



Vlaanderen
is wetenschap



14_025_4
WL rapporten

Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde

Deelrapport 4 – Zandscenario's

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be



Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde

Deelrapport 4 – Zandscenario's

Vos, G.; Meire, D.; De Maerschalc, B.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F.

Maart 2016

WL2016R14_025_4

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Vos, G.; Meire, D.; De Maerschalck, B.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016). Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde: Deelrapport 4 – Zandscenario's. Versie 4.0. WL Rapporten, 14_025. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.



DEPARTEMENT **MOBILITEIT EN OPENBARE WERKEN**

Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115, 2140 Antwerpen

T +32 (0)3 224 60 35

F +32 (0)3 224 60 36

waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be

mow.vlaanderen.be





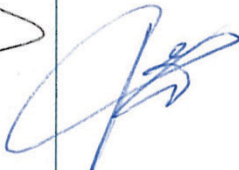

waterbouwkundiglaboratorium.be

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welk andere wijze ook zonder voorafgaande toestemming van de uitgever.

Documentidentificatie

Titel:	Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde: Deelrapport 4 – Zandscenario's		
Opdrachtgever:	VNSC	Ref.:	WL2016R14_025_4
Keywords (3-5):	Sediment transport, zand, numeriek model, Schelde-estuarium		
Tekst (p.):	33	Bijlagen (p.):	53
			<input type="checkbox"/> Intern <input type="checkbox"/> Vlaamse overheid
	<input type="checkbox"/> Nee	<input type="checkbox"/> Online beschikbaar	

Goedkeuring

Auteur	Revisor	Projectleider	Coördinator Studie & Advies	Afdelingshoofd
Vos, G.	Meire, D.	Plancke, Y.	Verwaest, T.	Mostaert, F.
	 De Maerschallck, B.			
				

Revisies

Nr.	Datum	Omschrijving	Auteur(s)
1.0	23/10/2015	Conceptversie	Vos, G.
2.0	27/10/2015	Inhoudelijke revisie	Meire, D.
2.1	09/11/2015	Inhoudelijke revisie	De Maerschallck, B.
3.0	05/02/2016	Revisie opdrachtgever	Beirinckx, K.; Ides, S.; Van der Werff J.
4.0	09/03/2016	Definitieve versie	Vos, G.

Abstract

Om de toegankelijkheid naar de Scheldehavens te kunnen garanderen dienen quasi continu onderhoudsbaggerwerken uitgevoerd te worden. Om deze werken uit te voeren zijn vergunningen nodig. Voor het Vlaamse deel van het estuarium, de Beneden-Zeeschelde, lopen de huidige onderhoudsvergunningen nog tot december 2017. Ten behoeve van een nieuwe vergunning (mogelijks een zogeheten omgevingsvergunning) dient er onderzoek te gebeuren om de stortstrategie zo optimaal mogelijk in te vullen, rekening houdend met toekomstige ontwikkelingen zoals zandwinstrategie, aanleg Oosterweeltunnel en risico op regime shift.

Voorliggend rapport beschrijft de resultaten van de scenarioberekeningen inzake het terugstorten van zanderige specie. Deze zullen worden gebruikt om uiteindelijk tot de optimale invulling te komen van de toekomstige stortstrategie in de Beneden-Zeeschelde.

INHOUDSTAFEL

Inhoudstafel.....	I
Lijst van de tabellen.....	III
lijst van de figuren	IV
1 Inleiding	1
1.1 Situering.....	1
1.2 Overige rapporten	1
2 Baggeren en storten in de Beneden-Zeeschelde.....	2
2.1 Bagger- en storttechnieken	2
2.2 Overzicht locaties	3
2.3 Overzicht bagger- en storthoeveelheden.....	3
2.4 Stortproef Ketelputten	6
3 Modelopzet	10
3.1 NEVLAmodel	10
3.2 Basismodel.....	10
3.2.1 Modelgrid.....	10
3.2.2 Topo-bathymetrie.....	11
3.2.3 Uitvoerpunten.....	12
3.2.4 Randvoorwaarden	12
3.2.5 Tijdstap.....	12
3.2.6 Modelparameters	13
3.2.7 Simulatieperiode.....	13
3.3 Sedimenttransportmodellering	13
3.3.1 Sedimentfracties	13
3.3.2 Randvoorwaarden	14
3.3.3 Dikte bodemsedimentlaag.....	14
3.4 Modelvalidatie	14
3.4.1 Sedimenttransport.....	14
3.4.2 Morfologie	15
4 Scenarioberekeningen.....	17
4.1 Beschrijving stortscenario's.....	17
4.2 Resultaten.....	22
4.2.1 Nevengeulen.....	22
4.2.2 Diepe delen afwaarts Oosterweel	25
4.2.3 Diepe delen opwaarts Oosterweel	28

4.2.4	Gecombineerde scenario's (runs zsc218, zsc219 en zsc220)	30
5	Conclusies en aanbevelingen	31
5.1	Conclusies	31
5.2	Aanbevelingen	32
6	Referenties	33
	BIJLAGE – Figuren	B1

LIJST VAN DE TABELLEN

Tabel 1 – Overzicht modelparameters	13
Tabel 2 – Gebruikte parameters voor de finale modelinstellingen.....	16
Tabel 3 – Simulatie van de evolutie van het netto-effect van stortingen over een periode van 5 jaar.....	19
Tabel 4 – Overzicht van doorgerekende stortscenario's.....	20

LIJST VAN DE FIGUREN

Figuur 1 – Sleephopperzuiger (links) en sweepbeam (rechts) Bron: www.scheepvaartwest.be	2
Figuur 2 – Overzicht bagger- (oranje polygonen) en stortlocaties (groene polygonen)	4
Figuur 3 – Overzicht jaarlijkse baggerhoeveelheden per baggerlocatie. Slibvolumes zijn “equivalente” volumes V'	5
Figuur 4 – Overzicht jaarlijkse storthoeveelheden per stortlocatie voor zand	5
Figuur 5 – Overzicht jaarlijkse storthoeveelheden per stortlocatie voor slib (equivalente volumes V') per stortlocatie	6
Figuur 6 – Bathymetrische verschilkaart Diepe Putten Ketelplaat tussen begin en einde van de stortproef (Bron: IMDC, 2011)	7
Figuur 7 – Absolute cumulatieve volumeverandering (m^3) in de stortzone eb (links) en stortzone vloed (rechts) (maart – augustus 2010) (Bron: IMDC, 2011). De rode lijn geeft de cumulatieve hoeveelheid gestort materiaal weer	8
Figuur 8 – Stabiliteit van de baggerspecie in de stortzone (eb+vloed) aan de Ketelplaat (Bron: IMDC, 2014)	9
Figuur 9 – Modelgrid van het Delft3D NEVLAmodel (groen) en het studiemodel (rood)	10
Figuur 10 – Situering studiegebied in het model, met afwaartse rand thv Raai 6 en opwaartse randen te Tielrode en Terhagen	11
Figuur 11 – Topo-bathymetrie van lei- en strekdam voor en na manuele aanpassing	12
Figuur 12 – Overzicht van de gebruikte stortvakken binnen de scenarioberekeningen	18
Figuur 13 – Capaciteit aan stortvolume per stortlocatie	21
Figuur 14 – Vergelijking Bruto- en netto-transportcapaciteit voor en na de storting van 2 Mm^3 Appelzak	23
Figuur 15 – Vergelijking bruto- en netto-transportcapaciteit voor en na de storting van 2 Mm^3 Schaar Ouden Doel	24
Figuur 16 – Vergelijking Bruto- en netto-transportcapaciteit voor en na de storting van 2 Mm^3 Ketelputten	25
Figuur 17 – Vergelijking Bruto- en netto-transportcapaciteit voor en na de storting van 2 Mm^3 Kallo	26
Figuur 18 – Vergelijking Bruto- en netto-transportcapaciteit voor en na de storting van 2 Mm^3 Oosterweel	27
Figuur 19 – Vergelijking Bruto- en netto-transportcapaciteit voor en na de storting van 2 Mm^3 Royerssluis	29
Figuur 20 – Vergelijking Bruto- en netto-transportcapaciteit voor en na de storting van 2 Mm^3 Rede van Antwerpen	29

1 INLEIDING

1.1 Situering

Om de toegankelijkheid naar de Scheldehavens te kunnen garanderen dienen quasi continu onderhoudsbaggerwerken uitgevoerd te worden. Om deze werken uit te voeren zijn vergunningen nodig. Voor de Westerschelde werd in 2013 een verlenging aangevraagd, dewelke in 2014 werd toegekend. Hierdoor zijn de bagger- en stortactiviteiten in het Nederlandse deel van het Schelde-estuarium vergund tot februari 2022.

Voor het afwaartse stuk van het Vlaamse deel van het estuarium, de Beneden-Zeeschelde, lopen de huidige onderhoudsvergunningen nog tot december 2017. Momenteel wordt zanderige specie teruggestort in de Schaar van Ouden Doel waar ook zandwinning plaatsvindt, en slibrijke specie ter hoogte van de Punt van Melsele (linkeroever) en Plaat van Boomke, Oosterweel en Vlake van Hoboken (rechteroever). Ten behoeve van een nieuwe vergunning (mogelijks een zogeheten omgevingsvergunning) dient er onderzoek te gebeuren om de stortstrategie zo optimaal mogelijk in te vullen, rekening houdend met toekomstige ontwikkelingen zoals o.a. zandwinstrategie, aanleg Oosterweeltunnel en risico regime shift.

Voorliggend rapport beschrijft de resultaten van een reeks scenario's inzake het terugstorten van zanderige specie. Het opzetten en de validatie van het model, gebruikt voor deze scenario's, wordt beschreven in (Vos *et al.*, 2016). Deze zullen worden gebruikt om uiteindelijk tot de optimale invulling te komen van de toekomstige stortstrategie in de Beneden-Zeeschelde. De strategie voor het terugstorten van slibrijke specie wordt in een ander rapport beschreven (Coen *et al.*, 2016).

1.2 Overige rapporten

De studie "Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde" werd in het kader van de Agenda voor de Toekomst¹ uitgevoerd door het Waterbouwkundig laboratorium in samenwerking met Antea Group, Instituut voor Natuur en Bosonderzoek en de Universiteit Antwerpen. De resultaten van de studie worden beschreven in 8 deelrapporten:

- DR 1. Opzet en validatie slibmodel
- DR 2. Opzet en validatie zandmodel
- DR 3. Slibscenario's.
- DR 4. Zandscenario's
- DR 5. Wijziging sedimentatie ter hoogte van baggerlocaties en slikken en schorren
- DR 6. Effecten op primaire productie van verschillende scenario's voor het terugstorten van slib
- DR 7. Ecologische effect inschatting van de verschillende zandstortscenario's
- DR 8. Samenvatting

¹ De Agenda voor de Toekomst is een Vlaams-Nederlands onderzoeksprogramma binnen de Werkgroep Onderzoek en Monitoring van de VNVC waarbinnen de prioritaire onderzoeksthema's onderzocht worden, volgend uit de evaluatie van het verdrag Beleid & Beheer (<http://www.vnvc.eu/agenda-voor-de-toekomst/>).

2 BAGGEREN EN STORTEN IN DE BENEDEN-ZEESCHELDE

In de Beneden-Zeeschelde wordt zowel zanderige als slibrijke specie gebaggerd om de toegankelijkheid tot de haven van Antwerpen te kunnen garanderen. Deze onderhoudsspecie wordt zowel in de vaargeul (“dremfels”), in het Deurganckdok als in de verschillende toegangsheulen tot de sluizen gebaggerd. Het gebaggerde sediment wordt teruggestort in de Beneden-Zeeschelde. Ook achter de sluizen vinden onderhoudsbaggerwerken plaats, doch deze specie wordt vandaag de dag niet terug in de Schelde gebracht.

2.1 Bagger- en storttechnieken

De onderhoudsbaggerwerken in de Beneden-Zeeschelde gebeuren met behulp van enerzijds sleephopperzuigers, in de vaar- en toegangsheulen en het centrale deel van Deurganckdok en anderzijds een ploeg of *sweepbeam* nabij kaaimuren en toegangsheulen (zie Figuur 1).

Een sleephopperzuiger of *Trailing Suction Hopper Dredger* (TSHD) is een zelfvarend baggerschip dat door middel van pompen het sediment van de bodem opzuigt en in een eigen ruim (“beun”) opvangt. Het opzuigen gebeurt door één of twee zuigbuizen die zich op de bodem bevinden en waar op het uiteinde een sleepkop het sediment van de bodem loswoelt. Bij zanderige specie zal het sediment vrij snel bezinken in het beun en kan het overtollige water overvloeien om een maximale vulling te bekomen. Bij slibrijke specie zal het sediment quasi niet bezinken en zal er geen overvloed plaatsvinden. Wanneer het beun vol zit, zal het schip zelf naar de stortlocatie varen, waar het het sediment kan lossen. In het Schelde-estuarium gebeurt dit quasi uitsluitend door middel van het storten via de kleppen, i.e. deuren onderaan het schip die geopend worden zodat het sediment kan bezinken op de bodem ter hoogte van de aangewezen stortlocatie. Naast deze techniek kan men ook het sediment lossen via leidingen verbonden met een sproeiponton of locatie aan de wal, of rainbowen. Deze technieken worden echter zelden in de Beneden-Zeeschelde.

Een ploeg maakt gebruik van een balk die over de bodem wordt gesleept om het sediment te verplaatsen. De balk kan uitgerust zijn met jets die water en/of lucht kunnen injecteren in de bodem om het sediment te fluidiseren. Deze techniek verplaatst het sediment over korte afstanden en wordt met name ingezet nabij kaaimuren waar het onmogelijk is om met een sleephopperzuiger te werken omwille van het risico op beschadiging van de kaaimuren en/of de bodembescherming.



Figuur 1 – Sleephopperzuiger (links) en sweepbeam (rechts)

Bron: www.scheepvaartwest.be

2.2 Overzicht locaties

Figuur 2 geeft een overzicht van de belangrijkste bagger- en stortlocaties in de Beneden-Zeeschelde. De belangrijkste baggerlocaties zijn enerzijds de drempels in de vaargeul (cfr. drempel van Zandvliet, drempel van Frederik) en anderzijds de stroomluwe dokken en toegangsgeulen tot de sluisen (Deurganckdok, toegangsgeulen tot Zandvliet- en Berendrechtsluis en Kallosluis). De stortlocaties kunnen onderverdeeld worden volgens type sediment dat er teruggestort wordt: in de Schaar van Ouden Doel wordt zanderige specie teruggestort, terwijl ter hoogte van Punt van Melsele en Oosterweel slibrijke specie wordt teruggestort. Daarnaast zijn er stortzones aanwezig ter hoogte van de diepe delen in de vaargeul ter hoogte van Kallo- en Boudewijn- en Van Cauwelaertsluis (Ketelputten). Enkel in de stortzone Ketelputten werd tijdens de aanlegbaggerwerken van de verruiming van de vaargeul zanderige specie gestort (geen onderhoudsbaggerspecie). In de overige diepe delen werd enkel slibrijke specie gestort.

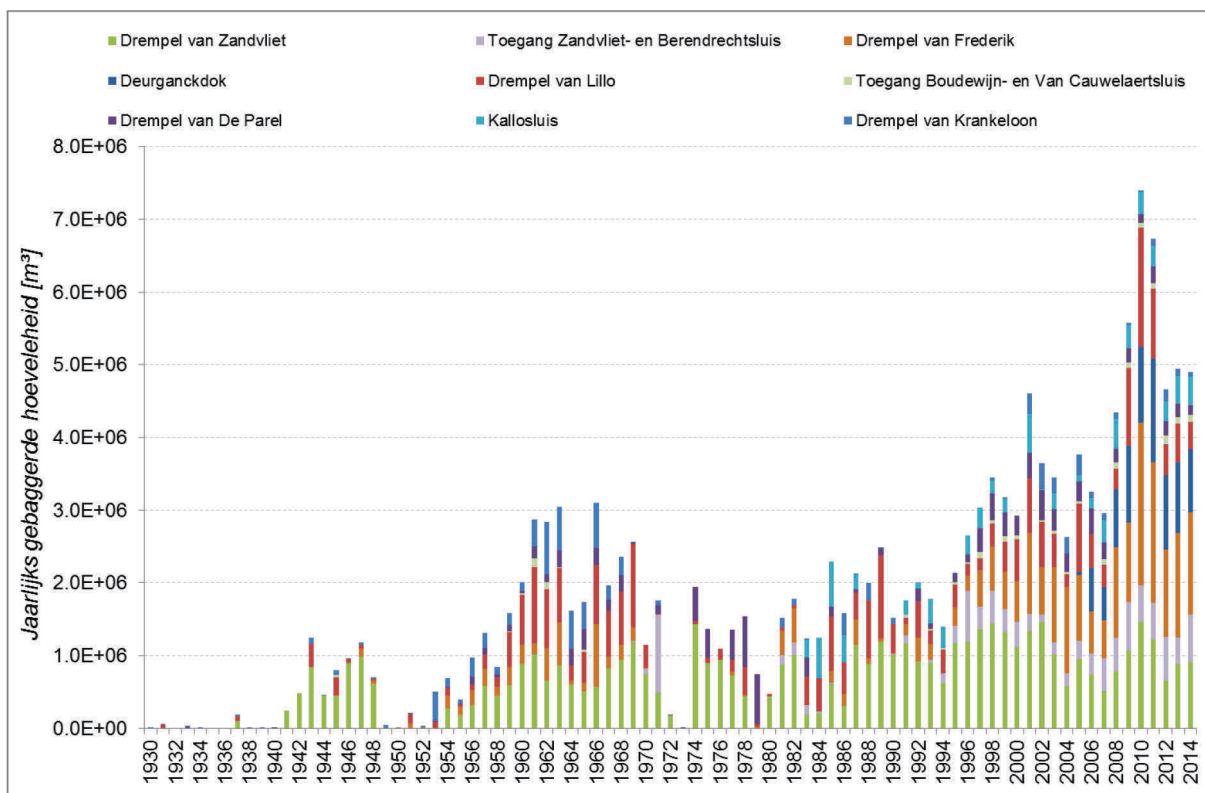
2.3 Overzicht bagger- en storthoeveelheden

De bagger- en storthoeveelheden worden sinds het begin van de werken geregistreerd. Figuur 3 geeft de jaarlijkse baggerhoeveelheden per baggerlocatie weer, terwijl Figuur 5 de jaarlijkse storthoeveelheden voor zand en Figuur 5 die voor slib weergeeft (bron: "baggerstatistiek"). Hierbij dient opgemerkt te worden dat de commerciële sedimentonttrekking die plaatsvindt in de Schaar van Ouden Doel, hier niet in is opgenomen. De volumes voor zanderige specie zijn reële volumes, die voor slib zijn zogeheten "equivalente" volumes V' , waarbij een omrekening heeft plaatsgevonden naar een constante densiteit (in het beun verschilt deze per trip). V' is het volume dat het slib zou hebben wanneer het een densiteit $1,6 \text{ ton/m}^3$ zou gehad hebben.

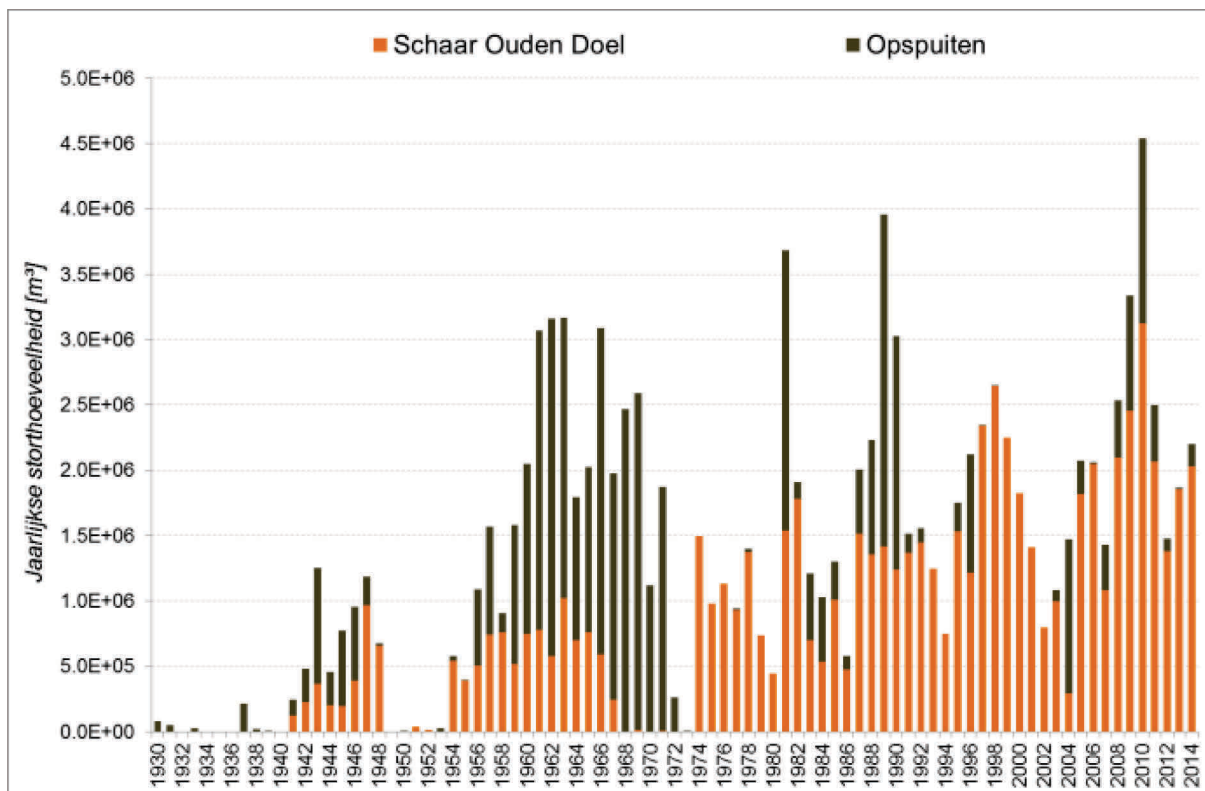
Voor 1950 bleef de baggerinspanning beperkt (maximaal 1 Mm^3 beunvolume zand per jaar). Na de eerste verruiming in de jaren 1960 nam het onderhoudsvolume op Vlaamse grondgebied toe tot 1 à $1,5 \text{ Mm}^3$ beun-volume zand per jaar en $0,5$ à $1 \text{ Mm}^3 V'$ slib per jaar. Na de tweede verruiming eind jaren 1990 steeg het onderhoudsvolume verder met een verhoging in 2005 na de opening van Deurganckdok tot $1,5$ à $2,5 \text{ Mm}^3$ beunvolume zand per jaar en 2 à $3 \text{ Mm}^3 V'$ slib per jaar. In 2010-2011 werd een tijdelijk maximum bereikt dat toe te schrijven is aan de 3^e verruiming van de vaargeul en het op diepte brengen van Deurganckdok (baggerdiepte TAW $-17,0 \text{ m}$ (aanlegdiepte dok), daar waar dit tot 2010 eerder TAW $-15,5 \text{ m}$ was).



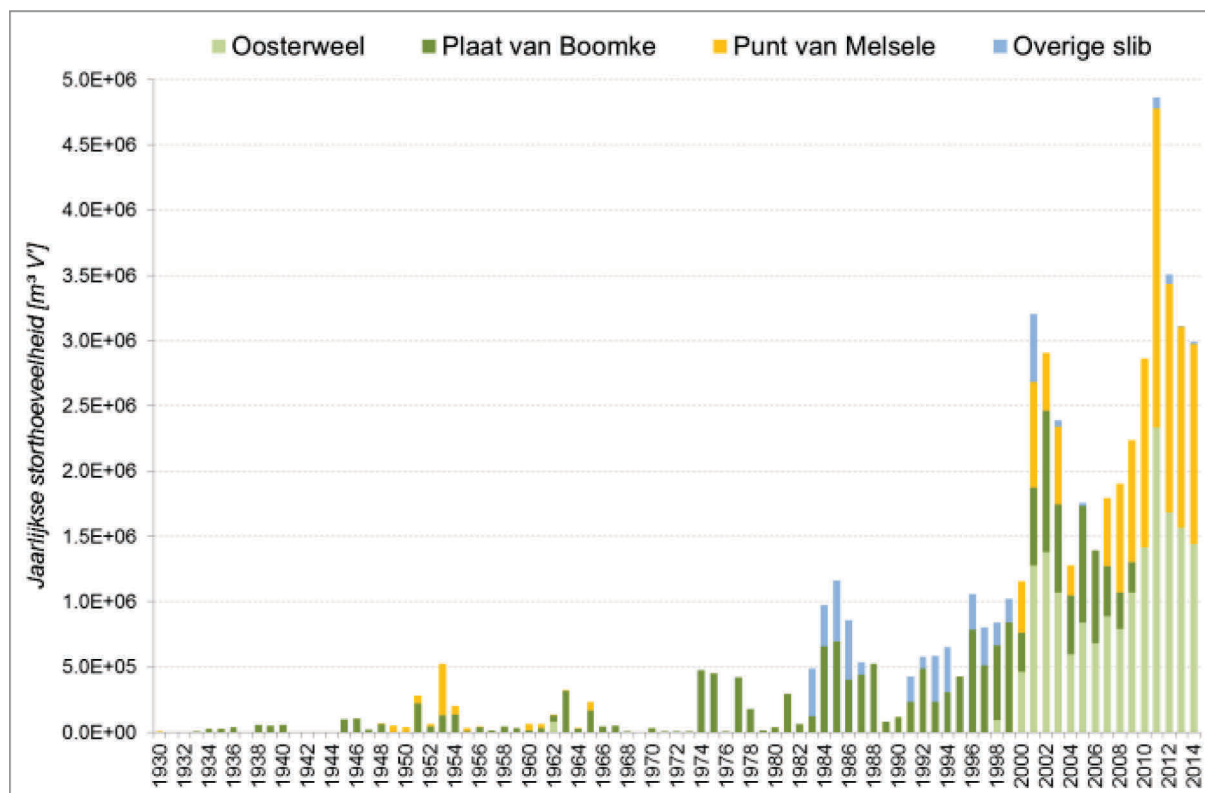
Figuur 2 – Overzicht bagger- (oranje polygonen) en stortlocaties (groene polygonen)



Figuur 3 – Overzicht jaarlijkse baggerhoeveelheden per baggerlocatie. Slibvolumes zijn “equivalente” volumes V’.



Figuur 4 – Overzicht jaarlijkse storthoeveelheden per stortlocatie voor zand

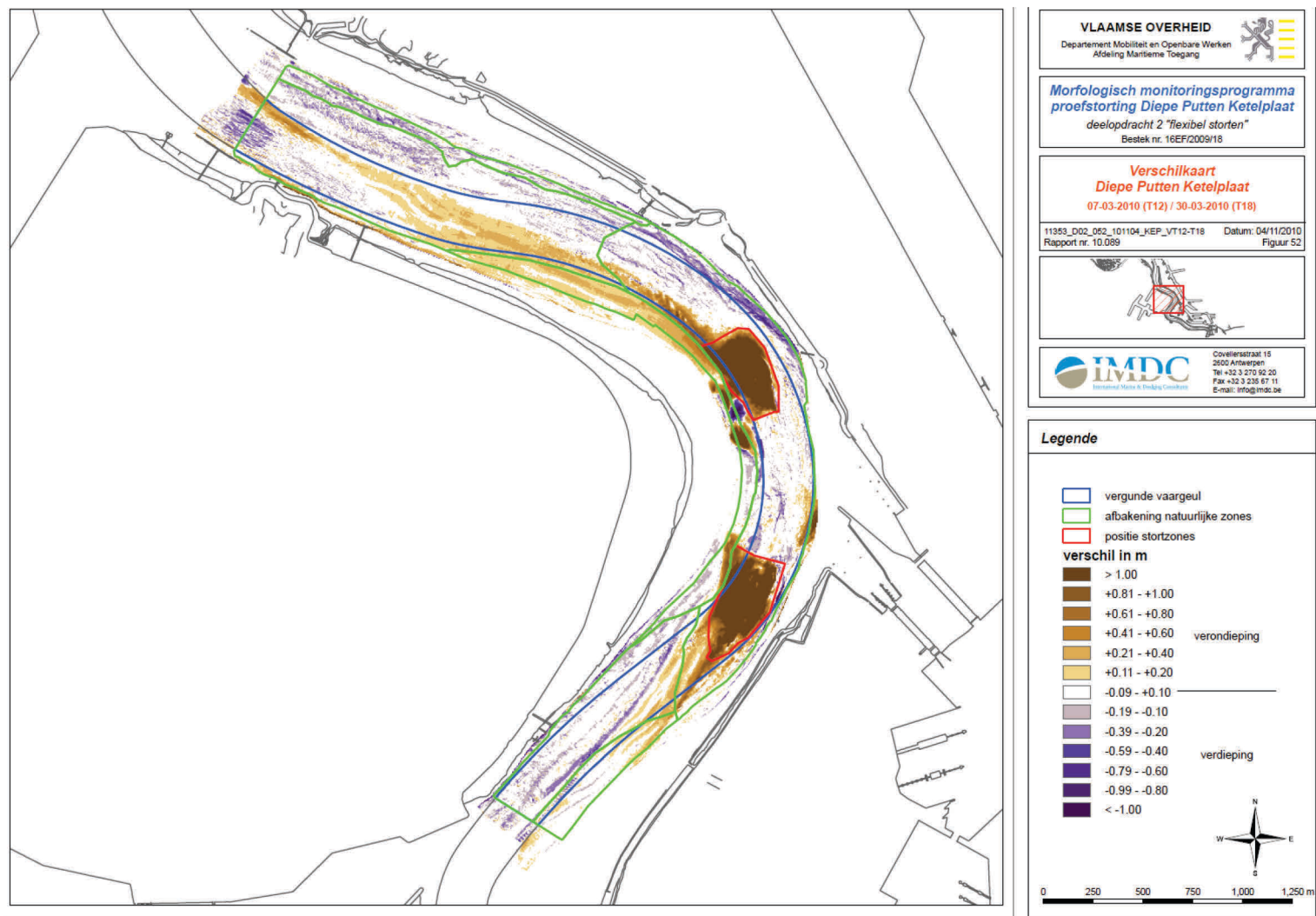


Figuur 5 – Overzicht jaarlijkse storthoeveelheden per stortlocatie voor slib (equivalente volumes V') per stortlocatie

2.4 Stortproef Ketelputten

In maart 2010 werden er in opdracht van Maritieme Toegang stortingen uitgevoerd van in totaal iets meer dan 500.000 m³ zand in de vaargeul ter hoogte van de diepe putten langs de Ketelplaat, de “Ketelputten”, met als doel de verkenning van deze nieuwe stortlocatie. Deze proef werd uitgebreid gemonitord en het gedrag van de gestorte specie werd beschreven in (IMDC, 2011 en IMDC, 2014).

Figuur 6 geeft via een verschilkaart een beeld van deze stortproef: er werd gestort in 2 stortzones (rode polygonen), de noordelijkste polygoon is de stortzone bij eb, de zuidelijkste polygoon de stortzone bij vloed.

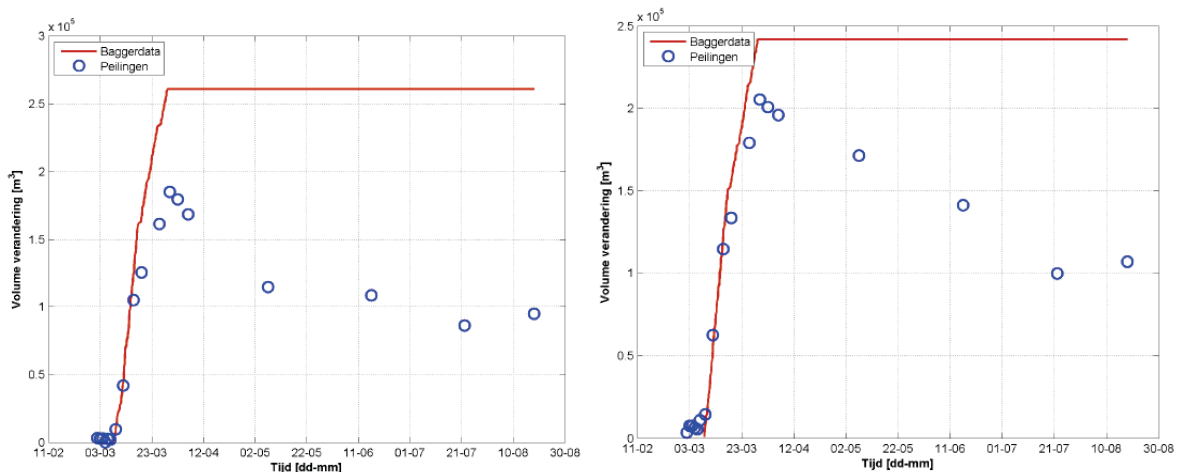


Figuur 6 – Bathymetrische verschilkaart Diepe Putten Ketelplaat tussen begin en einde van de stortproef
 (Bron: IMDC, 2011)

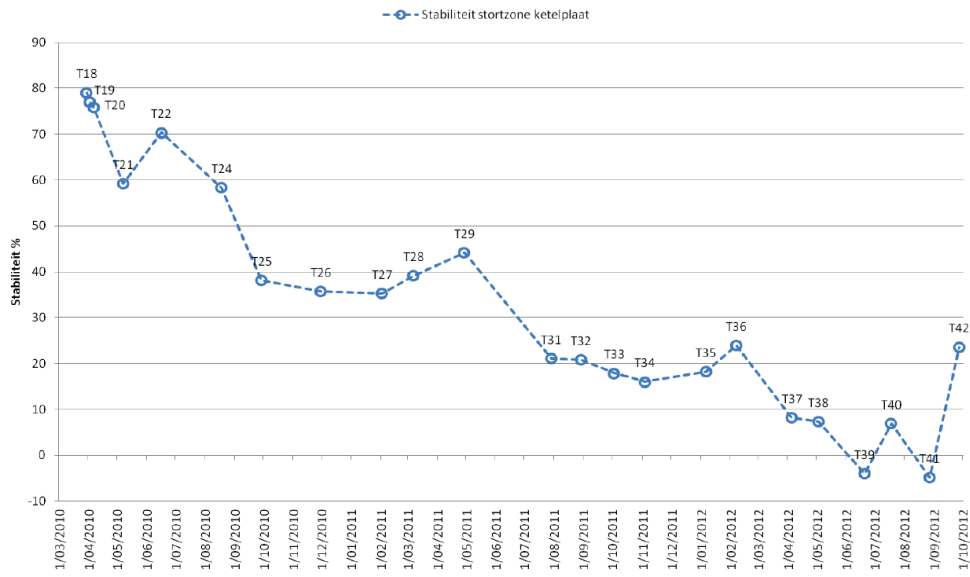
Uit de analyse van deze stortproef bleek dat op het einde van de stortproef nog ca. 70 % van de gestorte specie zich binnen de stortzone eb bevond. Voor de stortzone vloed bedroeg dit percentage ca. 80 %. Er is dus reeds een behoorlijk verlies van baggerspecie tijdens het storten zelf.

In de eerste vier à vijf maanden na de stortproef, bleef er van het totaal volume gestort materiaal in de stortzone eb ca. 35 % liggen, en in de stortzone vloed kon men nog ca. 40 % van deze hoeveelheid terugvinden. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 7, waar voor respectievelijk stortzone eb en stortzone vloed de absolute cumulatieve volumeverandering weergegeven wordt van maart tot en met augustus 2010. De baggerdata worden weergegeven in rood en vertegenwoordigen de werkelijk gestorte hoeveelheden materiaal, terwijl de blauwe punten de hoeveelheden weergegeven die teruggevonden kunnen worden met behulp van de volumeberekeningen op basis van bathymetrische peilingen van het gebied.

In de volgende maanden bleef het volume gestaag afnemen (zie Figuur 8): na één jaar was er nog ongeveer 40% terug te vinden in de polygoon, na 2 jaar ongeveer 15% en in de zomer van 2012, ruim 2 jaar na de stortingen netto alle sediment geërodeerd was. Uit de bathymetrische opnames blijkt wel dat de gestorte specie deels is blijven liggen, namelijk op de bodem van de putten (ca. 15 % van de initieel stabiele 400.000m³). Het sediment op de flanken van de putten is wel geërodeerd, alsook een deel van het originele bodemprofiel van de flanken en het gebied rond de putten. Het geërodeerde sediment is deels afgezet op de rand van de Ketelplaat, maar ook naar andere gebieden, vermoedelijk in zuidwaartse richting.



Figuur 7 – Absolute cumulatieve volumeverandering (m³) in de stortzone eb (links) en stortzone vloed (rechts) (maart – augustus 2010) (Bron: IMDC, 2011). De rode lijn geeft de cumulatieve hoeveelheid gestort materiaal weer.

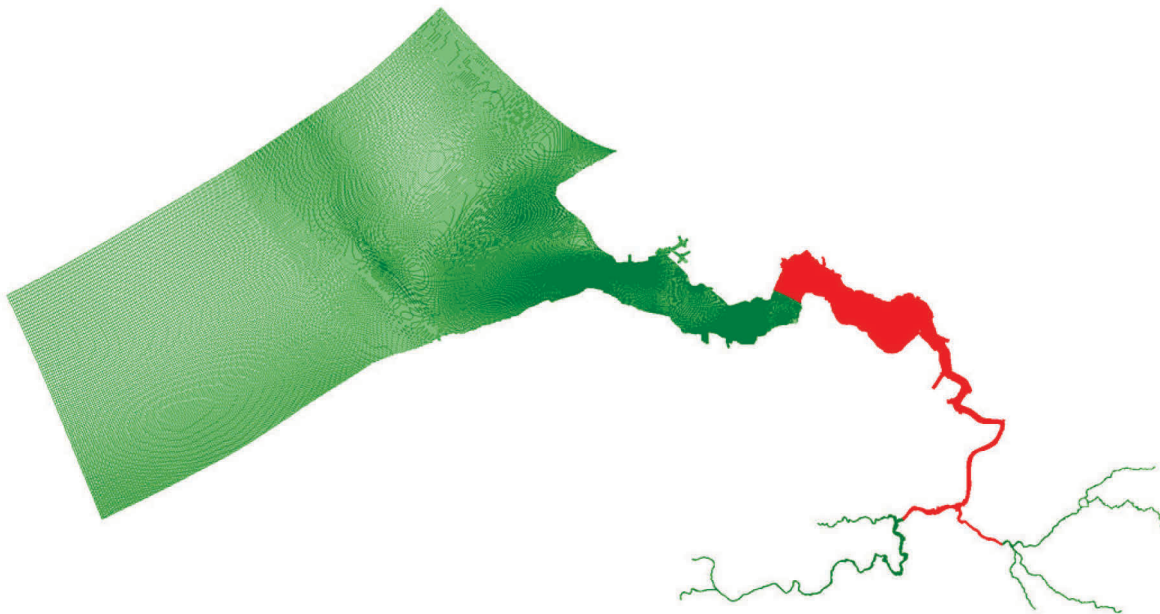


Figuur 8 – Stabiliteit van de baggerspecie in de stortzone (eb+vloed) aan de Ketelplaat (Bron: IMDC, 2014)

3 MODELOPZET

3.1 NEVLAmodel

Het numeriek 2D-model gebruikt in deze studie is geknipt uit het zogenaamde NEVLA-model. Het NEVLA-model is een 3D-hydrodynamisch model ontwikkeld met SIMONA (Verheyen *et al.*, 2012 en Maximova *et al.*, 2013). Dit model omvat het volledige Schelde-estuarium: een deel van de Noordzee, de Vlakte van de Raan, de Westerschelde, Zeeschelde en getijgebonden zijrivieren in Vlaanderen. De afwaartse rand van het NEVLA-model is gelegen in de Noordzee. De opwaartse randen zijn gelegen aan de grenzen van het tijgebied (zie Figuur 9).



Figuur 9 – Modelgrid van het Delft3D NEVLAmodel (groen) en het studiemodel (rood)

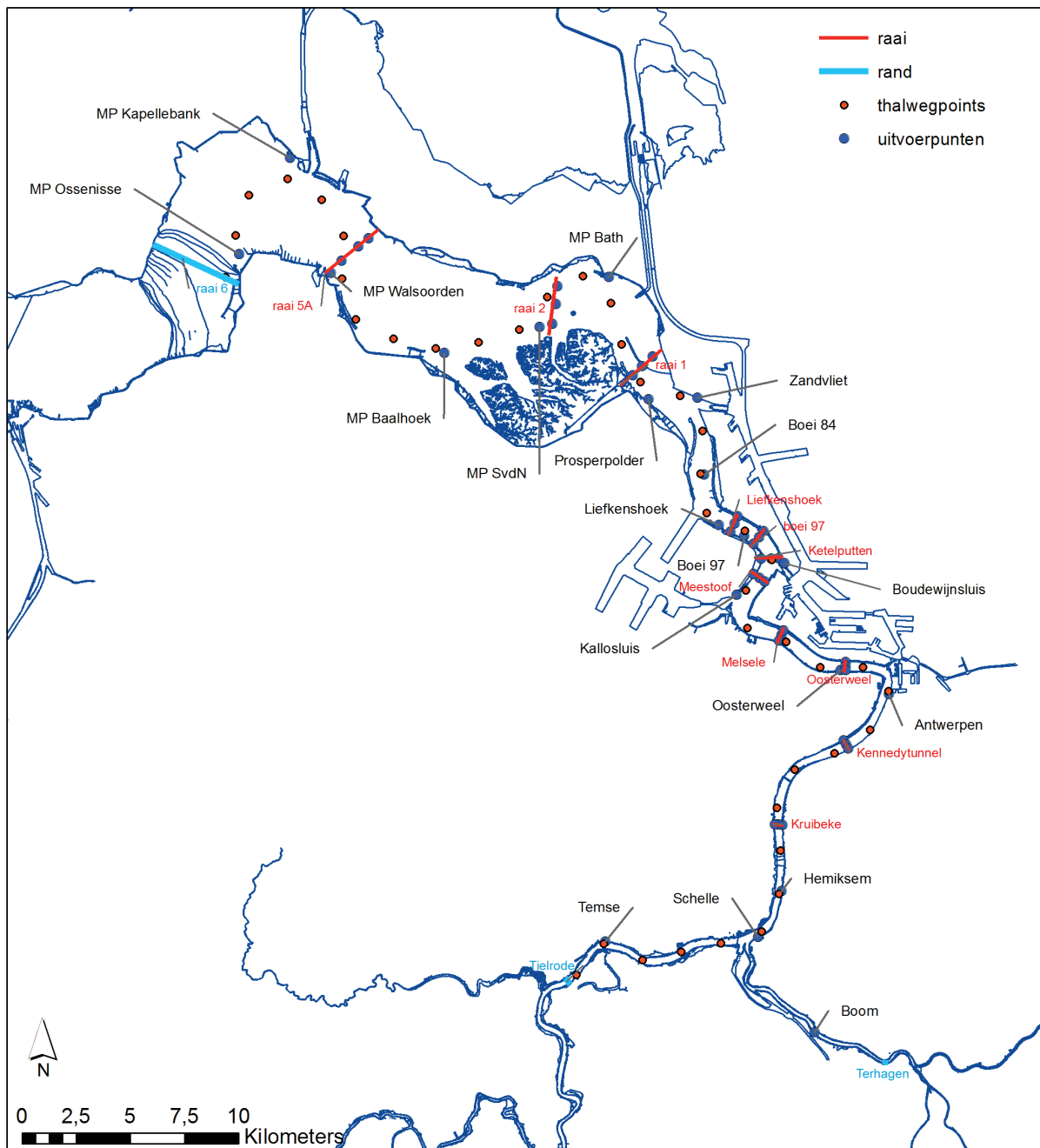
3.2 Basismodel

Voor deze studie is ervoor geopteerd een detailmodel op te zetten dat het studiegebied (Beneden-Zeeschelde) volledig omvat, inclusief een uitbreiding naar op- en afwaarts. Dit model heeft een afwaartse rand ter hoogte van de debietraai 6, gelegen net afwaarts van Ossenisse. De opwaartse randen zijn gelegen ter hoogte van Tielrode op de Zeeschelde en ter hoogte van Terhagen op de Rupel (Figuur 9 en Figuur 10).

3.2.1 Modelgrid

Het modelgrid van het gebruikte detailmodel is 3 x 3 keer fijner dan dit van het oorspronkelijke NEVLA-model. Deze verfijning werd uitgevoerd om ter hoogte van Deurganckdok, toegangsgeulen sluizen en de zone nabij Ketelputten een voldoende fijne resolutie te bekomen (Maximova *et al.*, 2011 en 2013).

De grootte van een gridcel ter hoogte van Schaar van Ouden Doel bedraagt circa 26 m x 18 m (lengte x breedte). Ter hoogte van het Deurganckdok bedraagt een grootte van een gridcel circa 16 m x 18 m, en ter hoogte van Kruikeke circa 30 m x 14 m.



Figuur 10 – Situering studiegebied in het model, met afwaartse rand thv Raai 6 en opwaartse randen te Tielrode en Terhagen

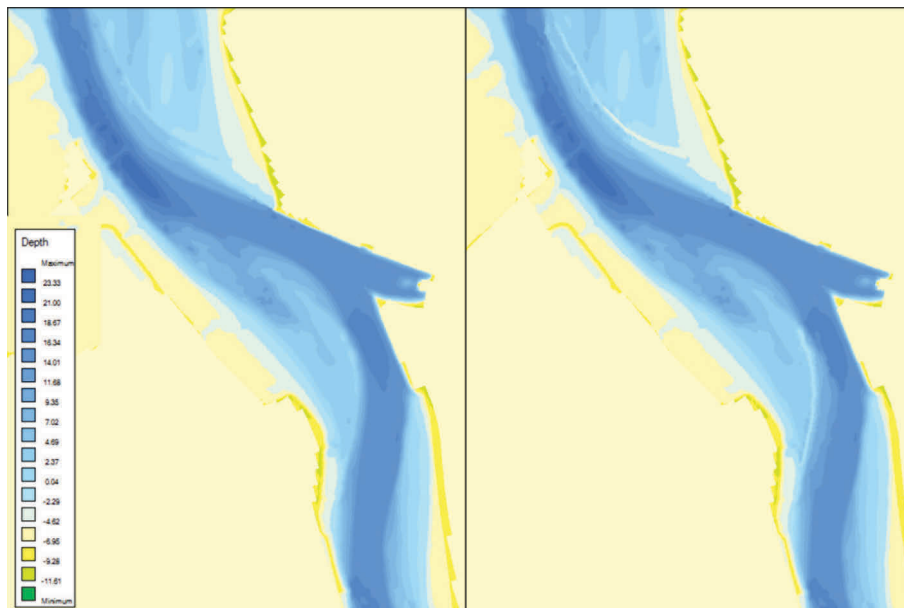
3.2.2 Topo-bathymetrie

De topo-bathymetrie van de Westerschelde en de Beneden-Zeeschelde zijn gebaseerd op metingen van 2011 aangeleverd door respectievelijk Rijkswaterstaat en Vlaamse Hydrografie. De bathymetrie van de intertidale gebieden is gebaseerd op LIDAR-metingen van 2011. Bij overlap tussen LIDAR en bathymetrische gegevens, is voorkeur gegeven aan bathymetrie. TAW is gebruikt als verticaal referentievlak. De bathymetrische data zijn omgezet van een 1 m bij 1 m grid naar een 5 m bij 5 m grid om de totale bestandsgrootte van het samengestelde bathymetrische grid werkbaar te houden. Aangezien de gridcellen van het model groter zijn dan 5x5 m (zie §3.2.1) vormt dit geen probleem voor het aanmaken van de modelbathymetrie.

De bathymetrie van het Deurganckdok is bepaald op basis van de waarde van de oorspronkelijke diepte van het dok: TAW -19 m in het midden van het dok en TAW -17 m aan de kaaien.

Aan de afwaartse rand van het model werd een waterstandsrandvoorwaarde opgelegd op een doorsnede met meerdere geulen. Het model vertoonde numerieke instabiliteiten ter hoogte van deze afwaartse rand. De bathymetrie aan de afwaartse rand van het model werd artificeel verdiept om de stabiliteit van het model te verbeteren (*WL/Delft Hydraulics, 2007*). Ook een reductie van de tijdstap werd toegepast om de instabiliteit te verhelpen.

Daarnaast werden ter hoogte van de leidam van de Ballastplaat en strekdam aan Ouden Doel een detailbathymetrie van de dammen ingevoerd en manueel nagekeken of de top van de dammen correct weergegeven werd in de bathymetrie (de top werd eveneens 2 cellen breed gemaakt). Op deze manier worden instabiliteiten voorkomen rond deze dammen. Figuur 11 geeft het verschil in de topo-bathymetrie voor en na deze ingreep weer.



Figuur 11 – Topo-bathymetrie van lei- en strekdam voor en na manuele aanpassing

3.2.3 Uitvoerpunten

Figuur 10 geeft de gebruikte uitvoerpunten en raaien weer die in het model gedefinieerd werden. Hierbij werd gebruik gemaakt van meetstations/debietraaien waar metingen beschikbaar zijn en zullen gebruikt worden in de modelvalidatie. Op elke raai werden 3 uitvoerpunten gedefinieerd, 1 op de thalweg en 2 aan weerszijden, in het ondiepere deel van de geul. Daarnaast werd op de thalweg om de 2 km eveneens een uitvoerpunt gelegd.

3.2.4 Randvoorwaarden

De opgelegde tijdreeksen aan de op- en afwaartse randen van het model werden gegenereerd op basis van een simulatie met het NEVLA-model, die gebruikt werd binnen het onderzoek Habitatmapping Zeeschelde (Maximova *et al.* 2013). De simulatieperiode van dit model loopt van 24/09/2009 tot 24/10/2009. Het model werd voor deze periode gevalideerd binnen het onderzoek Habitatmapping Zeeschelde.

Aan de afwaartse rand van het model wordt een tijdreeks van waterstanden opgelegd, afkomstig uit het NEVLA-model. Aan de opwaartse randen te Tielrode en Terhagen wordt een tijdreeks van debieten opgelegd, afkomstig uit het NEVLA-model.

3.2.5 Tijdstap

Voor de basisberekening werd gebruik gemaakt van een tijdstap van 0,125 min (~7,5 s).

3.2.6 Modelparameters

Een overzicht van de toegepaste modelparameters voor het basismodel wordt gegeven in Tabel 1.

Tabel 1 – Overzicht modelparameters

Parameter	Waarde
Tijdstap	7,5 s
Secondary flow	Off
Initiële waterstand	TAW +1,5 m
Horizontal eddy viscosity	1 m ² /s
HLES	Off
Aantal verticale lagen	1 (2DH model)
Versie Delft3D Flow	5.00.00.1234 (Linux)
Zout transport	Off
Wind	Off
Formule Ruwheid	Manning
Waarde bodemruwheid	0,025 s/m ^{1/3} /constant over grid

3.2.7 Simulatieperiode

Er werd een simulatieperiode van één volledige springtij-doodtij-cyclus gebruikt, voor de periode van 24/09/2009 tot 08/10/2009.

3.3 Sedimenttransportmodellering

3.3.1 Sedimentfracties

Aangezien de Beneden-Zeeschelde wordt gekarakteriseerd door sedimenttransport van zowel slib als zand, werd oorspronkelijk de keuze gemaakt om de scenario's voor het terugstorten van zand respectievelijk slib te onderzoeken met verschillende modellen. Binnen deze modellen zou enerzijds gerekend worden met louter de cohesieve fractie ("slib"), terwijl anderzijds een model met louter de niet-cohesieve fractie ("zand") zou worden opgezet.

Echter, door een aantal deskundigen (o.a. Commissie Monitoring Westerschelde) werd het belang aangehaald van beide fractie en de onderlinge interactie. Daarom werd binnen het gevoeligheidsonderzoek eveneens een model opgezet waarbij beide fracties gezamenlijk gemodelleerd werden. De invloed van de slibfractie op de zandfractie in het model bleek echter verwaarloosbaar en werd er uiteindelijk voor geopteerd om voor de scenarioberekeningen slechts één enkele zandfractie te gebruiken.

In het model dienen een aantal sedimentkarakteristieken opgelegd te worden. Aangezien de keuze van deze waarden onderdeel uitmaken van de kalibratie/validatie van het model, werden slechts een aantal parameters constant gehouden. Voor de zandfractie wordt een droge dichtheid van 1600 kg/m^3 genomen (specifieke dichtheid = 2650 kg/m^3 en porositeit 40%) en wordt een d_{50} van $150 \mu\text{m}$ gekozen. Deze keuze is gebaseerd op korrelgroottes van getransporteerde sedimenten tijdens een reeks 13u-metingen in de Zeeschelde (Plancke et al., 2014). De initiële concentratie van het zand werd ruimtelijk constant gehouden en gelijk aan $0,05 \text{ kg/m}^3$.

3.3.2 Randvoorwaarden

Aan de op- en afwaartse randen van het model wordt een constante sedimentconcentratie opgelegd, afgeleid op basis van metingen (Vandenbruwaene *et al.*, 2015) en gelijk aan $0,05 \text{ kg/m}^3$. Daarnaast werd aan de randen een evenwichtsconcentratie opgelegd, wat ervoor zorgt dat aan de randen de sedimentconcentratie in evenwicht gehouden wordt met de lokale stromingskarakteristieken en er dus aan de rand quasi geen sedimentatie of erosie zal optreden.

3.3.3 Dikte bodemsedimentlaag

Binnen het scenario-onderzoek werd gewerkt met een variabele dikte van de erodeerbare bodemlaag (initial sediment layer thickness at bed). De dikte van de erodeerbare laag werd berekend uit het verschil tussen de bathymetrie en de diepte van de harde laag.

De diepte van de harde lagen van de Beneden-Zeeschelde werd bepaald in het kader van de studie 'Instandhouding vaarpassen Schelde Milieuv vergunningen terugstorten baggerspecie', in het kader van LTV – Veiligheid en Toegankelijkheid, door IMDC (2013) ism. Deltares, Svašek Hydraulics en ARCADIS Nederland. De diepte van de harde laag in de Beneden-Zeeschelde is bepaald op basis van de basis-Quartairstaart, verschillende bathymetrieën van de Zeeschelde (tot 1950) en de lithologische kaart van de bodem van 2009.

De diepte van de harde lagen van de Westerschelde werd eveneens bepaald in het kader van LTV – Veiligheid en Toegankelijkheid, door Svašek Hydraulics (2012). Hierbij werd vertrokken van een kartering van TNO in 2003. Vervolgens werd de diepte van de historische bodems vanaf 1960 tot en met 2011 bekeken. De niet-erodeerbare laag werd verlaagd op die punten waar de bodemligging in het verleden lager is geweest.

Deze laatste actie werd niet uitgevoerd op de diepte van de harde laag voor de Beneden-Zeeschelde, wat ertoe leidde dat bij de berekening van het verschil tussen de bathymetrie en de diepte van de harde laag voor een aanzienlijk aantal punten de harde laag hoger lag dan de bathymetrie (wat leidde tot een negatieve dikte). In deze punten werd de dikte van de erodeerbare laag gelijk gesteld aan 0.

3.4 Modelvalidatie

3.4.1 Sedimenttransport

Een overzicht van de gebruikte parameters voor het modelleren van sedimenttransport wordt weergegeven in Tabel 2. Er werd gekozen om geen saliniteit of secondary flow toe te passen omdat blijkt dat het gebruik hiervan geen duidelijk positief effect heeft op de voorspellende waarde van het model. Het gebruik van zout in het model heeft wel een effect maar de run met zout voorspelt niet beter of slechter de metingen dan de run zonder zout. Hetzelfde geldt voor de overige parameters. Er werd daarom gekozen om te werken met een korrelgrootte van $150 \mu\text{m}$, omdat die het dichtst aanleunt bij de reële korrelgrootte. Omdat het gebruik van verschillende fracties geen groot effect heeft, maar wel een negatief effect heeft op de rekentijd werd gekozen om slechts met 1 zandfractie te werken. Het gebruik van een variabele dikte van de sedimentlaag heeft wel een effect, en bleek bij het uitvoeren van morfologische runs een iets realistischer sedimentatie-erosie patroon te genereren (zie Vos et al., 2016).

Als sedimenttransportformule werd gekozen voor de formule van Engelund-Hansen omdat uit de literatuur (Van Dam, 2014) bleek dat deze beter geschikt is voor het morfologisch modelleren van de Beneden-Zeeschelde.

Wat betreft de snelheden was er in de gevoeligheidsruns reeds weinig effect te zien van de verschillende parameterinstellingen. De gemodelleerde snelheden benaderen de gemeten snelheden dus vrij goed. De gemodelleerde transporten bij de gekozen parameters geven een overschatting in de vloedfase bij Kruibeke en Liefkenshoek en een onderschatting bij Oosterweel. Bij de eb fase is de afwijking beperkter. Hoewel er runs waren die in sommige stations beter scoorden, scoorden die in de andere stations dan weer slechter (of in de eb fase). Via de finale modelinstellingen wordt het transport globaal gezien goed voorspeld.

3.4.2 Morfologie

Ondanks het aanpassen van verschillende parameters werd er geen manier gevonden om een geloofwaardige inschatting van de transporthoeveelheden en –patronen te maken met behulp van een morfologisch model.

De resultaten werden sterk beïnvloedt door de keuze van de sedimenttransportformule. Uit de literatuur bleek dat voor de Westerschelde de formule van Engelund-Hansen de beste resultaten opleverde (o.a. Van Dam, 2014).

Het gebruik van een variabele dikte van de initiële sedimentlaag bleek eveneens een positieve invloed te hebben, m.n. de erosie- en sedimentatiehoeveelheden bleven hierdoor iets beperkter. Het gebruik van een variabele sedimentdikte en dus het rekening houden met de aanwezigheid van harde lagen in de bodem geeft logischerwijze een meer realistische voorspelling. Ook in de realiteit is de aanwezigheid van harde lagen mogelijk een bepalende factor in de hoeveelheid erosie die optreedt en de hoeveelheid sediment die beschikbaar is voor afzetting.

Bij een langere doorlooptijd van het morfologisch model bleek dat de transporthoeveelheden doorheen de tijd afnamen en realistischer waarden werden gemodelleerd. Op dit moment is de originele bathymetrie echter zodanig veranderd door de erosie- en sedimentatie in (vooral) het eerste jaar, dat de sedimentatie- en erosiepatronen niet meer betrouwbaar zijn.

Er werd daarom besloten dat de huidige generatie van morfologische modellen niet in staat is om op dergelijke korte tijdschaal en in dergelijk detail correcte resultaten te genereren. In plaats daarvan werd geopteerd om een aantal stortscenario's door te rekenen in een hydrodynamisch model (zonder morfologie) en op basis van de wijzigingen in sedimenttransportcapaciteit (zie Vos et al, 2016).

Tabel 2 – Gebruikte parameters voor de finale modelinstellingen

Parameter	Waarde
Ruwheid (Manning)	0,025
Korrelgrootte	150 μm
Tijdstap	7,5 s
Aantal sedimentfracties	1
Sedimenttransportformule	Engelund - Hansen
Secondary flow	nee
Saliniteit	nee
Sedimentconcentratie afwaartse rand	0,05
Sedimentconcentratie opwaartse rand Terhagen (kg/m^3)	0,05
Sedimentconcentratie opwaartse rand Tielrode (kg/m^3)	0,05
Initiële sedimentconcentratie (kg/m^3)	0,05
Initiële dikte sediment bodemlaag (m)	variabel (o.b.v. lithologische kaart)
Specifieke dichtheid (kg/m^3)	2650
Droge dichtheid (kg/m^3)	1600

4 SCENARIOBEREKENINGEN

In tegenstelling tot slib, zal zanderige specie een zekere stabiliteit kennen ter hoogte van de stortlocatie (zie o.a. IMDC, 2013). Dit betekent dat bepaalde morfologische ontwikkelingen kunnen gestuurd worden door middel van de stortstrategie. Aangezien de getijvoortplanting de voorbije decennia versterkt is en dit ongewenste effecten met zich meebrengt (Depreiter et al. 2014), wordt gezocht naar een stortstrategie die deze effecten mogelijks kan reduceren. Hiertoe is het van belang inzicht te hebben hoe het gestorte zand zich zal gedragen (o.a. residueel transport). Met behulp van numerieke modelsimulaties zal het inzicht hierin verder opgebouwd worden, wat gebruikt zal worden bij de uiteindelijke invulling van de stortstrategie.

Gelet op de beperkingen van het modelinstrumentarium in het reproduceren van opgetreden morfologische evoluties (zie (Vos et al., 2015)), wordt er binnen voorliggend scenario-onderzoek gekozen om een inschatting te maken van de morfologische ontwikkeling op basis van stoomsnelheden en sedimenttransportcapaciteit. Stortingen worden geïmplementeerd door een aanpassing van de bodemligging. Deze implementatie dient gezien te worden als een potentieel netto-resultaat van stortingen waarbij een bepaalde hoeveelheid van het gestorte sediment aanwezig blijft in het gebied. Het exacte percentage “stabiele specie” zal variëren in tijd en locatie en is moeilijk in te schatten met de huidige modellen. In deze analyse zal enkel een ruwe inschatting gemaakt worden, gebruik makende van de ervaringen ter hoogte van Schaar van Ouden Doel en Ketelputten.

4.1 Beschrijving stortscenario's

Momenteel wordt zanderige specie enkel gestort in het stortvak Schaar Ouden Doel (ca. 2 Mm³ per jaar). Daarnaast wordt er op deze plaats ook aan zandwinning gedaan, eveneens a rato van 1,5 à 2 Mm³ per jaar. Gezien de wens bestaat om deze zandwinning op termijn af te bouwen kan de stortcapaciteit binnen Schaar Ouden Doel afnemen en niet meer voldoende zijn op de middellange termijn. Daarenboven is het in het kader van sturen van morfologische ontwikkelingen met behulp van stortingen (verminderen van de getijslag bv.) interessant om alternatieve stortlocaties te bekijken, met name locaties in de diepere delen van de geul. Achterliggend idee is dat door het verondiepen van de geul de wrijving toeneemt en zo de getijvoortplanting afgeremd wordt ($c = \sqrt{g \cdot d}$ voor een “lange” golf ²). De locaties die als mogelijke alternatieven in aanmerking komen zijn:

- Ketelputten
- diepe delen ter hoogte van Kallosluis
- diepe delen ter hoogte van Oosterweel
- diepe delen ter hoogte van Royerssluis
- diepe delen ter hoogte van de Rede van Antwerpen

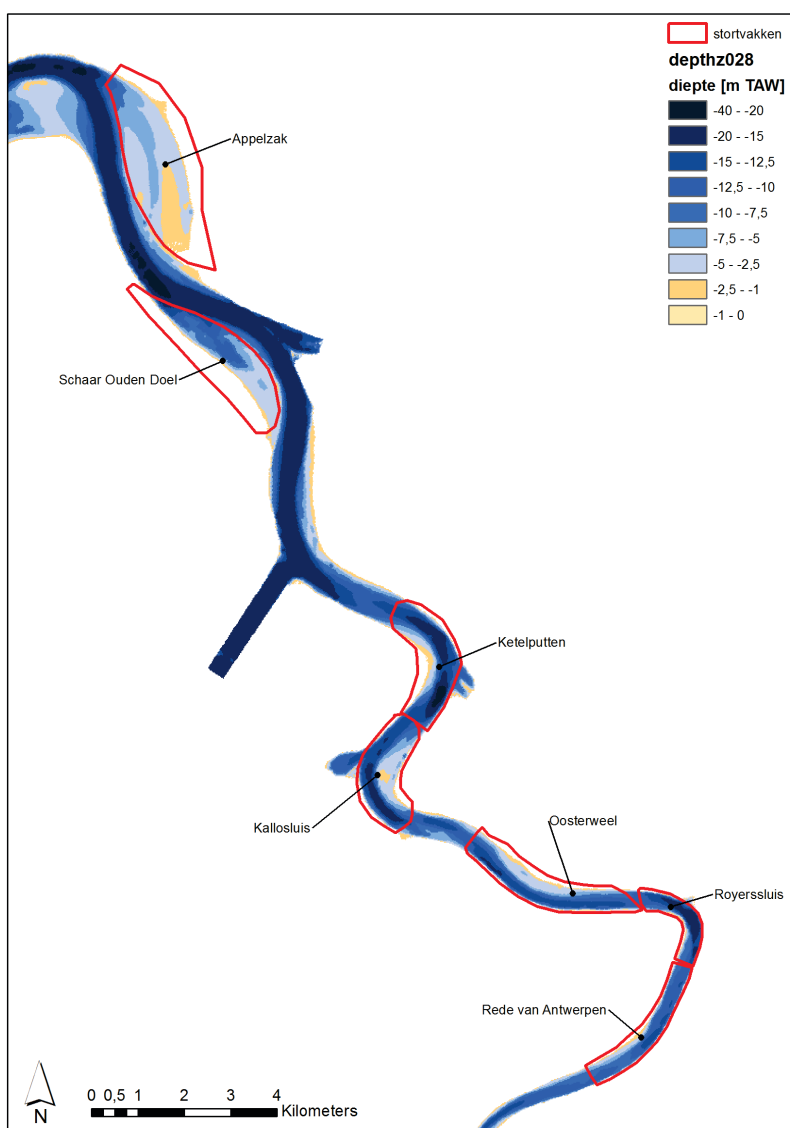
De ligging van deze ‘stortzones’ wordt weergegeven in Figuur 12. Voor de meer opwaarts gelegen stortzones wordt verwacht dat deze omwille van hun geringe diepte minder haalbaar zullen zijn, maar deze werden niettemin meegenomen in het onderzoek om over deze putten meer inzicht te krijgen. Ook de mogelijkheid om (deels) verder te storten in de Schaar van Ouden Doel wordt bekeken, alsook het terugstorten in de Appelzak, een andere nevengeul in het oostelijk deel van de Westerschelde. Door de aanwezigheid van de lei- en strekdam is de dynamiek hier kleiner (met name

² c = voortplantingssnelheid van de golf [m/s]
g = valversnelling [m/s²]
d = waterdiepte [m]

tijdens de eb fase), en zal de stabiliteit van de gestorte specie naar verwachting groter zijn. Een potentieel effect zou de creatie van extra ondiepwatergebied in deze nevengeulen zijn, met eventueel een toename van het laagdynamisch areaal.

Bij het evalueren van de verschillende stortscenario's zal rekening gehouden moeten worden met economische repercussies van de nieuwe keuze (vaartijd, evt. gebruik van sproeiponten i.p.v. kleppen), de initiële capaciteit op de verschillende locaties en de capaciteit op langere termijn (wat samenhangt met de stabiliteit van de specie) en de verwachte morfologische en ecologische impact.

Om de impact van een de stortingen op de sedimenttransportcapaciteit in te schatten werd hoger (§ 3) genoemd model gebruikt en werd in de verschillende runs de bathymetrie aangepast (opgehoogd) om het netto-effect van de stortingen te simuleren. Hiertoe wordt telkens berekend tot welke diepte de diepste delen binnen elk van de stortpolygoenen moeten worden opgevuld om de gewenste hoeveelheid sediment (afhankelijk van het scenario 0,5 , 1, 2 of 4 Mm³) voor elk scenario te kunnen storten.



Figuur 12 – Overzicht van de gebruikte stortvakken binnen de scenarioberekeningen

Tabel 4 geeft een overzicht van de doorgerekende scenario's. Er werd gekozen simulaties uit te voeren met respectievelijk 0,5, 1, 2 en 4 Mm³. Deze volume veranderingen dienen geïnterpreteerd te worden als het netto-effect van de stortingen, waarbij de tijdshorizon samenhangt met de hoeveelheid gestorte specie en de lokale stabiliteit. Een hypothetisch voorbeeld ter illustratie: indien op locatie A de stabiliteit zou verlopen als weergegeven is in Tabel 3 en er jaarlijks 1 Mm³ gestort wordt, dan zal de toestand "1 Mm³" netto overeenkomen met een toestand na 3 jaar (de verspreiding binnen de stortpolygoon wordt niet beschouwd).

Tabel 3 – Simulatie van de evolutie van het netto-effect van stortingen over een periode van 5 jaar

Jaar	1	2	3	4	5
Stabiliteit	50%	30%	20%	15%	10%
Storting jaar 1: 1 Mm ³	0,5 Mm ³	0,3 Mm ³	0,2 Mm ³	0,15 Mm ³	0,1 Mm ³
Storting jaar 2: 1 Mm ³		0,5 Mm ³	0,3 Mm ³	0,2 Mm ³	0,15 Mm ³
Storting jaar 3: 1 Mm ³			0,5 Mm ³	0,3 Mm ³	0,2 Mm ³
Storting jaar 4: 1 Mm ³				0,5 Mm ³	0,3 Mm ³
Netto-volume stortpolygoon binnen	0,5 Mm ³	0,8 Mm ³	1 Mm ³	1,15 Mm ³	0,75 Mm ³

Tabel 4 – Overzicht van doorgerekende stortscenario's

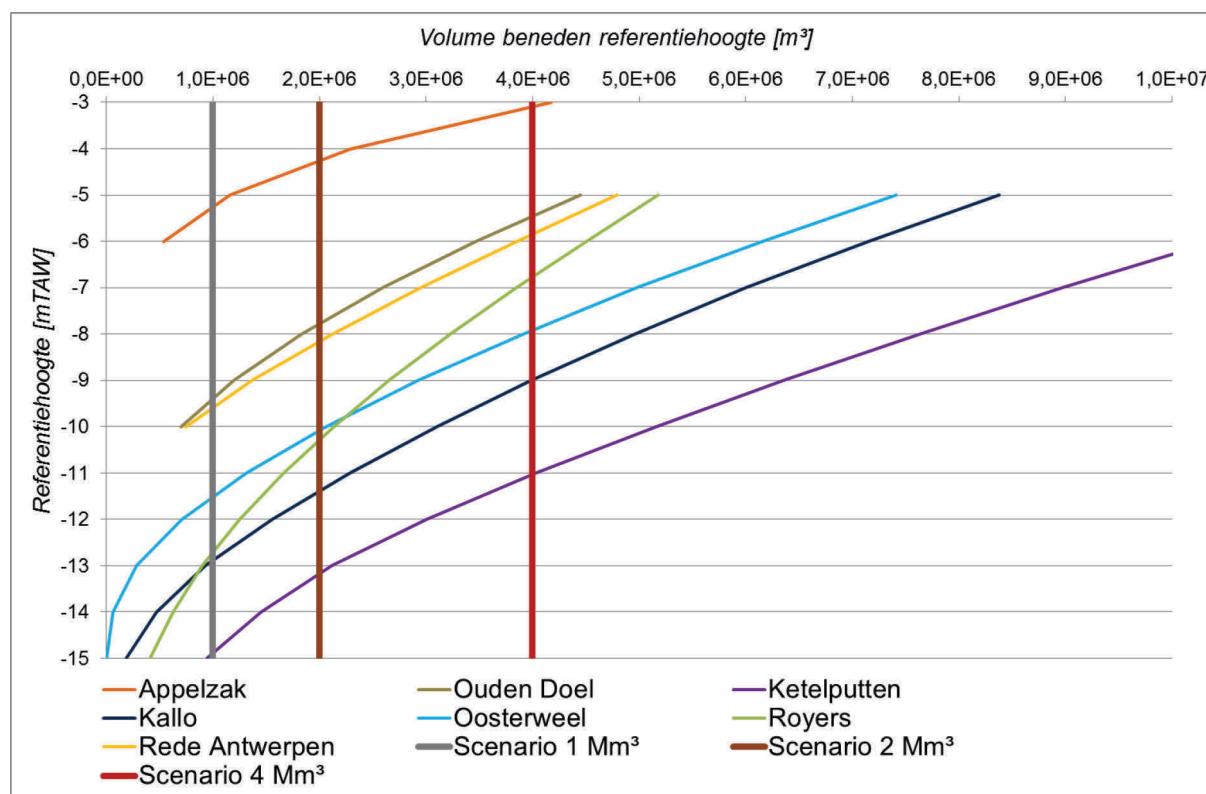
Runnaam	Locatie	Stortheveelheid
zsc200	Schaar Ouden Doel	2 Mm ³
zsc201	Schaar Ouden Doel	4 Mm ³
zsc202	Ketelputten	2 Mm ³
zsc203	Ketelputten	4 Mm ³
zsc204	Kallosluis	2 Mm ³
zsc205	Kallosluis	4 Mm ³
zsc206	Oosterweel	2 Mm ³
zsc207	Oosterweel	4 Mm ³
zsc208	Royerssluis	2 Mm ³
zsc209	Royerssluis	4 Mm ³
zsc210	Rede van Antwerpen	2 Mm ³
zsc211	Rede van Antwerpen	4 Mm ³
zsc212	Appelzak	2 Mm ³
zsc213	Appelzak	4 Mm ³
zsc214	Appelzak	1 Mm ³
zsc215	Schaar Ouden Doel	1 Mm ³
zsc216	Ketelputten	1 Mm ³
zsc217	Kallosluis	1 Mm ³
zsc218	Appelzak Schaar Ouden Doel	1 Mm ³ 1 Mm ³
zsc219	Ketelputten Kallosluis	1 Mm ³ 1 Mm ³
zsc220	Schaar Ouden Doel Ketelputten Kallosluis	1 Mm ³ 0,5 Mm ³ 0,5Mm ³

Tenslotte werden ook een aantal scenario's doorgerekend met combinaties van stortingen in verschillende stortvakken (run zsc218, zsc219 en zsc220), dit vooral om te kunnen inschatten hoe het effect van de stortingen elkaar kan beïnvloeden.

Figuur A 1 tot en met Figuur A 21 geven de wijzigingen weer in de bathymetrie voor de verschillende runs. In Figuur A 22 tot en met Figuur A 32 worden de verschilkaarten weergegeven tussen de originele bathymetrie en de scenario-bathymetrieën. Hieruit blijkt reeds dat een aantal scenario's in de praktijk niet haalbaar zullen zijn omdat de uitvoering ervan de vaargeul zodanig zou verondiepen dat scheepvaart in het gedrang zou komen. Vooral voor de meest opwaarts gelegen locaties en de storthoeveelheden van 4 Mm³ waarbij de diepte minder wordt dan 5 m TAW, terwijl in deze zones de streefdiepte 8,30 m TAW bedraagt. Daarnaast zou storten van de grotere volumes in de Appelzak (2 en 4 Mm³) betekenen dat er opgehoogd moet worden tot een diepte minder dan 5 m onder laag water. Dit betekent dat deze stortingen niet meer uitgevoerd zouden kunnen worden door middel van getijonafhankelijk kleppen, maar er getijafhankelijk gewerkt zou moeten worden of met een sproeiopont, wat hogere kosten zou betekenen. Dit in combinatie met een langere vaartijd naar deze meest afwaarts gelegen stortlocatie maakt dat de kosten te hoog zullen oplopen om deze scenario's als realistisch te zien.

De resultaten van deze scenarioberekeningen zijn niettemin toch interessant om de effecten van de stortingen op de sedimenttransportcapaciteit correct in te schatten.

Figuur 13 geeft de capaciteit voor het bergen van sediment voor de verschillende stortlocaties weer: per locatie wordt weergegeven welk volume beschikbaar is onder een bepaalde diepte. Hieruit blijkt dat de Ketelputten en de diepe delen ter hoogte van Kallosluis de grootste capaciteit hebben. Ook Oosterweel en Royerssluis hebben zeker voor de storting van minder grote volumes voldoende capaciteit. De capaciteit in de Schaar van Ouden Doel en de Rede van Antwerpen zijn vergelijkbaar en vrij beperkt. Ook de Appelzak is gelegen buiten de vaargeul, maar zoals reeds aangegeven is het storten van grotere hoeveelheden hier niet mogelijk met de traditionele stortmethodiek 'kleppen' vanwege de geringe stortcapaciteit en dus geringe diepte waarop gestort moet worden.



Figuur 13 – Capaciteit aan stortvolume per stortlocatie

4.2 Resultaten

Ter vergelijking van de verschillende stortscenario's werd allereerst de maximale eb- en maximale vloednelheid uitgezet. De maximale ebsnelheid wordt voor de verschillende scenario's weergegeven in Figuur A 33 tot en met Figuur A 53. Hierbij wordt telkens een vergelijking gemaakt tussen de ebsnelheid bij de situatie zonder stortingen en bij het onderzochte stortscenario. Er wordt per scenario ook ingezoomd op de betreffende stortlocatie, omdat de veranderingen in snelheid vooral lokaal zijn. De maximale vloednelheid wordt voor de verschillende scenario's weergegeven in Figuur A 54 tot en met Figuur A 74.

Naast de snelheid, wordt ook de sedimenttransportcapaciteit voor de verschillende scenario's bekeken. In de hiernavolgende bespreking wordt voor elk van de stortscenario's (hoeveelheid 2 Mm³) de bruto-transportcapaciteit en de netto-transportcapaciteit weergegeven met en zonder storting (Figuur 14 tot en met Figuur 20). De bruto-transportcapaciteit geeft de som van de totale transportcapaciteit weer over een volledig getij, zowel in de eb als de vloed-richting. De netto-transportcapaciteit geeft de resulterende transportcapaciteit weer over een volledig getij, dus het verschil tussen de eb- en vloedtransportcapaciteit. De netto-transportcapaciteit wordt vereenvoudigd weergegeven via pijlen waarvan de richting de richting van het transport (eb- of vloedgedomineerd) aangeeft, en waarvan de lengte van de pijl de grootte van het sedimenttransport aangeeft. Zones met transporten kleiner dan 0,5 kg/m/s worden aangeduid met een arcering.

Volledigheidshalve geven Figuur A 75 tot en met Figuur A 95 telkens voor elk scenario de bruto- en netto-transportcapaciteit over een volledig getij weer. Daarnaast geven Figuur A 96 tot en met Figuur A 102 voor de enkelvoudige scenario's met storthoeveelheden van 2 en 4 Mm³ telkens de verhouding weer van de bruto-sedimenttransportcapaciteit met en zonder de storting.

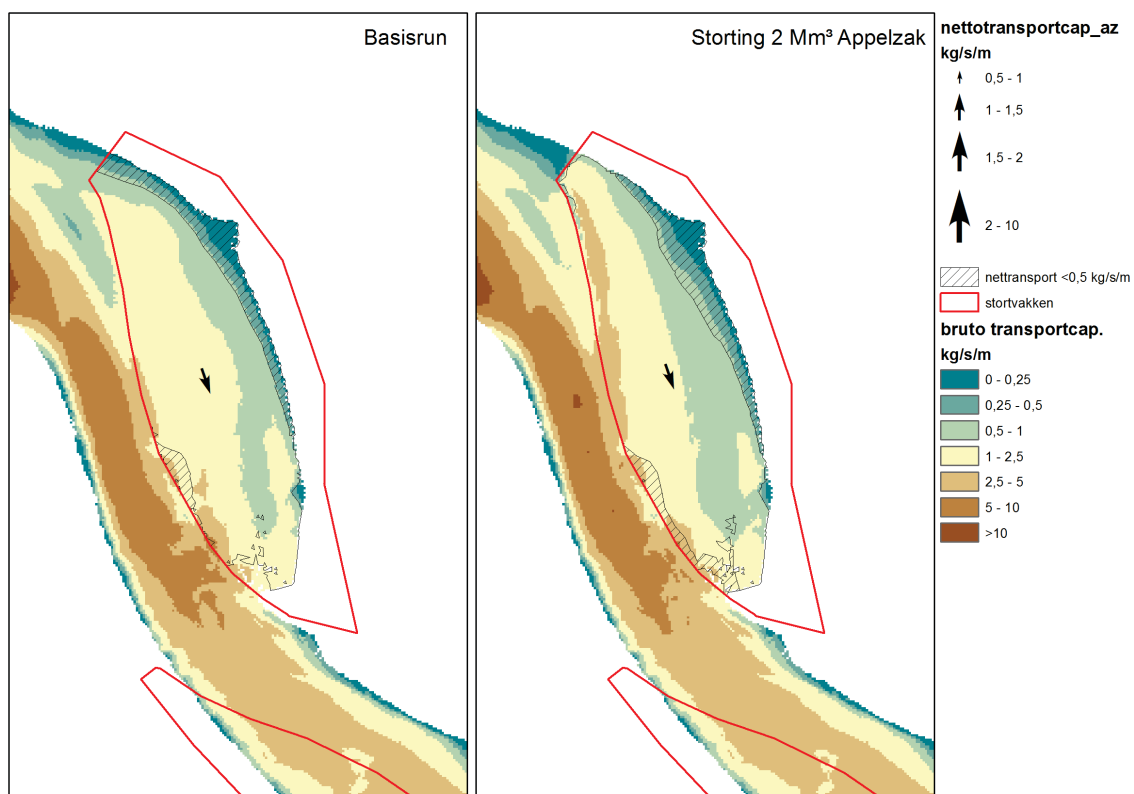
4.2.1 Nevengeulen

Appelzak (runs zsc212, zsc213 en zsc214)

Voor de stortingen in de Appelzak, waar de snelheden vrij laag zijn is er weinig effect te zien op de ebsnelheden. Aan de zuidzijde van de stortpolygoon zijn er bij de stortingen van 4 Mm³ (Figuur A 46) wel verschuivingen te zien van de grenzen tussen de verschillende snelheidsklassen, maar bij de kleinere stortingen (2 Mm³ - Figuur A 45 en 1 Mm³ - Figuur A 47) blijven deze zeer beperkt. Wel is er bij de storting van 4 Mm³ een duidelijke verhoging van de ebsnelheden te zien in de vaargeul.

In het centrale deel van de stortzone is er bij de storting van 2 Mm³ (Figuur A 66) een daling van de maximale vloednelheid van ca. 10 cm/s en aan de noordzijde tegen de vaargeul is er een lichte stijging. Bij de stortingen van 4 Mm³ (Figuur A 67) en 1 Mm³ (Figuur A 68) zien we dit effect ook zij het dan in het eerste geval sterker en in het tweede geval zwakker terug. In de vaargeul is er eveneens een stijging van de vloednelheid merkbaar, vooral bij de storting van 4 Mm³.

Figuur 14 geeft aan dat er in de Appelzak weinig wijzigingen zijn wat betreft richting van de netto sedimenttransportcapaciteit voor en na de storting. Deze is en blijft al bij al zeer beperkt. Wat betreft de sedimenttransportcapaciteit in de Appelzak (Figuur A 102) is er een stijging te zien aan de noordzijde van de stortzone, terwijl meer in het zuiden er een beperkte afname is van de sedimenttransportcapaciteit. Ook in de vaargeul is er een beperkte stijging merkbaar. Sediment dat op de locatie gestort wordt, zal geleidelijk in stroomopwaartse richting getransporteerd worden en zal zich vermoedelijk afzetten in de zone tussen de stortlocatie en de leidam. De toename van stroming en sedimenttransportcapaciteit in de vaargeul kan ertoe leiden dat het zelf-eroderend vermogen ter hoogte van de vaargeul ietwat toeneemt en deze minder onderhoudsbaggerwerk zal vergen. Deze afname zal echter zeer beperkt zijn.



Figuur 14 – Vergelijking Bruto- en netto-transportcapaciteit voor en na de storting van 2 Mm³ Appelpzak

Schaar van Ouden Doel (runs zsc200, zsc201 en zsc215)

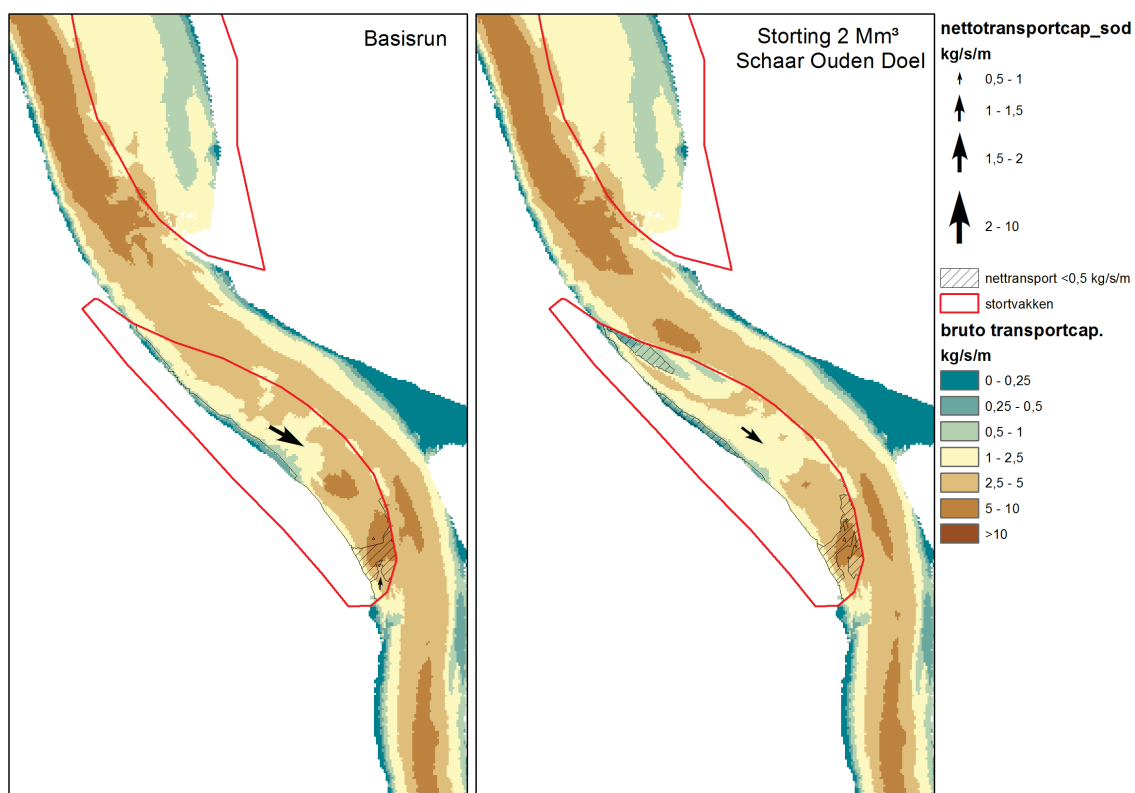
Figuur A 33 geeft het effect weer op de ebsnelheid van een storting van 2 Mm³ zand in de Schaar van Ouden Doel. Hier is amper een effect merkbaar. Bij een storting van 4 Mm³ (zie Figuur A 34) is er wel een lichte stijging zichtbaar in het diepste deel van de Schaar (stijging van ca. 10 cm/s). Uiteraard is er ook bij een storting van 1 Mm³ (zie Figuur A 48) weinig effect merkbaar.

De vloedsnelheden worden bij de storting van 2 Mm³ (Figuur A 54) slechts beperkt beïnvloed. Ter hoogte van de storting zelf (aan de noordzijde van de stortpolygoon) is er een lichte stijging van de vloedsnelheid merkbaar, terwijl aan de zuidzijde van de stortpolygoon is er een daling te zien, veroorzaakt door het afschermende effect van de storting. Voor de storting van 4 Mm³ (Figuur A 55) is hetzelfde effect zichtbaar, zij het meer uitgesproken, bij de storting van 1 Mm³ (Figuur A 69) is er amper een wijziging merkbaar.

Ook hier is zowel voor de eb- als de vloedsnelheden, vooral bij de grotere storting van 4 Mm³, een duidelijke stijging zichtbaar van de snelheden in de hoofdgeul, net zoals bij de Appelpzak.

Het netto-transport (Figuur 15) is vloedgedomineerd in de referentietoestand en dit blijft zo na de storting, hoewel het transport afneemt. Aan de noordzijde van de stortzone ontstaat door de storting ook een zone waar het nettotransport lager is dan 0,5 kg/m/s. Voor de sedimenttransportcapaciteit (Figuur A 96) is er bij de Schaar van Ouden Doel een duidelijke toename in de vaargeul grenzend aan de stortlocatie, terwijl de stortlocatie zelf in de diepere delen en in de zone tussen de stortlocatie en de strekdam gekenmerkt wordt door een daling van de sedimenttransportcapaciteit. In de diepere delen is er een stijging van de sedimenttransportcapaciteit.

Uiteraard zijn deze effecten groter bij een grotere storting. In de vaargeul is er bij een storting van 2 Mm³ een toename van de transportcapaciteit tot een kwart en een afname binnen de stortpolygoon met ongeveer een kwart à de helft. Bij een storting van 4 Mm³ verdubbelt de sedimenttransportcapaciteit in een groot deel van de vaargeul en op de stortlocatie is de sedimenttransportcapaciteit slechts de helft à 20% van de originele capaciteit. Sediment dat op deze locatie gestort wordt, zal geleidelijk in stroomopwaartse richting getransporteerd worden en zal zich vermoedelijk afzetten in de zone tussen de stortlocatie en de strekdam. De toename van stroming en sedimenttransportcapaciteit in de vaargeul kan ertoe leiden dat het zelf-eroderend vermogen ter hoogte van de drempel van Zandvliet ietwat toeneemt en deze minder onderhoudsbaggerwerk zal vergen. Deze afname zal echter zeer beperkt zijn.



Figuur 15 – Vergelijking bruto- en netto-transportcapaciteit voor en na de storting van 2 Mm³ Schaar Ouden Doel

Conclusies

Voor de twee stortzones in de nevengeulen, Appelszak en Schaar van Ouden Doel, kunnen we dus besluiten dat er enerzijds een vrij grote stabiliteit verwacht kan worden op de stortlocatie zelf. Deze stabiliteit impliceert dat de bergingscapaciteit voor het terugstorten van sediment eerder beperkt zal zijn. In de vaargeul verhoogt de stroomsnelheid en dus ook de sedimenttransportcapaciteit. Dit zal er voor zorgen dat het zelf-eroderend vermogen ter hoogte van de drempels zal verhogen, wat een licht positief effect kan hebben op de benodigde baggerinspanningen.

4.2.2 Diepe delen afwaarts Oosterweel

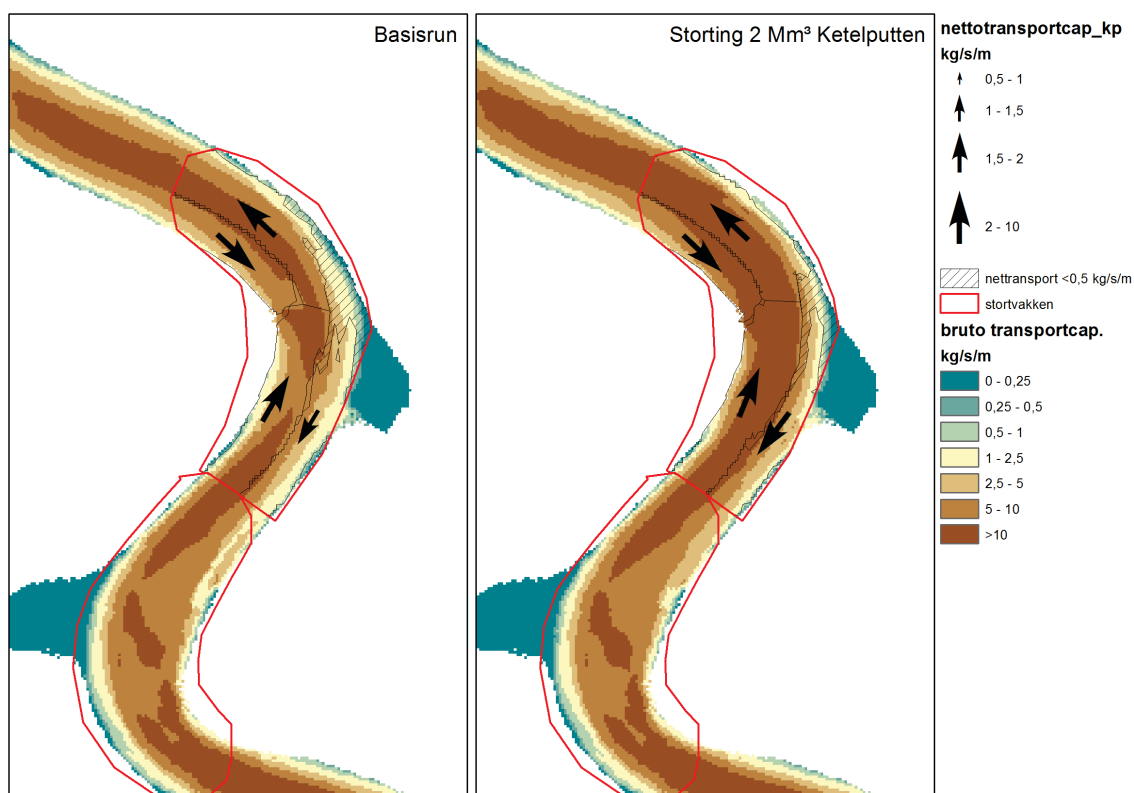
Ketelputten (run zsc202, zsc203 en zsc216)

Voor de Ketelputten geeft Figuur A 35 de maximale ebsnelheid weer voor een storting van 2 Mm³ zand, Figuur A 36 voor een storting van 4 Mm³ en Figuur A 49 voor een storting van 1 Mm³ zand. Hier is de huidige ebsnelheid hoger dan bij de Schaar van Ouden Doel (ca. 100 cm/s t.o.v. ca. 60 cm/s) en ook het effect van de stortingen is groter. Bij een storting van 2 Mm³ is er een stijging van 10 cm/s,

bij een storting van 4 Mm³ is er een stijging van ca. 20 cm/s en bij een storting van 1 Mm³ beperkt de stijging zich tot ongeveer 5 cm/s. De effecten op de snelheid beperken zich bovendien zeer sterk tot de stortlocatie, op- en afwaarts van de stortpolygoon zijn amper wijzigingen merkbaar.

De maximale vloedsnelheid stijgt bij de storting van 2 Mm³ (Figuur A 56) van ca. 120 cm/s de snelheid naar ca. 125 à 130 cm/s. Bij de storting van 4 Mm³ (Figuur A 57) stijgen de snelheden tot 140 à 150 cm/s. Hier is ook een wijziging van de stroomsnelheden zichtbaar in de opwaarts gelegen stortlocatie. Bij de storting van 1 Mm³ (Figuur A 70) is er slechts een zeer geringe stijging merkbaar.

Figuur 16 geeft aan dat het netto-sedimenttransport bij de Ketelputten verschilt: afwaarts van de toegangsgeul tot de Boudewijn en Van Cauwelaertsluis is het diepe deel (buitenbocht) ebgedomineerd, terwijl de ondiepe zone (binnenbocht) vloedgedomineerd is; opwaarts van de toegangsgeul tot de Boudewijn en Van Cauwelaertsluis is het diepe deel (buitenbocht) vloedgedomineerd, terwijl de ondiepe zone (binnenbocht) ebgedomineerd is. Na de storting neemt de grootte van het transport toe, maar de richting blijft gelijk. Sediment dat hier gestort wordt, zal dus op termijn geërodeerd worden. De stortingen uitgevoerd in 2010 (zie § 2.4) bevestigen dit, waarbij na 1 jaar amper 40% van de gestorte specie teruggevonden wordt binnen de berekeningspolygoon Gedurende deze proef werd slechts 0,5Mm³ gestort terwijl in het scenario 2Mm³ gestort wordt.



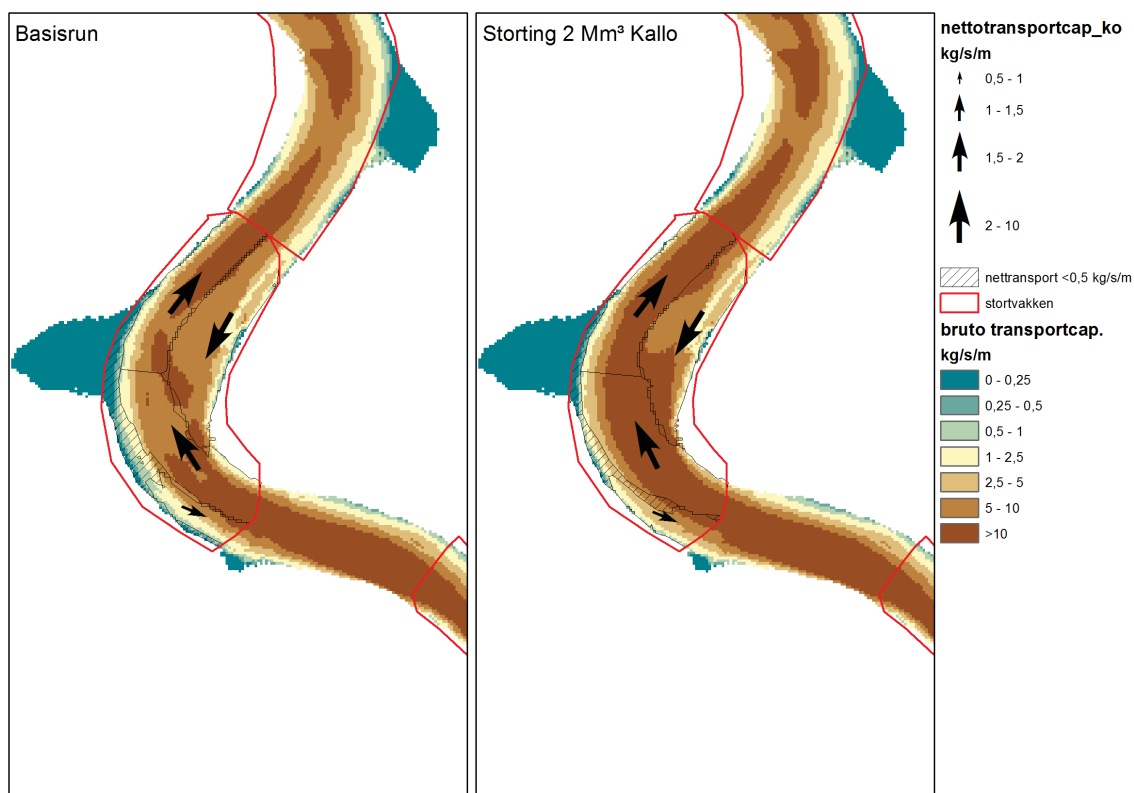
Figuur 16 – Vergelijking Bruto- en netto-transportcapaciteit voor en na de storting van 2 Mm³ Ketelputten

Diepe delen Kallosluis (run zsc204, zsc205 en zsc217)

Voor de stortingen ter hoogte van Kallosluis gelden dezelfde conclusies als voor deze bij Ketelputten: de originele ebsnelheid is ca. gelijk als bij de stortlocatie Ketelputten, en ook de stijging t.o.v. de referentiesituatie is bij de storting van 1 Mm³ ca. 5 cm/s (zie Figuur A 50), bij 2 Mm³ ca. 10 cm/s (zie Figuur A 37) en bij 4 Mm³ ca. 20 cm/s (zie Figuur A 38).

Voor de vloedsnelheden geeft de storting van 2 Mm³ (Figuur A 58) een stijging van ca. 10 cm/s, een storting van 4 Mm³ (Figuur A 59) zorgt voor een stijging van ca. 20 à 30 cm/s. Ook hier is er stroomopwaarts van de stortlocatie een effect van de stortingen merkbaar, vooral bij de storting van 4Mm³. Bij de storting van 1 Mm³ (Figuur A 71) is de stijging van de vloedsnelheden uiteraard nog kleiner dan bij de storting van 2 Mm³.

Figuur 17 geeft aan dat het netto-sedimenttransport bij de Kallosluis verschilt: afwaarts van de toegangsgeul tot de Kallosluis is het diepe deel (buitenbocht) ebgedomineerd, terwijl de ondiepe zone (binnenbocht) vloedgedomineerd is; opwaarts van de toegangsgeul tot de Kallosluis is een zeer kleine zone van het diepe deel (buitenbocht) vloedgedomineerd, terwijl het merendeel van de geul en het ondiepe deel (binnenbocht) ebgedomineerd is. Na de storting neemt de grootte van het transport toe, maar de richting blijft gelijk. Sediment dat hier gestort wordt, zal dus op termijn geërodeerd worden. Verwacht mag worden dat de stabiliteit hier gelijkaardig zal zijn dan deze die vastgesteld werd ter hoogte van de Ketelputten.



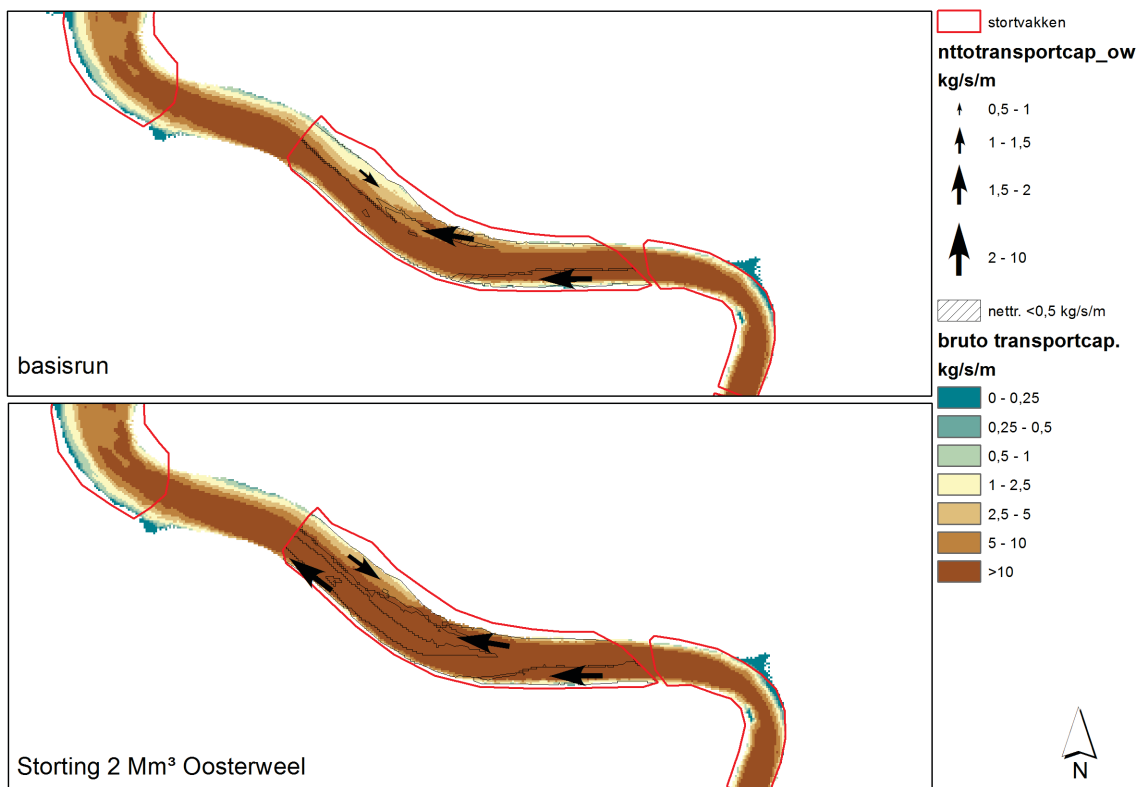
Figuur 17 – Vergelijking Bruto- en netto-transportcapaciteit voor en na de storting van 2 Mm³ Kallo

Diepe delen Oosterweel (run zsc206 en zsc207)

Bij de stortscenario's voor Oosterweel is het effect van de stortingen op de maximale eb- en vloedsnelheden ook vergelijkbaar met die bij Ketelputten en Kallosluis: bij de stortingen van 2 Mm³ (Figuur A 39) en 4 Mm³ (Figuur A 40) is er respectievelijk een toename van de maximum ebsnelheid van ca. 10 en ca. 20 cm/s zichtbaar.

De vloedsnelheden stijgen eveneens met ca. 10 cm/s bij de storting van 2 Mm³ (Figuur A 60) en met ca. 20 cm/s bij de storting van 4 Mm³ (Figuur A 61). Hier is er opwaarts wel geen effect van de stortingen zoals wel het geval was bij Ketelputten en Kallosluis.

Figuur 18 geeft aan dat het netto-sedimenttransport bij Oosterweel hoofdzakelijk ebgedomineerd is. Na de storting neemt de grootte van het transport toe, maar de richting blijft gelijk. Sediment dat hier gestort wordt, zal dus op termijn geërodeerd worden. Verwacht mag worden, gelet op de grote sedimenttransportcapaciteiten, dat de stabiliteit hier minder of gelijkaardig zal zijn dan deze die vastgesteld werd ter hoogte van de Ketelputten.



Figuur 18 – Vergelijking Bruto- en netto-transportcapaciteit voor en na de storting van 2 Mm³ Oosterweel

Conclusies

Voor de drie stortlocaties in de diepe delen afwaarts Oosterweel (Ketelputten, Kallosluis en Oosterweel) kan gesteld worden dat de stabiliteit van de hier uitgevoerde stortingen vrij laag zal zijn, aangezien de sedimenttransportcapaciteit en de stroomsnelheden sterk verhoogd worden door de stortingen. Bij de storting van 2 Mm³ is er over het grootste deel van de stortzones een verdubbeling van de sedimenttransportcapaciteit, terwijl bij de storting van 4 Mm³ de sedimenttransportcapaciteit vermeerderd met een factor 2 tot 5. Naar bergingscapaciteit toe, bieden deze locaties mogelijkheden om op de langere termijn te storten. Belangrijke vraag die hierbij dient onderzocht te worden (opvolging door monitoring), is waar de geërodeerde specie uiteindelijk terecht komt.

Daar waar het storten van sediment in de hoofdgeul zou kunnen leiden tot het dempen van de getijndringing (bij stabiele specie), mag verwacht worden dat gelet op deze grote dynamiek, de kans op getijdemping door het uitvoeren van stortingen in deze zones eerder beperkt in de tijd zal zijn.

4.2.3 Diepe delen opwaarts Oosterweel

Royerssluis (run zsc208 en zsc209)

Meer opwaarts is het effect op de stroomsnelheden nog groter. Een storting van 2 Mm³ (Figuur A 41) laat bij de Royerssluis de maximale ebsnelheid stijgen van rond de 110 cm/s naar 130 à 140 cm/s (lokaal zelfs 150 cm/s). Bij een storting van 4 Mm³ (Figuur A 42) stijgt de maximale ebsnelheid zelfs tot 180 à 200 cm/s. Afwaarts van de stortlocatie loopt het effect van de stortingen verder.

Ook zijn de effecten van de stortingen op de maximale vloednelheden vrij groot: bij 2 Mm³ (Figuur A 62) een stijging van 20 tot 40 cm/s, bij 4 Mm³ (Figuur A 63) een stijging van 30 tot 50 cm/s. Hier lopen de effecten ook opwaarts van de stortlocatie verder.

Figuur 19 toont aan dat bij de Royerssluis een beperkte verandering optreedt in de richting van het netto transport. Hier is in de referentiesituatie aan de afwaartse zijde van de stortzone het transport ebgedomineerd in de buitenbocht en vloedgedomineerd in de binnenbocht. Dit blijft na de storting gelijk, alleen het opwaartse deel van de stortzone wijzigt van volledig ebgedomineerd naar deels eb- en deels vloedgedomineerd.

Figuur A 100 geeft de verschillen weer in sedimenttransportcapaciteit: de stijging ligt hier ook hoger dan meer afwaarts: een factor 2 tot 5 voor de storting van 2 Mm³. Voor de storting van 4 Mm³ is er een grote zone waar de sedimenttransportcapaciteit oploopt tot meer dan 5 maal de originele capaciteit. Hier is er afwaarts en opwaarts van de stortzone ook een effect zichtbaar van de stortingen, m.n. een stijging in de vaargeul, en een daling tegen de oevers.

Rede van Antwerpen (run zsc210 en zsc211)

Ter hoogte van de Rede van Antwerpen is de maximale ebsnelheid zonder storting rond de 120 à 130 cm/s, als er 2 Mm³ (Figuur A 43) gestort zou worden zou deze stijgen tot ca. 150 cm/s. Bij een storting van 4 Mm³ (Figuur A 44) lopen de maximale ebsnelheden op tot ca. 180 cm/s.

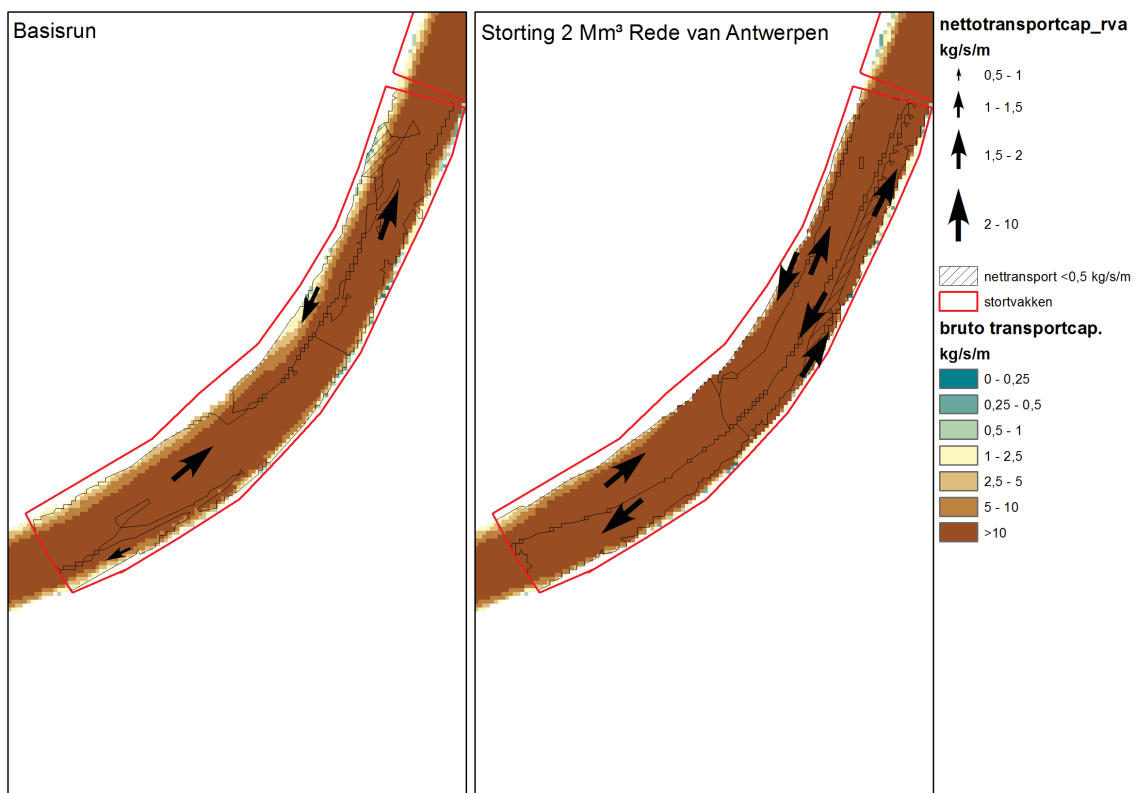
Voor de maximale vloednelheid is het effect ongeveer gelijk aan de te verwachten effecten bij de Royerssluis: bij 2 Mm³ (Figuur A 64) een stijging van 20 tot 30 cm/s, bij 4 Mm³ (Figuur A 65) een stijging van 30 tot 40 cm/s.

In de netto sedimenttransportcapaciteit (Figuur 20) treden er ook enkele wijzigingen op ten gevolge van de storting van 2 Mm³. Hier vergroot de netto sedimenttransportcapaciteit in de ondiepe delen en wordt de centrale diepere zone zelfs vloedgedomineerd.

Figuur A 101 geeft de verhouding van de sedimenttransportcapaciteit weer ter hoogte van de Rede van Antwerpen. Hier is te zien dat er een sterke stijging (factor 2 tot 5 voor de storting van 2 Mm³ en meer dan factor 5 voor de storting van 4 Mm³) is van de sedimenttransportcapaciteit aan de oevers, maar dat er in het centrale deel een daling (zeer beperkt bij de storting van 2 Mm³, maar factor 2 bij de storting van 5 Mm³) is van de sedimenttransportcapaciteit. Ook hier zijn op- en afwaarts van de storting effecten merkbaar.



Figuur 19 – Vergelijking Bruto- en netto-transportcapaciteit voor en na de storting van 2 Mm³ Royerssluis



Figuur 20 – Vergelijking Bruto- en netto-transportcapaciteit voor en na de storting van 2 Mm³ Rede van Antwerpen

Conclusies

Voor de meest opwaarts gelegen stortlocaties Royerssluis en Rede van Antwerpen is het effect van de stortingen op de stroomsnelheden en sedimenttransportcapaciteit nog hoger dan bij de meer afwaarts gelegen stortlocaties. Hier zal de stabiliteit van de specie dus nog lager zijn. Bovendien maak de geringere diepte het storten van grote hoeveelheden zand hier onmogelijk, omdat dit de bevaarbaarheid in het gedrang zou kunnen brengen.

4.2.4 Gecombineerde scenario's (runs zsc218, zsc219 en zsc220)

Aangezien de effecten van de stortingen zeer lokaal zijn, is voor de scenario's waarbij gestort werd op verschillende stortlocaties (run zsc218 - Figuur A 51, run zsc219 - Figuur A 52 en run zsc220 - Figuur A 53) gelijk aan het gecombineerde effect van de scenario's waar gestort werd op de afzonderlijke stortlocaties. Voor run zsc218 betekent dit dus de combinatie van run zsc214 en run zsc215, voor run zsc219 de combinatie van run zsc216 en run zsc217. In run zsc220 wordt slechts 0,5 Mm³ gestort ter hoogte van Kallosluis en Ketelputten, dus hier is het effect nog kleiner dan aangetoond werd in run zsc216 en run zsc217. Het effect in de Schaar van Ouden doel is gelijk aan het effect dat aangetoond werd in run zsc215, want hier werd ook een storting van 1 Mm³ gesimuleerd.

Bij de Ketelputten en Kallosluis was er voor de maximale vloodsnelheid wel een effect merkbaar buiten de stortpolygoon, maar dit was enkel merkbaar bij het storten van grotere hoeveelheden. Aangezien in de combinatiescenario's slechts 1 Mm³ per polygoon gestort werd is dit hier niet te verwachten en dat blijkt ook uit Figuur A 72 en Figuur A 73.

In run zsc220 (Figuur A 74) werd slechts 0,5 Mm³ gestort ter hoogte van Kallosluis en Ketelputten, dus hier is het effect nog kleiner dan aangetoond werd in run zsc216 en run zsc217. Het effect in de Schaar van Ouden doel is gelijk aan het effect dat aangetoond werd in run zsc215, want hier werd ook een storting van 1 Mm³ gesimuleerd.

5 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

5.1 Conclusies

Voorliggend rapport bespreekt de resultaten van de scenarioberekeningen ten behoeve van de toekomstige stortstrategie voor het terugstorten van zand in de Beneden-Zeeschelde. De modelopzet en validatie van het gebruikte 2D-model met sedimenttransportmodellering wordt besproken in (Vos *et al.*, 2015a). Het gebruikte model werd in het kader van voorliggend onderzoek gekalibreerd. Uit de kalibratie bleek het model in staat het sedimenttransport te reproduceren voor de beperkte beschikbare dataset van sedimenttransportmetingen. Het bleek onmogelijk om de in de realiteit waargenomen morfologische veranderingen te reproduceren (zowel naar consistentiekaarten als absolute bodemveranderingen). Gelet op deze vaststelling, werd besloten het modelinstrumentarium in te zetten om de initiële effecten te bestuderen van het terugstorten van sediment, dewelke geïmplementeerd werden als een bodemverandering in de modelbathymetrie.

Uit het onderzoek van de verschillende voorgestelde stortscenario's komt een onderscheid tussen verschillende types van stortlocaties naar voor wat betreft de waargenomen effecten van de gesimuleerde stortingen.

Allereerst zijn er de afwaarts gelegen stortlocaties in de nevengeul, waar er binnen de stortlocatie een grote stabiliteit kan verwacht worden, en binnen de vaargeul hogere stroomsnelheden. Storten in deze stortzones leidt ertoe dat de bergingscapaciteit zal afnemen door de grote stabiliteit. Indien de stortingen gecombineerd worden met zandwinning (huidige situatie voor Schaar van Ouden Doel), blijft de bergingscapaciteit wel behouden. Voor de Appellak zouden eventuele stortingen nu reeds getij-afhankelijk uitgevoerd moeten worden, uitgaande van een diepgang van het volgeladen schip van 8m. Het terugstorten van zanderige specie in deze nevengeulen leidt ertoe dat het zelf-eroderend vermogen in de vaargeul vermoedelijk zal verhogen. Daarnaast kunnen de stortingen in combinatie met het vloedgedomineerd transport in deze geulen, ervoor zorgen dat de nevengeul verondiept en zou er eventueel laagdynamisch areaal kunnen gecreëerd worden in de zone tussen de stortzone en de lei- of strekdam.

Vervolgens wordt er een onderscheid gemaakt tussen de meer afwaarts gelegen stortlocaties in de hoofdgeul (Ketelputten, Kallosluis en Oosterweel) en de meer opwaarts gelegen stortlocaties in de hoofdgeul (Royerssluis en Rede van Antwerpen). Beide types worden gekenmerkt door een stijging van stroomsnelheden en sedimenttransportcapaciteit ten gevolge van de stortingen, maar bij de opwaarts gelegen stortlocaties is dit effect meer uitgesproken. Bovendien hebben de opwaarts gelegen stortlocaties een lagere capaciteit voor het bergen van sediment. Hier grote hoeveelheden storten zou de bevaarbaarheid in het gedrang kunnen brengen.

Rekening houdend met de stortproef bij Ketelputten kan dus een gelijkaardig gedrag van de gestorte specie verwacht worden in alle stortlocaties in de vaargeul (meer uitgesproken in de opwaarts gelegen locaties). Aangezien bij de Ketelputten na één jaar slechts 35 à 40% van de specie bleef liggen, en 2 jaar na het beëindigen van de stortingen al het materiaal geërodeerd was, zal de stabiliteit in deze stortzones ook beperkt zijn. Bovendien werd bij de stortproef slecht 500.000 m³ gestort. Gezien de grootte van het stortvolume evenredig lijkt te zijn met de toename in de sedimenttransportcapaciteit, mag verwacht worden dat grotere stortvolumes nog minder stabiel zullen zijn. Belangrijke vraag die hierbij dient onderzocht te worden (opvolging door monitoring), is waar de erodeerde specie uiteindelijk terecht komt.

Daar waar het storten van sediment in de hoofdgeul zou kunnen leiden tot het dempen van de getijndringing (bij stabiele specie), mag verwacht worden dat gelet op deze grote dynamiek, de kans op getijdemping door het uitvoeren van stortingen in deze zones eerder beperkt is.

Elk van de stortlocaties biedt een aantal mogelijkheden, maar de exacte effecten op elk van de locaties is met de huidige modellen moeilijk in te schatten. Daarom is het aan te bevelen om met behulp van proefstortingen een accurater inzicht te krijgen in de te verwachten effecten op de verschillende stortlocaties. Op basis van de huidige bevindingen lijkt het raadzaam om de specie over verschillende stortlocaties uit te spreiden. De verlaging van de sedimenttransportcapaciteit ter hoogte van de Schaar van Ouden Doel en Appelzak maakt dit een interessante optie met betrekking tot stabiliteit en het zelf-eroderend vermogen, maar doet vragen rijzen wat betreft de capaciteit in de toekomst. Een grote storting in de vaargeul zal sneller eroderen (want veroorzaakt hogere snelheden en sedimenttransportcapaciteit) en zal dus ook kunnen zorgen voor een snellere aanzanding van de nabijgelegen drempels.

5.2 Aanbevelingen

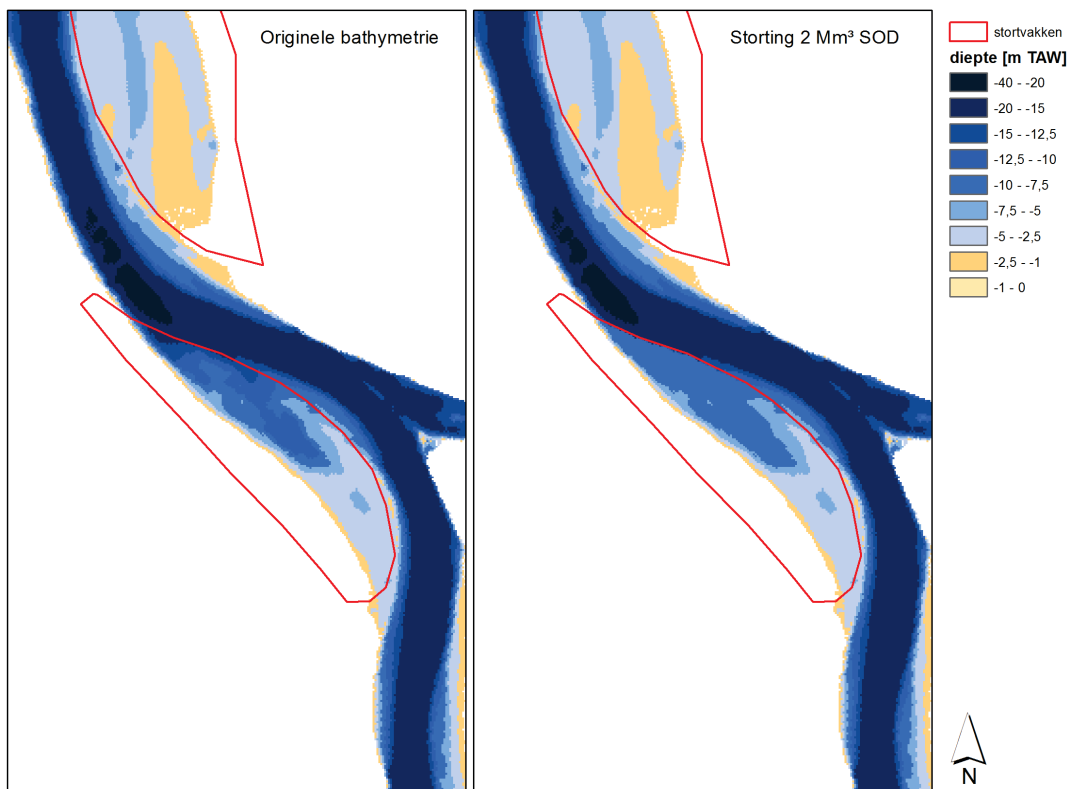
Uit de modelvalidatie is gebleken dat het reproduceren van de opgetreden morfologische evoluties onvoldoende plaatsvond door het numerieke model. Het verdient dan ook de aanbeveling om de instellingen van de modelparameters (bv. domein uitbreiden naar opwaarts) en transportformulering (meerdere zandfracties) verder te verkennen zodat de invloed van deze aspecten duidelijk wordt.

Gelet op de bestaande onzekerheden, verdient het de aanbeveling eventuele stortingen op alternatieve locaties uitgebreid te monitoren (cfr. Ketelputten), om enerzijds het inzicht in de stabiliteit – sedimentverspreiding te vergroten, maar tevens over extra datasets te beschikken die kunnen gebruikt worden voor de modeloptimalisatie (i.e. sedimenttransport en morfologische veranderingen).

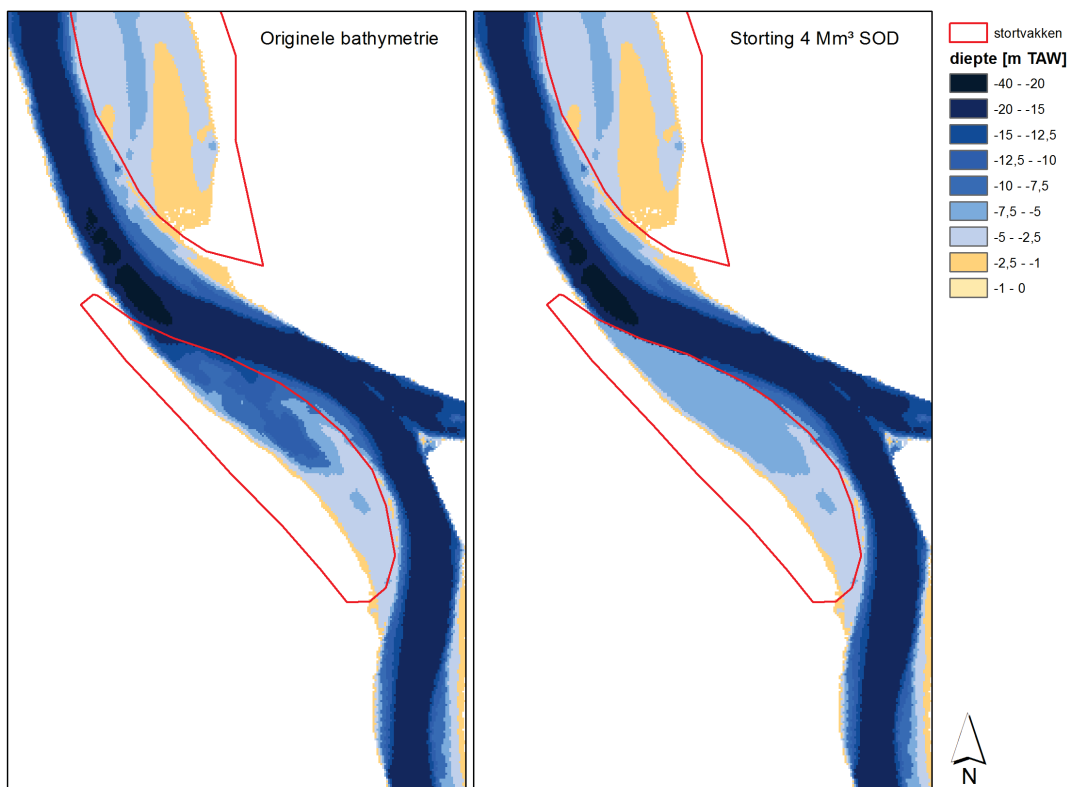
6 REFERENTIES

- Coen, L.; De Maerschallck, B.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016). Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde: Deelrapport 3 – Slibscenario's. Versie 4.0. WL Rapporten, 14_025. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.
- Depreiter, D.; Cleveringa, J.; van der Laan, T.; Maris, T.; Ysebaert, T.; Wijnhoven, S. (2014). T2009-rapport Schelde-estuarium. IMDC/Arcadis/Universiteit Antwerpen/Imares/NIOZ: [s.l.]. 522 + 2 bijlagen pp.
- IMDC (2011). Monitoringprogramma flexibel storten. Analyse stortproef Ketelplaat. International Marine & Dredging Consultants i.o.v. Afdeling Maritieme Toegang: Antwerpen.
- IMDC (2013). LTV-veiligheid en Toegankelijkheid. Instandhouding vaarpassen Schelde Milieuvergunningen terugstorten baggerspecie. Achtergrondrapport A-29: Harde lagen Beneden-Zeeschelde. International Marine & Dredging Consultants ism. Deltares, Svašek Hydraulics en ARCADIS Nederland i.o.v. Afdeling Maritieme Toegang: Antwerpen.
- IMDC (2014). Monitoringprogramma flexibel storten. Deelopdracht 12: analyse van de stortingen in de diepe delen van de hoofdgeul – fase 2. International Marine & Dredging Consultants i.o.v. Afdeling Maritieme Toegang: Antwerpen.
- Verheyen, B.; Leyssen, G.; Vanlede, J.; Schramkowski, G.; Mostaert, F. (2012, concept version). Verbetering randvoorwaardenmodel: Deelrapport 7: Afregeling van het 3D Scheldemodel. WL Rapporten, 753_09. Flanders Hydraulics Research & IMDC: Antwerp, Belgium
- Maximova, T.; Vanlede, J.; Mostaert, F. (2011). Flow in river bends: A numerical model investigation. Version 2.0. WL Rapporten, 753_15. Flanders Hydraulics Research: Antwerp, Belgium
- Maximova, T.; Vanlede, J.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2013). Habitatmapping ondiep water Zeeschelde. Deelrapport 2 – Numeriek 2D-model. Version 2_0. WL Rapporten, 00_028. Flanders Hydraulics Research: Antwerp, Belgium.
- Plancke, Y. (2014). Stortstrategie Beneden-Zeeschelde: voorstel stortscenario's slib. WL memo, 14_025. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.
- Vandenbruwaene, W.; Vanlede, J.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2015). Slibbalans Zeeschelde: Deelrapport 4 – Historische evolutie SPM. Versie 4_0. WL Rapporten, 00_029. Waterbouwkundig Laboratorium & Antea: Antwerpen, België.
- Vos, G.; De Maerschallck, B.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016). Sedimentstrategie Beneden Zeeschelde: Deelrapport 2 – Validatie en scenarioberekeningen zandmodel. Versie 4.0. WL Rapporten, 14_025. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.
- WL/Delft Hydraulics, (2007). Delft3D-FLOW. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User manual

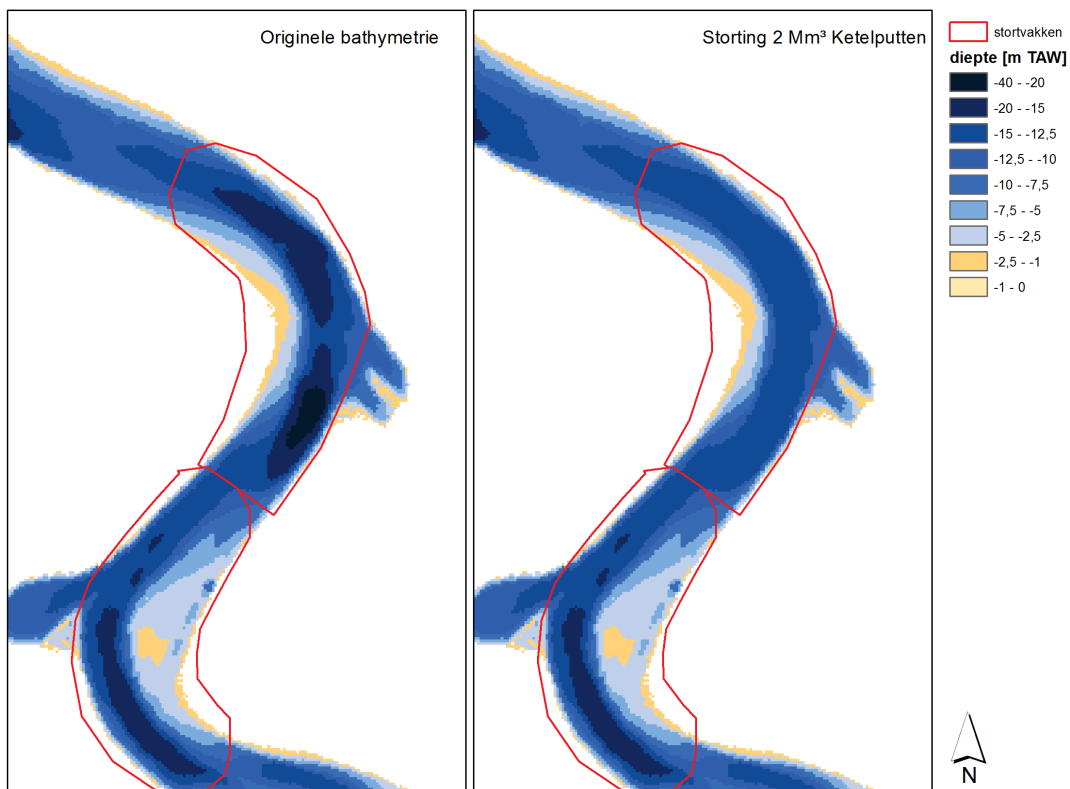
BIJLAGE – FIGUREN



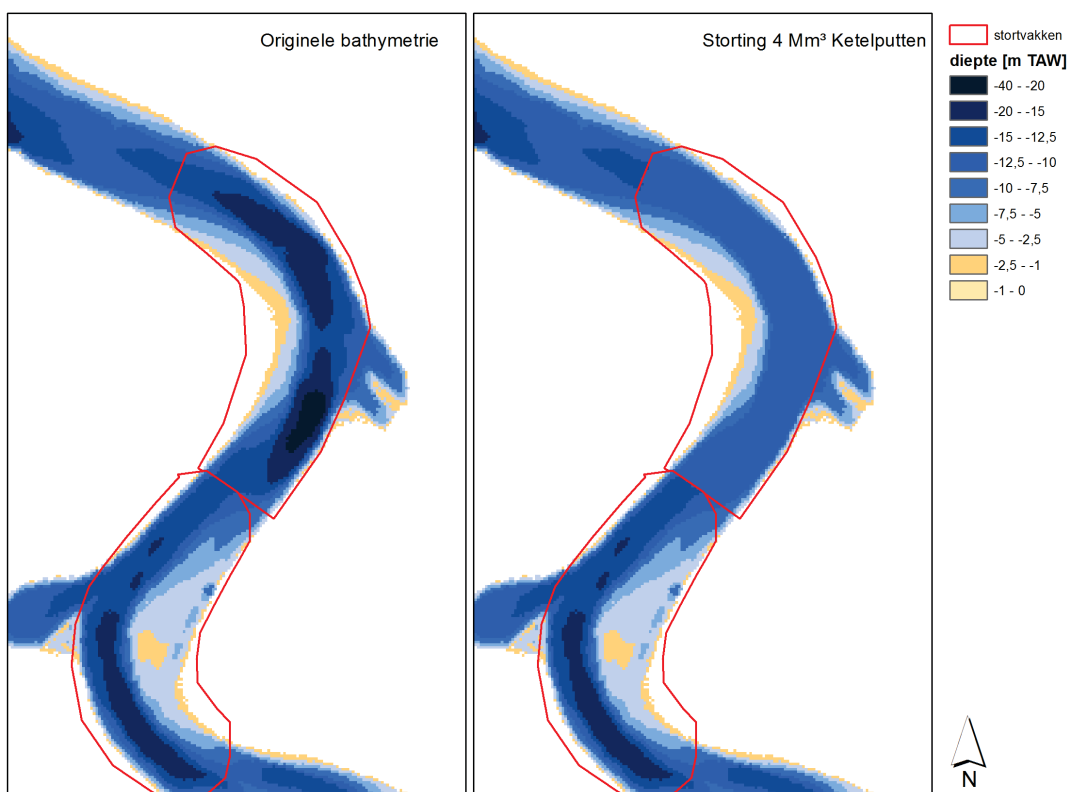
Figuur A 1 – Aanpassing bathymetrie voor run zsc200: Schaar Ouden Doel - 2 Mm³



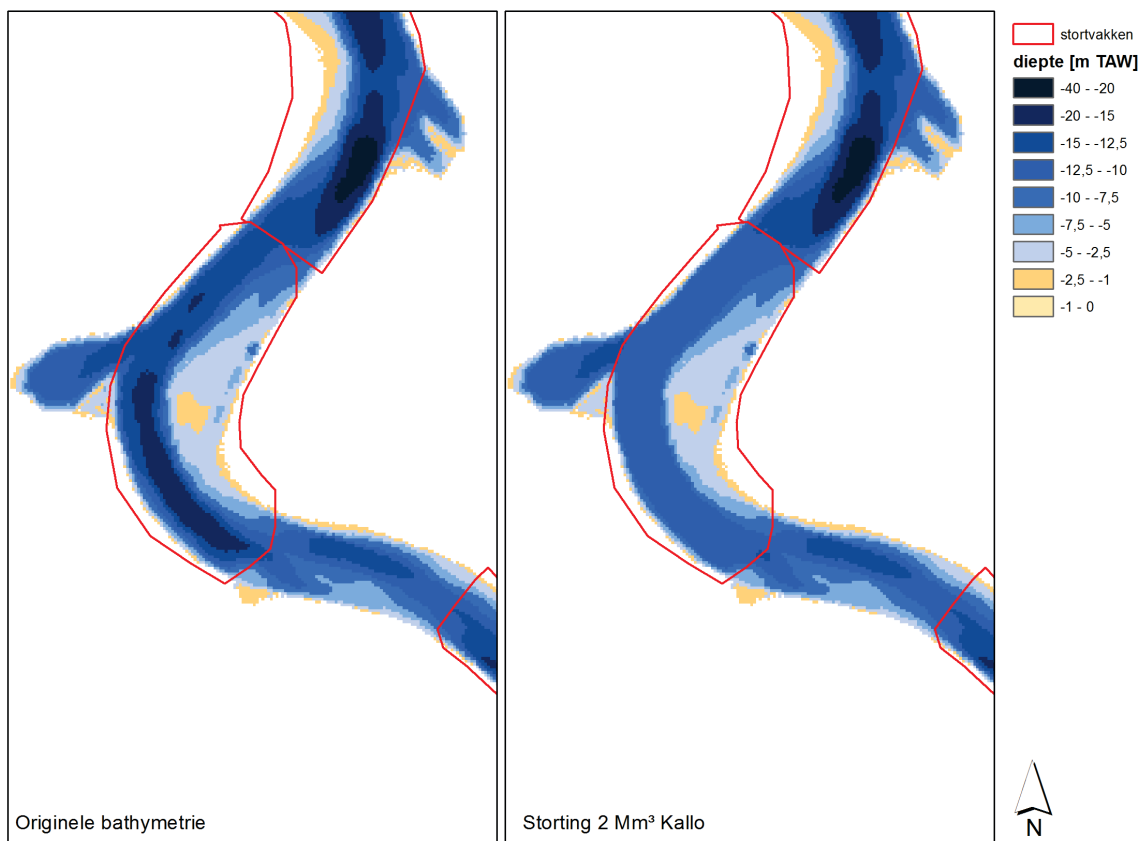
Figuur A 2 – Aanpassing bathymetrie voor run zsc201: Schaar Ouden Doel - 4 Mm³



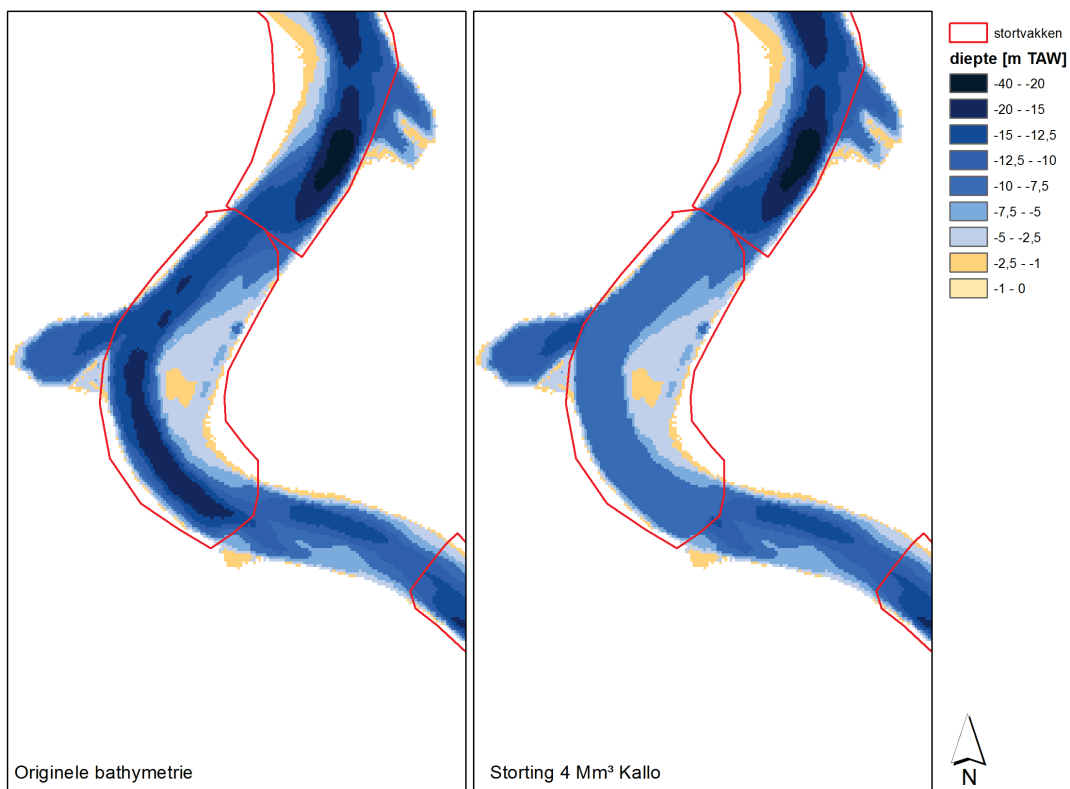
Figuur A 3 – Aanpassing bathymetrie voor run zsc202: Ketelputten – 2 Mm³



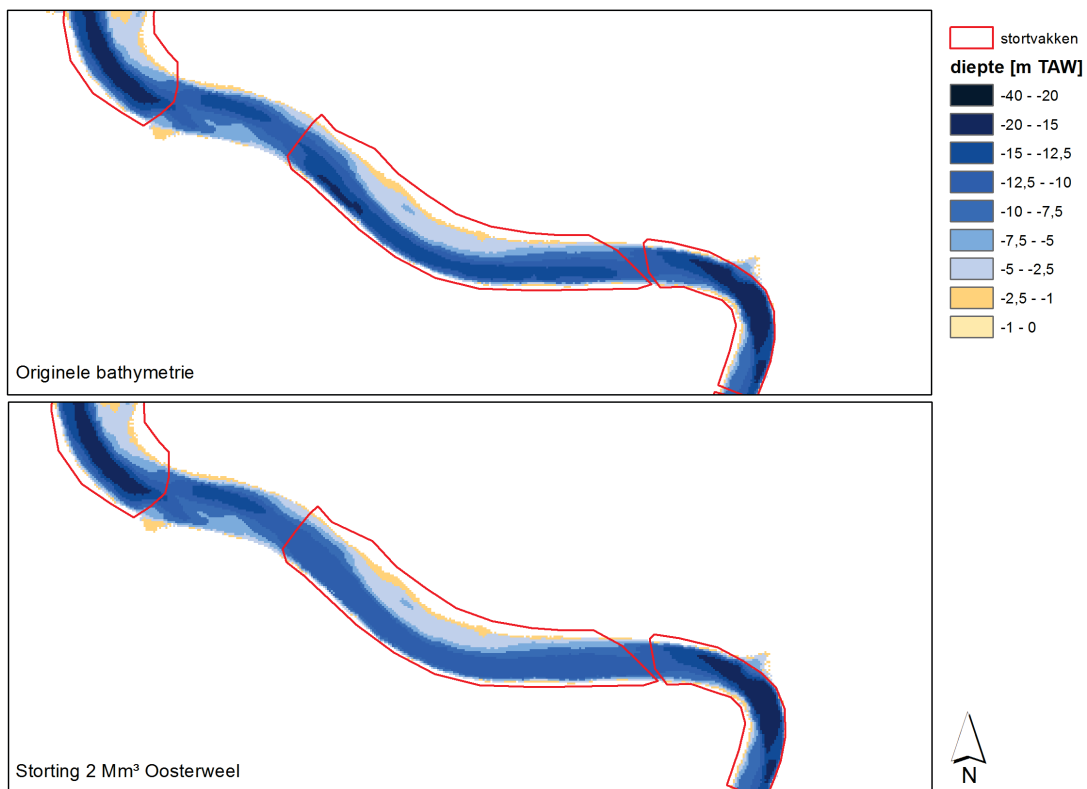
Figuur A 4 – Aanpassing bathymetrie voor run zsc203: Ketelputten 4 Mm³



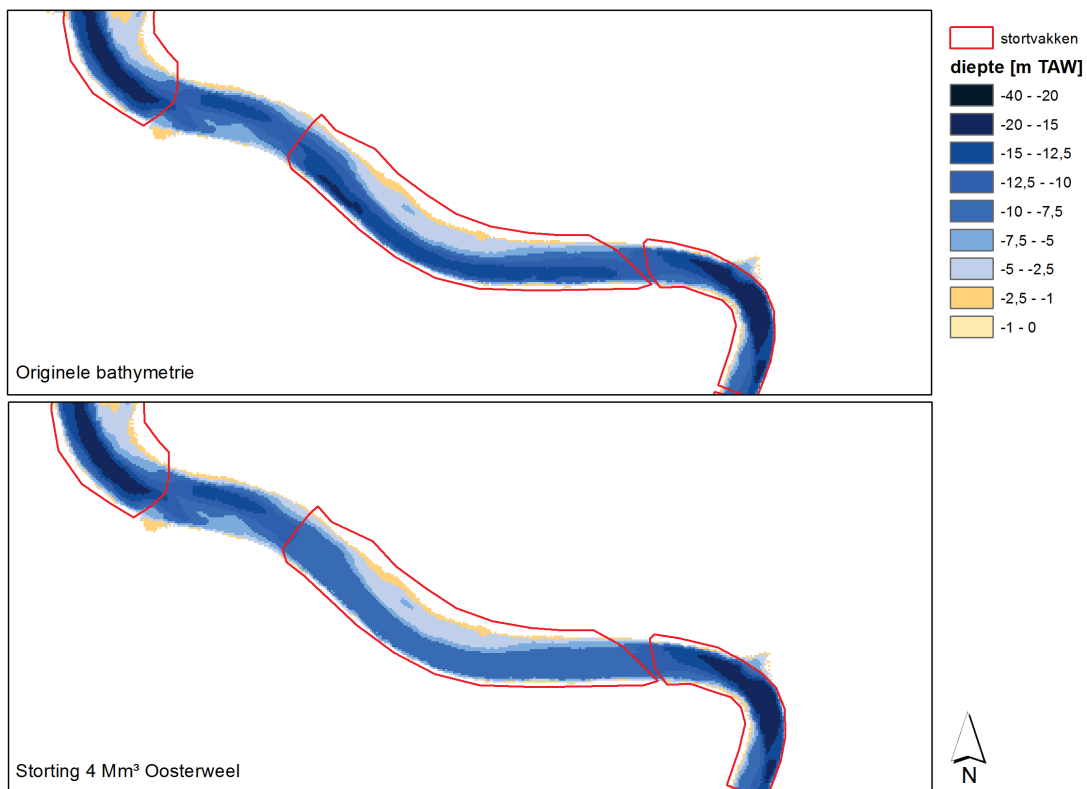
Figuur A 5 – Aanpassing bathymetrie voor run zsc204: Kallosluis 2 Mm³



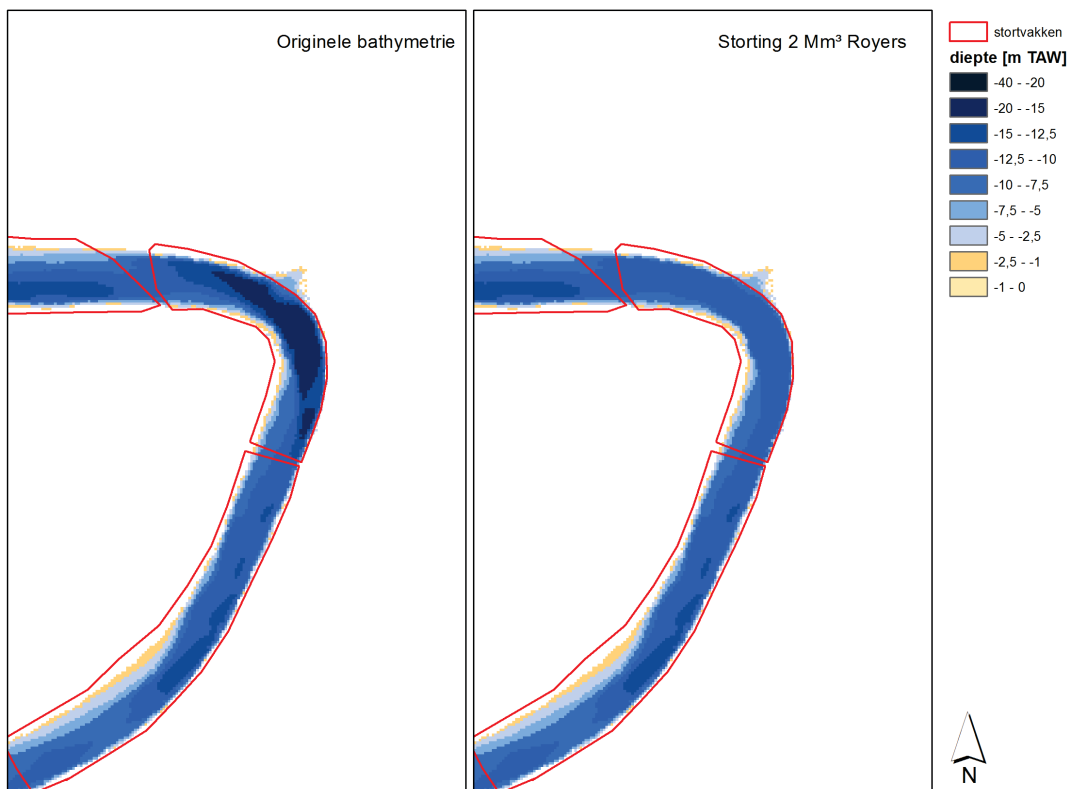
Figuur A 6 – Aanpassing bathymetrie voor run zsc205: Kallosluis 4 Mm³



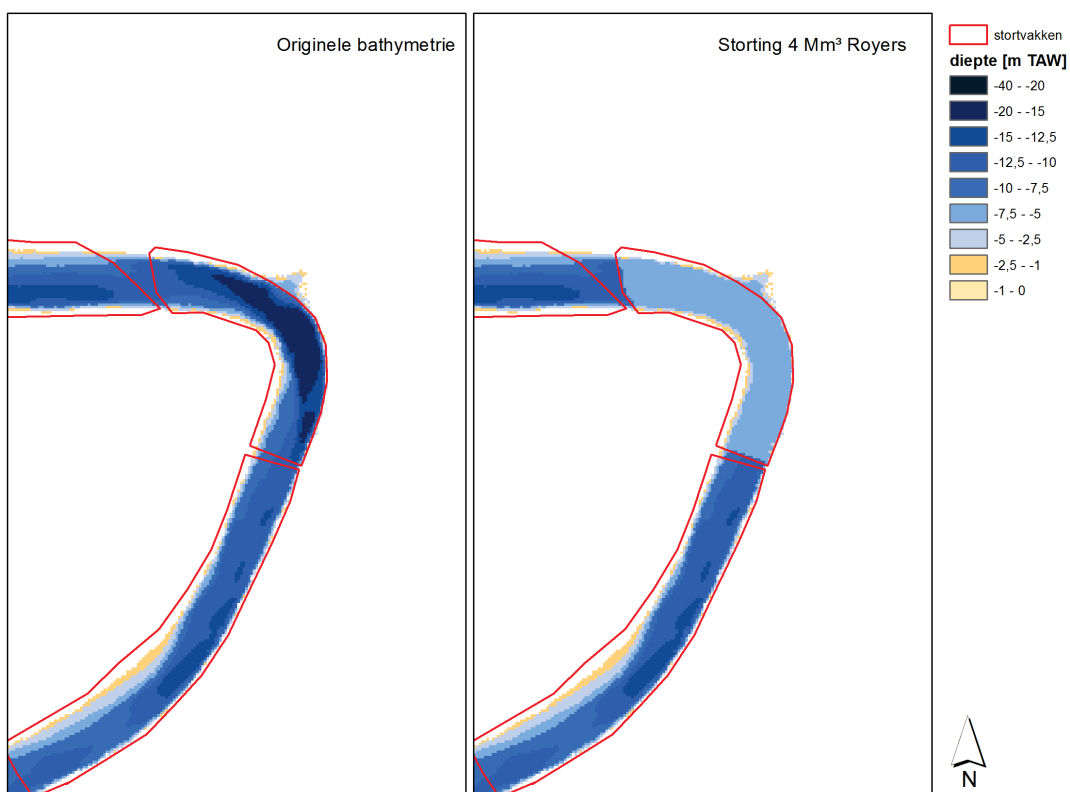
Figuur A 7 – Aanpassing bathymetrie voor run zsc206: Oosterweel 2 Mm³



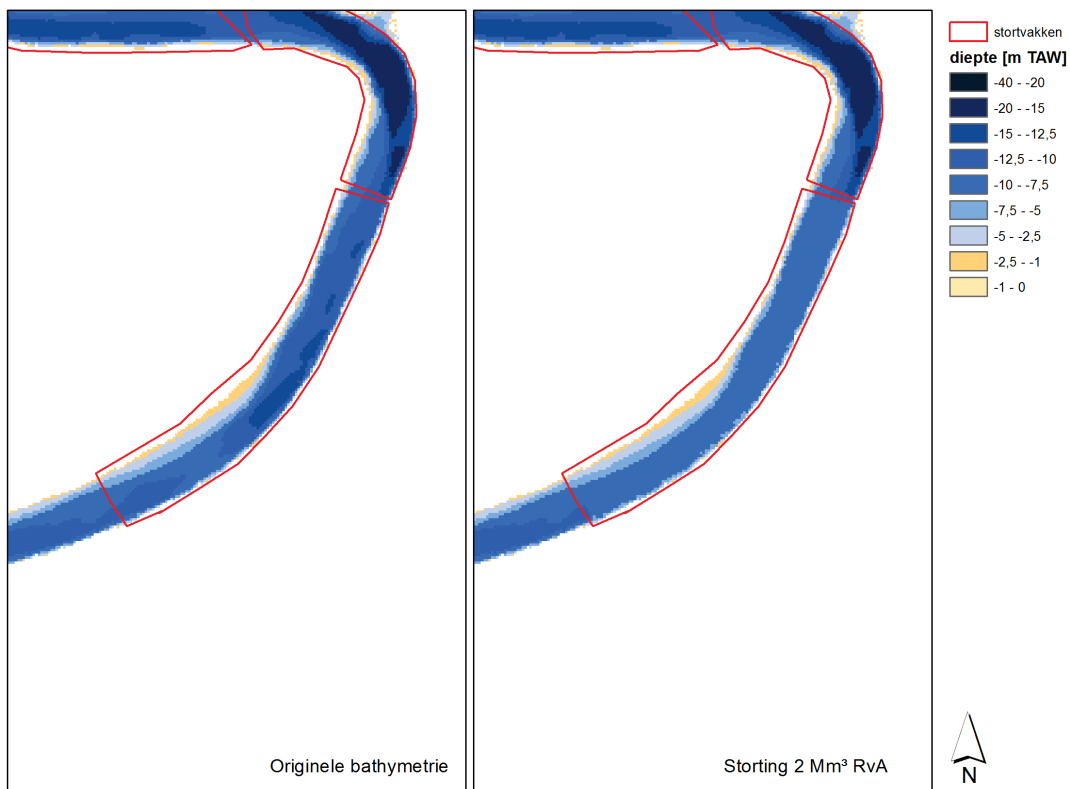
Figuur A 8 – Aanpassing bathymetrie voor run zsc207: Oosterweel 4 Mm³



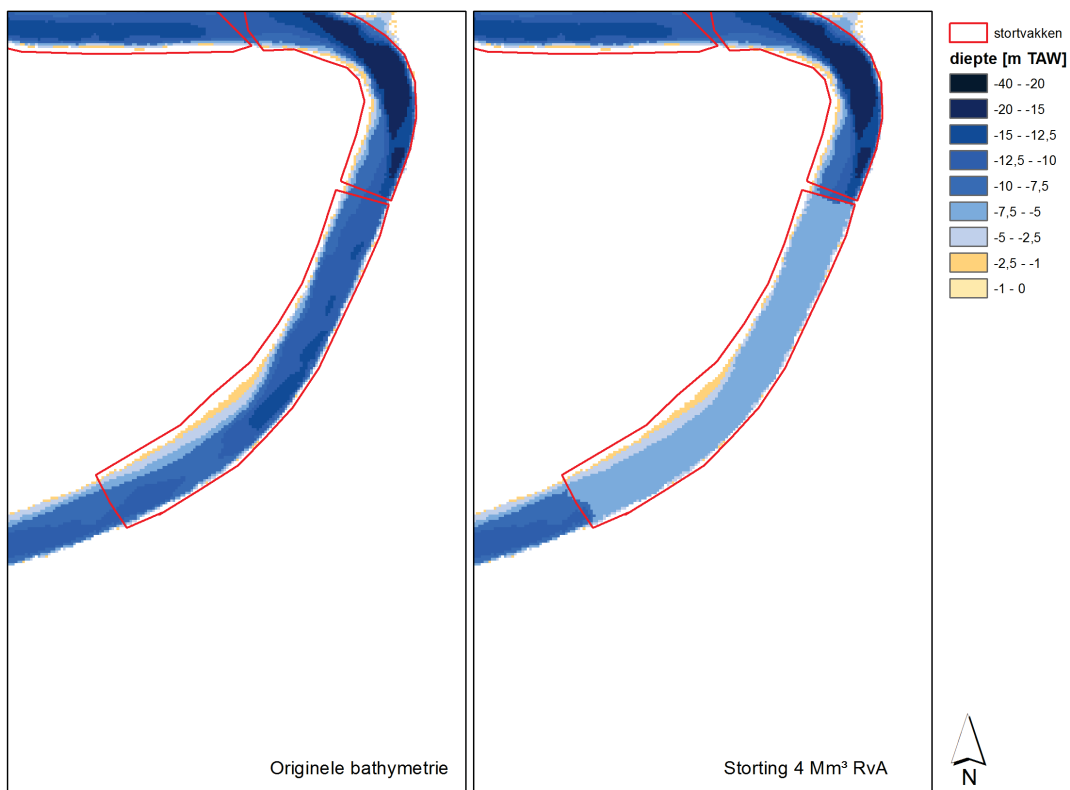
Figuur A 9 – Aanpassing bathymetrie voor run zsc208: Royerssluis 2 Mm³



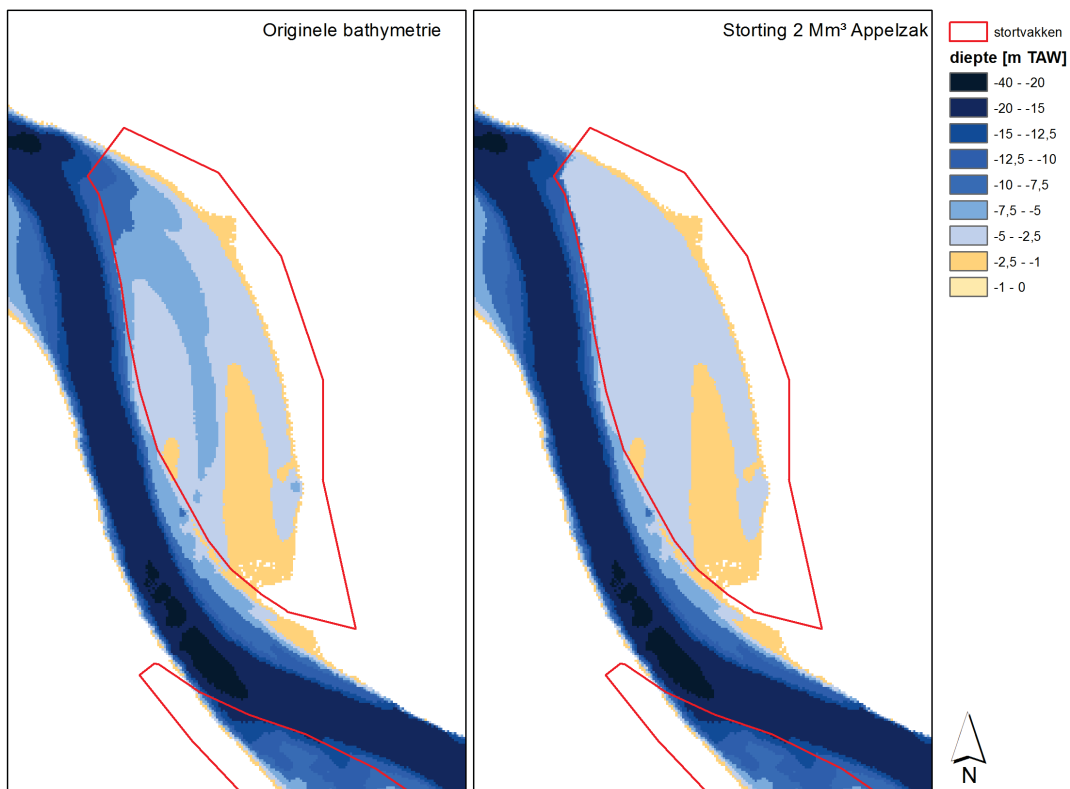
Figuur A 10 – Aanpassing bathymetrie voor run zsc209: Royerssluis 4 Mm³



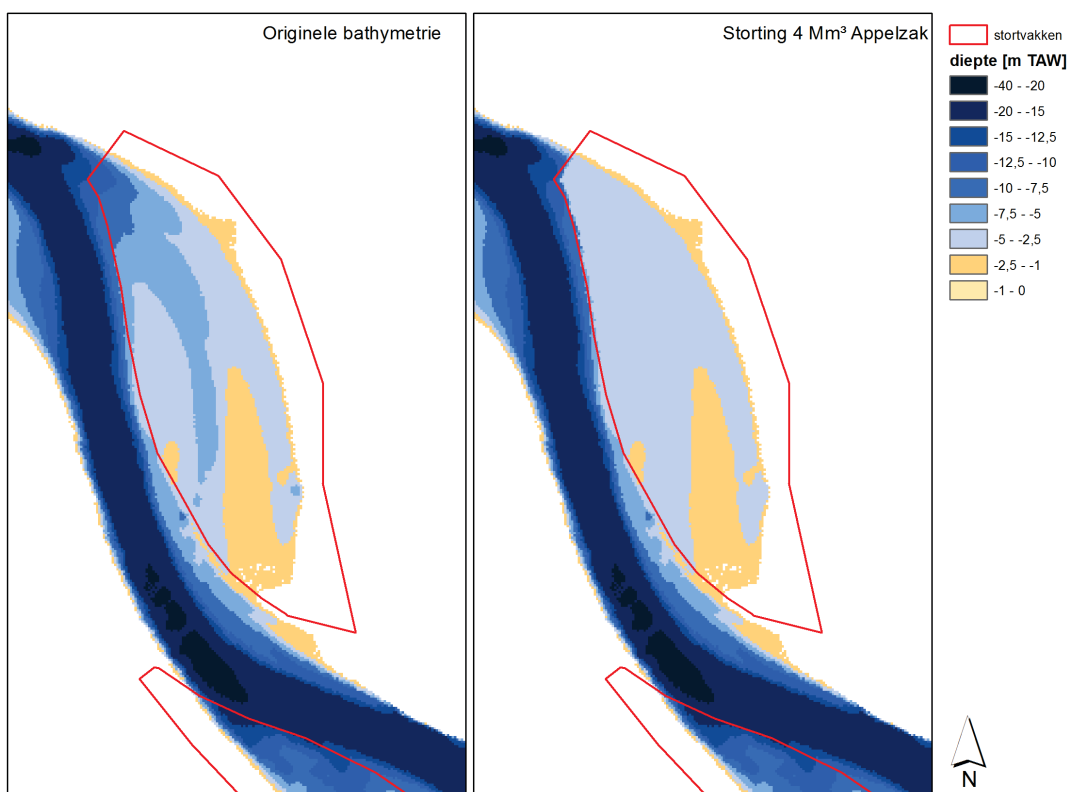
Figuur A 11 – Aanpassing bathymetrie voor run zsc210: Rede van Antwerpen 2 Mm³



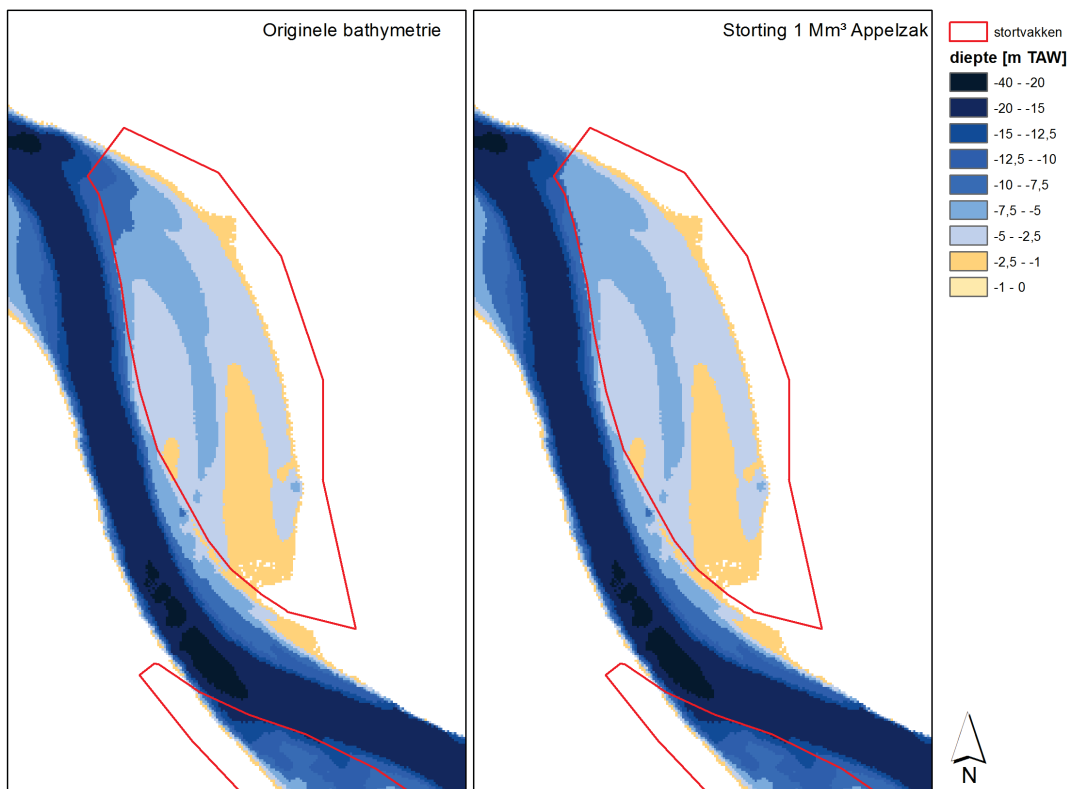
Figuur A 12 – Aanpassing bathymetrie voor run zsc211: Rede van Antwerpen 4 Mm³



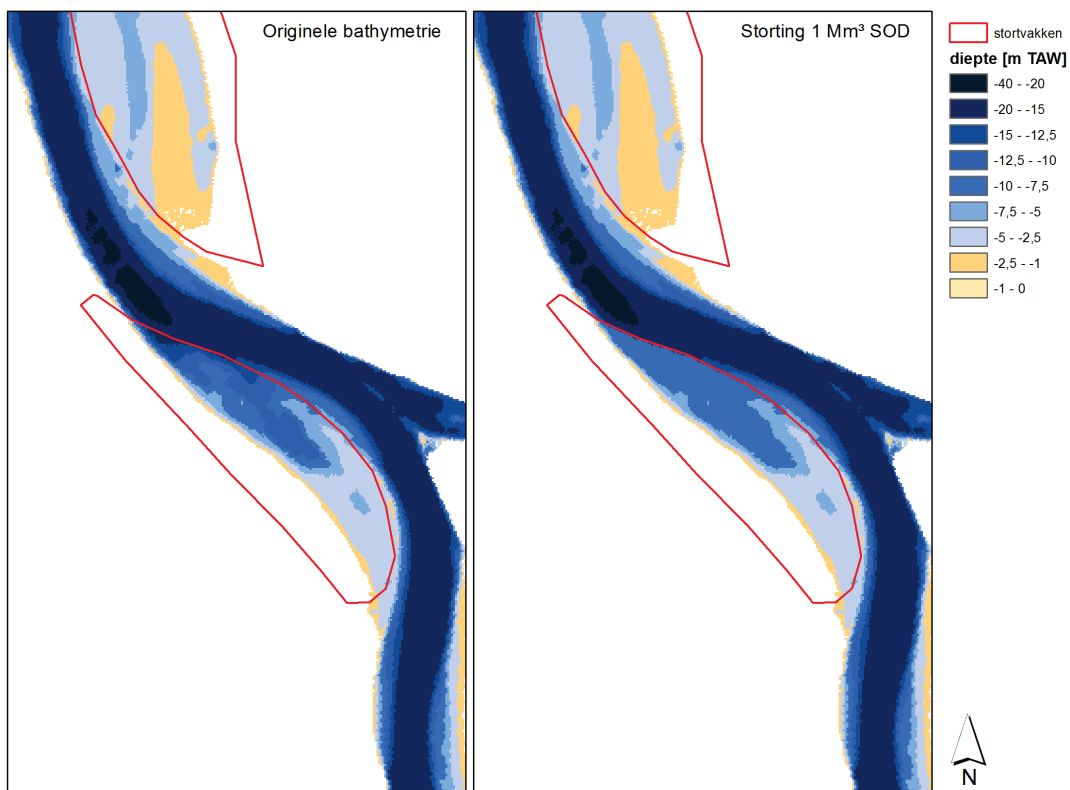
Figuur A 13 – Aanpassing bathymetrie voor run zsc212: Appelzak 2 Mm³



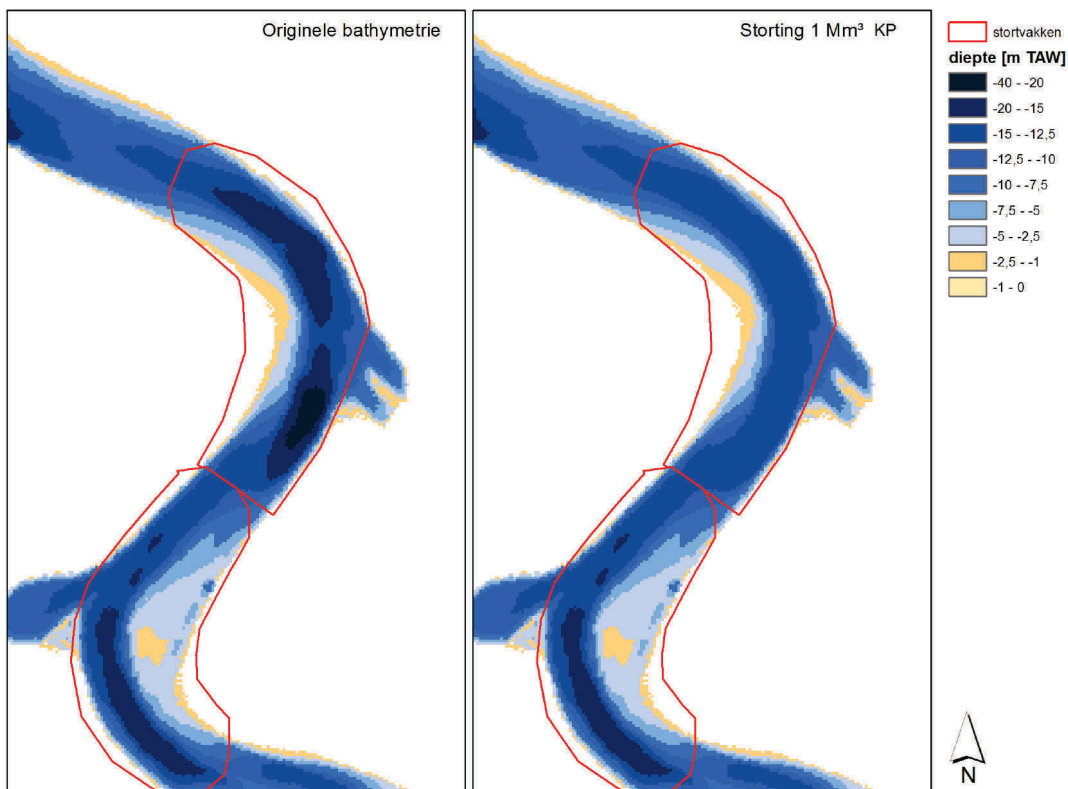
Figuur A 14 – Aanpassing bathymetrie voor run zsc213: Appelzak 4 Mm³



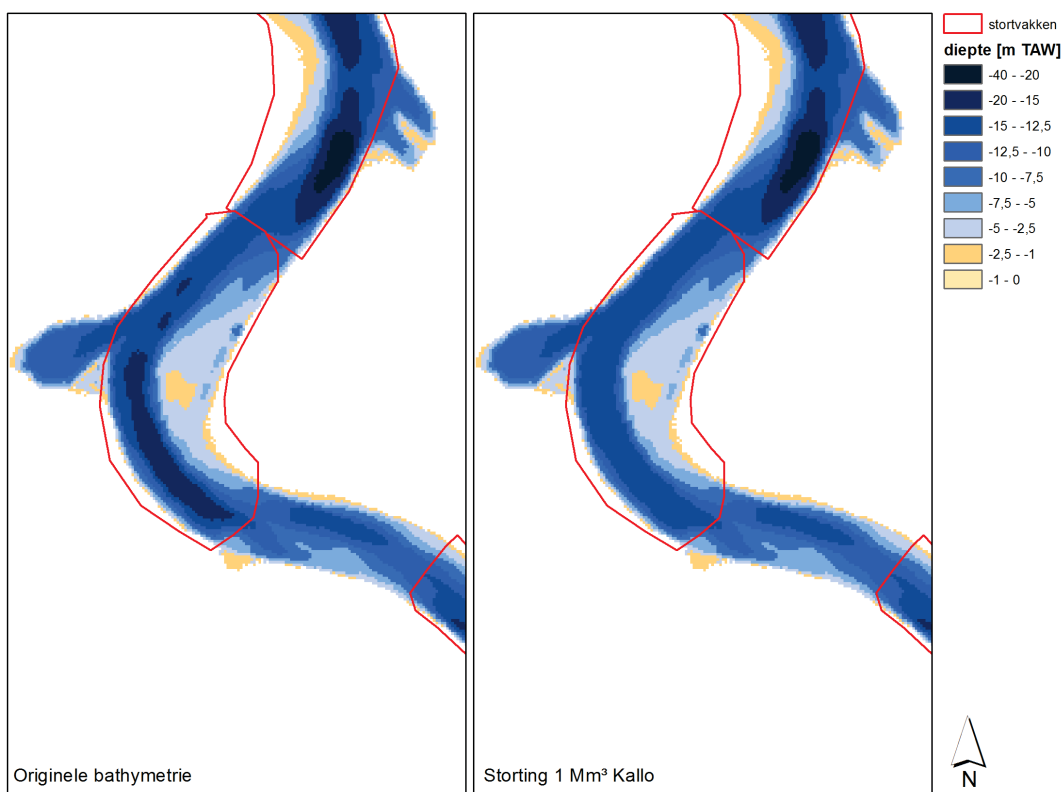
Figuur A 15 – Aanpassing bathymetrie voor run zsc214: Appelzak 1 Mm³



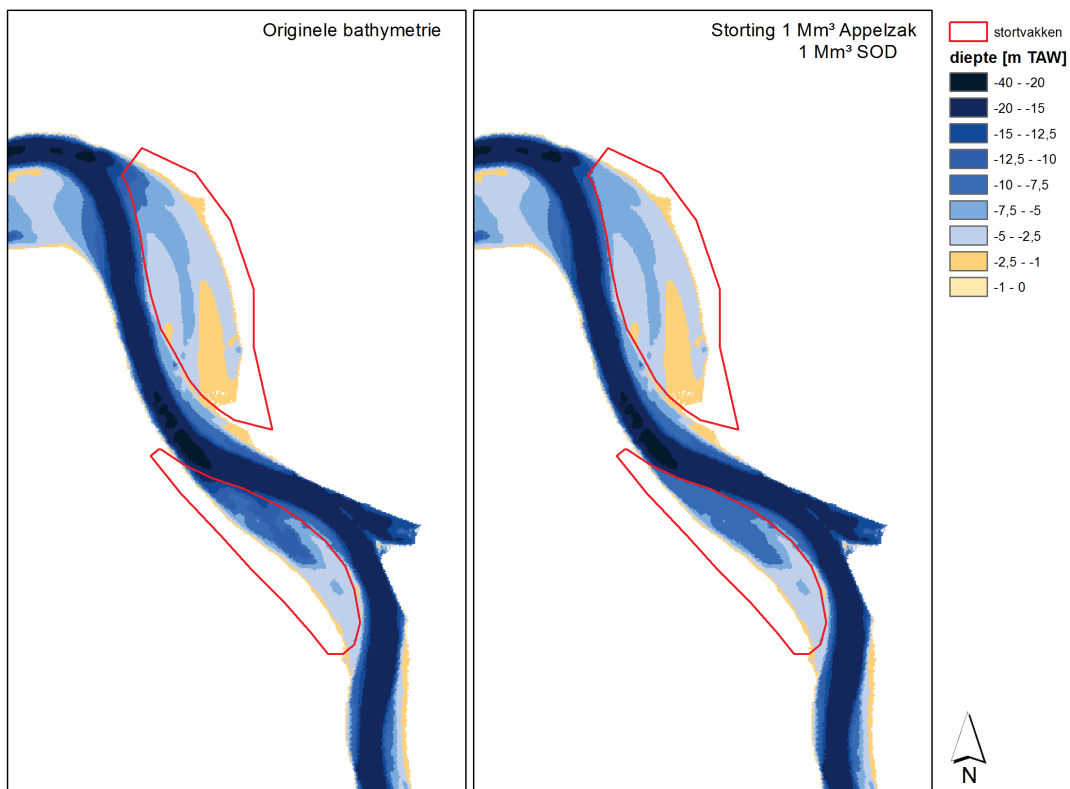
Figuur A 16 – Aanpassing bathymetrie voor run zsc215: Schaar Ouden Doel 1 Mm³



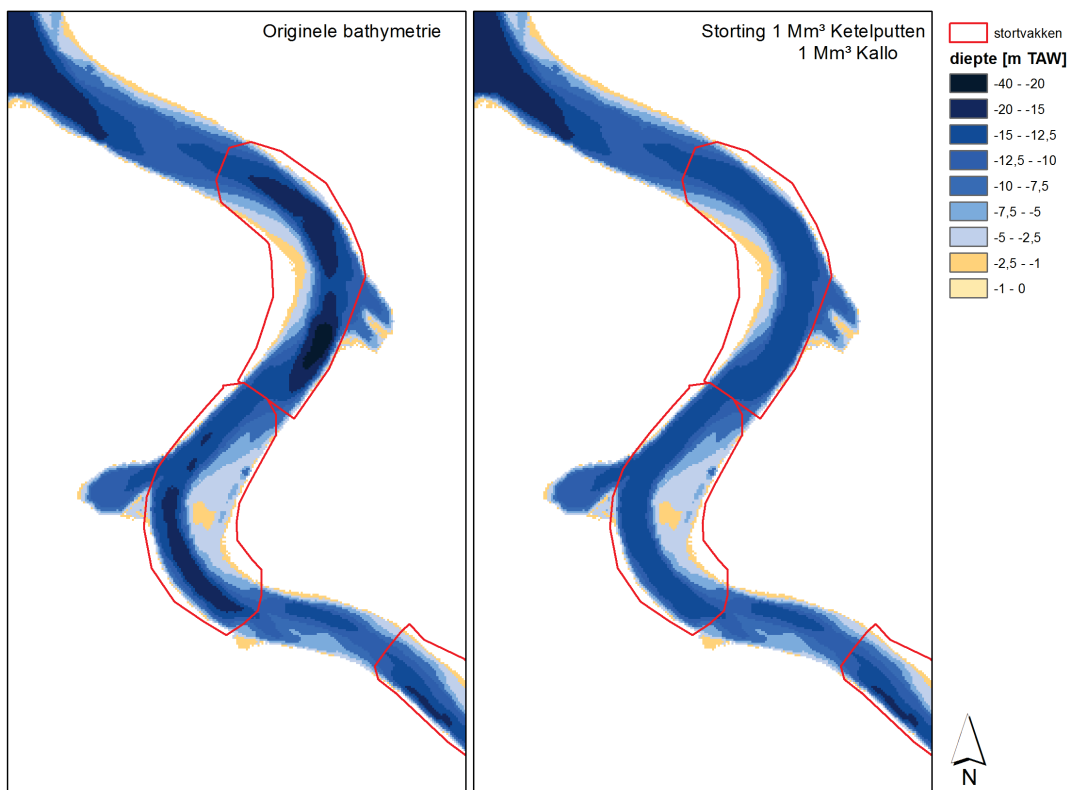
Figuur A 17 – Aanpassing bathymetrie voor run zsc216: Ketelputten 1 Mm³



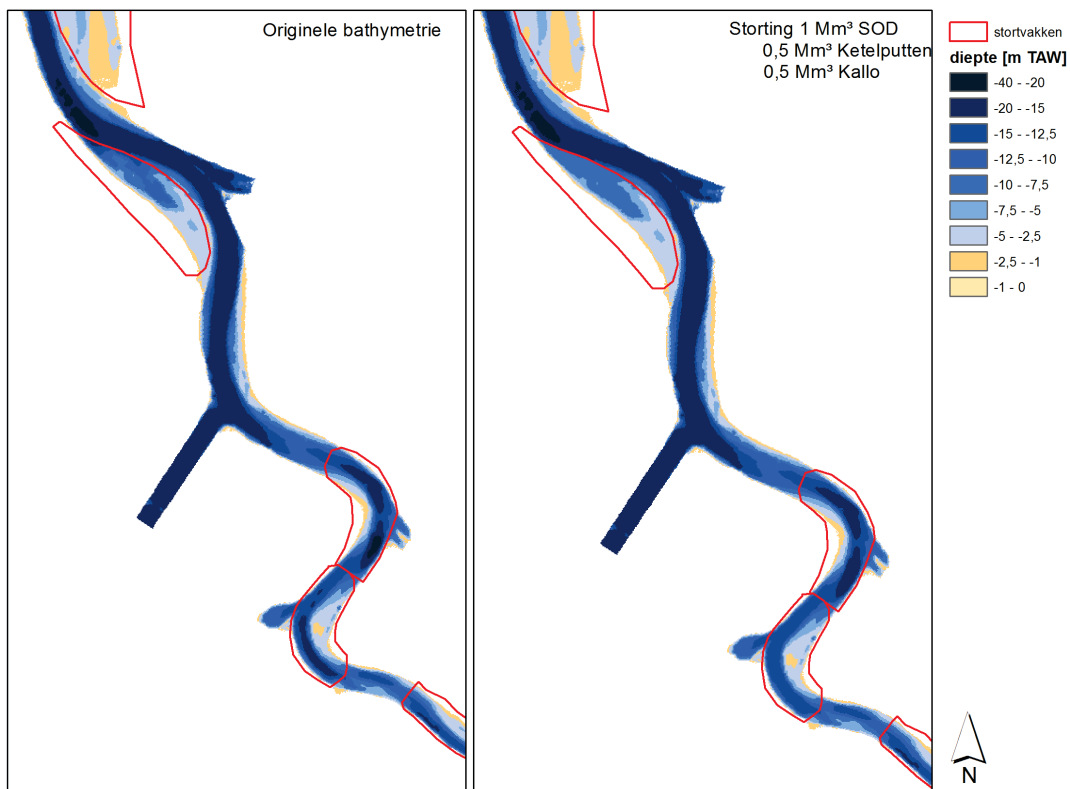
Figuur A 18 – Aanpassing bathymetrie voor run zsc217: Kallosluis 1 Mm³



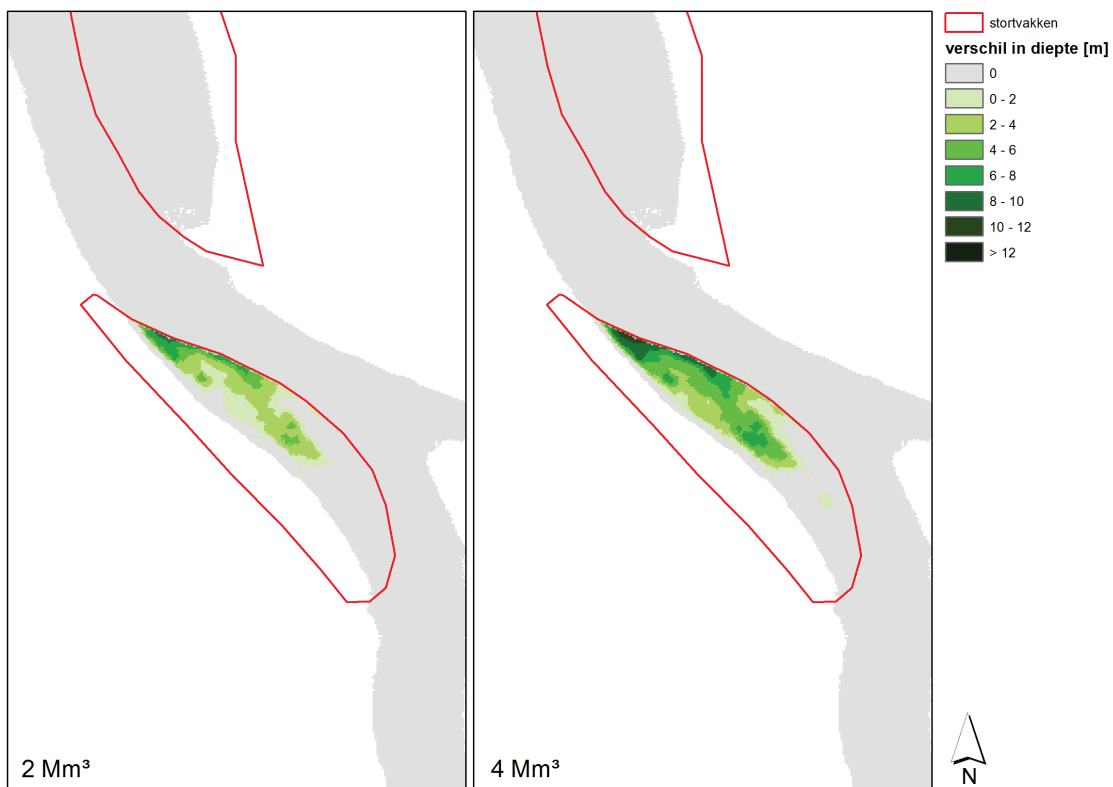
Figuur A 19 – Aanpassing bathymetrie voor run zsc218: Appelzak 1 Mm³ en Schaar Ouden Doel 1 Mm³



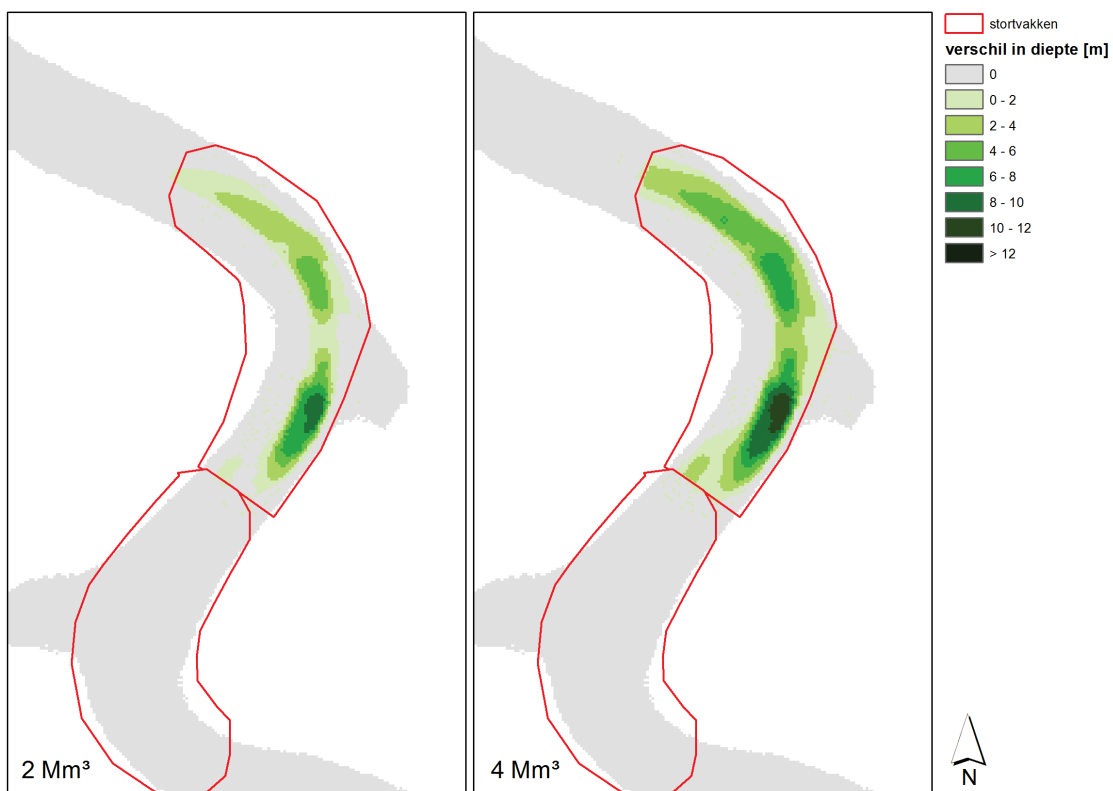
Figuur A 20 – Aanpassing bathymetrie voor run zsc219: Ketelputten 1 Mm³ en Kallosluis 1 Mm³



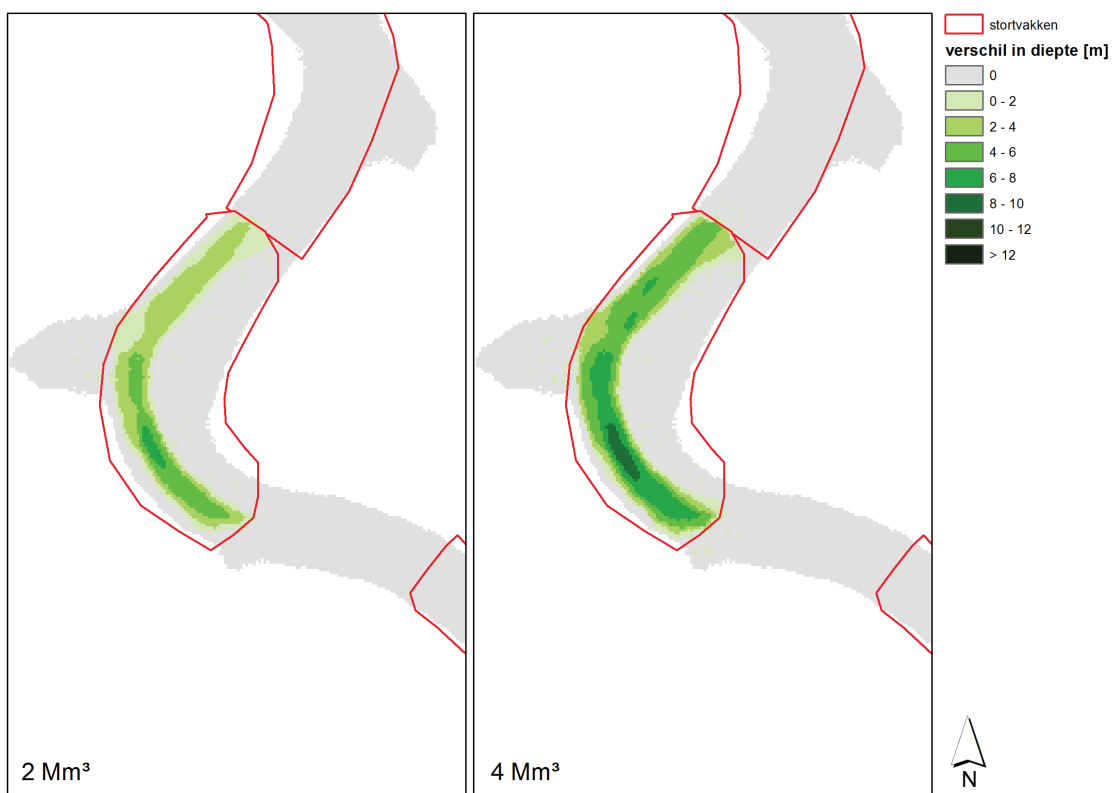
Figuur A 21 – Aanpassing bathymetrie voor run zsc220: Schaar Ouden Doel 1 Mm³, Ketelputten 0,5 Mm³ en Kallosluis 0,5 Mm³



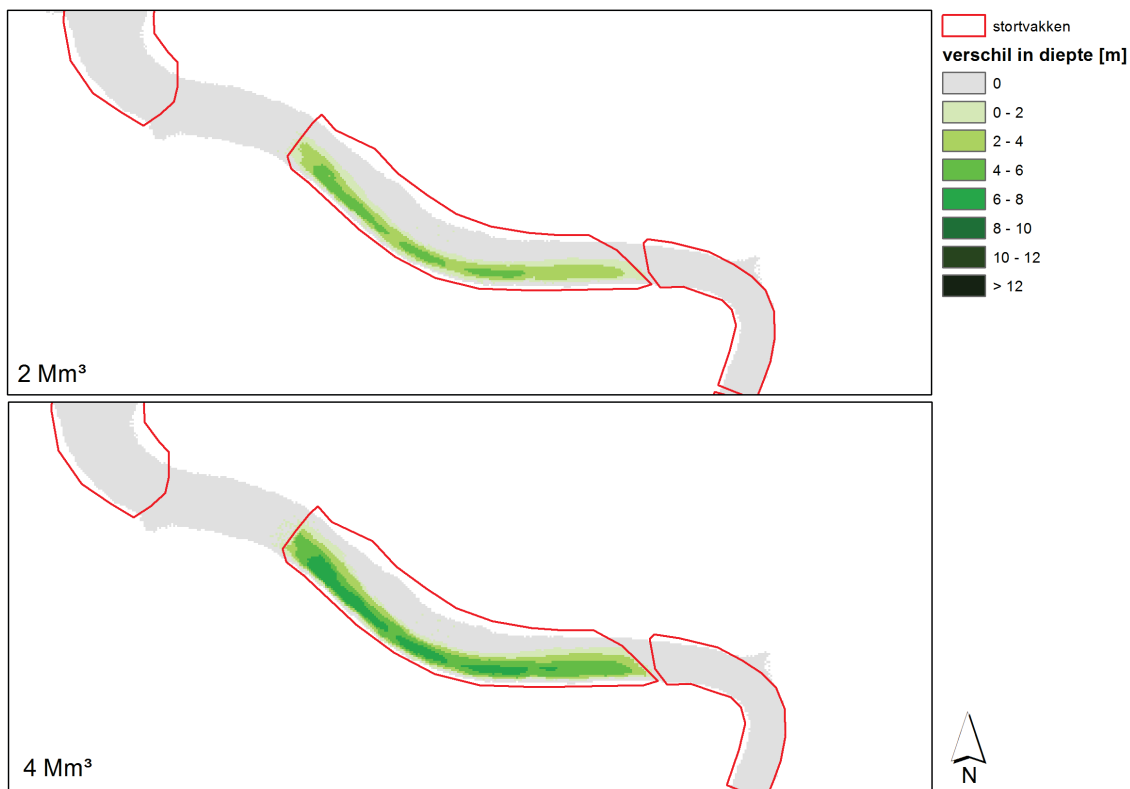
Figuur A 22 – Verschilkaart tussen originele bathymetrie en bathymetrie van run zsc200 (links) en run zsc201 (rechts) – Schaar Ouden Doel



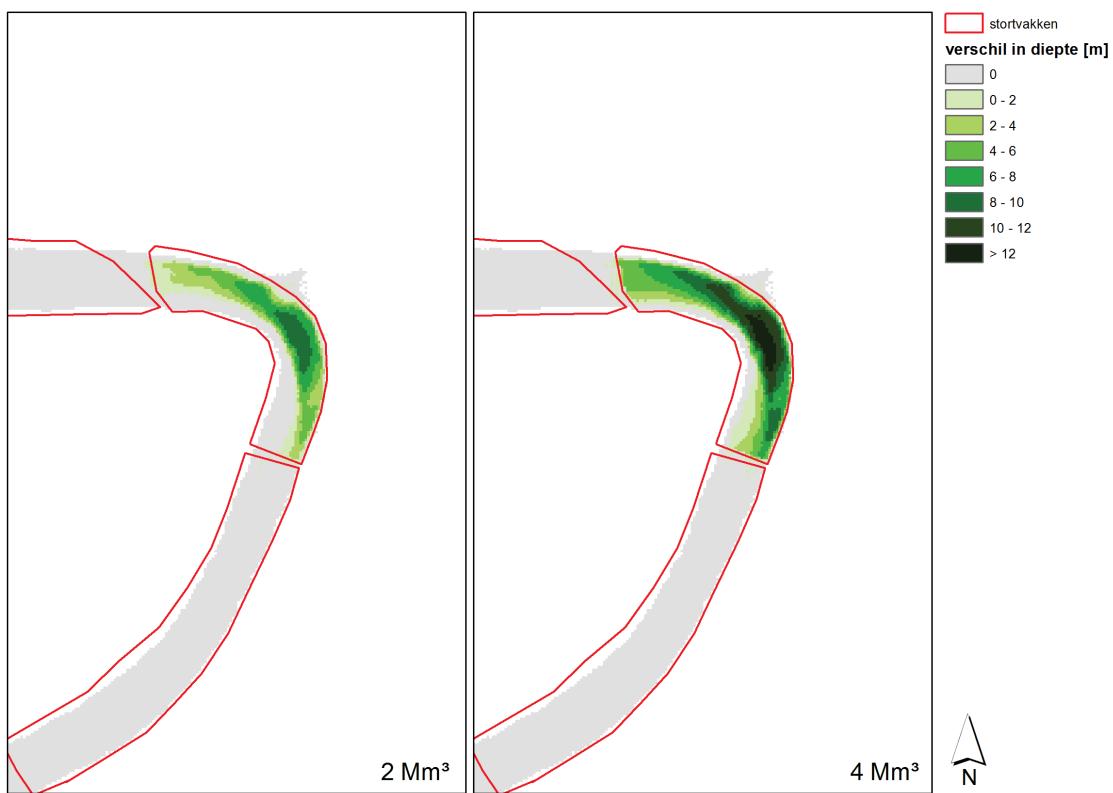
Figuur A 23 – Verschilkaart tussen originele bathymetrie en bathymetrie van run zsc202 (links) en run zsc203 (rechts) - Ketelputten



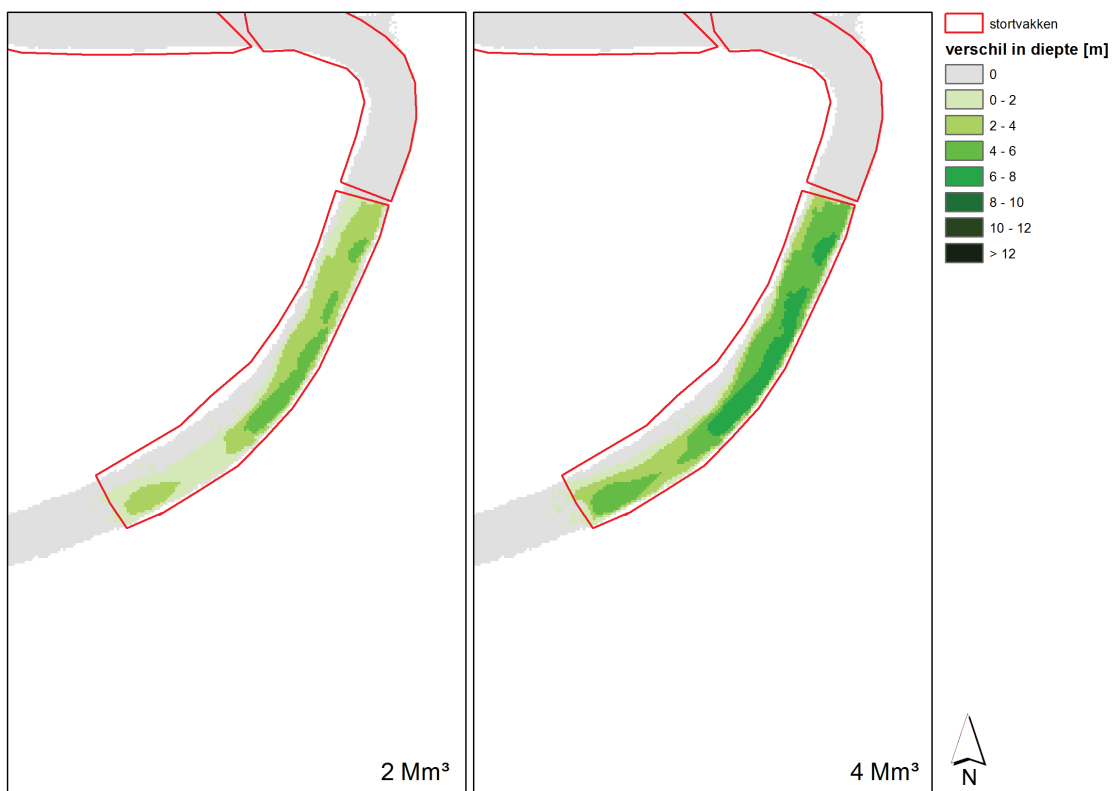
Figuur A 24 – Verschilkaart tussen originele bathymetrie en bathymetrie van run zsc204 (links) en run zsc205 (rechts) - Kallosluis



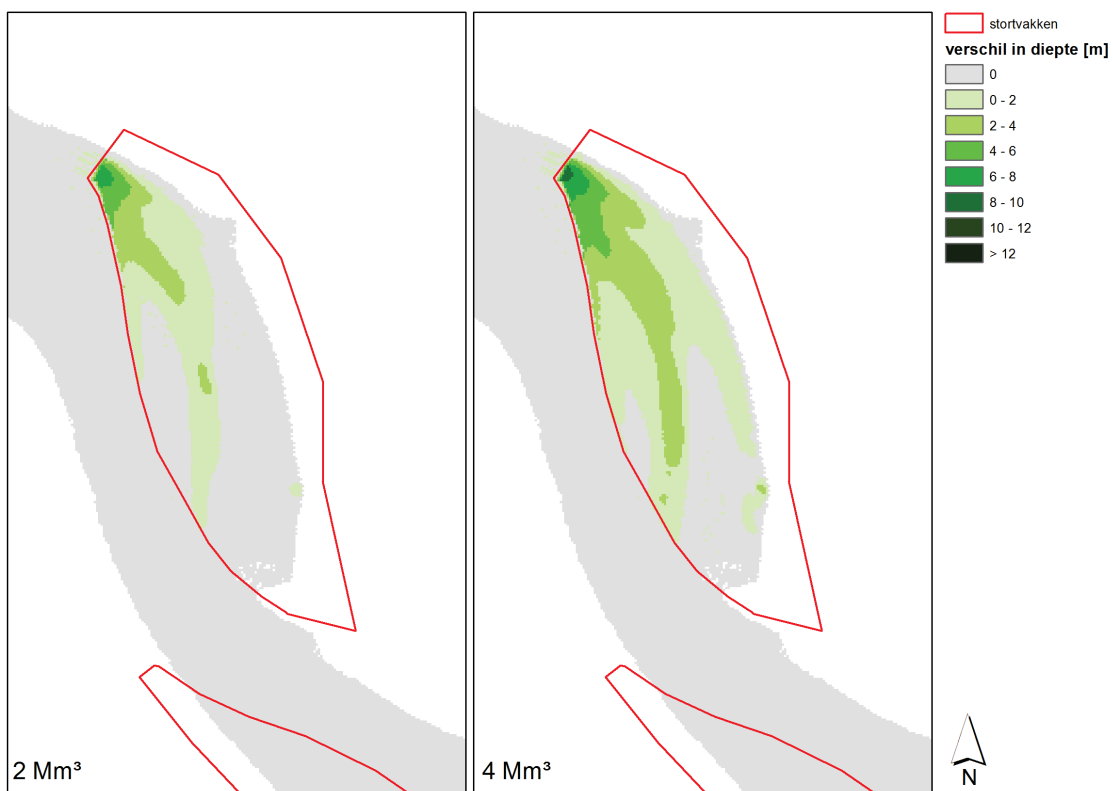
Figuur A 25 – Verschilkaart tussen originele bathymetrie en bathymetrie van run zsc206 (links) en run zsc207 (rechts) - Oosterweel



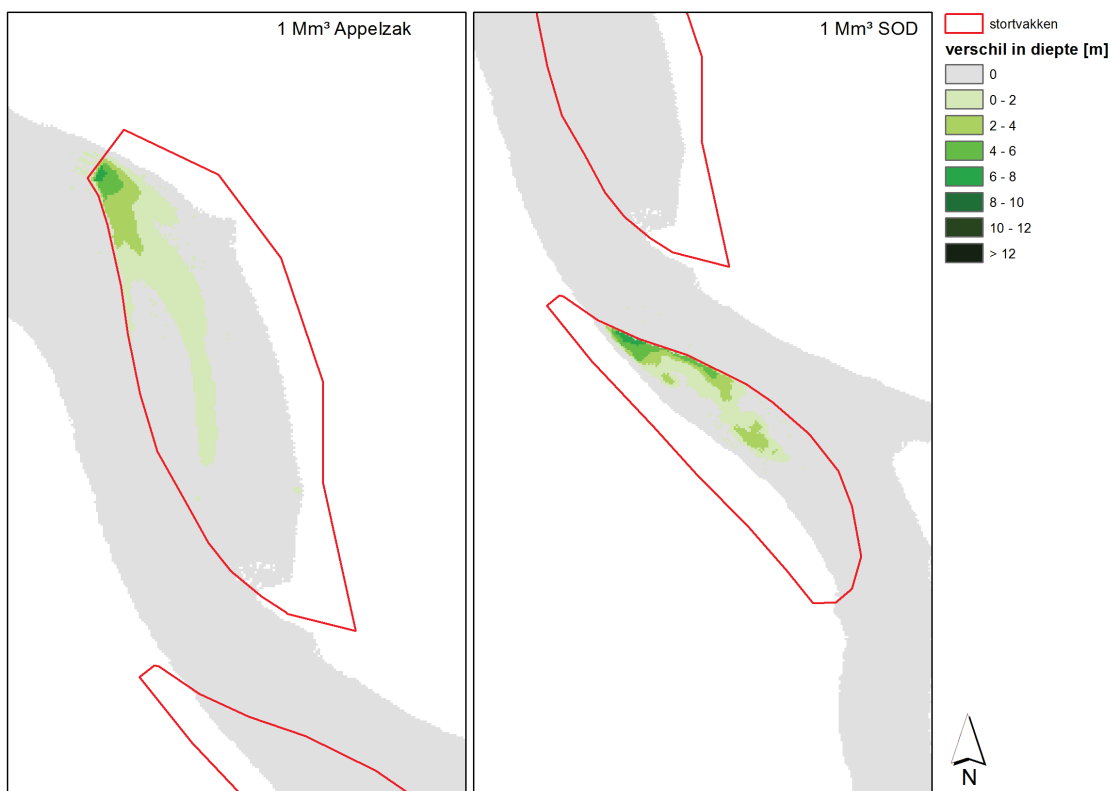
Figuur A 26 – Verschilkaart tussen originele bathymetrie en bathymetrie van run zsc208 (links) en run zsc209 (rechts) - Royerssluis



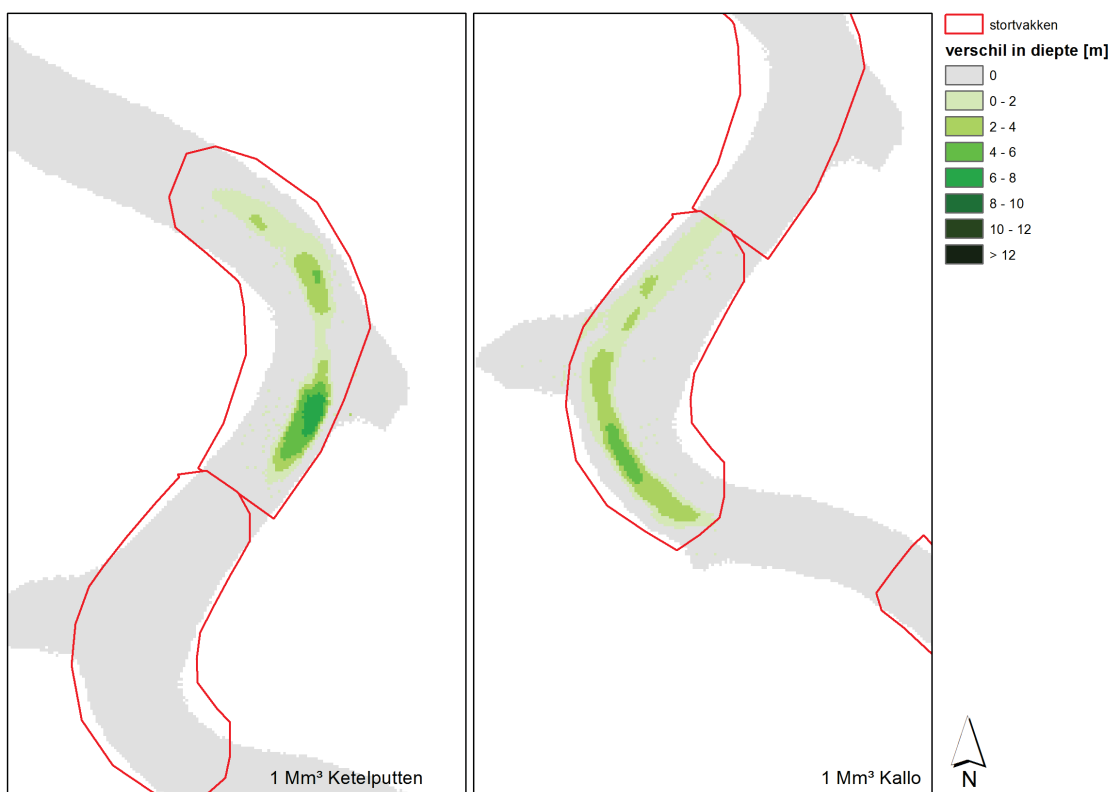
Figuur A 27 – Verschilkaart tussen originele bathymetrie en bathymetrie van run zsc210 (links) en run zsc211 (rechts) Rede van Antwerpen



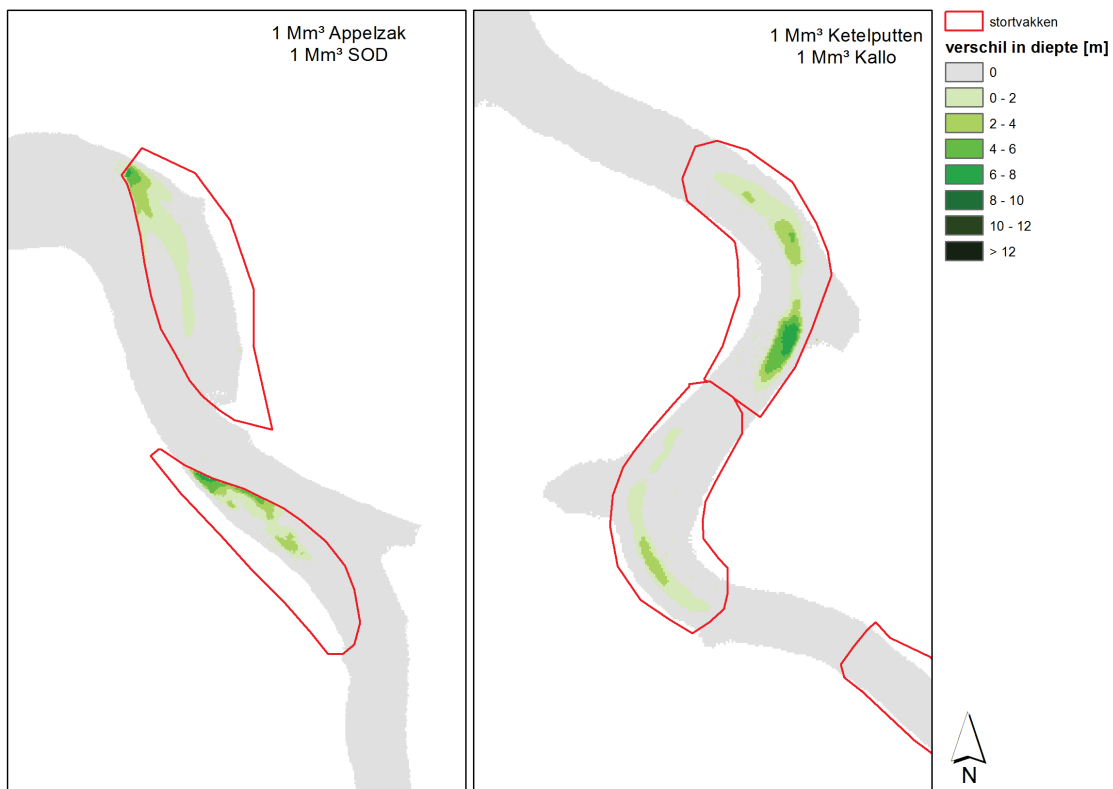
Figuur A 28 – Verschilkaart tussen originele bathymetrie en bathymetrie van run zsc212 (links) en run zsc213 (rechts) - Appelzak



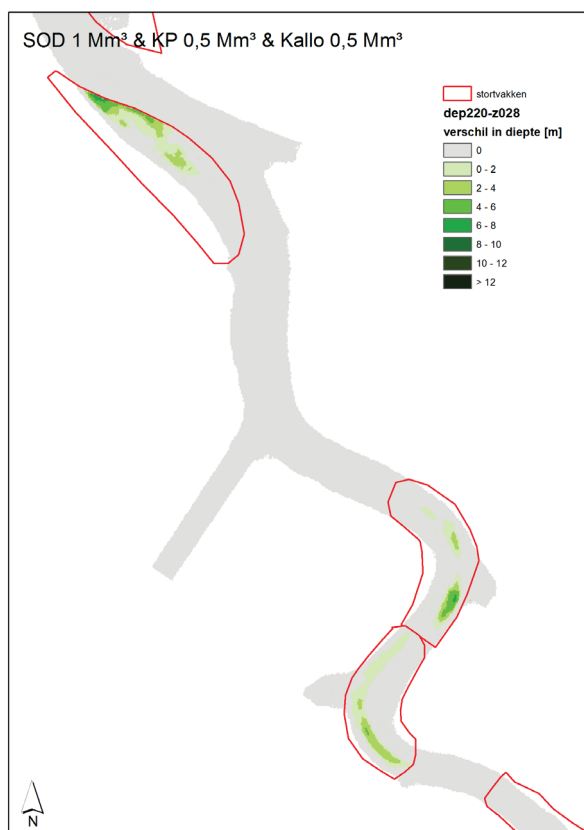
Figuur A 29 – Verschilkaart tussen originele bathymetrie en bathymetrie van run zsc214 (links) en run zsc215 (rechts)



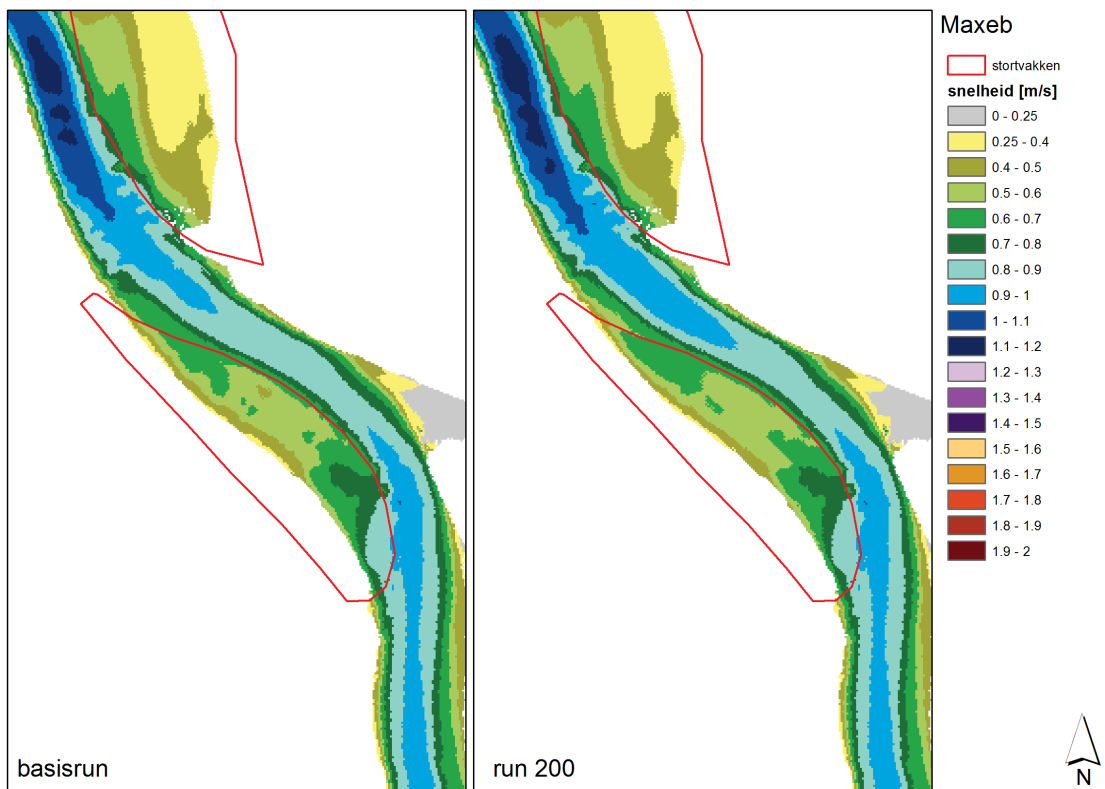
Figuur A 30 – Verschilkaart tussen originele bathymetrie en bathymetrie van run zsc216 (links) en run zsc217 (rechts)



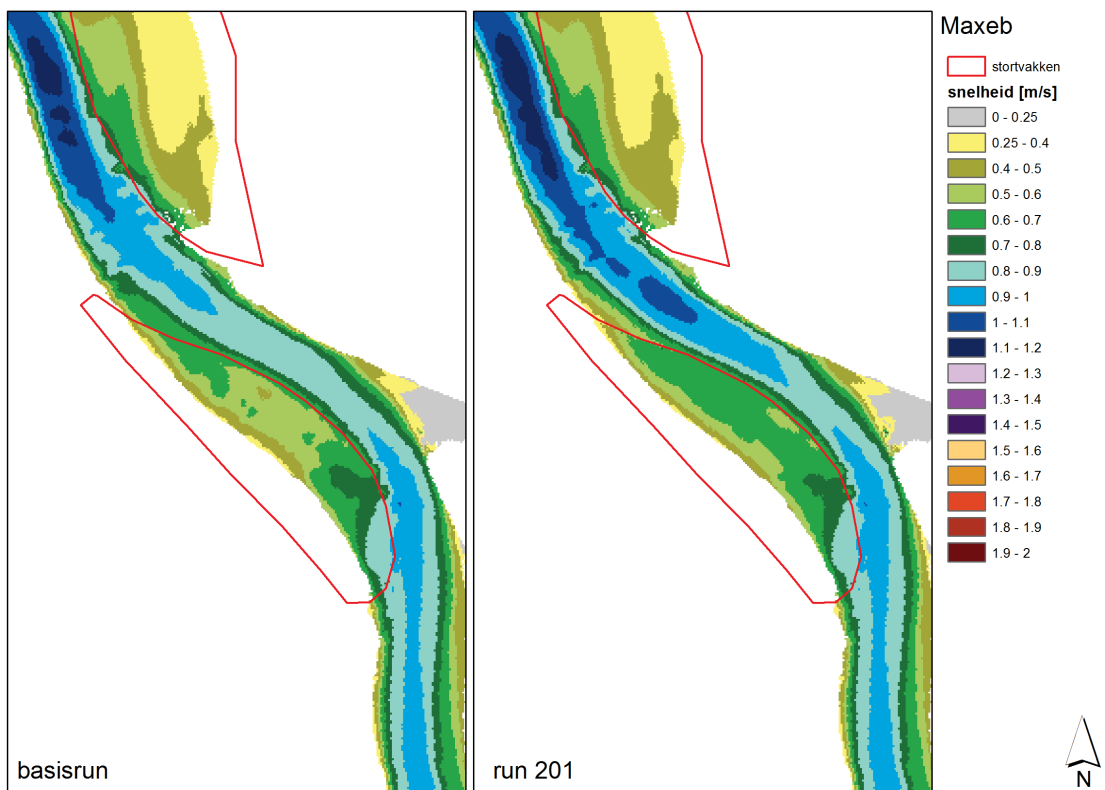
Figuur A 31– Verschilkaart tussen originele bathymetrie en bathymetrie van run zsc218 (links) en run zsc219 (rechts)



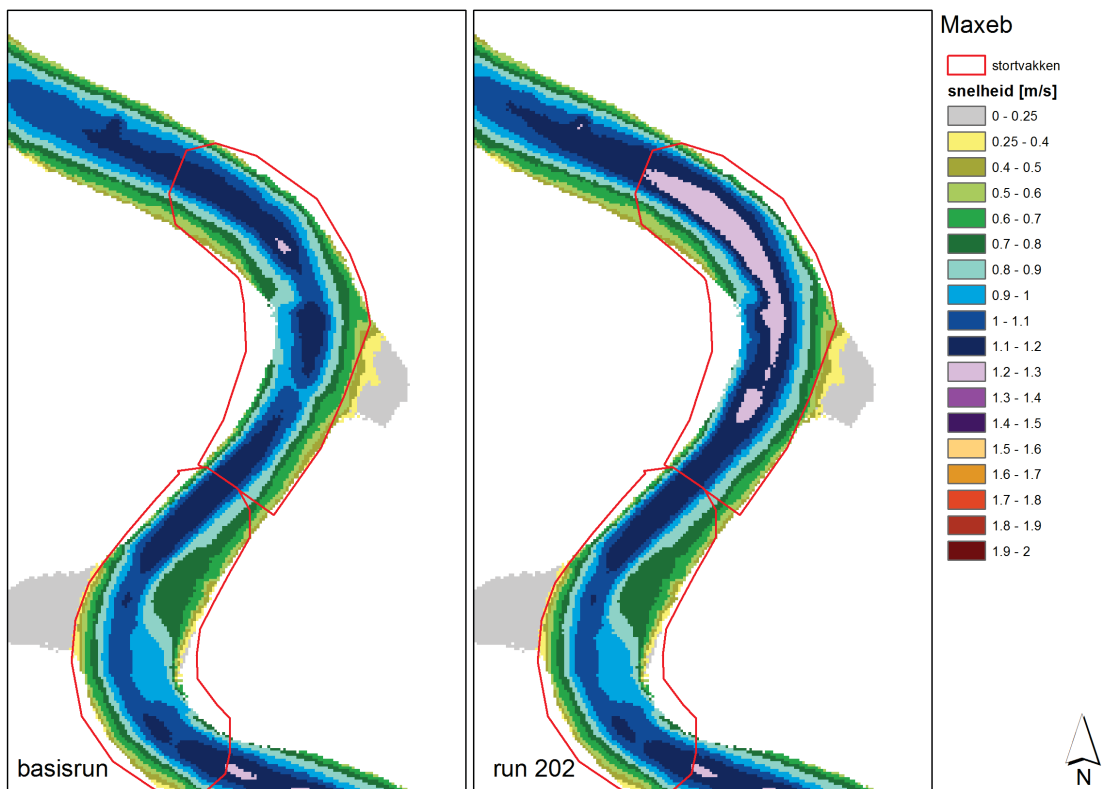
Figuur A 32 – Verschilkaart tussen originele bathymetrie en bathymetrie van run zsc220



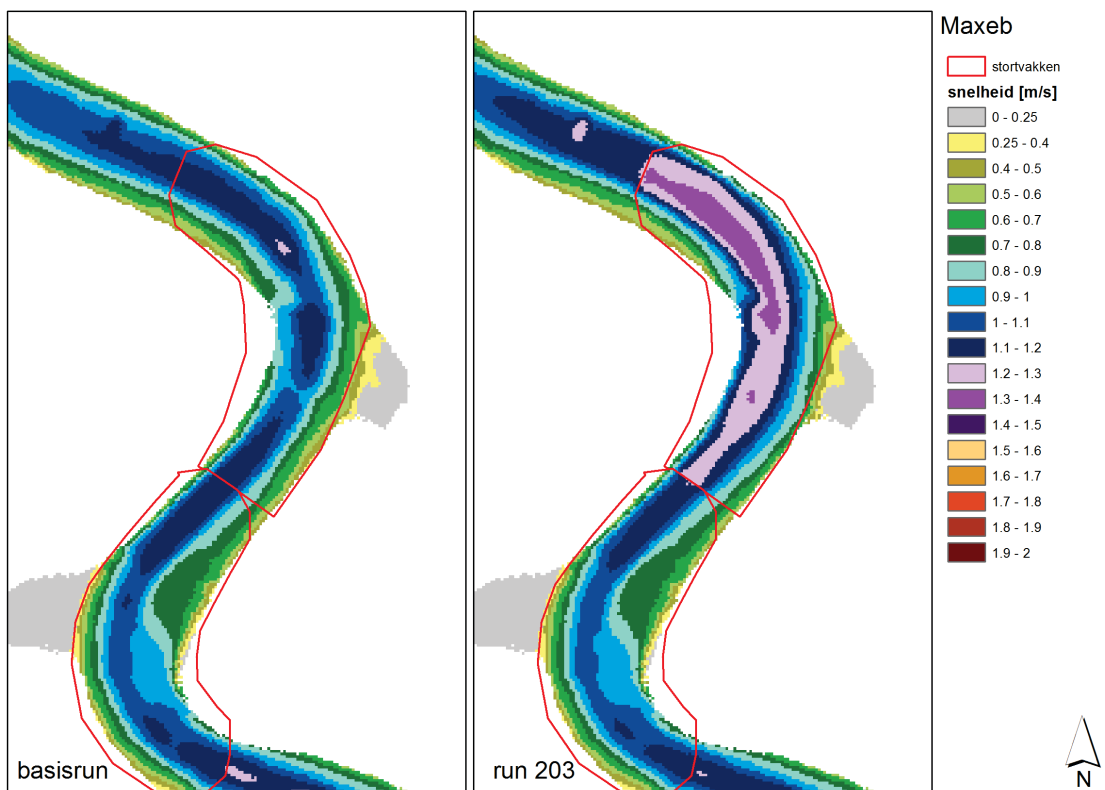
Figuur A 33 – Maximum ebsnelheid voor basisrun (links) en voor run zsc200 (rechts): Schaar Ouden Doel - 2 Mm³



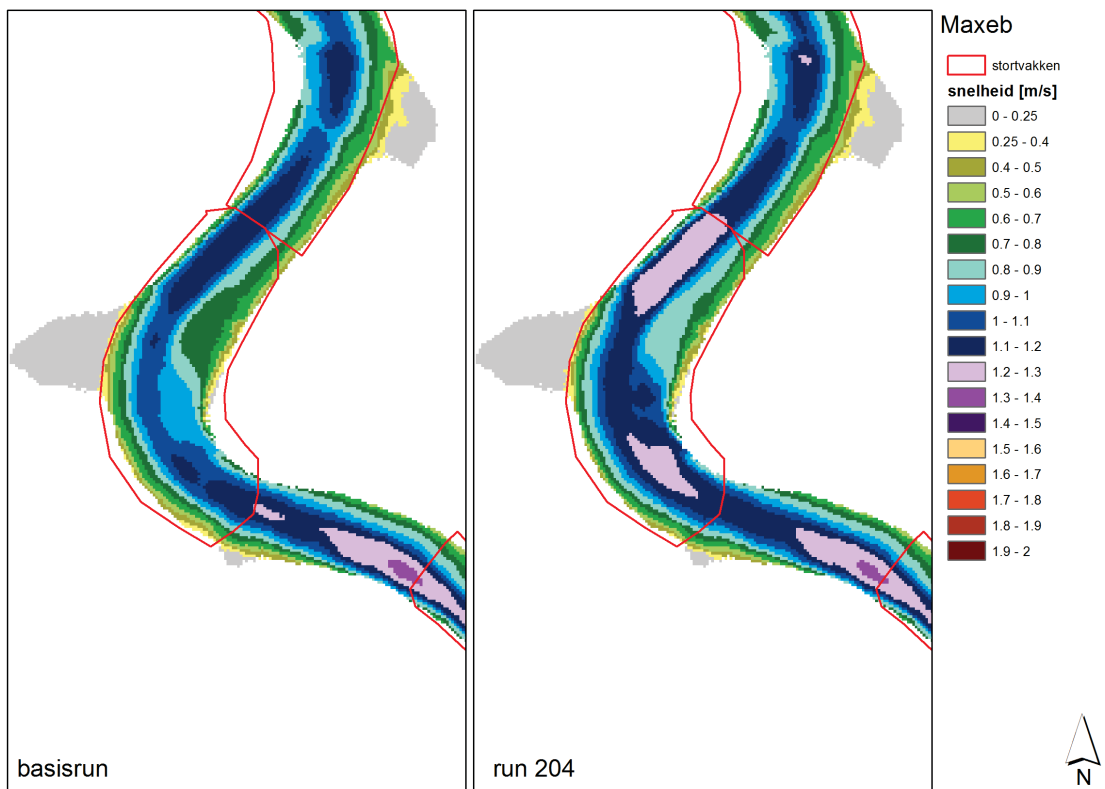
Figuur A 34 – Maximum ebsnelheid voor basisrun (links) en voor run zsc201 (rechts): Schaar Ouden Doel - 4 Mm³



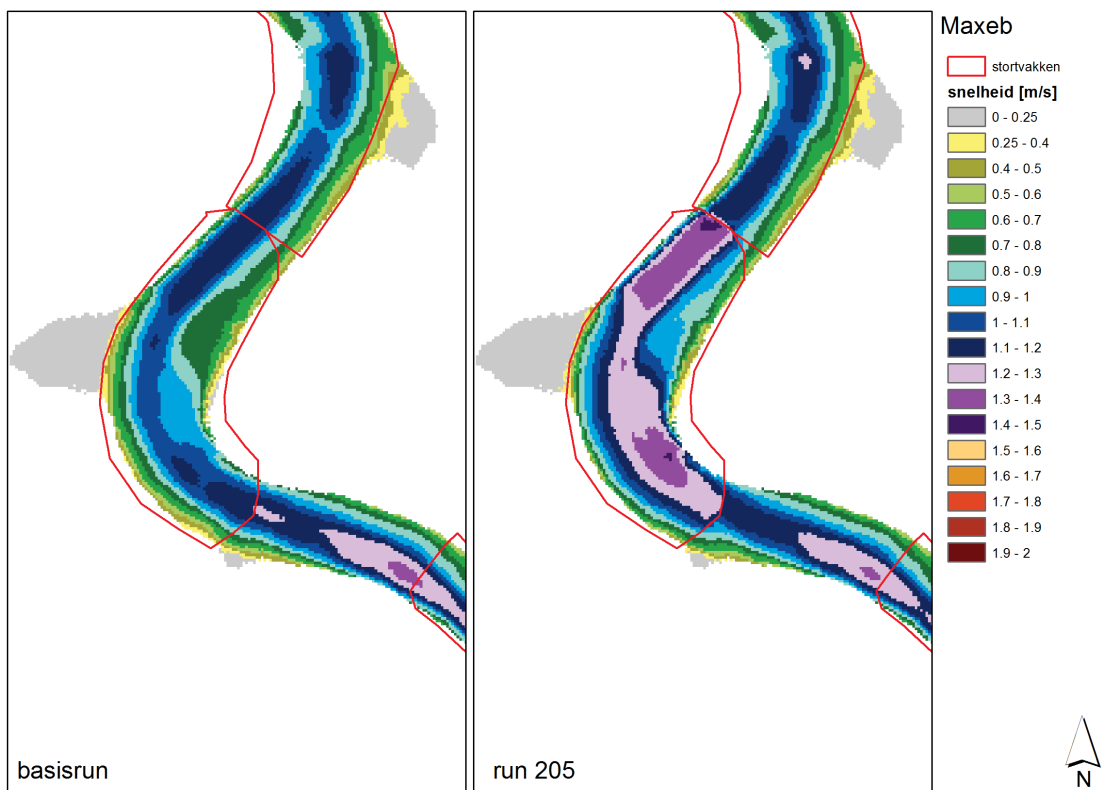
Figuur A 35 – Maximum ebsnelheid voor basisrun (links) en voor run zsc202 (rechts): Ketelputten - 2 Mm³



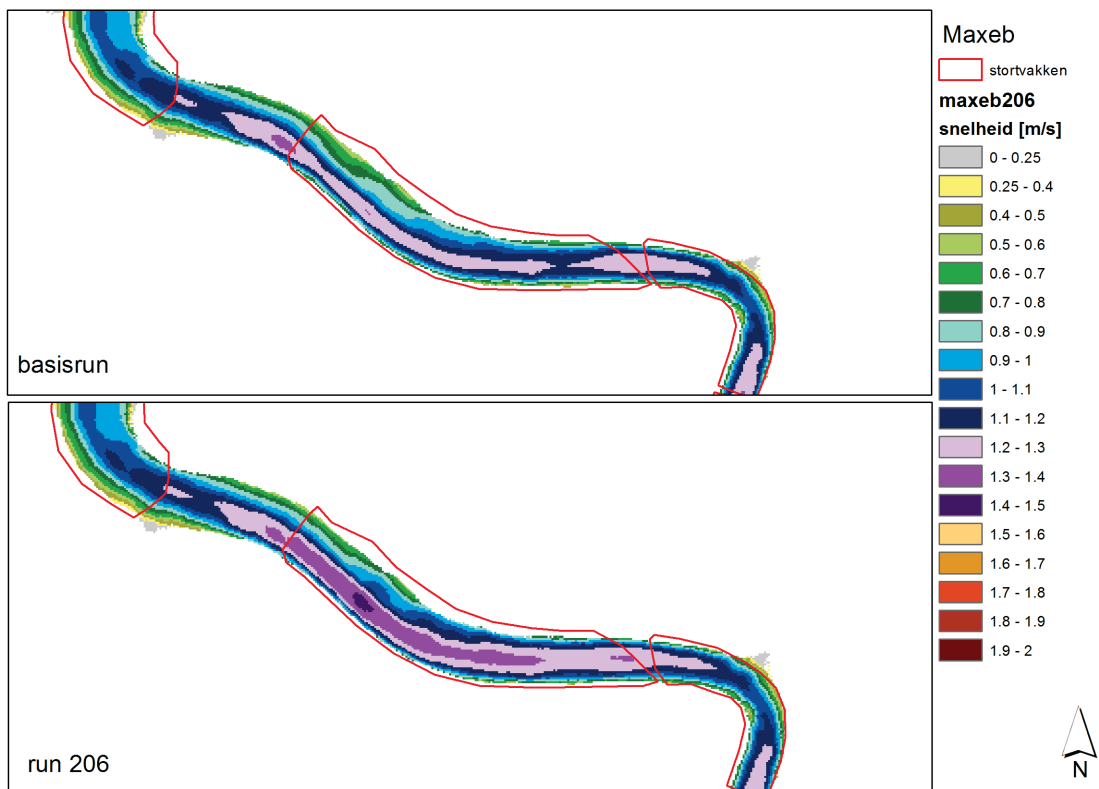
Figuur A 36 – Maximum ebsnelheid voor basisrun (links) en voor run zsc203 (rechts): Ketelputten - 4 Mm³



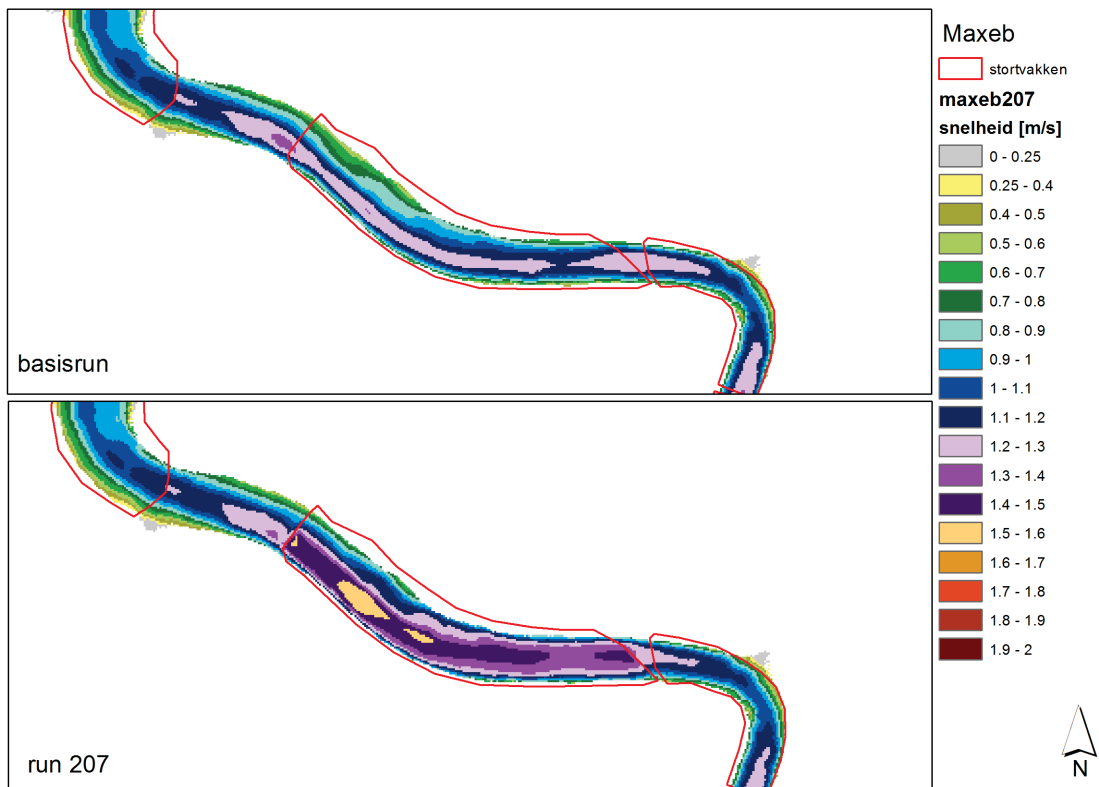
Figuur A 37 – Maximum ebsnelheid voor basisrun (links) en voor run zsc204 (rechts): Kallosluis - 2 Mm³



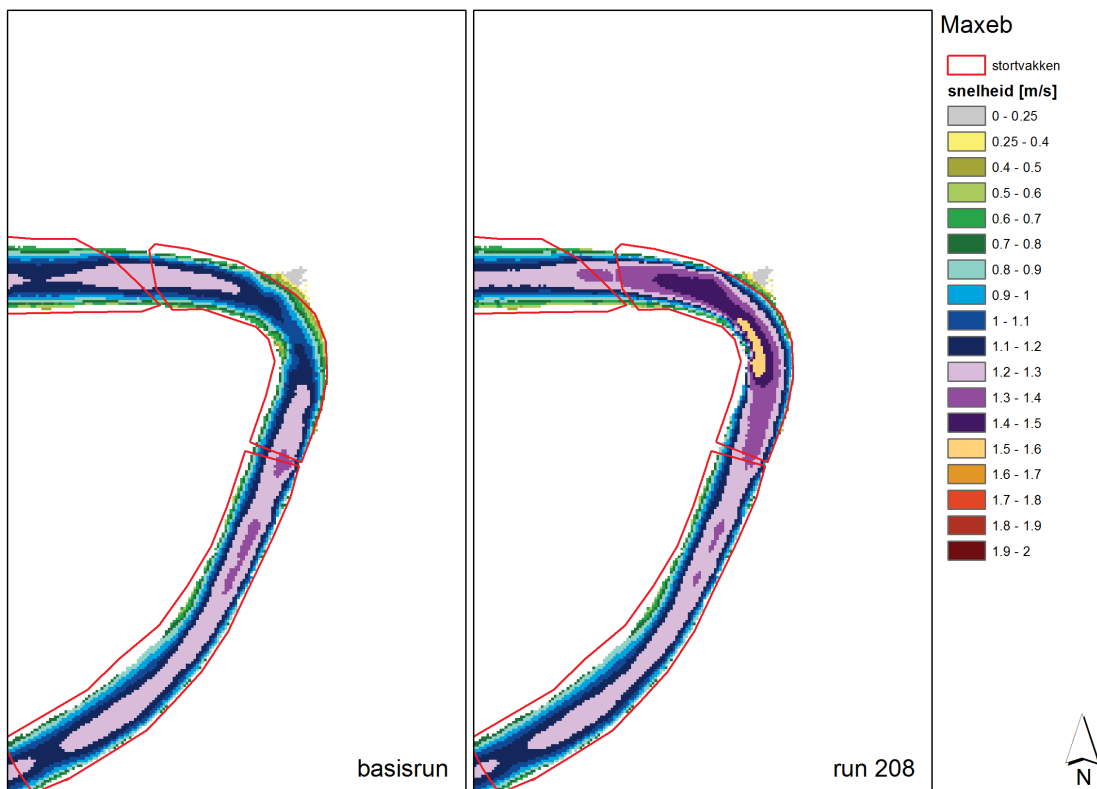
Figuur A 38 – Maximum ebsnelheid voor basisrun (links) en voor run zsc205 (rechts): Kallosluis - 4 Mm³



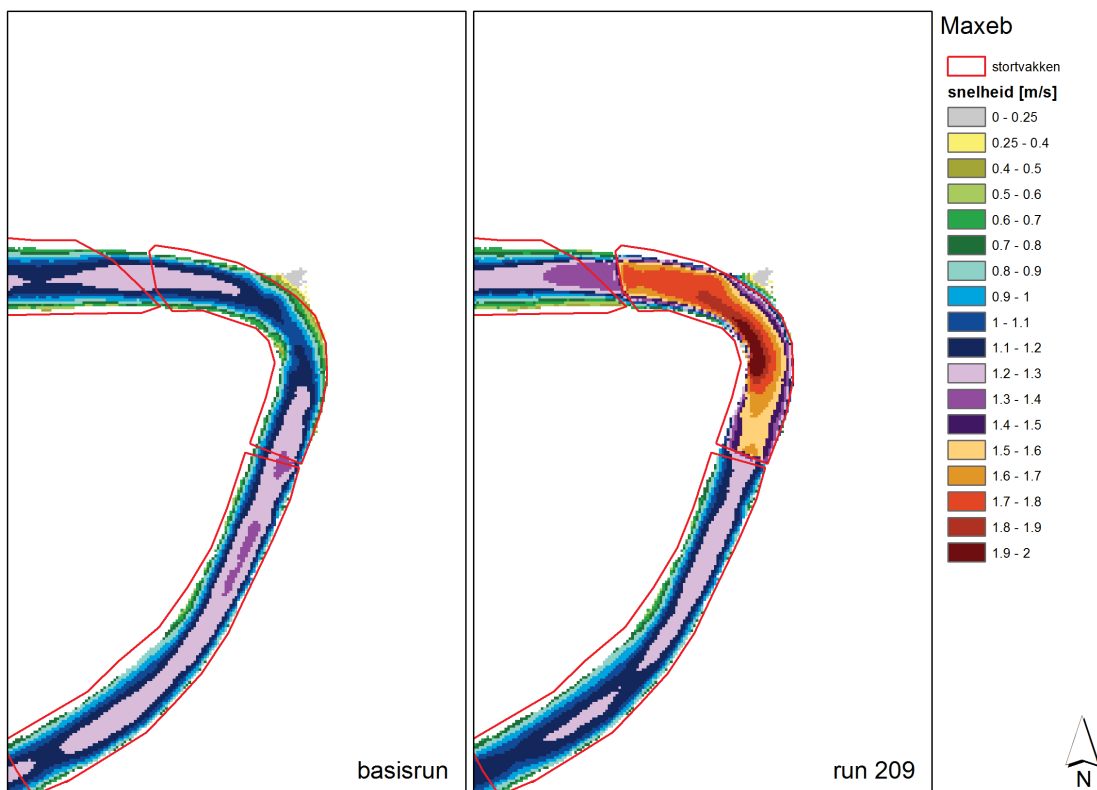
Figuur A 39 – Maximum ebsnelheid voor basisrun (links) en voor run zsc206 (rechts): Oosterweel - 2 Mm³



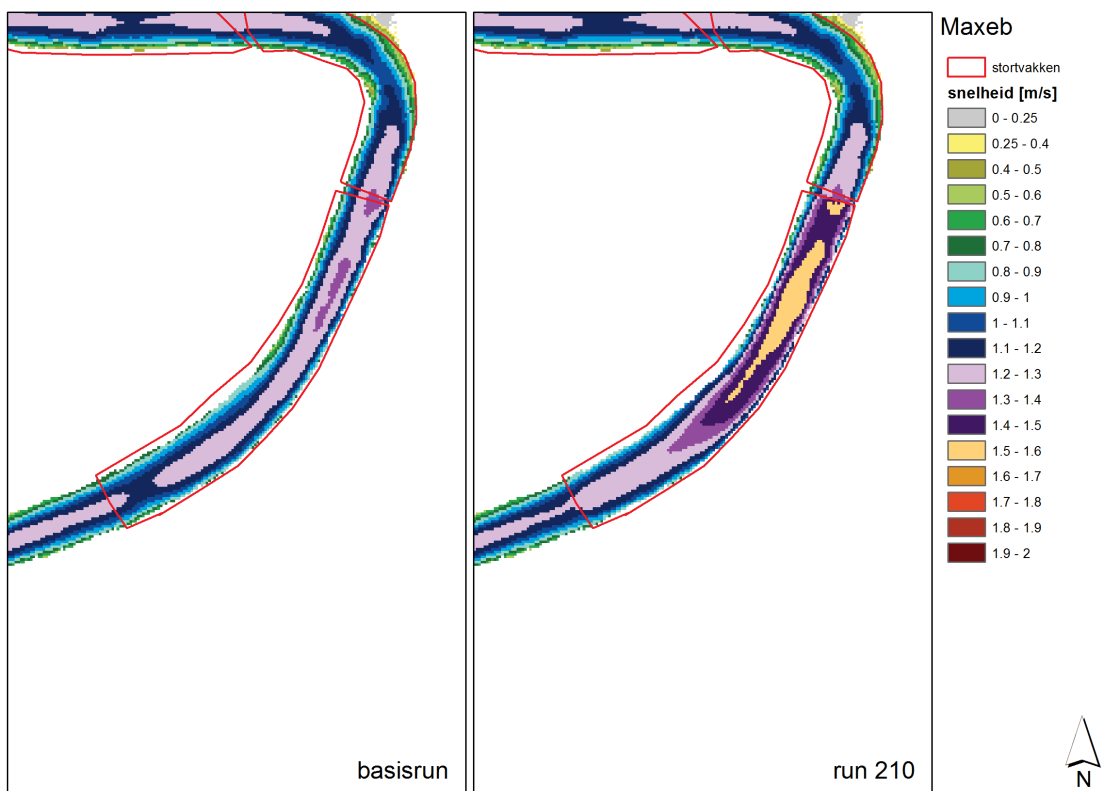
Figuur A 40 – Maximum ebsnelheid voor basisrun (links) en voor run zsc207 (rechts): Oosterweel - 4 Mm³



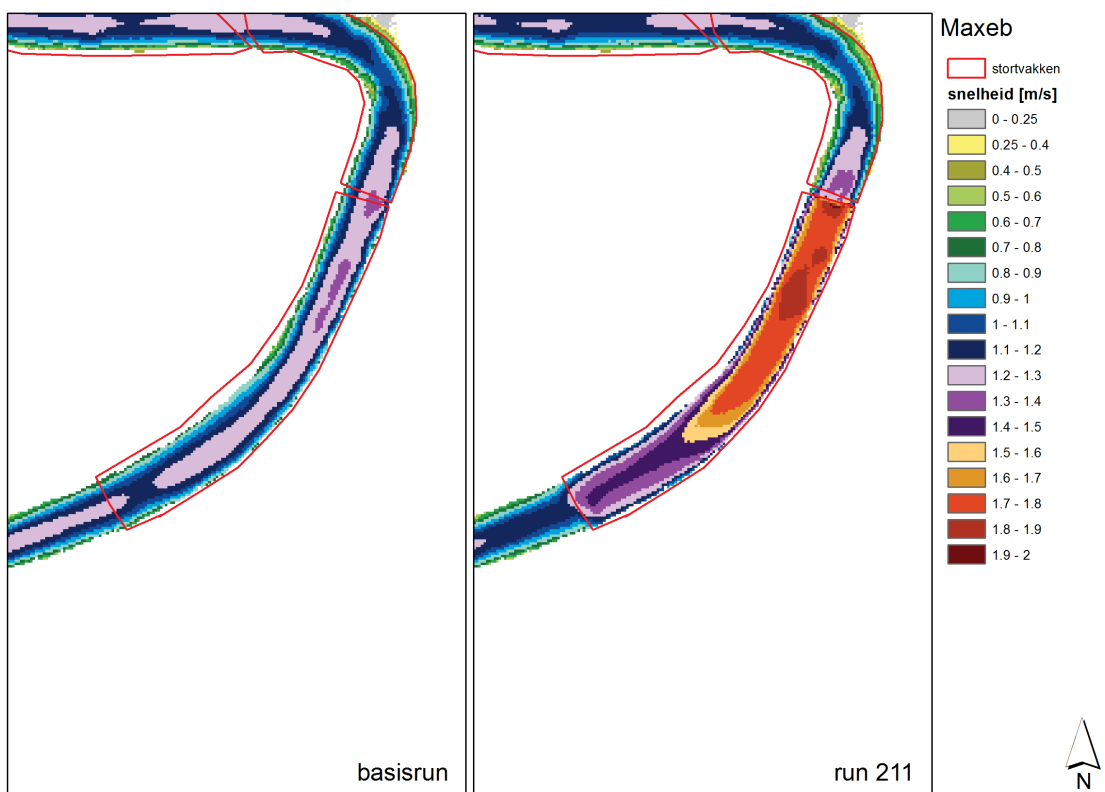
Figuur A 41 – Maximum ebsnelheid voor basisrun (links) en voor run zsc208 (rechts): Royerssluis - 2 Mm³



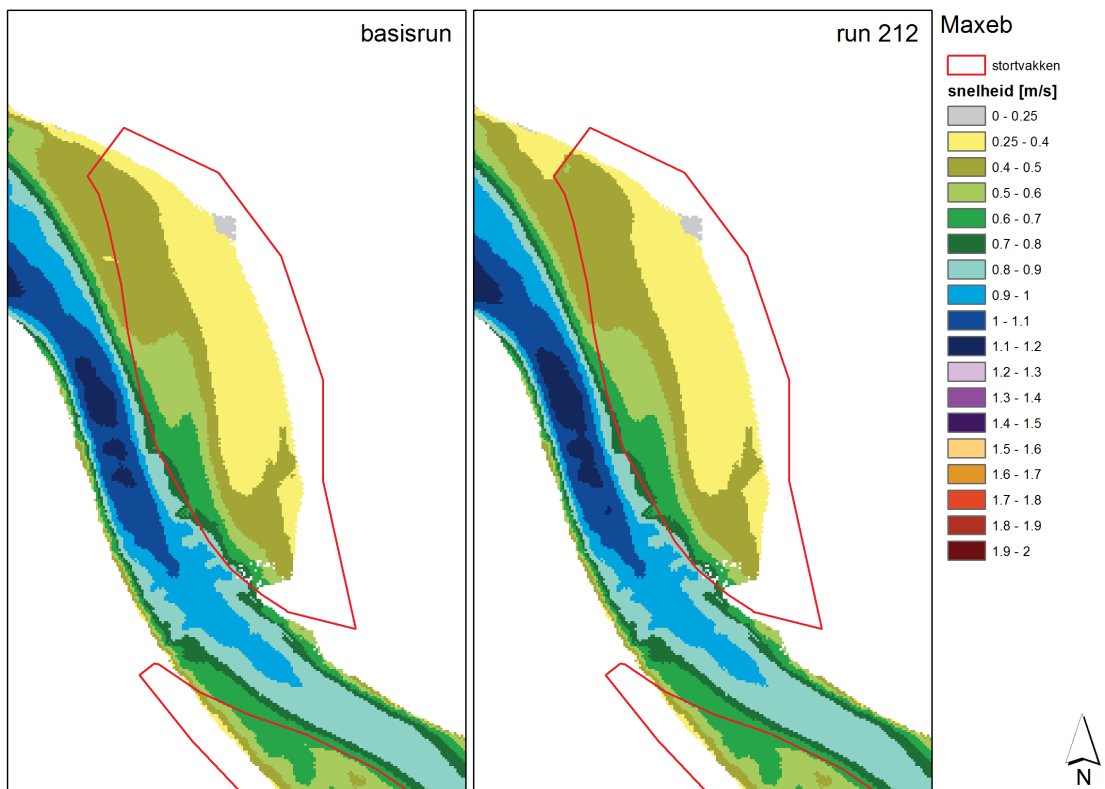
Figuur A 42 – Maximum ebsnelheid voor basisrun (links) en voor run zsc209 (rechts): Royerssluis - 4 Mm³



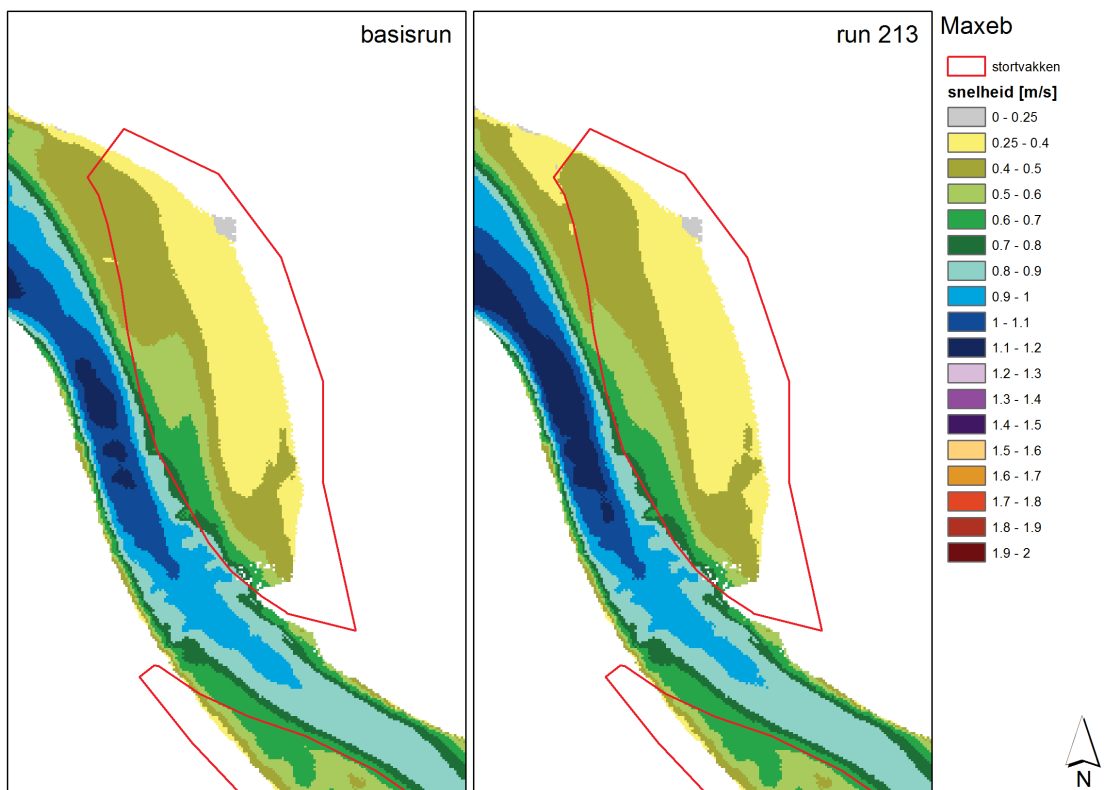
Figuur A 43 – Maximum ebsnelheid voor basisrun (links) en voor run zsc210 (rechts): Rede van Antwerpen - 2 Mm³



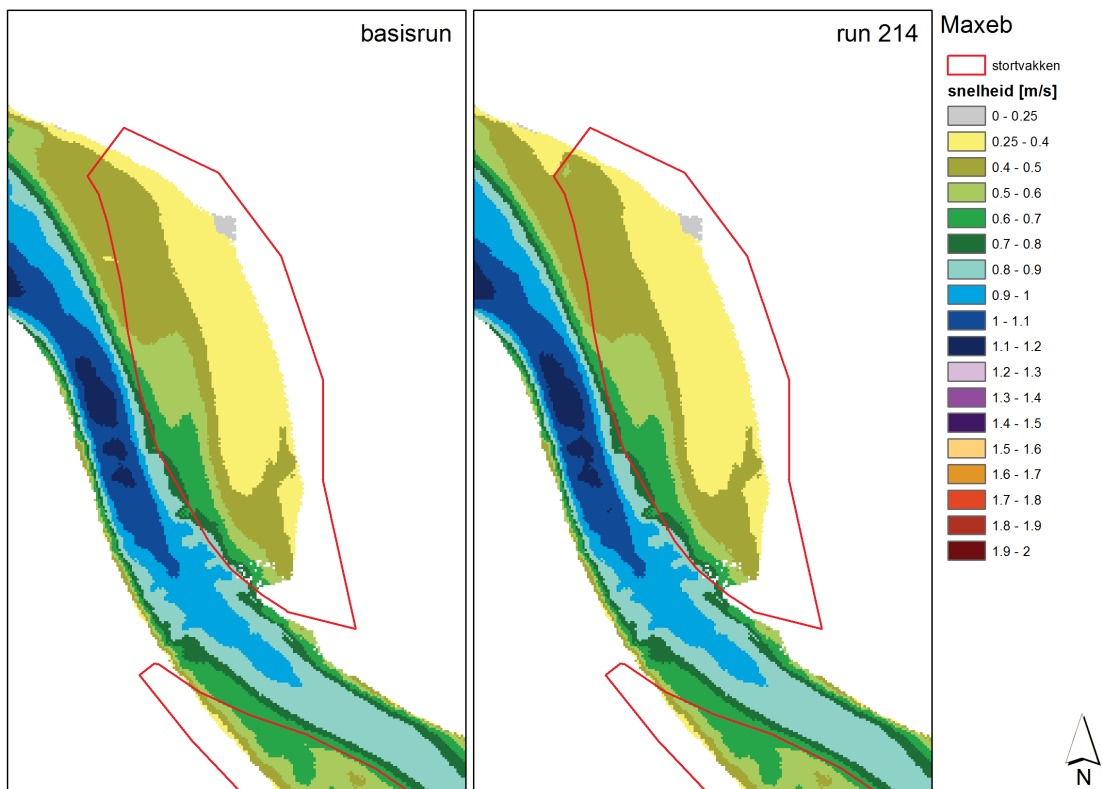
Figuur A 44 – Maximum ebsnelheid voor basisrun (links) en voor run zsc211 (rechts): Rede van Antwerpen - 4 Mm³



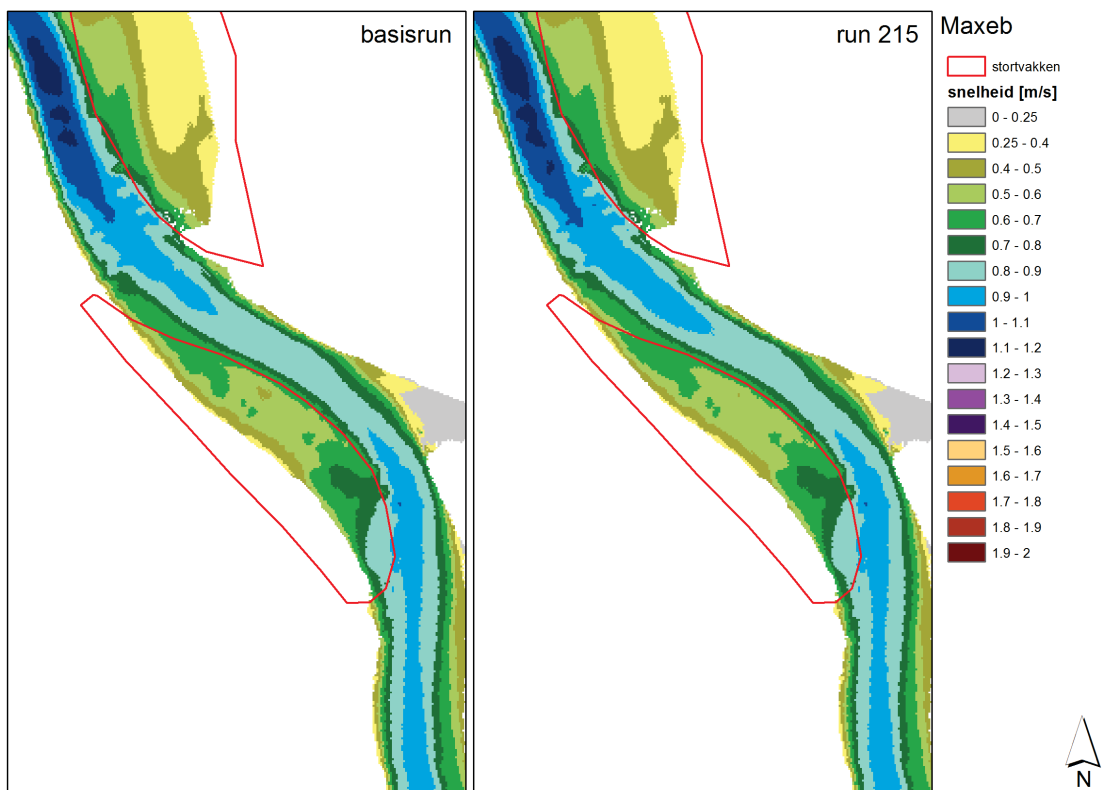
Figuur A 45 – Maximum ebsnelheid voor basisrun (links) en voor run zsc212 (rechts): Appelzak - 2 Mm³



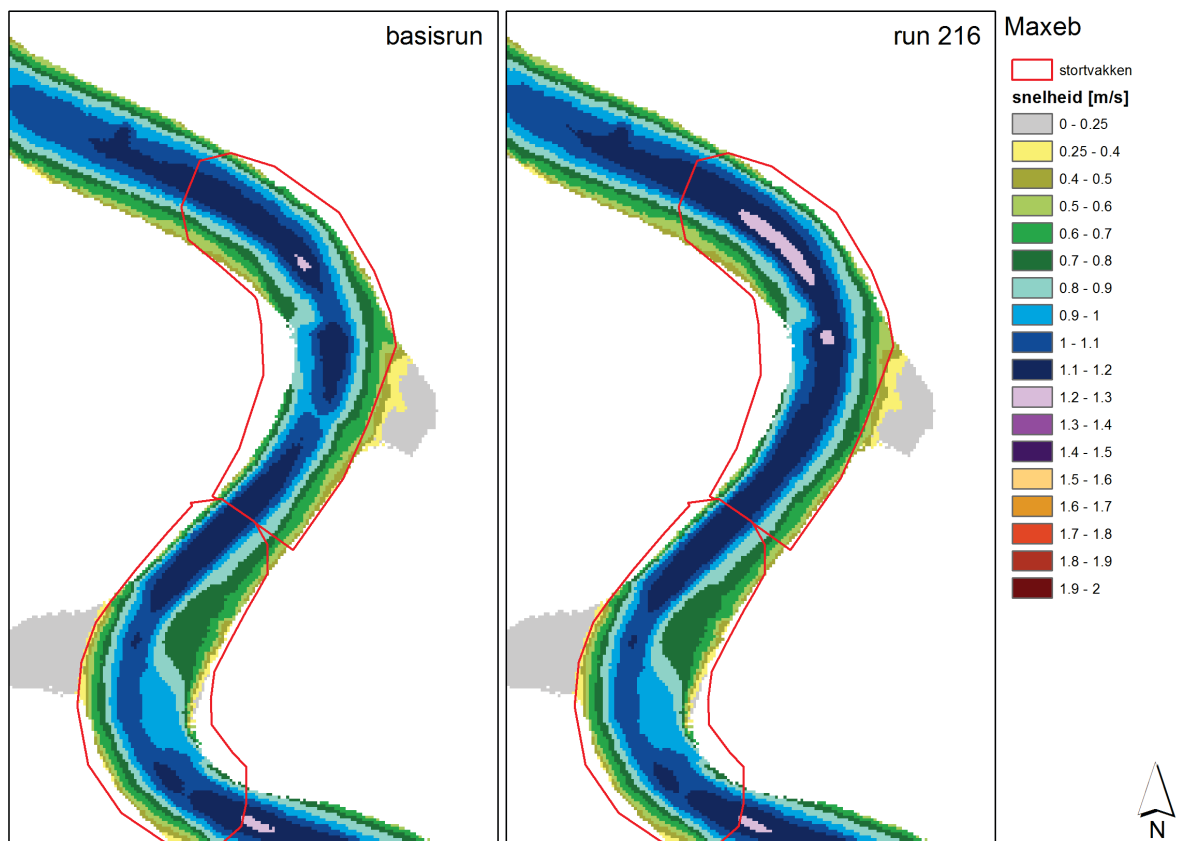
Figuur A 46 – Maximum ebsnelheid voor basisrun (links) en voor run zsc213 (rechts): Appelzak - 4 Mm³



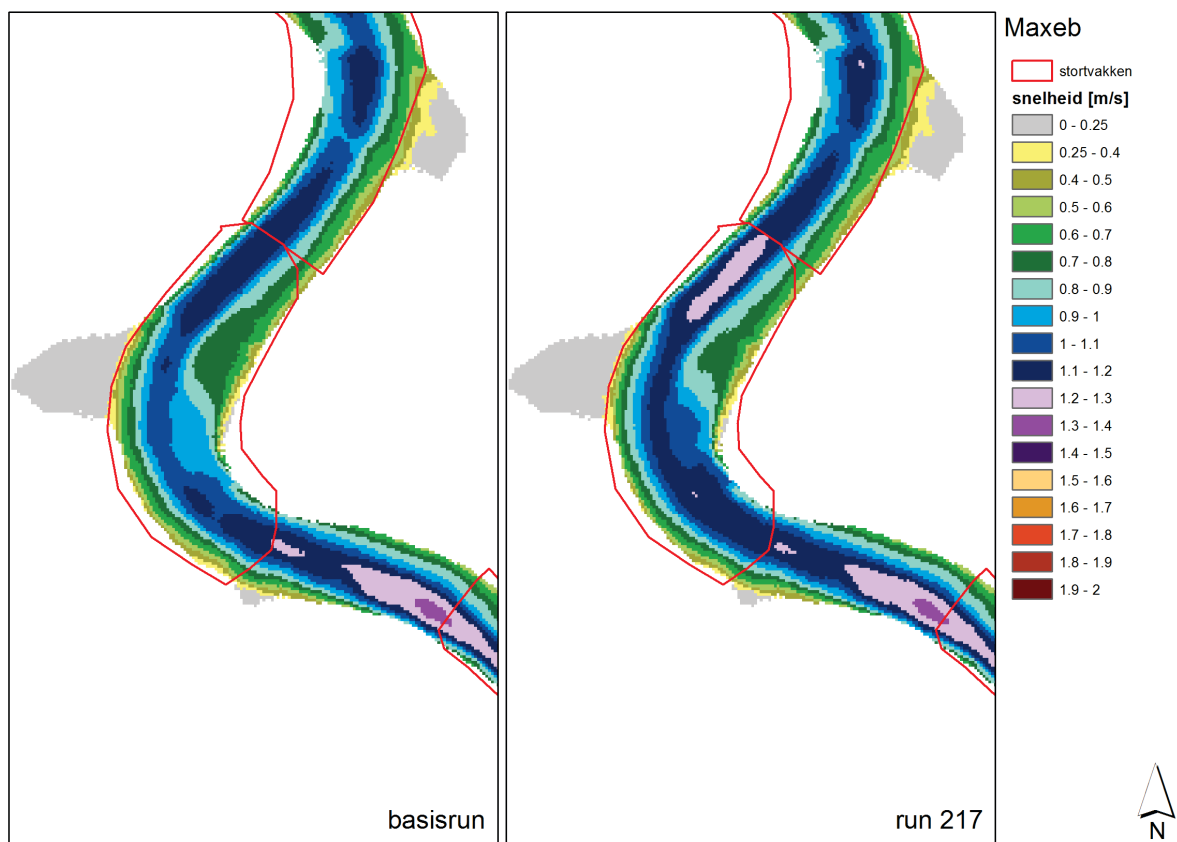
Figuur A 47 – Maximum ebsnelheid voor basisrun (links) en voor run zsc214 (rechts): Appelsak - 1 Mm³



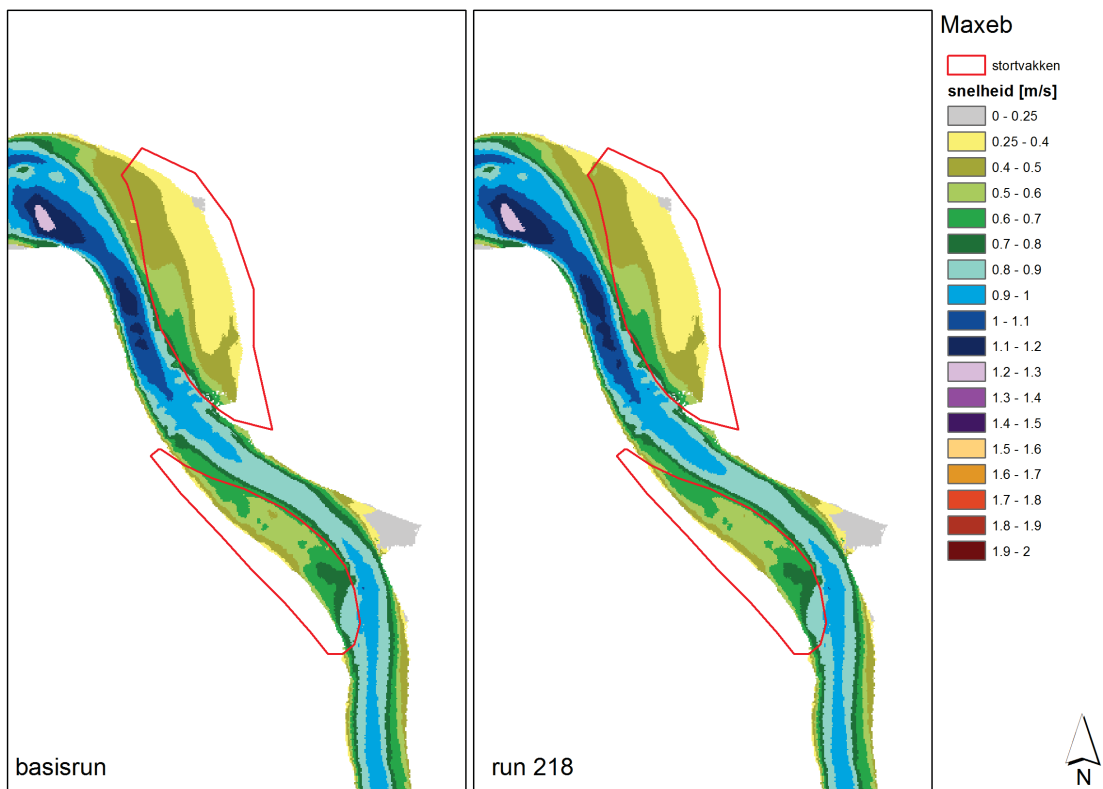
Figuur A 48 – Maximum ebsnelheid voor basisrun (links) en voor run zsc215 (rechts): Schaar Ouden Doel - 1 Mm³



Figuur A 49 – Maximum ebsnelheid voor basisrun (links) en voor run zsc216 (rechts): Ketelputten - 1 Mm³

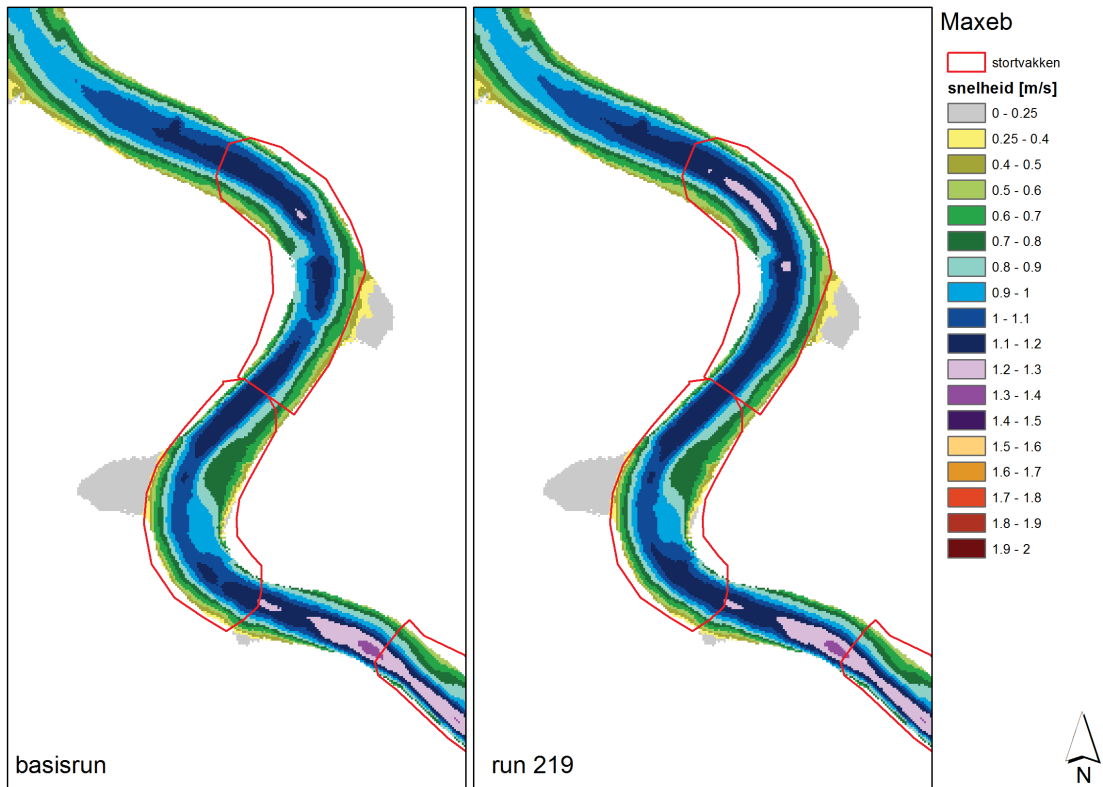


Figuur A 50 – Maximum ebsnelheid voor basisrun (links) en voor run zsc217 (rechts): Kallosluis 1 Mm³



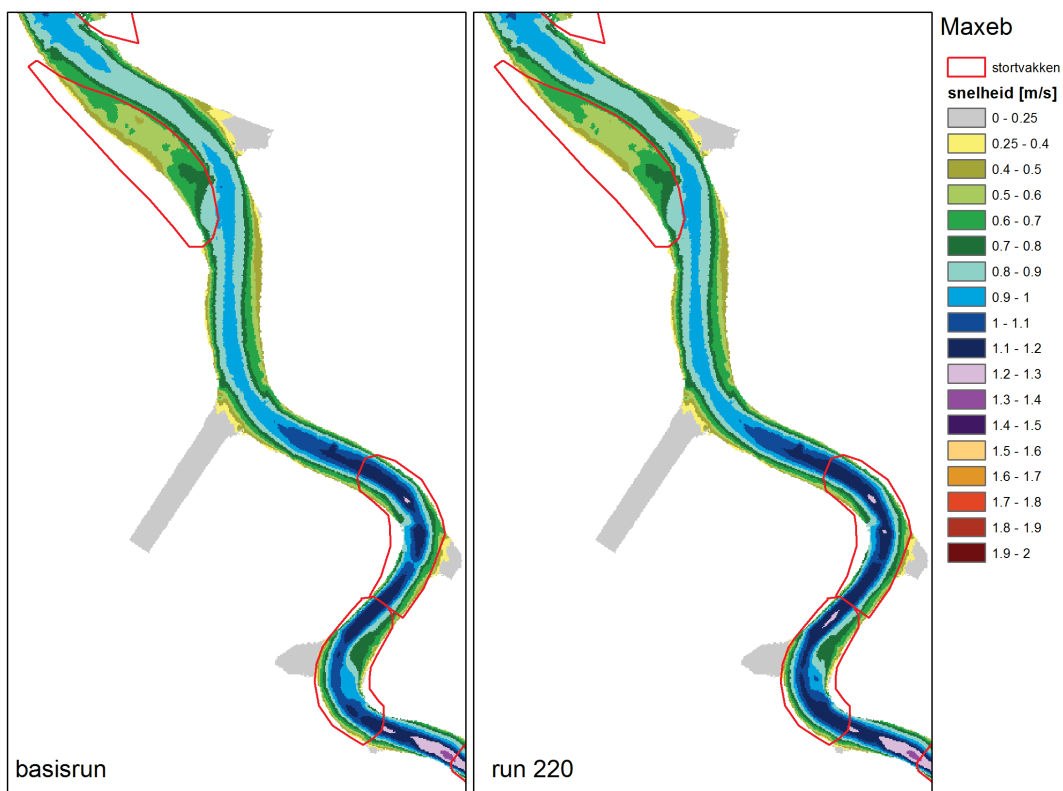
Figuur A 51 – Maximum ebsnelheid voor basisrun (links) en voor run zsc218 (rechts): Appelzak - 1 Mm³

Schaar Ouden Doel - 1 Mm³

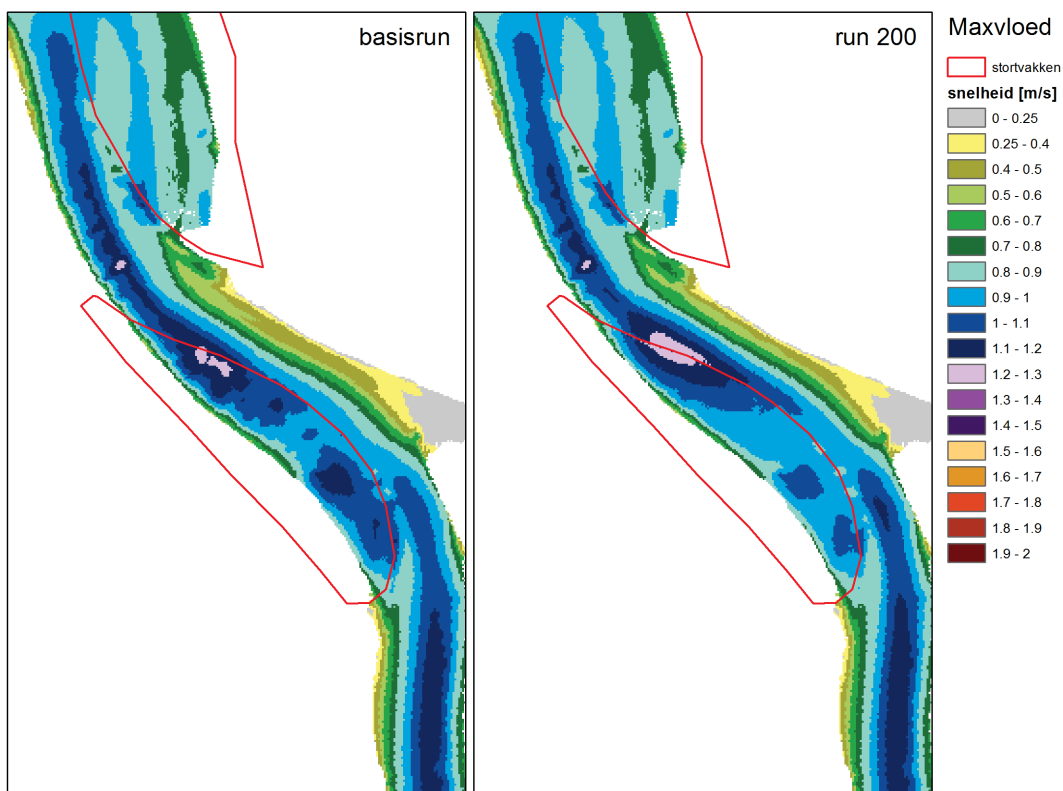


Figuur A 52 – Maximum ebsnelheid voor basisrun (links) en voor run zsc219 (rechts): Ketelputten - 1 Mm³

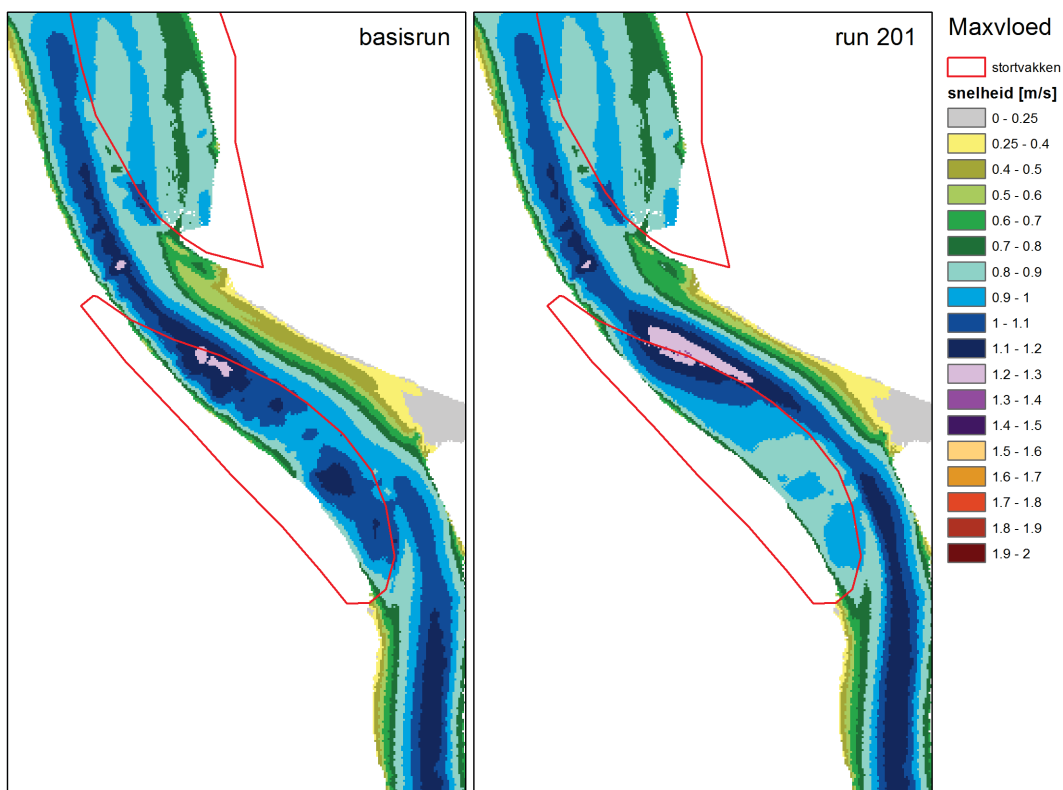
Kallosluis - 1 Mm³



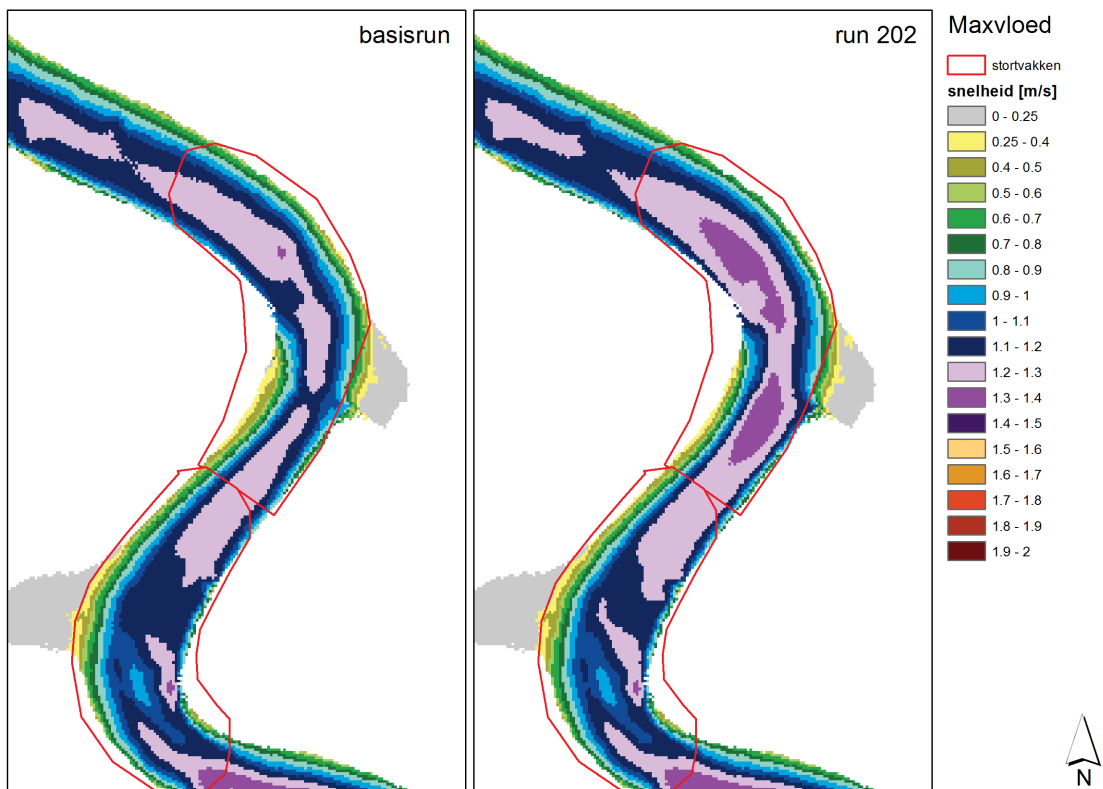
Figuur A 53 – Maximum ebsnelheid voor basisrun (links) en voor run zsc220 (rechts) Schaar Ouden Doel - 1 Mm³, Ketelputten - 0,5 Mm³ en Kallosluis - 0,5 Mm³



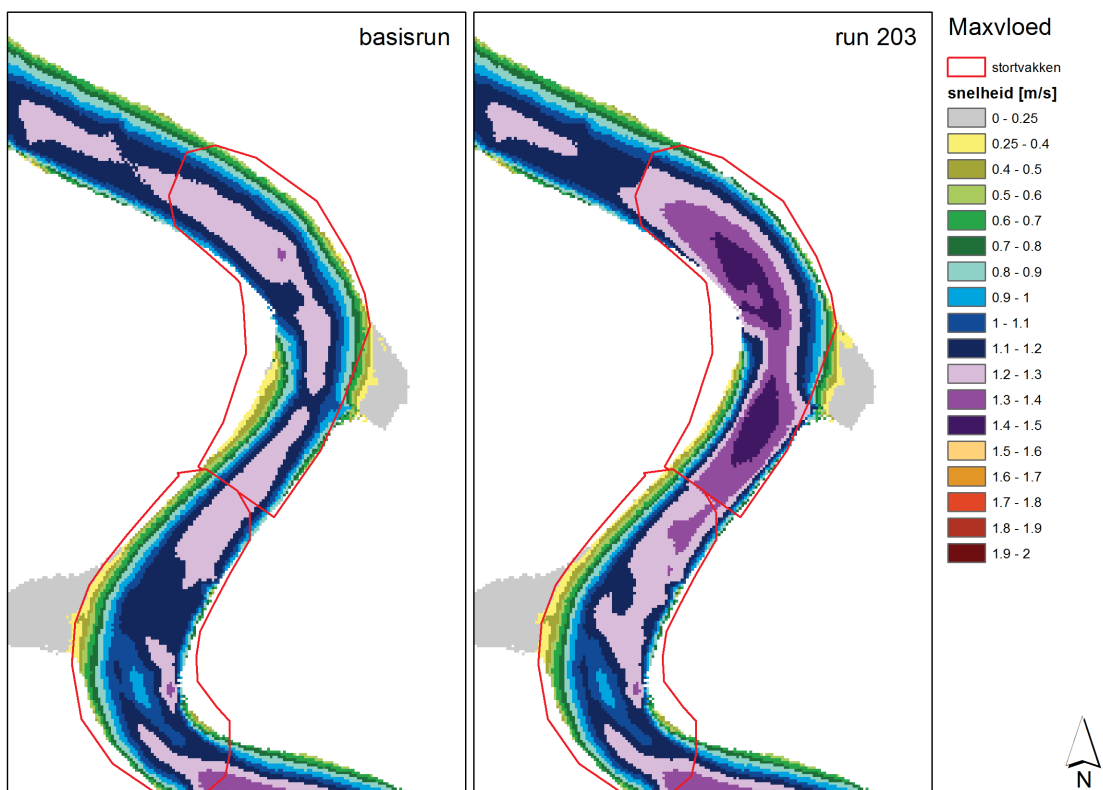
Figuur A 54 – Maximum vloedsnellheid voor basisrun (links) en voor run zsc200 (rechts): Schaar Ouden Doel - 2 Mm³



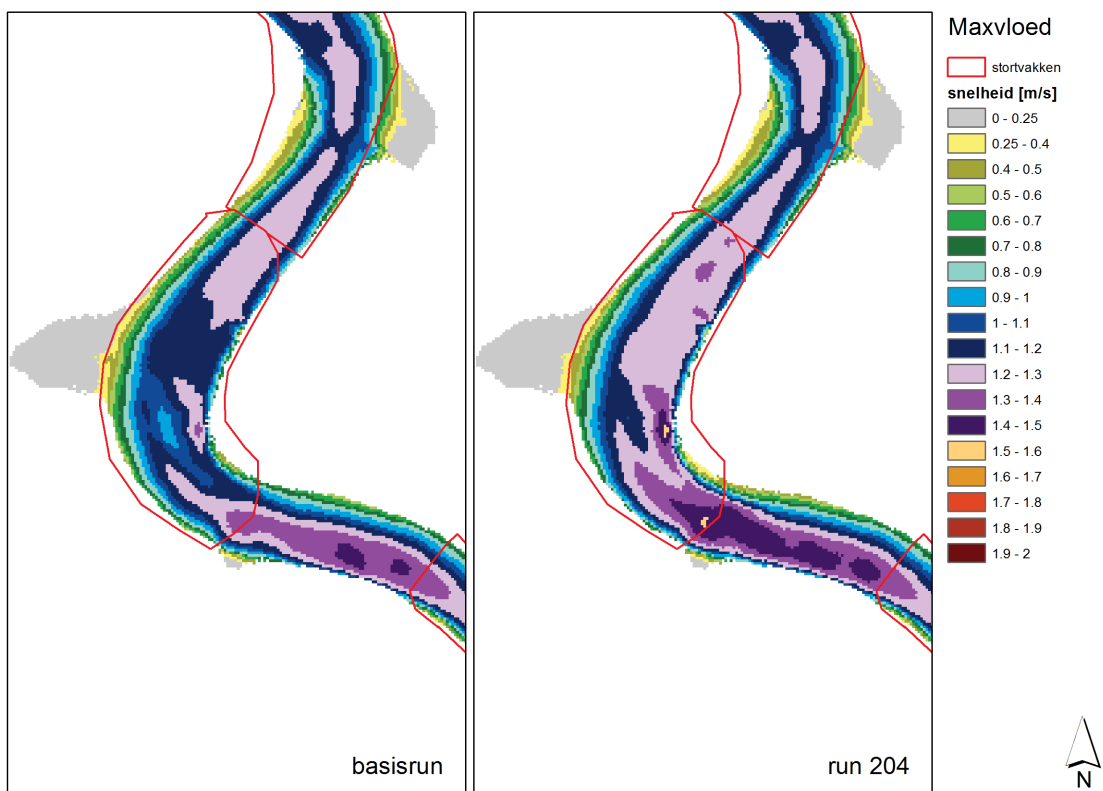
Figuur A 55 – Maximum vloedsnellheid voor basisrun (links) en voor run zsc201 (rechts): Schaar Ouden Doel - 4 Mm³



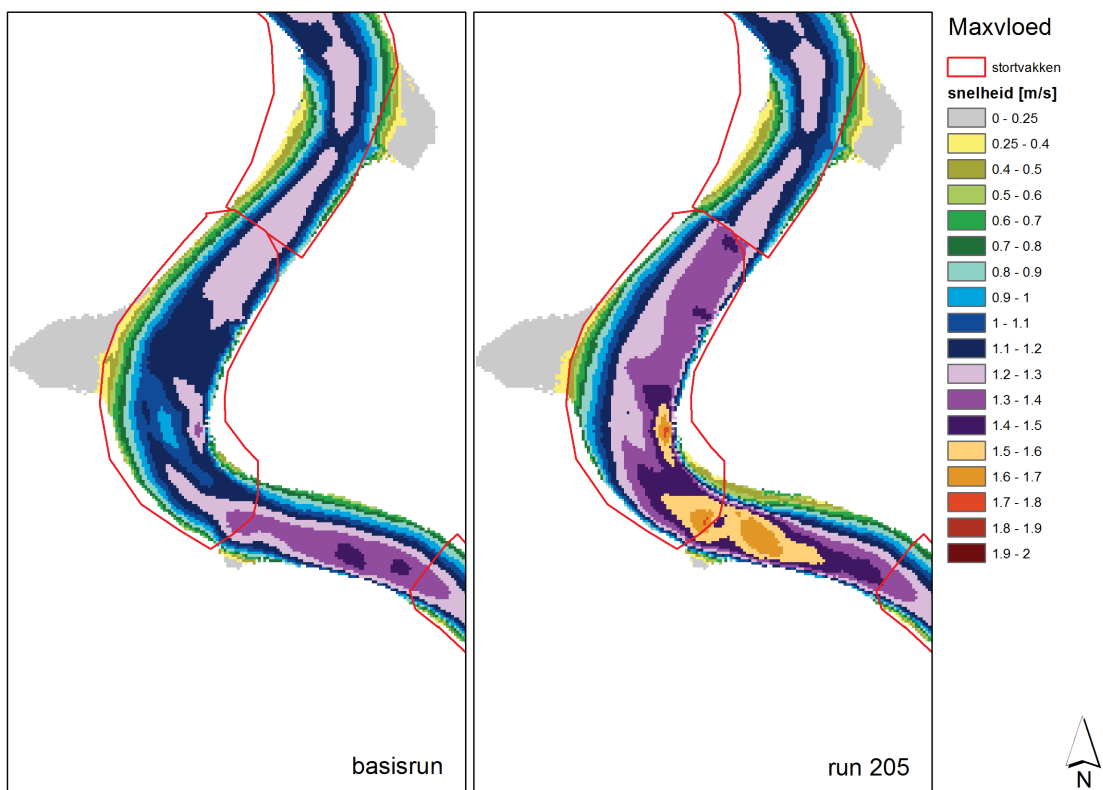
Figuur A 56 – Maximum vloednelheid voor basisrun (links) en voor run zsc202 (rechts): Ketelputten - 2 Mm³



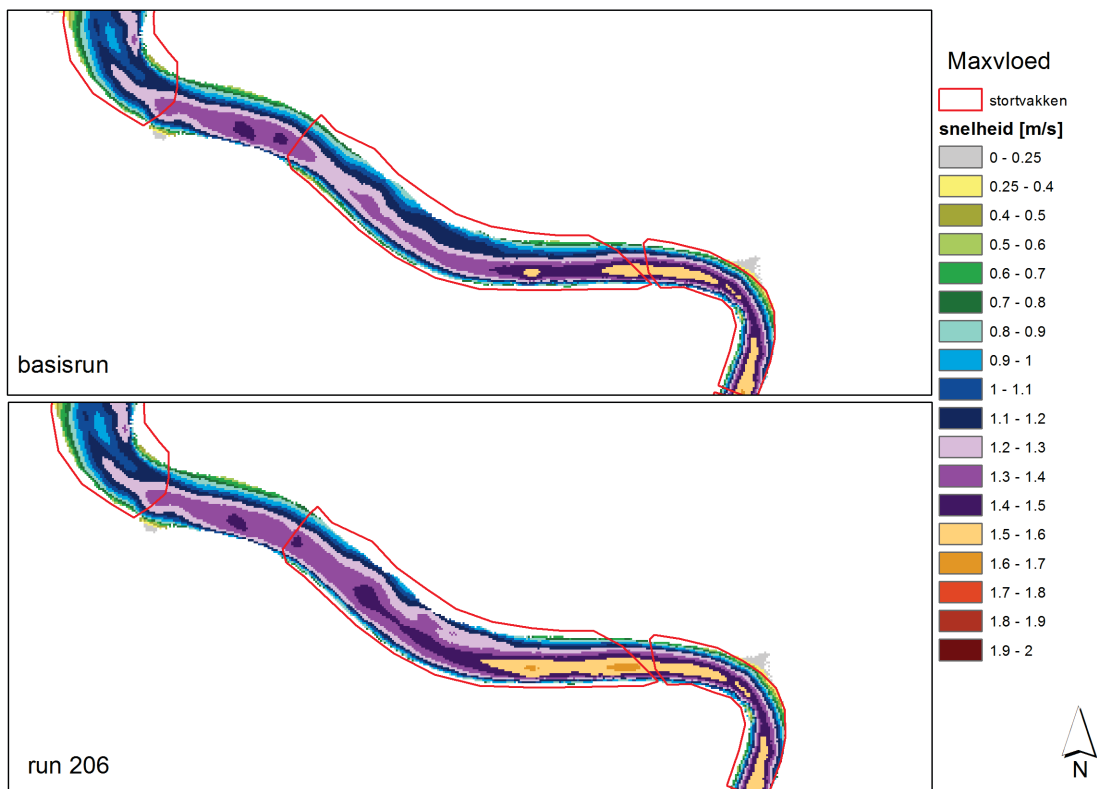
Figuur A 57 – Maximum vloednelheid voor basisrun (links) en voor run zsc203 (rechts): Ketelputten - 4 Mm³



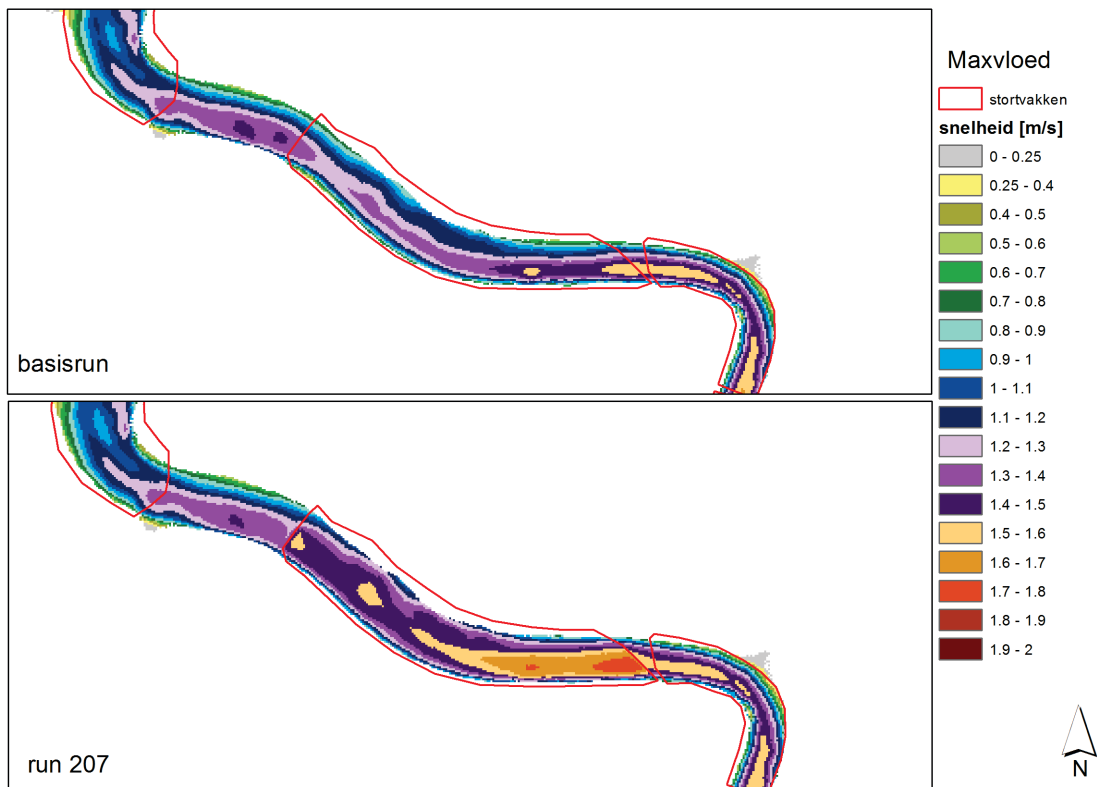
Figuur A 58 – Maximum vloednelheid voor basisrun (links) en voor run zsc204 (rechts): Kallosluis - 2 Mm³



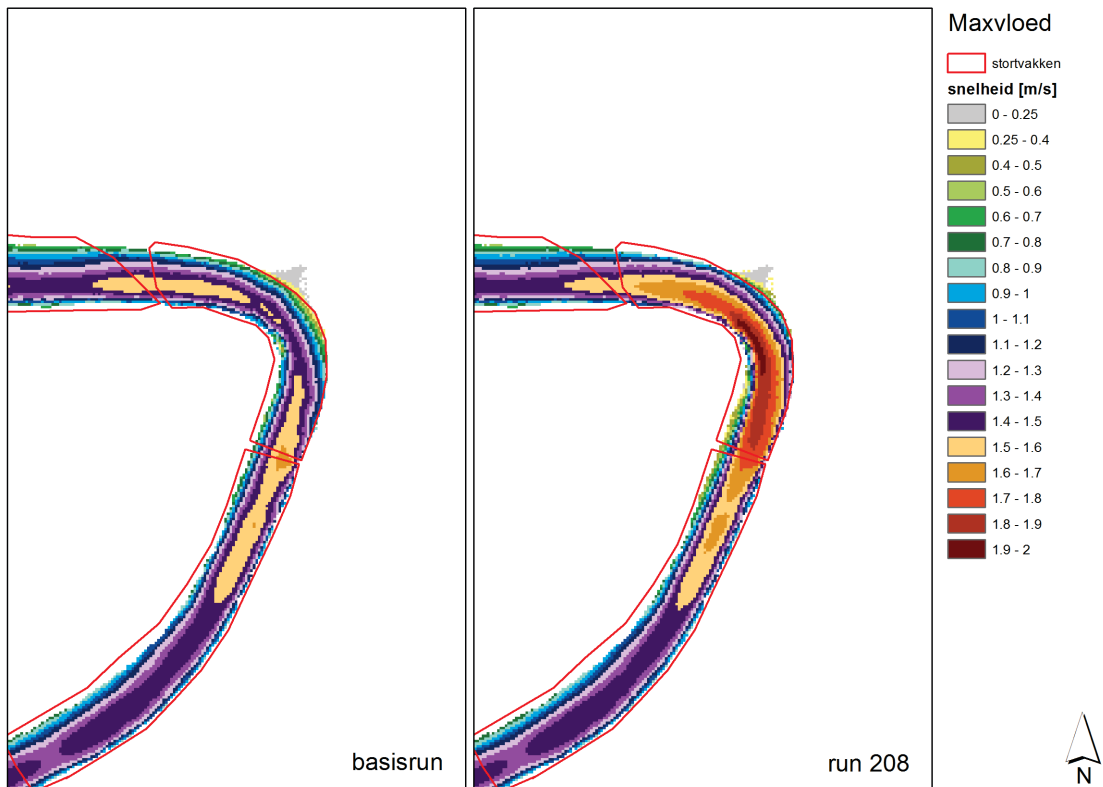
Figuur A 59 – Maximum vloednelheid voor basisrun (links) en voor run zsc205 (rechts): Kallosluis - 4 Mm³



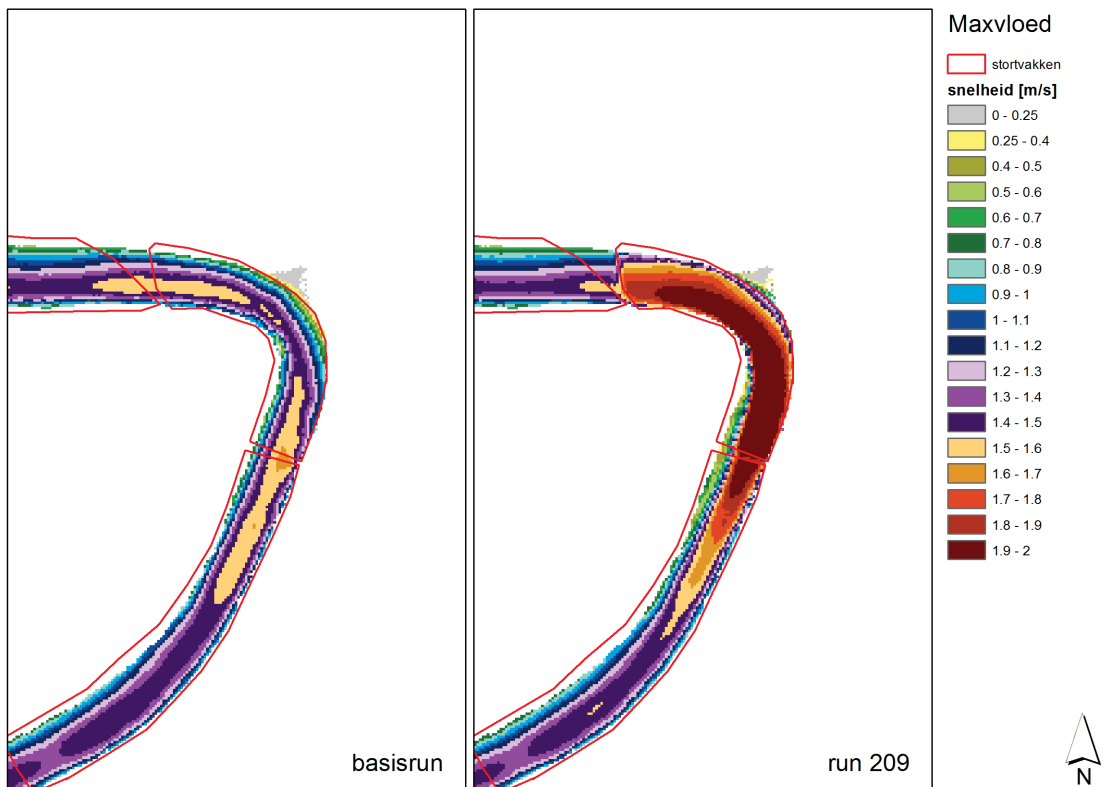
Figuur A 60 – Maximum vloedsneldheid voor basisrun (links) en voor run zsc206 (rechts): Oosterweel - 2 Mm³



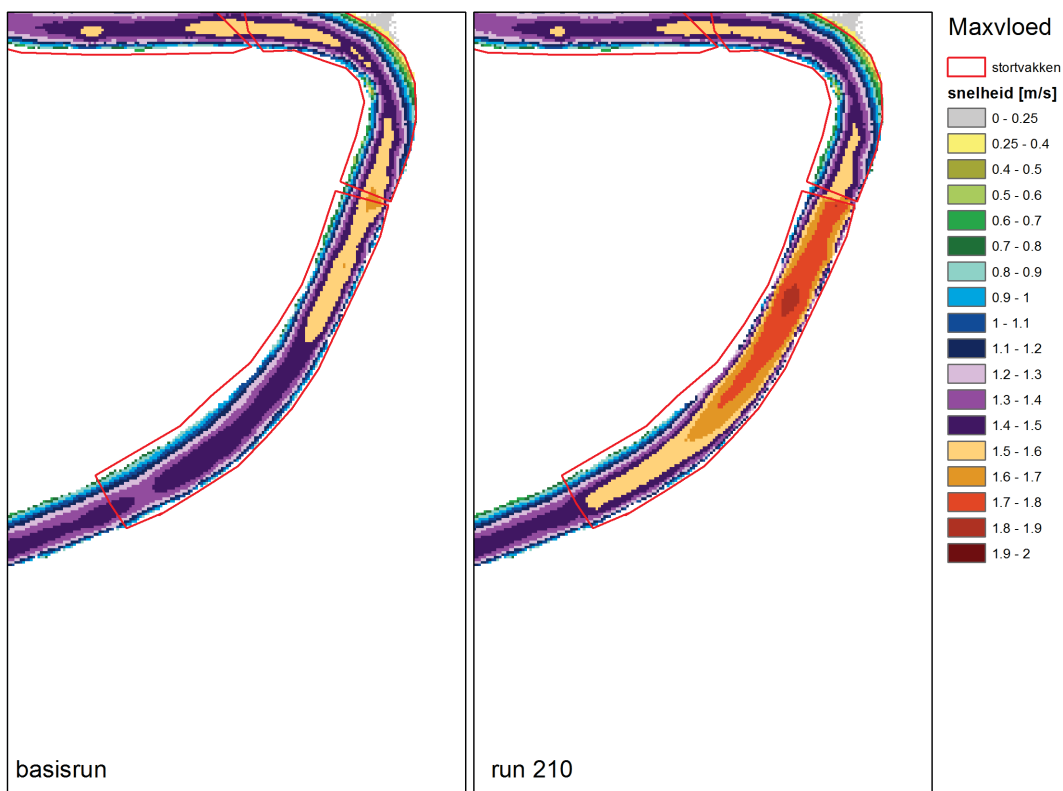
Figuur A 61 – Maximum vloedsneldheid voor basisrun (links) en voor run zsc207 (rechts): Oosterweel - 4 Mm³



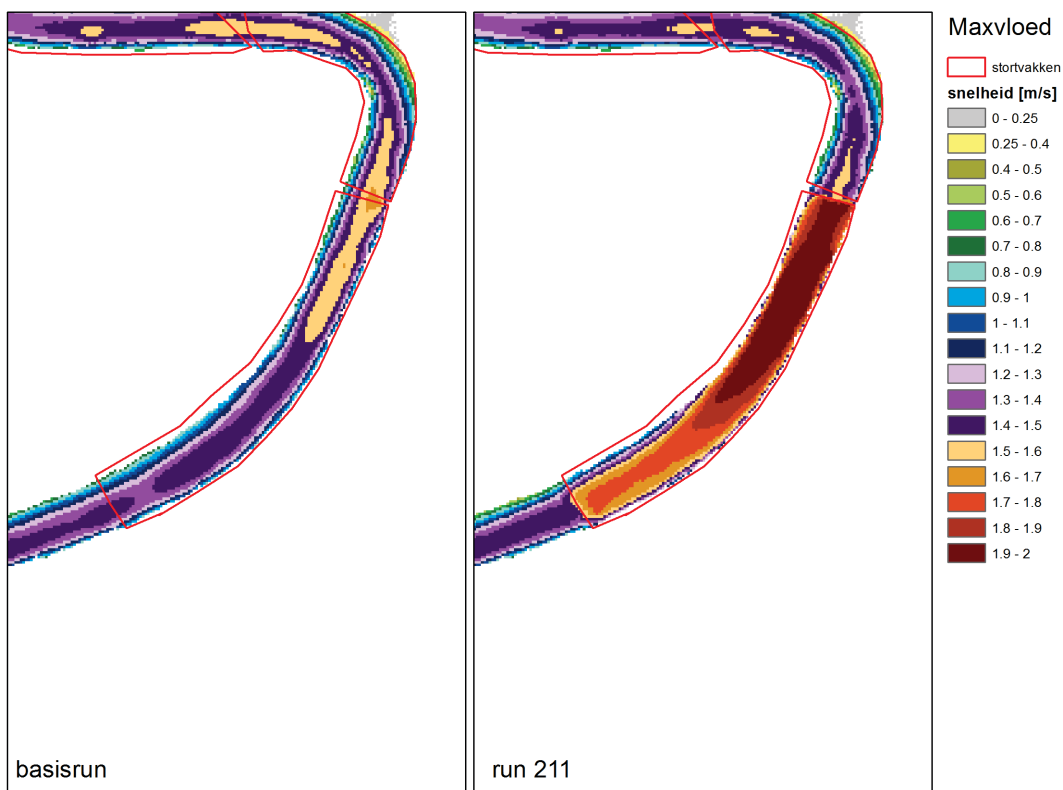
Figuur A 62 – Maximum vloedingsnelheid voor basisrun (links) en voor run zsc208 (rechts): Rooyersluis - 2 Mm³



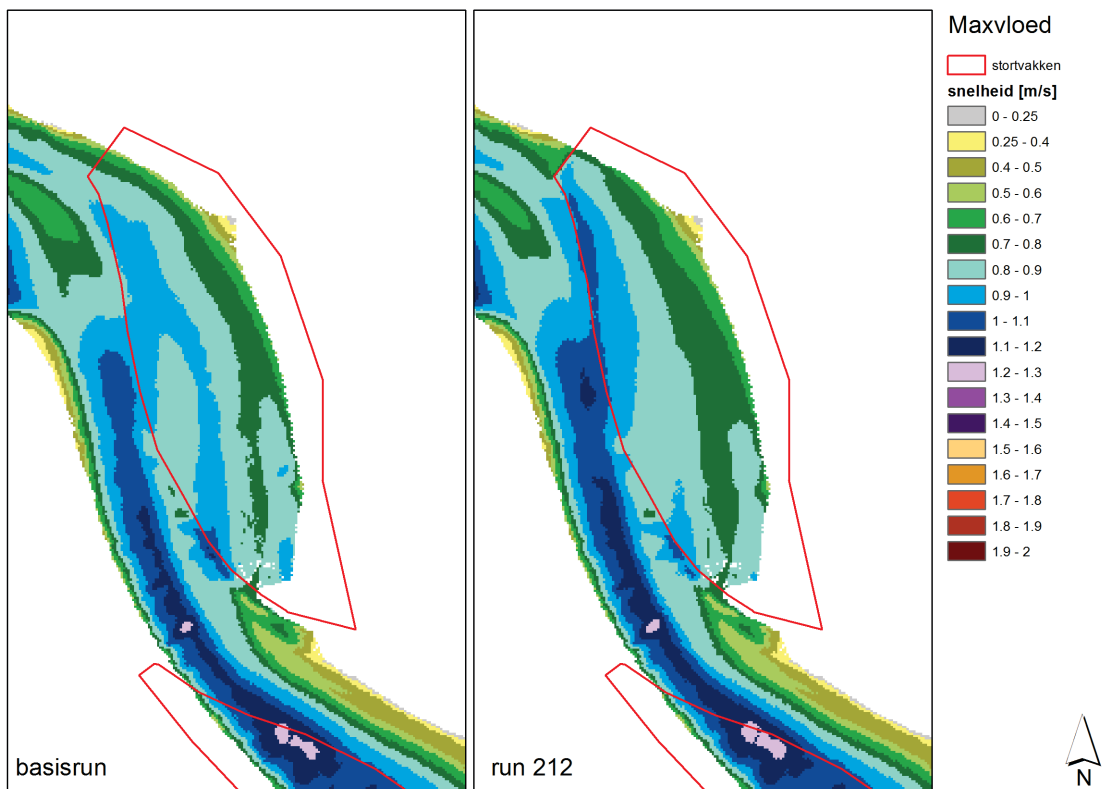
Figuur A 63 – Maximum vloedingsnelheid voor basisrun (links) en voor run zsc209 (rechts): Rooyersluis - 4 Mm³



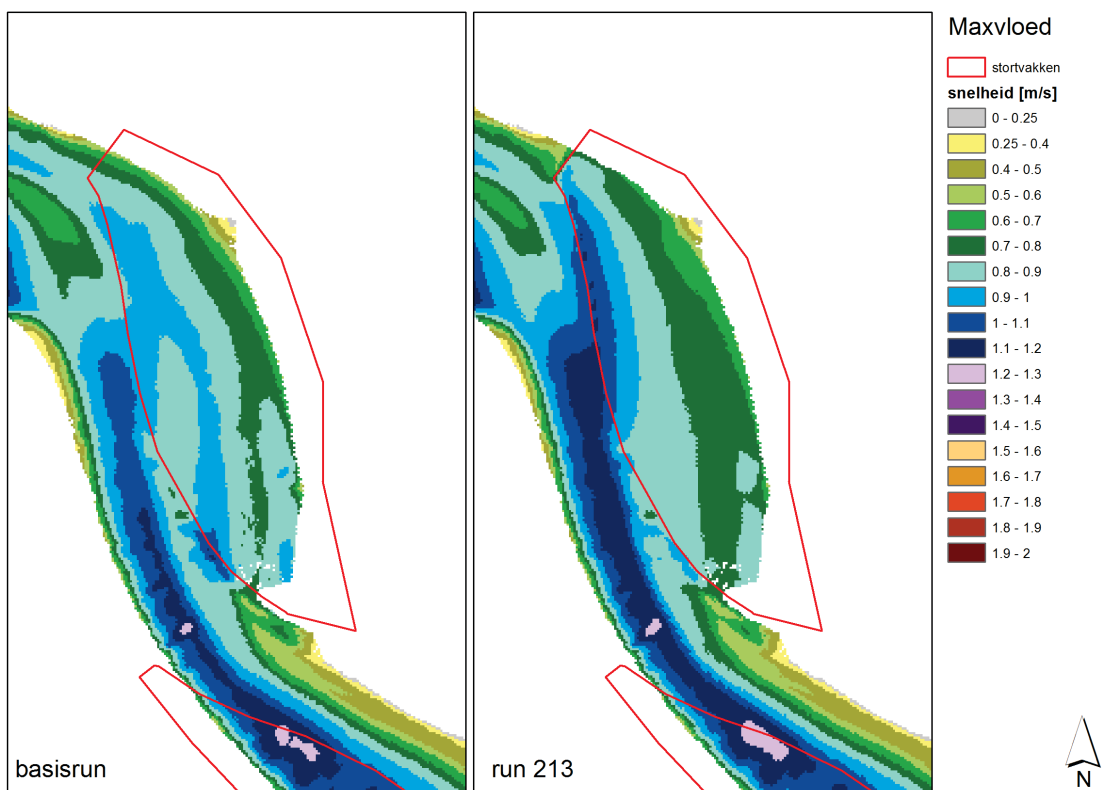
Figuur A 64 – Maximum vloedsnellheid voor basisrun (links) en voor run zsc210 (rechts): Rede van Antwerpen - 2 Mm³



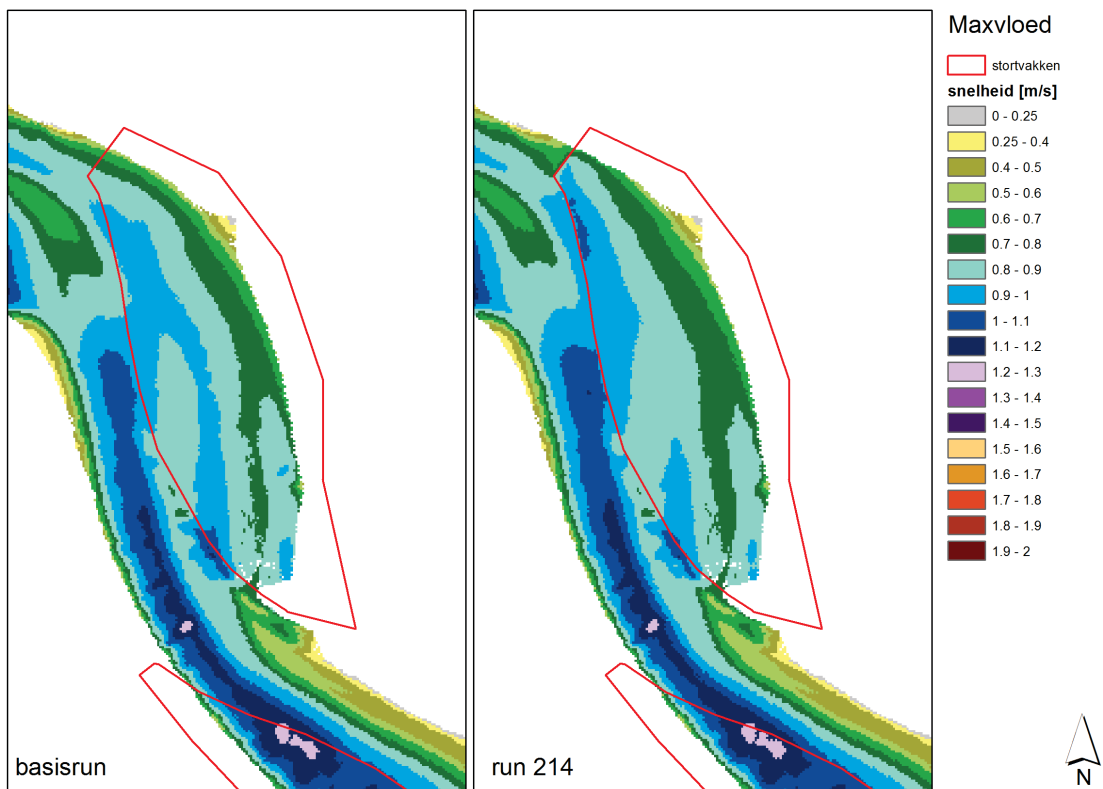
Figuur A 65 – Maximum vloedsnellheid voor basisrun (links) en voor run zsc211 (rechts): Rede van Antwerpen - 4 Mm³



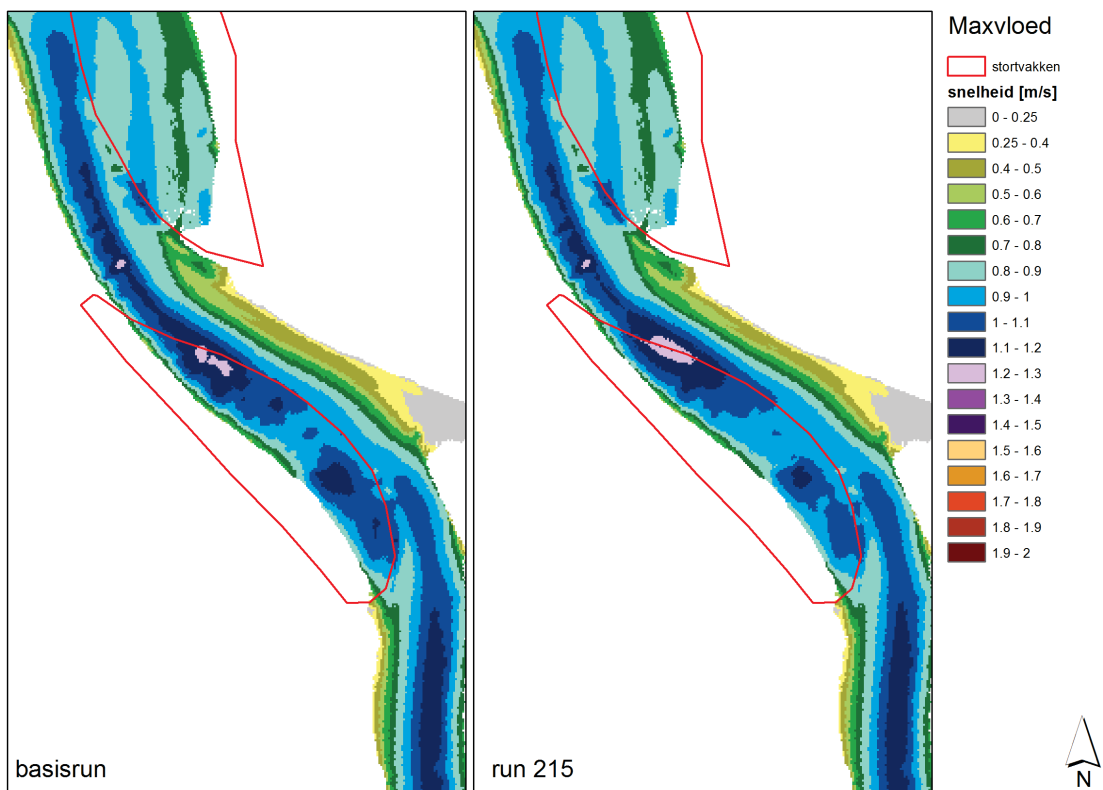
Figuur A 66 – Maximum vloednelheid voor basisrun (links) en voor run zsc212 (rechts): Appelzak - 2 Mm³



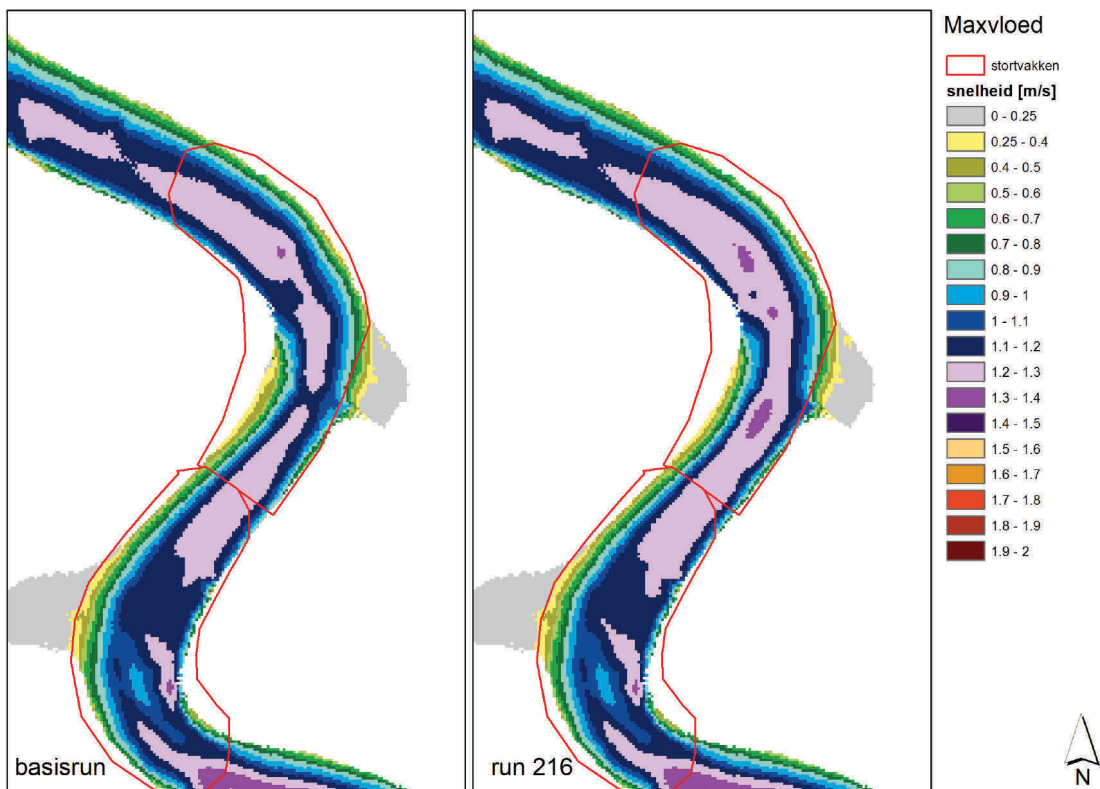
Figuur A 67 – Maximum vloednelheid voor basisrun (links) en voor run zsc213 (rechts): Appelzak - 4 Mm³



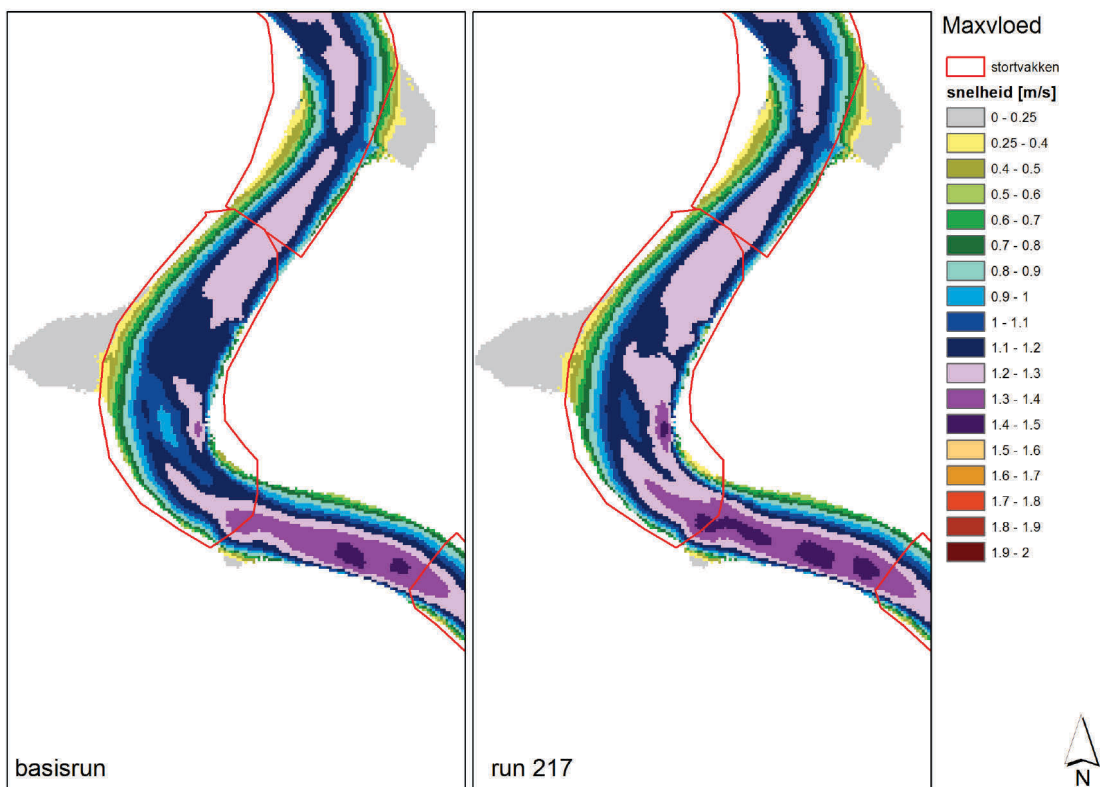
Figuur A 68 – Maximum vloednelheid voor basisrun (links) en voor run zsc214 (rechts): Appelzak - 1 Mm³



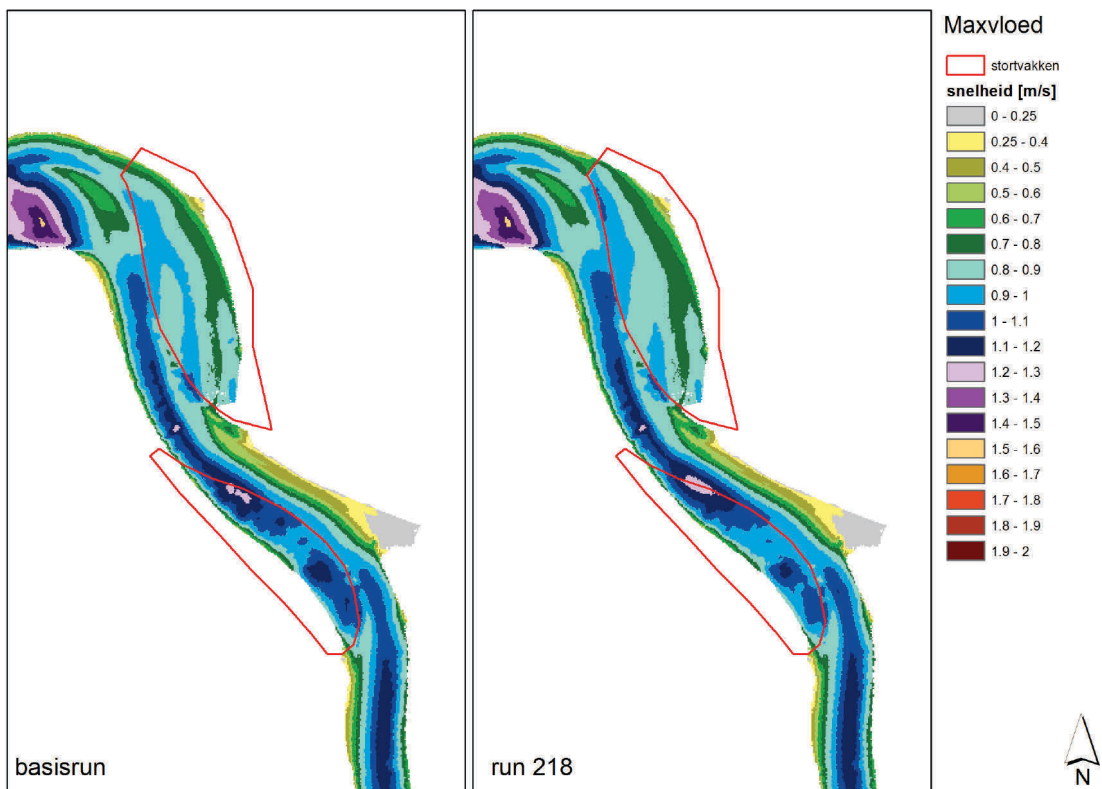
Figuur A 69 – Maximum vloednelheid voor basisrun (links) en voor run zsc215 (rechts): Schaar Ouden Doel - 1 Mm³



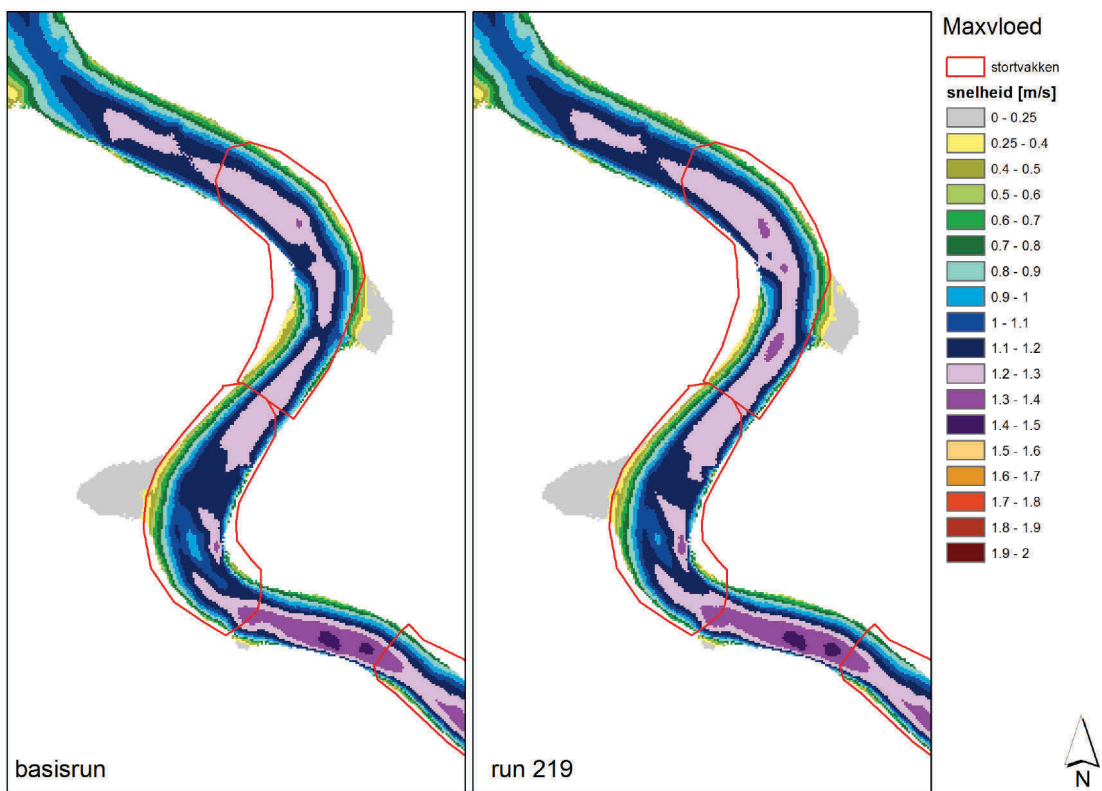
Figuur A 70 – Maximum vloednelheid voor basisrun (links) en voor run zsc216 (rechts): Ketelputten - 1 Mm³



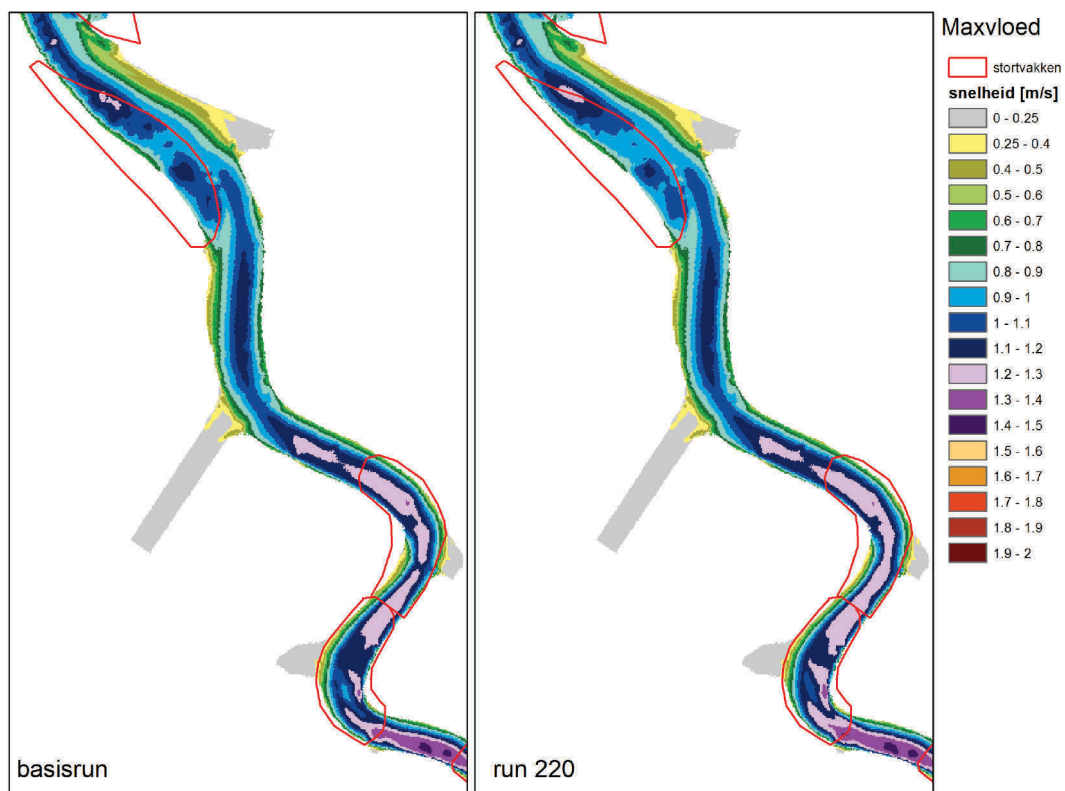
Figuur A 71 – Maximum vloednelheid voor basisrun (links) en voor run zsc217 (rechts): Kallosluis 1 Mm³



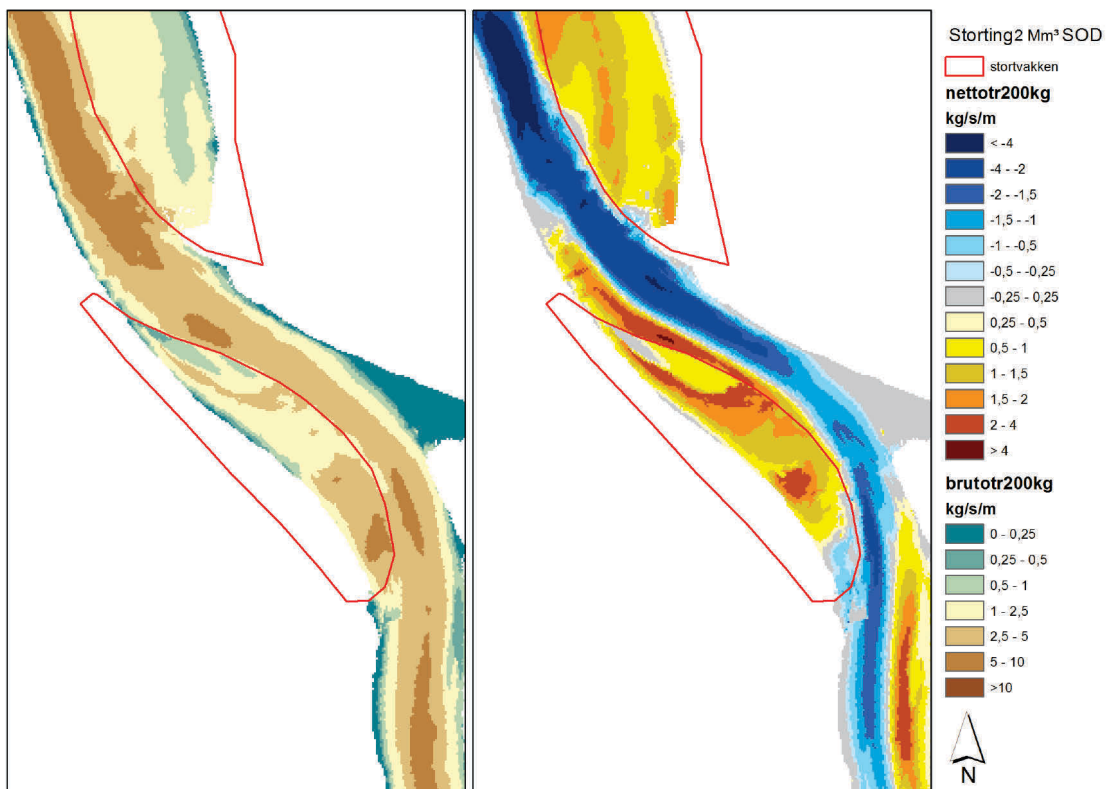
Figuur A 72 – Maximum vloednelheid voor basisrun (links) en voor run zsc218 (rechts): Appelzak - 1 Mm³
Schaar Ouden Doel - 1 Mm³



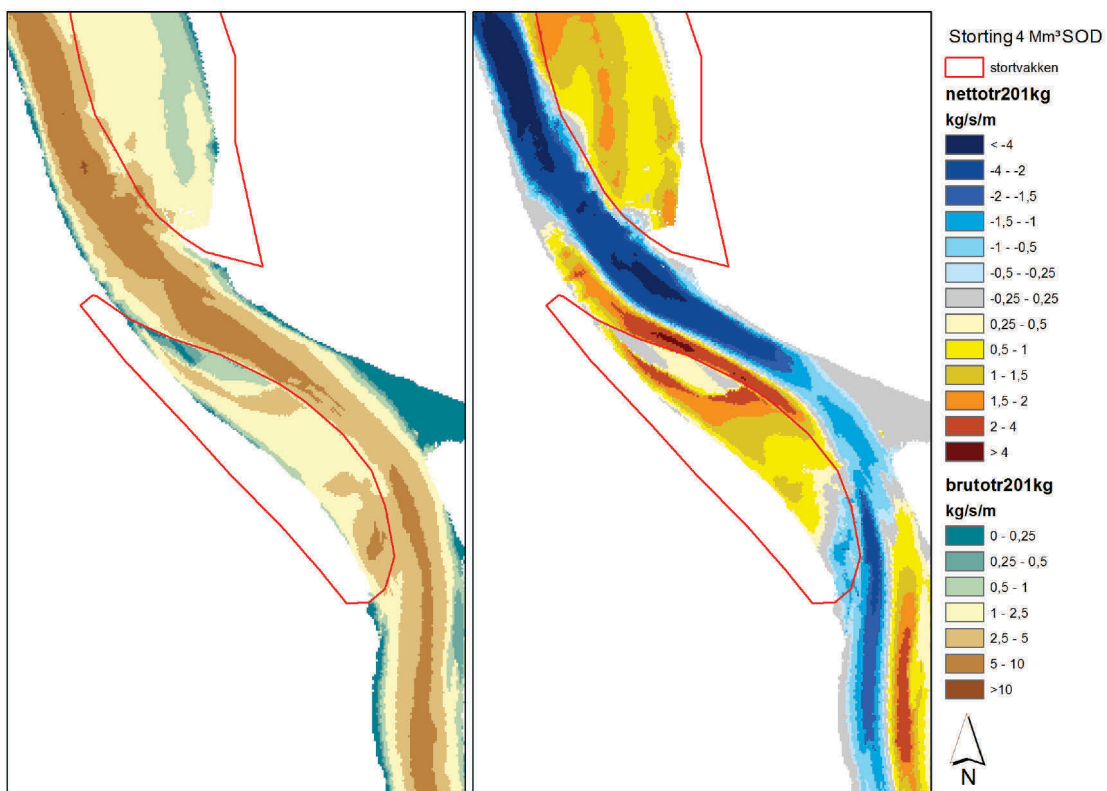
Figuur A 73 – Maximum vloednelheid voor basisrun (links) en voor run zsc219 (rechts): Ketelputten - 1 Mm³ en Kallosluis - 1 Mm³



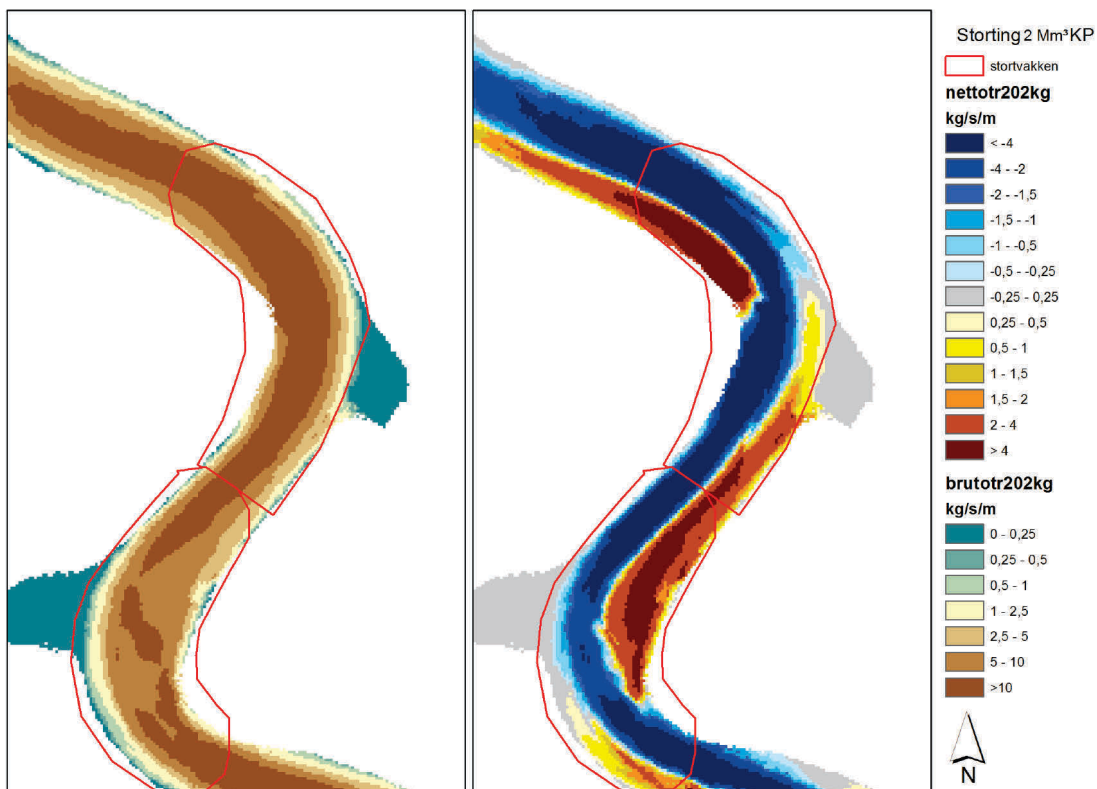
Figuur A 74 – Maximum vloed­snelheid voor basisrun (links) en voor run zsc220 (rechts): Schaar Ouden Doel - 1 Mm³, Ketelputten - 0,5 Mm³ en Kallosluis - 0,5 Mm³



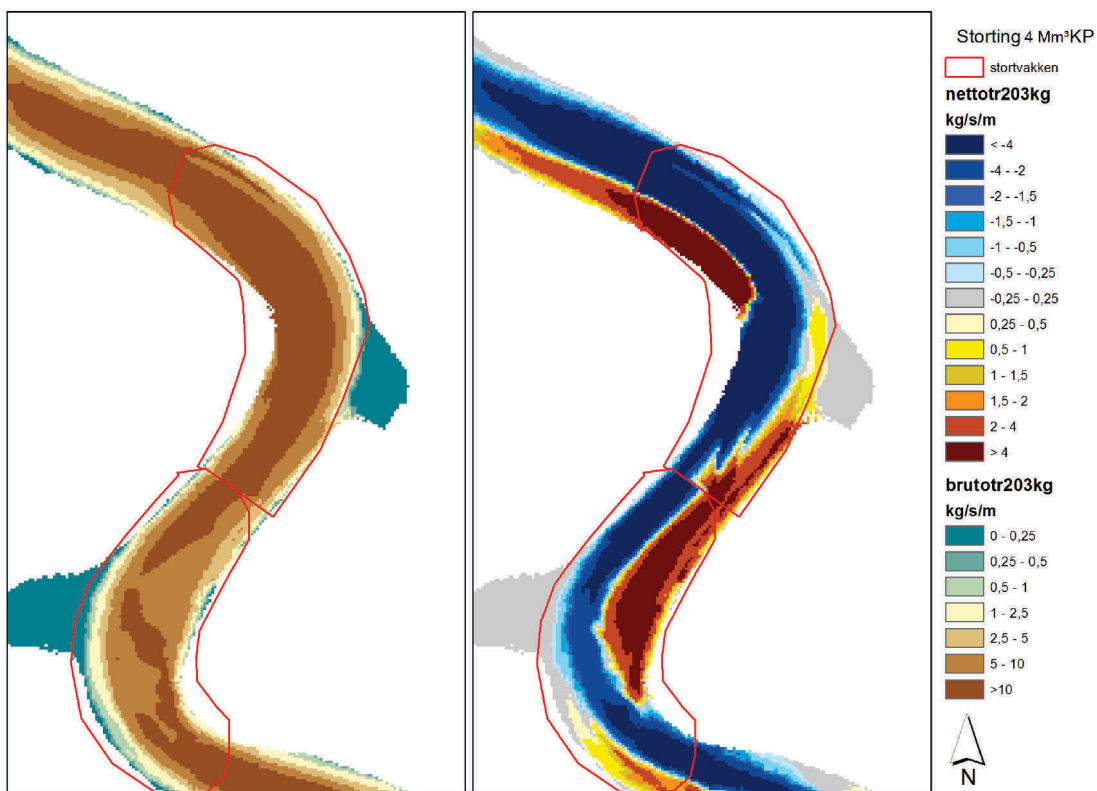
Figuur A 75 – Bruto transportcapaciteit (links) en Netto transportcapaciteit (rechts) voor run zsc200 ter hoogte van Schaar Ouden Doel



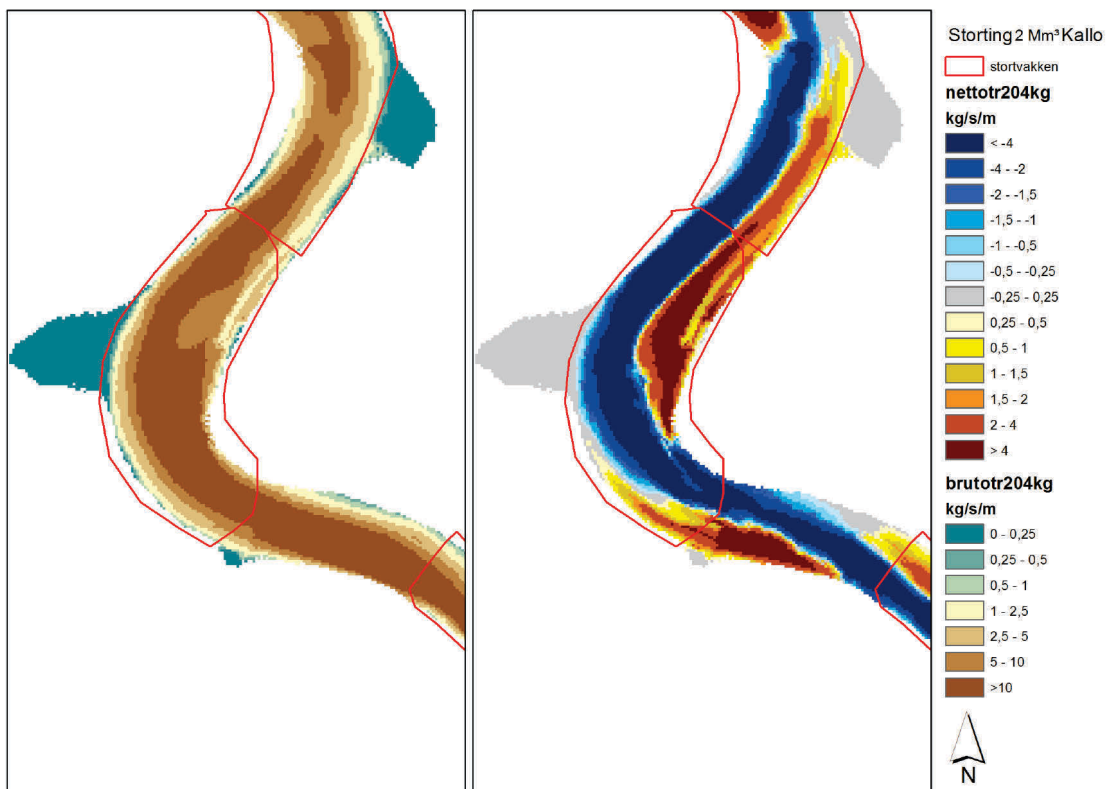
Figuur A 76 – Bruto transportcapaciteit (links) en Netto transportcapaciteit (rechts) voor run zsc201 ter hoogte van Schaar Ouden Doel



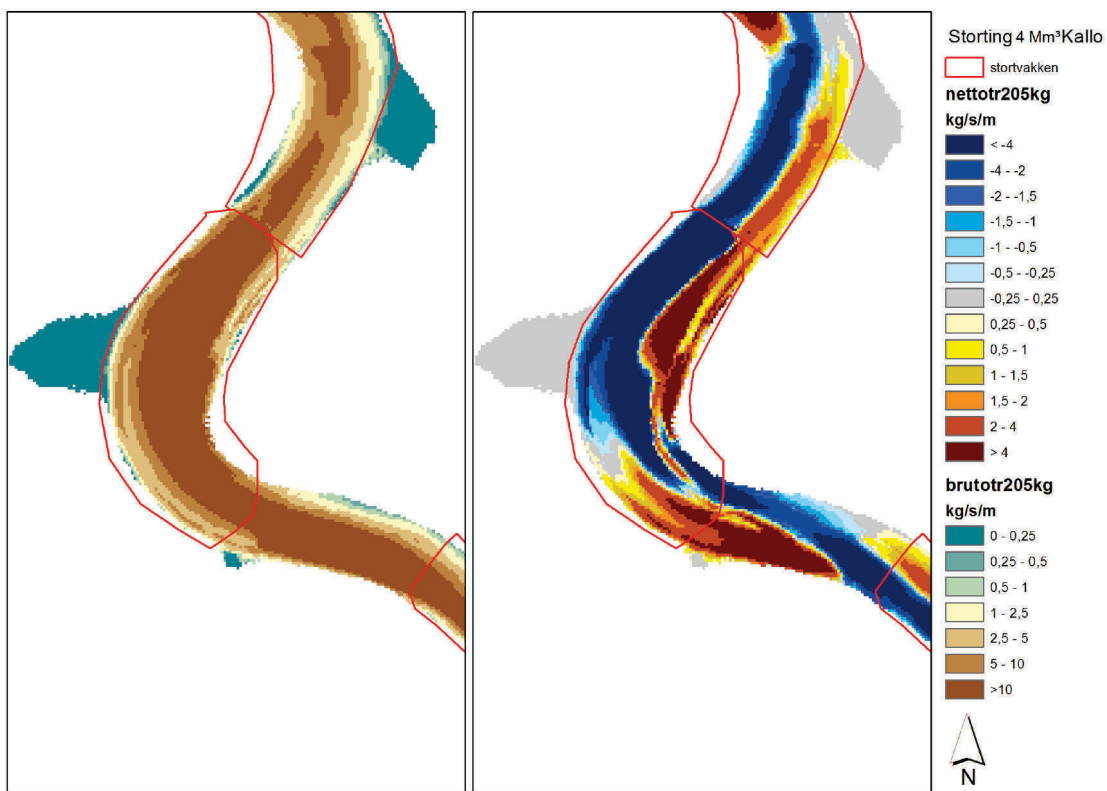
Figuur A 77 – Bruto transportcapaciteit (links) en Netto transportcapaciteit (rechts) voor run zsc202 ter hoogte van Ketelputten



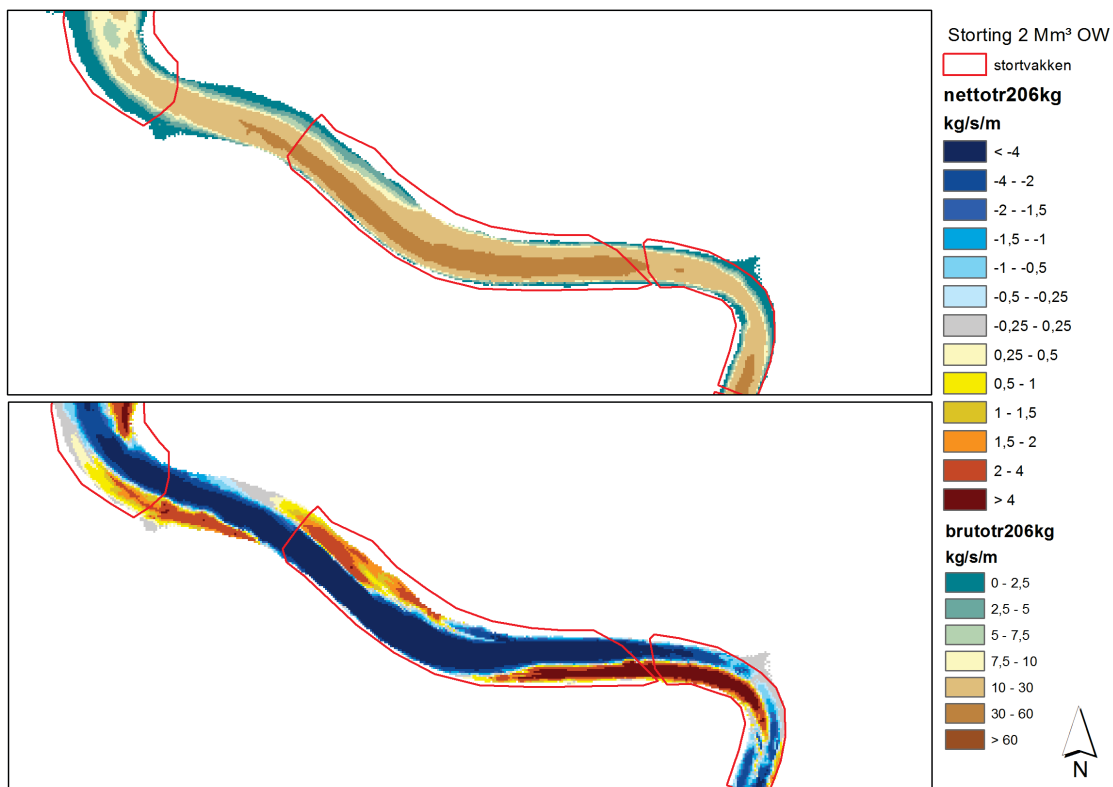
Figuur A 78 – Bruto transportcapaciteit (links) en Netto transportcapaciteit (rechts) voor run zsc203 ter hoogte van Ketelputten



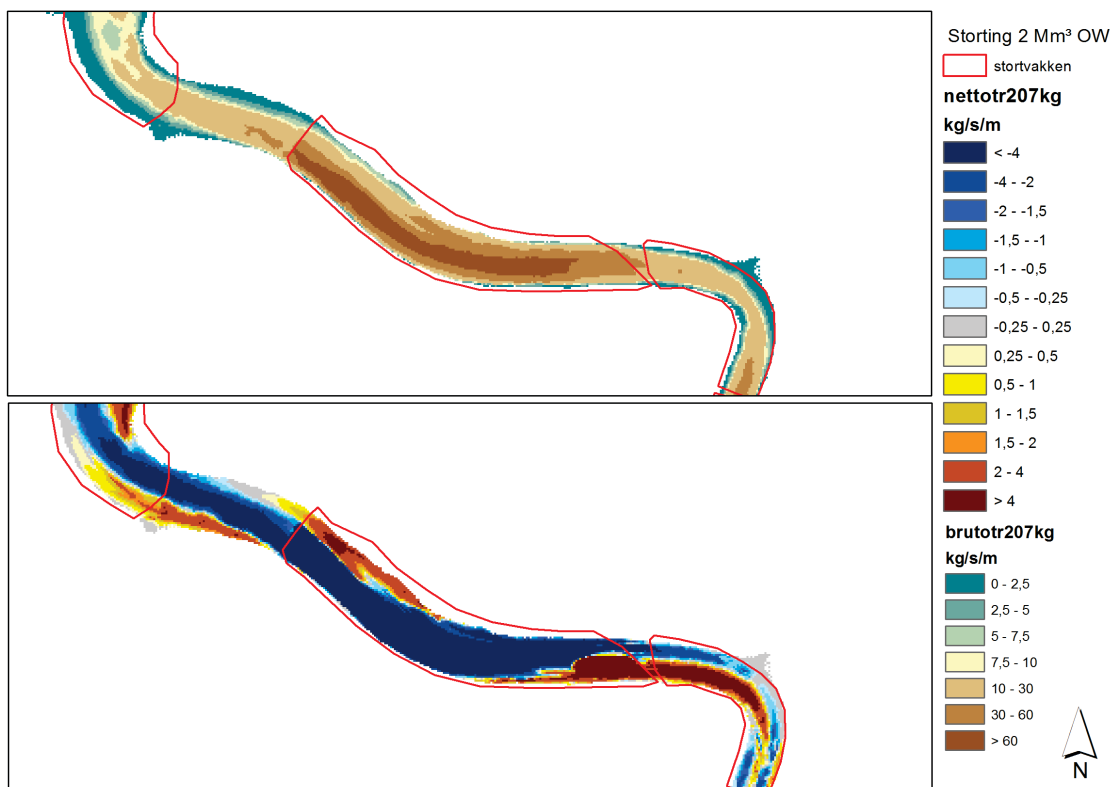
Figuur A 79 – Bruto transportcapaciteit (links) en Netto transportcapaciteit (rechts) voor run zsc204 ter hoogte van Kallosluis



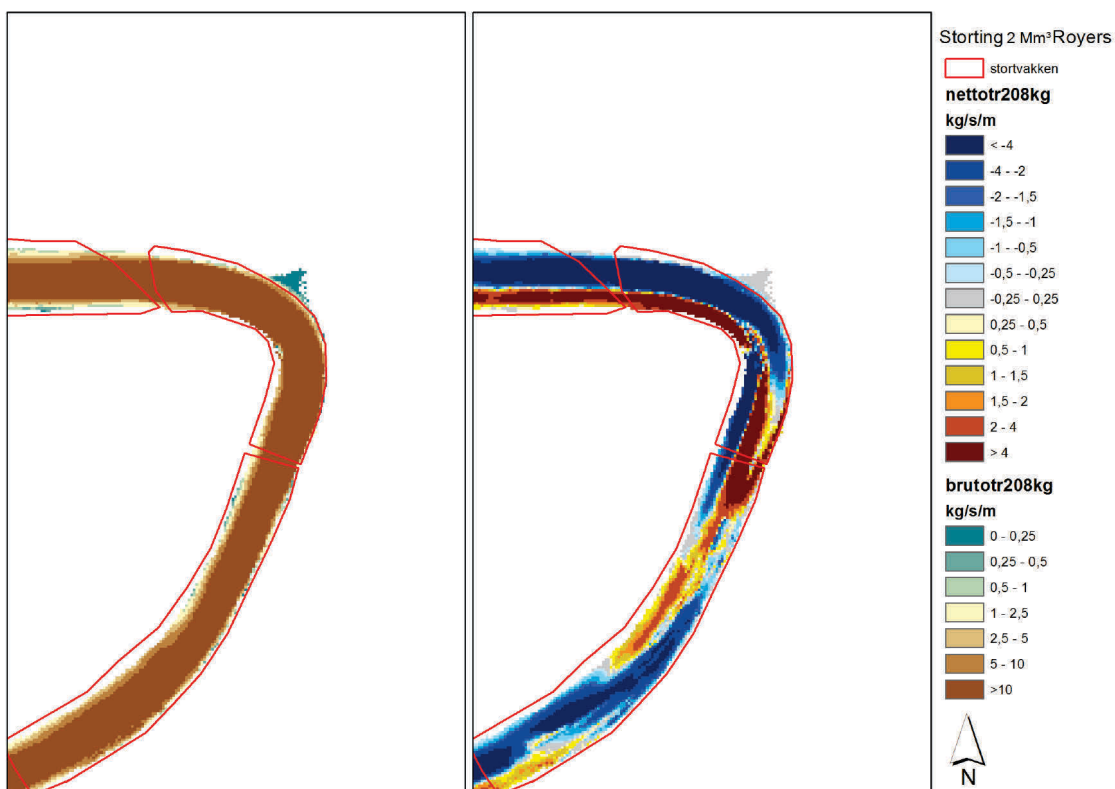
Figuur A 80 – Bruto transportcapaciteit (links) en Netto transportcapaciteit (rechts) voor run zsc205 ter hoogte van Kallosluis



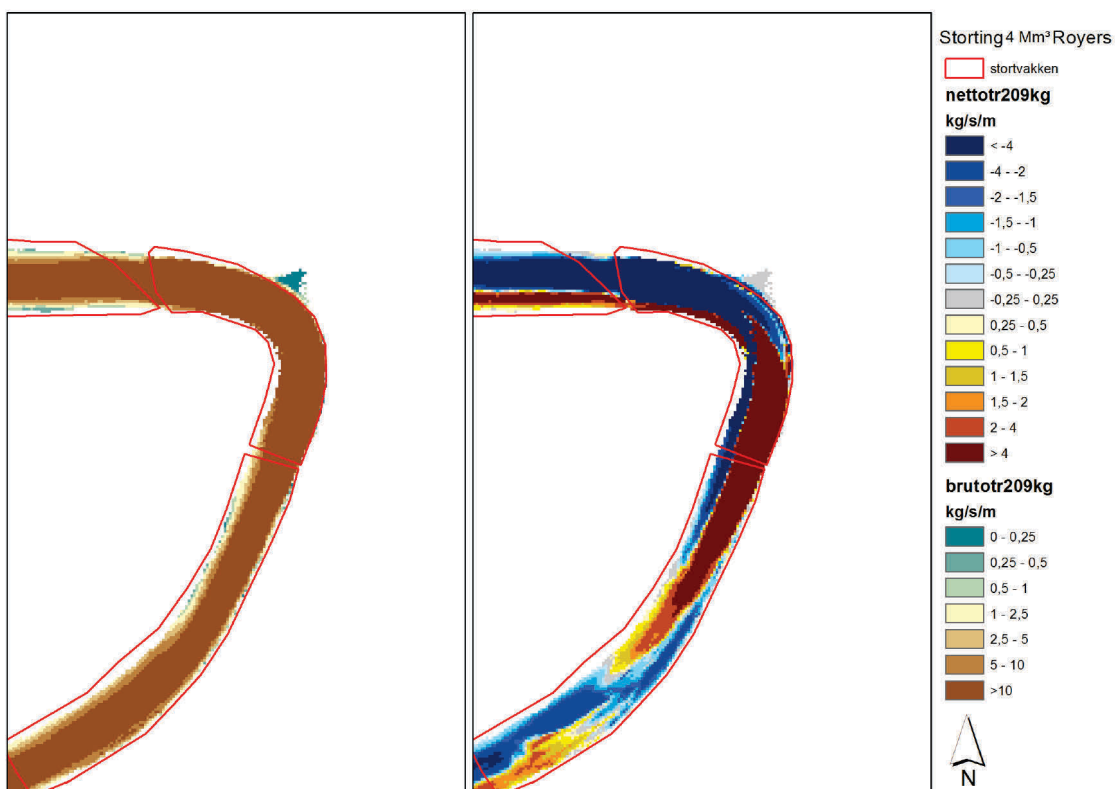
Figuur A 81 – Bruto transportcapaciteit (links) en Netto transportcapaciteit (rechts) voor run zsc206 ter hoogte van Oosterweel



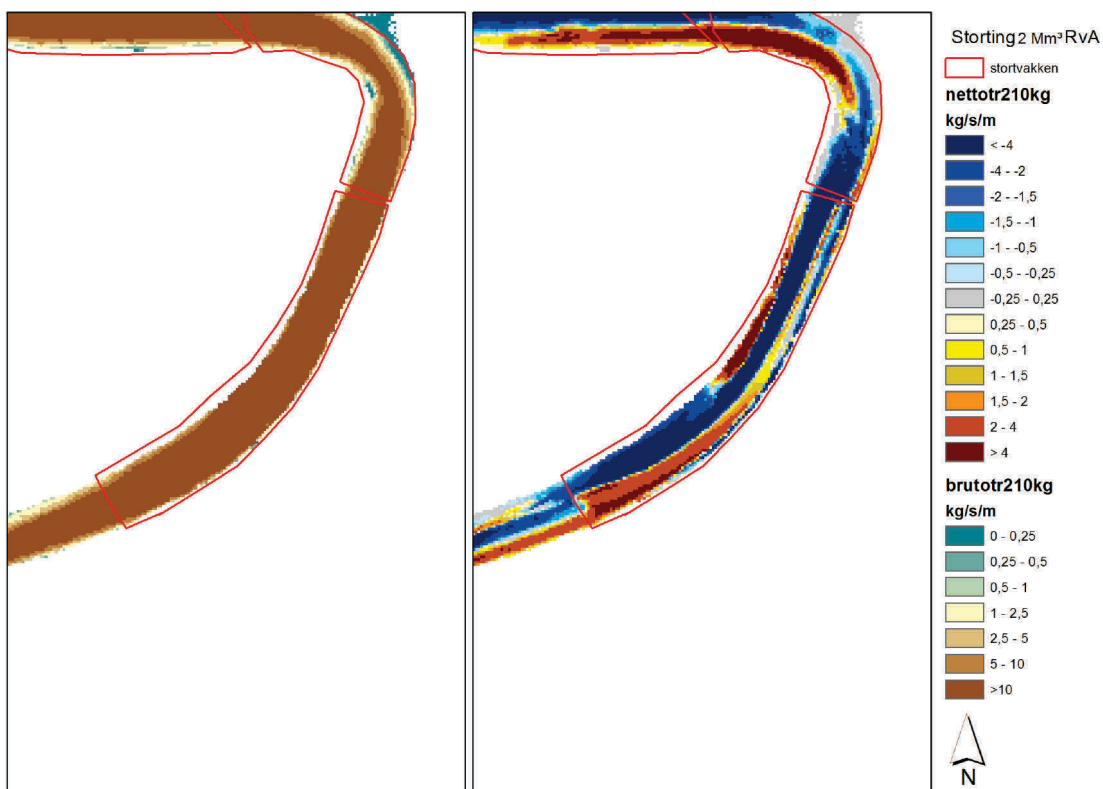
Figuur A 82 – Bruto transportcapaciteit (links) en Netto transportcapaciteit (rechts) voor run zsc207 ter hoogte van Oosterweel



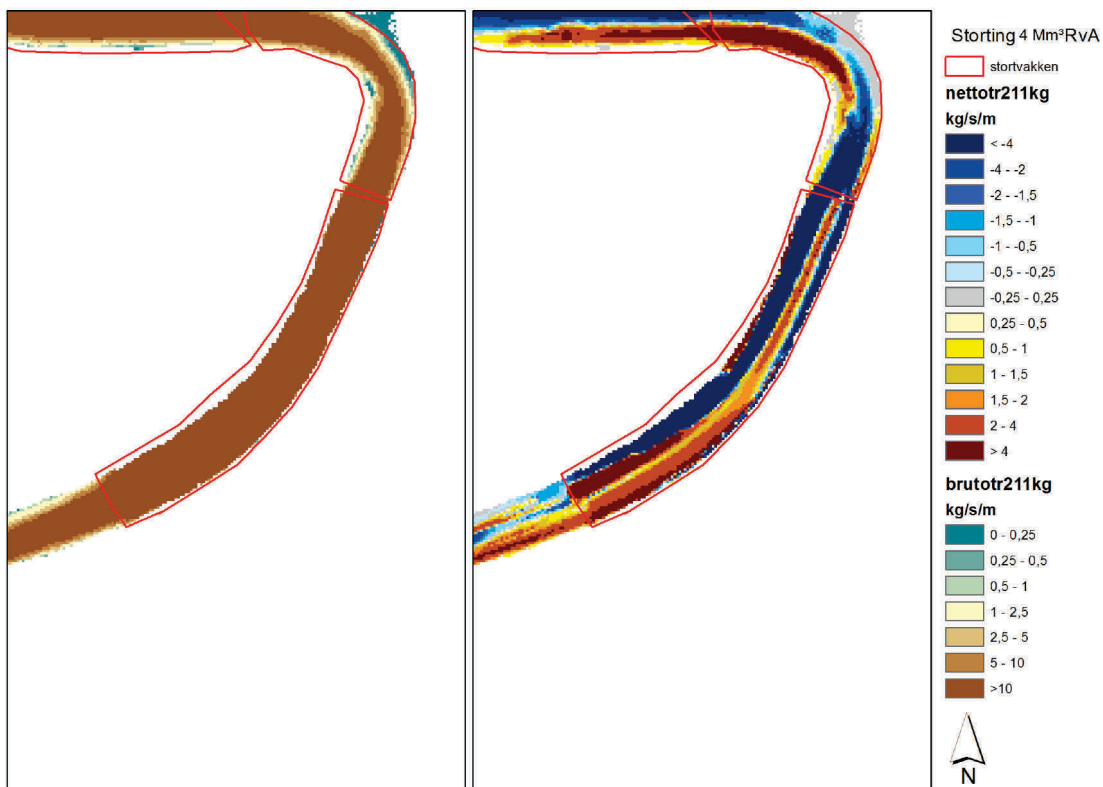
Figuur A 83 – Bruto transportcapaciteit (links) en Netto transportcapaciteit (rechts) voor run zsc208 ter hoogte van Royerssluis



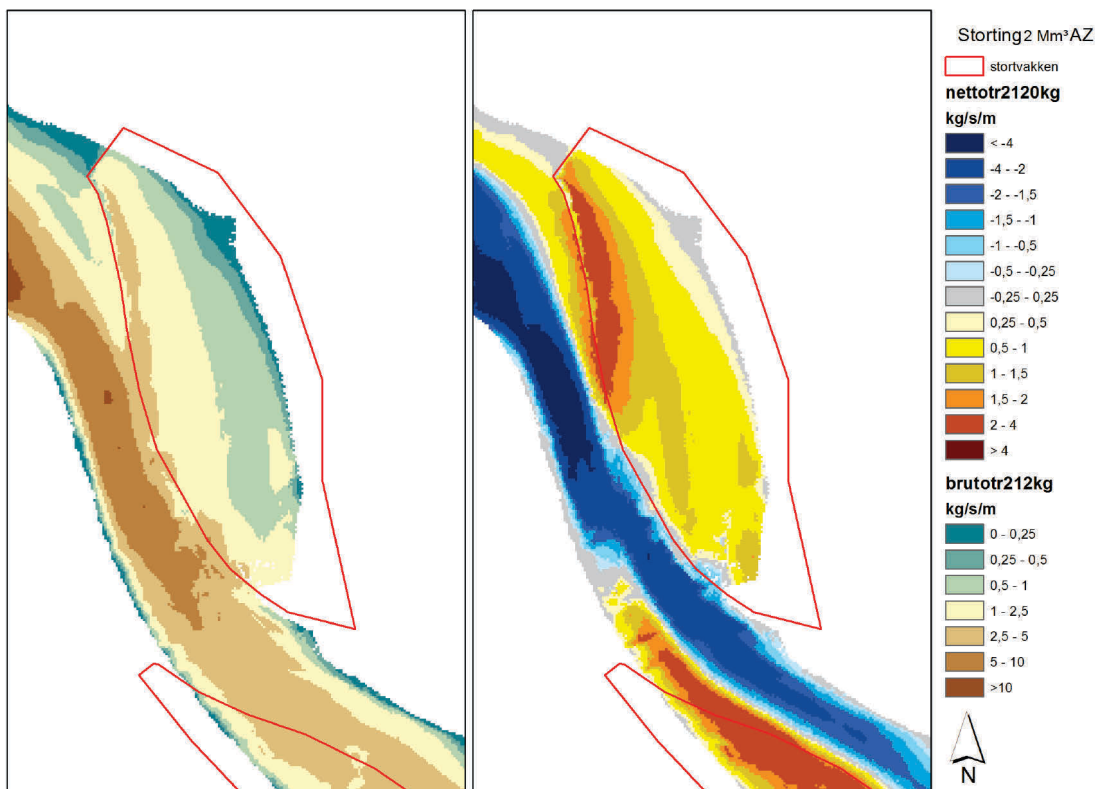
Figuur A 84 – Bruto transportcapaciteit (links) en Netto transportcapaciteit (rechts) voor run zsc209 ter hoogte van Royerssluis



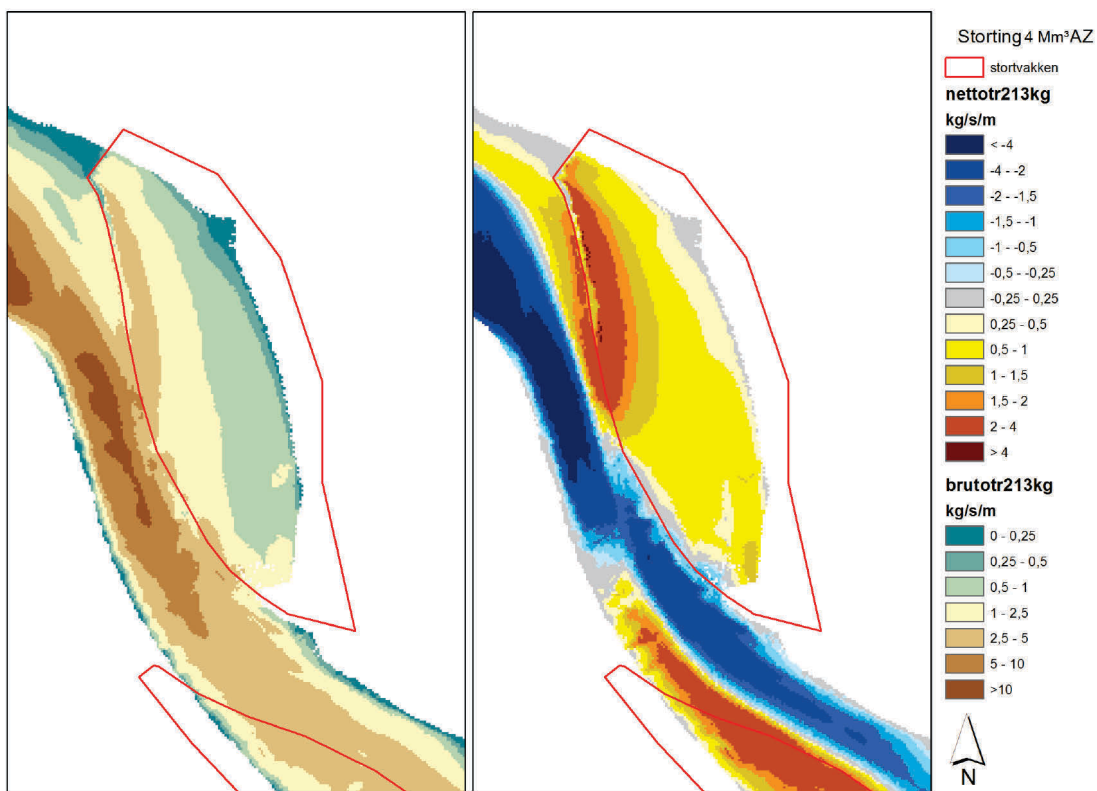
Figuur A 85 – Bruto transportcapaciteit (links) en Netto transportcapaciteit (rechts) voor run zsc210 ter hoogte van de Rede van Antwerpen



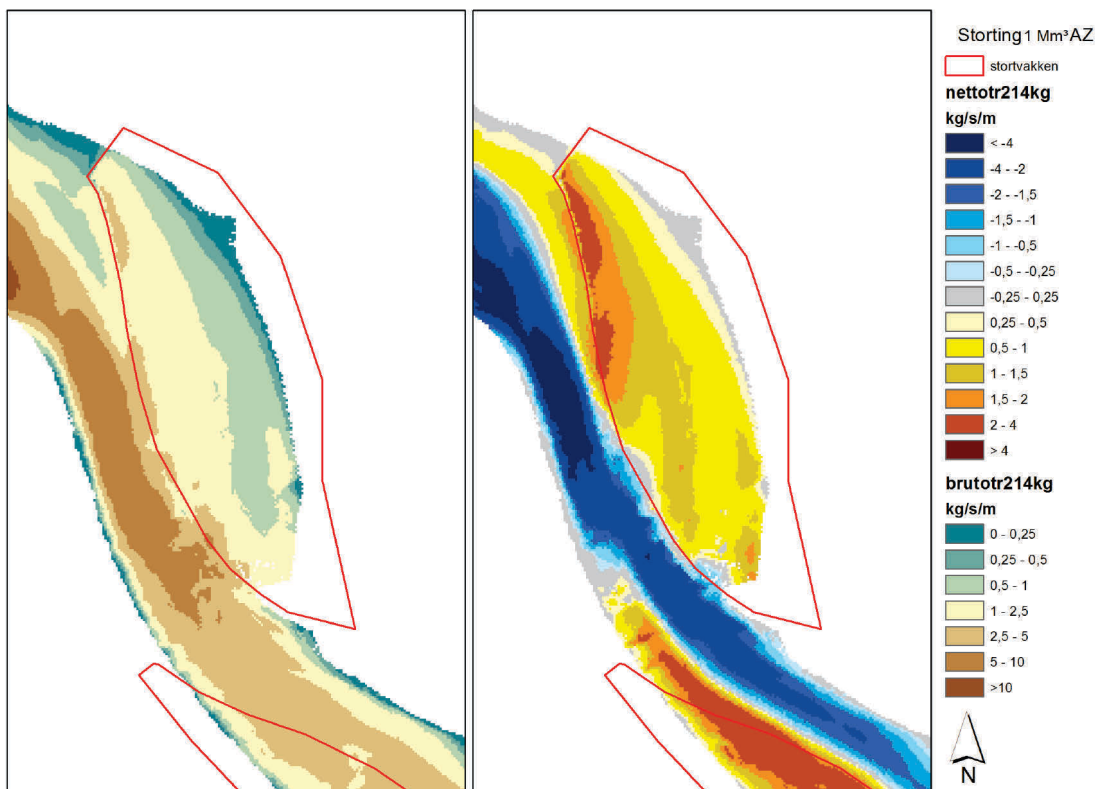
Figuur A 86 – Bruto transportcapaciteit (links) en Netto transportcapaciteit (rechts) voor run zsc211 ter hoogte van de Rede van Antwerpen



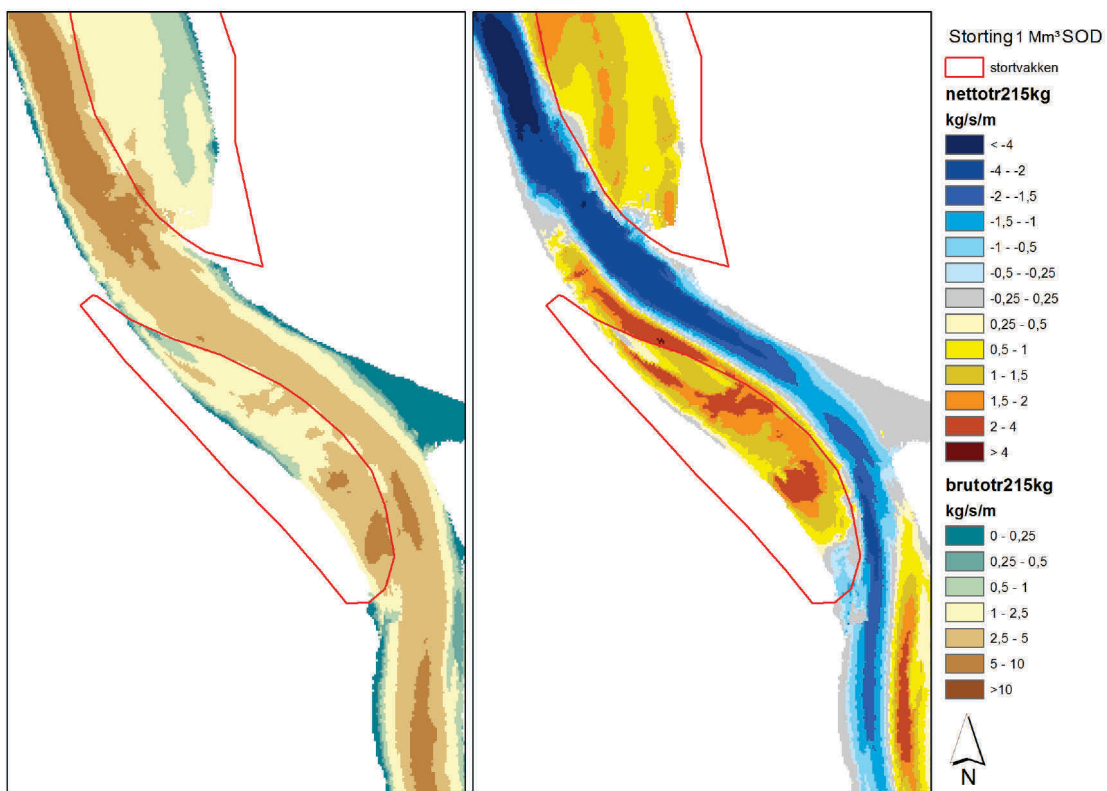
Figuur A 87 – Bruto transportcapaciteit (links) en Netto transportcapaciteit (rechts) voor run zsc212 ter hoogte van de Appelzak



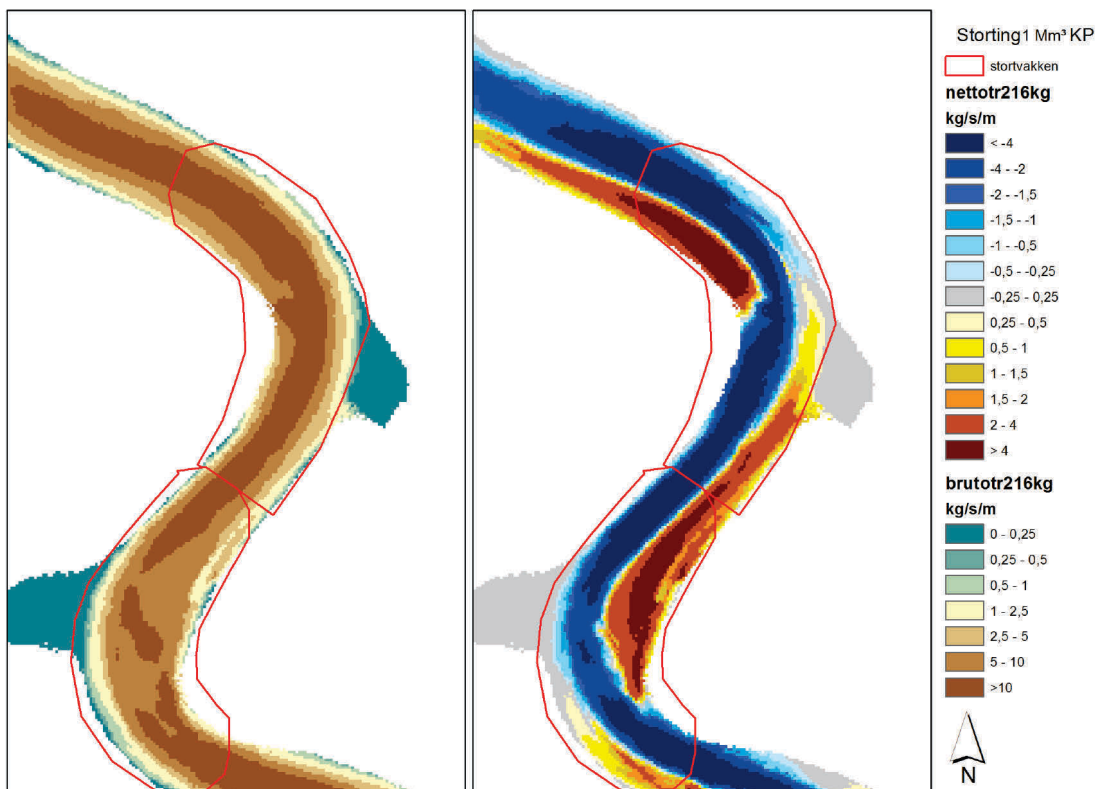
Figuur A 88 – Bruto transportcapaciteit (links) en Netto transportcapaciteit (rechts) voor run zsc213 ter hoogte van de Appelzak



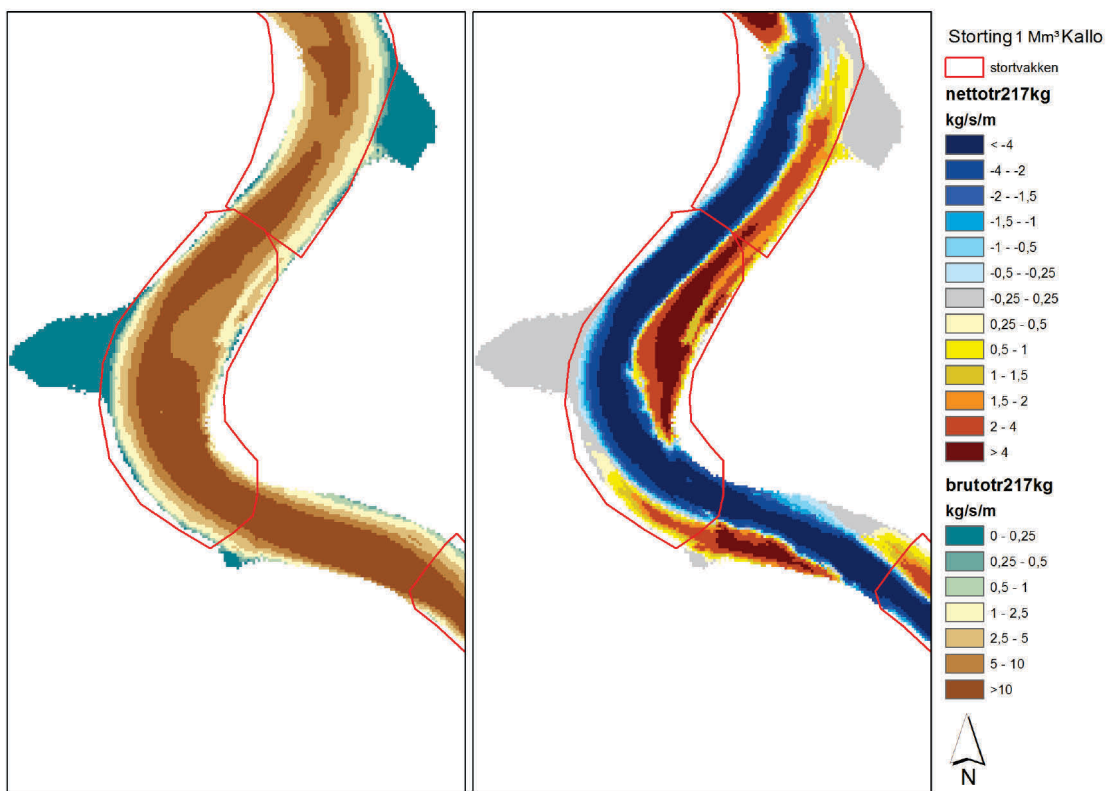
Figuur A 89 – Bruto transportcapaciteit (links) en Netto transportcapaciteit (rechts) voor run zsc214 ter hoogte van de Appelzak



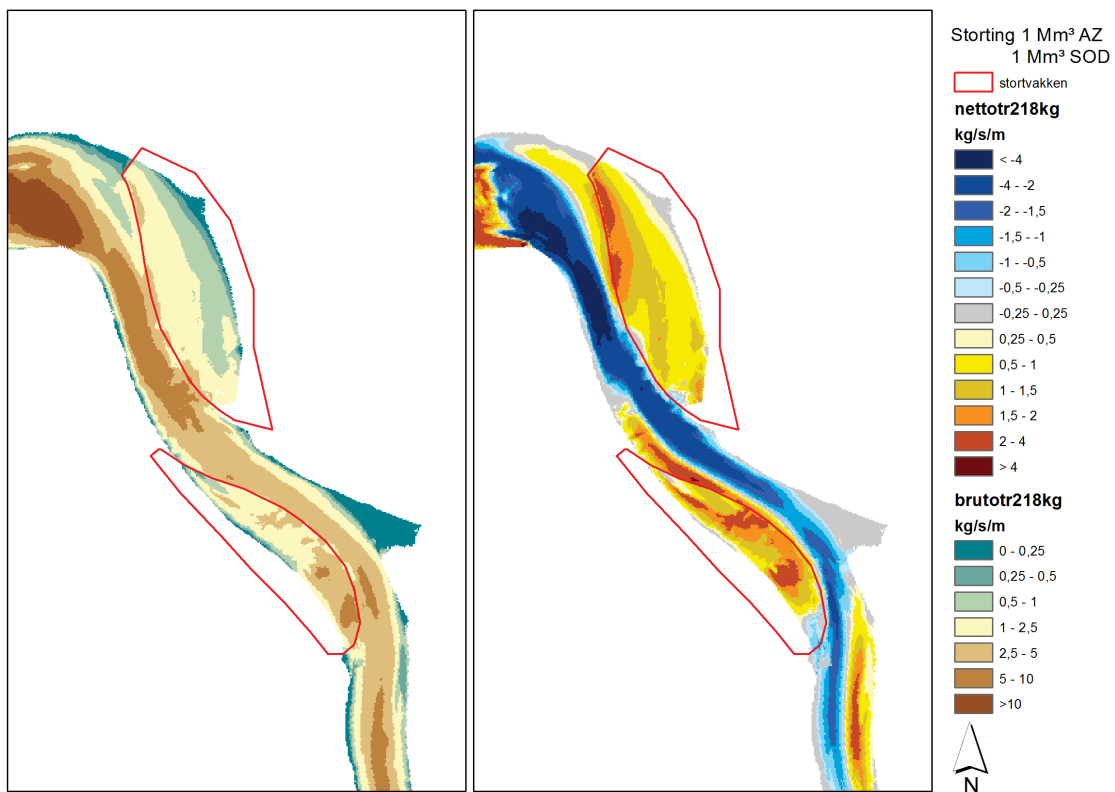
Figuur A 90 – Bruto transportcapaciteit (links) en Netto transportcapaciteit (rechts) voor run zsc215 ter hoogte van de Appelzak



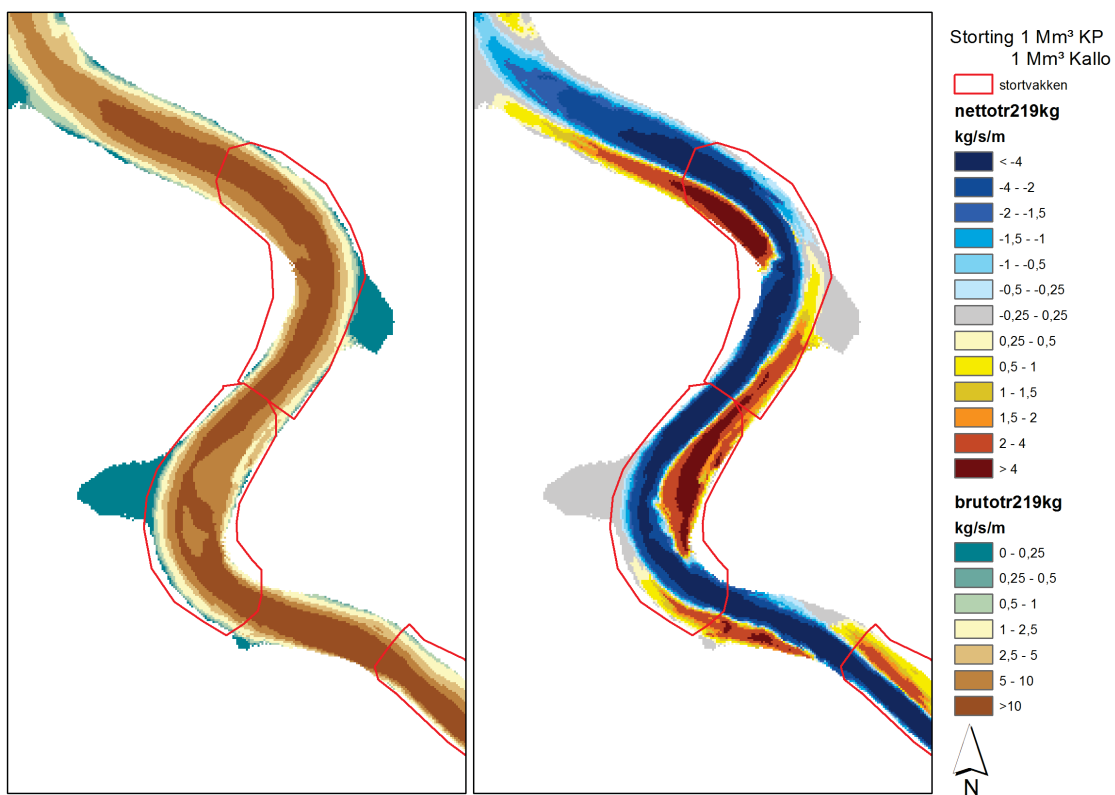
Figuur A 91 – Bruto transportcapaciteit (links) en Netto transportcapaciteit (rechts) voor run zsc216 ter hoogte van Ketelputten



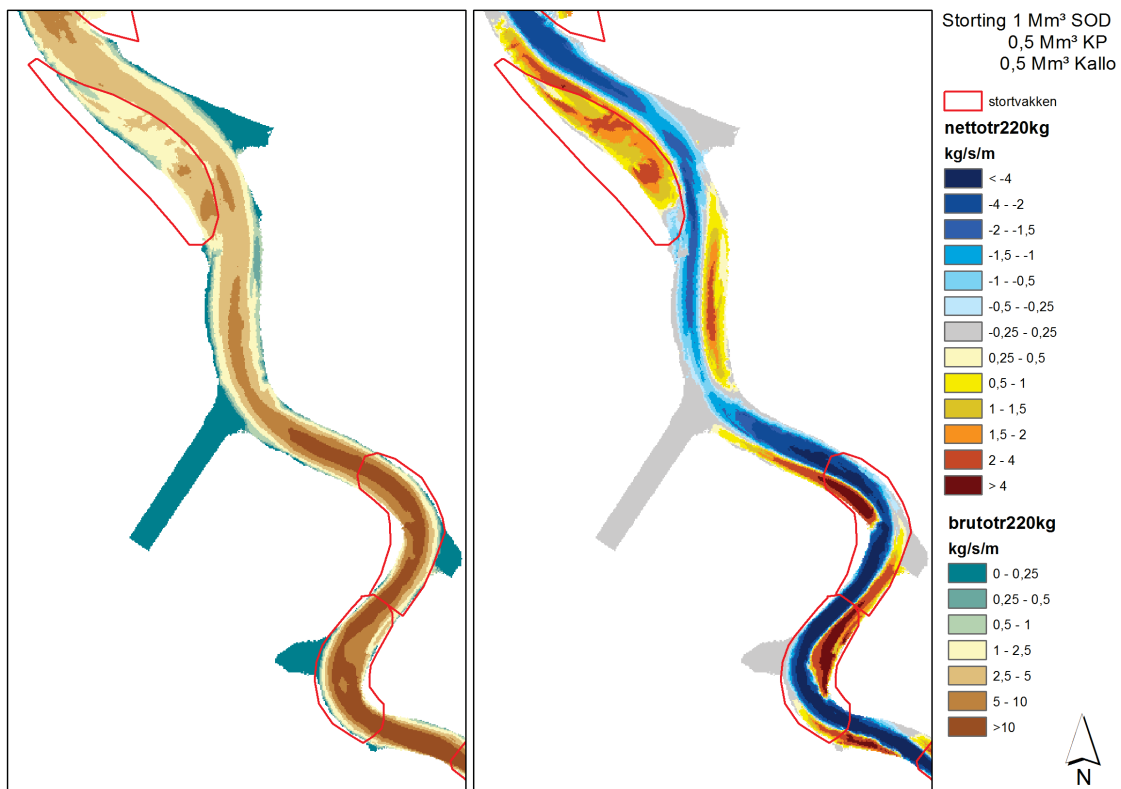
Figuur A 92 – Bruto transportcapaciteit (links) en Netto transportcapaciteit (rechts) voor run zsc217 ter hoogte van Kallosluis



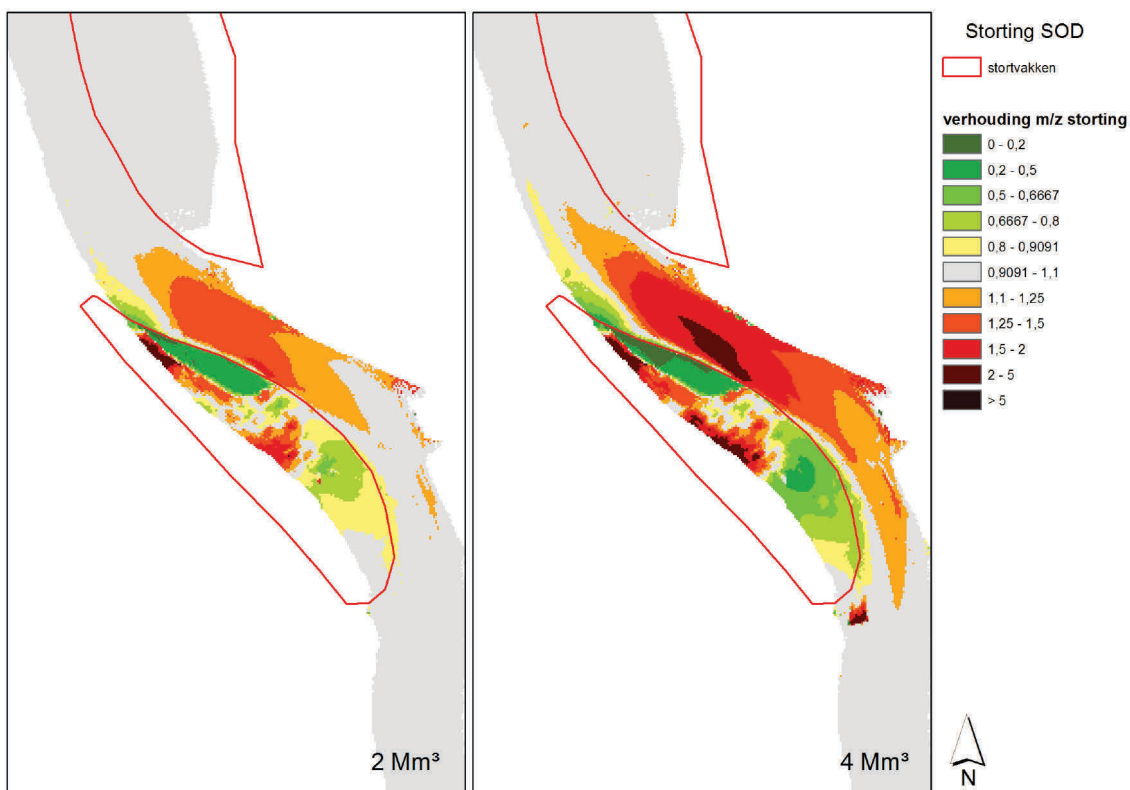
Figuur A 93 – Bruto transportcapaciteit (links) en Netto transportcapaciteit (rechts) voor run zsc218 ter hoogte van de Appelzak en Schaar van Ouden Doel



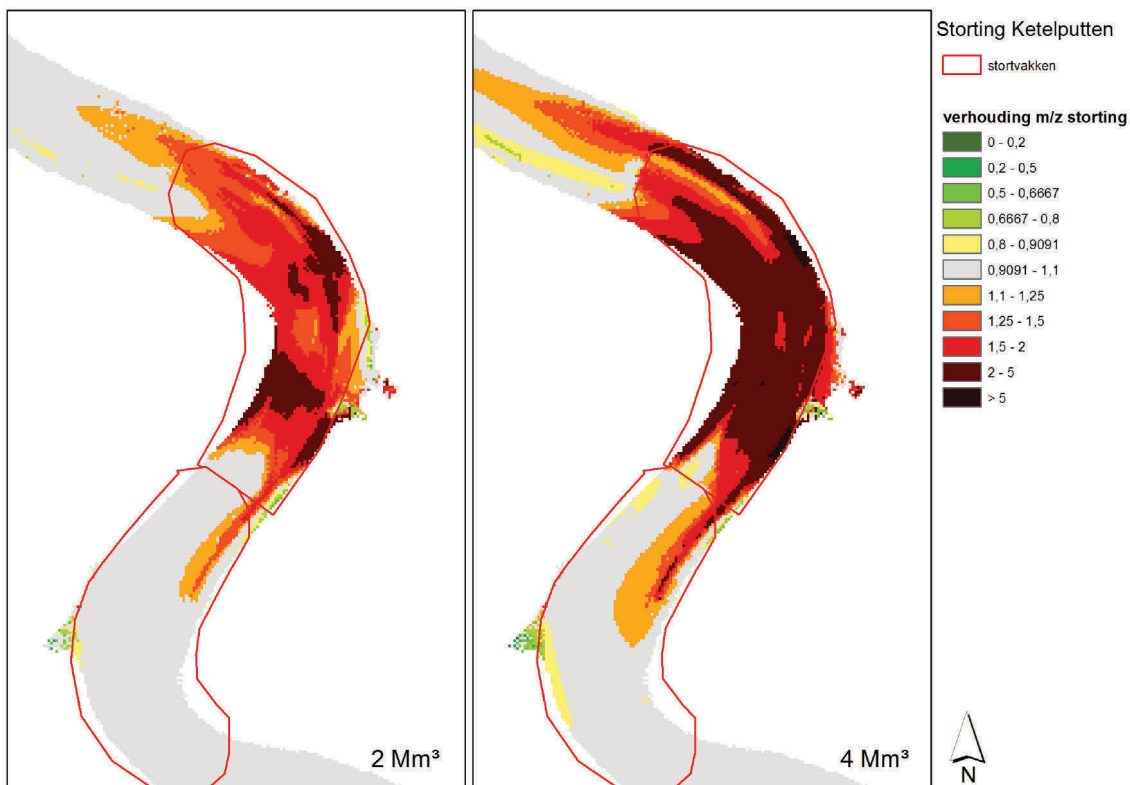
Figuur A 94 – Bruto transportcapaciteit (links) en Netto transportcapaciteit (rechts) voor run zsc219 ter hoogte van Ketelputten en Kallosluis



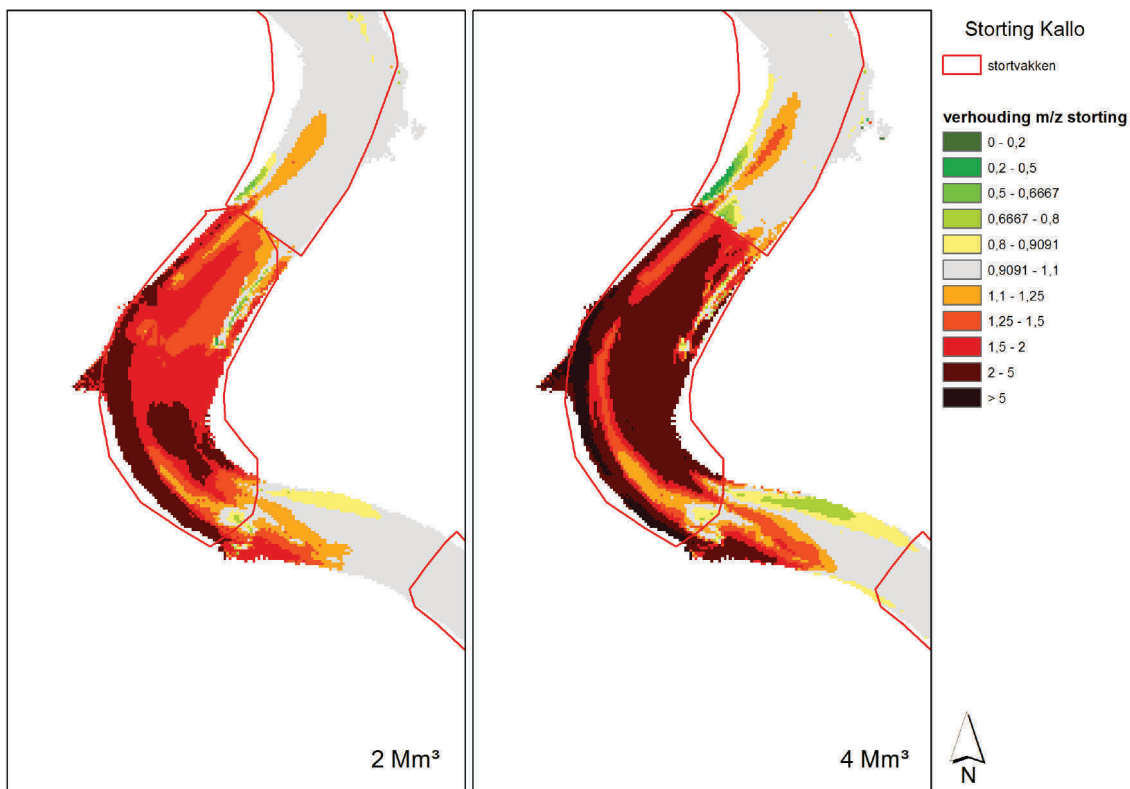
Figuur A 95 – Bruto transportcapaciteit (links) en Netto transportcapaciteit (rechts) voor run zsc220 ter hoogte van Royers



Figuur A 96 – Verhouding van de bruto sedimenttransportcapaciteit voor de storting en na de storting van 2 Mm³ (links) en van 4 Mm³ (rechts) ter hoogte van de Schaar van Ouden Doel



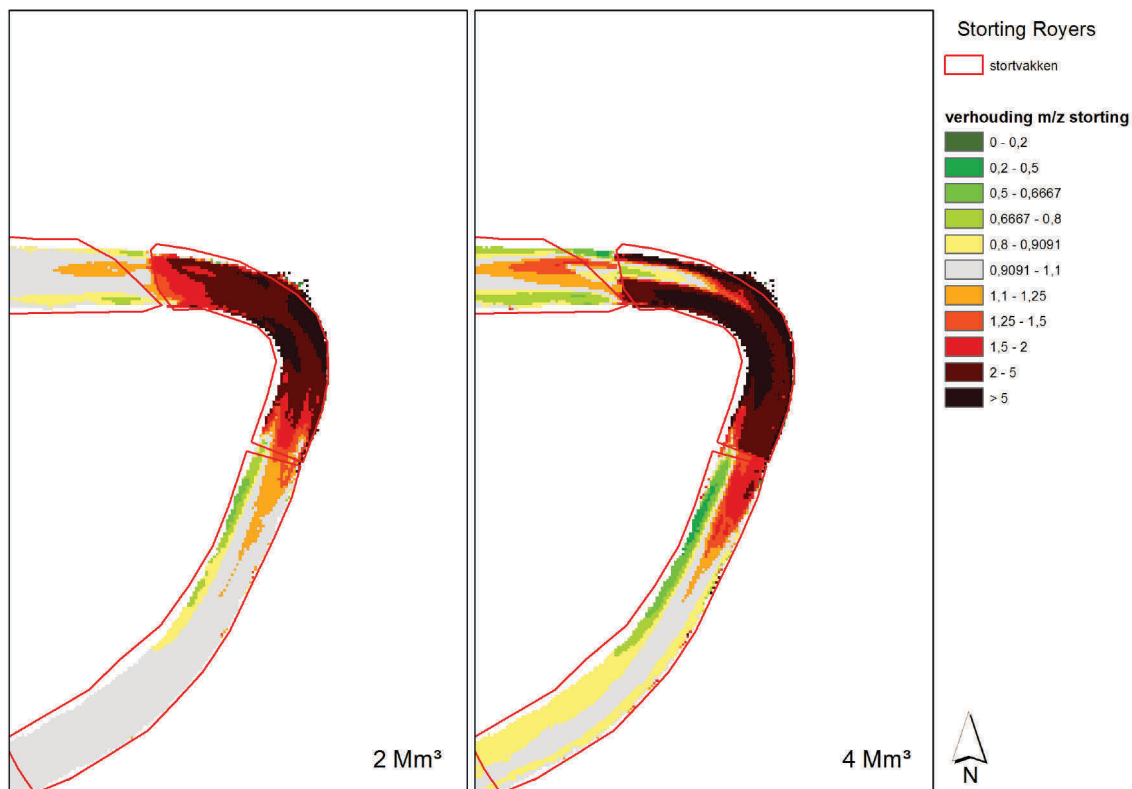
Figuur A 97 – Verhouding van de bruto sedimenttransportcapaciteit voor de storting en na de storting van 2 Mm³ (links) en van 4 Mm³ (rechts) ter hoogte van de Ketelputten



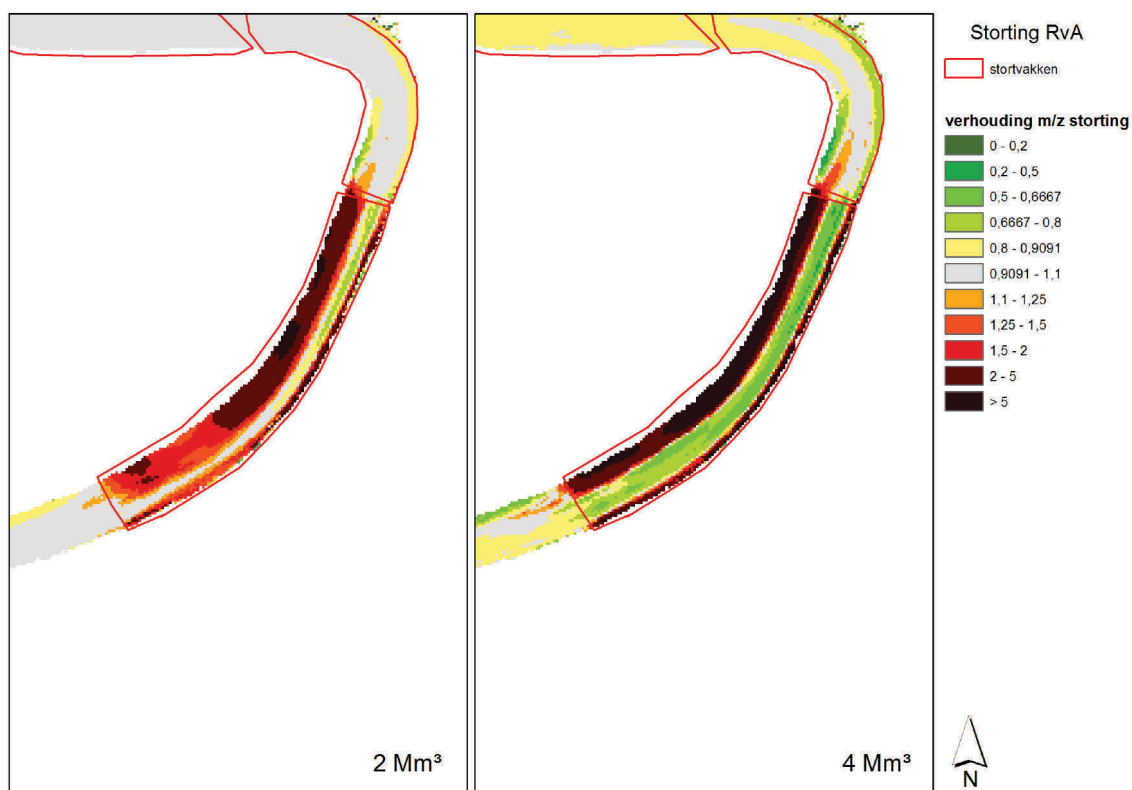
Figuur A 98 – Verhouding van de bruto sedimenttransportcapaciteit voor de storting en na de storting van 2 Mm³ (links) en van 4 Mm³ (rechts) ter hoogte van Kalloluis



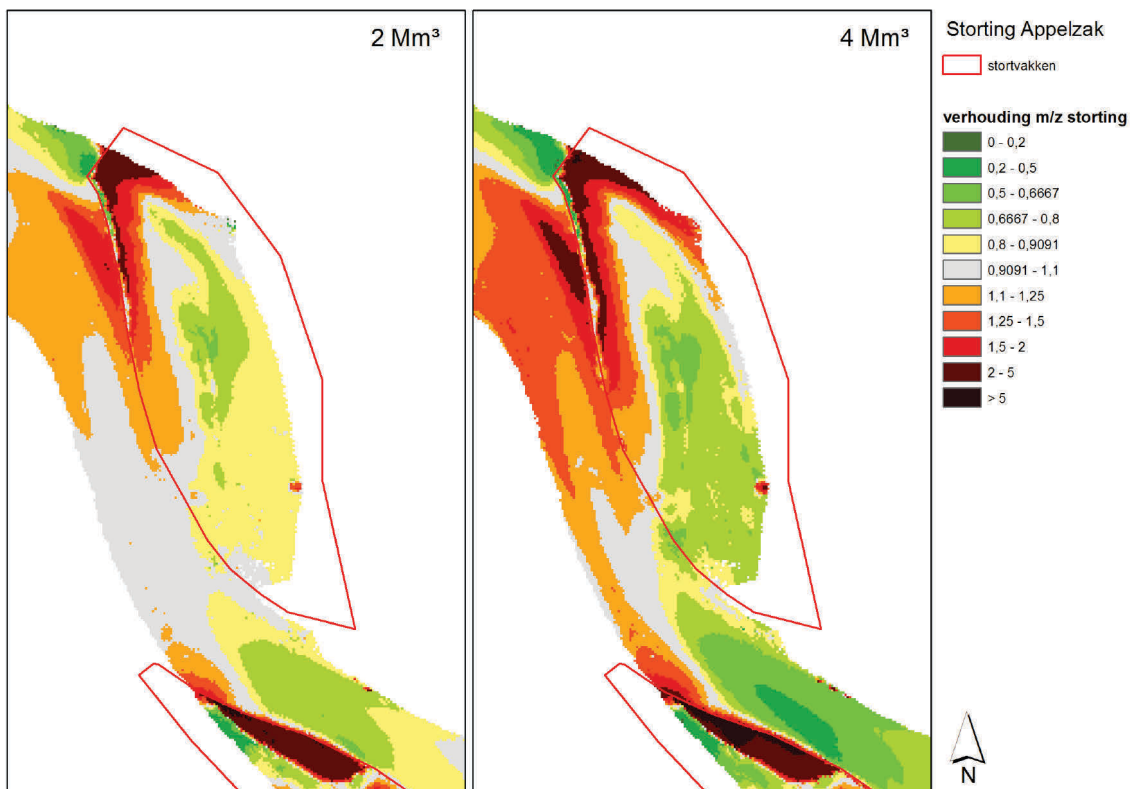
Figuur A 99 – Verhouding van de bruto sedimenttransportcapaciteit voor de storting en na de storting van 2 Mm³ (links) en van 4 Mm³ (rechts) ter hoogte van Oosterweel



Figuur A 100 – Verhouding van de bruto sedimenttransportcapaciteit voor de storting en na de storting van 2 Mm³ (links) en van 4 Mm³ (rechts) ter hoogte van Royerssluis



Figuur A 101 – Verhouding van de bruto sedimenttransportcapaciteit voor de storting en na de storting van 2 Mm³ (links) en van 4 Mm³ (rechts) ter hoogte van de Rede van Antwerpen



Figuur A 102 – Verhouding van de bruto sedimenttransportcapaciteit voor de storting en na de storting van 2 Mm³ (links) en van 4 Mm³ (rechts) ter hoogte van de Appelszak

DEPARTEMENT MOBILITEIT EN OPENBARE WERKEN

Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115, 2140 Antwerpen

T +32 (0)3 224 60 35

F +32 (0)3 224 60 36

waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be

mow.vlaanderen.be

waterbouwkundiglaboratorium.be



DEPARTEMENT **MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN**
Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115, 2140 Antwerpen

T +32 (0)3 224 60 35

F +32 (0)3 224 60 36

waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be

www.waterbouwkundiglaboratorium.be