tot Dintelsas
5. Vliet van Mark Vlietkanaal tot Benedensas
6. Mark-Vlietkanaal



Figuur 1 – Deelgebieden

Stap 3B: Visualiseren van resterende dataset

In stap 3A zijn geen significante uitschieters gevonden. Daarmee komt deze stap te vervallen.

Stap 3C: Interpretieren van de data

De data is geïnterpreteerd door een aantal stappen te volgen. Eerst zijn de Multibeam-metingen (hoge dichtheid puntmetingen) omgezet naar rasters (pixels). Daarmee wordt een vlakdekkend beeld verkregen en is het mogelijk de metingen uit de verschillende jaren kwantitatief te vergelijken.

Om de jaarlijkse baggeraanwas te kunnen bepalen zijn de verschillende ingemeten jaren met overlap in locatie, van elkaar afgehaald. Wanneer meerdere jaren tussen de metingen zit is hier rekening gehouden door het verschil te delen door het aantal jaren. Daarmee is voor elke set van twee metingen een baggeraanwas per jaar bepaald. Dit betekent dat er op locaties met meerdere ingemeten jaren, meerdere waarden voor de jaarlijkse baggeraanwas beschikbaar zijn. Een volgende stap is daarom het samenvoegen van de verschillende waarden in één ruimtelijke kaart laag. Wanneer er op locaties meerdere waarden voor baggeraanwas bepaald zijn (in de vorige stap), is op de betreffende locatie de mate van baggeraanwas gemiddeld. Deze bepaling van de baggeraanwas per pixel is omschreven in de onderstaande vergelijking (geldt voor elke pixel):

$$\text{Pixel baggeraanwas jaar}^{-1} = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^{N-1} \left(\frac{1}{N-j} \sum_{K=j+1}^N \left(\frac{h_k - h_j}{T_k - T_j} \right) \right) \quad (\text{Verg. 1})$$

Met:

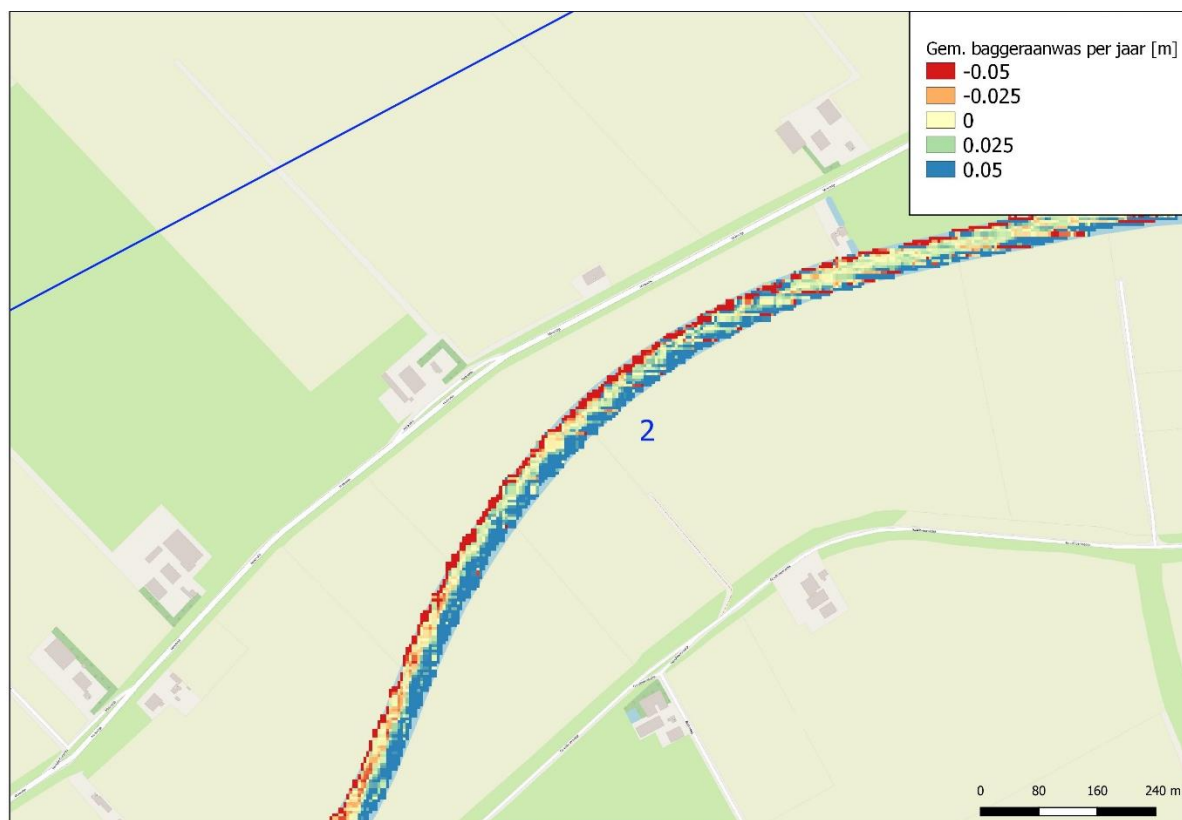
N = aantal multibeam metingen op pixel locatie = aantal kaartlagen per pixel locatie

h = bodemhoogte [m NAP] op pixel locatie

j, k = multibeam meting/kaartlaag nummer op chronologische volgorde

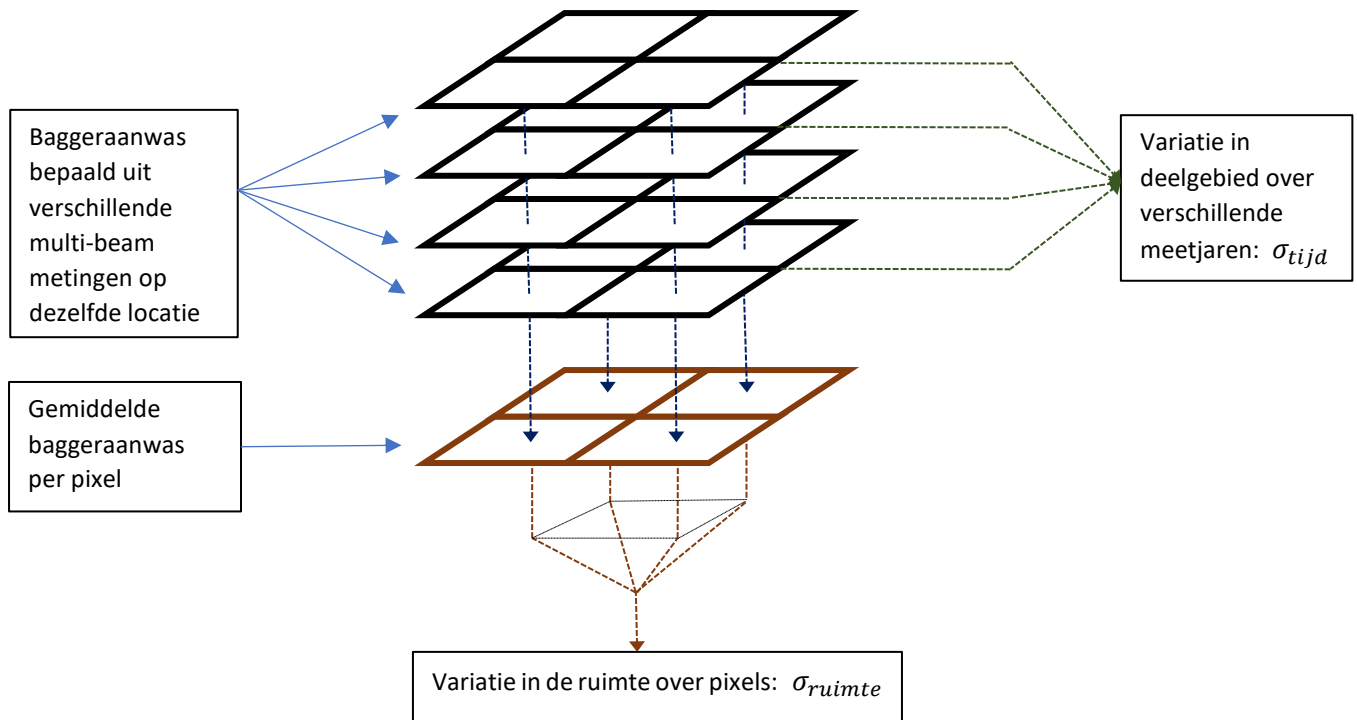
T = jaartal van multibeam meting

Op deze wijze is voor alle deelgebieden, vlakdekkend, een mate van baggeraanwas bepaald (Bijlage I). Het is goed te zien dat op sommige plekken zoals bochten zowel erosie als sedimentatie op treedt, zie figuur 2 ter plaatse van deelgebied 2. In figuur 2 is duidelijk te zien dat de mate van baggeraanwas een relatief grote mate van ruimtelijke spreiding kan hebben.



Figuur 2: ruimtelijk variatie in baggeraanwas als gevolg van erosie en sedimentatie in bochten

De mate van variatie in de baggeraanwas kan op verschillende manieren worden geïnterpreteerd, namelijk als ruimtelijke variatie en variatie in de tijd. Ruimtelijke variatie betreft variatie in baggeraanwas over verschillende plekken in het systeem, zoals erosie en sedimentatie (zoals weergegeven in figuur 2) maar ook als gevolg van andere invloeden zoals scheepvaart. Het betreft hier dus de variatie tussen de baggeraanwas per pixel (zoals bepaald in vergelijking 1). Daarnaast is er een variatie van baggeraanwas in de tijd. Dit is de variatie tussen baggeraanwas afgeleid uit verschillende jaren van metingen op dezelfde locatie. Deze twee variaties zijn schematisch weergegeven in figuur 3.



Figuur 3: schematische weergave van variatie in baggeraanwas bepaald over tijd en ruimte per deelgebied

Hierbij geldt:

$$\sigma_{ruimte} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \mu_b)^2}{n}}$$

Met:

n = aantal pixels in deelgebied

P_i = baggeraanwas op pixel

μ_b = gemiddelde baggeraanwas in deelgebied

En

$$\sigma_{tijd} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (L_i - \mu_b)^2}{m}}$$

m = Aantal kaartlagen (over tijd) met mate van baggeraanwas in deelgebied

L_i = Gemiddelde baggeraanwas per kaart laag (over tijd) in deelgebied

De ruimtelijke standaarddeviatie σ_{ruimte} zegt in mindere mate iets over de onzekerheid in de bepaalde gemiddelde baggeraanwas in een gebied. De ruimtelijke variatie is namelijk inherent aan het natuurlijke systeem. Het zegt echter wel iets over hoe sterk de mate van baggeraanwas varieert in het deelgebied. Ter bepaling van de mate van onzekerheid in de gemiddelde jaarlijkse baggeraanwas per deelgebied, wordt de variatie in baggeraanwas over de tijd σ_{tijd} relevanter geacht ten opzichte van waterveiligheid.

In tabel 1 zijn per deelgebied waarden gegeven voor de gemiddelde baggeraanwas (in ruimte en tijd) met de bijbehorende ruimtelijke variatie en variatie over de tijd.

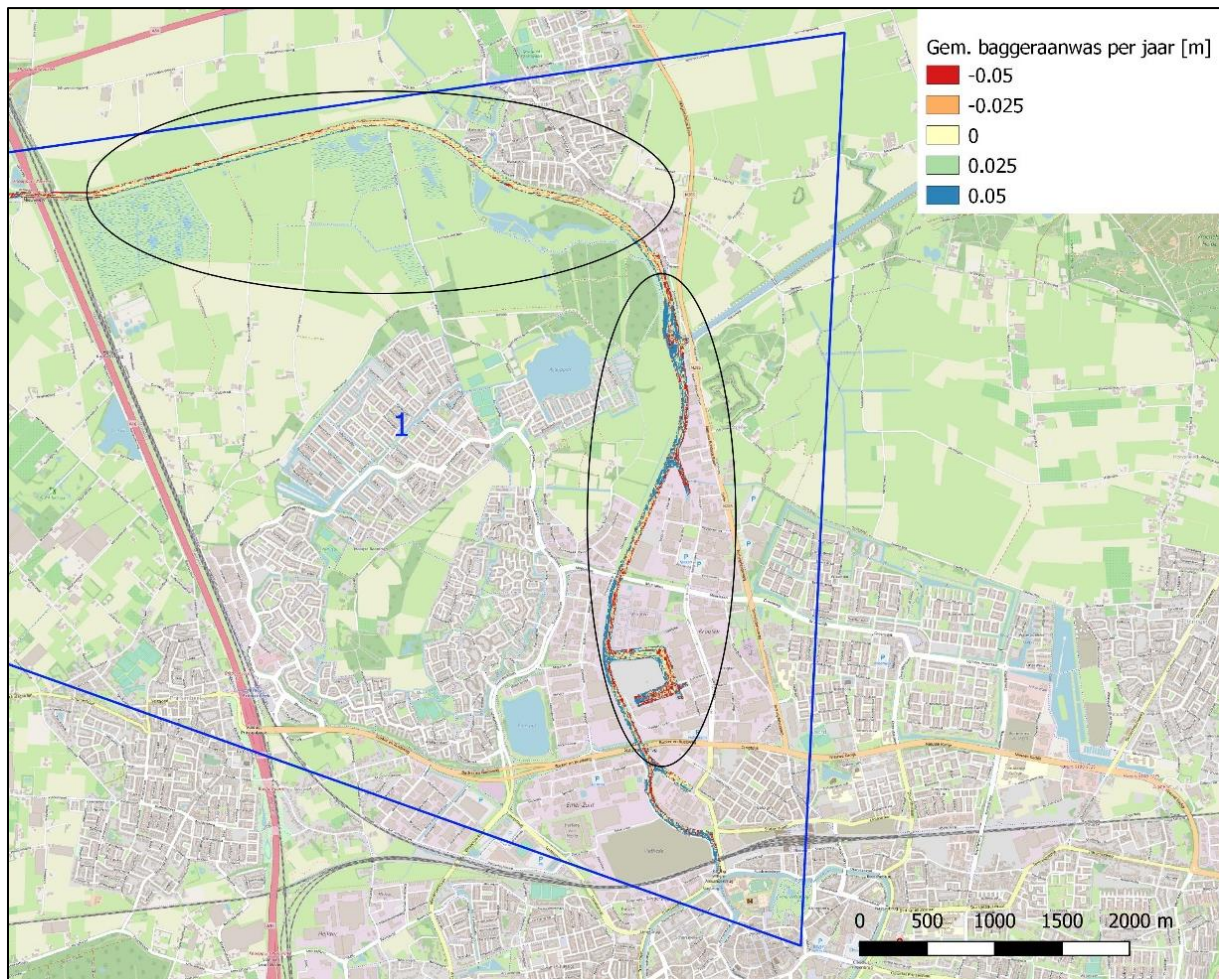
Tabel 1 – Gemiddelde baggeraanwas per jaar in deelgebieden met variaties

Deelgebied	Gemiddelde [cm/jaar]	Ruimtelijke standaarddeviatie [cm/jaar] σ_{ruimte}	Standaarddeviatie verschillende meetreeksen [cm/jaar] σ_{tijd}	Jaren metingen
1	1,91	10,53	2,8	2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2013
2	0,18	10,80	0,93	2008, 2013, 2014
3	2,60	9,31	2,24	2008, 2009, 2010, 2011, 2013
4	1,57	6,45	2,13	2009, 2013, 2014
5	1,07	6,24	0,65	2010, 2011, 2014
6	1,63	3,81	-	2010, 2014

In de volgende paragrafen zal er gereflecteerd worden op de resultaten. Hierbij wordt eerst gereflecteerd op verschillende gemiddelden en vervolgens de variaties in ruimte en tijd.

Gemiddelden per deelgebied

In de tweede kolom van tabel 1, zijn gemiddelden gegeven voor de mate van baggeraanwas in de verschillende deelgebieden. De algemene verwachting is dat in bovenstroomse deelgebieden (deelgebied 1 en 2) een lagere mate van baggeraanwas zou plaats vinden dan in benedenstroomse gebieden. Dit is fysisch verklaarbaar door relatief hogere stroomsnelheden in bovenstroomse gebieden. Voor deelgebied 2 wordt er ook aan deze verwachting voldaan, met de laagste mate van baggeraanwas vergeleken met de overige deelgebieden. De gemiddelde baggeraanwas van deelgebied 1 voldoet hierbij niet aan de verwachtingen, echter is hier een mogelijke verklaring voor te vinden wanneer gekeken wordt naar verschillen in de mate van baggeraanwas tussen het beneden- en bovenstroomse deel van de aansluiting tussen de Mark en het Markkanaal, zie figuur 4.



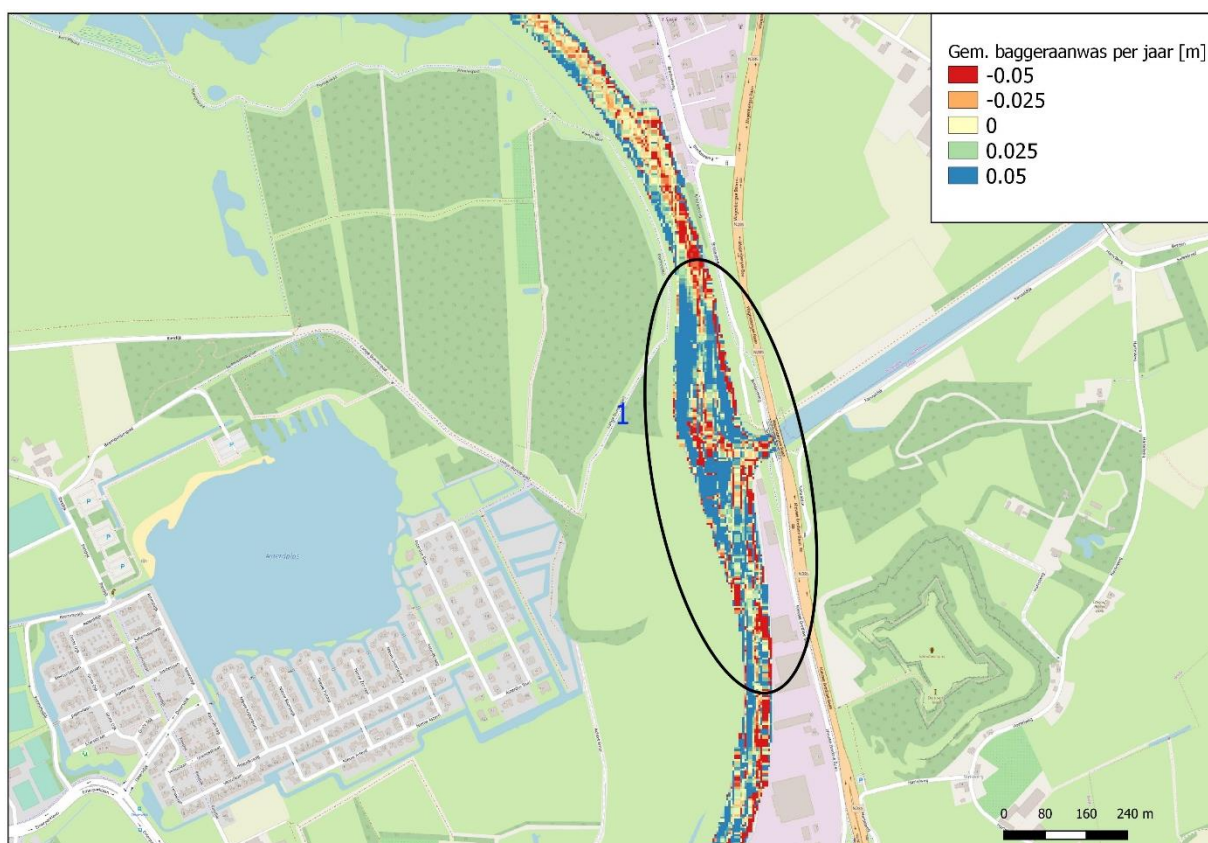
Figuur 4: gemiddelde baggeraanwas in de Mark, boven- en onderstrooms van de verbinding met het Markkanaal

In Figuur 4 is duidelijk te zien dat benedenstrooms (noordelijk) van de aansluiting met het Markkanaal de mate van baggeraanwas relatief laag is vergeleken met het bovenstroomse (zuidelijke) deel. Hierbij voldoet het deel benedenstrooms van de aansluiting met het Markkanaal aan de verwachting van een lagere baggeraanwas ter plaatse van deelgebied 1. Het hoge gemiddelde in dit deelgebied wordt echter veroorzaakt door de watergang richting de haven/centrum van Breda. Het water uit het centrum komt hier terecht in een relatief grote vaargeul waardoor stroomsnelheden mogelijk afnemen, en daardoor de mate van baggeraanwas toe neemt. Na de aansluiting met het Markkanaal loopt het debiet, en als gevolg, de stroomsnelheid weer op waardoor er een duidelijk verschil ontstaat in baggeraanwas. Mogelijkerwijs heeft ook de scheepvaart zelf een invloed op de erosie en sedimentatie van de waterbodem.

De hogere mate van gemiddelde baggeraanwas in de benedenstroomse deelgebieden 3, 4, en 6 voldoen aan gestelde verwachtingen, echter geeft deelgebied 5 een lagere mate van baggeraanwas. Mogelijke oorzaak zou de relatief hoge stroomsnelheden in de Steenbergse vliet tijdens het doorspoelen in de zomer kunnen zijn, bij (tijdelijke) sluiting van Dintelsas, en er water wordt ingelaten vanuit Oosterhout. Tijdens een dergelijke situatie loopt de gemiddelde stroomsnelheid in het benedenstroomse deel van de Dintel terug naar 0 terwijl in de Steenbergse vliet stroomsnelheid tot 30 cm/s kan oplopen. Hierdoor zou de mate van baggeraanwas in de Steenbergse vliet mogelijk lager uit kunnen vallen dan in het benedenstroomse deel van de Dintel.

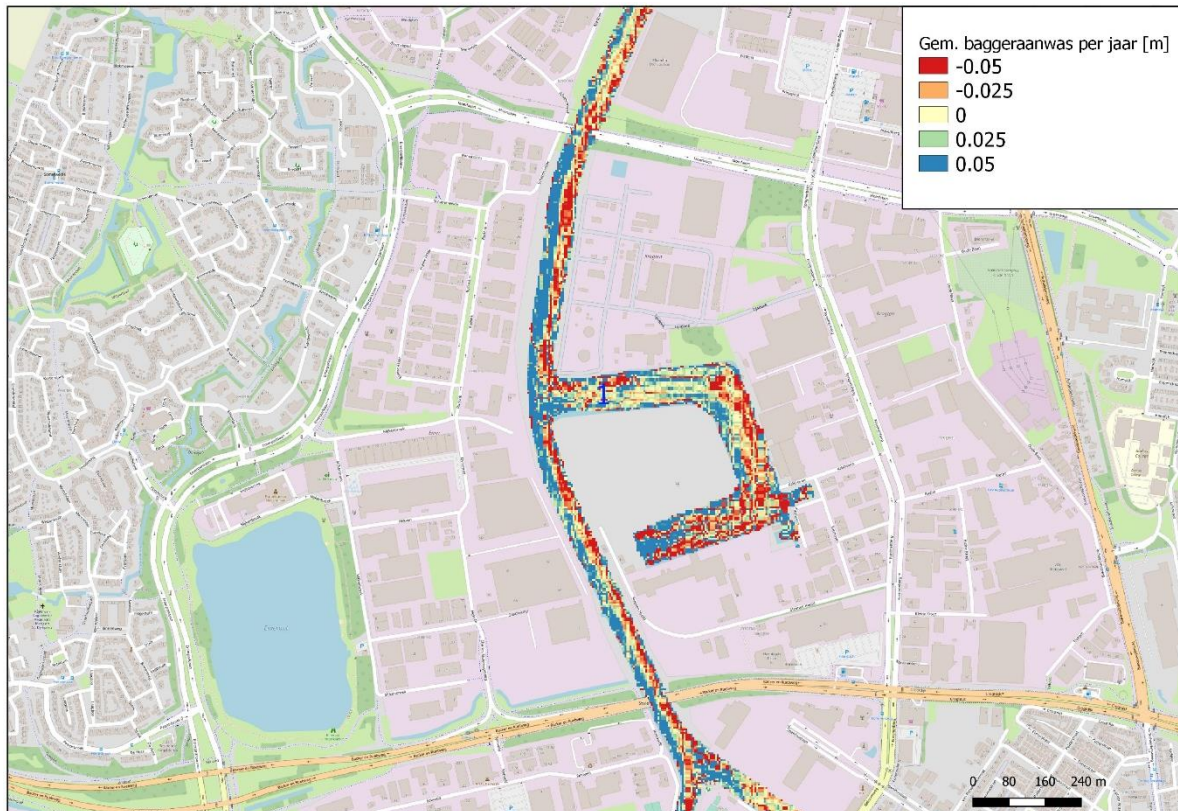
Ruimtelijke variaties

In de derde kolom van tabel 1 is de ruimtelijke standaarddeviatie gegeven, welke een maat geeft voor de ruimtelijke variatie in baggeraanwas. Met name in bovenstroomse deelgebieden worden erg grote ruimtelijke variaties gevonden in de mate van baggeraanwas. Naast erosieprocessen door hogere stroomsnelheden in de bovenstroomse deelgebieden, speelt schepvaart hier waarschijnlijk een rol in. Met name in deze deelgebieden zijn er duidelijke vaargeulen te onderscheiden, zie figuur 5.



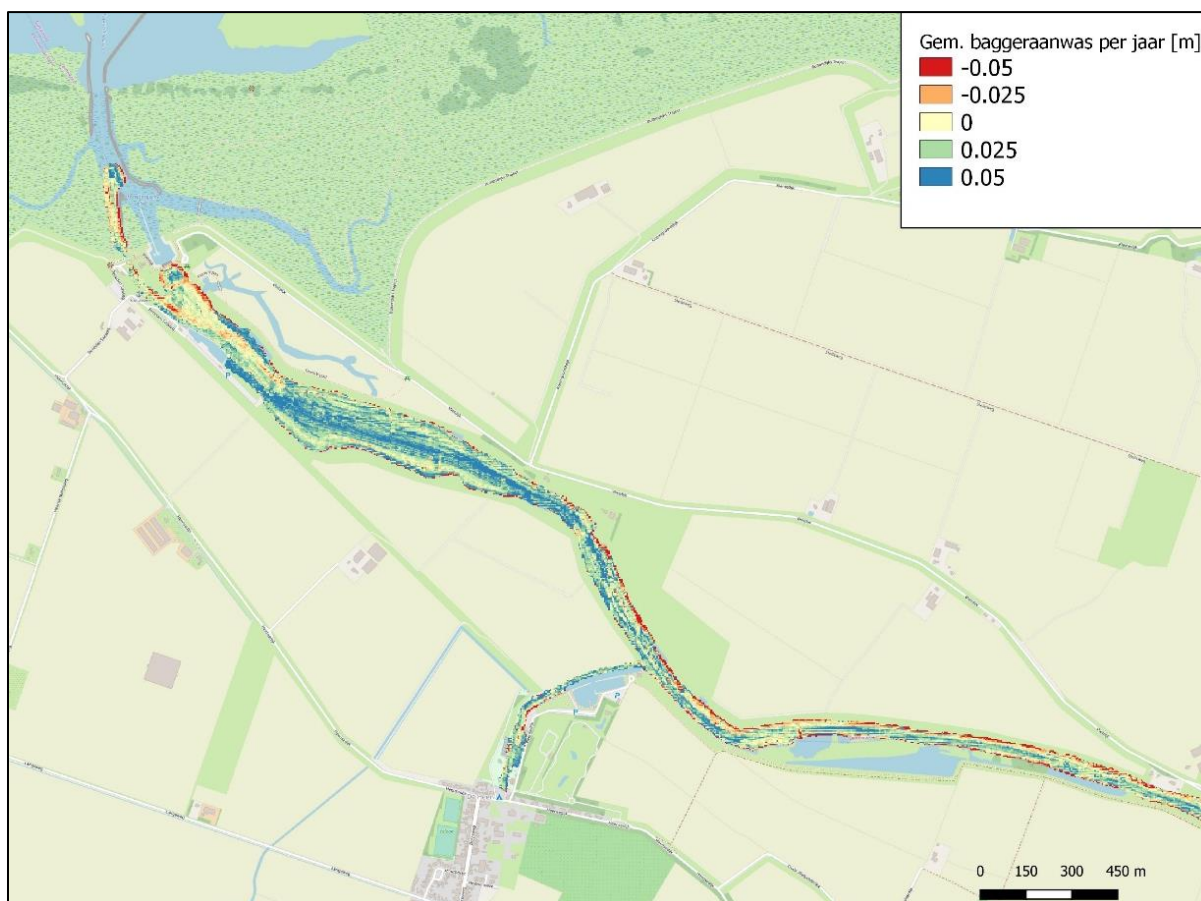
Figuur 5: sterke ruimtelijke variatie van baggeraanwas als gevolg van schepvaart

Wat tevens op te merken is, is dat over het algemeen aan rechter zijde (stroomafwaarts gezien) van de watergang meer erosie op treed dan aan de linker zijde. Dit is ook met name duidelijk te zien in bovenstroomse gebieden, zie figuur 6. Dit zou iets kunnen zeggen over de belasting van schepvaart, mogelijk als gevolg van een verschil in intensiteit of belading van schepen die stroom op- en afwaarts varen.



Figuur 6: Erosie overwegend aan de rechter zijde van de watergang (stroomafwaarts gezien)

In benedenstroomse deelgebieden is de ruimtelijke variatie beduidend kleiner, maar nog steeds relatief groot vergeleken met de gemiddelde baggeraanwas. In de benedenstroomse deelgebieden hebben erosie/sedimentatie processen een grotere bijdrage in de ruimtelijke variatie ten opzichte van scheepvaart, in vergelijking tot bovenstroomse deelgebieden. Met name nabij de sluisen, waar de watergang breder wordt is duidelijk te zien dat stroomsnelheden afnemen, waardoor sedimentatie op treedt. In figuur 6 is de situatie nabij Benedensas weergegeven. Op deze kaart is duidelijk te zien dat de mate van baggeraanwas toeneemt nabij de verbreding van de watergang voor de jachthaven bij Benedensas. Dichter bij de sluis neemt de mate van baggeraanwas weer af, mogelijk als gevolg van hogere stroomsnelheden ter plaatse van de sluis.



Figuur 7: ruimtelijke variatie in baggeraanwas in benedenstroomse deelgebied nabij Benedensas

Variatie tussen verschillende metingen over tijd

In de meest rechter kolom van tabel 1 is de standaarddeviatie gegeven over de verschillende multibeam metingen in de verschillende deelgebieden. Dit geeft een mate van variatie in baggeraanwas per deelgebied over de verschillende jaren dat er gemeten is. Omdat in deelgebied 6 slechts 2 meetreeksen beschikbaar zijn is er maar een enkele gemiddelde jaarlijkse baggeraanwas bepaald, waardoor er geen standaardafwijking is bepaald voor dit deelgebied.

Het is op te merken dat ter plaatse van de watergang Mark en Dintel, de variaties over de tijd het grootst zijn. Een mogelijke verklaring voor de relatief grote veranderingen in baggeraanwas over de verschillende jaren is de gevoeligheid op hoge afvoerpieken in het systeem. Deze hypothese wordt ondersteund door het feit dat verschillen tussen basisafvoer en piekafvoer in de Mark en Dintel beduidend hoger zijn dan in de Steenbergsevliet en het Mark-Vlietkanaal¹.

Echter, om iets te zeggen over de mate van onzekerheid op de gevonden gemiddelde jaarlijkse baggeraanwas speelt ook het aantal metingen over de jaren een rol. In bepaalde deelgebieden zijn meer metingen verricht over de jaren dan in andere deelgebieden. Om een mate van onzekerheid aan te geven op de gevonden gemiddelde jaarlijkse baggeraanwas spelen de volgende parameters een rol:

- De gevonden standaardafwijking over de verschillende metingen
- Het aantal vergelijkingen tussen de metingen over de jaren
- Gekozen betrouwbaarheidsniveau: 95% (meest gebruikelijke statistische waarde)

¹ Bron: Watersysteemanalyse Mark Dintel Vliet, Arcadis (2019)

Een betrouwbaarheidsinterval op de gevonden gemiddelde baggeraanwas is berekend aan de hand van de volgende formule:

$$BI_{95} = t \frac{\sigma_{tijd}}{\sqrt{m}}$$

Met:

BI_{95} = 95% betrouwbaarheidsinterval

t = t waarde uit de t – student verdeling

m = Aantal kaartlagen (over tijd) met mate van baggeraanwas in deelgebied

Dit geeft de volgende betrouwbaarheden op de gemiddelde baggeraanwas per deelgebied weergegeven in tabel 2. De waarden in de tabel geven een bandbreedte rondom het gemiddelde (tabel 1) waarin de mate van jaarlijkse baggeraanwas per deelgebied zich met 95% zekerheid bevindt.

Tabel 2: betrouwbaarheidsintervallen gemiddelde baggeraanwas

Deelgebied	$BI_{95} [\pm cm]$
1	1,55
2	2,30
3	1,60
4	5,29
5	1,61
6	-

Uit tabel 2 is af te leiden dat de gemiddelde jaarlijkse baggeraanwas in deelgebied 1, 3 en 5 met een overeenkomende mate van betrouwbaarheid bepaald kan worden. Voor deelgebied 2 en 4 is de gegeven bandbreedte groter als gevolg van minder metingen en grote veranderingen in baggeraanwas tussen verschillende jaren. In deelgebied 6 is geen betrouwbaarheid af te leiden omdat er maar een enkele waarde voor gemiddelde baggeraanwas is bepaald. Afwijkingen over de tijd zijn hierdoor niet beoordeeld in deelgebied 6.

Stap 4: Kwaliteitsoordeel

Op basis van de interpretatie van de data wordt een kwaliteitsoordeel gevormd. Het kwaliteitsoordeel is voor de zes deelgebieden los van elkaar bepaald, omdat niet elk deelgebied even veel metingen heeft. Het kwaliteitsoordeel wordt gebaseerd op 5 criteria:

1. Beschikbaarheid van data; Tijdreeks aanwezig in, of samen te stellen uit beschikbare data
2. Uitschieters
3. Aantal datareeksen over vergelijkbare periode
4. Ruimtelijke verdeling van meetpunten
5. Kwaliteit meetmethode

Op basis van deze criteria wordt conform IKM een oordeel gegeven aan de datakwaliteit in de vorm van een aantal sterren. Meer informatie over de toekenning van sterren is in onderstaande Tabel 3 weergegeven.

Tabel 3 – Sterrentoekenning IKM (Rinsema, Pals, Zomer, & Korving, 2018)

Oordeel	Criteria vanuit datakwaliteit in IKM	Vervolg
☆	1. Beperkte aaneengesloten datapunten 2. Grote onverklaarbare uitschieters 3. Geen datareeksen voor validatie 4. Geen tot beperkte ruimtelijke verdeling van meetpunten (voor zover relevant) 5. onbetrouwbare meetmethode	Data niet bruikbaar
☆☆	1. Voldoende aaneengesloten datapunten 2. Grote onverklaarbare uitschieters 3. Geen datareeks voor validatie 4. Beperkte ruimtelijke verdeling van meetpunten (voor zover relevant) 5. Twijfelachtige meetmethode	Combinatie met expert meningen nodig
☆☆☆	1. Voldoende aaneengesloten datapunten 2. Verklaarbare uitschieters 3. Minimale datareeks aanwezig voor validatie 4. Beperkte ruimtelijke verdeling van meetpunten (voor zover relevant) 5. Meetmethode is voldoende voor beschreven parameter	Data geeft bruikbare beschrijving van het systeem
☆☆☆☆	1. Voldoende aaneengesloten datapunten 2. Verklaarbare uitschieters 3. Voldoende datareeksen voor validatie 4. Voldoende ruimtelijke verdeling van meetpunten (voor zover relevant) 5. Erg betrouwbare meetmethode	Data geeft goede beschrijving van het systeem
☆☆☆☆☆	1. Voldoende aaneengesloten datapunten 2. Uitschieters afwezig 3. Uitgebreide datareeksen voor validatie 4. Goede ruimtelijke verdeling van meetpunten (voor zover relevant) 5. Erg betrouwbare meetmethode	Data geeft volledig inzicht in het systeem

Deelgebied 1

In deelgebied 1 zijn in 6 jaren metingen uitgevoerd, namelijk 2007, 2008, 2009, 2010, 2011 en 2013. In 2007 is in de metingen een kleine uitschieter waar te nemen. Er is geen verklaring gevonden voor deze uitschieter, maar deze omvat slechts een aantal datapunten waardoor de invloed op de analyse te verwaarlozen is. Er is daarom gekozen om deze uitschieter te negeren. De datareeksen hebben niet allemaal dezelfde stukken bemeten, maar hebben wel veel overlap. De ruimtelijke verdeling van de punten is zeer goed en gelijk over het hele gebied. De meetmethode is betrouwbaar met een nauwkeurigheid van circa 0,1% (Bodemrichtlijn, 2019). Het gevonden 95% betrouwbaarheidsinterval op de gemiddelde jaarlijkse baggeraanwas bedraagt 1,55 cm. Daarmee wordt aan de data in deelgebied 1 een kwaliteitsoordeel van 4 sterren gegeven.

Deelgebied 2

In deelgebied 2 zijn in 3 jaren metingen uitgevoerd, namelijk 2008, 2013 en 2014. Deze datareeksen bevatten geen uitschieters. De datareeksen hebben niet allemaal dezelfde stukken bemeten, maar hebben wel veel overlap. De ruimtelijke verdeling van de punten is zeer goed en gelijk over het hele gebied. De meetmethode is betrouwbaar met een nauwkeurigheid van circa 0,1% (Bodemrichtlijn,

2019). Het gevonden 95% betrouwbaarheidsinterval op de gemiddelde jaarlijkse baggeraanwas bedraagt 2,30 cm. Door de hoge bandbreedte van het betrouwbaarheidsinterval in combinatie met de hoeveelheid metingen wordt aan de data in deelgebied 2 een kwaliteitsoordeel van 3 sterren gegeven.

Deelgebied 3

In deelgebied 3 zijn in 5 jaren metingen uitgevoerd, namelijk 2008, 2009, 2010, 2011 en 2013. Deze datareeksen bevatten geen uitschieters. De datareeksen hebben niet allemaal dezelfde stukken bemeten, maar hebben wel veel overlap. De ruimtelijke verdeling van de punten is zeer goed en gelijk over het hele gebied. De meetmethode is betrouwbaar met een nauwkeurigheid van circa 0,1% (Bodemrichtlijn, 2019). Het gevonden 95% betrouwbaarheidsinterval op de gemiddelde jaarlijkse baggeraanwas bedraagt 1,60 cm. Daarmee wordt aan de data in deelgebied 3 een kwaliteitsoordeel van 4 sterren gegeven.

Deelgebied 4

In deelgebied 4 zijn in 3 jaren metingen uitgevoerd, namelijk 2009, 2013 en 2014. De datareeksen hebben niet allemaal dezelfde stukken bemeten, maar hebben wel veel overlap. De ruimtelijke verdeling van de punten is zeer goed en gelijk over het hele gebied. De meetmethode is betrouwbaar met een nauwkeurigheid van circa 0,1% (Bodemrichtlijn, 2019). Het gevonden 95% betrouwbaarheidsinterval op de gemiddelde jaarlijkse baggeraanwas bedraagt 5,29 cm. Mede gezien de beperkte hoeveelheid metingen wordt aan de data in deelgebied 4 een kwaliteitsoordeel van 3 sterren gegeven.

Deelgebied 5

In deelgebied 5 zijn in 3 jaren metingen uitgevoerd, namelijk 2010, 2011 en 2014. De datareeksen hebben niet allemaal dezelfde stukken bemeten, maar hebben wel veel overlap. De ruimtelijke verdeling van de punten is zeer goed en gelijk over het hele gebied. De meetmethode is betrouwbaar met een nauwkeurigheid van circa 0,1% (Bodemrichtlijn, 2019). Het gevonden 95% betrouwbaarheidsinterval op de gemiddelde jaarlijkse baggeraanwas bedraagt 1,61 cm. Gezien de redelijk beperkte hoeveelheid metingen wordt aan de data in deelgebied 5 een kwaliteitsoordeel van 4 sterren gegeven.

Deelgebied 6

In deelgebied 6 zijn in 2 jaren metingen uitgevoerd, namelijk 2010 en 2014. De beide datareeksen hebben het hele deelgebied bemeten. De ruimtelijke verdeling van de punten is zeer goed en gelijk over het hele gebied. De meetmethode is betrouwbaar met een nauwkeurigheid van circa 0,1% (Bodemrichtlijn, 2019). Gezien de zeer beperkte hoeveelheid metingen wordt aan de data in deelgebied 6 een kwaliteitsoordeel van 2 sterren gegeven.

Stap 5: Expert judgement

Voor deze case is geen expert judgement toegepast. Daarmee komt deze stap te vervallen.

Stap 6: kwantificeer onzekerheid

Op basis van de multibeam metingen kunnen de ruimtelijke verschillen in baggeraanwas duidelijk in beeld worden gebracht. Daarnaast kan de gemiddelde mate van baggeraanwas over de afgelopen meetjaren nauwkeurig worden bepaald. Statistisch gezien is de data over het algemeen dus van goede kwaliteit. Men kan relatief nauwkeurig bepalen hoe het verloop in baggeraanwas zich heeft ontwikkeld over de afgelopen jaren. Echter, wanneer men een verwachte mate van baggeraanwas wil voorspellen,

speelt kansrekening een rol. Door relatief grote veranderingen in baggeraanwas over de tijd, blijkt het voorspellen van de verwachte baggeraanwas over verschillende jaren gepaard te gaan met grote onzekerheden. 95% betrouwbaarheidsintervallen zijn dan ook ten minste in de orde grootte van een factor 2 groter dan de gemiddelde aanwas per jaar.

Conclusie en discussie

Uit de analyse zijn in de deelgebieden verschillende maten van gemiddelde jaarlijkse baggeraanwas gevonden met verschillende maten van variatie in ruimte en tijd. Mogelijke verklaringen gegeven voor de gevonden resultaten zijn aannemelijk en blijken ook voor het waterschap herkenbaar.

Wat betreft de betrouwbaarheid van de data, is in de toepassing van het IKM gebleken dat de kwaliteit van de data niet over de gehele Mark-Dintel-Vliet boezem gelijk is. Er zijn een aantal locaties waar de datakwaliteit goed is, maar ook een aantal locaties waar verbetering van de datakwaliteit mogelijk is. Over het algemeen geldt dat met een betere datakwaliteit de baggeraanwas nauwkeuriger en betrouwbaarder bepaald kan worden. In tabel 4 zijn de resultaten uit de analyse samengevat.

Tabel 4 – Samenvatting resultaten

Deelgebied	Gemiddelde [cm/jaar]	95% betrouwbaarheidsinterval [cm]	Kwaliteitsoordeel data
1	1,91	1,55	☆☆☆☆
2	0,18	2,30	☆☆☆
3	2,60	1,6	☆☆☆☆
4	1,57	5,29	☆☆☆
5	1,07	1,61	☆☆☆☆
6	1,63	-	☆☆

Om tot betrouwbaardere resultaten te komen kan op een aantal deelgebieden meer gemeten worden om de baggeraanwas nauwkeuriger te bepalen. Met name deelgebied 6 (Markvlietkanaal/Nieuwe Roosendaalsche Vliet), verdient daarbij extra aandacht, omdat daar nu slechts twee metingen beschikbaar zijn en dus maar een maal een mate van baggeraanwas bepaald kan worden. Veranderingen in de tijd kunnen hierdoor niet worden beoordeeld. De deelgebieden 2, 4 en 5 hebben ieder 3 metingen, maar deze beslaan niet het gehele deelgebied. Daarom verdienen ook deze deelgebieden aandacht, waarin met name voor deelgebied 2 en 4 het baggeraanwas verloop over verschillende jaren relatief onzeker is door grote afwijkingen over de tijd. Wanneer hier meer metingen beschikbaar zijn kan ook hier de jaarlijkse baggeraanwas nauwkeuriger en betrouwbaarder bepaald worden.

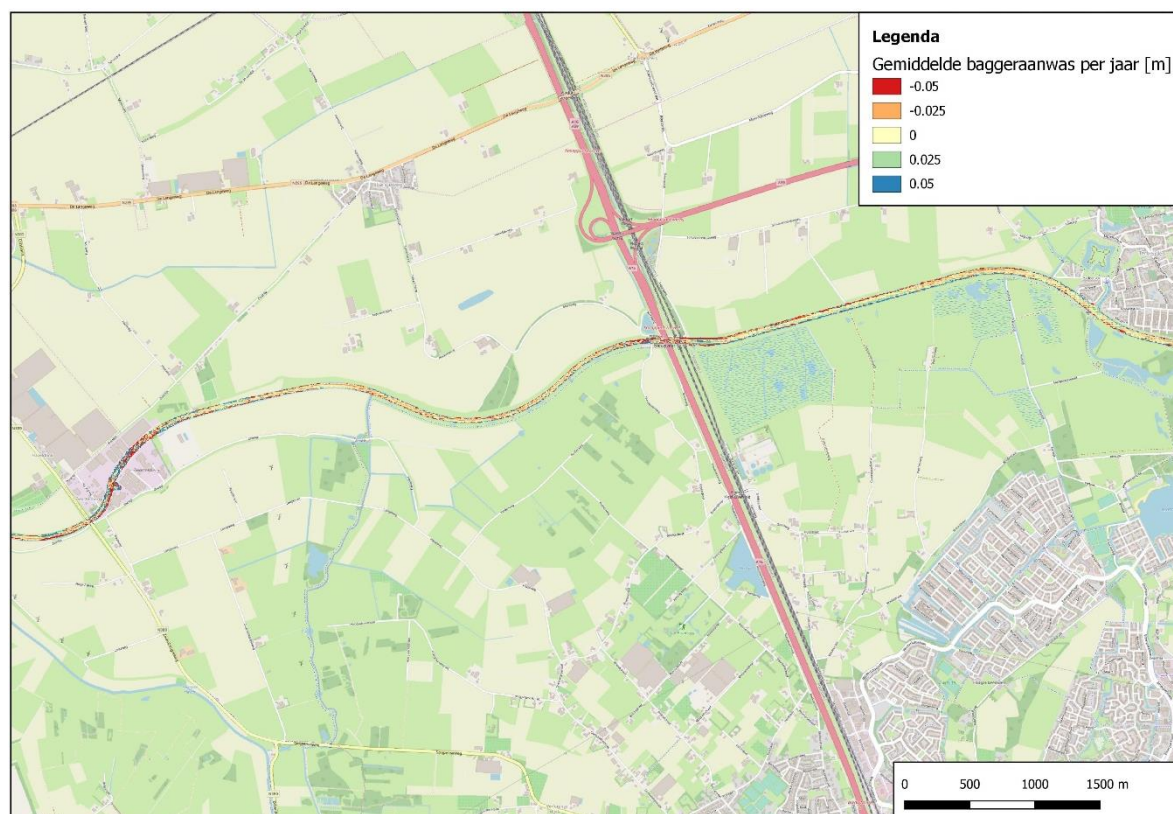
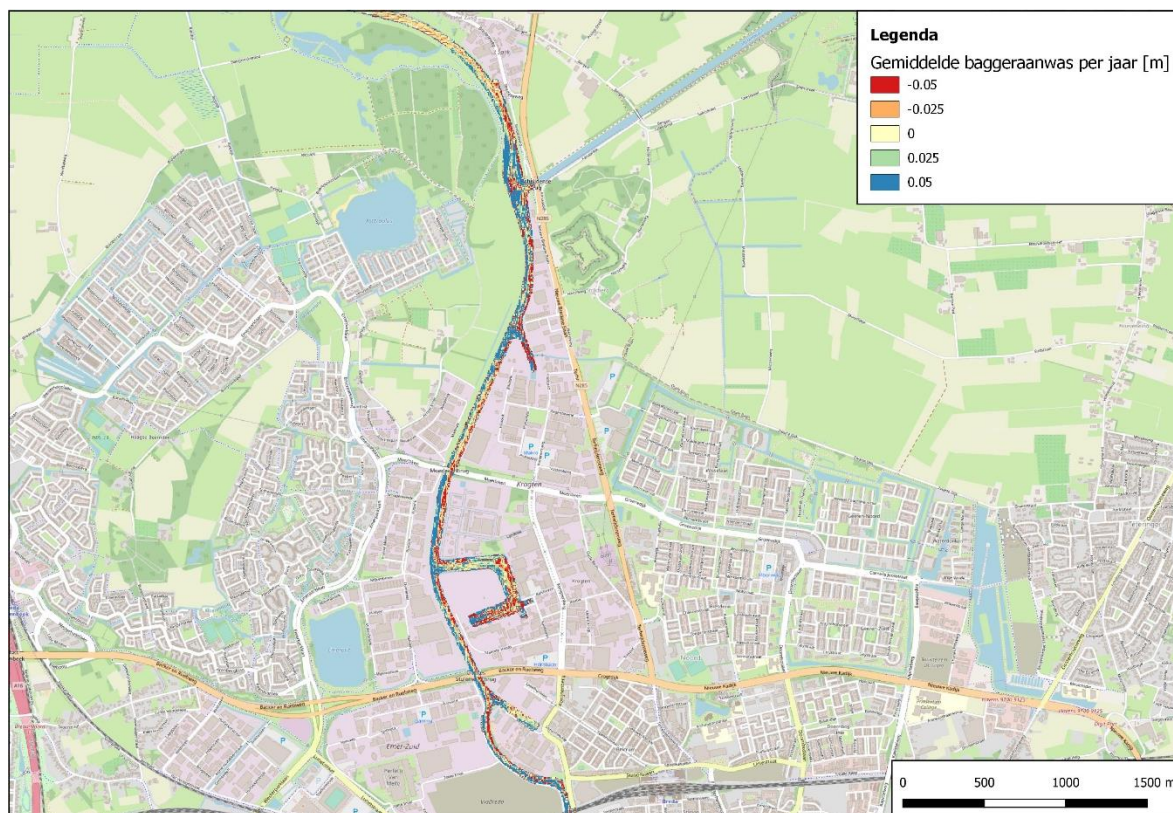
Referenties

Bodemrichtlijn. (2019, februari 27). *Echolood*. Opgehaald van Bodemrichtlijn: <https://www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bodemonderzoek/onderzoekstechnieken/echolood>

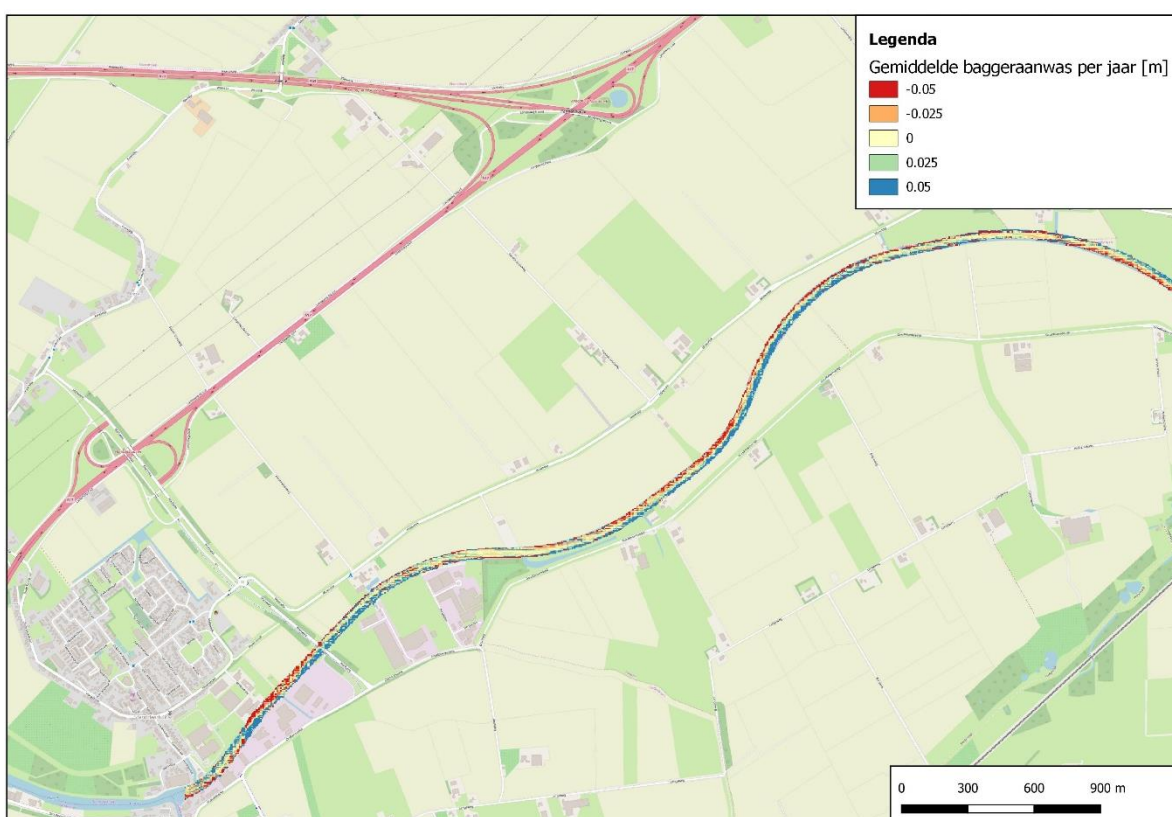
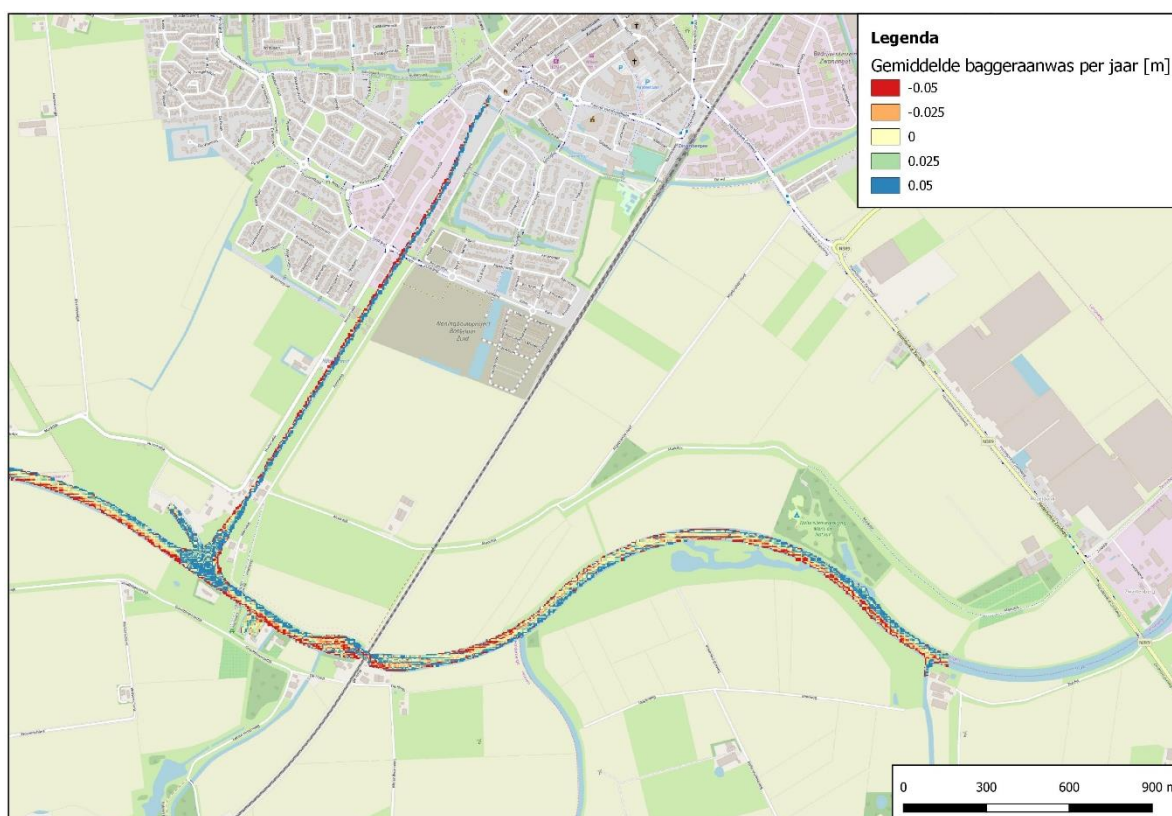
Rinsema, J., Pals, N., Zomer, W., & Korving, H. (2018). *Informatie Kwaliteit Model; Rapportage Fase 3 Robamci*. Delft: ROBAMCI.

Bijlage I

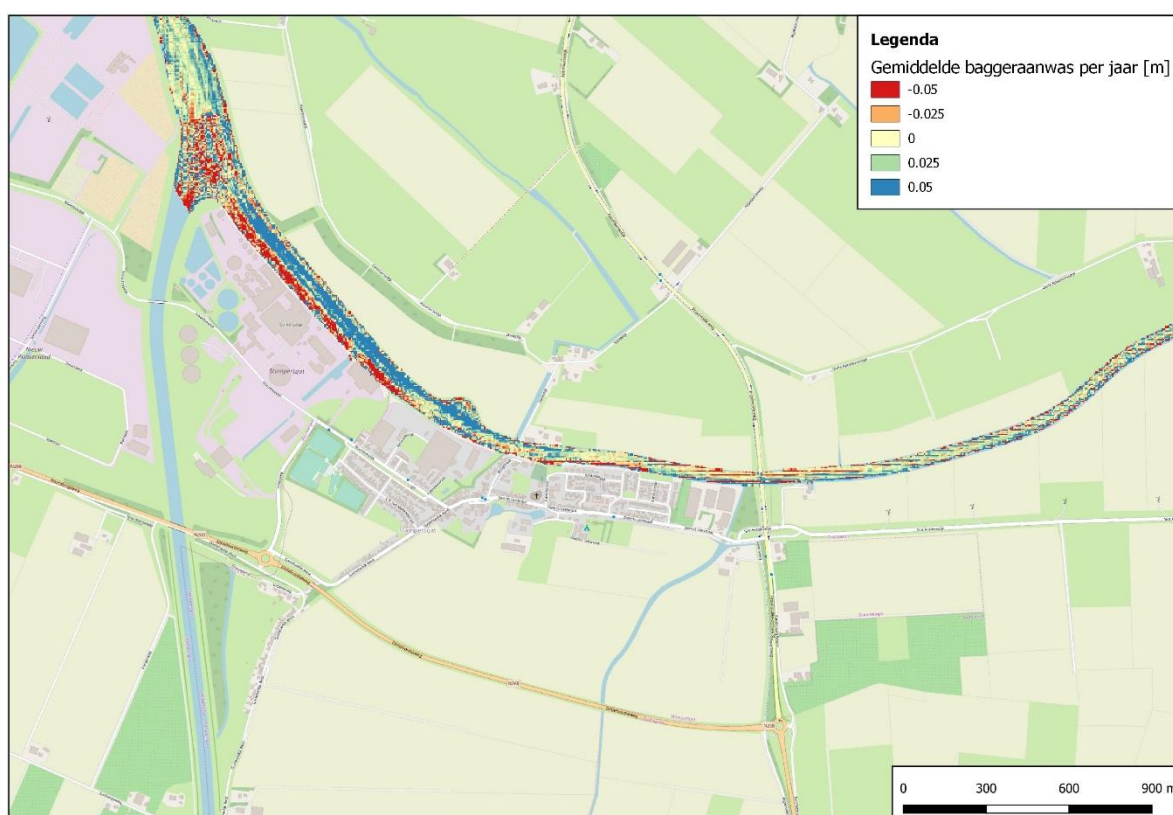
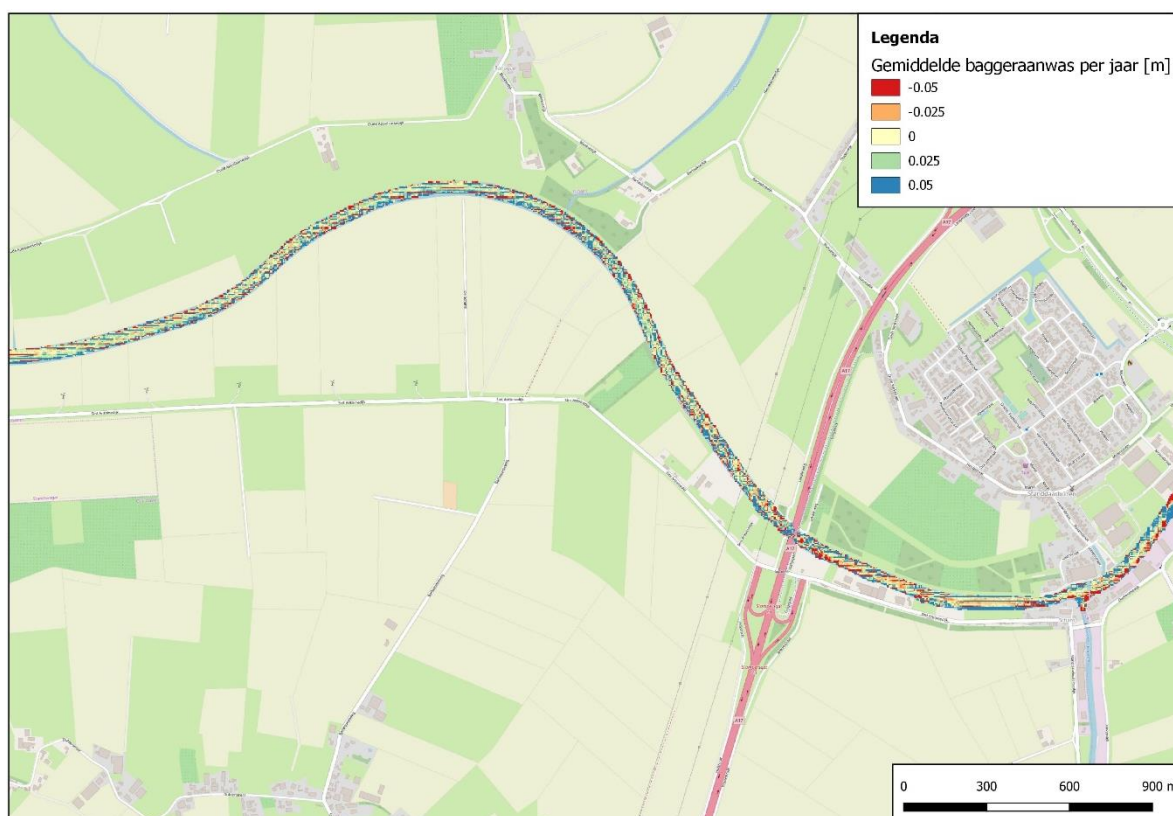
Deelgebied 1



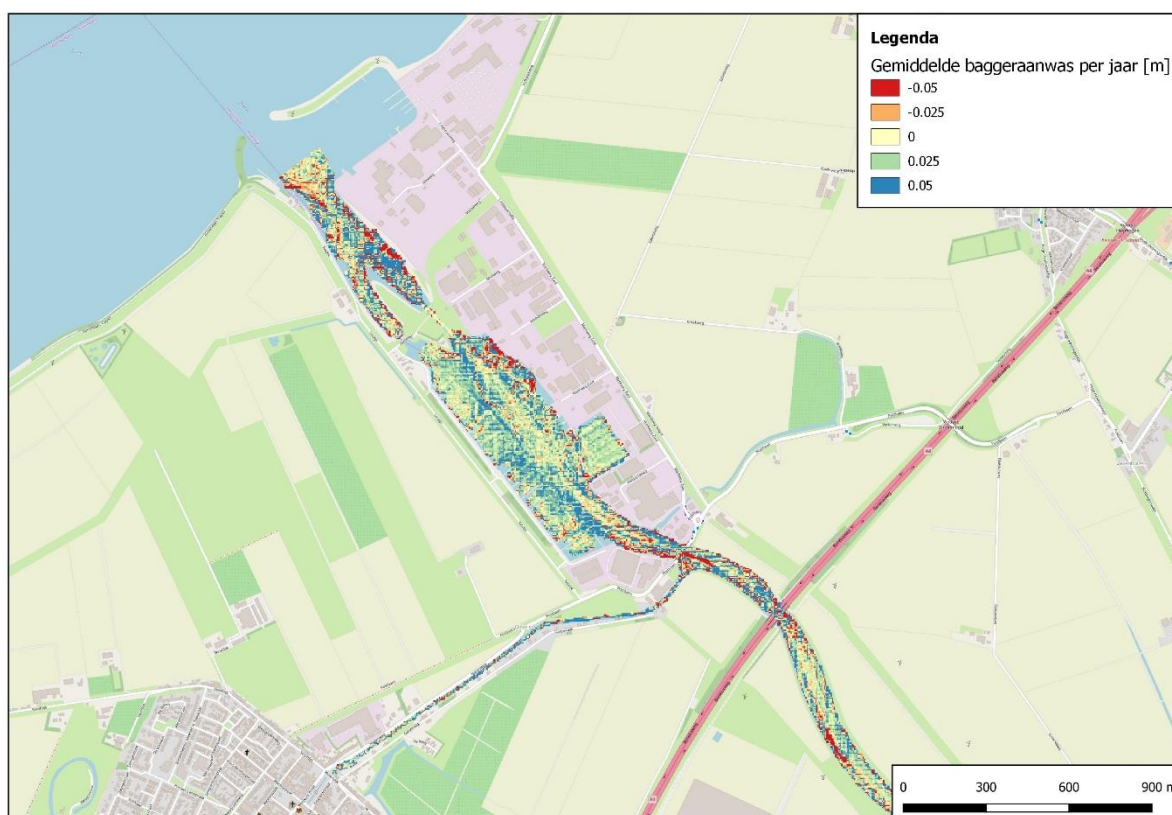
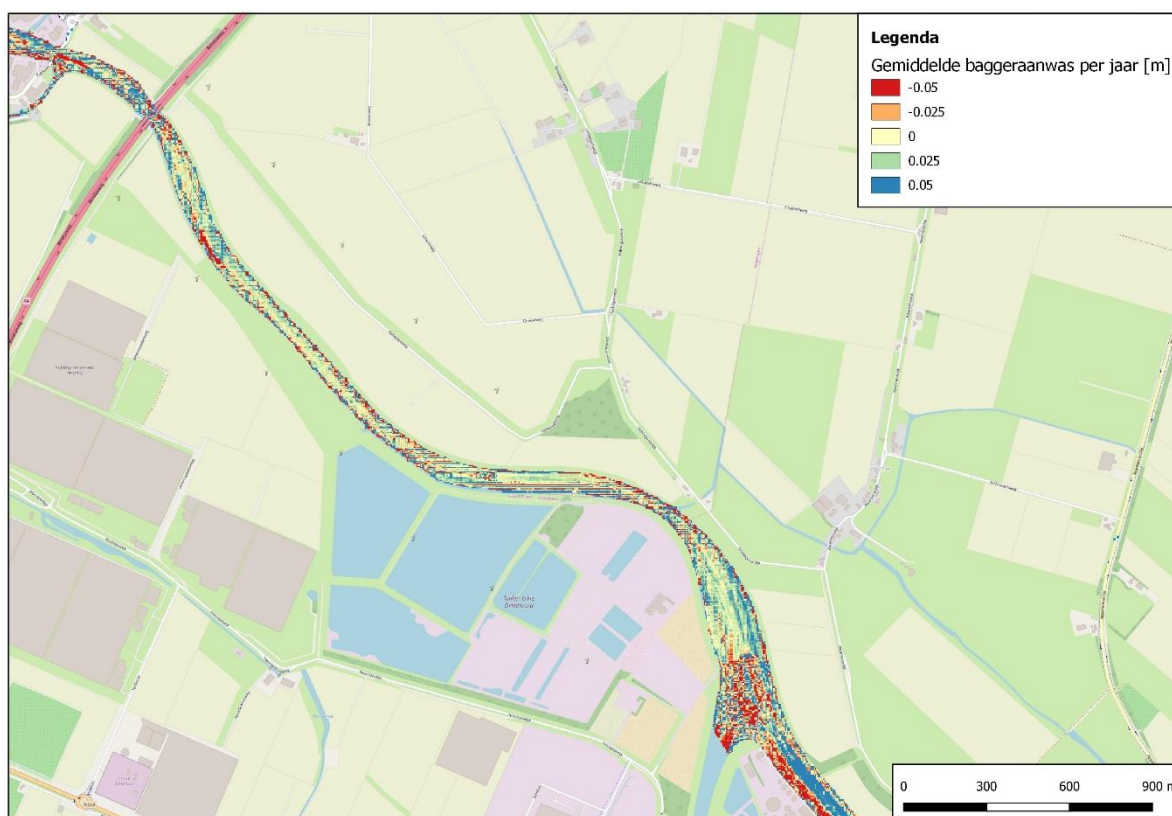
Deelgebied 2



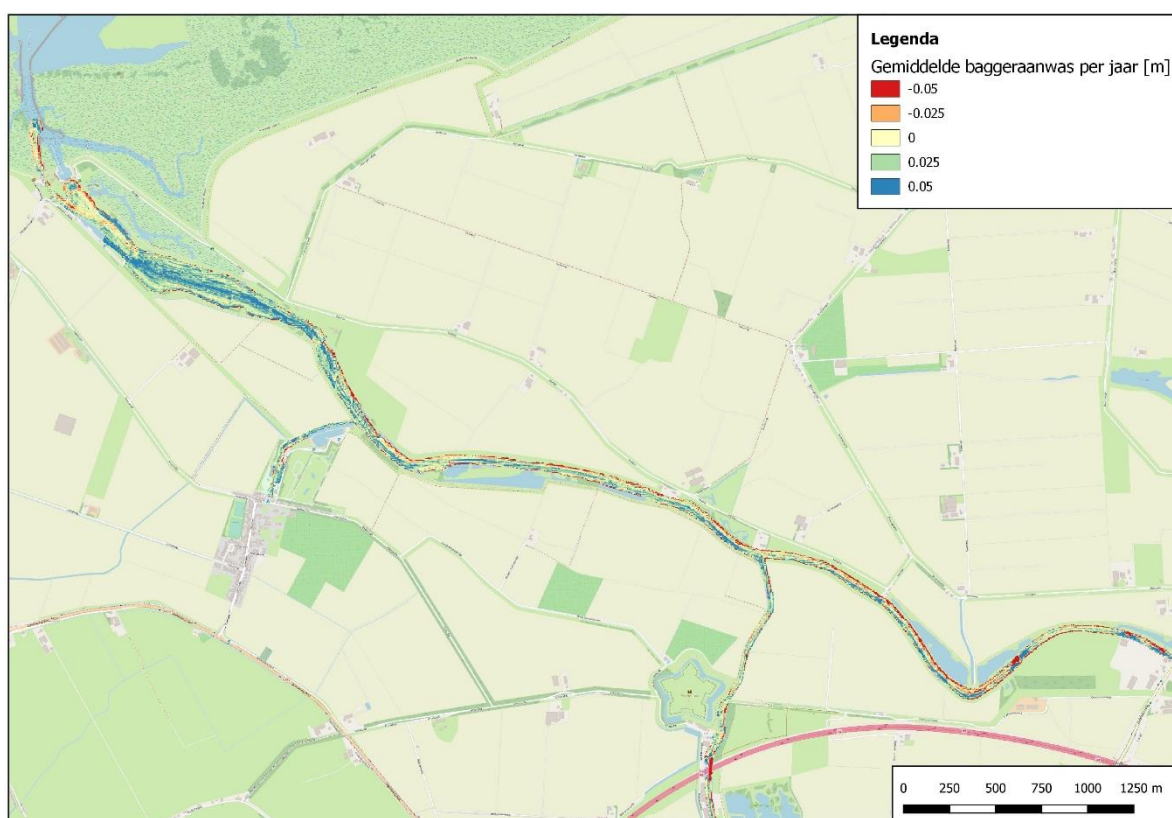
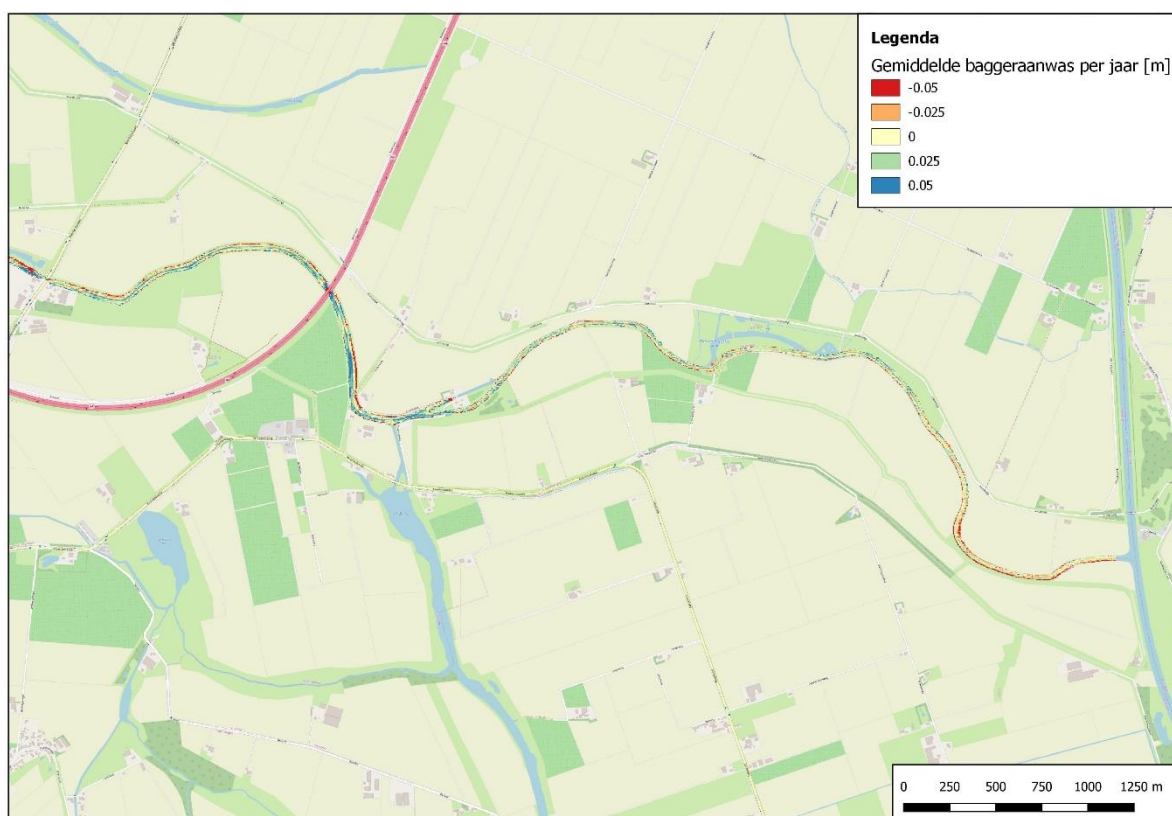
Deelgebied 3



Deelgebied 4



Deelgebied 5



Deelgebied 6

