

Notitie Rivierkundige beoordeling

Dijkverbeteringstraject Cuijk-Ravenstein

WBS: WSB.23.2

Datum: 2025-03-06

Versienummer: D1.0



Inhoud

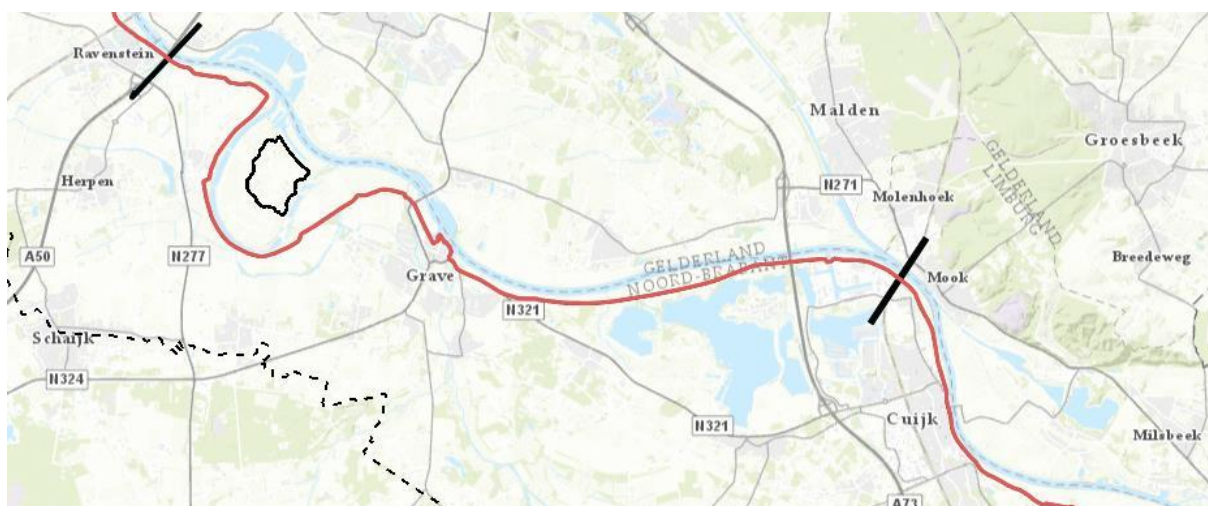
Inhoud	3
1. Inleiding	4
2. Methode	6
3. Ontwerp	10
4. Resultaten	14
5. Conclusies	28
6. Referenties	29
Bijlage A. Rivierwaartse verplaatsing buitendijks versterken	30
Bijlage B. Resultaten rivierkundige berekeningen projectreferentie	57
Bijlage C. Resultaten rivierkundige berekeningen dijkversterking	58
Bijlage D. Iteraties ontwerp compenserende maatregelen	62
Bijlage E. Resultaten rivierkundige berekeningen dijkversterking met compensatiemaatregel	63
Bijlage F. Morfologische berekeningen D-FAST MI	75

1. Inleiding

1.1 Projectbeschrijving

Het klimaat verandert. Dat betekent dat het water in de rivieren in de toekomst steeds vaker erg hoog staat. Alle dijken in Nederland moeten daarom voldoen aan de nieuwe normen voor waterveiligheid. Ook de dijken langs de Maas. We werken hiervoor samen in het landelijke hoogwater beschermingsprogramma (HWBP). Samen met Rijkswaterstaat, provincie Noord-Brabant, gemeenten en bewoners gaat waterschap Aa en Maas aan de slag om de dijk tussen Cuijk en Ravenstein te verbeteren.

Het dijktraject, weergegeven in Figuur 1-1, is circa 21 km lang en bestaat voor een groot deel uit een gronddijk. Halverwege het traject, in de vestingstad Grave, is een kademuur aanwezig als primaire waterkering. Daarnaast zijn ook diverse constructieve objecten in de dijk aanwezig (kunstwerken) zoals onder andere de Keersluis Cuijk en Gemaal van Sasse. De gronddijk, de kademuur en de kunstwerken zijn gezamenlijk onderdeel van het project dijkverbetering Cuijk-Ravenstein. Deze rapportage is onderdeel van de planuitwerking. In de planuitwerking wordt het gekozen voorkeursalternatief uit de verkenningsfase verder uitgewerkt.



Figuur 1-1 Dijktraject Cuijk-Ravenstein

1.2 Doel van dit rapport

Het voorliggende rapport is de Notitie Rivierkundige beoordeling (WP 23.2). Deze notitie beschrijft de rivierkundige consequenties van buitendijks versterken en hoe deze nadelen gecompenseerd worden. Het is een technisch document voor de doelgroep rivierkundig specialisten bij Waterschap Aa en Maas (hierna: WSAM) en Rijkswaterstaat (hierna: RWS).

Het doel van deze effectstudie is het bepalen van de rivierkundige effecten van het vergunningenontwerp (VO) voor de dijkverbetering Cuijk-Ravenstein. In dit document worden twee ontwerpsituaties beschreven, doorgerekend en beoordeeld: de dijkverbeteringen zonder compensatiemaatregel en de dijkverbeteringen met een compensatiemaatregel.

De beoordeling is uitgevoerd volgens het Rivierkundig Beoordelingskader 6.0 [1] en behelst de volgende onderdelen:

- Het bepalen van het effect van de dijkverbetering op de hoogwaterveiligheid door middel van het bepalen van het effect op de rivierwaterstanden.
- Het bepalen van het effect van de dijkverbetering in combinatie met de compensatiemaatregel op de hoogwaterveiligheid door middel van het bepalen van het effect op de rivierwaterstanden.
- Het beschrijven en beoordelen van de hydraulische en morfologische effecten van het ontwerp op diverse aspecten van het Rivierkundig Beoordelingskader 6.0 [1].

1.3 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 van dit rapport is de gebruikte werkwijze toegelicht. Hierin zijn de uitgangspunten beschreven voor de analyse en de werkwijze voor het uitvoeren van de rivierkundige berekeningen. In Hoofdstuk 3 is het getoetste ontwerp toegelicht. Dit behelst het ontwerp van de dijkversterkingen en van de compensatiemaatregel. In Hoofdstuk 4 zijn de resultaten van de toetsing aan het Rivierkundig Beoordelingskader beschreven. Hoofdstuk 5 besluit met een conclusie ten aanzien van de toetsing. De referenties waar in dit rapport naar verwezen is zijn te vinden in Hoofdstuk 6.

2. Methode

2.1 Uitgangspunten

2.1.1 Redeneerlijn Buitendijks Versterken

De Redeneerlijn buitendijks versterken van het HWBP [2] is een afspraak tussen het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat en de Unie van Waterschappen over hoe te handelen indien binnendijkse maatregelen redelijkerwijs niet mogelijk zijn. De redeneerlijn beschrijft wanneer buitendijkse versterking mogelijk is en welke eisen en uitgangspunten gelden voor het ontwerp van compenserende maatregelen.

In het geval er voor een dijktraject een noodzaak is om buitendijks te versterken, dan is dit onderbouwd in de ontwerpnotitie van het dijkontwerp. Deze zijn opgenomen in de integrale ontwerpnotitie (WSB18).

2.1.2 Rivierkundig Beoordelingskader

Het Rivierkundig Beoordelingskader voor ingrepen in de Grote Rivieren [1] (hierna: RBK) beschrijft hoe Rijkswaterstaat bij vergunningverlening van voorgenomen ingrepen in de rivier de rivierkundige effecten beoordeelt. Voor de beoordeling van de effecten van de ingrepen in deze notitie geldt het RBK 6.0.

De beoordelingsaspecten die van toepassing zijn voor de Maas zijn gegeven in Tabel 2-1 met een korte beschrijving van de gebruikte methode. De hoogwaterreferentie (HR) voor de bedijkte Maas is een afvoer van 4.100 m³/s bij Borgharen met een herhalingsjijd van 3.000 jaar. Een uitwerking van de beoordelingsaspecten, de opbouw van de simulaties en de presentatie van de modelresultaten zijn verder uitgewerkt in het RBK.

Door RWS-ZN is aangegeven dat voor de studie van sediment en erosie van zowel zomerbed (3.1) en uiterwaard (3.2) ook gerekend moet worden met D-FAST MI.

Tabel 2-1 Rivierkundige beoordelingsaspecten en methoden in de Maas gegroepeerd naar hoogwaterveiligheid (sectie 1), hinder of schade door hydraulische effecten (sectie 2) en morfologische effecten (sectie 3).

	Rivierkundig beoordelingsaspect	Methode
1.1	Hoogwaterreferentie in de as van de rivier: geen waterstandsverhoging	Simulaties D-HYDRO bij HR
1.2	Hoogwaterreferentie buiten de as van de rivier: geen waterstandsverhoging bij de primaire waterkering	Simulaties D-HYDRO bij HR
2.1	Inundatiefrequentie van de uiterwaard	Simulaties D-HYDRO bij HR
2.2	Stroombeeld in de uiterwaard: verandering in stroomrichting en -snelheid	Simulaties D-HYDRO bij HR
2.3	Stroombeeld in vaarweg: verandering in dwarsstroming bij rand vaarweg	Simulaties D-HYDRO bij een afvoer van 2.500 m ³ /s bij Borgharen ¹
2.6	Instroom retentiegebieden Maas ²	Simulaties D-HYDRO bij diverse afvoeren
3.1	Sedimentatie en erosie van het zomerbed (+ oevers)	Expert judgement, aangevuld met berekeningen D-FAST MI
3.2	Sedimentatie en erosie van uiterwaard en nevengeulen	Expert judgement, met berekeningen D-FAST MI

¹ Dit criterium is relevant tussen het niveau dat de verlaagde uiterwaard meestroomt (hoger dan 2.100 m³/s), tot de afvoer van 2.300 m³/s dat de scheepvaart gestremd wordt. Omdat er slechts randvoorwaarden beschikbaar zijn voor een afvoer van 1.700 m³/s, 2.100 m³/s, 2.500 m³/s en 4.100 m³/s, is de afvoer van 2.500 m³/s gebruikt voor de beoordeling.

² Er hoeft geen rekening gehouden te worden met waterstandsveranderingen bij inlaat Geijsteren. Dit ligt bovenstrooms van Lob van Gennep en heeft daardoor een kleinere waterstandsverandering.

2.1.3 Modellen en software

Door RWS-ZN is besloten voor deze studie gebruik te maken van de nieuwe (zesde) generatie rivierkundige modellen van Rijkswaterstaat in Baseline 6, D-HYDRO en D-FAST MI. Hiermee wordt vooruit gelopen op de oplevering van het RBK 7.0. Het RBK 6.0 beschrijft: "Voor D-HYDRO Suite modellen zullen tot RBK 7.0 dezelfde eisen gelden als voor WAQUA en waar nodig aanpassing van de eisen in overleg met de beheerder."

Door RWS-ZN is tijdens een overleg op 23-11-2023 gespecificeerd dat de volgende modellen gebruikt kunnen worden voor de in dit rapport beschreven berekeningen:

- baseline-maas-beno22_6-v2;
- dflowfm2d-maas-beno22_6_20m_km144_247-v2a.

De modellen zijn uitgeleverd aan Sweco via de Helpdesk Water. Berekeningen met dit model worden uitgevoerd met D-HYDRO 2023.01 [14].

In het model zijn randvoorwaarden beschikbaar voor de volgende afvoeren:

- Stationaire afvoeren met het gedrag (topvervlakking) van een dynamische afvoergolf middels kunstmatige lateralen, voor de hoogwaterreferenties: 3.200 en 4.100 m³/s.
- Stationaire afvoeren voor berekeningen waarbij het dynamische karakter niet belangrijk is, zoals morfologie en scheepvaart: 1.300, 1.700, 2.100 en 2.500 m³/s.

Voor simulaties ten behoeve van het RBK (Tabel 2-1) wordt enkel gebruik gemaakt van de randvoorwaarden 2.500 en 4.100 m³/s.

Voor het inschatten van het morfologische effect wordt gebruik gemaakt worden van de vuistregels in D-FAST Morphological Impact (MI). Met D-FAST MI wordt op een eenvoudige en consistente manier een eerste inschatting gekregen van erosie en sedimentatie. Omdat de rekenregels gebruik maken van het bereiken van een evenwichtstoestand in het alluviale zomerbed, is de methode niet geschikt voor uiterwaarden. Op verzoek van RWS-ZN zijn de resultaten in de uiterwaarden wel gebruikt om indicatief aan te geven waar een risico op sedimentatie of erosie kan ontstaan. De uitgeleverde versie is D-FAST 3.1.1 (september 2024). Documentatie van de methode is opgenomen in Bijlage F.

2.1.4 Meekoppelkansen

In dit project worden verscheidene meekoppelkansen (MKK's) beschouwd. De volgende meekoppelkansen zijn op het moment van schrijven actueel en hebben mogelijk een effect op de rivierwaterstand:

- MKK 1.1: Halfbastion Blauwkoop;
- MKK 13: Verbreding N321;

RWS-ZN heeft aangegeven dat het rivierkundig effect van de meekoppelkansen los beschouwd kan worden van het dijkontwerp. Wanneer het waterstandsverhogende effect van de individuele meekoppelkansen onder de 1 mm blijft, dan hoeven deze niet te worden gecompenseerd.

Dat betekent dat het mogelijke opstuwende effect van de meekoppelkansen niet meegenomen hoeft te worden in het bepalen van de opgave. De meekoppelkansen zijn daarom ook niet opgenomen in het ontwerp zoals dat in dit rapport is doorgerekend. MKK 13, de verbreding van de N321, vormt hierop een uitzondering. In het huidige ontwerp kunnen de verplaatsing als gevolg van de verbreding van de N321 en het effect van de dijkversterking niet los beschouwd worden. Daarom is de verbreding van de N321 wel opgenomen in het getoetste ontwerp. Als gevolg hiervan is de benadering conservatief. Dat wil zeggen dat het waterstandsverhogende effect van de dijkversterking in dit rapport mogelijk overschat wordt.

2.2 Rivierkundige berekeningen

Deze sectie beschrijft hoe de rivierkundige berekeningen zijn opgezet. De berekeningen zijn uitgevoerd volgens de specificatie van het RBK 6.0 (zie paragraaf 2.1.2).

2.2.1 Varianten

Voor het bepalen van het effect van de dijkversterkingen en het ontwerpen van de compensatiemaatregel zijn meerdere varianten doorgerekend. De doorgerekende modelvarianten zijn getoond in Tabel 2-2. Allereerst is een referentiesimulatie doorgerekend, waar de andere varianten mee vergeleken zijn om het effect te bepalen. De wijzigingen tussen het aangeleverde modelreferentie *dflowfm2d-maas-beno22_6_20m_km144_247-v2a* en de projectreferentie zijn beschreven in paragraaf 2.2.2.

Daarna zijn de effecten van de dijkversterking bepaald door de rivierwaartse verplaatsingen in te brengen van de dijkvakken die buitenwaarts versterkt worden. De methode hiervoor is beschreven in paragraaf 2.2.3.

Tot slot zijn twee varianten doorgerekend met daarin de dijkversterking, in combinatie met een compensatiemaatregel. Dit is in twee stappen gedaan, omdat de eerste variant niet voldoende compensatie opleverde. In de hoofdtekst van deze rapportage zijn enkel de resultaten van variant *CuRa_VO_maneerl_a2* gepresenteerd. De resultaten van variant *CuRa_VO_maneerl_a1* zijn gepresenteerd in Bijlage D.

Tabel 2-2 Overzicht modelvarianten

Variant	Omschrijving	Maatregelen
CuRa_REF_a2	Projectreferentie	-
CuRa_VO_a4	Dijkversterkingen, geen compensatiemaatregelen	Representatieve verplaatsing buitenkruinlijn in dijkvak 14-17, 19, 23, 27, en 30-38 (<i>ma_curavodv1dv38_a1</i>).
CuRa_VO_maneerl_a1	Dijkversterkingen + compensatiemaatregel uiterwaardverlaging op niveau NAP +8,5 m	Representatieve verplaatsing buitenkruinlijn in dijkvak 14-17, 19, 23, 27, en 30-38 (<i>ma_curavodv1dv38_a1</i>). Compensatiemaatregel uiterwaardverlaging Neerloon op niveau NAP +8,5 m (<i>ma_maneerl_uitwverl_a1</i>).
CuRa_VO_maneerl_a2	Dijkversterkingen + compensatiemaatregel uiterwaardverlaging op niveau NAP +8,4 m	Representatieve verplaatsing buitenkruinlijn in dijkvak 14-17, 19, 23, 27, en 30-38 (<i>ma_curavodv1dv38_a1</i>). Compensatiemaatregel uiterwaardverlaging Neerloon op niveau NAP +8,4 m (<i>ma_maneerl_uitwverl_a2</i>).

2.2.2 Actualisatie referentiemodel

Het RBK 6.0 [1] schrijft voor dat de bandijklijn in het referentiemodel gecorrigeerd dient te worden, wanneer deze niet overeenkomt met de buitenkruinlijn in de referentie van het dijkversterkingsproject. De bandijklijn in de modelreferentie (*dflowfm2d-maas-beno22_6_20m_km144_247-v2a*) komt inderdaad op meerdere trajecten niet genoeg overeen met de buitenkruinlijn in dit project. De locatie van de buitenkruinlijn is opgenomen in de nieuwe projectreferentie (variant *CuRa_REF_a2*). Daarna zijn de rivierwaartse dijkversterkingen uitgedrukt ten opzichte van de projectreferentie.

In de meeste gevallen ligt de projectreferentie rivierwaarts van de modelreferentie. In dat geval is het gebied tussen de beide buitenkruinlijnen hoogwatervrij gemaakt, door een nieuwe hoogwatervrije lijn op te nemen op de plaats van de buitenkruinlijn in de projectreferentie. In een aantal gevallen ligt de projectreferentie beperkt landinwaarts van de modelreferentie. In dat geval is de buitenkruinlijn van de modelreferentie verwijderd en is er een nieuwe hoogwatervrije lijn geplaatst. Het schematiseren van het stuk rivierbed tussen de oude en de nieuwe bandijklijn was niet nodig, omdat dit reeds in het model was opgenomen.

2.2.3 Schematisering rivierwaartse verplaatsing

Voor het schematiseren van de rivierwaartse dijkversterking is de methodiek toegepast zoals beschreven in Bijlage 15 van het RBK 6.0 [1]. Wanneer er sprake is van een rivierwaartse versterking, neemt het doorstroomoppervlak af. Deze afname van doorstroomoppervlak is geschematiseerd door een representatieve verplaatsing van de buitenkruinlijn. Deze bestaat uit de werkelijke verplaatsing van de buitenkruinlijn en een fictieve verplaatsing om de profielvernauwing door taludverflauwing of buitenbermen mee te nemen. In Baseline is vervolgens een nieuwe hoogwatervrije lijn toegevoegd op de locatie van de nieuwe buitenkruinlijn. Baseline bepaalt daarmee welke cellen hoogwatervrij worden en daardoor niet worden meegenomen in de berekening.

Het verschilt per dijkvak hoe groot het deel van het dijkvak is waarover een rivierwaartse verplaatsing plaatsvindt. Deze differentiëring is deels meegenomen in de berekeningen. Hiervoor zijn de volgende uitgangspunten aangehouden:

- Indien het hele dijkvak een rivierwaartse verplaatsing heeft, dan is het dwarsprofiel met de grootste rivierwaartse verplaatsing aangehouden als maatgevend. Deze verplaatsing is toegepast op het gehele dijkvak.
- Indien slechts een deel van het dijkvak een rivierwaartse verplaatsing heeft, dan wordt enkel in dat deel de maatgevende rivierwaartse verplaatsing toegepast.
- Bij overgangen tussen delen van de dijk met verschillende rivierwaartse verplaatsing, is een overgang ingetekend onder een hoek van ongeveer 60°. Op deze manier sluit de schematisatie beter aan bij het ontwerp, zonder dat het ontwerp gedetailleerd ingebracht hoeft te worden. Deze overgang ligt altijd langs het deel van de dijk met de mindere rivierwaartse verplaatsing. Figuur 2-1 geeft een voorbeeld van een dergelijke overgang.



Figuur 2-1 Voorbeeld van een overgang van een deel van een dijkvak zonder rivierwaartse verplaatsing naar een deel met rivierwaartse verplaatsing (rechts) en een overgang tussen twee dijkvakken met een verschillende rivierwaartse verplaatsing (links)

2.2.4 Schematisering compensatiemaatregel

De compensatiemaatregel Neerloon is een uiterwaardverlaging (zie paragraaf 3.3). De uiterwaardverlaging is ingebracht in het model door de bodemhoogte binnen een polygoon aan te passen naar een vaste hoogte. De hoogtepunten, overlaten en overige hoogte-informatie uit het referentiemodel zijn verwijderd binnen dit vlak. Omdat het landgebruik niet verandert in het ontwerp ten opzichte van de huidige situatie, zijn er geen aanpassingen gedaan aan de ruwheid. De specifieke aanpak voor de compensatiemaatregel is verder toegelicht in paragraaf 3.3.

3. Ontwerp

Het ontwerp van dijkvakken met een rivierkundige verplaatsing, de rotonde van de N321 en de compensatiemaatregel Neerloon zijn getoetst op de rivierkundige effecten. Overige ontwerpaspecten zijn voor de rivierkundige toetsing niet onderscheidend en zijn daarom niet opgenomen in deze rapportage.

3.1 Dijkontwerp

Er zijn zestien dijkvakken met een rivierwaartse verplaatsing van de kruinlijn in het VO en dus mogelijk een waterstandseffect veroorzaken. De methode voor het berekenen van de rivierwaartse verplaatsing is toegelicht in paragraaf 2.2.3. De berekening van de representatieve verplaatsing en het traject waarover dit wordt toegepast zijn opgenomen in Bijlage A. Tabel 3-1 geeft een samenvatting van het resultaat van de berekeningen van de representatieve rivierwaartse verplaatsing.

Tabel 3-1 Representatieve verplaatsing van de buitenkruinlijn. De onderbouwing is gegeven in Bijlage A.

Dijkvak	Toelichting	Deel van het dijkvak	Rivierwaartse verplaatsing (m)
14		Vanaf A250,5	6,17
15	N321	Gehele dijkvak	10,27
16	N321	Ten oosten van de rotonde	9,95
16	N321	Rotonde	Maatwerk
16	N321	Ten westen van de rotonde	4,94
17	N321	Gehele dijkvak	4,94
19	Kademuur Grave	Gehele dijkvak	1,00
23	Koninginnedijk	Gehele dijkvak	1,40
27		Van A294 tot A299	2,08
30		Van 312,5 tot A319	4,75
31		Van A322,5 tot A326	4,58
32		Vanaf A336	4,96
33		Gehele dijkvak	7,45
34		Gehele dijkvak	8,19
35		Tot A359,5	4,78
36		Gehele dijkvak	5,39
37		Gehele dijkvak	13,20
38		Voor brug	12,23
38		Onder brug	6,03
38		Benedenstrooms van brug	5,00

3.2 Ronde N321

In het ontwerp van de N321 (dijkvak 15-17) is in dijkvak 16 een ronde opgenomen. Deze ronde ligt voor een deel buitendijks. Dit is meegenomen in het ontwerp dat is doorgerekend. Het ontwerp voor de ronde bestaat uit een ronde en een opritweg vanaf de uiterwaard naar de ronde. Deze zijn als volgt geschematiseerd in het hoogtemodel (zie Figuur 3-1):

- De ronde zelf is opgenomen als een hoogwatervrije lijn. De hoogwatervrije lijn is geplaatst waar het talud van de ronde begint.
- Er gaat daarnaast een opritweg van de uiterwaarde de ronde op. Deze opritweg is opgenomen als een overlaat. De overlaat neemt toe in hoogte vanaf de uiterwaarde tot de ronde. In de uiterwaarde is deze NAP +10,5 m (gelijk aan de maaiveldhoogte van de uiterwaard op die locatie) en bij de ronde is deze NAP+13,16 m (gelijk aan de hoogte van de dijk ter hoogte van de ronde).



Figuur 3-1 Schematisering van de ronde in de N321 (paars, hoogwatervrije lijn) met de opritweg (rood, overlaat met een hoogte van NAP +10,5 m in de uiterwaard tot NAP +13,16 m bij de ronde)

3.3 Compensatiemaatregel Neerloon

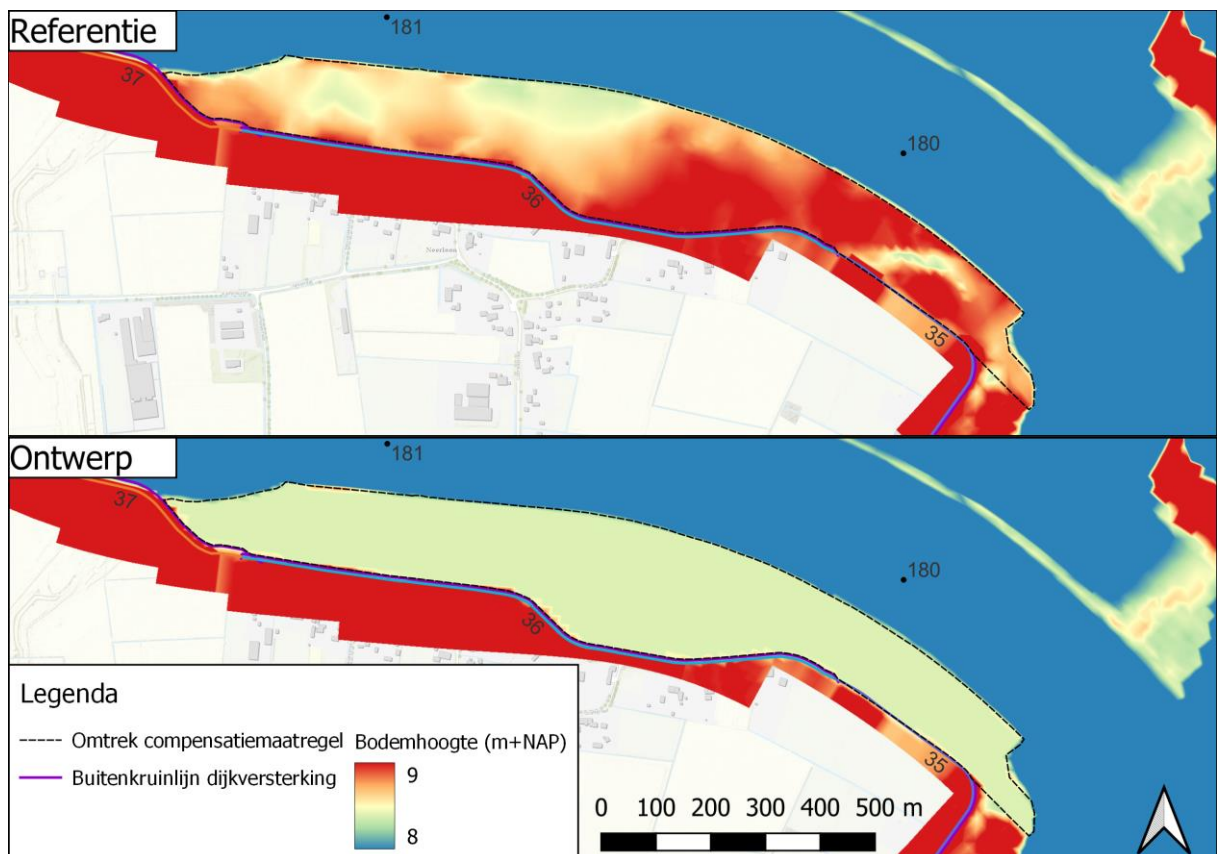
Het ontwerp van de compensatiemaatregel Neerloon is toegelicht in het ontwerpverslag Uiterwaardverlaging Neerloon [13]. De compensatiemaatregel is een verlaging van de uiterwaarden langs dijkvak 35, 36 en 37.

Er zijn modelberekeningen voor drie varianten uitgevoerd voor het bepalen van het ontwerp van de compensatiemaatregel:

- Variant met enkel de rivierwaartse verplaatsing als gevolg van de dijkversterkingen (en de ronde N321): de berekeningsresultaten zijn gebruikt om de benodigde compensatie te bepalen. De resultaten van deze berekening zijn opgenomen in Bijlage C. Het effect op de waterstand in de as van de rivier is beschreven in paragraaf 4.1.1.
- Variant met de rivierwaartse verplaatsing als gevolg van de dijkversterkingen (en de ronde N321) en een uiterwaardverlaging met een niveau van NAP +8,5 m: Optimalisatie van het ontwerp van de uiterwaardverlaging. De compensatiemaatregel met een niveau van NAP +8,5 m blijkt niet effectief genoeg om het volledige waterstandsverhogende effect van de dijkversterkingen te compenseren. De resultaten van deze berekening zijn opgenomen in Bijlage D.

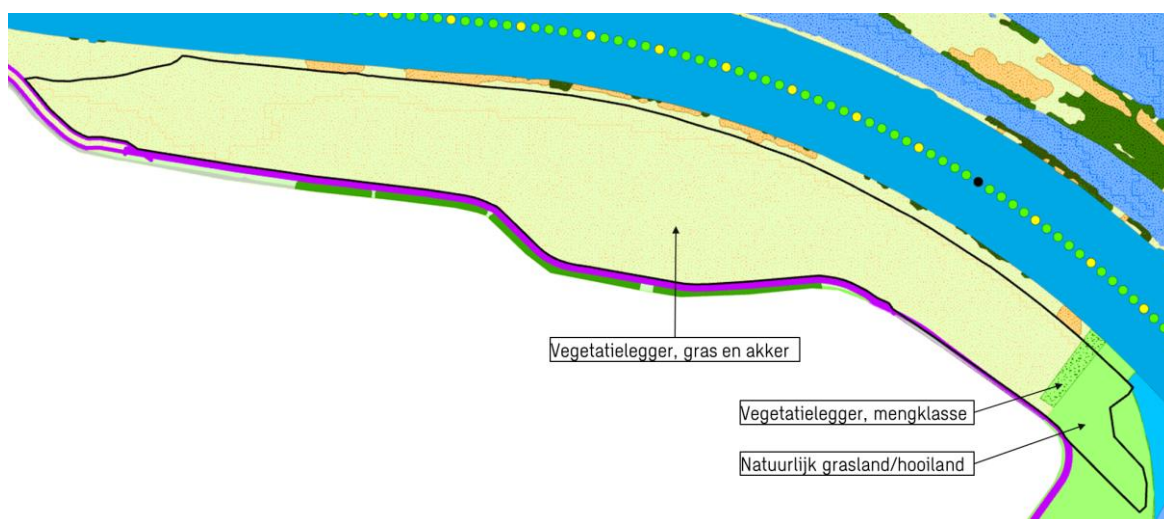
- Variant met de rivierwaartse verplaatsing als gevolg van de dijkversterkingen (en de rotonde N321) en een uiterwaardverlaging met een niveau van NAP +8,4 m: Optimalisatie van het ontwerp van de uiterwaardverlaging. De compensatiemaatregel met een niveau van NAP +8,4 m blijkt wel effectief genoeg om het volledige waterstandsverhogende effect van de dijkversterkingen te compenseren. De resultaten van deze berekening zijn opgenomen in Bijlage E. De toetsing aan het RBK 6.0 in hoofdstuk 4 is uitgevoerd op basis van de berekeningsresultaten van deze variant.

De uiterwaardverlaging is ingebracht in het model door de bodemhoogte binnen een polygoon aan te passen naar een hoogte van NAP +8,4 m. De hoogtepunten, overlaten en overige hoogte-informatie uit het referentiemodel zijn verwijderd binnen dit vlak. Figuur 3-2 toont de omtrek van de Baselinemaatregel en de bodemhoogte ter plaatse van de compensatiemaatregel in de referentiesituatie en in het ontwerp. Gemiddeld is de uiterwaardverlaging circa 0,4 m.



Figuur 3-2 Schematisering van de bodemhoogte bij Neerloon in projectreferentie (CuRa_REF_a2) en in de compensatiemaatregel (CuRa_VO_maneerl_a2).

In het ontwerp wordt, na het afgraven van de uiterwaarden, hetzelfde landgebruik teruggebracht. Er zijn daarom geen wijzigingen doorgevoerd met betrekking tot de landgebruik- en ruwheidswaarden. Figuur 3-3 toont de ruwheidsklassen in de uiterwaarden.



Figuur 3-3 Ruwheidsklassen in de uiterwaarden van de projectreferentie (CuRa_REF_a2) in de uiterwaarden bij Neerloon. De omtrek van de compensatiemaatregel (CuRa_VO_maneerl_a2) is weergegeven met een zwarte lijn.

4. Resultaten

Dit hoofdstuk beschrijft de modelresultaten en de beoordeling hiervan op de criteria van het RBK. In iedere deelparagraaf wordt een beoordelingscriteria van het RBK behandeld. Iedere deelparagraaf sluit af met een conclusie, deze conclusies worden samengevat in hoofdstuk 5.

4.1 Hoogwaterveiligheid

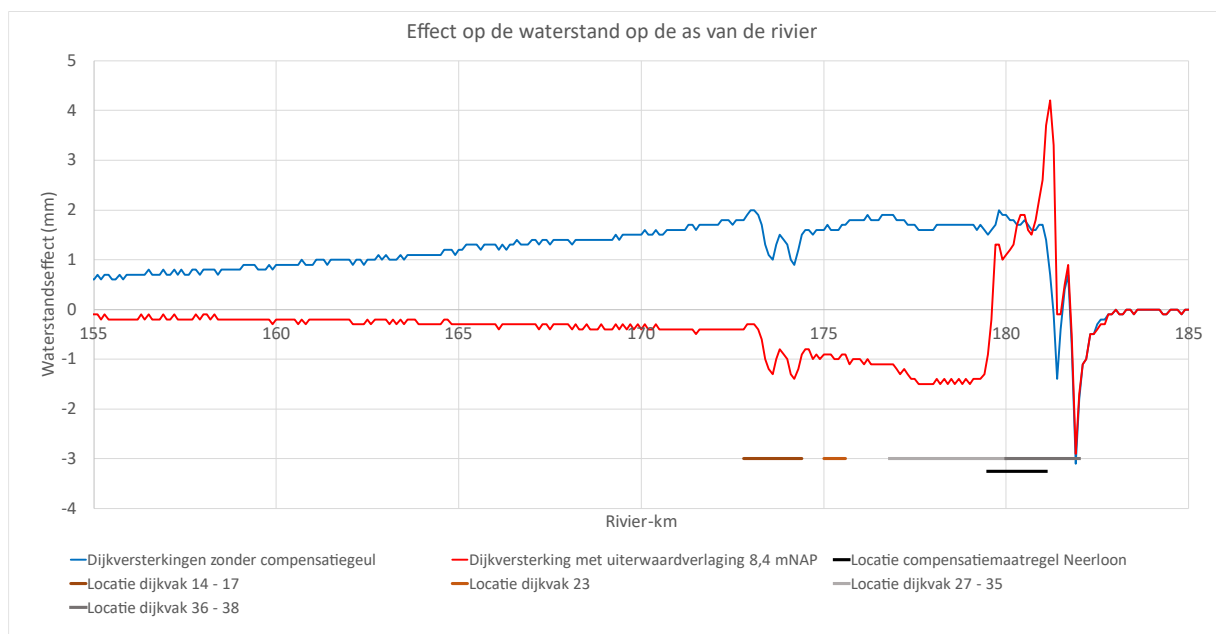
Het effect van het ontwerp op de hoogwaterveiligheid is getoetst op basis van twee criteria:

- 1.1 de hoogwaterreferentie in de as van de rivier;
- 1.2 de hoogwaterreferentie buiten de as van de rivier.

4.1.1 Hoogwaterreferentie in de as van de rivier (1.1)

Bij de beoordeling van dit criterium wordt de het relatieve effect van de ingreep op de waterstand in de as van de rivier bepaald. De voorwaarde bij de beoordeling is dat de ingreep niet mag leiden tot een verhoging van de waterstanden in de hoogwaterreferentie. De hoogwaterreferentie is de afvoer van 4.100 m³/s bij Borgharen.

Figuur 4-1 toont de waterstandseffecten op de as van de rivier bij de hoogwaterreferentie voor zowel de variant met de dijkversterkingen als de variant met de dijkversterkingen en de compensatiemaatregel (op een niveau van NAP +8,4 m) vergeleken met het referentiescenario.



Figuur 4-1 Effect op de waterstand op de as van de rivier van de dijkversterkingen zonder compensatiemaatregel (CuRa_VO_a4) en met compensatiemaatregel (CuRa_VO_maneerl_a2) ten opzichte van de projectreferentie (CuRa_REF_a2) bij de hoogwaterreferentie (4.100 m³/s). Positieve verschillen betekenen een waterstandsverhoging (opstuwing), negatieve verschillen betekenen een waterstandsverlaging.

Dijkversterkingen zonder compensatiemaatregel

De dijkversterking leidt tot een maximale opstuwing van +2,0 mm in de as van de rivier, ter hoogte van zowel rivierkilometer (rivier-km) 173 (dijkvak 15) als 180 (dijkvak 36). Bij dijkvak 37 treedt er lokaal een maximale waterstandsverlaging op van -1,4 mm, een benedenstroomse piek. Deze waterstandsverlaging is lokaal en draagt daarom niet bij aan het compenseren van het waterstandsverhogende effect van de dijkversterking.

In het RBK6.0 is voorgeschreven dat een berekende waterstandsverhoging in de as van de rivier van maximaal +1 mm wordt geaccepteerd. In het geval van dijkversterkingen zonder compensatiemaatregel wordt deze maximaal toelaatbare waterstandsverhoging overschreden over een traject van 20,4 km (rivier-km 160,7 – 181,1).

Conclusie: De dijkversterkingsmaatregelen leveren een waterstandsverhoging op in de as van de rivier. Deze dient gecompenseerd te worden. De situatie zonder compensatiemaatregel is in de basis niet vergunbaar. Daarom is in alle volgende resultaten enkel de situatie met zowel dijkversterkingen als compensatiemaatregel getoetst. De effecten van enkel de dijkversterking zijn wel opgenomen in Bijlage C.

Dijkversterkingen met compensatiemaatregel

De compensatiemaatregel heeft een waterstandsverlagend effect. Dit effect compenseert de waterstandsverhoging door de dijkversterkingen volledig. De maximale waterstandsverlaging ontstaat direct bovenstrooms van de compensatiemaatregel en is bij de hoogwaterreferentie +1,5 mm. De afstand waarover een waterstandsverlaging van meer dan -1 mm wordt gerealiseerd is 3,7 km (rivier-km 175,7-179,4).

Er ontstaat benedenstrooms van de waterstandsverlaging een lokale waterstandsverhoging, de zogenaamde benedenstroomse piek. Dit is een verwacht effect bij een waterstandsverlagende ingreep. Deze benedenstroomse piek is maximaal +4,2 mm direct benedenstrooms van de compensatiemaatregel (rivier-km 181,2). Het traject waarover een opstuwing van meer dan +1 mm optreedt is 1,6 km (rivier-km 179,7-181,3).

De benedenstroomse piek is een effect dat in bijna alle gevallen van een waterstandsverlagende ingreep ontstaat. Het RBK6.0 schrijft daarom voor dat het bevoegd gezag in kan stemmen met een benedenstroomse piek van meer dan 1 mm wanneer er sprake is van een ruime netto waterstandsverlaging. De oppervlakte van de verlaging moet in dat geval veel groter zijn dan de oppervlakte van de verhoging. Met de oppervlakte wordt de oppervlakte onder de grafiek bedoeld, dus de optelsom van de waterstandsverlaging bij iedere rivierkilometer. De oppervlakte van de waterstandsverlaging is in dit geval drie keer zo groot als de oppervlakte van de waterstandsverhoging. Naar verwachting wordt de benedenstroomse piek daarom geaccepteerd.

Conclusie: de compensatiemaatregel compenseert de waterstandsverhoging door de dijkversterkingen ruimschoots. Er treedt een benedenstroomse piek op, maar de totale waterstandsverlaging is drie keer zo groot als de waterstandsverhoging.

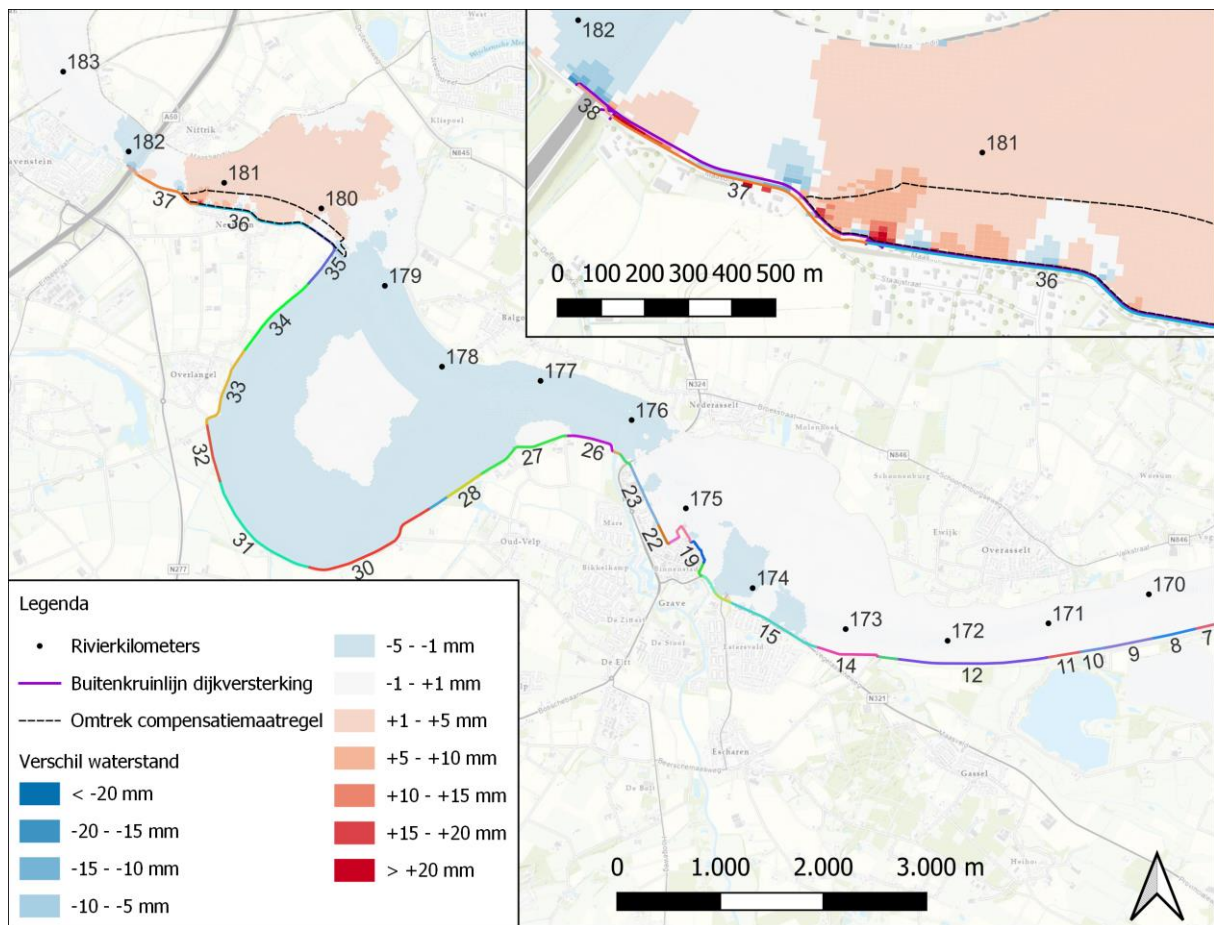
4.1.2 Hoogwaterreferentie buiten de as van de rivier (1.2)

Om dit criterium te beoordelen, is gebruik gemaakt van de berekeningsresultaten voor de hoogwaterreferentie (4.100 m³/s bij Borgharen).

Figuur 4-2 toont het verschil in de waterstand tussen de variant met de dijkversterkingen en compensatiemaatregelen ten opzichte van de projectreferentie. De ingrepen beïnvloeden de waterstand bij de hoogwaterreferentie buiten de as van de rivier op de volgende wijze:

- Er treedt een waterstandsverlaging op bovenstrooms van de compensatiemaatregel, over de gehele breedte van het doorstroomprofiel. Het effect is meer dan 1 mm tot bovenstrooms van rivier-km 176. Het waterstandsverlagende effect van de compensatiemaatregel heft het waterstandsverhogende effect van de dijkversterkingen volledig op.
- Lokaal treden er kleine waterstandsverhogingen en -verlagingen op langs de dijk bij dijkvak 36 en 37. De maximale waterstandsverhoging is 30 mm.
- Er treedt een verhoging van de waterstand op in het traject van de compensatiemaatregel. Dit wordt veroorzaakt door de dijkversterking benedenstrooms van de compensatiemaatregel en lokaal versterkt door de benedenstroomse piek. De waterstandsverhoging reikt tot aan de overkant van de rivier, de waterstandsverhoging aan de kering aan de noordzijde is maximaal 4 mm.

Conclusie: De waterstandseffecten buiten de as van de rivier zijn minimaal. Of de kleine waterstandseffecten acceptabel zijn, is ter beoordeling van de rivierbeheerder.



Figuur 4-2 Verskil in waterstand tussen de variant met dijkversterkingen en de compensatiemaatregel (CuRa_VO_maneerl_a2) en de projectreferentie (CuRa_REF_a2) bij een afvoer van 4.100 m³/s (hoogwaterreferentie) bij Borgharen.

4.2 Hinder of schade door hydraulische effecten

De mogelijke hinder of schade door hydraulische effecten van het ontwerp is getoetst op basis van vier criteria:

- 2.1 de inundatiefrequentie van de uiterwaard;
- 2.2 het stroombeeld in de uiterwaard;
- 2.3 het stroombeeld in de vaarweg;
- 2.6 de instroom van de retentiegebieden van de Maas.

4.2.1 Inundatiefrequentie van de uiterwaard (2.1)

De waterstandseffecten die ontstaan door de dijkversterkingen en de compensatiemaatregel zijn dusdanig klein dat de inundatiefrequentie en het gebruik niet noemenswaardig worden beïnvloed voor uiterwaarden die niet verlaagd worden. Er is enkel een lokaal effect op de inundatiefrequentie van de uiterwaarden ter plaatse van de compensatiemaatregel, waar de uiterwaard verlaagd wordt.

De inundatiefrequentie van de uiterwaard ter plaatse van de compensatiemaatregel is geanalyseerd op basis van de betrekkinglijnen van de Maas [2] (Tabel 4-1 en Tabel 4-2). In de huidige situatie varieert de bodemhoogte op deze locatie in de uiterwaard tussen NAP +8,4 m en NAP +9,2 m (Figuur 3-2). De gemiddelde bodemhoogte is ongeveer NAP +8,8 m. De compensatiemaatregel ligt ter hoogte van rivier-km 180-181. Uit de betrekkinglijnen (Tabel 4-2) volgt dat de uiterwaard meestroomt vanaf een afvoer van gemiddeld 2.400 m³/s, met een herhalingsjijd van veertien jaar³.

In de ontwerpsituatie is de uiterwaard verlaagd naar een constant niveau van NAP +8,4 m (Figuur 3-2). Dat betekent dat de uiterwaard inundeert bij een afvoer van ongeveer 2.200 m³/s, met een herhalingsjijd van ongeveer tien jaar. De inundatiefrequentie van het deel van de uiterwaarden dat in de huidige situatie hoger ligt dan NAP +8,4 m, neemt iets toe. De invloed op de inundatiefrequentie is echter zeer beperkt, omdat het om een verlaging van enkele decimeters gaat. De verandering in de gemiddelde inundatiefrequentie is van veertien jaar naar tien jaar.

De huidige akkerbouw op de locatie van de compensatiemaatregel wordt behouden. Ingeschat wordt dat de consequenties van de hogere inundatiefrequentie geen effect hebben op deze gebruiksfunctie. Als huidige gebruikers ook in de toekomst de uiterwaard weer gaan gebruiken, moeten deze geïnformeerd worden over deze mogelijke nadelige gevolgen.

Conclusie: Er is enkel een lokaal effect van de ingrepen op de inundatiefrequentie. De gemiddelde inundatiefrequentie van de uiterwaarden waar de compensatiemaatregel ligt is nu ongeveer veertien jaar en neemt toe tot ongeveer tien jaar. Dit heeft naar verwachting geen effect op de gebruiksfunctie.

Tabel 4-1 Betrekkinglijnen Maas 2023-2024 voor afvoeren tot 1.700 m³/s bij Borgharen voor rivier-km 179-182.

Parameter	Betrekkingslijnen Maas 2023-2024						
Afvoer St. Pieter [m ³ /s]	80	155	280	530	1030	1280	1500
Afvoer Borgharen [m ³ /s]	50	125	250	500	1000	1250	1470
Overschrijdingsfrequentie [dagen / jaar]	267	185	107	46	9	4	2
Rivier-km	Waterstand [m+NAP]						
179	4,92	4,96	5,06	5,39	6,18	6,44	6,94
180	4,92	4,96	5,05	5,37	6,13	6,39	6,89
181	4,91	4,96	5,05	5,35	6,1	6,35	6,85
182	4,91	4,95	5,03	5,3	5,97	6,2	6,69

³ De hoogste delen van de uiterwaarde in de huidige situatie (hoogte 9,2 m+NAP) inunderen bij een afvoer van ongeveer 2.700 m³/s, met een herhalingsjijd van ongeveer 28 jaar. De laagste delen van de uiterwaarde in de huidige situatie (hoogte 8,4 m+NAP) inunderen bij een afvoer van ongeveer 2.200 m³/s, met een herhalingsjijd van ongeveer 10 jaar.

Tabel 4-2 Betrekkingslijnen Maas 2023-2024 voor afvoeren vanaf 1.700 m³/s bij Borgharen voor rivier-km 179-182.

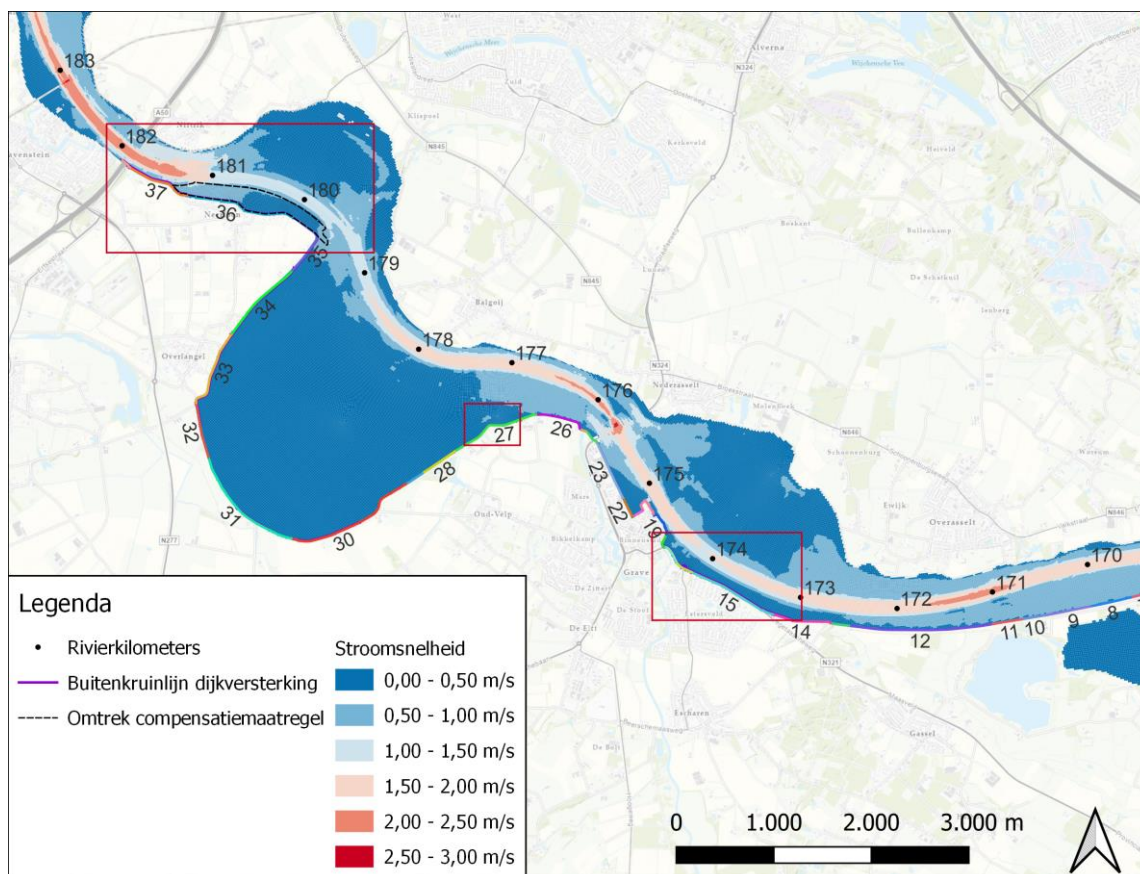
Parameter	Betrekkingslijnen Maas 2023-2024							
Afvoer St. Pieter [m ³ /s]	1722	2113	2512	2813	3211	3608	4101	4511
Afvoer Borgharen [m ³ /s]	1700	2100	2500	2800	3200	3600	4100	4500
Herhalingstijd topafvoer [jaren]	3	7	17	33	95	340	2800	16000
Rivier-km	Waterstand [m+NAP]							
179	7,45	8,31	9,06	9,54	10,13	10,61	11,02	11,23
180	7,39	8,23	8,99	9,47	10,05	10,53	10,94	11,14
181	7,34	8,18	8,95	9,42	9,98	10,45	10,86	11,06
182	7,19	8,02	8,75	9,2	9,72	10,17	10,57	10,77

4.2.2 Stroombeeld in de uiterwaard (2.2)

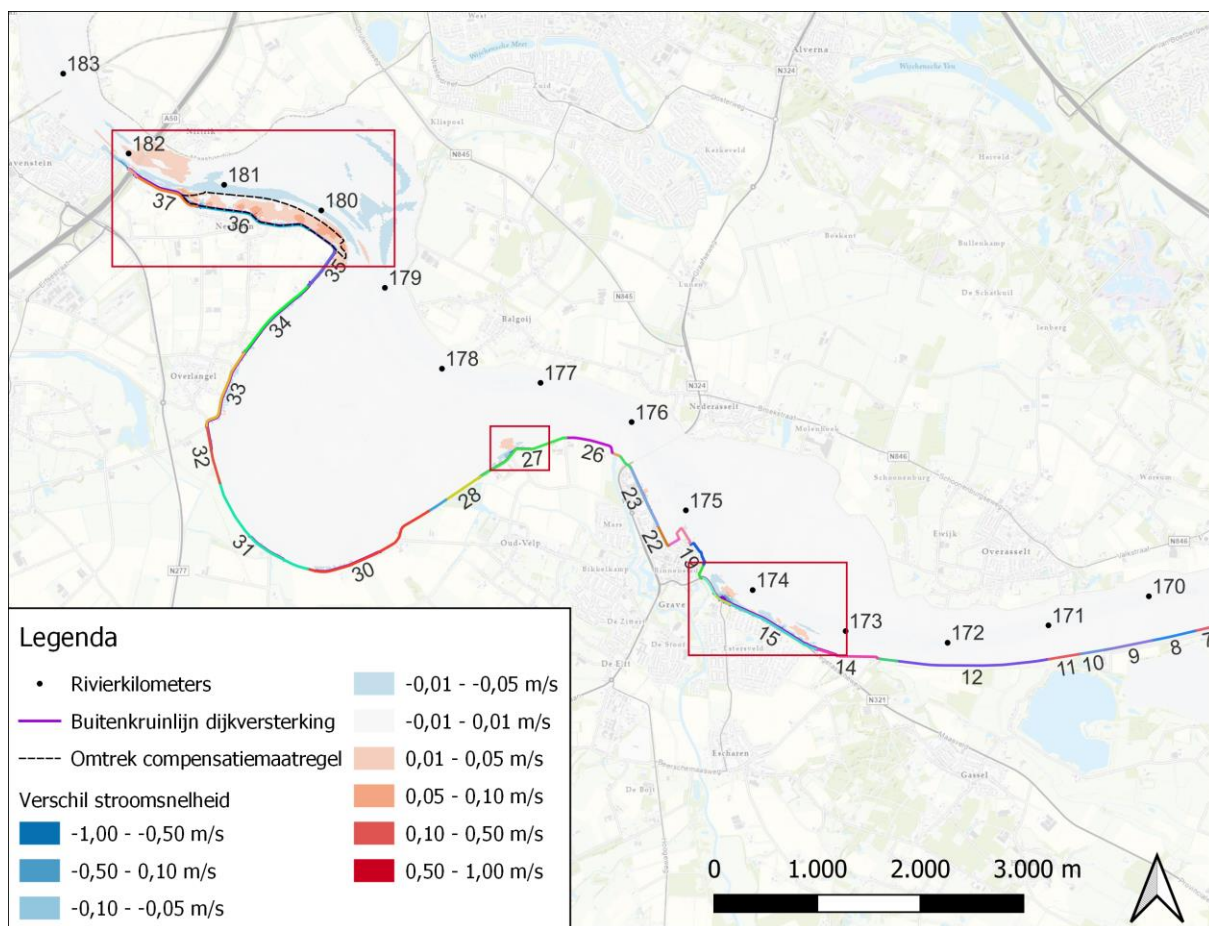
Om dit criterium te beoordelen, is gebruik gemaakt van de berekeningsresultaten voor de hoogwaterreferentie (4.100 m³/s bij Borgharen). Dit wordt voorgeschreven door het RBK omdat in dit afvoerscenario naar verwachting de grootste stroomsnelheden optreden.

Figuur 4-3 toont de stroomsnelheid en Figuur 4-4 de stroomsnelheidsverandering tussen de situatie met de dijkversterkingen en de compensatiemaatregel en de projectreferentie. Hierin is te zien dat er op de meeste locaties geen significante stroomsnelheidsverandering optreedt. Figuur 4-5 en Figuur 4-6 tonen dezelfde figuren voor details op drie locaties. Deze veranderingen zijn als volgt:

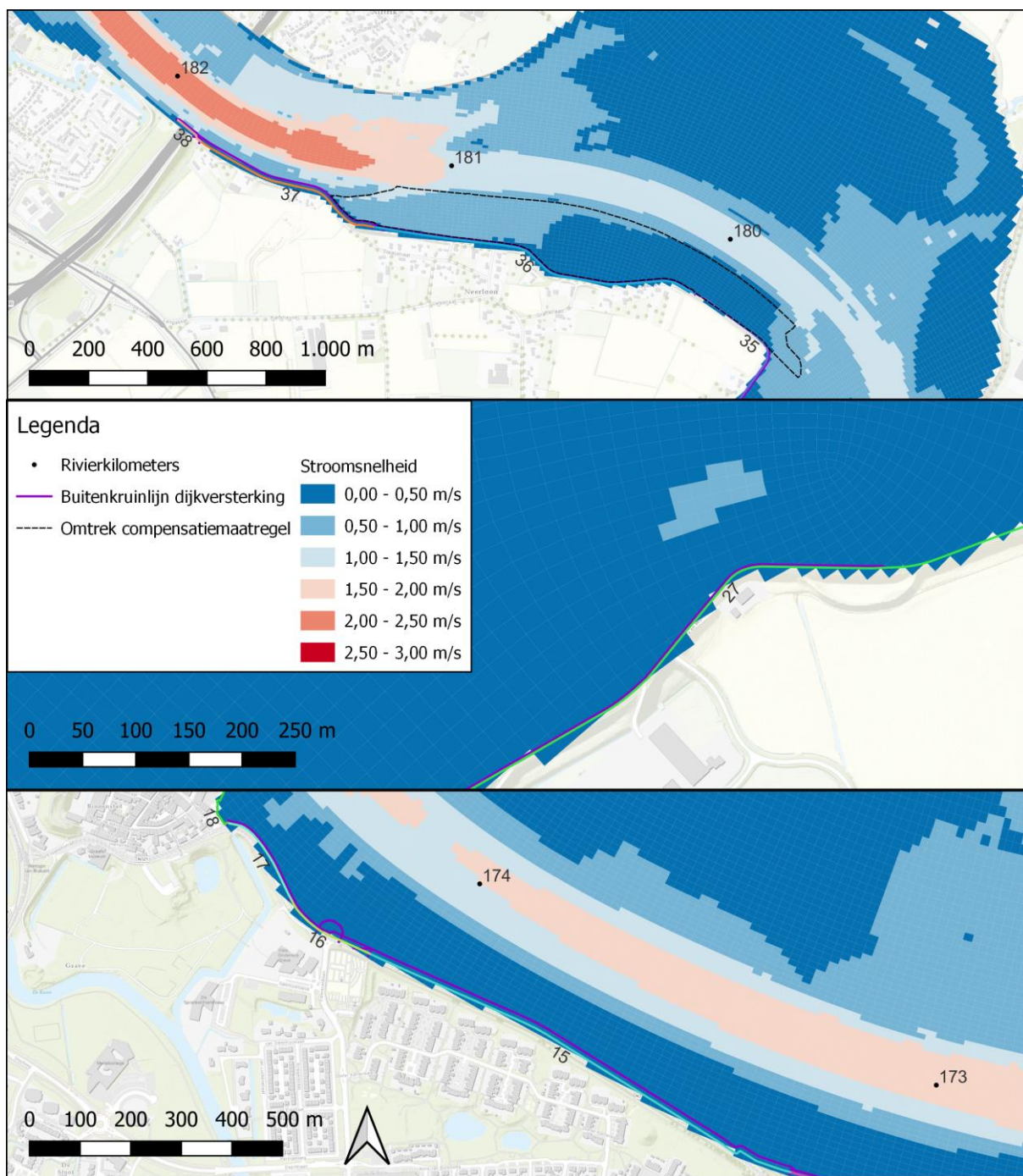
- De compensatiemaatregel onttrekt afvoer uit de hoofdgeul. Hierdoor neemt de stroomsnelheid in het zomerbed naast de verlaagde uiterwaarden iets af met maximaal -0,05 m/s. De stroomsnelheid in de uiterwaarden neemt toe met maximaal +0,12 m/s. Gemiddeld is de toename in de uiterwaard +0,05 m/s. De stroomsnelheid in de uiterwaarden is in de ontwerpsituatie gemiddeld ongeveer 0,60 m/s en maximaal 1,20 m/s (Figuur 4-5).
- Aan het benedenstroomse uiteinde van de verlaagde uiterwaard stroomt het water door een flessenhals (ter hoogte van dijkvak 38). Hier neemt de stroomsnelheid in de hoofdgeul en over de uiterwaarden aan de noordzijde iets toe (maximaal +0,02 m/s). De stroomsnelheid is hier in de ontwerpsituatie maximaal 2,25 m/s. De toename is dus erg klein ten opzichte van de absolute stroomsnelheid.
- Bij de instroom van de Meander Keent zit een uitstulping in dijkvak 27. Door de rivierwaartse dijkversterking komt deze uitstulping verder de rivier in te liggen waardoor lokaal de stroomsnelheden worden beïnvloed tussen maximaal -0,27 en +0,04 m/s.
- Op de locatie van de rotonde van de N321 treedt een snelheidsverlaging op van maximaal -0,20 m/s, doordat de stroming hier geremd wordt door de rotonde en de oprijweg.



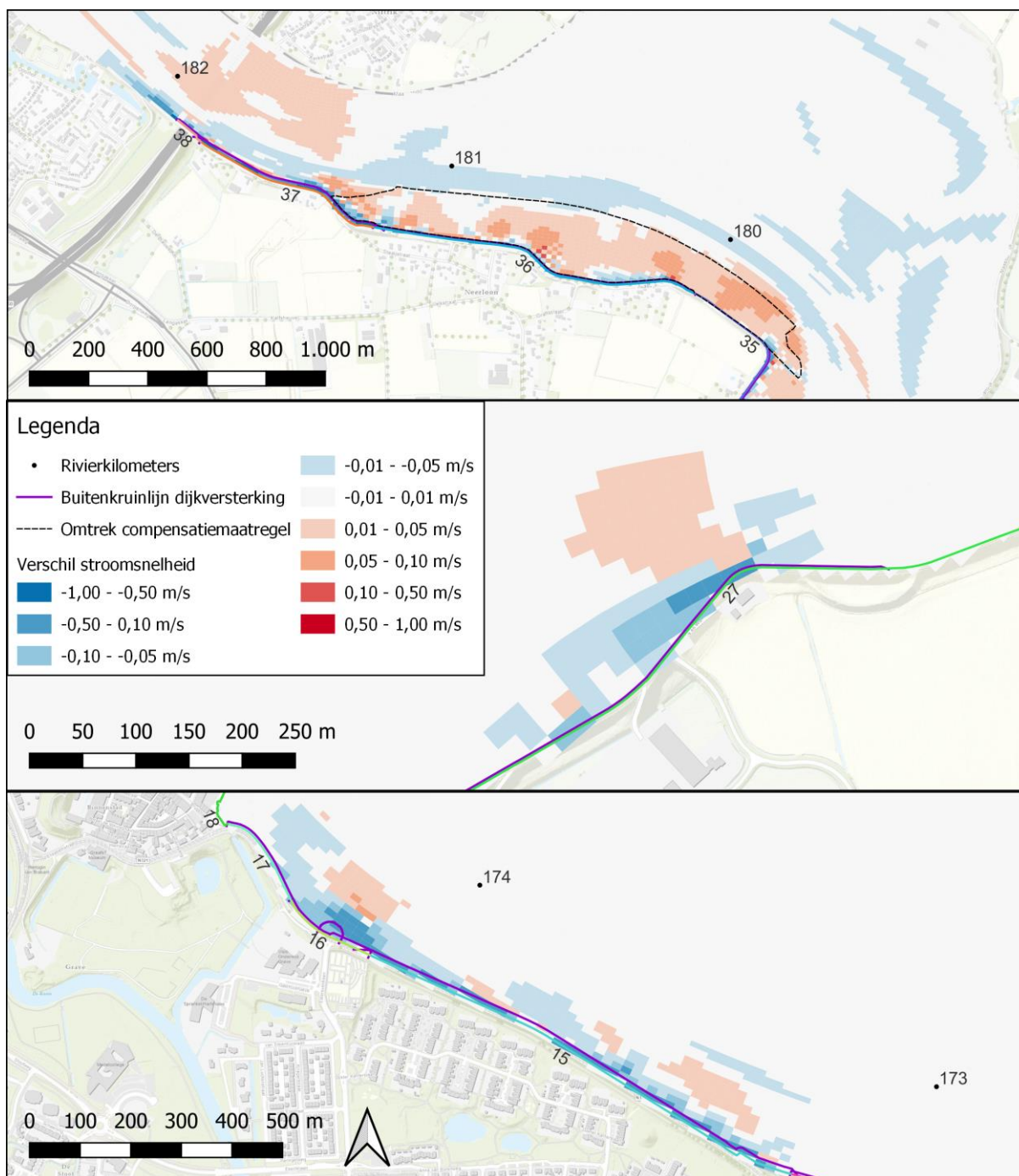
Figuur 4-3 Stroomsnelheid voor de variant met dijkversterkingen en de compensatiemaatregel (CuRa_VO_maneerl_a2) bij een afvoer van $4.100 \text{ m}^3/\text{s}$ (hoogwaterreferentie) bij Borgharen. Eenzelfde figuur van de projectreferentie is opgenomen in Bijlage B (Figuur 6-51). Figuur 4-5 toont ingezoomde kaarten van de locaties die zijn aangeduid met een rood kader.



Figuur 4-4 Verskil in stroomsnelheid tussen de variant met dijkversterkingen en de compensatiemaatregel (CuRa_VO_maneerl_a2) en de projectreferentie (CuRa_REF_a2) bij een afvoer van $4.100 \text{ m}^3/\text{s}$ (hoogwaterreferentie) bij Borgharen. Figuur 4-6 toont ingezoomde kaarten van de locaties die zijn aangeduid met een rood kader.

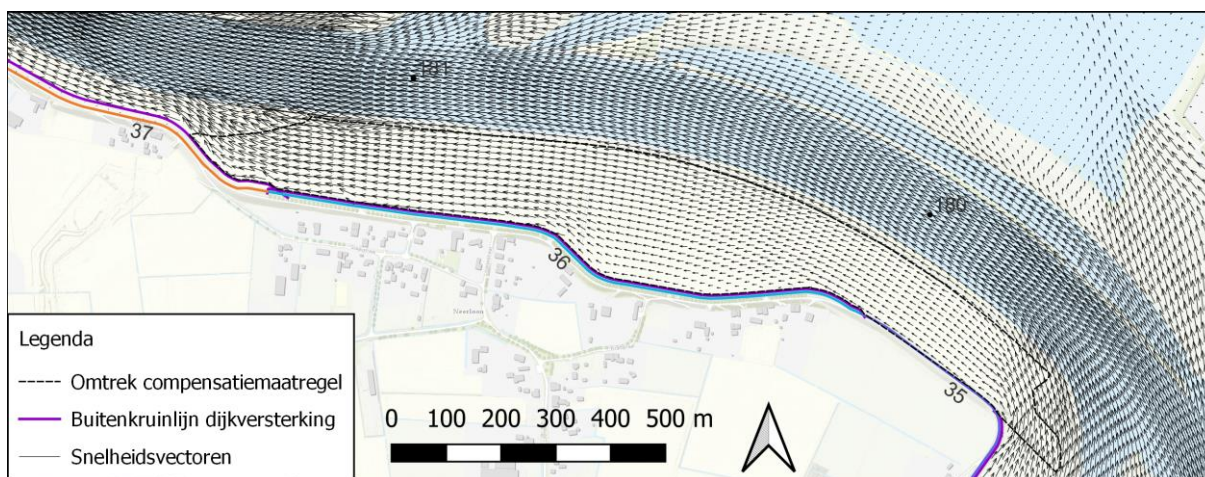


Figuur 4-5 Stroomsnelheid voor de variant met dijkversterkingen en de compensatiemaatregel (CuRa_VO_maneerl_a2) bij een afvoer van $4.100 \text{ m}^3/\text{s}$ (hoogwaterreferentie) bij Borgharen op drie locaties waar stroomsnelheidsverschillen optreden ten opzichte van de projectreferentie (zie Figuur 4-4). De locaties zijn aangeduid in Figuur 4-3.



Figuur 4-6 Verskil in stroomsnelheid tussen de variant met dijkversterkingen en de compensatiemaatregel (CuRa_VO_maneerl_a2) en de projectreferentie (CuRa_REF_a2) bij een afvoer van 4.100 m³/s (hoogwaterreferentie) bij Borgharen op drie locaties waar snelheidsveranderingen optreden. De locaties zijn aangeduid in Figuur 4-4.

Figuur 4-7 toont stroomsnelheidsvectoren bij de situatie met de dijkversterkingen en de compensatiemaatregel. De stroomsnelheidsvectoren geven de richting van de stroming weer. De richting van de stroming wordt niet significant aangepast, doordat de uiterwaard in zijn geheel verlaagd wordt en de stroming niet wordt geconcentreerd in een geul.



Figuur 4-7 Stroomsnelheidsvectoren voor de variant met dijkversterkingen en de compensatiemaatregel (CuRa_VO_maneeerl_a2) bij een afvoer van $4.100 \text{ m}^3/\text{s}$ (hoogwaterreferentie) bij Borgharen.

Conclusie: Er is een klein effect op de stroomsnelheid in en naast de uiterwaarden waar de compensatiemaatregel ligt. De verschillen in stroomsnelheid en stroomrichting zijn echter minimaal.

4.2.3 Stroombeeld in de vaarweg (2.3)

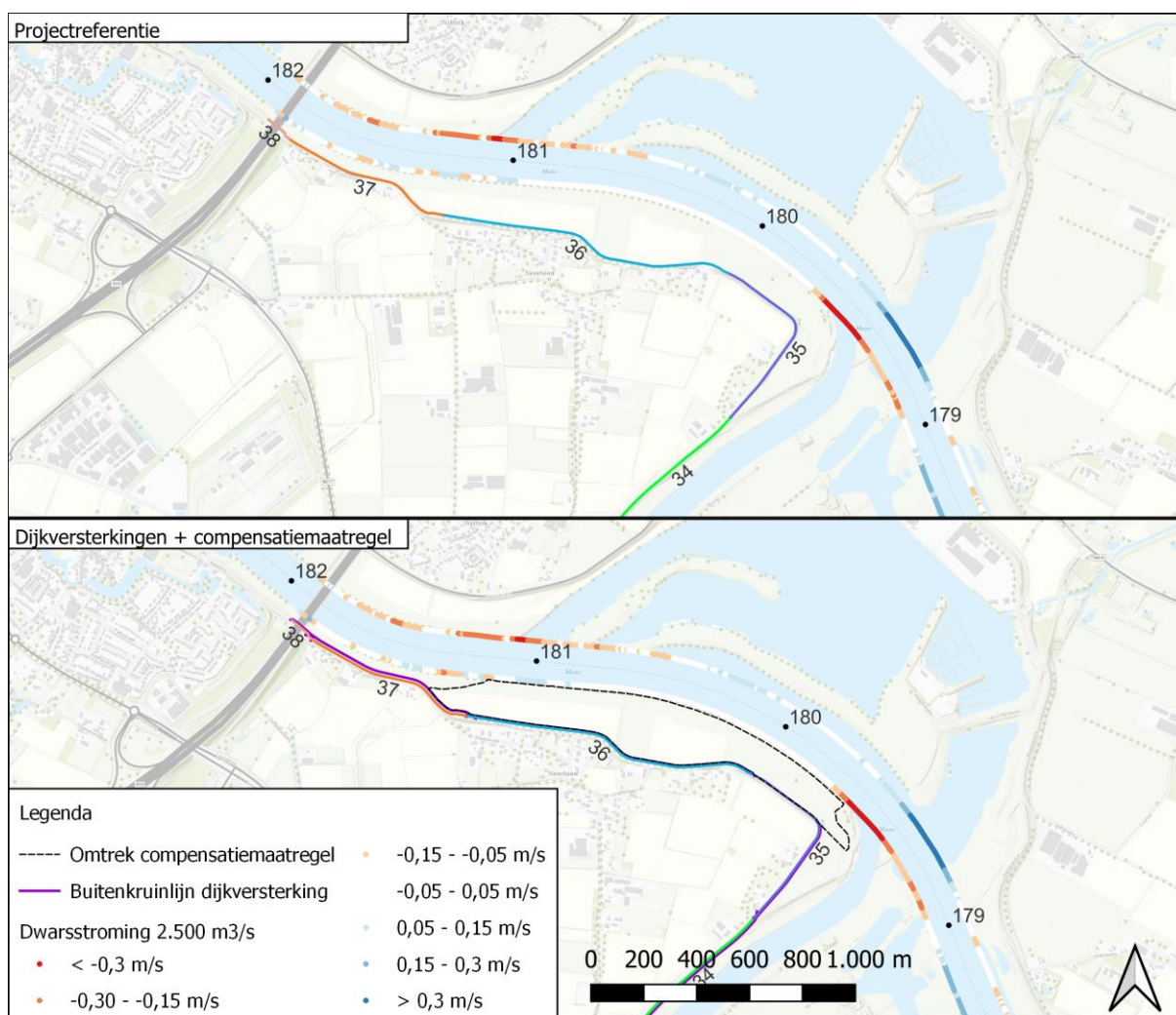
De rivierwaartse dijkversterkingen hebben geen significante invloed op het stroombeeld in de vaarweg (minder dan $0,01 \text{ m/s}$). De uiterwaardverlaging heeft mogelijk wel invloed op het stroombeeld in de vaarweg en dit is daarom getoetst.

Het is relevant om te toetsen op afvoeren waarbij de uiterwaard meestroomt en de scheepvaart op de Maas nog niet gestremd is. De uiterwaard stroomt mee bij een afvoer van $2.200 \text{ m}^3/\text{s}$ (zie paragraaf 4.2.1). Bij een afvoer van $2.300 \text{ m}^3/\text{s}$, wordt de scheepvaart op de Maas gestremd. Omdat gekozen moet worden uit de aangeleverde randvoorwaarden is gekozen de analyse uit te voeren voor een afvoer van $2.500 \text{ m}^3/\text{s}$. Deze afvoer is hoger dan de afvoer waarbij de scheepvaart gestremd wordt, maar de laagste afvoer waarbij de uiterwaard meestroomt.

Figuur 4-8 toont de dwarsstroming langs de vaarweg voor de referentiesituatie en voor het ontwerp met dijkversterkingen en de uiterwaardverlaging. Over het grootste deel van de uiterwaarden is de dwarsstroming kleiner dan $0,05 \text{ m/s}$. Enkele punten langs de uiterwaard hebben zowel in de referentie als de variant een dwarsstroming van $0,15 \text{ m/s}$ die door de uiterwaardverlaging niet noemenswaardig beïnvloed wordt. Direct benedenstrooms van de maatregel neemt de dwarsstroming toe naar maximaal $0,16 \text{ m/s}$.

In vergelijking met de omgeving zijn deze dwarsstromingen niet ongewoon. Direct bovenstrooms van de maatregel is de uitstroming van de meander bij Keent waar in de referentie de stroomsnelheden al groter zijn dan $0,43 \text{ m/s}$. Ook de oude Maasarm aan de rechteroever heeft stroomsnelheden tot $0,38 \text{ m/s}$.

Conclusie: Benedenstrooms van de compensatiemaatregel treden lokaal dwarsstromingen op van maximaal $0,16 \text{ m/s}$. In overleg met de rivierbeheerder moet besloten worden of de dwarsstromingen toelaatbaar zijn.



Figuur 4-8 Dwarsstroming langs de oever van de rivier bij een afvoer van 2.500 m³/s voor de projectreferentie (CuRa_REF_a2) (boven) en voor de variant met dijkversterkingen en de compensatiemaatregel (CuRa_VO_maneerl_a2) (onder). Positieve waarden (blauw) geven een uitstroom aan, van zomer- naar winterbed. Negatieve waarden (rood) geven een instroom aan, van winter- naar zomerbed.

4.2.4 Instroom retentiegebieden Maas (2.6)

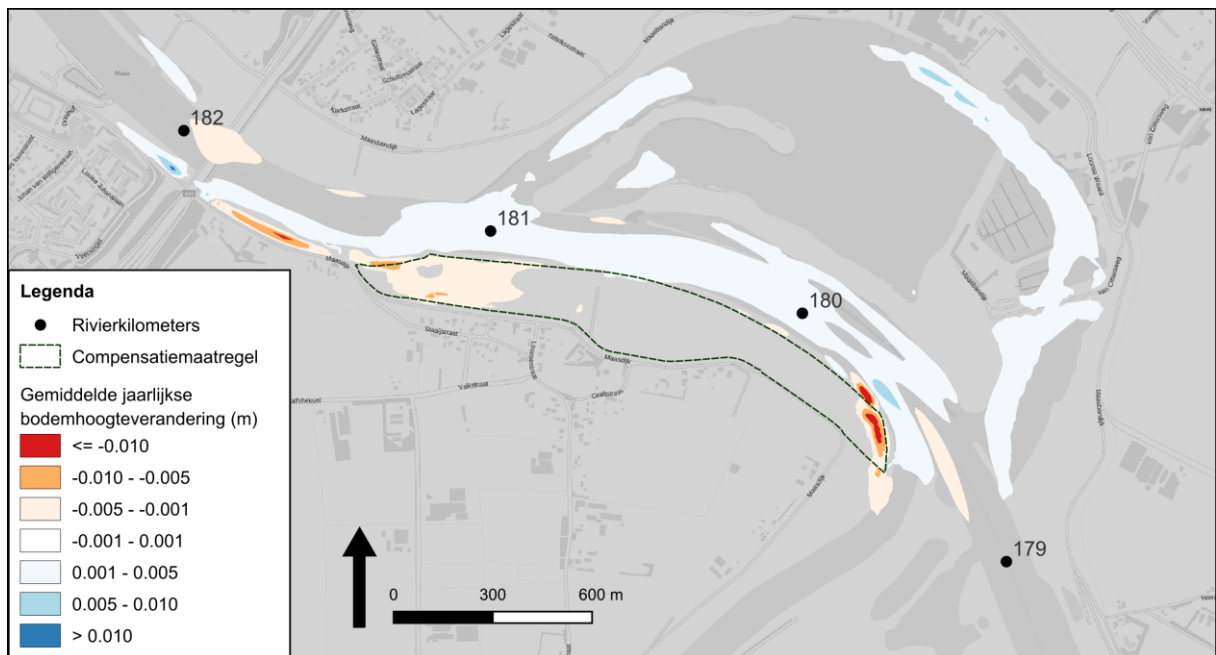
Het RBK 6.0 schrijft voor dat er getoetst moet worden of de instroom van retentiegebieden mogelijk verandert als gevolg van de ingrepen. Het eerste retentiegebied bovenstrooms van het project is Lob van Gennepe. De inlaat van het retentiegebied Lob van Gennepe ligt bij rivier-km 158. Het meest bovenstrooms gelegen dijkvak waarin de dijk buitenwaarts versterkt wordt is dijkvak 15 bij rivier-km 173. Het retentiegebied Lob van Gennepe ligt dus 15 km bovenstrooms van dit dijkvak. De compensatiemaatregel ligt bij rivier-km 180. Het retentiegebied Lob van Gennepe ligt 22 km bovenstrooms van de compensatiemaatregel.

Error! Reference source not found. t/m Figuur 6-59 in Bijlage E tonen de waterstandseffecten in bij stationaire afvoeren 1.700, 2.100, 2.500 en 4.100 m³/s. In alle afvoersituatie is het effect van de ingrepen op de waterstand bij rivier-km 158 minder dan 1 mm. Dit is een verandering van de waterstand dat valt binnen de foutmarge van het modelinstrumentarium. Er kan geconcludeerd worden dat er geen significant waterstandseffect is ter hoogte van de inlaat van het retentiegebied Lob van Gennepe. Er zijn daarom geen aanvullende dynamische berekeningen nodig.

Conclusie: De ingrepen hebben geen effect op de werking van de retentiegebieden.

4.3 Morfologische effecten

De morfologische effecten zijn ingeschat met de vuistregels uit D-FAST MI. In Figuur 4-9 is de gemiddelde jaarlijkse veranderingen in de bodemhoogte weergegeven. Dit wordt voor het zomerbed en de uiterwaard in onderstaande secties geanalyseerd.



Figuur 4-9 Inschatting van de gemiddelde jaarlijkse bodemhoogteverandering volgens de vuistregels in D-FAST MI. Veranderingen kleiner dan 1 mm zijn niet weergegeven.

4.3.1 Sedimentatie en erosie van het zomerbed (+ oevers) (3.1)

In het ontwerp worden er geen ingrepen gedaan in het zomerbed. Het is echter mogelijk dat de ingrepen in het winterbed invloed hebben op sedimentatie en erosie in het zomerbed. Dit is hieronder toegelicht en getoetst.

Sedimentatie in het zomerbed

Langs de uiterwaardverlaging treedt mogelijk lichte sedimentatie op. Inschattingen met D-FAST MI (Figuur 4-9) geven een maximale jaarlijkse sedimentatie van 0,007 m bij de uitstroming van de oude Maasarm van Keent. Gemiddeld langs dijkvak 35 tot 36 is dit slechts 0,002 m. Dit wordt veroorzaakt doordat een groter deel van de afvoer door de uiterwaarden stroomt, waardoor de sedimenttransportcapaciteit in het zomerbed afneemt. Het effect is zo klein vanwege de volgende redenen:

- De uiterwaard inundeert bij een afvoer van ongeveer 2.200 m³/s, waardoor enkel bij hogere afvoeren effect ontstaat op de sedimenthuishouding. Deze afvoeren hebben een herhalingsstijd van ongeveer tien jaar, waardoor de invloed van deze hoge afvoeren op de morfologie slechts beperkt is.⁴
- Ook tijdens deze hoge afvoeren zijn de veranderingen van de stroomsnelheden in het zomerbed klein: de maximale afname van de stroomsnelheid in het zomerbed is 0,05 m/s bij een afvoer van 4.100 m³/s (Figuur 4-4).

Conclusie: Er is een kleine sedimentatie in het zomerbed van gemiddeld 0,002 m per jaar. Dit heeft een zeer klein effect op het baggeronderhoud en wordt daarom beoordeeld als verwaarloosbaar.

⁴ In de D-FAST MI berekeningen is uitgegaan dat de uiterwaard ook bij een afvoer van 2.100 m³/s al meestroomt. Zie Bijlage F.

Erosie in het zomerbed

Waar de uiterwaard uitstroomt in het zomerbed, kan erosie ontstaan door de plotselinge toename in de afvoer en sedimenttransportcapaciteit. Uit de inschattingen met D-FAST MI (Figuur 4-9) volgt echter dat deze erosie niet waarneembaar is in de berekeningen.

- Een kleine sedimentatie (maximaal 0,002 m) ter hoogte van de Maasbrug A50 wordt veroorzaakt door de rivierwaartse dijkverplaatsing van dijkvak 38. Deze kleine sedimentatie heeft geen effect op de Maasbrug A50.

Conclusie: De erosie benedenstrooms van de compensatiemaatregel is niet waarneembaar.

4.3.2 Sedimentatie en erosie van de uiterwaard en nevengeulen (3.2)

Er is mogelijk sprake van sedimentatie en erosie in de uiterwaarden waar een buitenwaartse versterking plaatsvindt en bij de uiterwaardverlaging. Dit is hieronder beschreven en getoetst. Er is een risico op sedimentatie of erosie wanneer de stroomsnelheid en daarmee de sedimenttransportcapaciteit respectievelijk afneemt of toeneemt. Ook hier wordt gebruik gemaakt van de resultaten met D-FAST MI (Figuur 4-9). Dit is buiten het theoretische toepassingsbereik, omdat de grootte van de bodemverandering berekend wordt voor een alluviale rivierbodem. De rekenregels geven echter wel een waardevolle inschatting van locaties waar sedimentatie of erosie op kan treden. Daarnaast wordt in de analyse gekeken naar locaties met veranderingen in stromingsvectoren (zie ook paragraaf 4.2.2).

Naast de locaties die hieronder toegelicht worden, berekent D-FAST MI nergens bodemveranderingen groter dan 0,003 m.

Sedimentatie van de uiterwaard en nevengeulen

De locaties waar een verandering in de stroomsnelheid optreedt (zie Figuur 4-6) zijn nader geanalyseerd:

- Bij de rivierwaartse dijkverplaatsing bij dijkvak 38 (onder de Maasbrug A50) neemt de stroomsnelheid in de uiterwaard af en wordt sedimentatie verwacht (zie Figuur 4-9) van maximaal 0,020 m (uitgaande van een alluviale bodem). De werkelijke erosie is veel lager en heeft daarom geen effect op de stabiliteit van de Maasbrug A50.
- In Loonse Waard (de rechteroever bij Neerloon) neemt de stroomsnelheid af en hierdoor is sprake van sedimentatie. Door D-FAST MI wordt dit ingeschat op maximaal 0,007 m (uitgaande van een alluviale bodem).
- Bij de instroom van de Meander Keent zit een uitstulping in dijkvak 27 (zie Figuur 4-6). Door de rivierwaartse dijkversterking komt deze uitstulping verder de rivier in te liggen. Hierdoor treedt een stroomsnelheidsverlaging op benedenstrooms van de uitstulping (maximaal 0,27 m/s). Doordat de stroomsnelheid hier nog steeds laag is, berekent D-FAST MI hier geen sedimentatie.
- Op de locatie van de rotonde van de N321 treedt een snelheidsverlaging op, doordat de stroming hier geremd wordt door de rotonde en de oprijweg. Hier treedt naar verwachting lichte sedimentatie op na de val van het hoogwater.

Conclusie: Door de ingrepen treedt er mogelijk lichte sedimentatie op bij dijkvak 38, in de Loonse Waard en bij de oprijweg van de rotonde van de N321 (dijkvak 16).

Erosie van de uiterwaard en nevengeulen

De locaties waar een verandering in de stroomsnelheid optreedt (zie Figuur 4-6) zijn nader geanalyseerd:

- In de uiterwaardverlaging van compensatiemaatregel Neerloon is een kleine toename in de stroomsnelheid (maximaal 0,12 m/s) en daardoor is sprake van erosie (zie Figuur 4-9). Dit is het best merkbaar bij de in- en uitstroming van de uiterwaard. Bij de instroming wordt een erosie ingeschat op maximaal 0,026 m en bij de uitstroming op maximaal 0,010 m (uitgaande van een alluviale bodem). Omdat de stroomsnelheid in de ontwerpsituatie laag is (maximaal 1,2 m/s bij de uitstroom van de uiterwaarden), is de verwachte erosie vermoedelijk beperkter.
- Bij de instroom van de Meander Keent zit een uitstulping in dijkvak 27 (zie Figuur 4-6). Door de rivierwaartse dijkversterking komt deze uitstulping verder de rivier in te liggen. Hierdoor treedt een stroomsnelheidsverhoging op langs de uitstulping (maximaal 0,02 m/s). De stroomsnelheid is hier echter nog steeds laag (maximaal 0,53 m/s). D-FAST MI berekent hierdoor geen erosie.
- Op de locatie van de rotonde van de N321 treedt in de uiterwaard naast de rotonde een snelheidsverhoging op (zie Figuur 4-6), doordat het water om de oprijweg heen moet stromen. De maximale snelheidsverhoging is 0,06 m/s. De stroomsnelheid is op deze locatie echter dusdanig laag (0,36 m/s) dat hier geen erosie wordt berekend door D-FAST MI.

Conclusie: Door de ingrepen is er weinig tot geen toename van de erosie in de uiterwaard bij Neerloon.

5. Conclusies

Het ontwerp van de dijkversterking en de compensatiemaatregel zijn getoetst aan de hand van het RBK 6.0.

Tabel 5-1 geeft een samenvatting van de resultaten zoals beschreven in Hoofdstuk 4. De beoordelingsaspecten zijn als volgt beoordeeld:

- **Goed**
- **Vermoedelijk goed (ter beoordeling van de rivierbeheerder RWS-ZN)**
- **Slecht**

Tabel 5-1 Samenvatting resultaten toetsing ontwerp met dijkversterkingen en compensatiemaatregel conform het RBK 6.0.

#	Rivierkundig beoordelingsaspect	Samenvatting resultaten	
1.1	Hoogwaterreferentie in de as van de rivier: geen waterstandsverhoging	De compensatiemaatregel compenseert de waterstandsverhoging door de dijkversterkingen ruimschoots. Er treedt een benedenstroomse piek op, maar de totale waterstandsverlaging is drie keer zo groot als de waterstandsverhoging.	●
1.2	Hoogwaterreferentie buiten de as van de rivier: geen waterstandsverhoging bij de primaire waterkering	De waterstandseffecten buiten de as van de rivier zijn minimaal. Of de kleine waterstandseffecten acceptabel zijn, is ter beoordeling van de rivierbeheerder.	●
2.1	Inundatiefrequentie van de uiterwaard	Er is enkel een lokaal effect van de ingrepen op de inundatiefrequentie. De gemiddelde inundatiefrequentie van de uiterwaarde waar de compensatiemaatregel ligt is nu ongeveer 14 jaar en neemt toe tot ongeveer 10 jaar. Dit heeft naar verwachting geen effect op de gebruiksfunctie.	●
2.2	Stroombeeld in de uiterwaard: verandering in stroomrichting en -snelheid	Er is een klein effect op de stroomsnelheid in en naast de uiterwaarden waar de compensatiemaatregel ligt. De verschillen in stroomsnelheid en stroomrichting zijn echter minimaal.	●
2.3	Stroombeeld in vaarweg: verandering in dwarsstroming bij rand vaarweg	Benedenstrooms van de compensatiemaatregel treden lokaal dwarsstromingen op van maximaal 0,16 m/s. In overleg met de rivierbeheerder moet besloten worden of de dwarsstromingen toelaatbaar zijn.	●
2.6	Instroom retentiegebieden Maas	De ingrepen hebben geen effect op de werking van de retentiegebieden.	●
3.1	Sedimentatie en erosie van het zomerbed (+ oevers)	Er is een kleine afname van de stroomsnelheid in het zomerbed, dus er is een risico op sedimentatie. Het verschil in stroomsnelheid is echter klein (0,05 m/s bij een afvoer van 4.100 m ³ /s) en komt zelden voor, waardoor sedimentatie in het zomerbed verwaarloosbaar is. De erosie benedenstrooms van de compensatiemaatregel zal beperkt zijn.	●
3.2	Sedimentatie en erosie van uiterwaard en nevengeulen	Door de ingrepen treedt er mogelijk sedimentatie op in de uiterwaarden langs dijkvak 27 en bij de oprijweg van de rotonde van de N321 (dijkvak 16). De ingrepen in het ontwerp veroorzaken geen significante erosie in de uiterwaarden.	●

6. Referenties

6.1 Richtlijnen

- [1] Rivierkundig beoordelingskader voor ingrepen in de Grote Rivieren, versie 6.0, Rijkswaterstaat, 23 januari 2023;
- [2] Dijkversterking langs de grote rivieren. Redeneerlijn buitendijk (rivierwaarts) versterken, Factsheet Hoogwaterbeschermingsprogramma, versie maart 2018.
- [3] Handreiking Beleidslijn Grote Rivieren, Geactualiseerde versie 2019, 15 juli 2019

6.2 Beleidsdocumenten

6.3 Projectdocumenten

- [4] Werkpakketbeschrijving WSB.23 Integraal ontwerp: Opstellen rapport Compensatie rivier v1.0;
- [5] Notitie weerdverlaging. WSP Memo WAB013032-D-071, definitief, versie 4, datum 5 juli 2022;
- [6] WP15 Rivierkundige effecten buitendijks versterken Kansrijke alternatieven, WSP Memo WAB013032-D-061, versie 2. Datum 20 april 2022 (noot: in de memo zelf staat onjuist 20 april 2021);
- [7] Nota voorkeursalternatief dijkverbetering Cuijk-Ravenstein, WSAM, Strootman & WSP, d.d. 18 november 2022;
- [8] Review voorkeursalternatief voor dijkversterking Cuijk-Ravenstein, 90% Concept ter review. RWS-ZN memo, d.d. 20 juli 2022;
- [9] WP1 Conditionering: Rivierkunde, WSP Memo WAB013032-D-007, d.d. 20 november 2020;
- [10] WP15 Gevoeligheidsanalyse Weerdverlaging Rivierkunde, WSP Memo WAB013032-D-008, d.d. 20 november 2020;
- [11] Ontwerprapport Dijk, WSP Rapport WAB013032-D-033, versie 7, d.d. 11 november 2022;
- [12] Ontwerprapport kunstwerken (WP25), WSP Rapport WAB013032-D-037, versie 7.0, d.d. 17-06-2022;
- [13] Ontwerprapport uiterwaardverlaging Neerloon (WP 23.3), Sweco, versie D1.0, d.d. maart 2025

6.4 Conditionerende onderzoeken

- [14] B&O-modellen en deelmodellen Maas, Deltares rapport 11208053-002-ZWS-0005, 10-07-2023;
- [15] Proof-of-Concept vergunningverlening met G6 modellen Maas, Royal HaskoningDHV. Referentie BI7740-RHD-ZZ-XX-RP-Z-0001, 11 november 2022;
- [16] Proof of Concept G6 vergunningsmodellen Rijn, Witteveen+Bos, referentie 132735/22-016.168, 11 november 2022;
- [17] Proof of Concept G6 deelmodellen Rijn, Witteveen+Bos, referentie 135748/23-003.648, 28 februari 2023;
- [18] WSP Rivierkundige beoordeling – RBK 5.0 Planuitwerking Salmsteke uiterwaard, WSP Projectnummer WAB010194, documentnummer 050 v5, Mei-21;
- [19] Verschilanalyse overstap zesde-generatie modellering Maas, Effect software, rekenrooster, parameters & modelconcepten, schematisatie en randvoorwaarden. Deltares rapport 11209233-002-ZWS-0001, d.d. 12-10-2023, v0.11.

6.5 Data

- [20] Waqua-modellen en Baselineschematisaties uit VK-fase, aangeleverd door WSP.

Bijlage A. Rivierwaartse verplaatsing buitendijks versterken

Tabel 6-1 toont een samenvatting van de rivierwaartse verplaatsingen per dijkvak en waar nodig per deel van het dijkvak. De manier waarop de rivierwaartse verplaatsingen geïmplementeerd zijn is in deze bijlage per dijkvak toegelicht.

Tabel 6-1 Samenvatting van de berekende rivierwaartse verplaatsing van de dijk voor de delen van de dijk waar een buitenwaartse versterking plaatsvindt

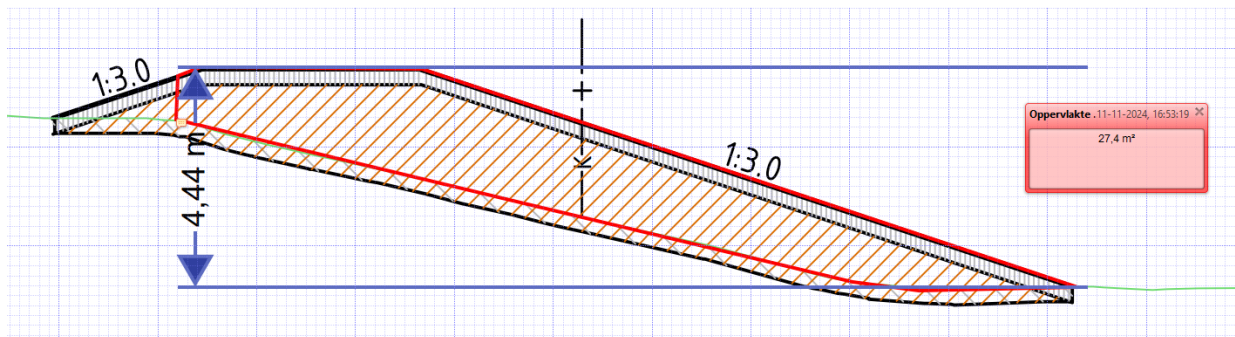
Dijkvak	Kenmerk	Deel van het dijkvak	Oppervlakte (m ²)	Hoogte (m)	Rivierwaartse verplaatsing (m)
14		Vanaf A250,5	27,4	4,44	6,17
15	N321	Gehele dijkvak	40,2	3,91	10,27
16	N321	Ten oosten van de rotonde	45,9	4,61	9,95
16	N321	Rotonde			Maatwerk
16	N321	Ten westen van de rotonde	19,3	3,90	4,94
17	N321	Gehele dijkvak	19,3	3,90	4,94
19	Kademuur Grave	Gehele dijkvak			1,00
23	Koninginnedijk	Gehele dijkvak	4,7	3,36	1,40
27		Van A294 tot A299	8,3	4,00	2,08
30		Van 312,5 tot A319	19,0	4,00	4,75
31		Van A322,5 tot A326	25,4	5,54	4,58
32		Vanaf A336	18	3,63	4,96
33		Gehele dijkvak	39,4	5,29	7,45
34		Gehele dijkvak	53,1	6,48	8,19
35		Tot A359,5	14,9	3,12	4,78
36		Gehele dijkvak	21,3	3,95	5,39
37		Gehele dijkvak	71	5,38	13,20
38		Voor brug	64,7	5,29	12,23
38		Onder brug	31,6	5,24	6,03
38		Benedenstrooms van brug	26,3	5,26	5,00

Dijkvak 14

Dijkvak 14 kent een rivierwaartse verplaatsing vanaf dijkpaal A250,5 (Figuur 6-1). Het dwarsprofiel bij dijkpaal A253 kent de grootste rivierwaartse verplaatsing en is daarmee maatgevend (Figuur 6-2). Deze maatgevende verplaatsing (6,17 m) is toegepast voor het deel van het dijkvak met een rivierwaartse verplaatsing (Figuur 6-3).



Figuur 6-1 Dijkvak 14 - Overgang van geen buitenwaartse verplaatsing naar een buitenwaartse verplaatsing van de dijk



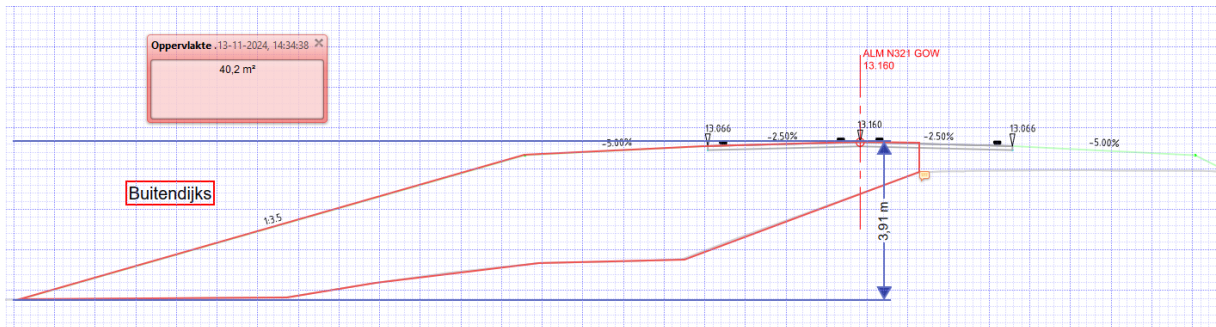
Figuur 6-2 Dijkvak 14 - Bepaling rivierwaartse verplaatsing dwarsprofiel A253 (6,17 m)



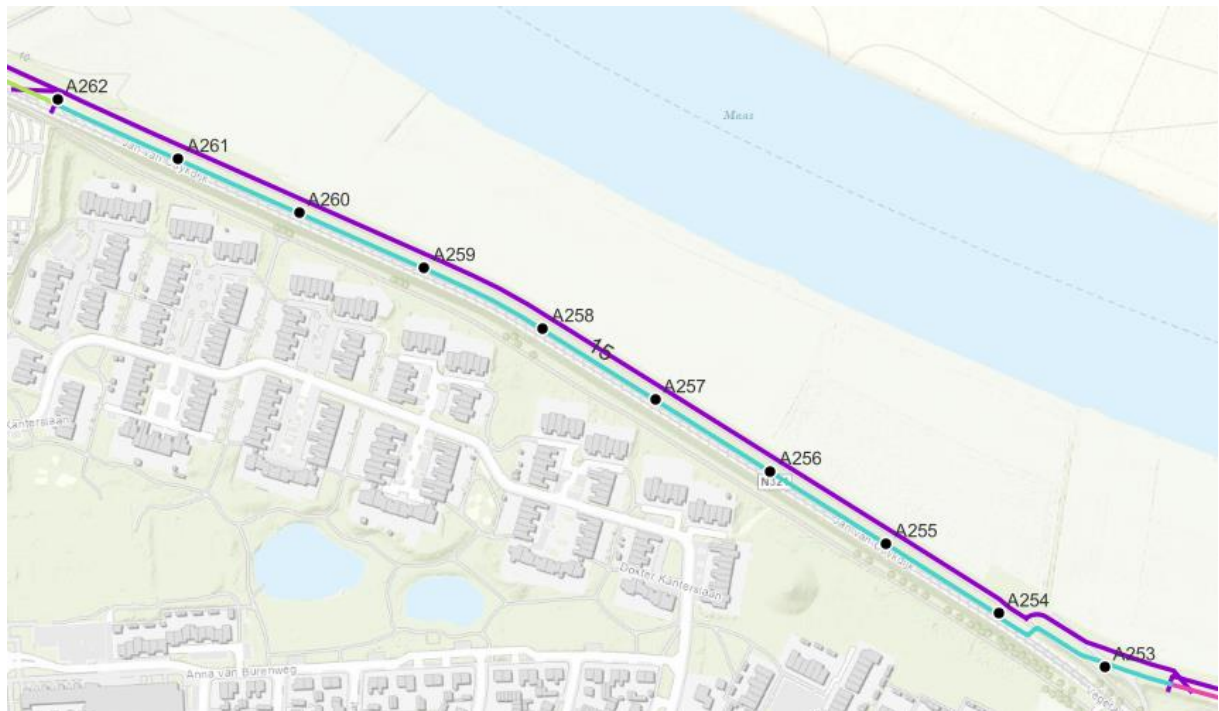
Figuur 6-3 Dijkvak 14 – De buitenkruinlijn in de referentie (roze) en de nieuwe hoogwatervrije lijn (paars). De dijkpalen zijn aangegeven als punten.

Dijkvak 15

De N321 loopt over de dijk in dijkvak 15, 16 en 17. Er zijn twee dwarsprofielen beschikbaar voor dijkvak 15, ter hoogte van dijkpaal A255 en A259. Het dwarsprofiel ter hoogte van A255 kent de grootste rivierwaartse verplaatsing (Figuur 6-4). De rivierwaartse verplaatsing van de dijk in dit dwarsprofiel (10,27 m) is toegepast op het gehele dijkvak (Figuur 6-5). De hoogwatervrije lijn sluit aan weerszijden aan op de hoogwatervrije lijn van dijkvak 14 en dijkvak 16.



Figuur 6-4 Dijkvak 15 - Bepaling rivierwaartse verplaatsing dwarsprofiel A255 (10,27 m)



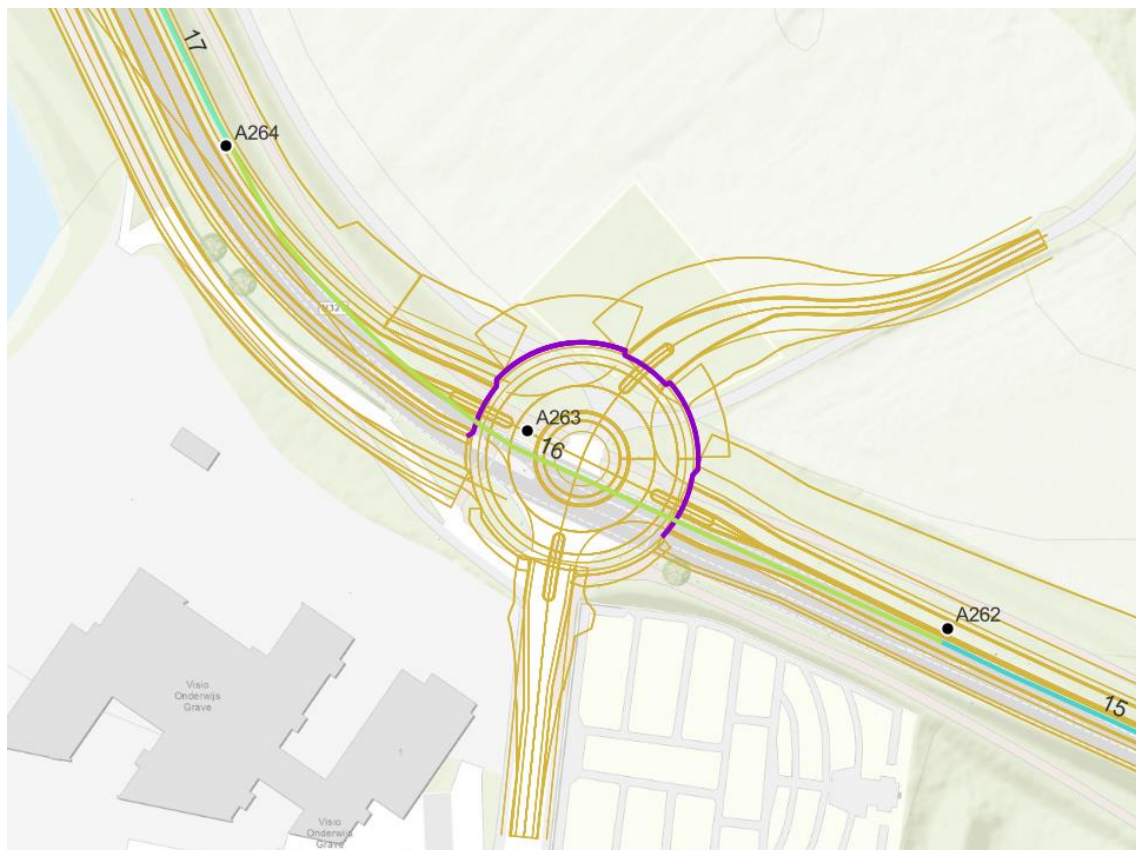
Figuur 6-5 Dijkvak 15 - De buitenkruinlijn in de referentie (aqua) en de nieuwe hoogwatervrije lijn (paars). De dijkpalen zijn aangegeven als punten.

Dijkvak 16

De N321 loopt over de dijk in dijkvak 15, 16 en 17. In dijkvak 16 is in het ontwerp een rotonde ingebracht, met een oprijweg naar de rotonde vanaf de uiterwaarden. De rivierwaartse verplaatsing van dijkvak 16 bestaat daarom uit vier delen: de rotonde, de toegangsweg naar de rotonde vanuit de uiterwaarden en de rivierwaartse verplaatsing van de dijk ten oosten en ten westen van de rotonde.

Rotonde

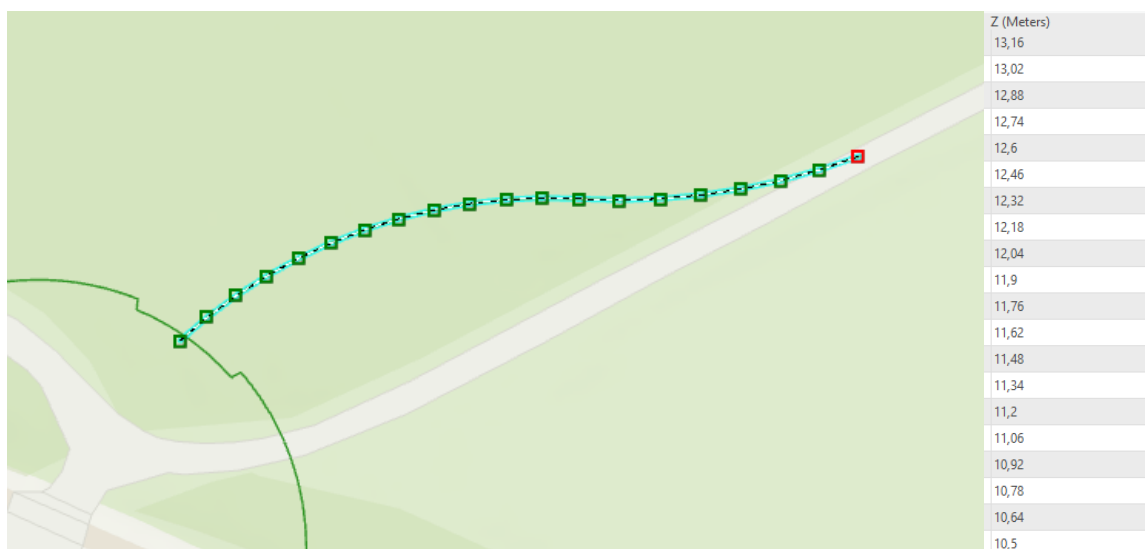
De methode van het toepassen van een representatieve verplaatsing voor het gehele dijkvak werkt niet goed op de locatie van de rotonde omdat de vorm van de rotonde invloed heeft op de stroming. Daarom is de buitenzijde van de rotonde ingebracht als een aparte hoogwatervrije lijn. Hiervoor is de buitenberm van de rotonde aangehouden (Figuur 6-6).



Figuur 6-6 Dijkvak 16 - Ontwerp van de rotonde (gele lijnen) en de hoogwatervrije lijn rond de rotonde zoals deze is opgenomen in het model (paars)

Toegangsweg

In het huidige ontwerp loopt er een toegangsweg van de uiterwaarden naar de rotonde. Deze stijgt in hoogte vanaf het maaiveld in de uiterwaarden (ongeveer NAP +10,50 m) naar de hoogte van de dijk (NAP 13,16 m). De toegangsweg is opgenomen in het model door middel van een overlaat (Figuur 6-7).

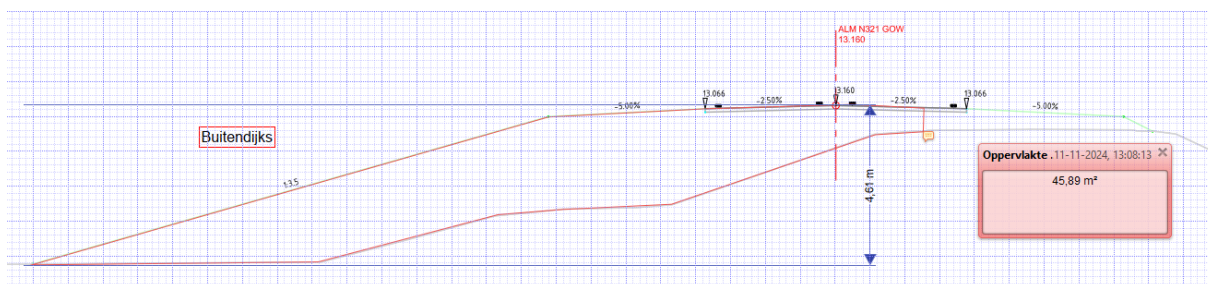


Figuur 6-7 Dijkvak 16 – Hoogte (m+NAP) van de punten van de overlaatsconstructie waarmee de toegangsweg tot de rotonde is geschematiseerd in het model. De hoogtes in de tabel horen bij de punten van links naar rechts.

Rivierwaartse verplaatsing dijk

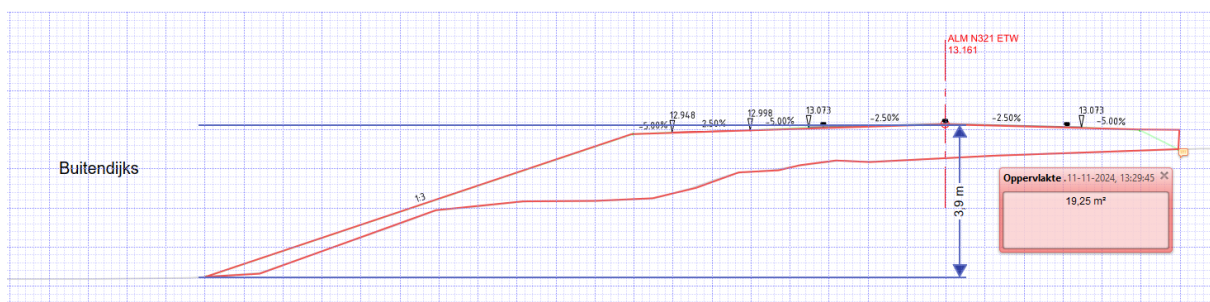
De rivierwaartse verplaatsing van de dijk naast de rotonde wordt op dezelfde manier meegenomen als voor de andere dijkvakken. Er is onderscheid gemaakt tussen het deel van het dijkvak ten oosten (bovenstrooms) en het deel ten westen (benedenstrooms) van de rotonde.

Er is geen dwarsprofiel beschikbaar binnen dit dijkvak voor het deel van de dijk ten oosten van de rotonde. Daarom is voor dit deel van het dijkvak het dwarsprofiel uit dijkvak 15 ter hoogte van dijkpaal A259 gebruikt (300 m bovenstrooms van dijkvak 16) (Figuur 6-8). De rivierwaartse verplaatsing van de dijk in dit dwarsprofiel is toegepast op het deel van het dijkvak ten oosten van de rotonde. De hoogwatervrije lijn sluit aan de bovenstroomse zijde aan op de hoogwatervrije lijn in dijkvak 15.



Figuur 6-8 Dijkvak 16 - Bepaling rivierwaartse verplaatsing deel van de dijk ten oosten van de rotonde (bovenstrooms), dwarsprofiel bij dijkpaal A259 (9,95 m)

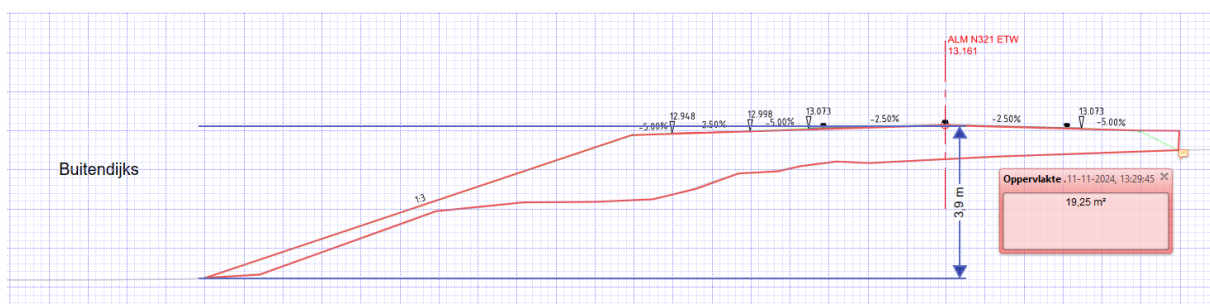
Er is één dwarsprofiel beschikbaar voor dijkvak 16, tussen dijkpaal A263 en A264, net ten westen van de rotonde (Figuur 6-9). De rivierwaartse verplaatsing van de dijk in dit dwarsprofiel is toegepast op het deel van het dijkvak ten westen van de rotonde. De hoogwatervrije lijn is aan de benedenstroomse zijde aangesloten op de hoogwatervrije lijn in dijkvak 17.



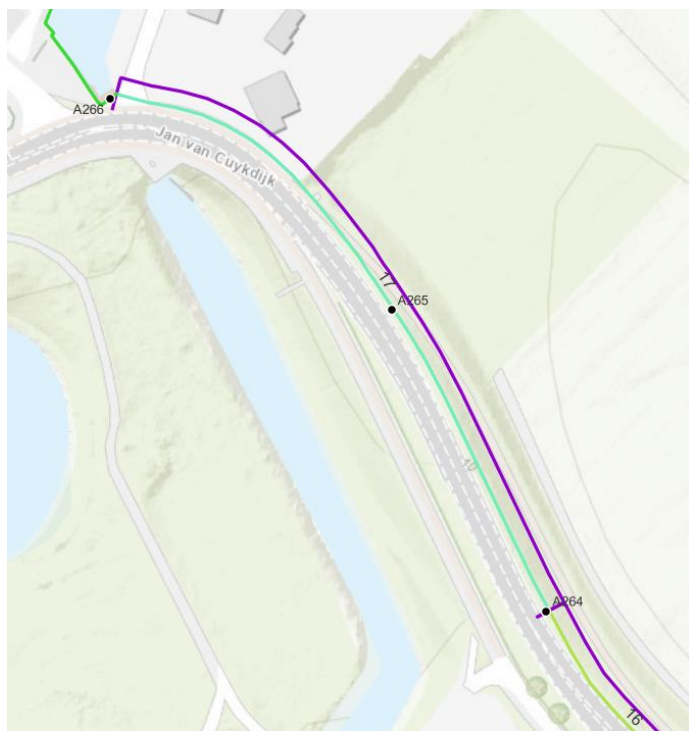
Figuur 6-9 Dijkvak 16 - Bepaling rivierwaartse verplaatsing deel van de dijk ten westen van de rotonde (benedenstrooms), dwarsprofiel tussen dijkpaal A263 en A264 (4,94 m)

Dijkvak 17

Er is geen dwarsprofiel beschikbaar binnen dijkvak 17. Daarom is voor een benadering van het ontwerp van dijkvak 17 het dwarsprofiel in dijkvak 16 ten westen (benedenstrooms) van de rotonde gebruikt (Figuur 6-9). De rivierwaartse verplaatsing van de dijk in dit dwarsprofiel is toegepast op het hele dijkvak. De hoogwatervrije lijn sluit aan de benedenstroomse zijde met een rechte hoek aan op de Oude Haven (Figuur 6-11).



Figuur 6-10 Dijkvak 17 - Bepaling rivierwaartse verplaatsing, dwarsprofiel tussen dijkpaal A263 en A264 (4,94 m). Gelijk aan Figuur 6-8.



Figuur 6-11 Dijkvak 17 - De buitenkruinlijn in de referentie (groen-blauw) en de nieuwe hoogwatervrije lijn (paars). De dijkpalen zijn aangegeven als punten.

Dijkvak 19

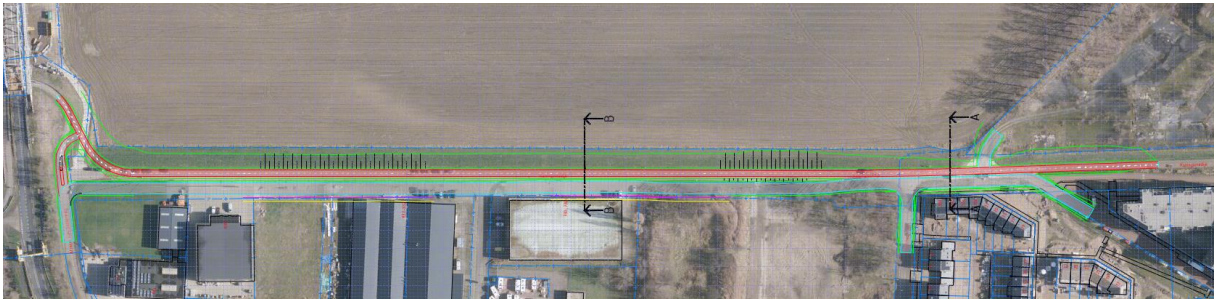
Het is nog niet volledig duidelijk of er (rivierwaartse) maatregelen getroffen worden in dijkvak 19. Indien de huidige kademuur afgekeurd wordt, dan zijn er meerdere opties om dit op te lossen. De oplossing met het grootste effect op de waterstand van de rivier is getoetst. Dit is een nieuwe constructie aan de buitenzijde van de huidige muur, die 1 m verder naar de rivier komt te staan dan de huidige muur. Daarom is er een rivierwaartse verplaatsing van 1 m opgenomen voor dijkvak 19 (Figuur 6-12).



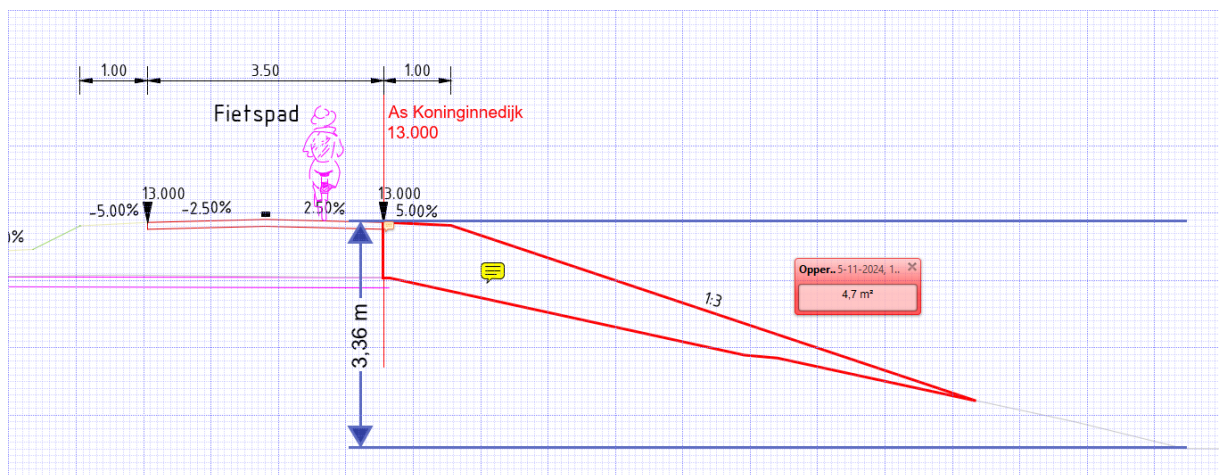
Figuur 6-12 Dijkvak 19 - De buitenkruinlijn in de referentie (blauw) en de nieuwe hoogwatervrije lijn (paars). De dijkpalen zijn aangegeven als punten.

Dijkvak 23

Dijkvak 23 kent een rivierwaartse verplaatsing over de gehele lengte van het dijkvak (Figuur 6-13). Het dwarsprofiel bij dijkspaal A280 heeft de grootste rivierwaartse verplaatsing en is daarmee maatgevend (Figuur 6-14). Deze maatgevende verplaatsing is toegepast voor het hele dijkvak (Figuur 6-15).



Figuur 6-13 Dijkvak 23 - Bovenaanzicht ontwerp



Figuur 6-14 Dijkvak 23 - Bepaling rivierwaartse verplaatsing dwarsprofiel bij dijkspaal A280 (dwarsprofiel 'B-B' in Figuur 6-13) (1,40 m)



Figuur 6-15 Dijkvak 23 - De buitenkruinlijn in de referentie (blauw) en de nieuwe hoogwatervrije lijn (paars). De dijkspalen zijn aangegeven als punten.



Figuur 6-16 Dijkvak 23 – de aansluiting op dijkvak 22 (bovenstrooms, links) en dijkvak 24 (benedenstrooms, rechts)

Dijkvak 27

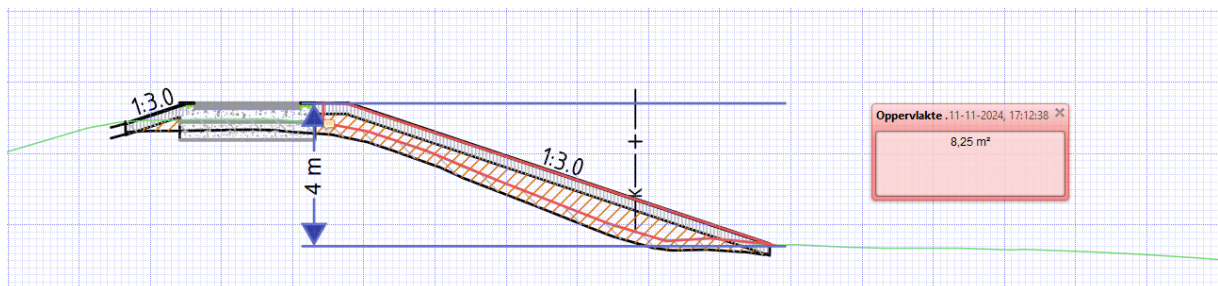
Dijkvak 27 kent een rivierwaartse verplaatsing vanaf dijkpaal A294 tot A296,5 en vanaf dijkpaal A299 (Figuur 6-17, Figuur 6-18). Om de modelinvoer te versimpelen, is voor het hele deel van het dijkvak vanaf dijkpaal A294 een rivierwaartse verplaatsing ingevoerd. Het dwarsprofiel bij dijkpaal A295 kent de grootste rivierwaartse verplaatsing en is daarmee maatgevend (Figuur 6-19). Deze maatgevende verplaatsing is toegepast voor het deel van het dijkvak vanaf dijkpaal A294 (Figuur 6-20).



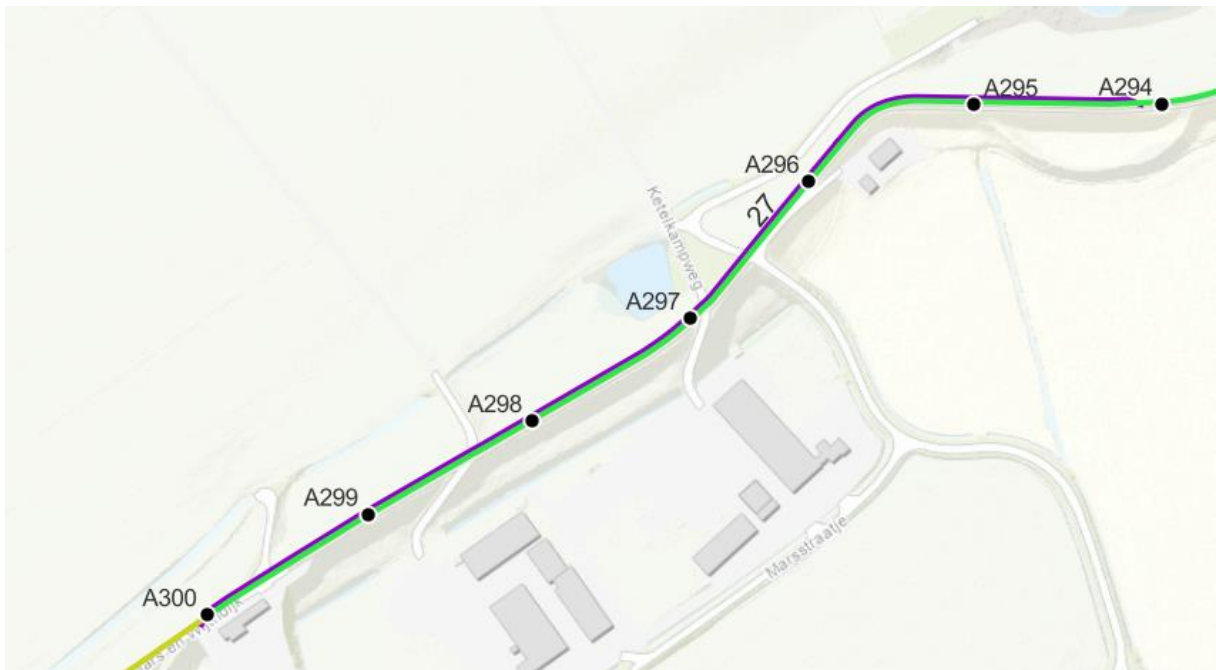
Figuur 6-17 Dijkvak 27 - Bovenaanzicht ontwerp oostelijk deel



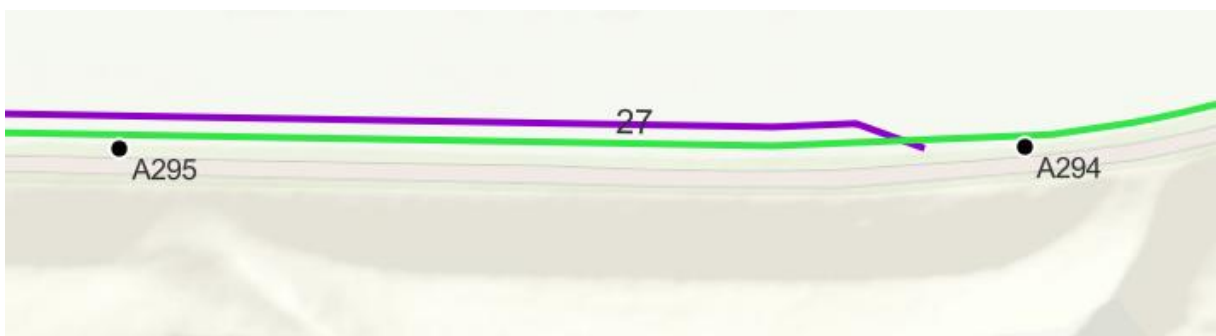
Figuur 6-18 Dijkvak 27 - Bovenaanzicht ontwerp westelijk deel



Figuur 6-19 Dijkvak 27 - Bepaling rivierwaartse verplaatsing, dwarsprofiel A295 (2,08 m)



Figuur 6-20 Dijkvak 27 - De buitenkruinlijn in de referentie (groen) en de nieuwe hoogwatervrije lijn (paars). De dijkpalen zijn aangegeven als punten.



Figuur 6-21 Dijkvak 27 – De aansluiting van de hoogwatervrije lijn op het bovenstroomse deel van dijkvak 27



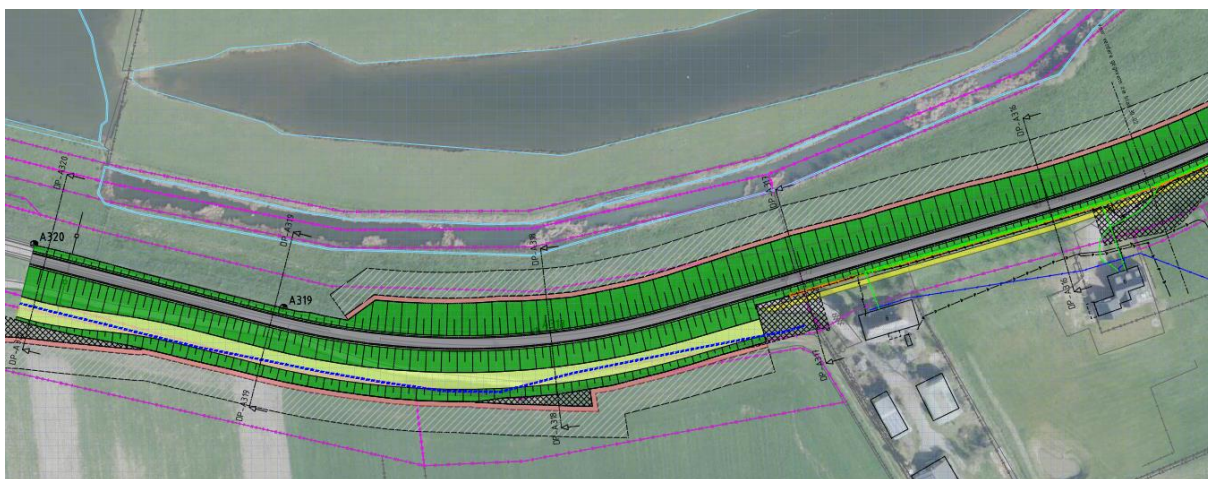
Figuur 6-22 Dijkvak 27 – De aansluiting van de hoogwatervrije lijn op dijkvak 28

Dijkvak 30

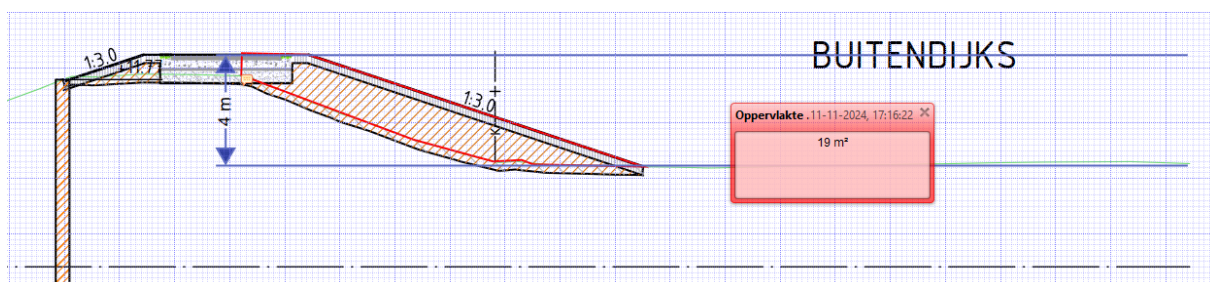
Dijkvak 30 kent een rivierwaartse verplaatsing vanaf dijkpaal A312,5 tot A319 (Figuur 6-23, Figuur 6-24). Het dwarsprofiel bij dijkpaal A315 kent de grootste rivierwaartse verplaatsing en is daarmee maatgevend (Figuur 6-25). Deze maatgevende verplaatsing is toegepast voor het deel van het dijkvak vanaf dijkpaal A312,5 (Figuur 6-26).



Figuur 6-23 Dijkvak 30 - Bovenaanzicht ontwerp oostelijk deel



Figuur 6-24 Dijkvak 30 - Bovenaanzicht ontwerp westelijk deel



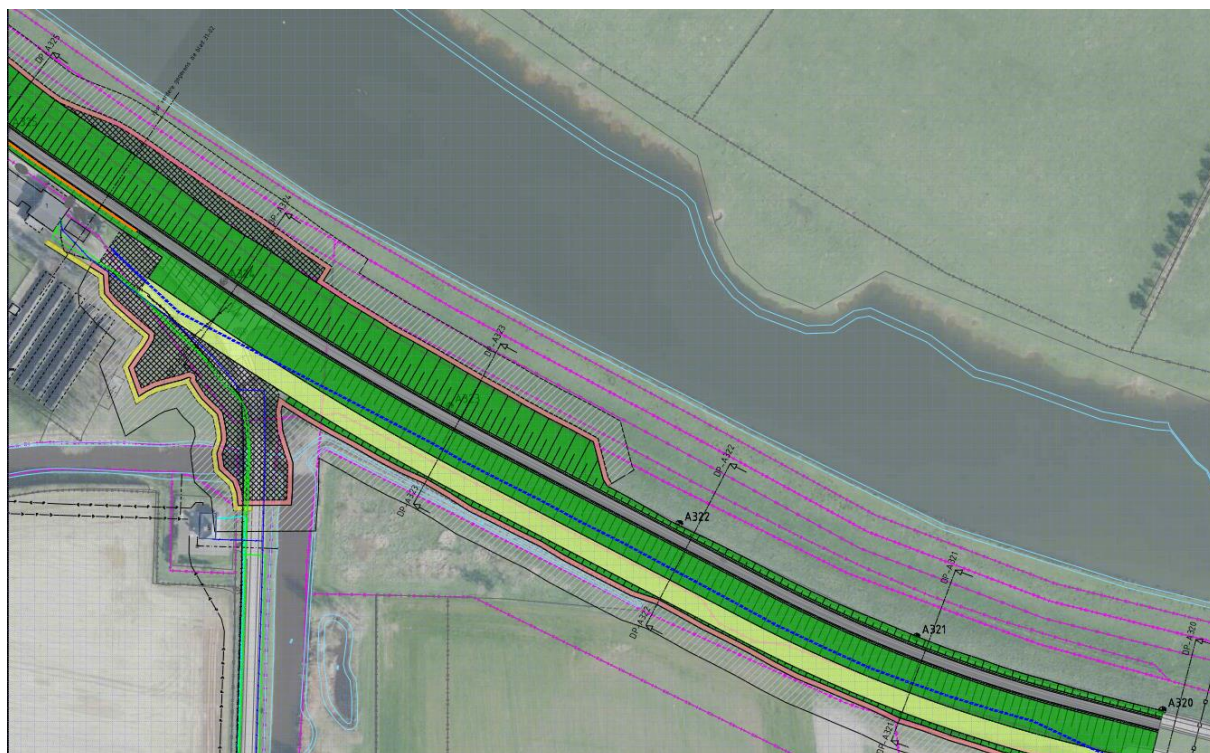
Figuur 6-25 Dijkvak 30 - Bepaling rivierwaartse verplaatsing, dwarsprofiel A315 (4,75 m)



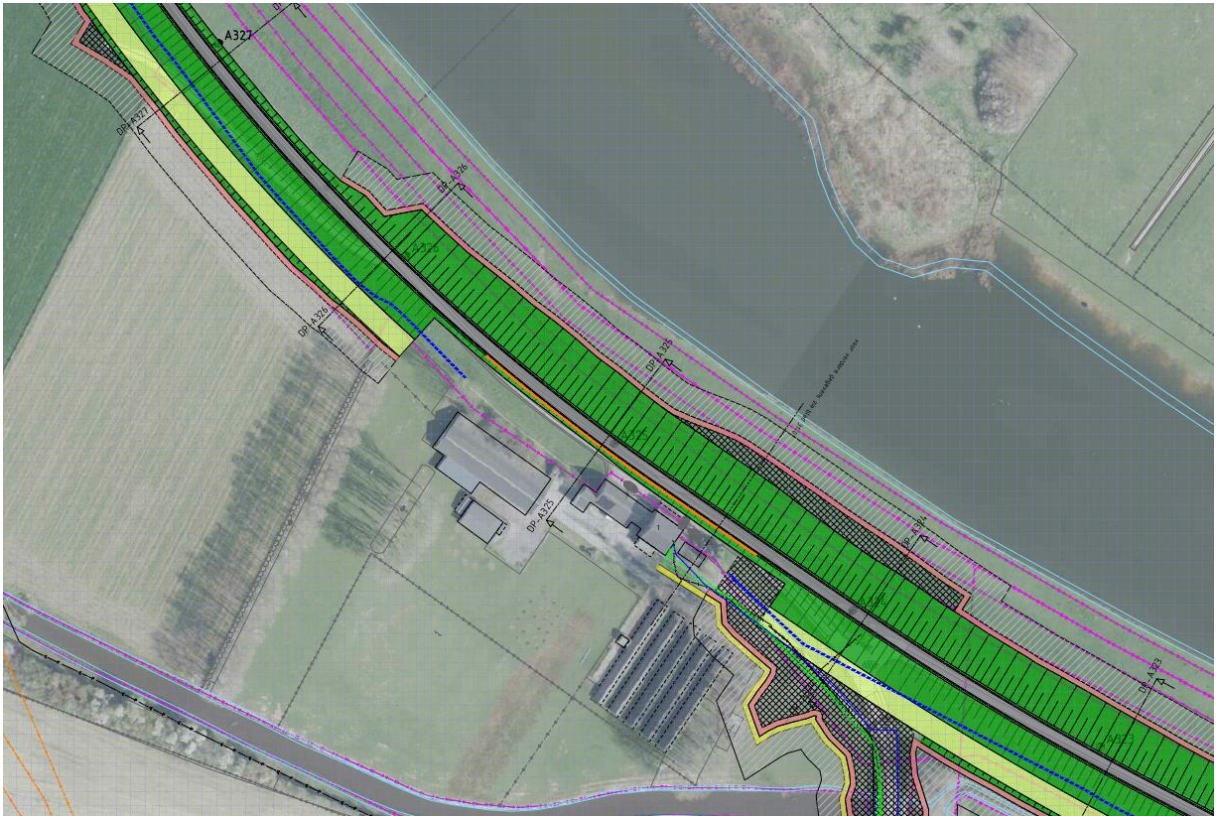
Figuur 6-26 Dijkvak 30 - De buitenkruinlijn in de referentie (rood) en de nieuwe hoogwatervrije lijn (paars). De dijkpalen zijn aangegeven als punten.

Dijkvak 31

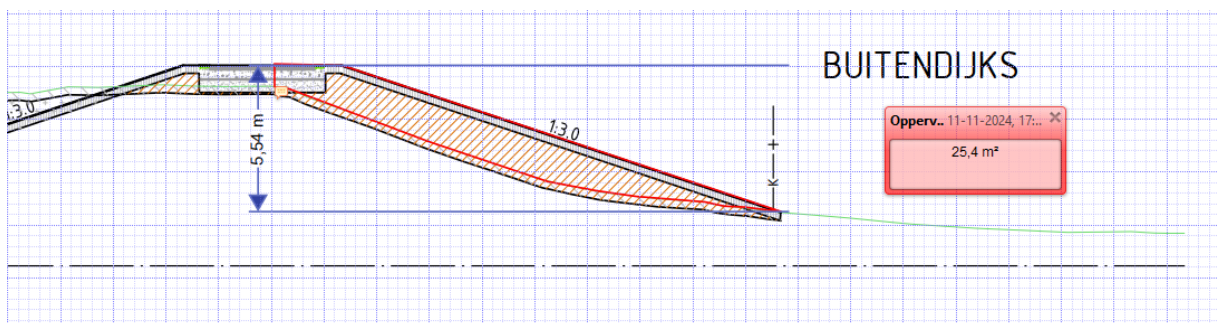
Dijkvak 31 kent een rivierwaartse verplaatsing vanaf dijkpaal A322,5 tot A326 (Figuur 6-27, Figuur 6-28). Het dwarsprofiel bij dijkpaal A324 kent de grootste rivierwaartse verplaatsing en is daarmee maatgevend (Figuur 6-29). Deze maatgevende verplaatsing is toegepast voor het deel van het dijkvak met een rivierwaartse verplaatsing (Figuur 6-30).



Figuur 6-27 Dijkvak 31 - Bovenaanzicht ontwerp oostelijk deel



Figuur 6-28 Dijkvak 31 - Bovenaanzicht ontwerp westelijk deel



Figuur 6-29 Dijkvak 31 - Bepaling rivierwaartse verplaatsing, dwarsprofiel A324 (4,58 m)



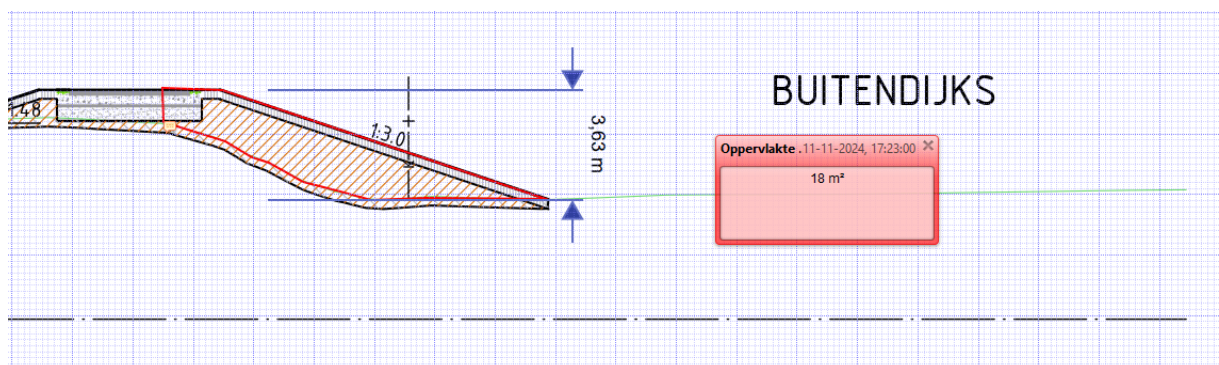
Figuur 6-30 Dijkvak 31 - De buitenkruinlijn in de referentie (aqua) en de nieuwe hoogwatervrije lijn (paars). De dijkpalen zijn aangegeven als punten.

Dijkvak 32

Dijkvak 32 kent een rivierwaartse verplaatsing vanaf dijkpaal 336 (Figuur 6-31). Het dwarsprofiel bij dijkpaal A338 heeft de grootste rivierwaartse verplaatsing en is daarmee maatgevend (Figuur 6-32). Deze maatgevende verplaatsing is toegepast voor het deel van het dijkvak met een rivierwaartse verplaatsing (Figuur 6-33). De hoogwatervrije lijn sluit aan de benedenstroomse zijde aan op de hoogwatervrije lijn van dijkvak 33.



Figuur 6-31 Dijkvak 32 - Bovenaanzicht ontwerp van het deel van het dijkvak met een rivierwaartse verplaatsing



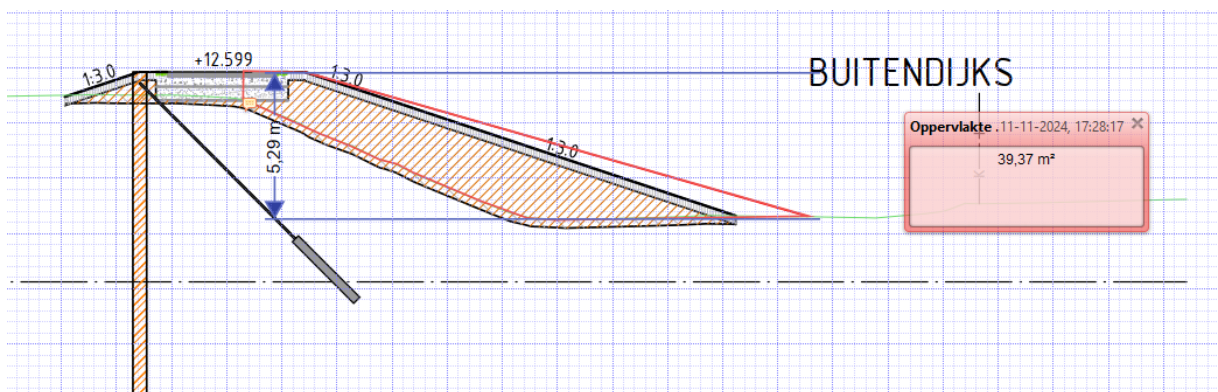
Figuur 6-32 Dijkvak 32 - Bepaling rivierwaartse verplaatsing, dwarsprofiel A338 (4,96 m)



Figuur 6-33 Dijkvak 32 - De buitenkruinlijn in de referentie (rood) en de nieuwe hoogwatervrije lijn (paars). De dijkpalen zijn aangegeven als punten.

Dijkvak 33

Dijkvak 33 kent een rivierwaartse verplaatsing over het gehele dijkvak. Het dwarsprofiel bij dijkpaal A344 heeft de grootste rivierwaartse verplaatsing en is daarmee maatgevend (Figuur 6-34). In het ontwerp is een talud van 1:3,0 opgenomen, maar dit is in een latere versie 1:3,5 geworden. Daarom is de oppervlakte bepaald aan de hand van een talud van 1:3,5 (rode lijn). De maatgevende verplaatsing is toegepast voor het gehele dijkvak (Figuur 6-35). De hoogwatervrije lijn sluit aan weerszijden aan op de hoogwatervrije lijn van dijkvak 32 en 34.



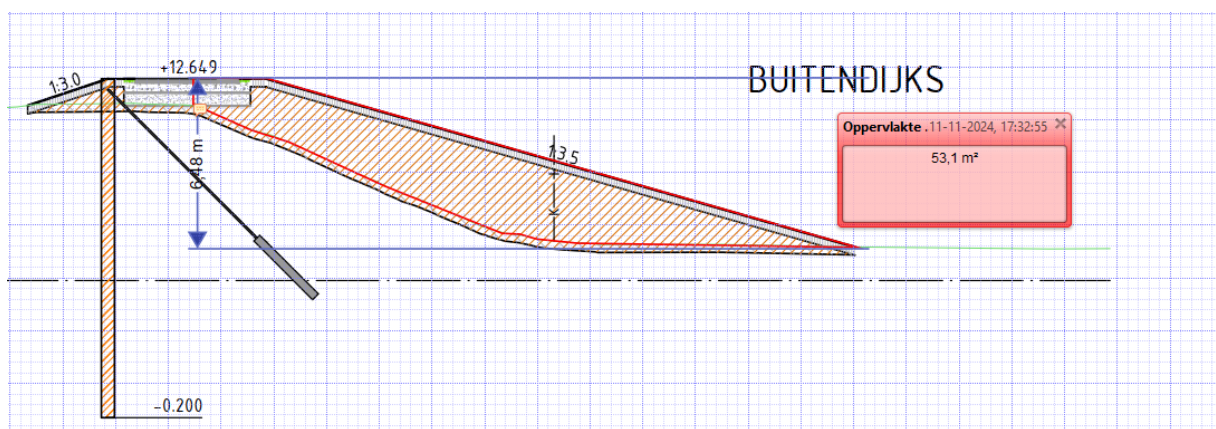
Figuur 6-34 Dijkvak 33 - Bepaling rivierwaartse verplaatsing, dwarsprofiel A344 (7,45 m). In het ontwerp is een talud van 1:3,0 opgenomen, maar dit is in een latere versie 1:3,5 geworden. Daarom is de oppervlakte bepaald aan de hand van een talud van 1:3,5 (rode lijn).



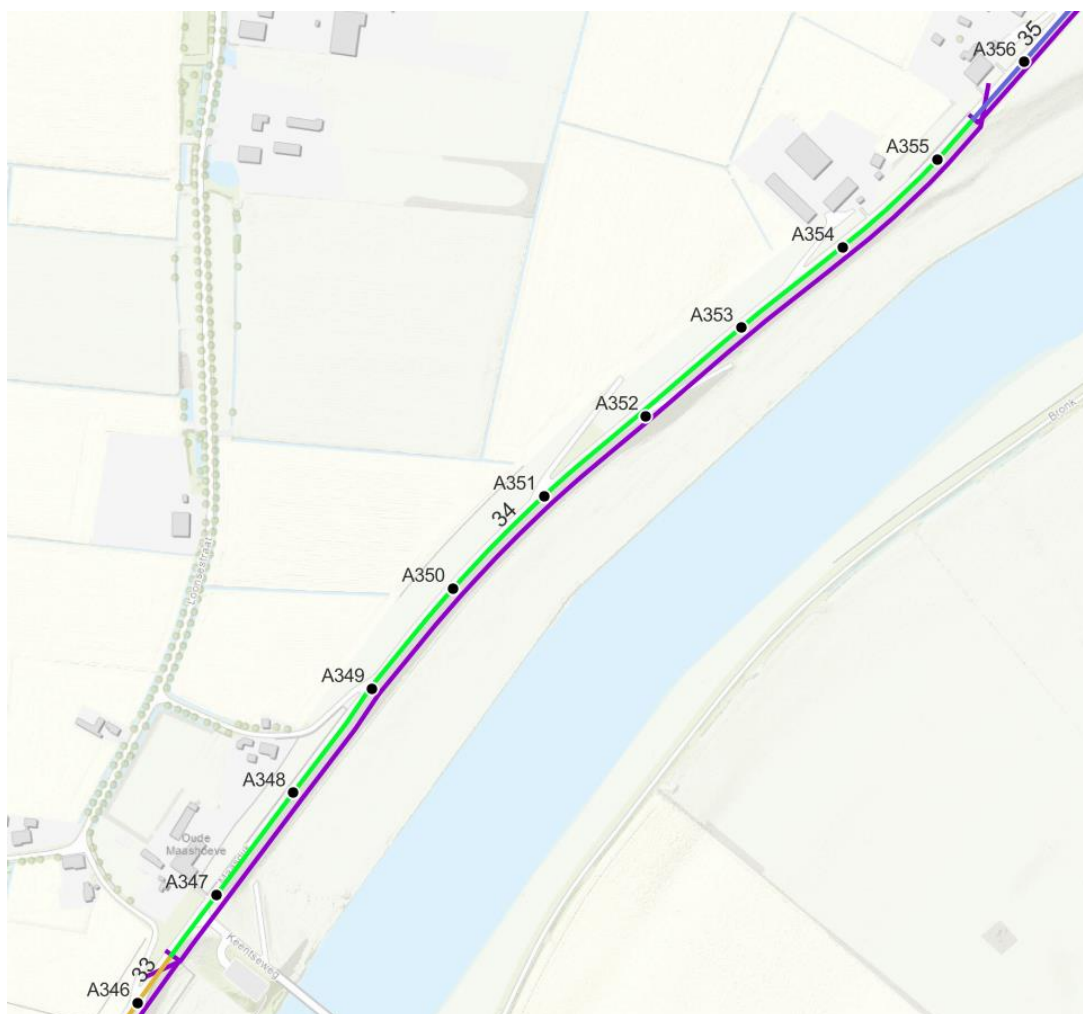
Figuur 6-35 Dijkvak 33 - De buitenkruinlijn in de referentie (geel) en de nieuwe hoogwatervrije lijn (paars). De dijkpalen zijn aangegeven als punten.

Dijkvak 34

Dijkvak 34 kent een rivierwaartse verplaatsing over het gehele dijkvak. Het dwarsprofiel bij dijkpaal A354 heeft de grootste rivierwaartse verplaatsing en is daarmee maatgevend (Figuur 6-36). De maatgevende verplaatsing is toegepast voor het gehele dijkvak (Figuur 6-37). De hoogwatervrije lijn sluit aan weerszijden aan op de hoogwatervrije lijn van dijkvak 33 en 35.



Figuur 6-36 Dijkvak 34 - Bepaling rivierwaartse verplaatsing, dwarsprofiel A354 (8,19 m)



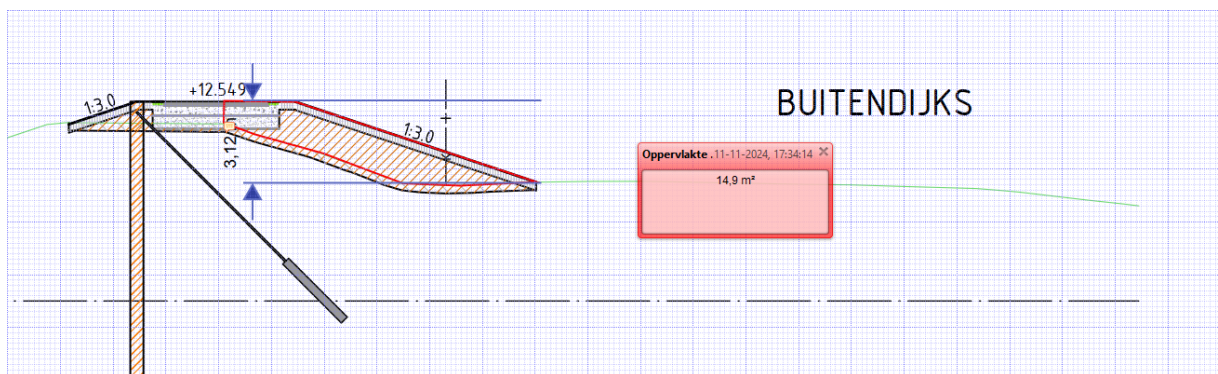
Figuur 6-37 Dijkvak 34 - De buitenkruinlijn in de referentie (geel) en de nieuwe hoogwatervrije lijn (paars). De dijkpalen zijn aangegeven als punten.

Dijkvak 35

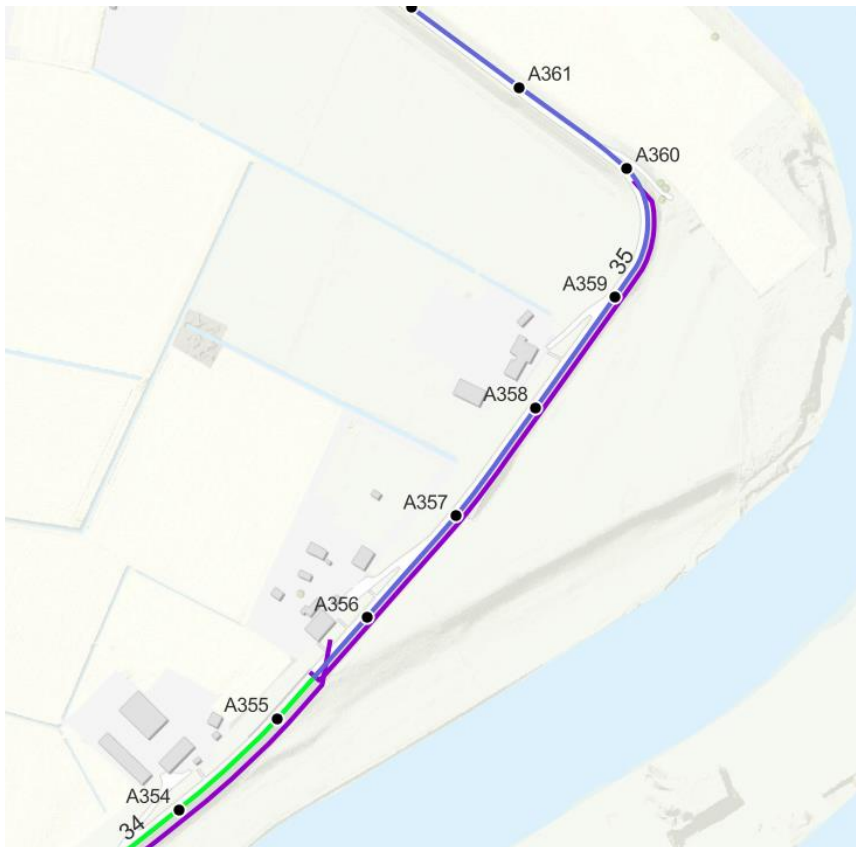
Dijkvak 35 kent een rivierwaartse verplaatsing tot dijkpaal 359,5 (Figuur 6-38). Het dwarsprofiel bij dijkpaal A356 heeft de grootste rivierwaartse verplaatsing en is daarmee maatgevend (Figuur 6-39). Deze maatgevende verplaatsing is toegepast voor het deel van het dijkvak met een rivierwaartse verplaatsing (Figuur 6-40). De hoogwatervrije lijn sluit aan de bovenstroomse zijde aan op de hoogwatervrije lijn van dijkvak 34.



Figuur 6-38 Dijkvak 35 - Bovenaanzicht ontwerp van de overgang van het deel van het dijkvak met een rivierwaartse verplaatsing naar het deel zonder rivierwaartse verplaatsing



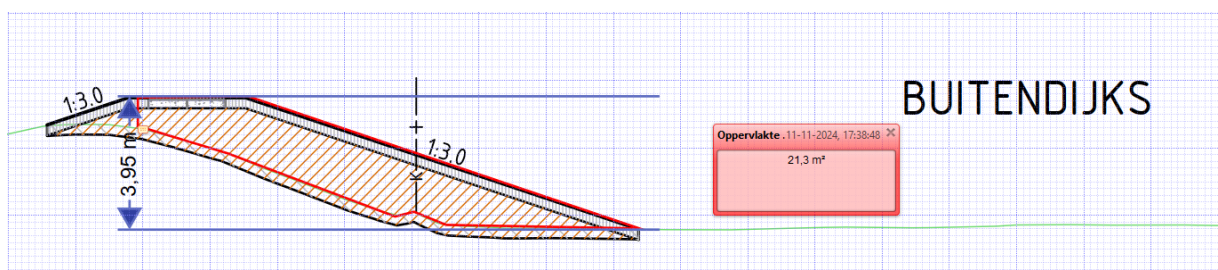
Figuur 6-39 Dijkvak 35 - Bepaling rivierwaartse verplaatsing, dwarsprofiel A356 (4,78 m)



Figuur 6-40 Dijkvak 35 - De buitenkruinlijn in de referentie (blauw) en de nieuwe hoogwatervrije lijn (paars). De dijkpalen zijn aangegeven als punten.

Dijkvak 36

Dijkvak 36 kent een rivierwaartse verplaatsing over het gehele dijkvak. Het dwarsprofiel bij dijkpaal A374 heeft de grootste rivierwaartse verplaatsing en is daarmee maatgevend (Figuur 6-41). De maatgevende verplaatsing is toegepast voor het gehele dijkvak (Figuur 6-42). De hoogwatervrije lijn sluit aan weerszijden aan op de hoogwatervrije lijn van dijkvak 35 en 37.



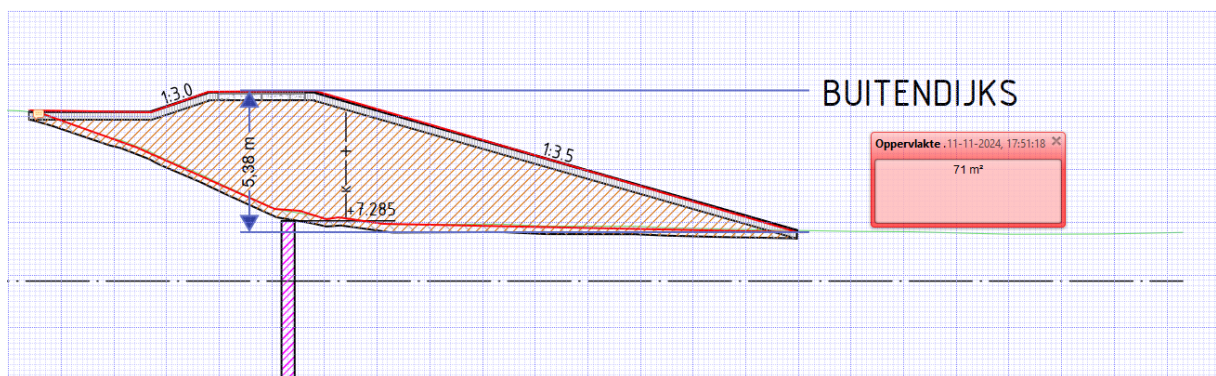
Figuur 6-41 Dijkvak 36 - Bepaling rivierwaartse verplaatsing, dwarsprofiel A374 (5,39 m)



Figuur 6-42 Dijkvak 36 - De buitenkruinlijn in de referentie (blauw) en de nieuwe hoogwatervrije lijn (paars). De dijkpalen zijn aangegeven als punten.

Dijkvak 37

Dijkvak 37 kent een rivierwaartse verplaatsing over het gehele dijkvak. Het dwarsprofiel bij dijkpaal A378 heeft de grootste rivierwaartse verplaatsing en is daarmee maatgevend (Figuur 6-43). De maatgevende verplaatsing is toegepast voor het gehele dijkvak (Figuur 6-44). De hoogwatervrije lijn sluit aan weerszijden aan op de hoogwatervrije lijn van dijkvak 36 en 38.



Figuur 6-43 Dijkvak 37 - Bepaling rivierwaartse verplaatsing, dwarsprofiel A378 (13,20 m)



Figuur 6-44 Dijkvak 37 - De buitenkruinlijn in de referentie (oranje) en de nieuwe hoogwatervrije lijn (paars). De dijkpalen zijn aangegeven als punten.

Dijkvak 38

Dijkvak 38 kent een rivierwaartse verplaatsing over het gehele dijkvak. Echter, de mate waarmee de dijk rivierwaarts wordt versterkt verschilt sterk over het dijkvak (Figuur 6-45) en een deel van het dijkvak ligt langs een flessenhals in de rivier (Figuur 6-46). Daarom is er gedifferentieerd in de mate van de rivierwaartse verplaatsing over het dijkvak (Figuur 6-50).

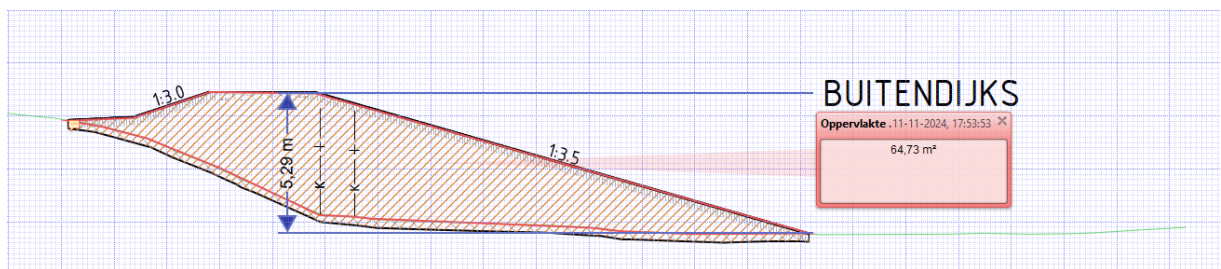


Figuur 6-45 Dijkvak 38 - Bovenaanzicht ontwerp. In dit ontwerp is nog een talud van 1:3,0 aangehouden. Dit is in een latere versie veranderd naar 1:3,5. Dit is wel meegenomen in de berekening van de rivierwaartse verplaatsing (zie Figuur 6-47- Figuur 6-49), maar dit is nog niet opgenomen in dit bovenaanzicht.

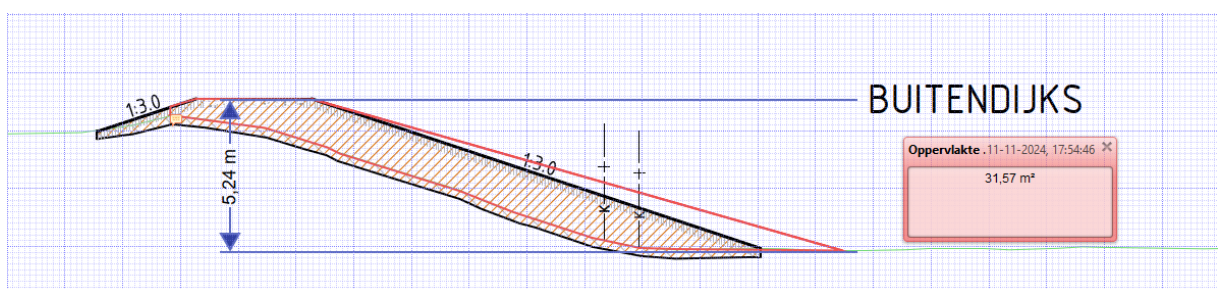


Figuur 6-46 Dijkvak 38 - Ligging van het dijkvak in een flessenhals van de rivier

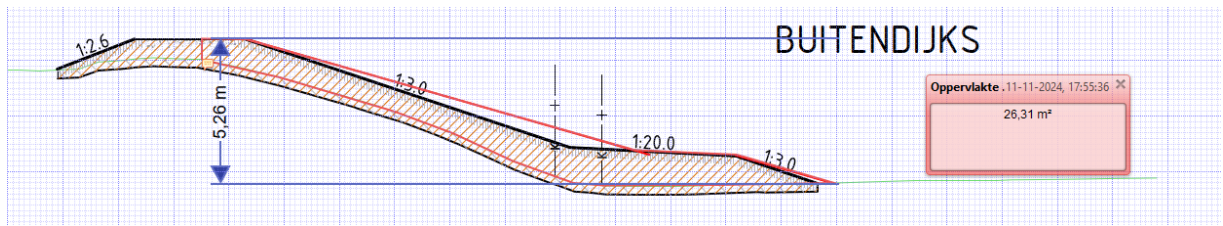
Het dijkvak is opgedeeld in drie delen met een verplaatsing, gebaseerd op de drie beschikbare dwarsprofielen. De rivierwaartse verplaatsing is getoond in Figuur 6-47, Figuur 6-48 en Figuur 6-49.



Figuur 6-47 Dijkvak 38 - Bepaling rivierwaartse verplaatsing, dwarsprofiel A381 (12,23 m)



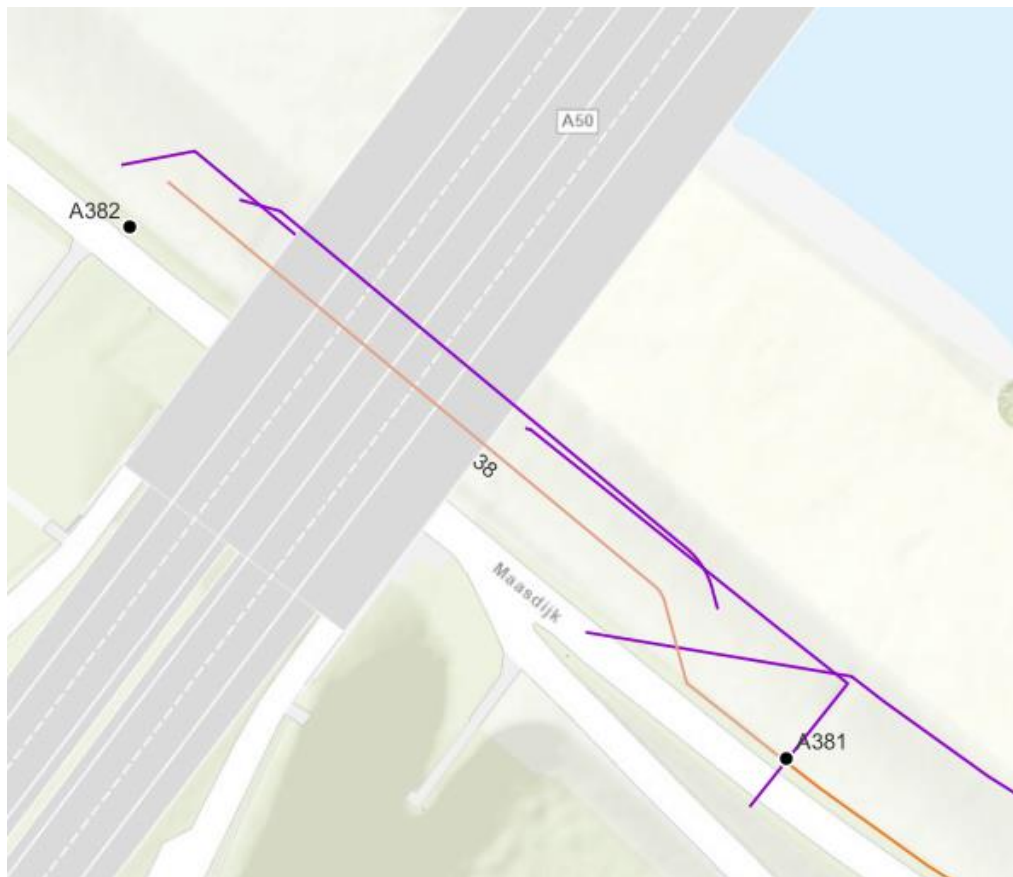
Figuur 6-48 Dijkvak 38 - Bepaling rivierwaartse verplaatsing, dwarsprofiel A381a (6,03 m). In het ontwerp is een talud van 1:3,0 opgenomen, maar dit is in een latere versie 1:3,5 geworden. Daarom is de oppervlakte bepaald aan de hand van een talud van 1:3,5 (rode lijn).



Figuur 6-49 Dijkvak 38 - Bepaling rivierwaartse verplaatsing, dwarsprofiel A382 (5,00 m). In het ontwerp is een talud van 1:3,0 opgenomen, maar dit is in een latere versie 1:3,5 geworden. Daarom is de oppervlakte bepaald aan de hand van een talud van 1:3,5 (rode lijn).

Figuur 6-50 toont de resulterende rivierwaartse verplaatsing. Het valt op dat de kering een andere vorm krijgt dan het bovenaanzicht in Figuur 6-45 laat zien. Dit heeft twee redenen:

- In het bovenaanzicht is nog een talud van 1:3,0 aangehouden. Dit is in een latere versie veranderd naar 1:3,5. Dit is wel meegenomen in de berekening van de rivierwaartse verplaatsing (zie Figuur 6-47- Figuur 6-49), maar dit is nog niet opgenomen in dit bovenaanzicht.
- Door definitie van de representatieve verplaatsing, gaan we onder de brug verder rivierwaarts dan de werkelijke verplaatsing. Hierdoor ligt de nieuwe buitenkruinlijn onder de brug dichterbij de rivier dan de buitenkruinlijn in het traject voor de brug.

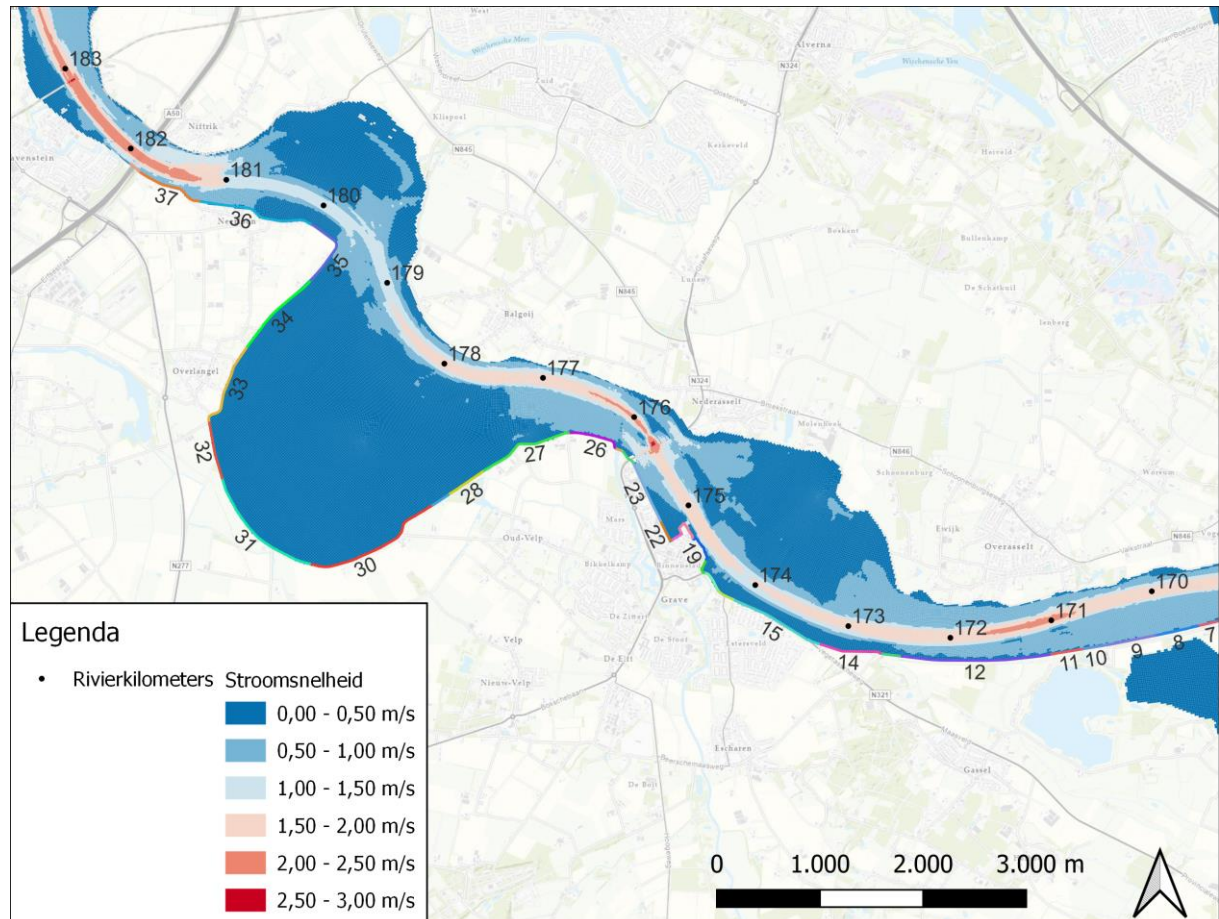


Figuur 6-50 Dijkvak 38 - De buitenkruinlijn in de referentie (roze met bruine stippellijn) en de nieuwe hoogwatervrije lijn (paars). De dijkpalen zijn aangegeven als punten.

Bijlage B. Resultaten rivierkundige berekeningen projectreferentie

Deze bijlage bevat een extra figuur van de simulaties met de hoogwaterreferentie (4.100 m³/s) voor de projectreferentie (CuRa_REF_a2).

Stroomsnelheid



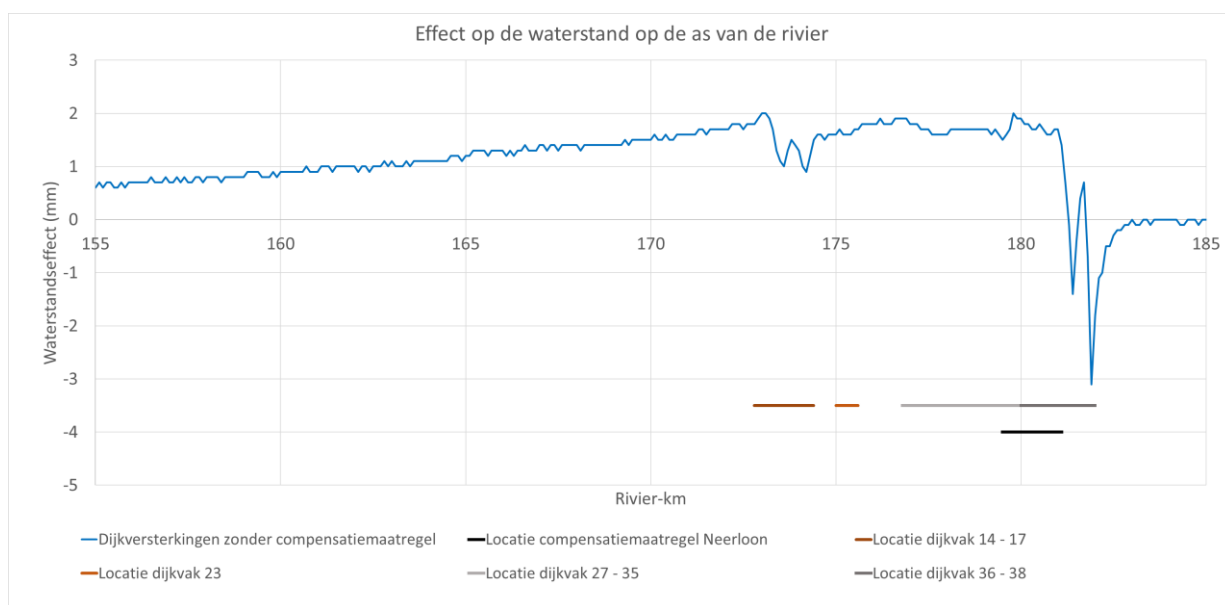
Figuur 6-51 Stroomsnelheid voor de projectreferentie bij een afvoer van 4.100 m³/s (hoogwaterreferentie) bij Borgharen

Bijlage C. Resultaten rivierkundige berekeningen dijkversterking

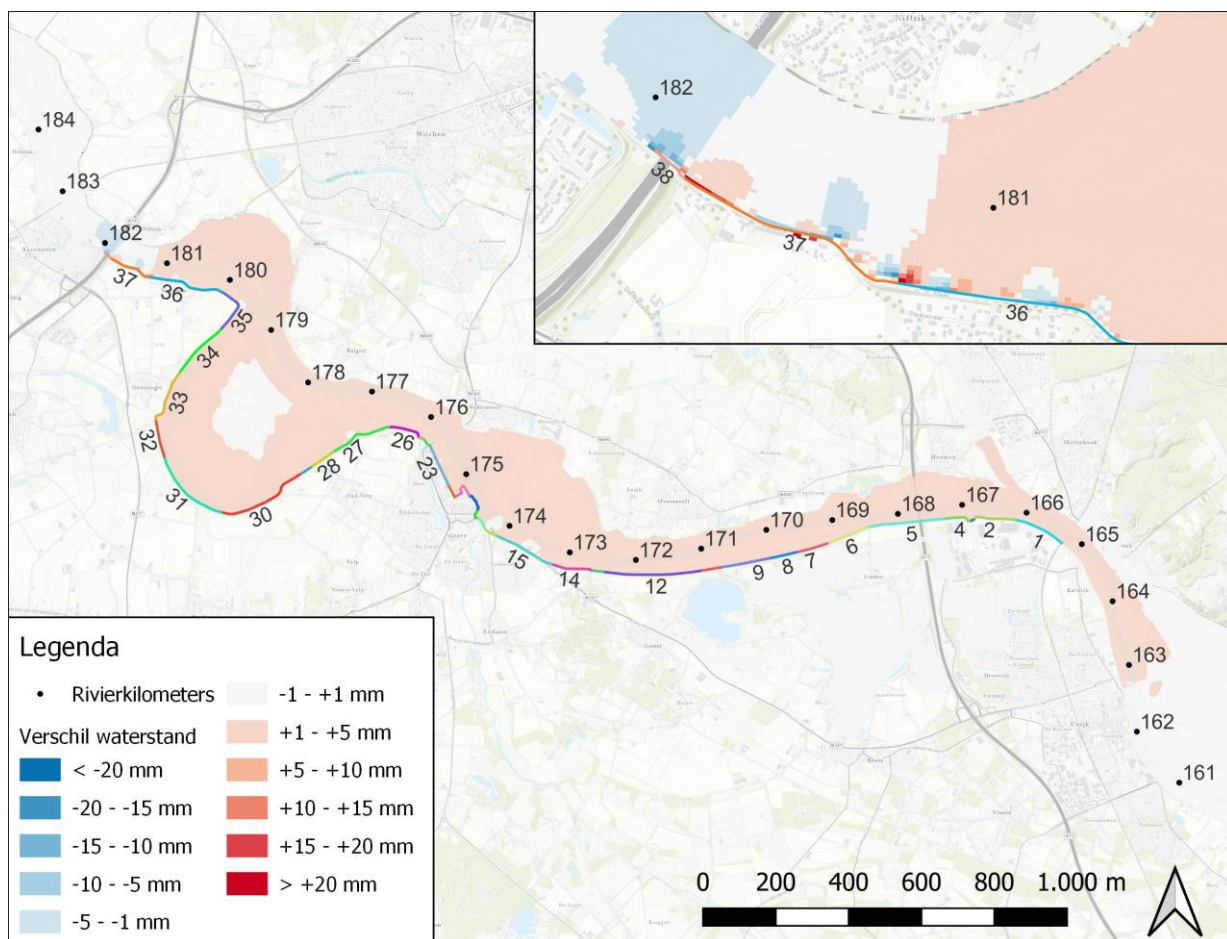
Deze bijlage bevat extra figuren van de simulaties met de hoogwaterreferentie ($4.100 \text{ m}^3/\text{s}$) voor het model met enkel dijkversterking en geen compensatiemaatregel (CuRa_VO_a4).

Waterstanden

Afvoer van $4.100 \text{ m}^3/\text{s}$ bij Borgharen



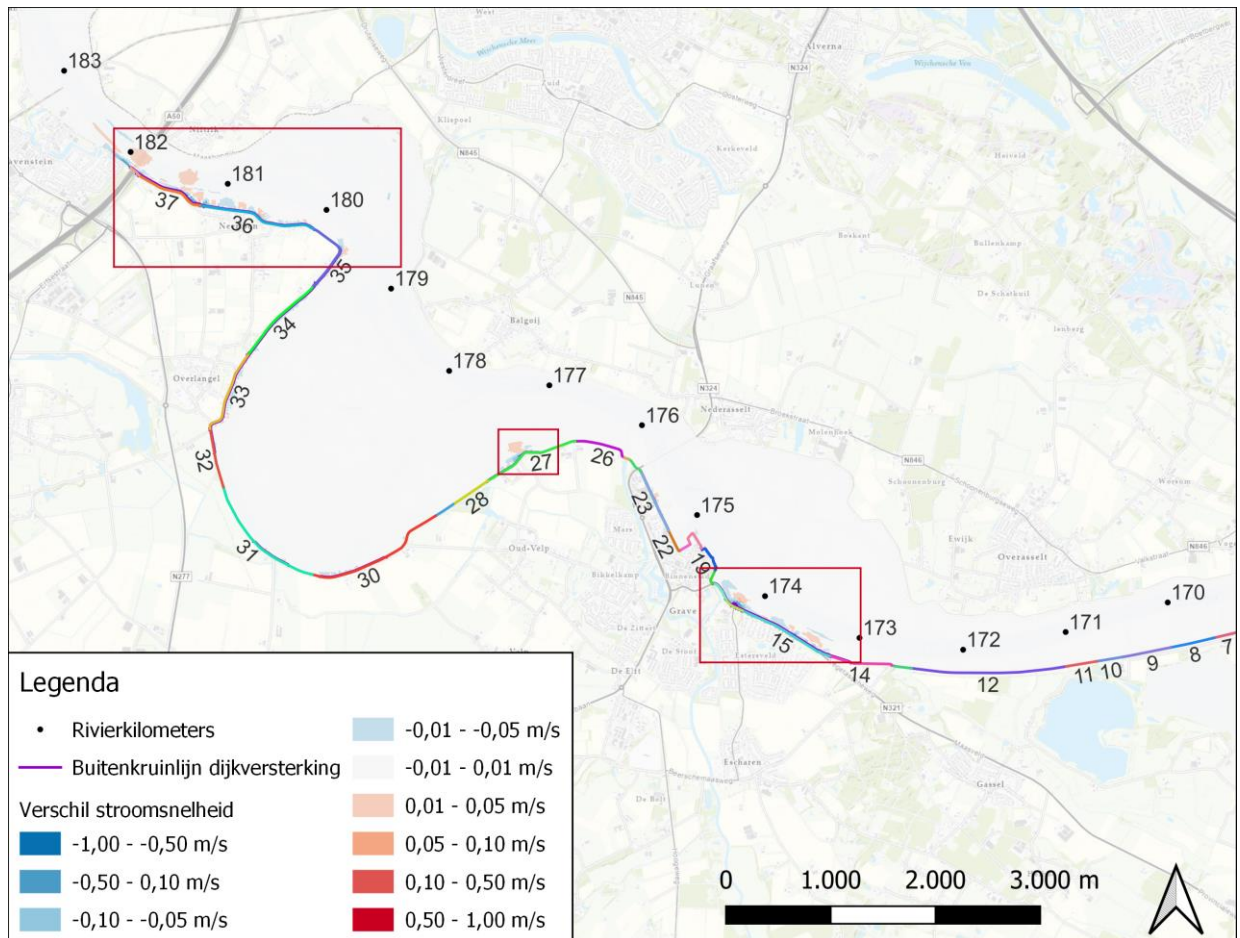
Figuur 6-52 Effect op de waterstand op de as van de rivier van de dijkversterkingen ten opzichte van de referentie bij de hoogwaterreferentie ($4.100 \text{ m}^3/\text{s}$). Positieve verschillen betekenen een waterstandsverhoging (opstuwing), negatieve verschillen betekenen een waterstandsverlaging.



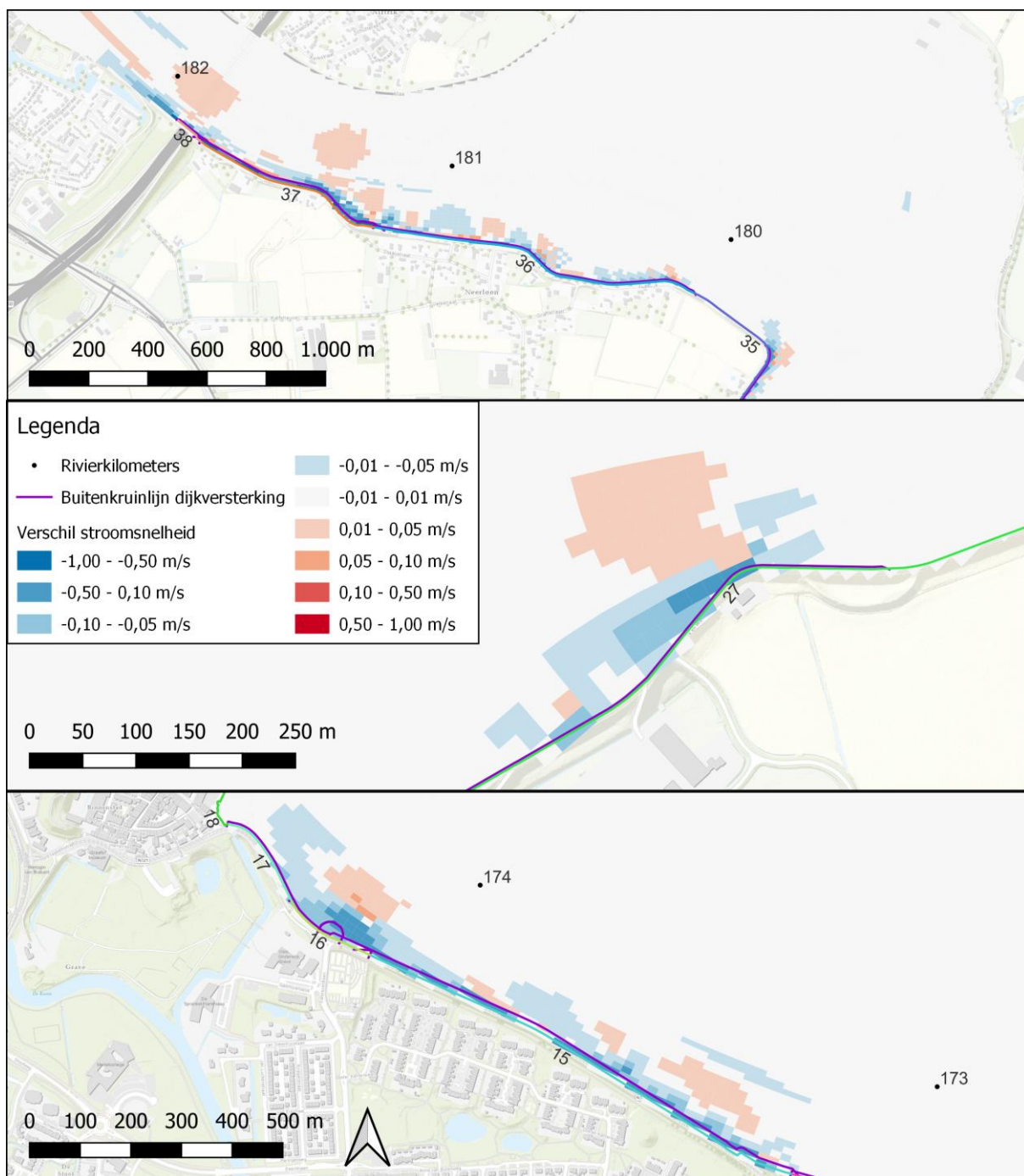
Figuur 6-53 Waterstandseffecten dijkversterking zonder compensatiemaatregel (CuRa_VO_a4) ten opzichte van de projectreferentie (CuRa_REF_a2) bij een afvoer van 4.100 m³/s (hoogwaterreferentie) bij Borgharen

Stroomsnelheid

Afvoer van 4.100 m³/s bij Borgharen



Figuur 6-54 Vershil in stroomsnelheid tussen de variant met dijkversterkingen zonder compensatiemaatregel (CuRa_VO_a4) en de projectreferentie (CuRa_REF_a2) bij een afvoer van 4.100 m³/s (hoogwaterreferentie) bij Borgharen. Figuur 6-55 toont ingezoomde kaarten van de locaties die zijn aangeduid met een rood kader.



Figuur 6-55 Verskil in stroomsnelheid tussen de variant met dijkversterkingen zonder compensatiemaatregel (CuRa_VO_a4) en de projectreferentie (CuRa_REF_a2) bij een afvoer van 4.100 m³/s (hoogwaterreferentie) bij Borgharen op drie specifieke locaties waar snelheidsveranderingen optreden. De locaties zijn aangeduid in Figuur 6-54.

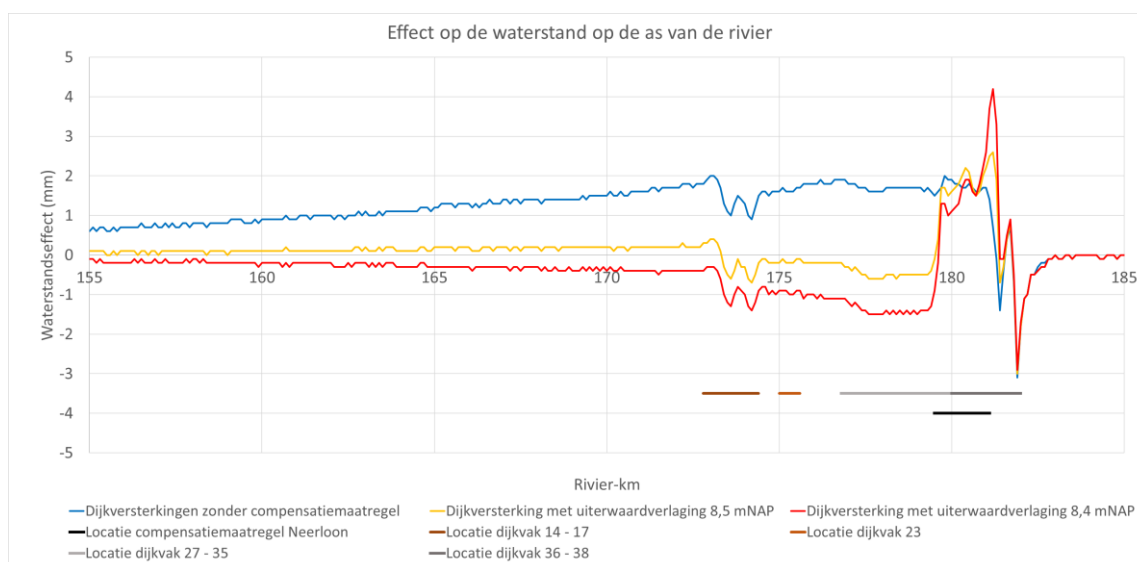
Bijlage D. Iteraties ontwerp compenserende maatregelen

Als onderdeel van de optimalisatie van het ontwerp van de compensatiemaatregel, zijn twee varianten van de uiterwaardverlaging doorgerekend:

- uiterwaardverlaging tot een niveau van NAP +8,5 m;
- Uiterwaardverlaging tot een niveau van NAP +8,4 m.

Figuur 6-56 toont het effect van de dijkversterkingen in combinatie met de uiterwaardverlaging tot de twee niveaus op de waterstand op de as van de rivier. De uiterwaardverlaging tot een niveau van NAP +8,5 m levert niet voldoende waterstandsverlaging op om het effect van de dijkversterkingen in zijn geheel te compenseren. Het algehele waterstandsverhogende effect van de ingrepen is groter dan het waterstandsverlagende effect van de ingrepen.

De uiterwaardverlaging tot een niveau van NAP +8,4 m levert wel voldoende waterstandsverlaging op om het effect van de dijkversterkingen in zijn geheel te compenseren. Deze variant is getoetst in deze rapportage.



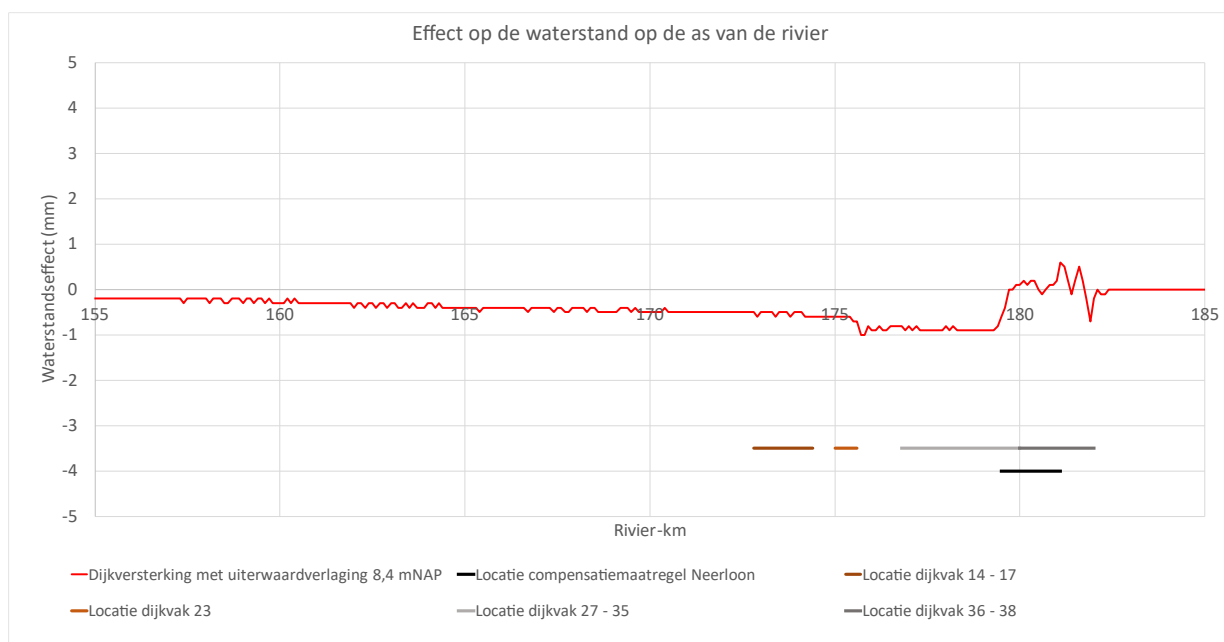
Figuur 6-56 Effect op de waterstand op de as van de rivier van de dijkversterkingen zonder compensatiemaatregelen (CuRa_VO_a4) en met een uiterwaardverlaging met een niveau van respectievelijk NAP +8,4 m en NAP +8,5 m ten opzichte van de projectreferentie (CuRa_REF_a2) bij de hoogwaterreferentie (4.100 m³/s). Positieve verschillen betekenen een waterstandsverhoging (opstuwing), negatieve verschillen betekenen een waterstandsverlaging.

Bijlage E. Resultaten rivierkundige berekeningen dijkversterking met compensatiemaatregel

Deze bijlage bevat extra figuren van de simulaties met de hoogwaterreferentie (4.100 m³/s) voor het model met enkel dijkversterking, inclusief compensatiemaatregel (CuRa_VO_maneerl_a2). Sommige figuren zijn identiek aan figuren in het hoofdrapport, maar hier nogmaals opgenomen om de vergelijking tussen de verschillende afvoeren te vereenvoedigen.

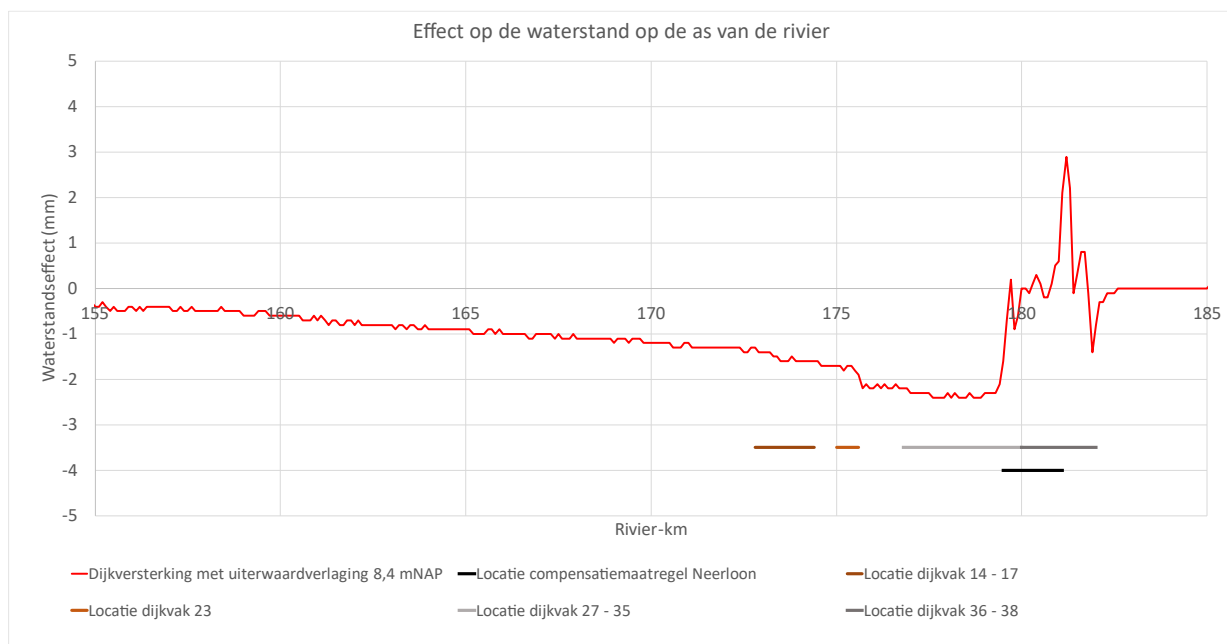
Waterstanden

Afvoer van 2.100 m³/s bij Borgharen



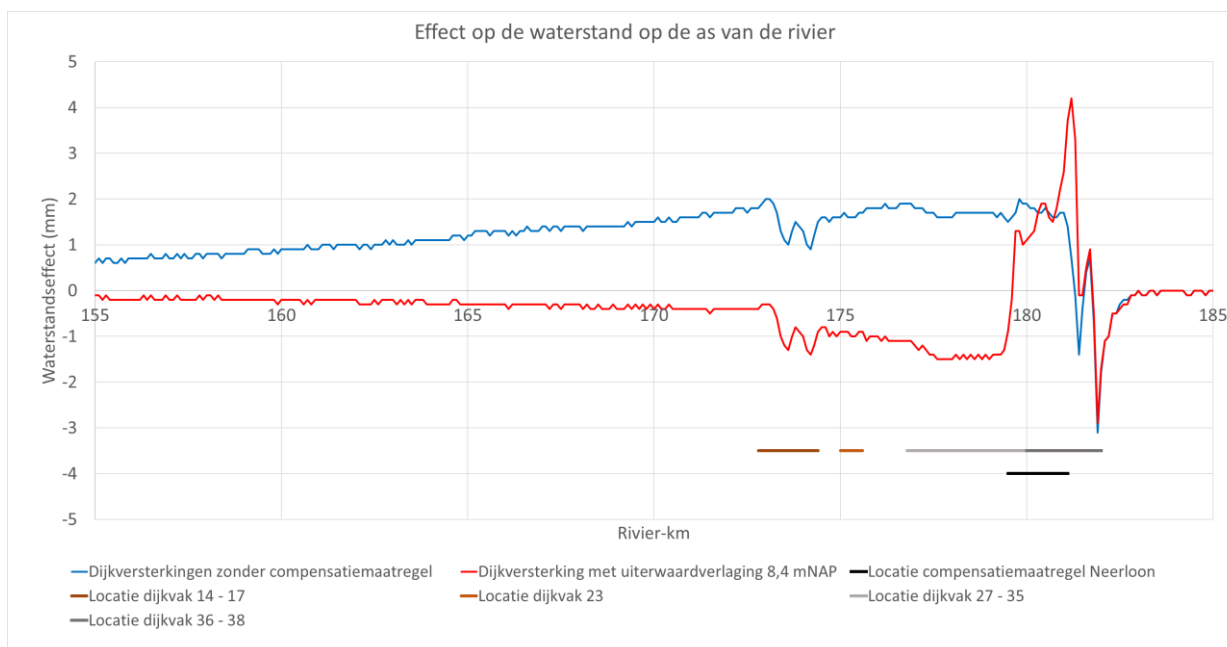
Figuur 6-57 Effect op de waterstand op de as van de rivier van de dijkversterkingen met de compensatiemaatregel ten opzichte van de referentie bij een afvoer van 2.100 m³/s bij Borgharen. Positieve verschillen betekenen een waterstandsverhoging (opstuwing), negatieve verschillen betekenen een waterstandsverlaging. Omdat in dit deelmodel de waterstanden 0,5 m hoger zijn dan verwacht uit betrekkinglijnen stroomt de compensatiemaatregel mee en geeft een waterstandsverlaging van 1 mm.

Afvoer van 2.500 m³/s bij Borgharen

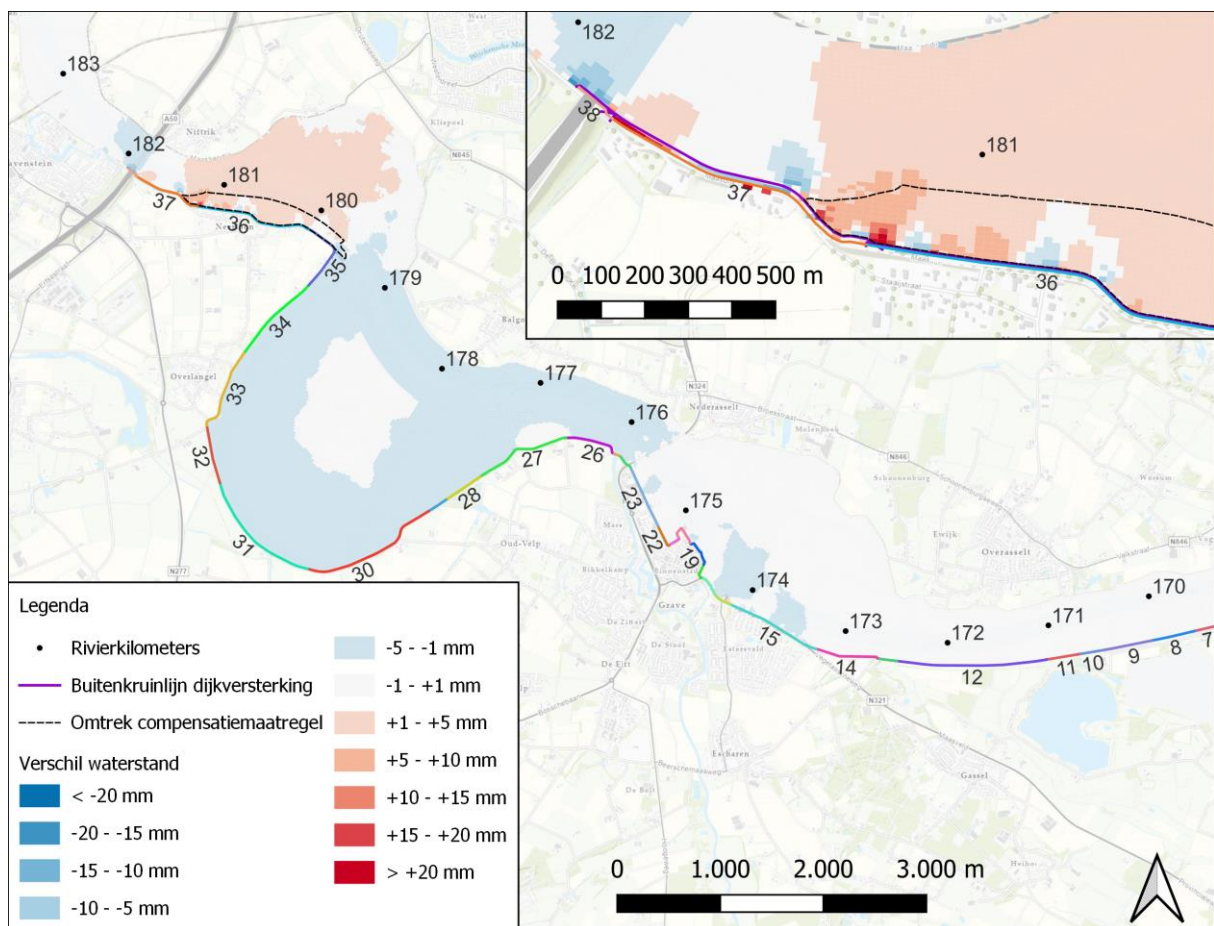


Figuur 6-58 Effect op de waterstand op de as van de rivier van de dijkversterkingen met de compensatiemaatregel ten opzichte van de referentie bij een afvoer van 2.500 m³/s bij Borgharen. Positieve verschillen betekenen een waterstandsverhoging (opstuwing), negatieve verschillen betekenen een waterstandsverlaging.

Afvoer van 4.100 m³/s bij Borgharen



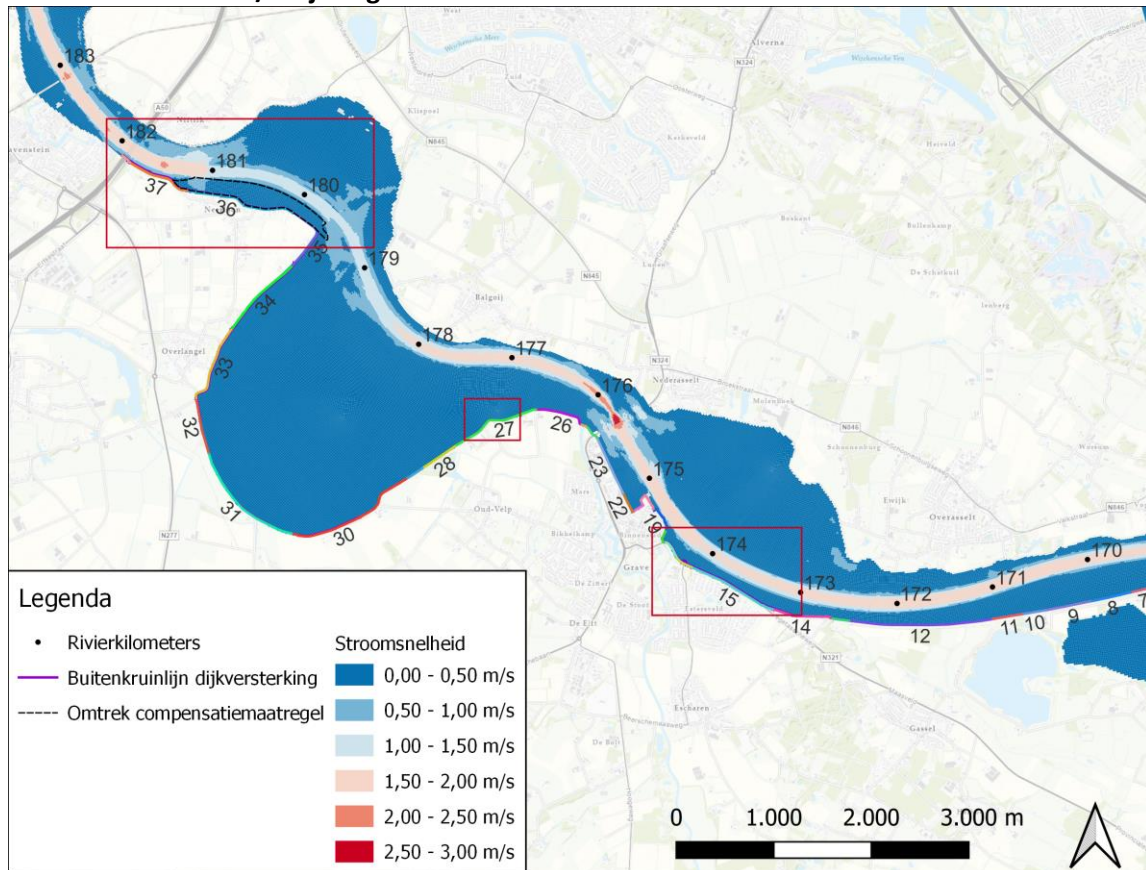
Figuur 6-59 Effect op de waterstand op de as van de rivier van de dijkversterkingen met de compensatiemaatregel ten opzichte van de referentie bij een afvoer van 4.100 m³/s (hoogwaterreferentie) bij Borgharen. Positieve verschillen betekenen een waterstandsverhoging (opstuwing), negatieve verschillen betekenen een waterstandsverlaging.



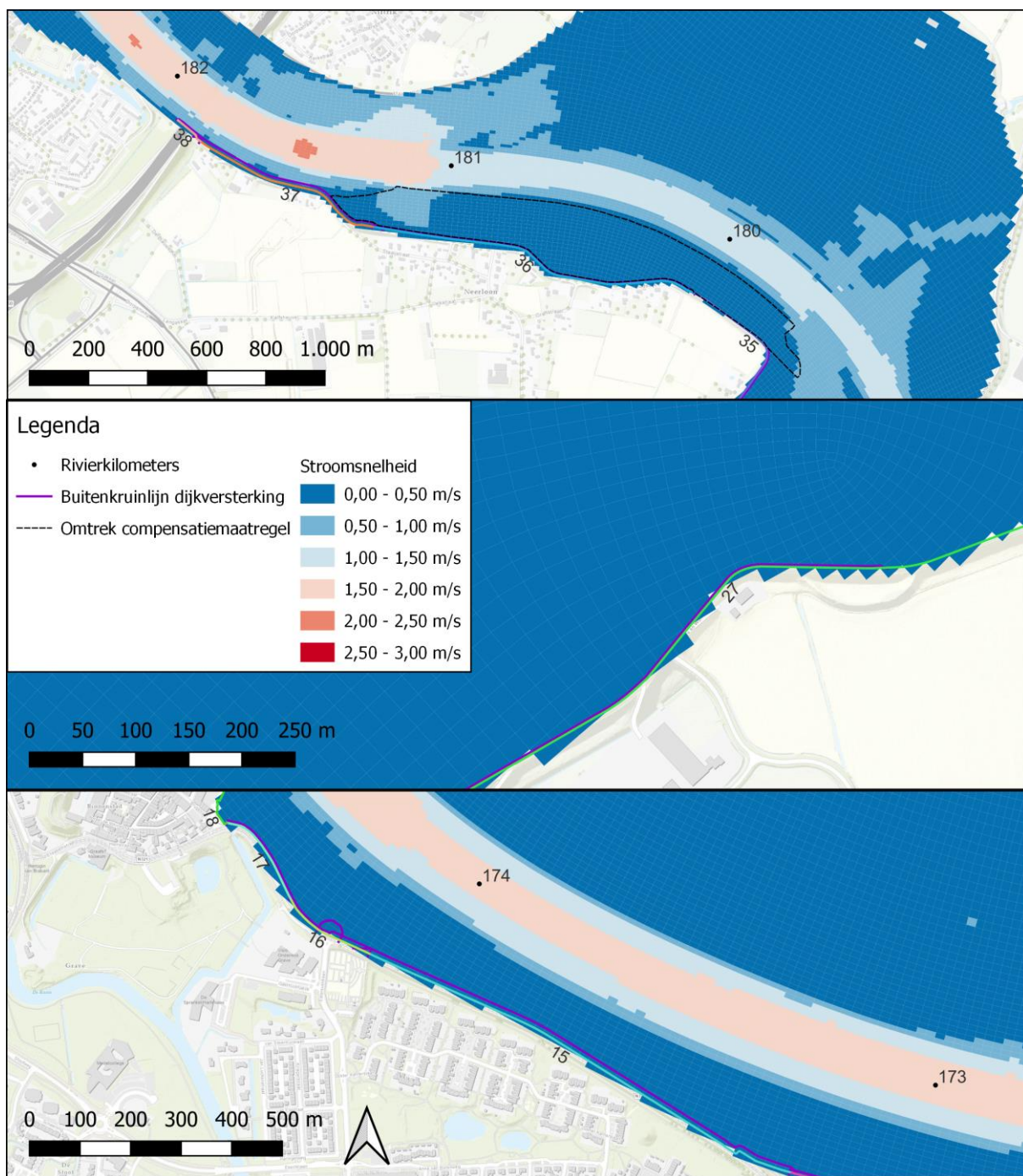
Figuur 6-60 Vershil in waterstand tussen de variant met dijkversterkingen en de compensatiemaatregel (niveau NAP +8,4 m) en de projectreferentie bij een afvoer van 4.100 m³/s (hoogwaterreferentie) bij Borgharen

Stroomsnelheid

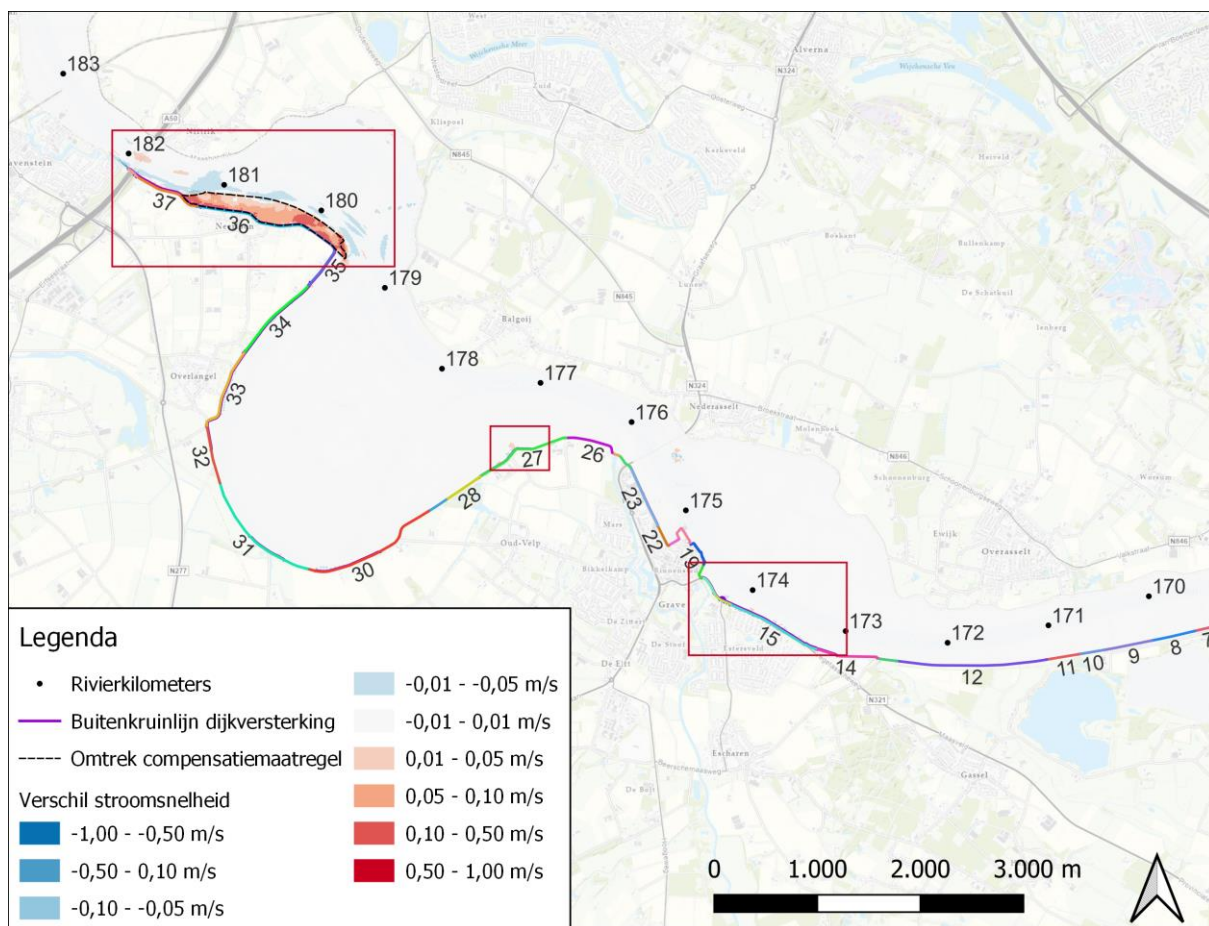
Afvoer van 2.500 m³/s bij Borgharen



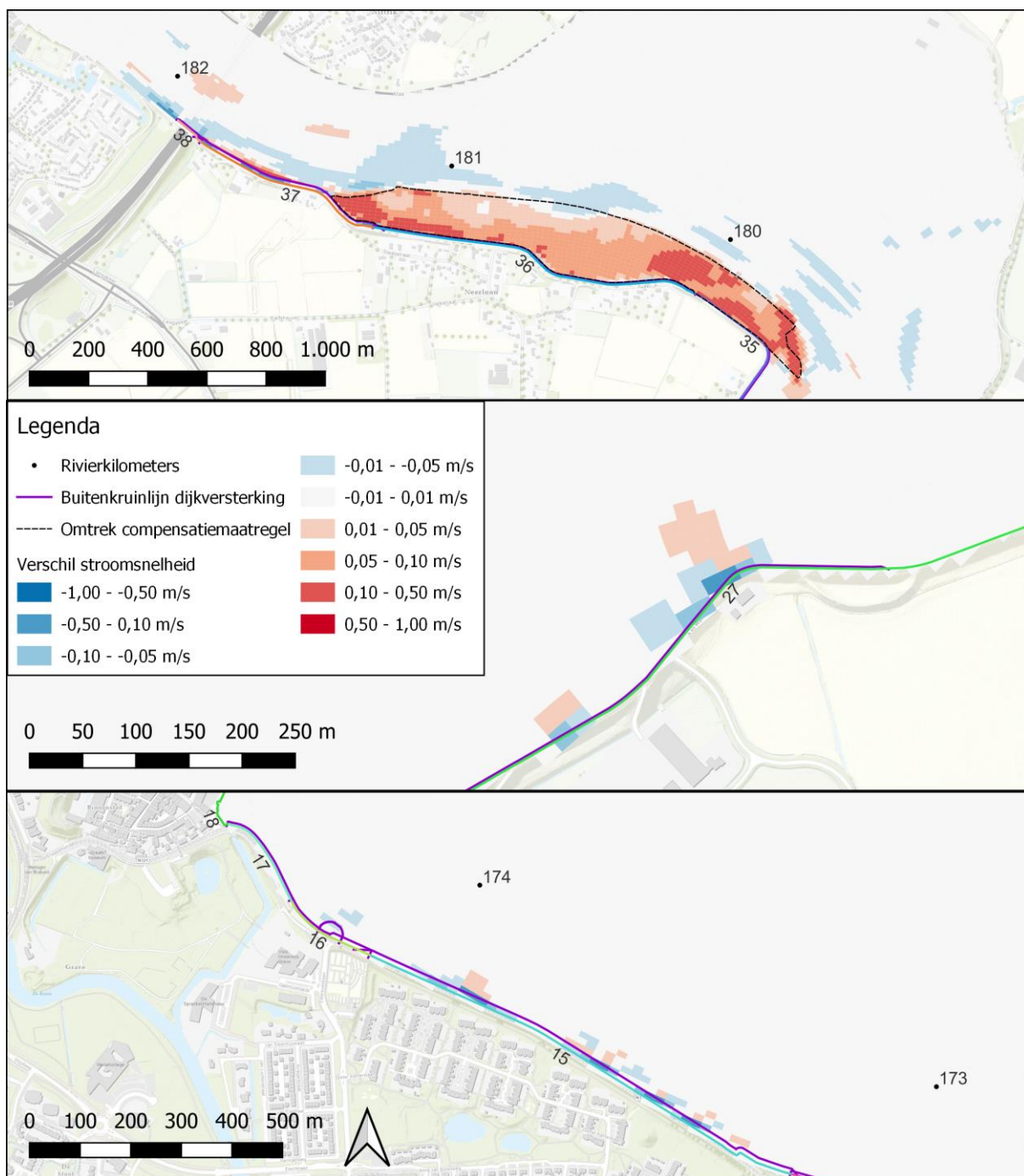
Figuur 6-61 Stroomsnelheid voor de variant met dijkversterkingen en de compensatiemaatregel (niveau NAP +8,4 m) bij een afvoer van 2.500 m³/s bij Borgharen. Figuur 6-62 toont ingezoomde kaarten van de locaties die zijn aangeduid met een rood kader.



Figuur 6-62 Stroomsnelheid voor de variant met dijkversterkingen en de compensatiemaatregel (niveau NAP +8,4 m) bij een afvoer van 2.500 m³/s bij Borgharen op drie specifieke locaties waar stroomsnelheidsverschillen optreden ten opzichte van de projectreferentie (zie Figuur 4-4). De locaties zijn aangeduid in Figuur 6-61.

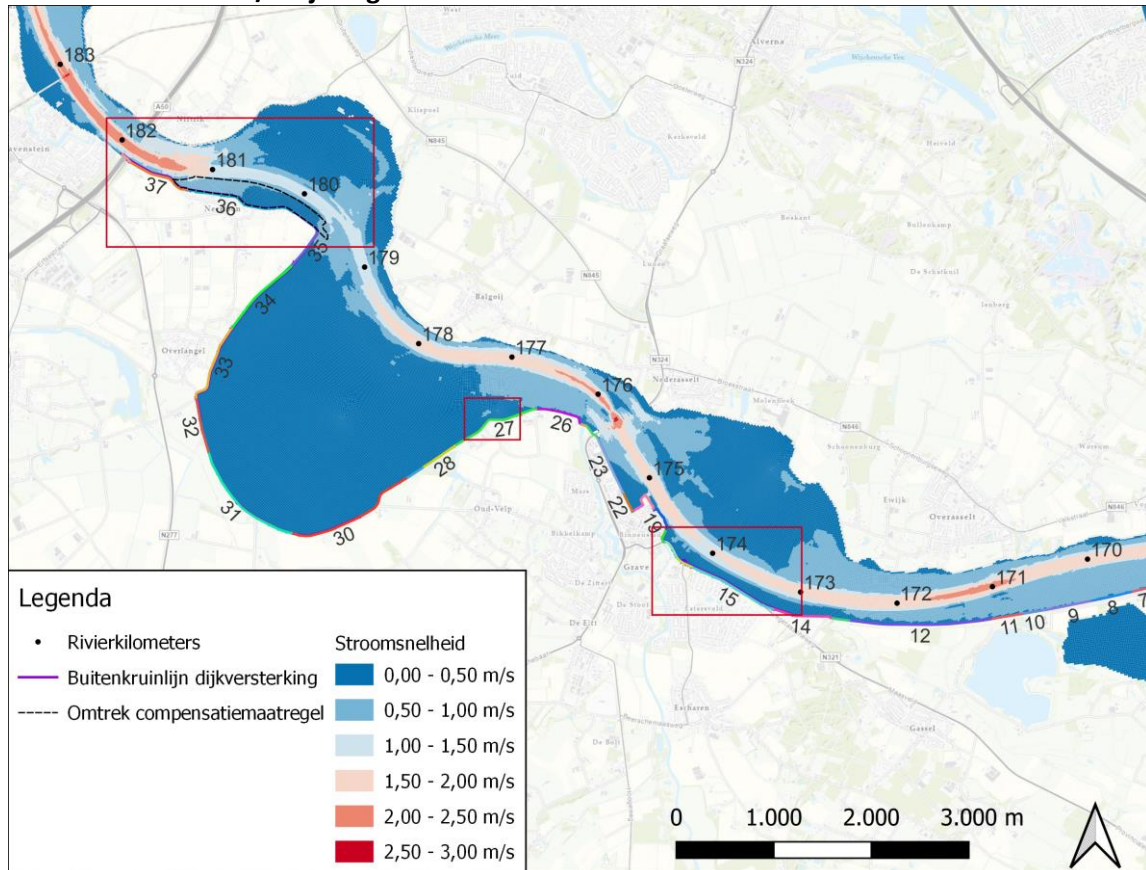


Figuur 6-63 Verskil in stroomsnelheid tussen de variant met dijkversterkingen en de compensatiemaatregel (niveau NAP +8,4 m) en de projectreferentie bij een afvoer van 2.500 m³/s bij Borgharen. Figuur 6-64 toont ingezoomde kaarten van de locaties die zijn aangeduid met een rood kader.

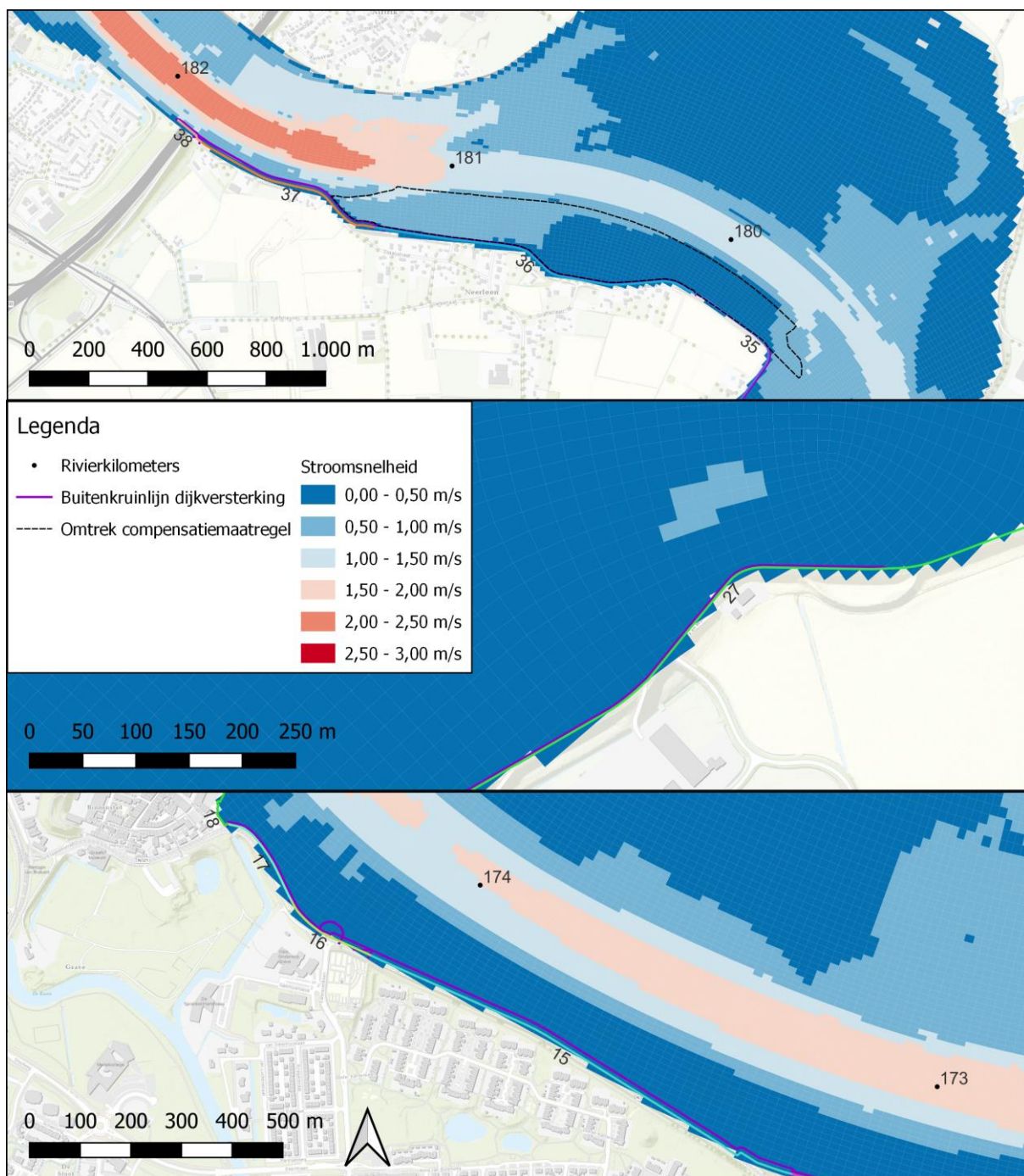


Figuur 6-64 Verschil in stroomsnelheid tussen de variant met dijkversterkingen en de compensatiemaatregel (niveau NAP +8,4 m) en de projectreferentie bij een afvoer van 2.500 m³/s bij Borgharen op drie specifieke locaties waar snelheidsveranderingen optreden. De locaties zijn aangeduid in Figuur 6-63.

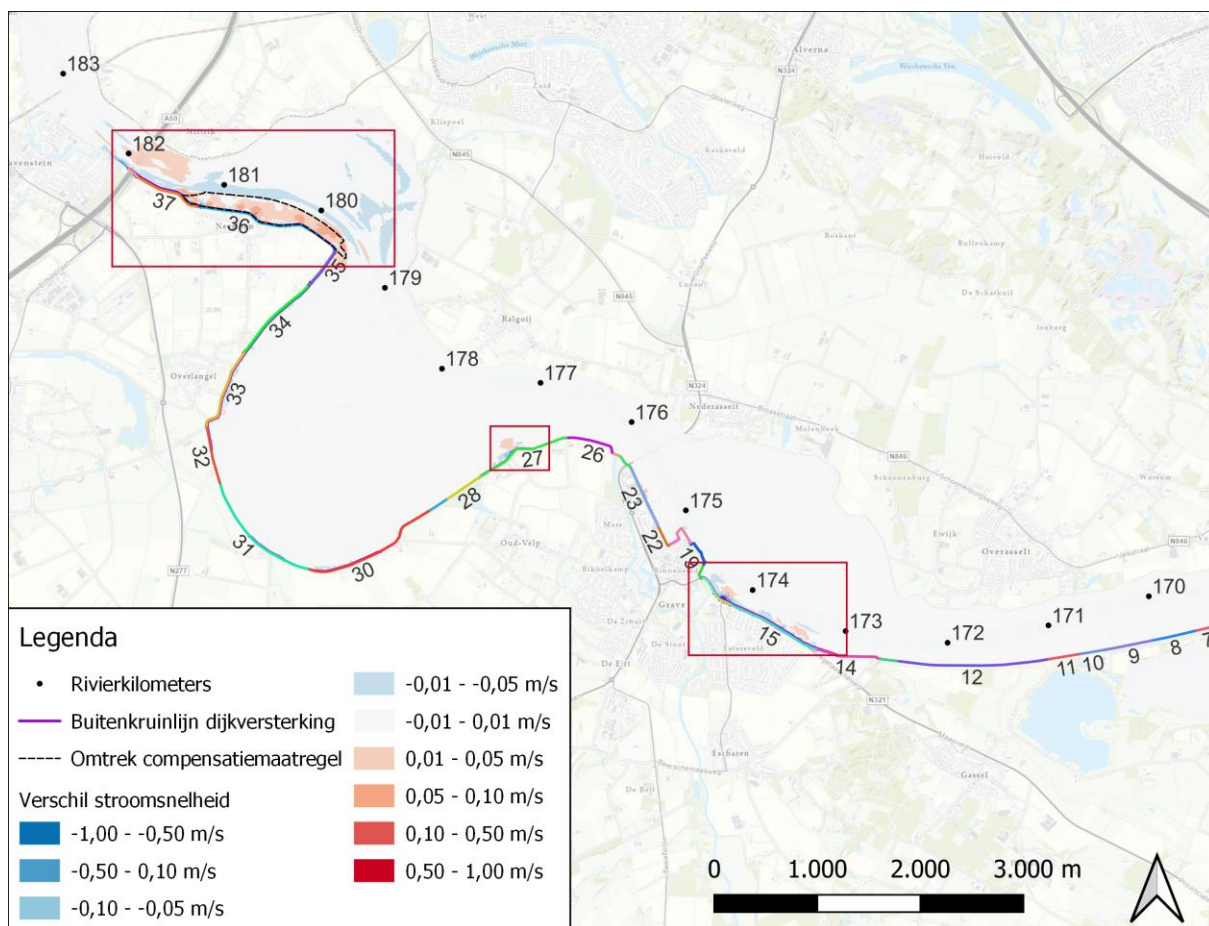
Afvoer van 4.100 m³/s bij Borgharen



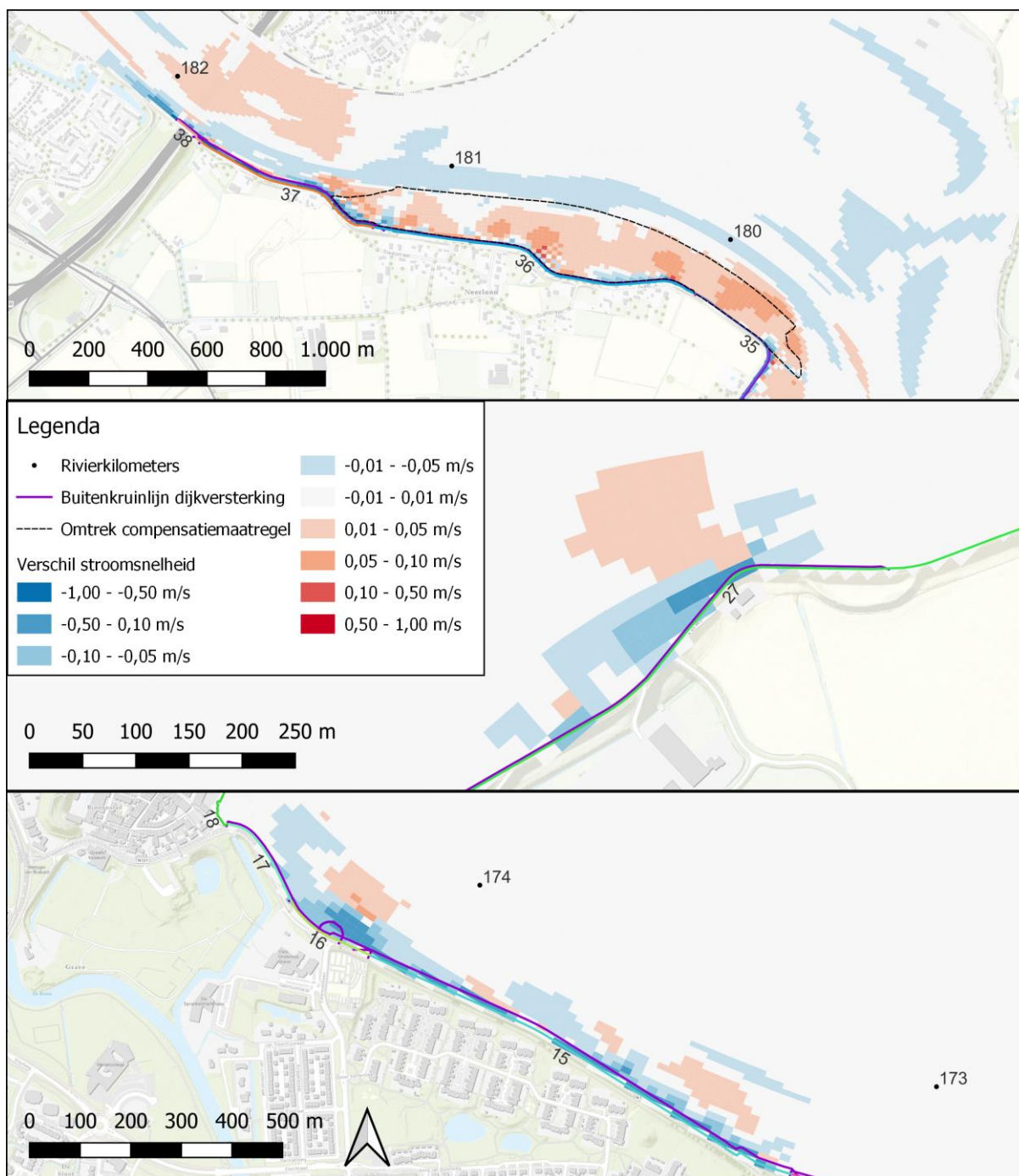
Figuur 6-65 Stroomsnelheid voor de variant met dijkversterkingen en de compensatiemaatregel (niveau NAP +8,4 m) bij een afvoer van 4.100 m³/s (hoogwaterreferentie) bij Borgharen. Figuur 6-66 toont ingezoomde kaarten van de locaties die zijn aangeduid met een rood kader. Deze figuur is identiek aan Figuur 4-3, maar hier nogmaals opgenomen voor de vergelijking met de overige afvoeren.



Figuur 6-66 Stroomsnelheid voor de variant met dijkversterkingen en de compensatiemaatregel (niveau NAP +8,4 m) bij een afvoer van 4.100 m³/s (hoogwaterreferentie) bij Borgharen op drie specifieke locaties waar stroomsnelheidsverschillen optreden ten opzichte van de projectreferentie (zie Figuur 4-4). De locaties zijn aangeduid in Figuur 6-65.



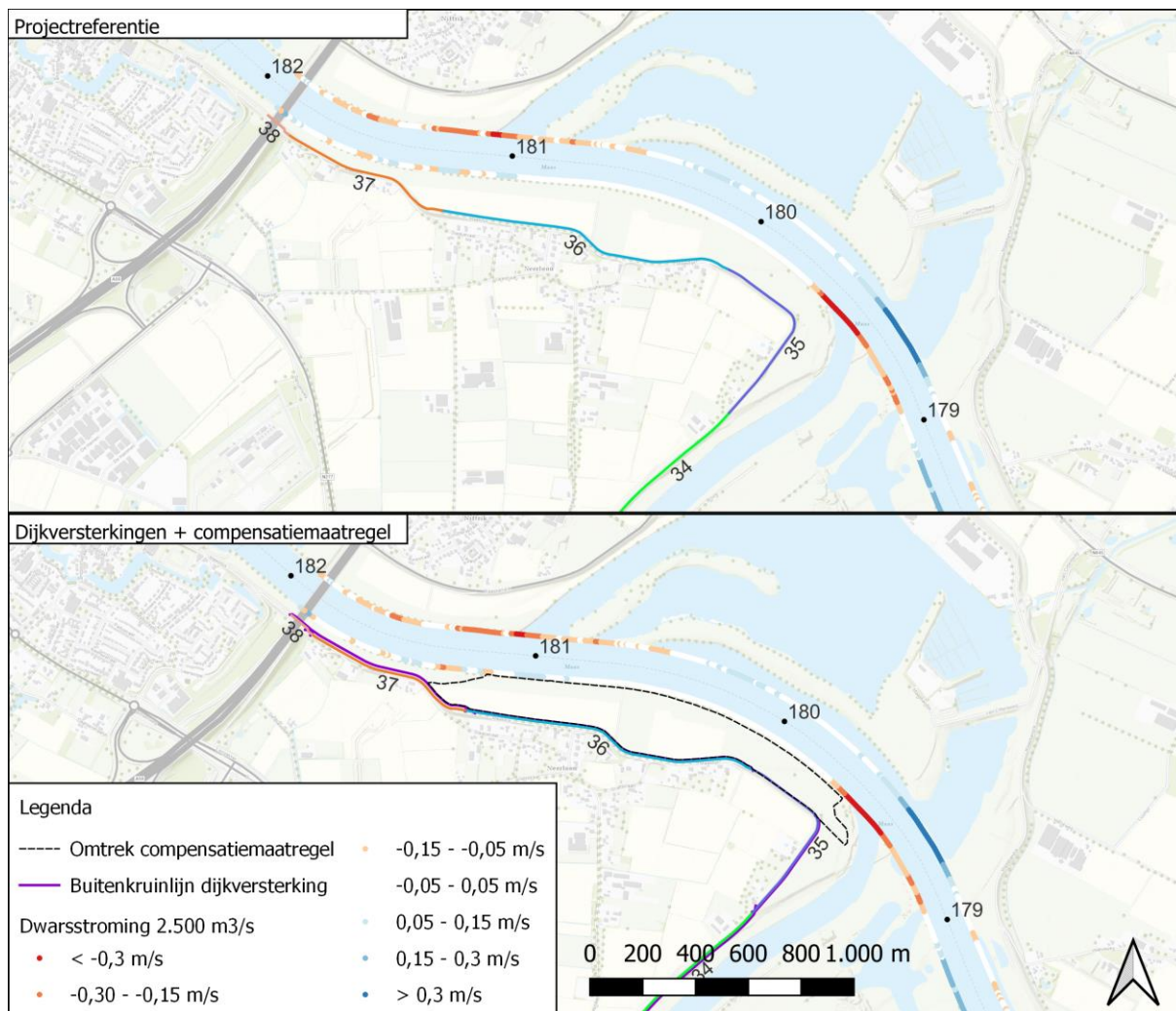
Figuur 6-67 Verskil in stroomsnelheid tussen de variant met dijkversterkingen en de compensatiemaatregel (niveau NAP +8,4 m) en de projectreferentie bij een afvoer van 4.100 m³/s (hoogwaterreferentie) bij Borgharen. Figuur 6-68 toont ingezoomde kaarten van de locaties die zijn aangeduid met een rood kader.



Figuur 6-68 Verschil in stroomsnelheid tussen de variant met dijkversterkingen en de compensatiemaatregel (niveau NAP +8,4 m) en de projectreferentie bij een afvoer van $4.100 \text{ m}^3/\text{s}$ (hoogwaterreferentie) bij Borgharen op drie specifieke locaties waar snelheidsveranderingen optreden. De locaties zijn aangeduid in Figuur 6-67.

Dwarsstroming

Afvoer van 2.500 m³/s bij Borgharen



Figuur 6-69 Dwarsstroming langs de oever van de rivier bij een afvoer van 2.500 m³/s voor de projectreferentie (CuRa_REF_a2) (boven) en voor de variant met dijkversterkingen en de compensatiemaatregel (CuRa_VO_maneeerl_a2) (onder). Positieve waarden (blauw) geven een uitstroom aan, van zomer- naar winterbed. Negatieve waarden (rood) geven een instroom aan, van winter- naar zomerbed.

Bijlage F. Morfologische berekeningen

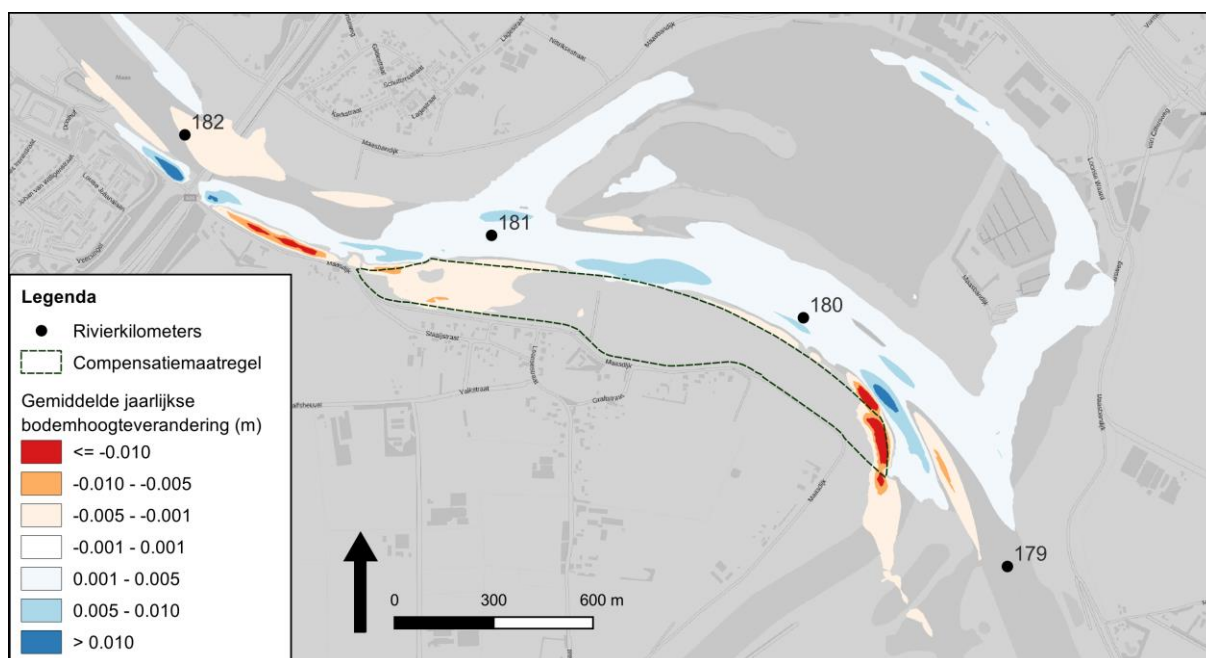
D-FAST MI

De tool D-FAST Morphological Impact (MI) is gebruikt om op basis van de D-HYDRO-modelresultaten op een eenvoudige maar consistente manier een inschatting te krijgen van de morfologische effecten. De tool vereist modelresultaten van de situatie inclusief en exclusief maatregel voor alle afvoeren waarbij de maatregel actief is. Voor de berekeningen is gebruik gemaakt van modelresultaten bij de 2.500 en 3.200 m³/s.

Als gevoeligheidsanalyse is een extra berekening uitgevoerd waarbij ook de afvoer 2.100 m³/s is toegevoegd, omdat in de berekeningen met het deelmodel ook bij deze afvoer de uiterwaard actief is met een waterdiepte tot 0,4 m. Een verschilanalyse is voor deze afvoeren niet opgenomen in de modelrapportage [14]. Uit een vergelijking van het model met betrekkinglijnen (sectie 4.2.1) zijn de waterstanden 0,5 m hoger. Verwacht wordt dat de waterstanden uit de betrekkinglijnen betrouwbaarder zijn en daarom gebruikt worden voor de inundatiefrequentie.

Het resultaat van deze gevoeligheidsanalyse is weergegeven in Figuur 6-70. Omdat de uiterwaard nu vaker meestroomt is zowel de sedimentatie als de erosie groter:

- Een maximale sedimentatie in het zomerbed van 0,014 m bij de uitstroming van de oude Maasarm van Keent. Gemiddeld langs dijkvak 35 tot 36 is de sedimentatie 0,004 m.
- Een maximale erosie in het zomerbed bij Maasbrug A50 van 0,003 m (uitgaande van een alluviale bodem).
- Een maximale sedimentatie in de uiterwaard bij Maasbrug A50 van 0,055 m (uitgaande van een alluviale bodem).
- Een maximale sedimentatie in de Loonse Waard van 0,007 m.
- Een maximale erosie bij de instroming van de compensatiemaatregel van 0,053 m en bij de uitstroming van 0,010 m (uitgaande van een alluviale bodem).



Figuur 6-70 Inschatting van de gemiddelde jaarlijkse bodemhoogteverandering volgens de vuistregels in D-FAST MI. In deze gevoeligheidsanalyse is ook de afvoer 2.100 m³/s meegenomen. Veranderingen kleiner dan 1 mm zijn niet weergegeven.