



Vlaanderen
is wetenschap



00_107_2
WL rapporten

Simulator opleiding

Deelrapport 2
Scenario verondieping put ter hoogte van Rijnkaai

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Simulator opleiding

Deelrapport 2 – Scenario verondieping put ter hoogte van Rijnkaai

Plancke, Y.; Stark, J.; Eloot, K.; Mostaert, F.

Juridische kennisgeving

Het Waterbouwkundig Laboratorium is van mening dat de informatie en standpunten in dit rapport onderbouwd worden door de op het moment van schrijven beschikbare gegevens en kennis.

De standpunten in deze publicatie zijn deze van het Waterbouwkundig Laboratorium en geven niet noodzakelijk de mening weer van de Vlaamse overheid of één van haar instellingen.

Het Waterbouwkundig Laboratorium noch iedere persoon of bedrijf optredend namens het Waterbouwkundig Laboratorium is aansprakelijk voor het gebruik dat gemaakt wordt van de informatie uit dit rapport of voor verlies of schade die eruit voortvloeit.

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2021
D/2021/3241/209

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Plancke, Y.; Stark, J.; Eloot, K.; Mostaert, F. (2021). Simulator opleiding: Deelrapport 2 – Scenario verondieping put ter hoogte van Rijnkaai. Versie 5.0. WL Rapporten, 00_107_2. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Overname uit en verwijzingen naar deze publicatie worden aangemoedigd, mits correcte bronvermelding.

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	DABL	Ref.:	WL2021R00_107_2
Trefwoorden (3-5):	Stroming, Sediment transport, numeriek model		
Kennisdomeinen:	Hydrodynamica > Stroomsnelheden -en patronen > Numerieke modelleringen Sediment > Sedimenttransport > Numerieke modelleringen		
Tekst (p.):	13	Bijlagen (p.):	26
Vertrouwelijk:	☒ Nee ☒ Online beschikbaar		

Auteur(s):	Plancke, Y.
------------	-------------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Stark, J.	Getekend door: Jeroen Stark (Signature) Getekend op: 2021-09-03 11:54:42 +02:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Jeroen Stark</i>
Projectleider:	Eloot, K.	Getekend door: Katrien Eloot (Signature) Getekend op: 2021-09-03 09:25:22 +02:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Katrien Eloot</i>

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Mostaert, F. Voor het afdelingshoofd, afwezig Patrik Peeters, Ingenieur, belast met de leiding van de afdeling Waterbouwkundig Laboratorium	Patrik Peeters (Signature) Digitaal ondertekend door Patrik Peeters (Signature) Datum: 2021.09.02 18:26:58 +02'00'
-----------------	---	---



Abstract

In het kader van de werken voor de Oosterweelverbinding wordt overwogen aanlegbaggerspecie te bergen ter hoogte van de diepe delen in de vaargeul ter hoogte van de Rijnkaai. Om de invloed van dergelijke stortingen op de nautische veiligheid na te gaan, zullen vaarsimulaties worden uitgevoerd voor dit scenario. Ten behoeve van deze vaarsimulaties werden met behulp van het 2D-hydrodynamisch Delft3D model stroomvelden aangeleverd. In dit rapport worden de methodiek en de resultaten beschreven voor het genereren van deze stroomvelden. Tevens is een vergelijking gemaakt met de referentietoestand, waaruit blijkt dat er een aanzienlijke (tot ca. 40 cm/s) toename van de maximale stroomsnelheden zal kunnen optreden. Daarnaast wordt op basis van expert judgement en de gesimuleerde initiële sedimenttransporten, een inschatting gemaakt van de te verwachten stabiliteit van de gestorte specie

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VI
Lijst van de figuren	VII
1 Inleiding	1
2 Modelopzet	2
2.1 NEVLA-model.....	2
2.2 Basismodel.....	3
2.2.1 Modelgrid	3
2.2.2 Topo-bathymetrie.....	3
2.2.3 Randvoorwaarden	4
2.2.4 Tijdstap	4
2.2.5 Hydrodynamische modelparameters	4
2.3 Sedimenttransportmodellering	5
2.3.1 Sedimentfracties.....	5
2.3.2 Randvoorwaarden	5
2.3.3 Dikte bodemsedimentlaag	5
2.3.4 Modelvalidatie	5
3 Scenarioberekening.....	7
3.1 Bodemligging	7
3.2 Waterbeweging	7
3.3 Sedimenttransport en stabiliteit specie	8
4 Conclusies	12
5 Referenties	13
Bijlage 1 Stroomvelden t.h.v. het studiegebied	B1

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Overzicht modelparameters	4
Tabel 2 – Waarden modelparameters na kalibratie.....	6

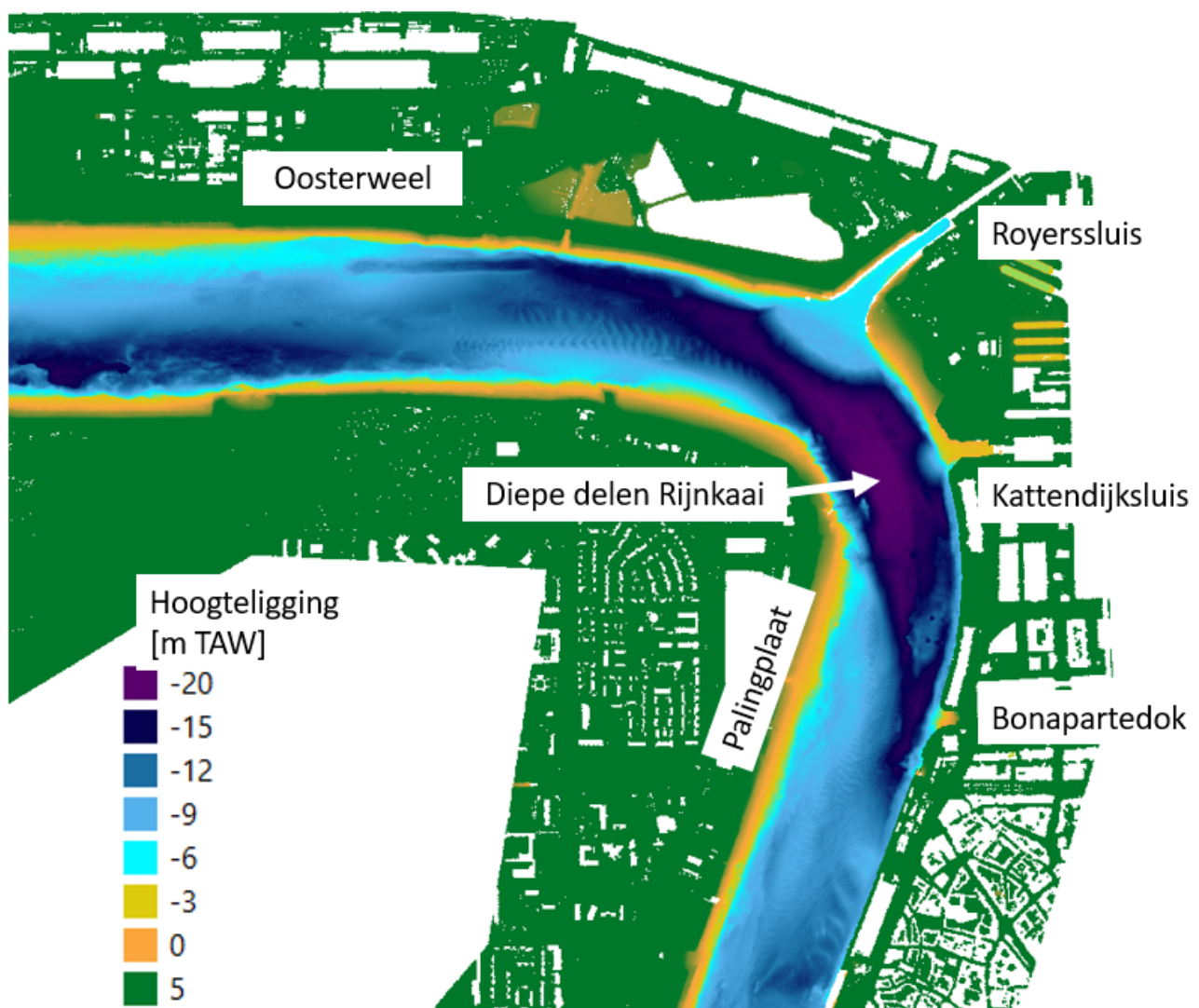
Lijst van de figuren

Figuur 1 – Overzicht studiegebied.....	1
Figuur 2 – Modelgrid van het Delft3D NEVLA-model (groen) en het studiemodel (rood).....	2
Figuur 3 – Verschil in hoogteligging tussen bodem 2011 en 2019.....	3
Figuur 4 – Bodemligging ter hoogte van dwarsraai doorheen diepe put Rijnkaai.....	7
Figuur 5 – Maximale stroomsnelheid ter hoogte van dwarsraai doorheen diepe put Rijnkaai.....	8
Figuur 6 – Bruto sedimenttransport ter hoogte van dwarsraai doorheen diepe put Rijnkaai	9
Figuur 7 – Netto sedimenttransport ter hoogte van dwarsraai doorheen diepe put Rijnkaai (scenario met verondieping)	9
Figuur 8 – Bodemligging: referentie (links), verondieping Rijnkaai (midden) en verschil.....	10
Figuur 9 – Maximale stroomsnelheid: referentie (links), verondieping Rijnkaai (midden) en verschil	10
Figuur 10 – Bruto sedimenttransport: referentie (links), verondieping Rijnkaai (midden) en verschil	11
Figuur 11 – Waterstand te Antwerpen-Loodsgebouw voor de periode van uitgevoerde stroomvelden.....	B1
Figuur 12 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW - 290'$)	B1
Figuur 13 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW - 275'$)	B2
Figuur 14 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW - 260'$)	B2
Figuur 15 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW - 245'$)	B3
Figuur 16 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW - 230'$)	B3
Figuur 17 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW - 215'$)	B4
Figuur 18 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW - 200'$)	B4
Figuur 19 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW - 185'$)	B5
Figuur 20 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW - 170'$)	B5
Figuur 21 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW - 155'$)	B6
Figuur 22 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW - 140'$)	B6
Figuur 23 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW - 125'$)	B7
Figuur 24 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW - 110'$)	B7
Figuur 25 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW - 95'$)	B8
Figuur 26 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW - 80'$)	B8
Figuur 27 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW - 65'$)	B9
Figuur 28 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW - 50'$)	B9
Figuur 29 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW - 35'$)	B10
Figuur 30 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW - 20'$)	B10
Figuur 31 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW - 5'$)	B11
Figuur 32 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 10'$)	B11

Figuur 33 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 25'$)	B12
Figuur 34 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 40'$)	B12
Figuur 35 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 55'$)	B13
Figuur 36 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 70'$)	B13
Figuur 37 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 85'$)	B14
Figuur 38 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 100'$)	B14
Figuur 39 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 115'$)	B15
Figuur 40 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 130'$)	B15
Figuur 41 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 145'$)	B16
Figuur 42 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 160'$)	B16
Figuur 43 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 175'$)	B17
Figuur 44 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 190'$)	B17
Figuur 45 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 205'$)	B18
Figuur 46 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 220'$)	B18
Figuur 47 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 235'$)	B19
Figuur 48 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 250'$)	B19
Figuur 49 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 265'$)	B20
Figuur 50 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 280'$)	B20
Figuur 51 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 295'$)	B21
Figuur 52 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 310'$)	B21
Figuur 53 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 325'$)	B22
Figuur 54 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 340'$)	B22
Figuur 55 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 355'$)	B23
Figuur 56 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 370'$)	B23
Figuur 57 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 385'$)	B24
Figuur 58 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 400'$)	B24
Figuur 59 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 415'$)	B25
Figuur 60 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 430'$)	B25
Figuur 61 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 445'$)	B26

1 Inleiding

In het kader van de bouw van de Oosterweelverbinding worden de diepe delen in de vaargeul ter hoogte van de Rijnkaai (Figuur 1) als potentieel (tijdelijk) bergingsgebied van aanlegbaggerspecie beschouwd. Om de impact op de nautische veiligheid van dergelijk scenario te onderzoeken, zullen nautische vaarsimulaties uitgevoerd worden in de simulator van het Waterbouwkundig Laboratorium. De stroomvelden voor dit onderzoek worden gegenereerd op basis van numerieke modellen. Voorliggend rapport beschrijft het numerieke modelscenario dat hiervoor is uitgevoerd en waarvan de stroomvelden ingevoerd worden in de simulator. Daarnaast wordt op basis van expert judgement en de gesimuleerde initiële sedimenttransporten, een inschatting gemaakt van de te verwachten stabiliteit van de gestorte specie.



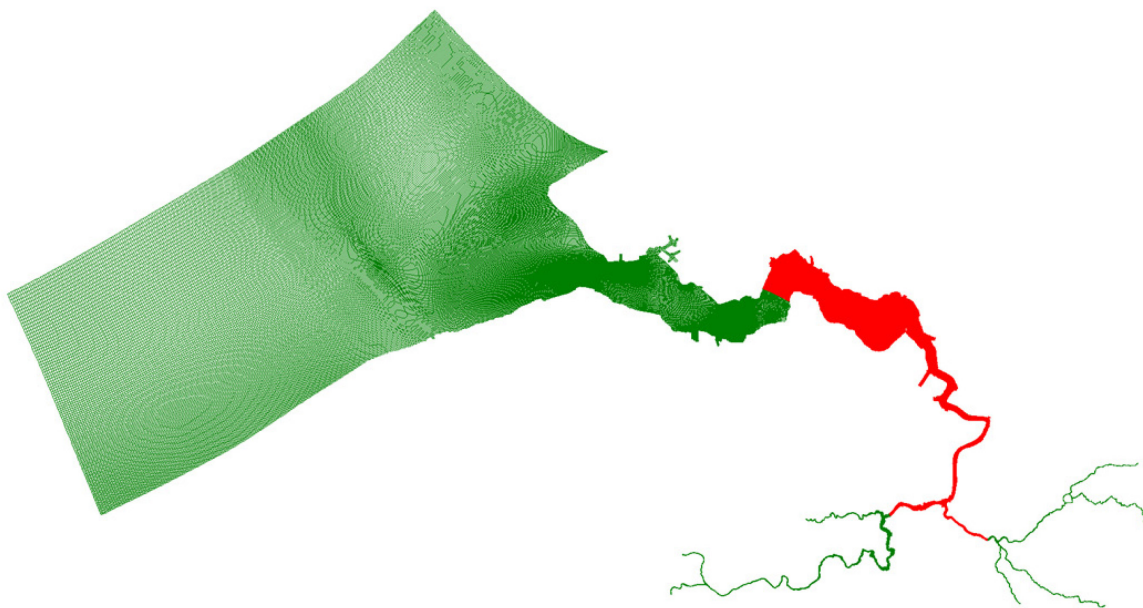
Figuur 1 – Overzicht studiegebied

2 Modelopzet

2.1 NEVLA-model

Het numerieke 2D-model gebruikt in deze studie is geknipt uit het zogenaamde NEVLA-model. Het NEVLA-model is een 2D-hydrodynamisch model ontwikkeld binnen het SIMONA softwarepakket (Maximova *et al.*, 2013; Verheyen *et al.*, 2012). Dit model omvat het volledige Schelde-estuarium: een deel van de Noordzee, de Vlake 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 2).

In het kader van het project “Stortstrategie Beneden-Zeeschelde” 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 Ossensisse. De opwaartse randen zijn gelegen ter hoogte van Tielrode op de Zeeschelde en ter hoogte van Terhagen op de Rupel (Figuur 2, rode gebied). Binnen het project “Stortstrategie Beneden-Zeeschelde” werden een gevoeligheidsanalyse en validatie van het model uitgevoerd. Deze worden beschreven in (Coen *et al.*, 2016). Ten behoeve van voorliggende onderzoeksvraag is ervoor geopteerd dit gevalideerde model in te zetten. Bijkomend argument voor dit model is dat dit reeds ingezet werd om de geschiktheid van verschillende gebieden voor het terugstorten van zand te onderzoeken (Coen *et al.*, 2018; Plancke *et al.*, 2019; Vos *et al.*, 2016b).



Figuur 2 – Modelgrid van het Delft3D NEVLA-model (groen) en het studiemodel (rood)

2.2 Basismodel

2.2.1 Modelgrid

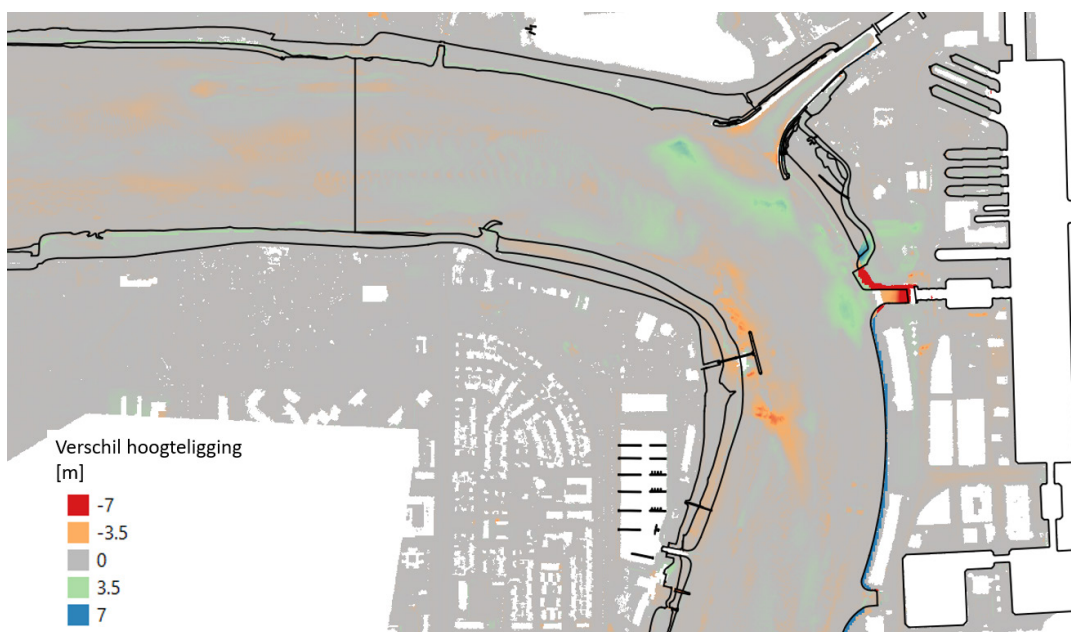
Het modelgrid van het gebruikte detailmodel is 3 x 3 keer fijner dan dit van het oorspronkelijke NEVLA-model. Deze verfijning werd uitgevoerd om ter hoogte van Deurganckdok, toegangsgeulen sluizen en de zone nabij Ketelputten een voldoende fijne resolutie te bekomen (Maximova *et al.*, 2013; Maximova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

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

2.2.2 Topo-bathymetrie

De topo-bathymetrie van de Westerschelde en de Beneden-Zeeschelde is 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. 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.

De modelbathymetrie betreft deze die in het kader van het project “Stortstrategie Beneden-Zeeschelde” werd toegepast. Voor voorliggende oefening is ervoor gekozen deze topo-bathymetrie te behouden, waardoor het referentiescenario kon behouden blijven. De lokale invloed ter hoogte van het interessegebied door de veranderingen in topo-bathymetrie tussen 2011 en 2021 worden klein verondersteld ten opzichte van de invloed van het te onderzoeken scenario. Figuur 3 geeft de verschilkaart weer voor de bodem 2011 en 2019. Hieruit blijkt dat de verschillen over de periode beperkt zijn, met als belangrijkste wijzigingen een verondieping ter hoogte van de ingang van de Royerssluis (rechteroever) en een verdieping nabij de steiger van Sint-Anneke (linkeroever).



Figuur 3 – Verschil in hoogteligging tussen bodem 2011 en 2019

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 artificieel 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.

2.2.3 Randvoorwaarden

De opgelegde tijdreeksen aan de op- en afwaartse randen van het model zijn afkomstig uit een simulatie met het NEVLA-model. De simulatieperiode van dit model loopt van 24/09/2009 tot 24/10/2009, en kan beschouwd worden als een periode van twee representatieve springtij-doodtij-cycli.

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 10-minuutelijkse debieten opgelegd, afkomstig uit het NEVLA-model.

2.2.4 Tijdstap

Voor de gevoeligheidsanalyse werd gebruik gemaakt van een tijdstap van 0,125 min (~7,5 s). Omdat tijdens de gevoeligheidsanalyse bleek dat onder bepaalde parameterinstellingen lokaal numerieke instabiliteiten optraden, is er beslist om voor de eigenlijke scenarioberekeningen de tijdstap te verkleinen tot 0,05 min (3 sec). Bij deze tijdstip is het Courantgetal over het volledige modelgrid kleiner dan 15, en zelfs grotendeels kleiner dan 10.

2.2.5 Hydrodynamische modelparameters

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

Tabel 1 – Overzicht modelparameters

Parameter	Waarde (gevoeligheidsanalyse / scenarioberekeningen)
Time step	7,5 s / 3 s
Secondary flow	On
Initial condition water level	TAW +1,5 m
Horizontal eddy viscosity	1 m ² /s
HLES	Off
Aantal (verticale) lagen	1 (2D model)
Version Delft3D Flow	5.00.00.1234 (Linux)
Salt transport	Off
Wind	Off
Roughness formula	Manning
Bed roughness value	0,025 s/m ^{1/3}

2.3 Sedimenttransportmodellering

De berekeningen van het sedimenttransport zijn uitgevoerd met het Delft3D 'online' model, waarbij het sedimenttransport simultaan met de hydrodynamica berekend wordt. Het sedimenttransportmodel heeft geen terugkoppeling op het hydrodynamische model en morfologische veranderingen worden niet meegenomen.

2.3.1 Sedimentfracties

Aangezien de Beneden-Zeeschelde wordt gekarakteriseerd door sedimenttransport van zowel slib als zand, werd binnen het project "stortstrategie Beneden-Zeeschelde" (Vos *et al.*, 2016a; b), mede na advies van de Commissie Monitoring Westerschelde, beslist om beide fracties gezamenlijk te modelleren. Deze benadering verschilt van eerdere studies waarin de zand- en slibfractie afzonderlijk werd gemodelleerd.

In het model dienen een aantal sedimentkarakteristieken opgelegd te worden. De verschillende waarden werden identiek gehouden aan het eerdere onderzoek (Vos *et al.*, 2016a; b). Voor de zandfracties, welke het meest relevant is voor voorliggende analyse, werd een droge densiteit van 1600 kg/m^3 genomen (specifieke densiteit = 2650 kg/m^3) en werd een d50 van $130 \mu\text{m}$ gekozen. Deze keuze is gebaseerd op korrelgroottes van getransporteerde sedimenten tijdens een reeks 13u-metingen in de Zeeschelde (Plancke *et al.*, 2014). Indien het te storten sediment qua korrelgrootte afwijkt van deze waarden, kan dit een invloed hebben op het sedimenttransport en de ingeschatte stabiliteit. Echter, gedetailleerde informatie over de eigenschappen van de te storten specie is op dit moment niet beschikbaar. De initiële concentratie van het zand werd ruimtelijk constant gehouden en gelijk aan $0,03 \text{ kg/m}^3$.

2.3.2 Randvoorwaarden

Aan de op- en afwaartse randen van het model wordt een constante sedimentconcentratie opgelegd, afgeleid op basis van metingen (Vandenbruwaene *et al.*, 2016).

Aan de afwaartse rand wordt een waarde van $0,03 \text{ kg/m}^3$ opgelegd, voor zowel zand als slib. Aan de opwaartse rand te Terhagen wordt een waarde van $0,03 \text{ kg/m}^3$ opgelegd voor zand, en $0,1 \text{ kg/m}^3$ voor slib. Aan de opwaartse rand te Tielrode wordt een waarde van $0,03 \text{ kg/m}^3$ opgelegd voor zand, en $0,3 \text{ kg/m}^3$ voor slib. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de sedimentconcentratie ter hoogte van Driegoten sterke seizoenale variaties vertoont, waarbij de sedimentconcentratie in de winter (hoge bovenafvoer) aanzienlijk lager is dan in de zomer (lage bovenafvoer).

2.3.3 Dikte bodemsedimentlaag

De dikte van de bodemsedimentlaag ("initial sediment layer thickness at bed") werd ruimtelijk variërend opgelegd. De waarden voor de zand- en slibfractie werden berekend op basis van zowel de lithologische kaart (aandeel zand en slib) en de dikte van de erodeerbare lagen, die bepaald werd op basis van het verschil tussen de bathymetrie en de diepte van de harde laag. Voor meer informatie wordt verwezen naar Vos *et al.* (2016).

2.3.4 Modelvalidatie

In Coen *et al.* (2016) werd het in deze studie gebruikte model uitvoerig gevalideerd voor het slibtransport ten opzichte van beschikbare metingen. De validatie werd uitgevoerd voor zowel continue metingen op 3 vaste meetlocaties in het estuarium (Boei84, Oosterweel en Driegoten), als voor de sedimentconcentratie langsheen het estuarium op basis van periodieke vaarten. Op basis van de continue metingen werd tevens een specifieke validatie uitgevoerd die gericht was op het effect van stortingen: hierbij werd een periode van

intensieve stortingen gevolgd door een periode zonder storten geselecteerd en werd dit door het model gereproduceerd.

In Vos *et al.* (2016) werd het in deze studie gebruikte model uitvoerig gevalideerd voor het zandtransport ten opzichte van beschikbare metingen. De validatie werd uitgevoerd voor zowel het zandtransport op enkele vaste punten (13u-metingen) als de morfologie. Aangezien de vastgestelde morfologische veranderingen niet goed door het model werden gereproduceerd, werd in Vos, Meire *et al.* (2016) besloten om de scenario-analyse uit te voeren op basis van de sedimenttransporten zonder morfologische veranderingen in het model toe laten. Deze methodologie wordt ook in voorliggend rapport gevolgd.

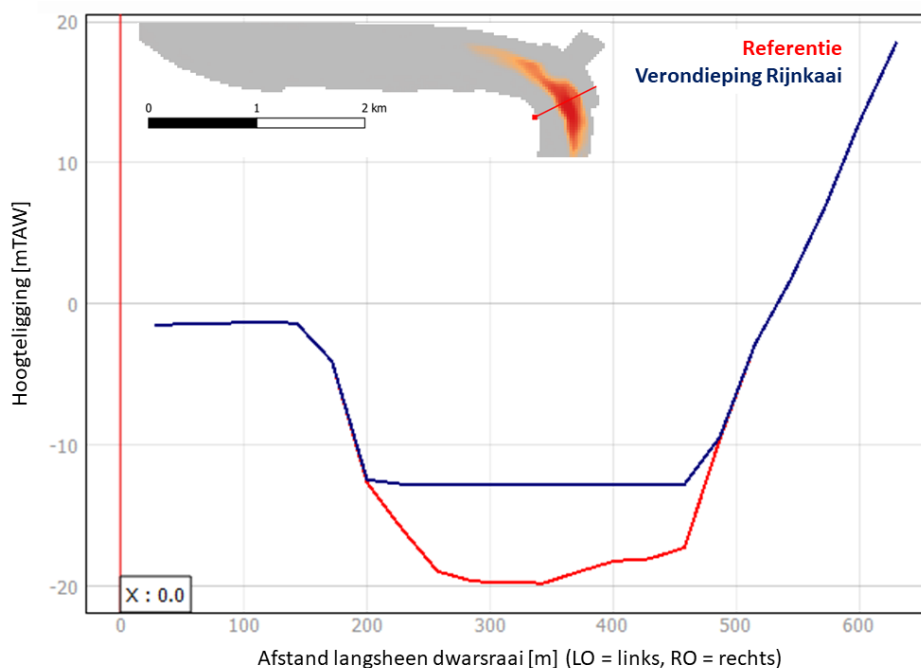
Tabel 2 – Waarden modelparameters na kalibratie

Parameter		Waarde
Ruwheid		0,025
Valsnelheid w_s (mm/s)		2,0 – 0,2
Kritische erosieschuifspanning $\tau_{cr,erosie}$ (N/m ²)		0,4 – 0,8
Kritische sedimentatieschuifspanning $\tau_{cr,sed}$ (N/m ²)		1000
Erosieparameter M_E (kg/m ² /s)		$8,0 \cdot 10^{-4}$
Sedimentconcentratie afwaartse rand (kg/m ³)	zand	0,03
	slib1	0,015
	slib2	0,015
Sedimentconcentratie opwaartse rand Terhagen (kg/m ³)	zand	0,03
	slib1	0,05
	slib2	0,05
Sedimentconcentratie opwaartse rand Tielrode (kg/m ³)	zand	0,03
	slib1	0,15
	slib2	0,15
Initiële sedimentconcentratie (kg/m ³)	zand	0,03
	slib1	0,15
	slib2	0,15
Initiële dikte sedimentbodemiaag (m)		grid
Specifieke dichtheid (kg/m ³)		2650
Droge dichtheid (kg/m ³)	zand	1600
	slib1	550
	slib2	550

3 Scenarioberekening

3.1 Bodemligging

Het te onderzoeken scenario betreft een verondieping van de diepe delen ter hoogte van de Rijnkaai tot op een diepte van -12,8 mTAW¹. De verschillende bodemliggingen zoals in het numerieke model geïmplementeerd zijn terug te vinden in Figuur 8. Figuur 4 geeft de aangebrachte verondieping weer ter hoogte van een dwarsraai doorheen de diepe put van de Rijnkaai. Hierop is duidelijk te zien dat de initiële diepteligging zich situeert rond -20 mTAW, waardoor het scenario neerkomt op een verondieping tot 7 m.

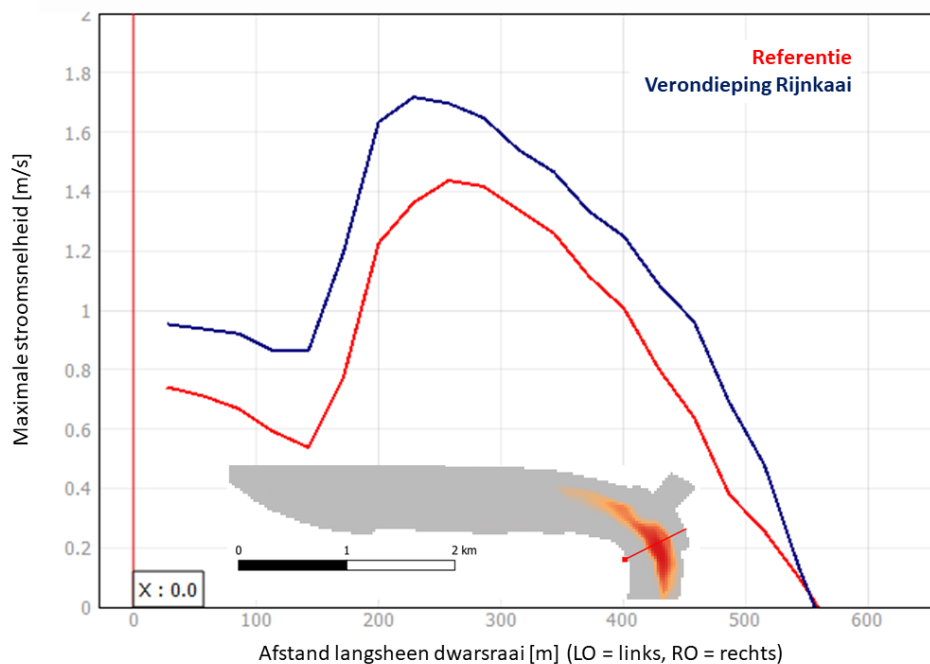


Figuur 4 – Bodemligging ter hoogte van dwarsraai doorheen diepe put Rijnkaai

3.2 Waterbeweging

Met behulp van het numerieke model werden de stroomvelden gegenereerd die als brondata dienen voor de simulatorstudie. De verschillende stroomvelden zijn weergegeven in Bijlage 1; Stroomvelden t.h.v. het studiegebied. Figuur 9 geeft het ruimtelijke beeld van de maximale stroomsnelheid in het referentiescenario en het scenario met verondiepte diepe delen. Uit de verschilkaart blijkt dat ter hoogte van de verondieping de maximale stroomsnelheid tot 40 cm/s toeneemt. Deze toename manifesteert zich vooral ter hoogte van de verondieping, maar ook in de op- en afwaartse richting zijn wijzigingen in de maximale stroomsnelheid waar te nemen. Dit is toe te schrijven aan de wijziging in de verdeling van de stroming over de dwarssectie (Figuur 5): de sterkste wijzigingen treden niet enkel op ter hoogte van de grootste verondieping maar ook dichterbij de oevers (getijstrooming wordt “uitgesmeerd” over de breedte van de dwarssectie). Deze herverdeling van de stroming ter hoogte van de verondieping resulteert in wijzigingen in de op- en afwaartse gebieden.

¹ Voor de conversie mTAW naar mLAT werd een verschil van 77 cm gehanteerd, wat representatief is voor Antwerpen-Loodsgebouw.



Figuur 5 – Maximale stroomsnelheid ter hoogte van dwarsraai doorheen diepe put Rijnkaai

3.3 Sedimenttransport en stabiliteit specie

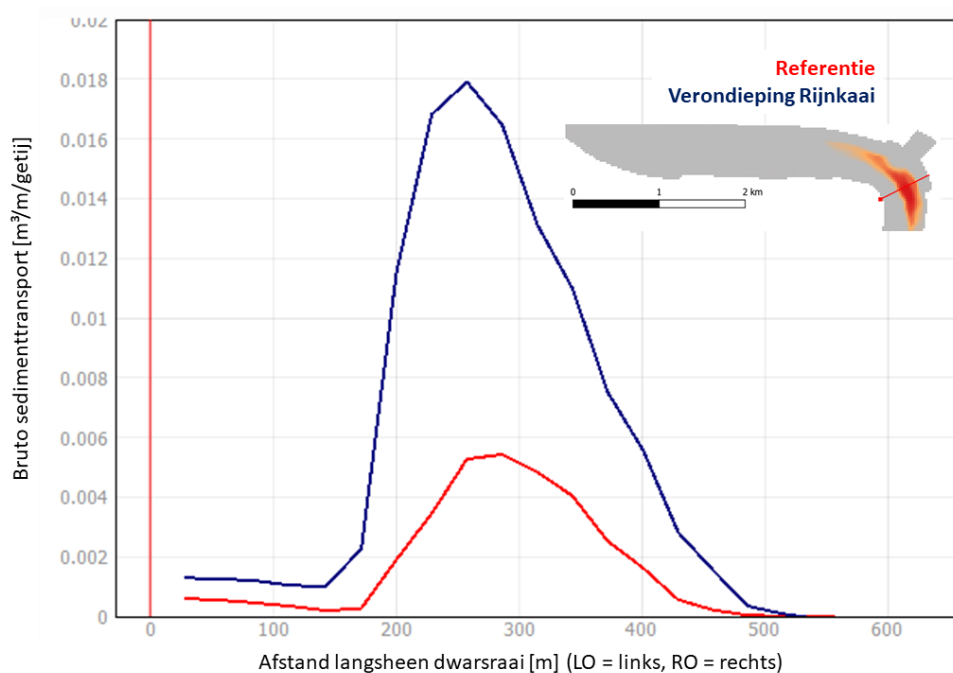
Naast de variatie in stroomsnelheid, werden met behulp van het numerieke model de veranderingen in sedimenttransport gemodelleerd. Het betreft de initiële sedimenttransporten die worden berekend ten gevolge van de aanpassingen in de bodemligging.

Figuur 10 geeft het ruimtelijke beeld van de bruto² sedimenttransporten in het referentiescenario en het scenario met verondiepte diepe delen. Uit de verschilkaart blijkt dat ter hoogte van de verondieping de bruto sedimenttransporten toenemen. Dit wijst erop dat de aangebrachte specie de neiging zal hebben om geërodeerd te worden. Figuur 6 geeft de verandering weer ter hoogte van een dwarssectie door de diepe delen ter hoogte van de Rijnkaai: het sedimenttransport neemt hier met een factor 3 toe, wat doet vermoeden dat de stabiliteit eerder beperkt zal zijn.

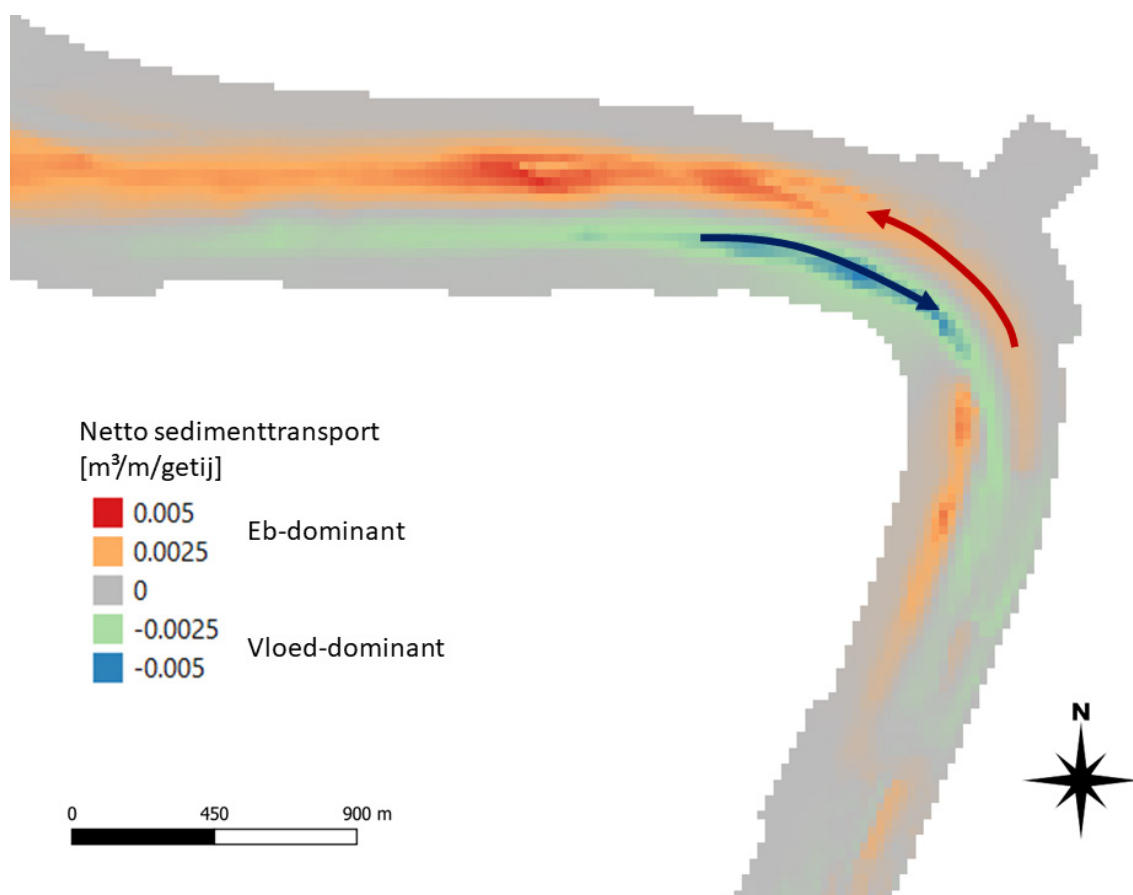
De netto³ sedimenttransporten in het scenario met verondiepte diepe delen geeft een indicatie van de richting waarin het sediment zich kan verspreiden. Ter hoogte van de verondieping is het sedimenttransport in de buitenbocht eb-dominant, terwijl in de binnenbocht vloed-dominantie heerst. De inschatting is dat het sediment zich dus in beide richtingen kan verplaatsen. De opge vulde diepere delen situeren zich vooral in de buitenbocht, waardoor deze dus eerder onderhevig zijn aan eb-dominant transport. Over de tijdschaal waarop de erosie zal plaatsvinden, kan geen uitspraak gedaan worden.

² Dit is de som van de absolute waarde van het sedimenttransport bij eb en bij vloed.

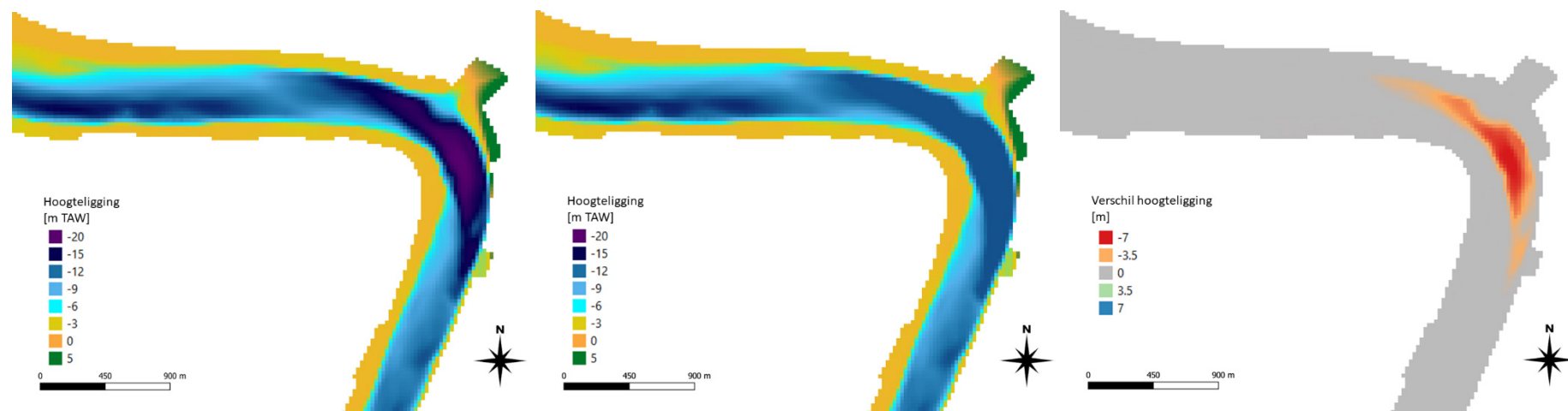
³ Dit is het verschil van de absolute waarde van het sedimenttransport bij eb en bij vloed.



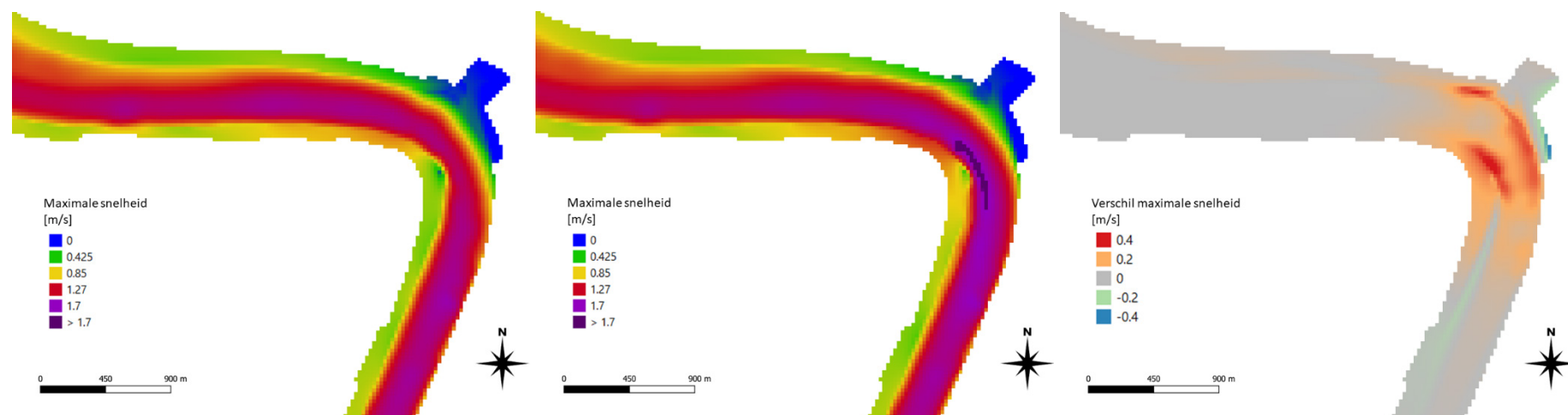
Figuur 6 – Bruto sedimenttransport ter hoogte van dwarsraai doorheen diepe put Rijnkaai



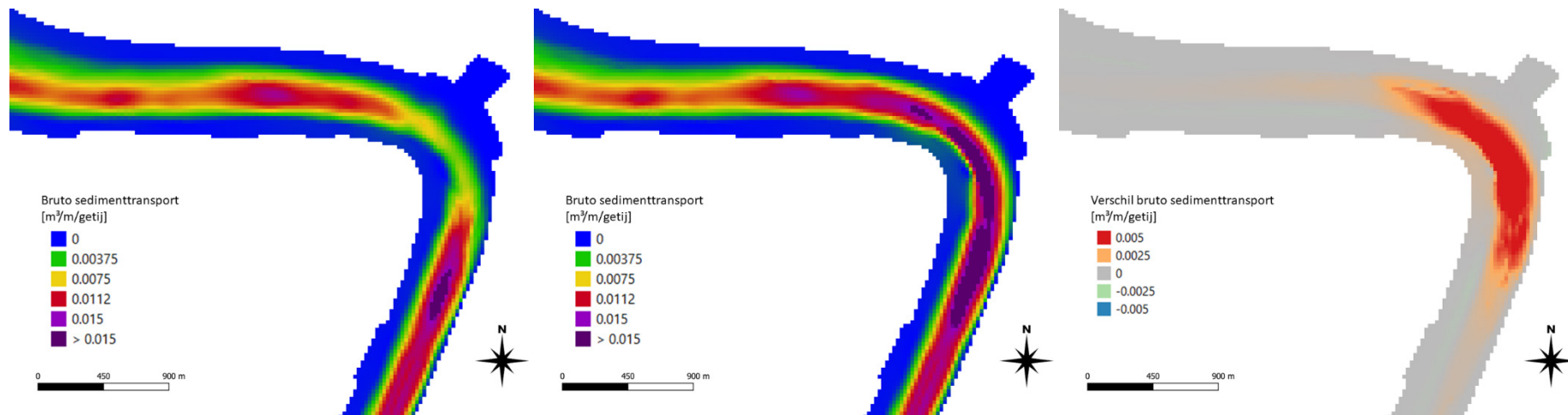
Figuur 7 – Netto sedimenttransport ter hoogte van dwarsraai doorheen diepe put Rijnkaai (scenario met verondieping)



Figuur 8 – Bodemligging: referentie (links), verondieping Rijnkaai (midden) en verschil



Figuur 9 – Maximale stroomsnelheid: referentie (links), verondieping Rijnkaai (midden) en verschil



Figuur 10 – Bruto sedimenttransport: referentie (links), verondieping Rijnkaai (midden) en verschil

4 Conclusies

In het kader van de werken voor de Oosterweelverbinding wordt overwogen aanlegbaggerspecie te bergen ter hoogte van de diepe delen in de vaargeul ter hoogte van de Rijnkaai. Om de invloed van dergelijke stortingen op de nautische veiligheid na te gaan, worden vaarsimulaties uitgevoerd voor dit scenario. Ten behoeve van deze vaarsimulaties werden met behulp van het 2D-hydrodynamisch Delft3D model stroomvelden aangeleverd. Uit de vergelijking met de referentietoestand, blijkt dat de verondieping van de diepe delen lokaal neerkomt op een verondieping tot ca. 7 m. Dit beïnvloedt de stroming, waarbij er ter hoogte van de stortzone een toename tot 40 cm/s kan vastgesteld worden op de maximale stroomsnelheden. Dergelijke toename zorgt eveneens voor een toename in het sedimenttransport, waardoor de stabiliteit van de gestorte specie eerder beperkt zal zijn. Een analyse van de verspreiding van deze specie valt buiten de scope van deze oefening, waarbij tevens dient opgemerkt worden dat de numerieke modellen voor dergelijke “verspreidingsberekeningen” omvat zijn met belangrijke beperkingen.

5 Referenties

Coen, L.; De Maerschalck, B.; Plancke, Y.; Mostaert, F. (2018). Advies stortstrategie Oosterweel-tunnel (BAM): deelrapport 1. Scenarioberekeningen voor het terugstorten van baggerspecie die vrijkomt bij de aanleg van de tunnelsleuf. Versie 3.0. *WL Rapporten*, 17_108_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Coen, L.; De Maerschalck, B.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016). Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde: deelrapport 1. Opzet en validatie slibmodel. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 14_025. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Maximova, T.; Vanlede, J. (2011). Flow in river bends: A numerical model investigation [POSTER]. Flanders Hydraulics Research: Antwerp

Maximova, T.; Vanlede, J.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2013). Habitatmapping ondiep water Zeeschelde: deelrapport 2 - Numeriek 2D model. *WL Rapporten*, 00_028. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerp

Plancke, Y.; De Maerschalck, B.; Mostaert, F. (2019). Advies stortstrategie Oosterweel-tunnel (BAM): scenarioberekeningen voor het terugstorten van baggerspecie ter hoogte van de Schaar van Ouden Doel. Versie 5.0. *WL Rapporten*, 18_154_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Plancke, Y.; Vereecken, H.; Vanlede, J.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2014). Integraal plan Boven-Zeeschelde: deelrapport 3. Factual data-rapport sediment transportmetingen in de Zeeschelde in 2014. *WL Rapporten*, 13_131. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Vandenbruwaene, W.; Vanlede, J.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016). Slibbalans Zeeschelde: deelrapport 4. Historische evolutie SPM. versie 6.0. *WL Rapporten*, 00_029_4. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. 74 + 4 p. bijlagen pp.

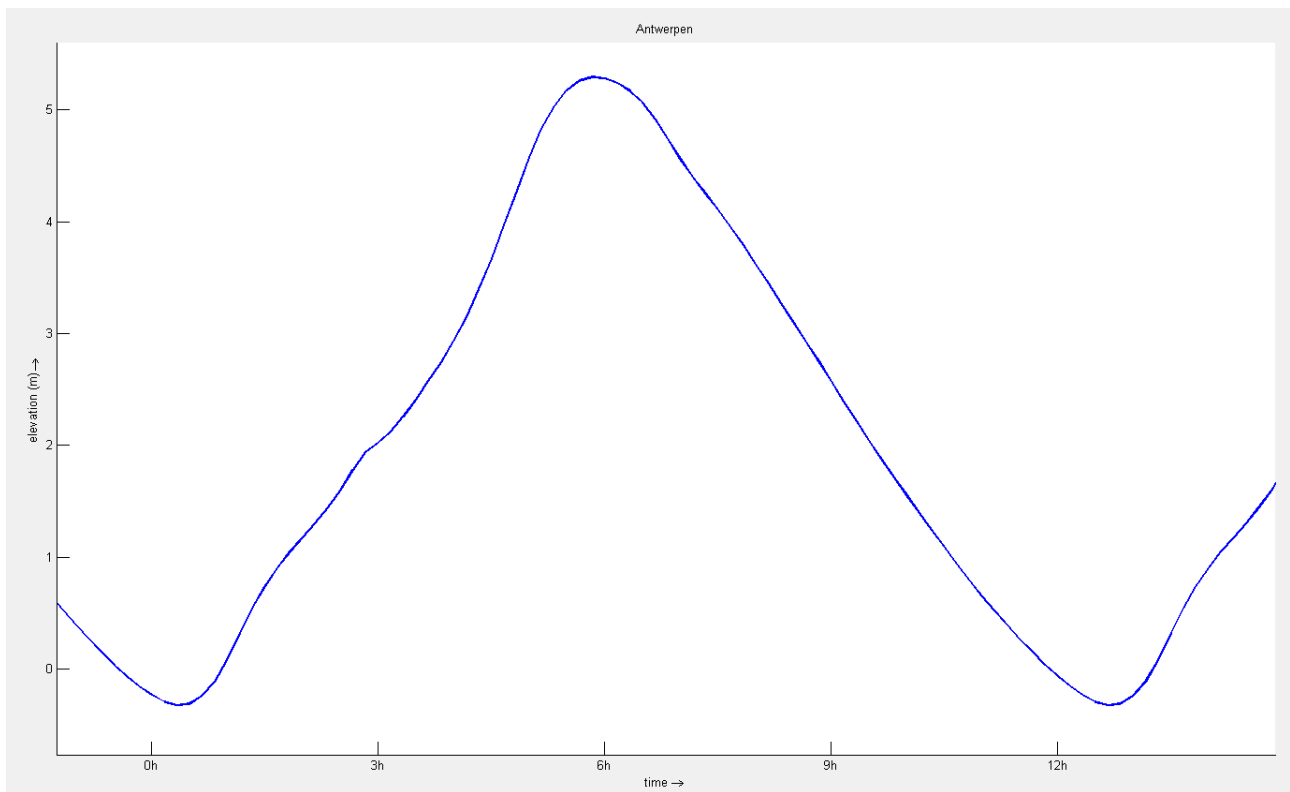
Verheyen, B.; Vanlede, J.; Decrop, B.; Mostaert, F. (2012). NEVLA3D randvoorwaardenmodel: deelrapport 6. Scenarioberekeningen LTV zandhuishouding. *WL Rapporten*, 00_018. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Vos, G.; De Maerschalck, B.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F.; Coen, L.; De Maerschalk, B.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016a). Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde: deelrapport 2. Opzet en validatie zandmodel. *WL Rapporten*, 14_025. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

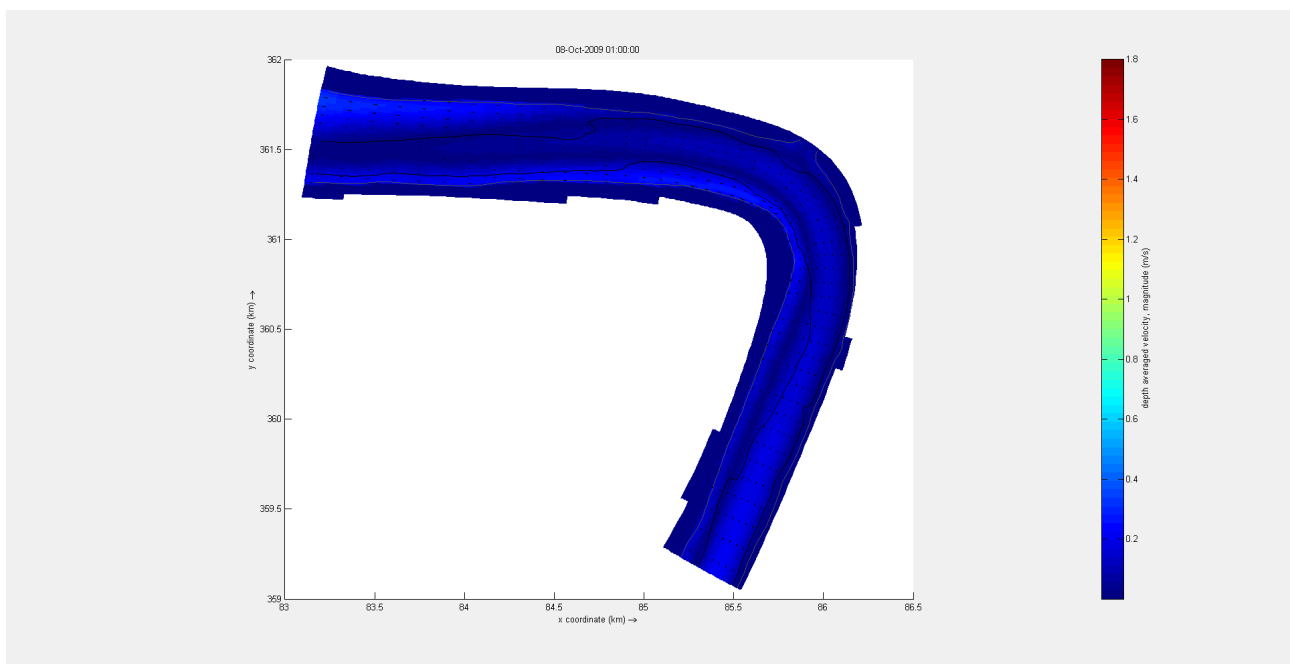
Vos, G.; Meire, D.; De Maerschalck, B.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016b). Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde: deelrapport 4. Zandscenario's. *WL Rapporten*, 14_025. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

WL/Delft Hydraulics. (2007). Delft3D-FLOW. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User manual.

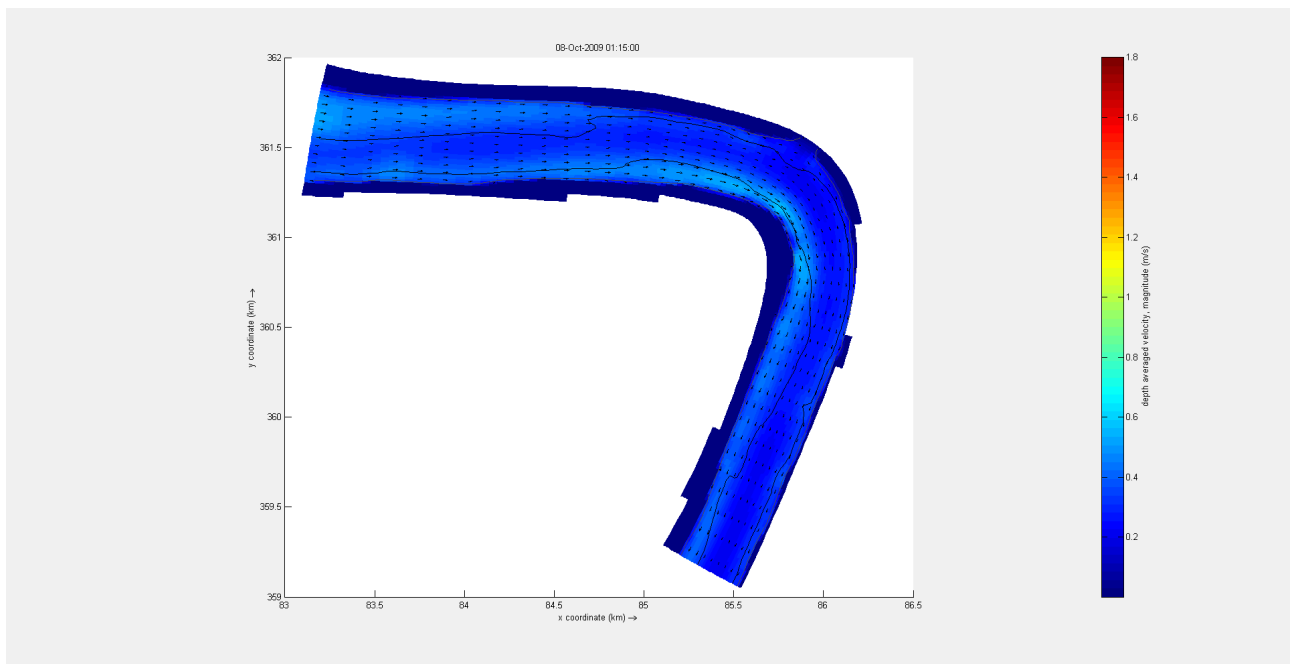
Bijlage 1 Stroomvelden t.h.v. het studiegebied



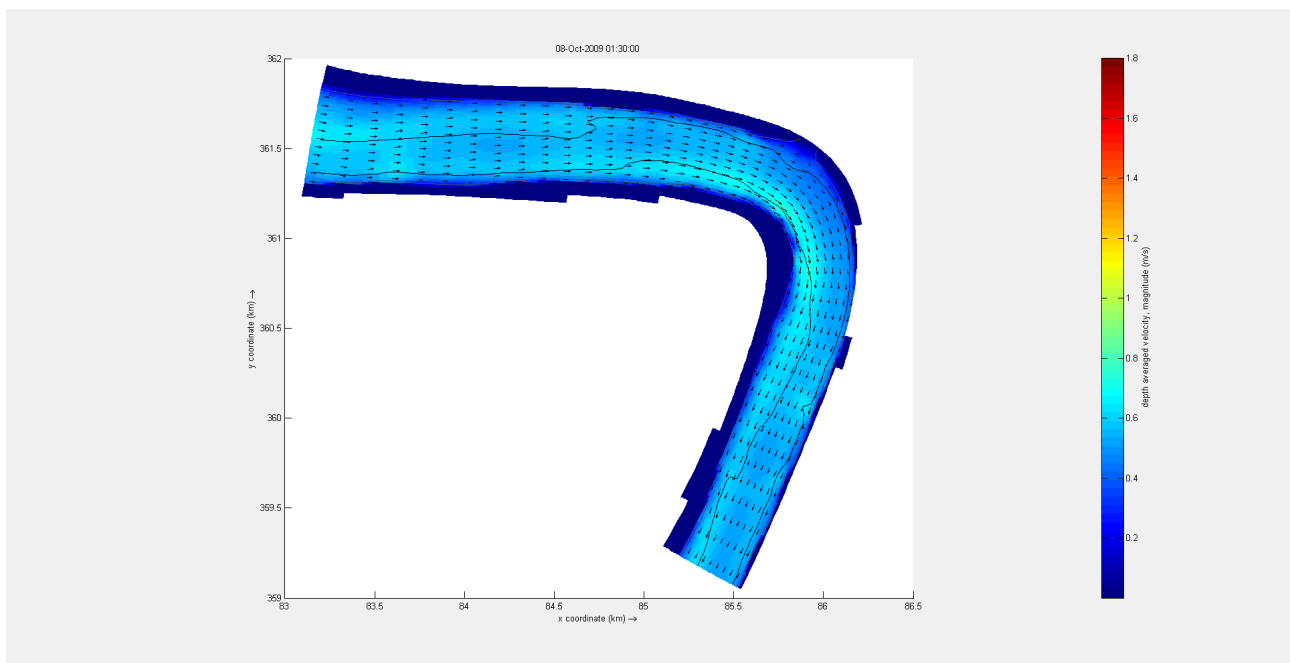
Figuur 11 – Waterstand te Antwerpen-Loodsgebouw voor de periode van uitgevoerde stroomvelden



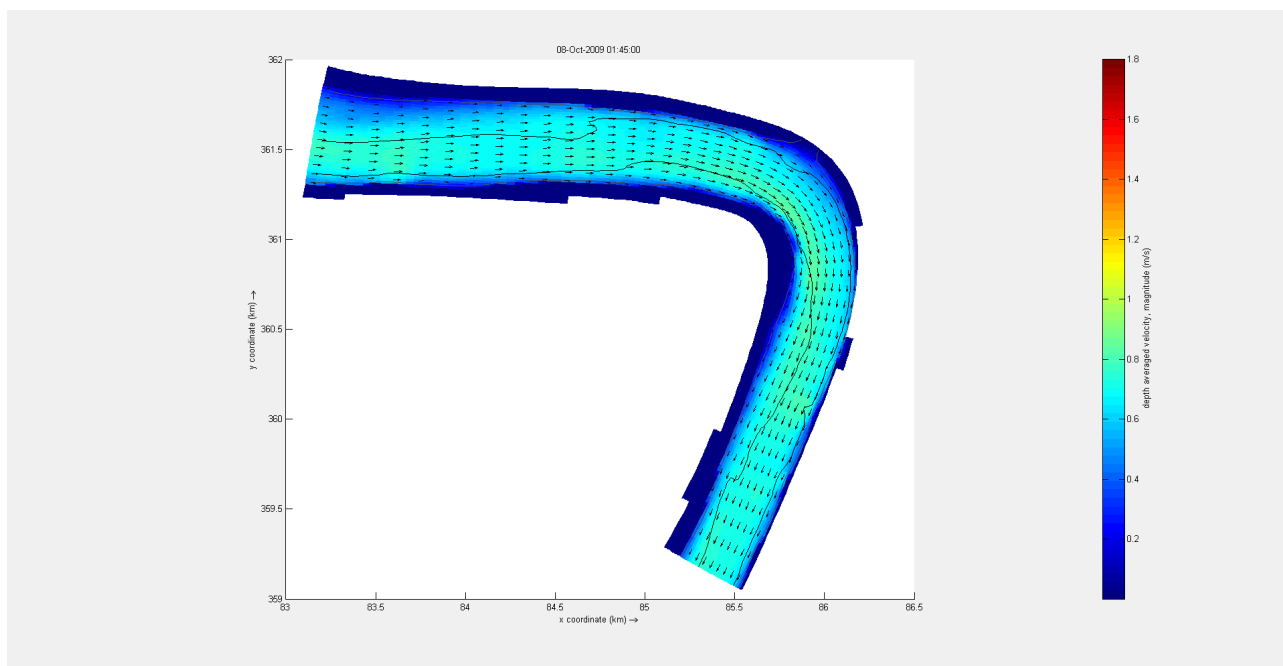
Figuur 12 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai (T = HW – 290')



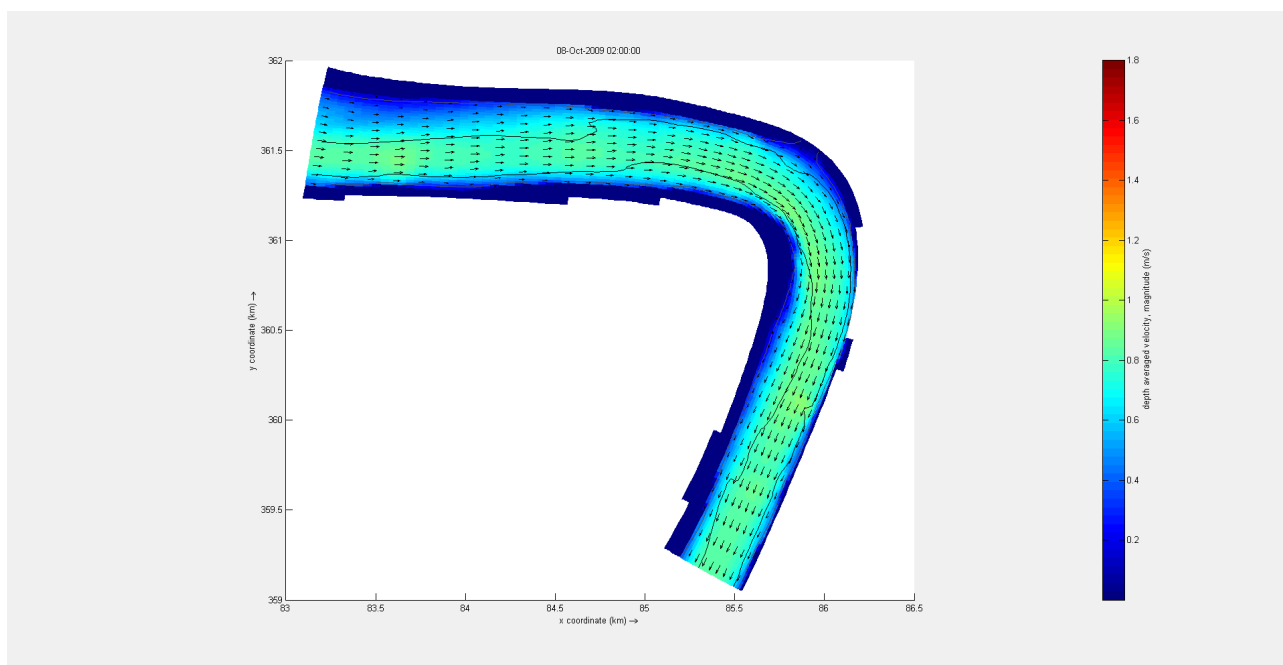
Figuur 13 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW - 275'$)



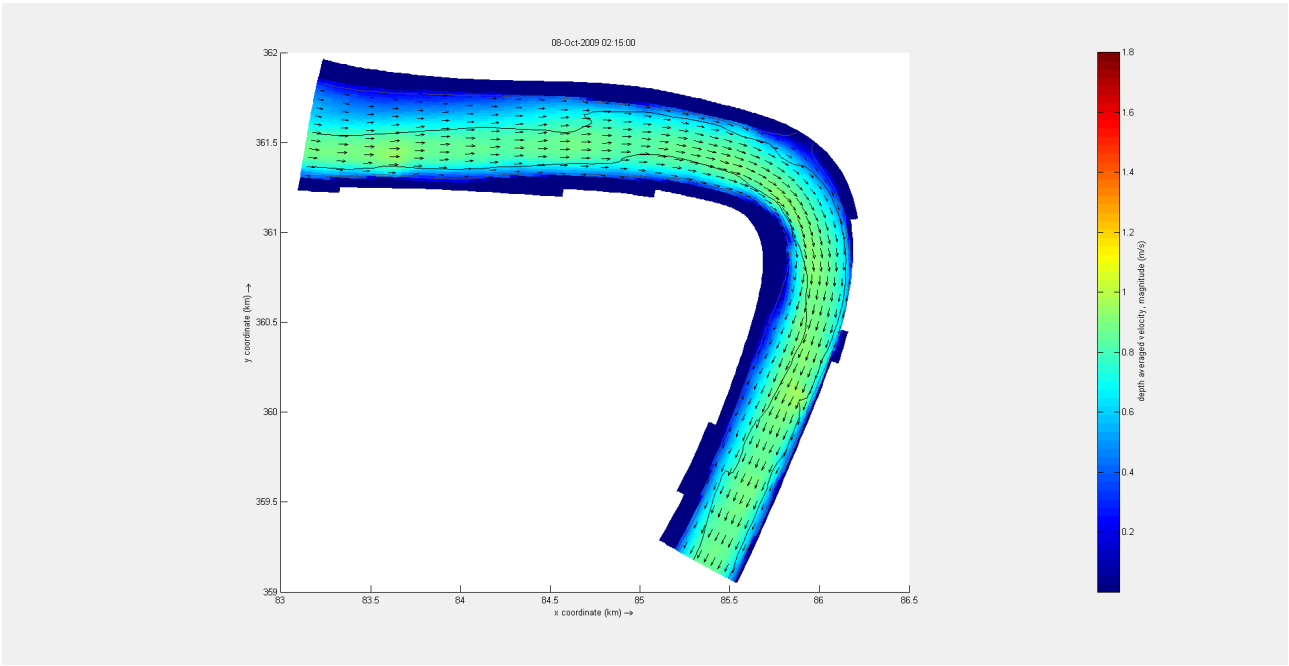
Figuur 14 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW - 260'$)



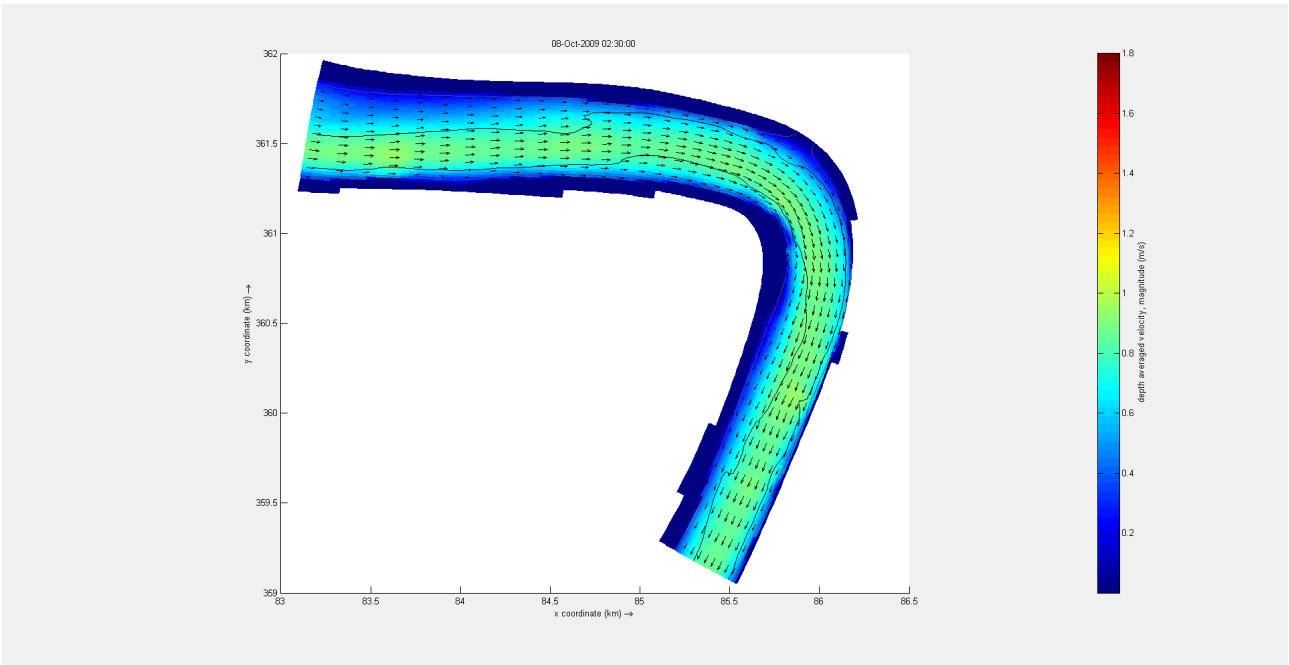
Figuur 15 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW - 245'$)



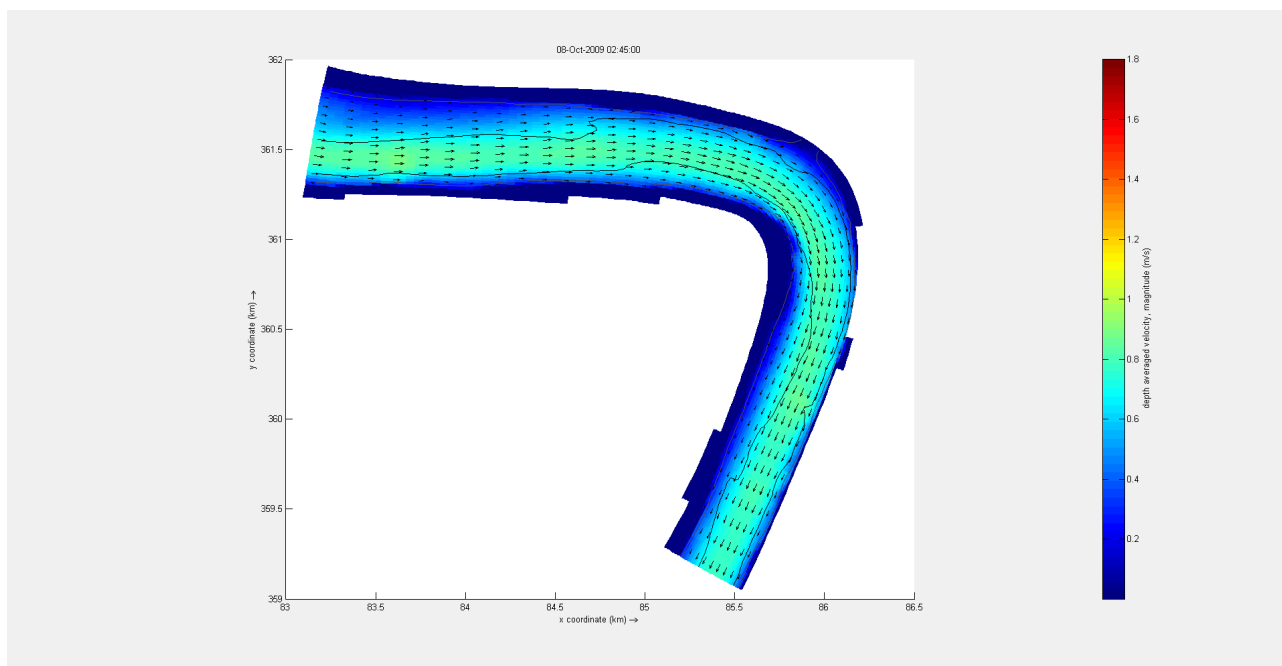
Figuur 16 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW - 230'$)



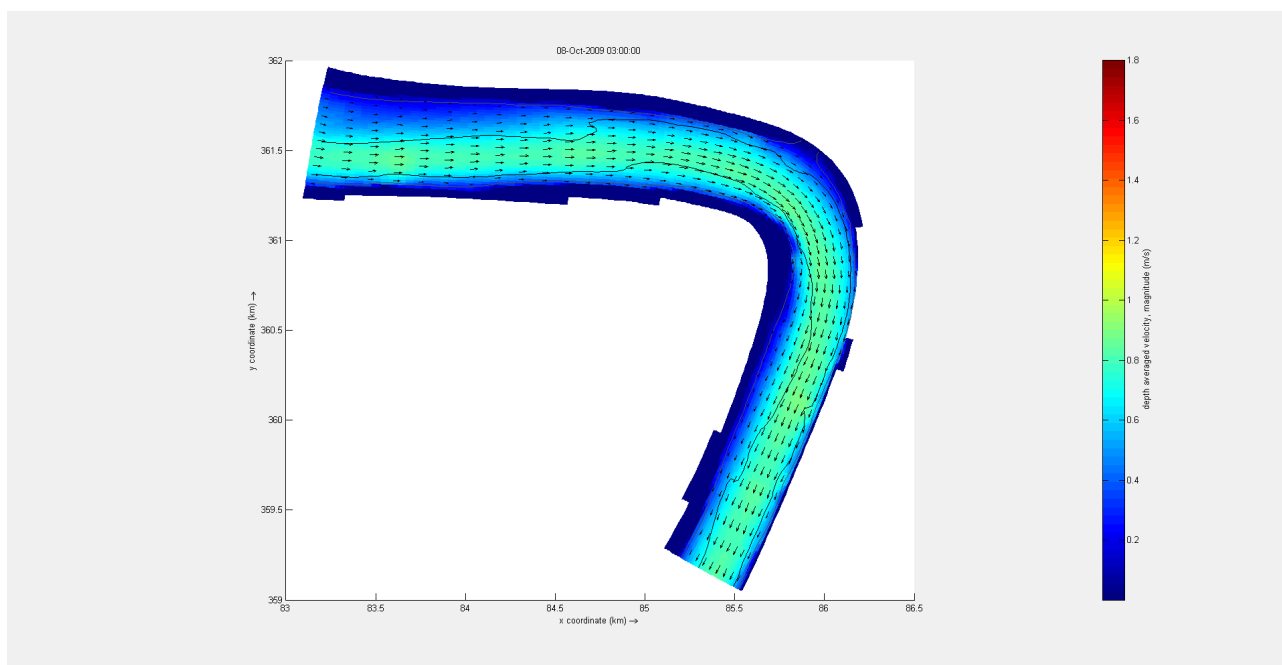
Figuur 17 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai (T = HW – 215’)



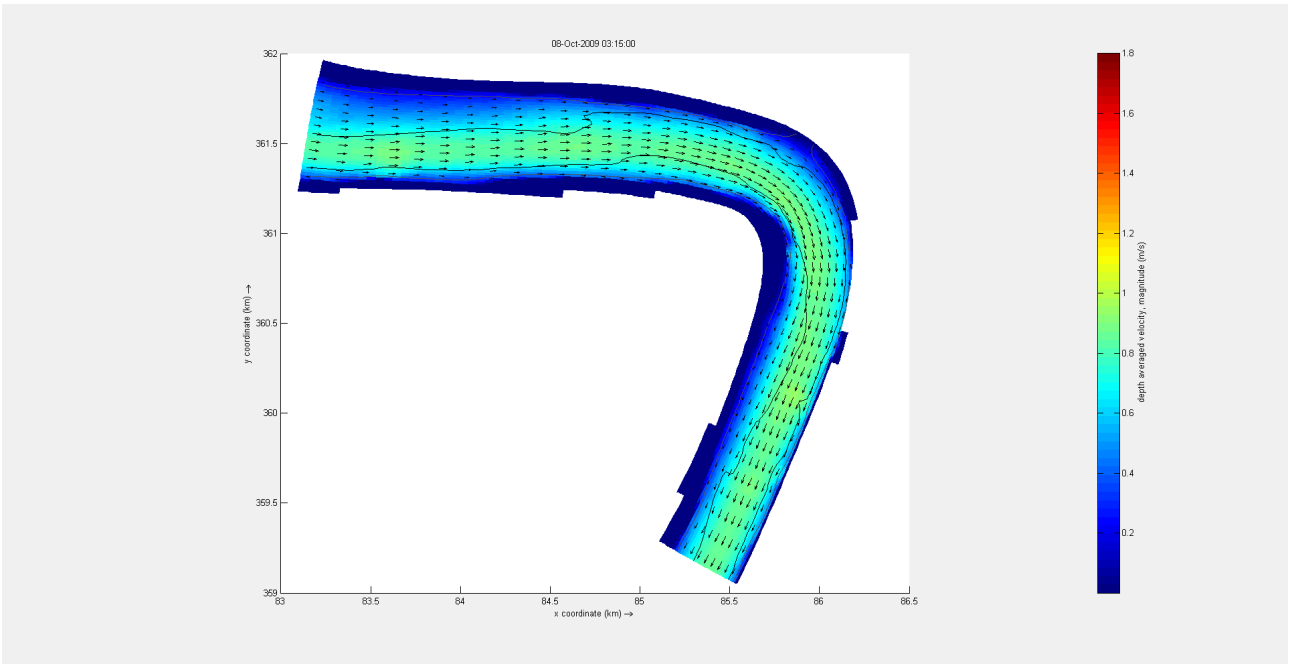
Figuur 18 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai (T = HW – 200’)



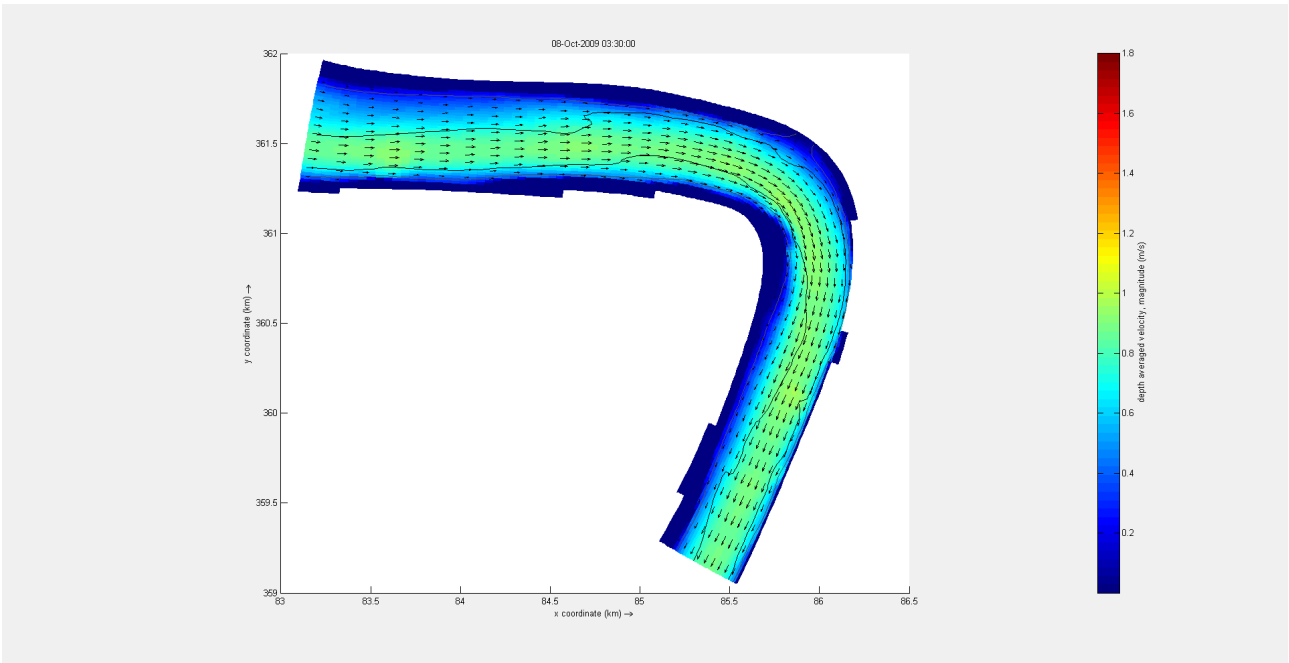
Figuur 19 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW - 185'$)



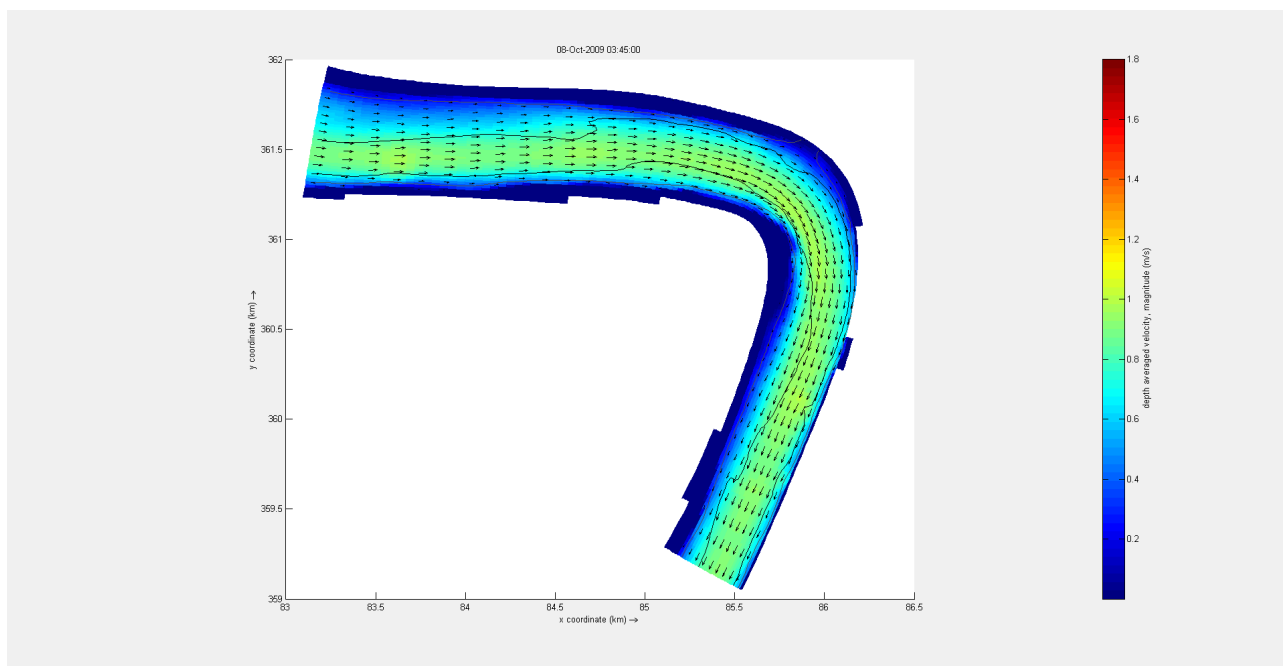
Figuur 20 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW - 170'$)



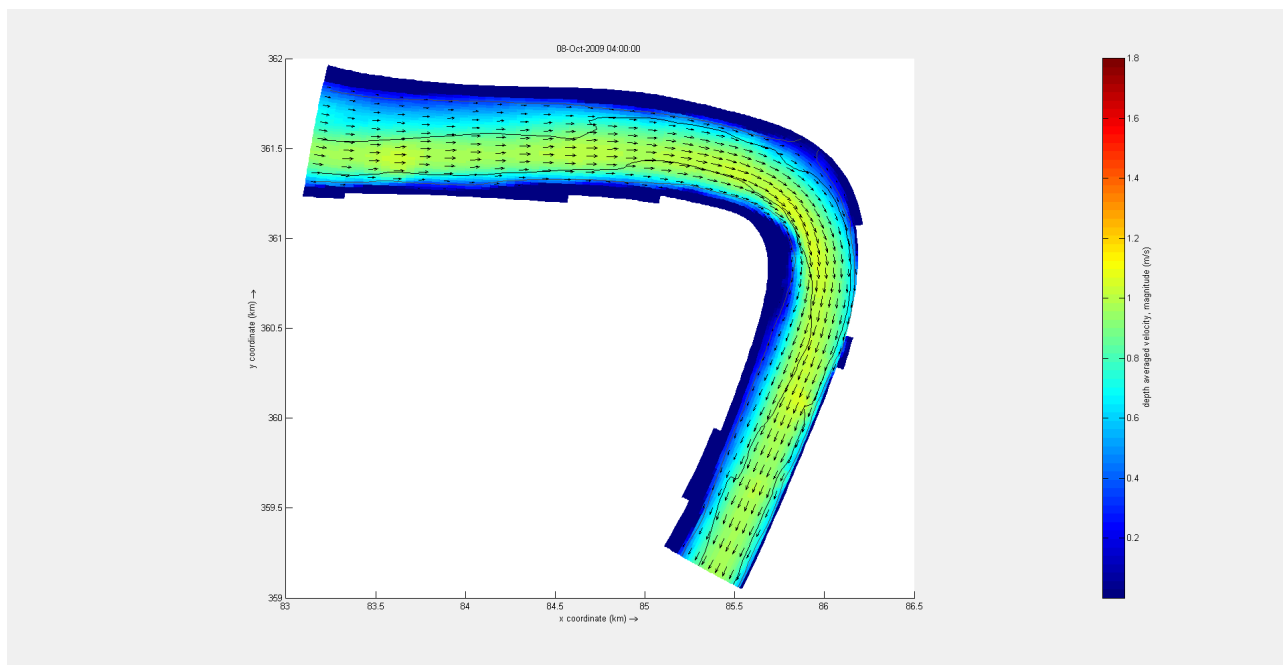
Figuur 21 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai (T = HW – 155’)



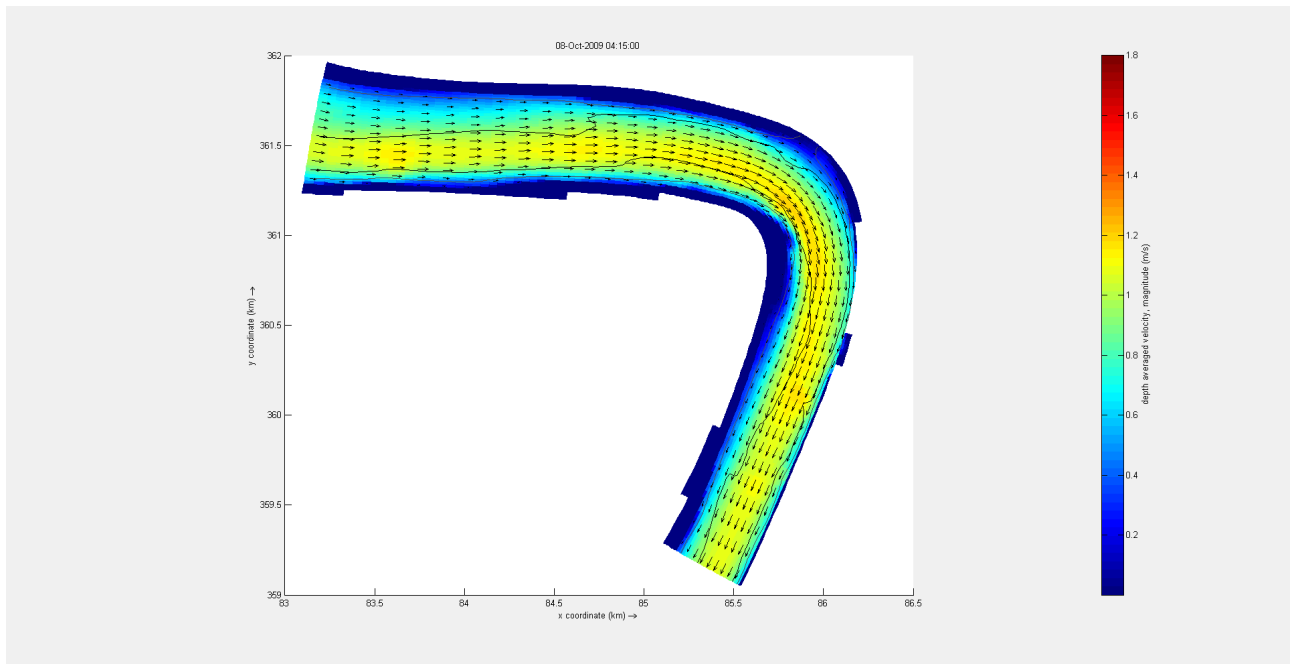
Figuur 22 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai (T = HW – 140’)



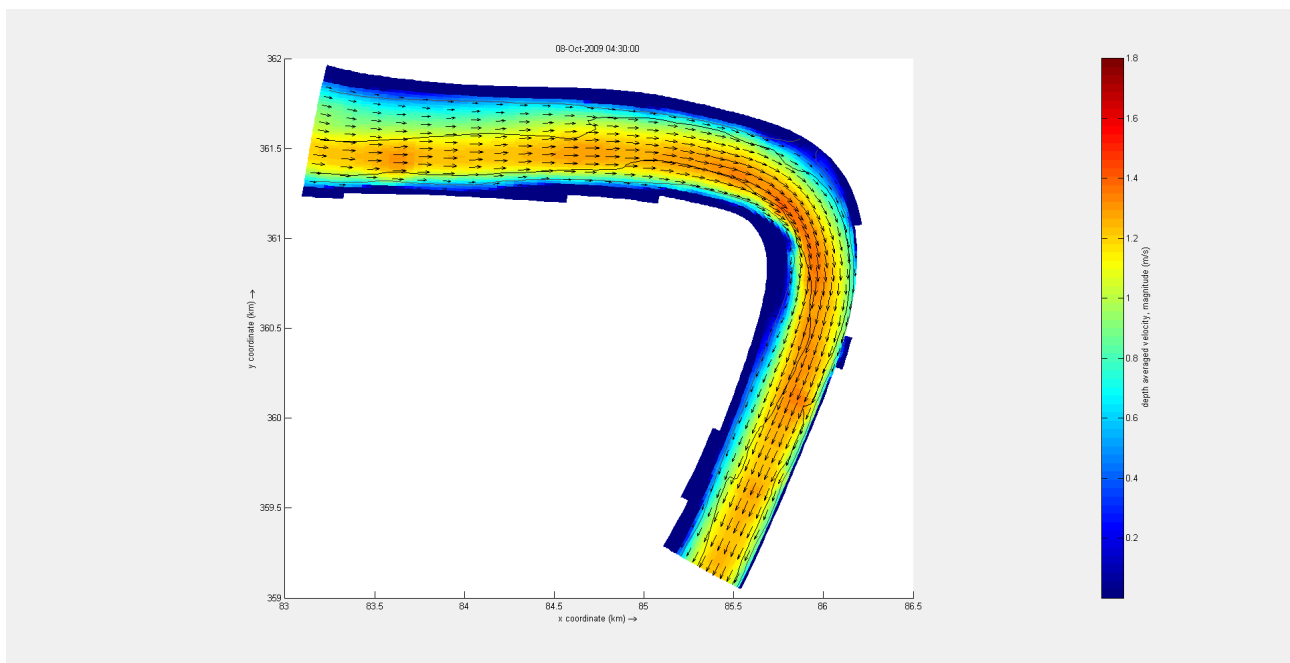
Figuur 23 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW - 125'$)



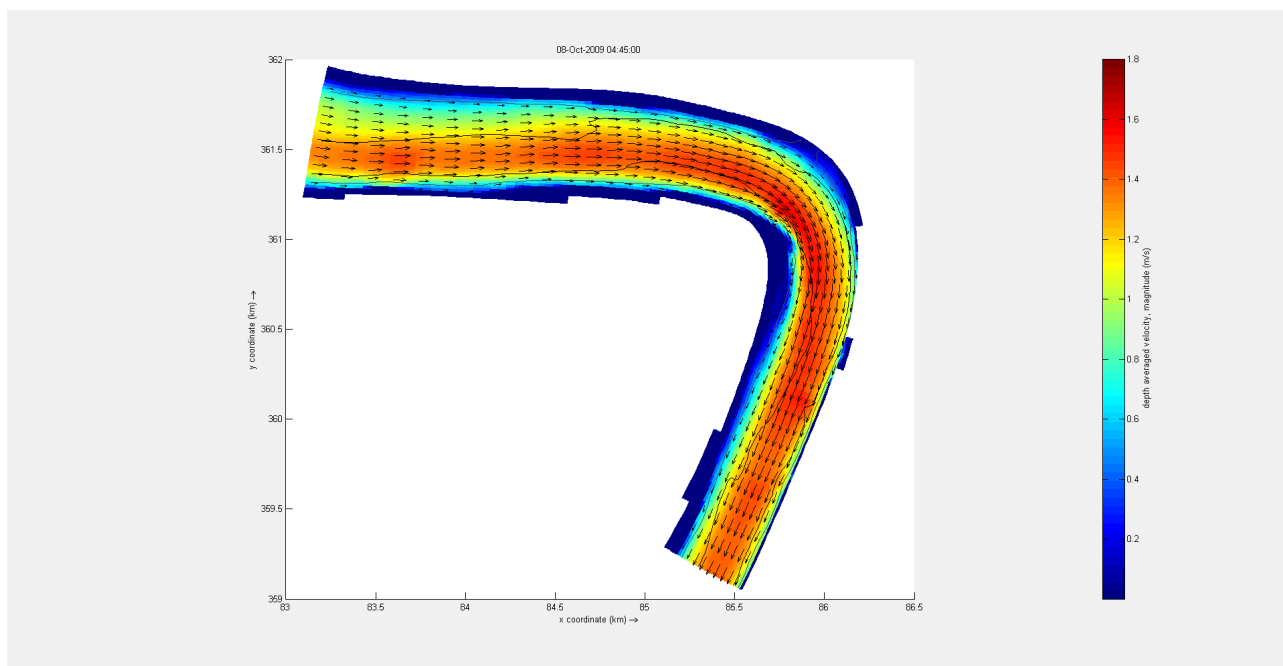
Figuur 24 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW - 110'$)



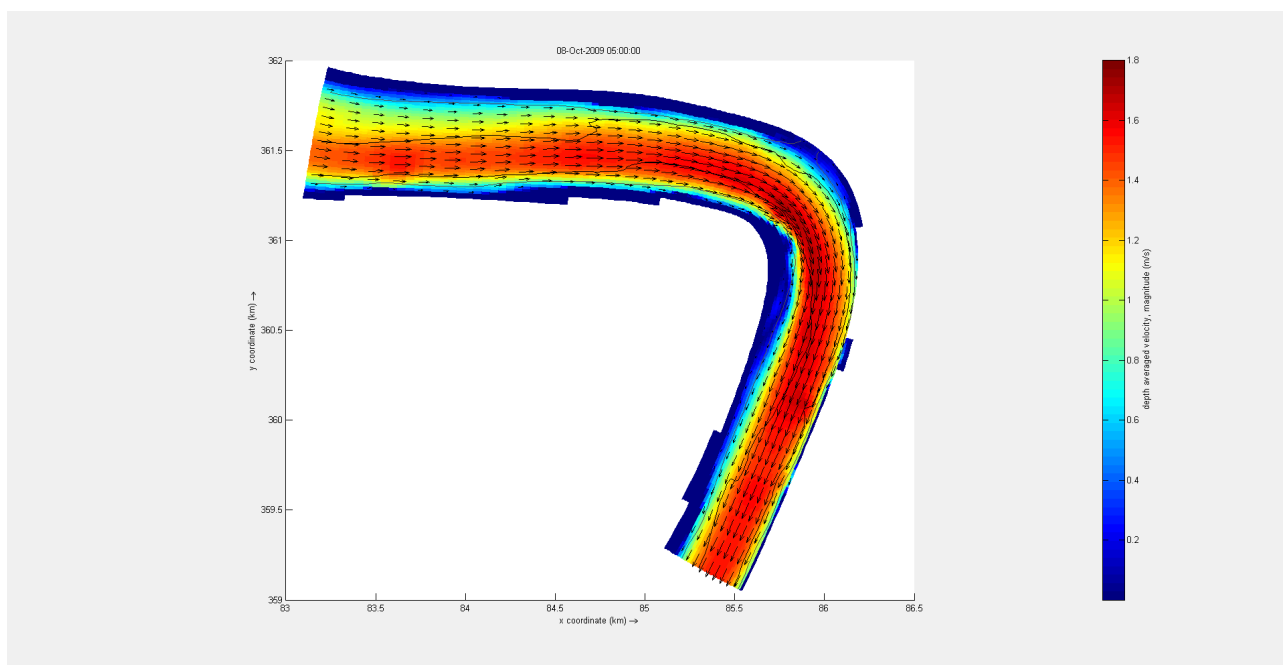
Figuur 25 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai (T = HW – 95')



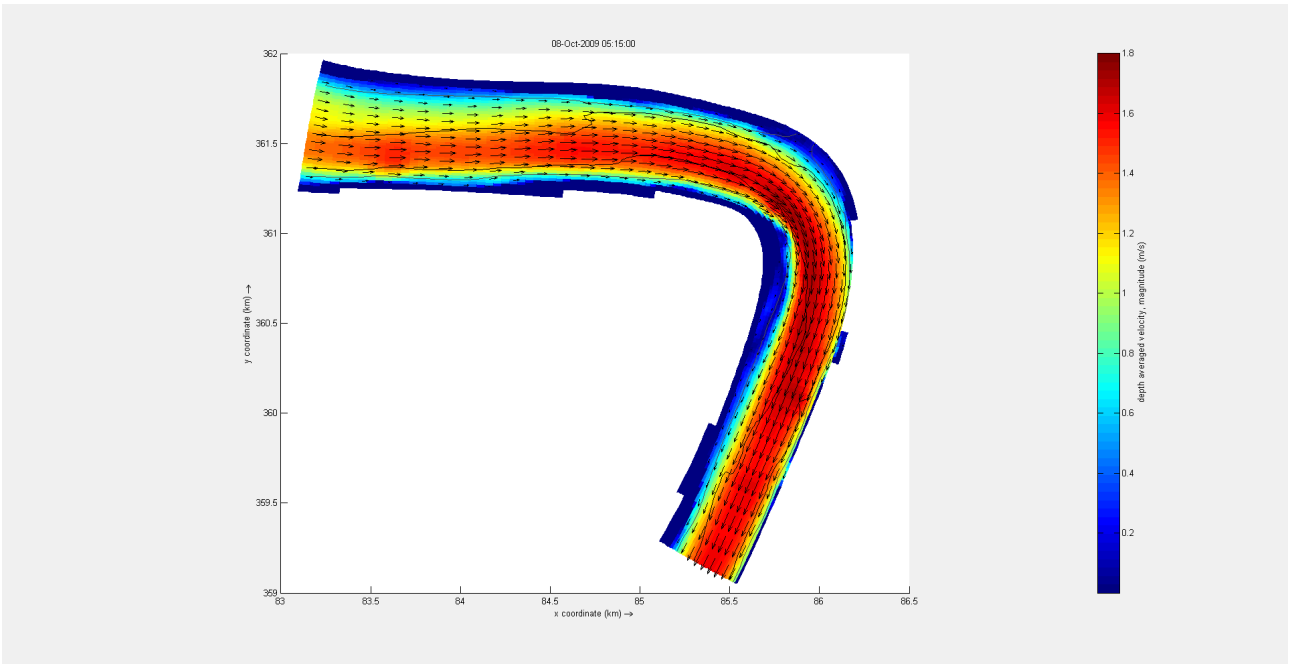
Figuur 26 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai (T = HW – 80')



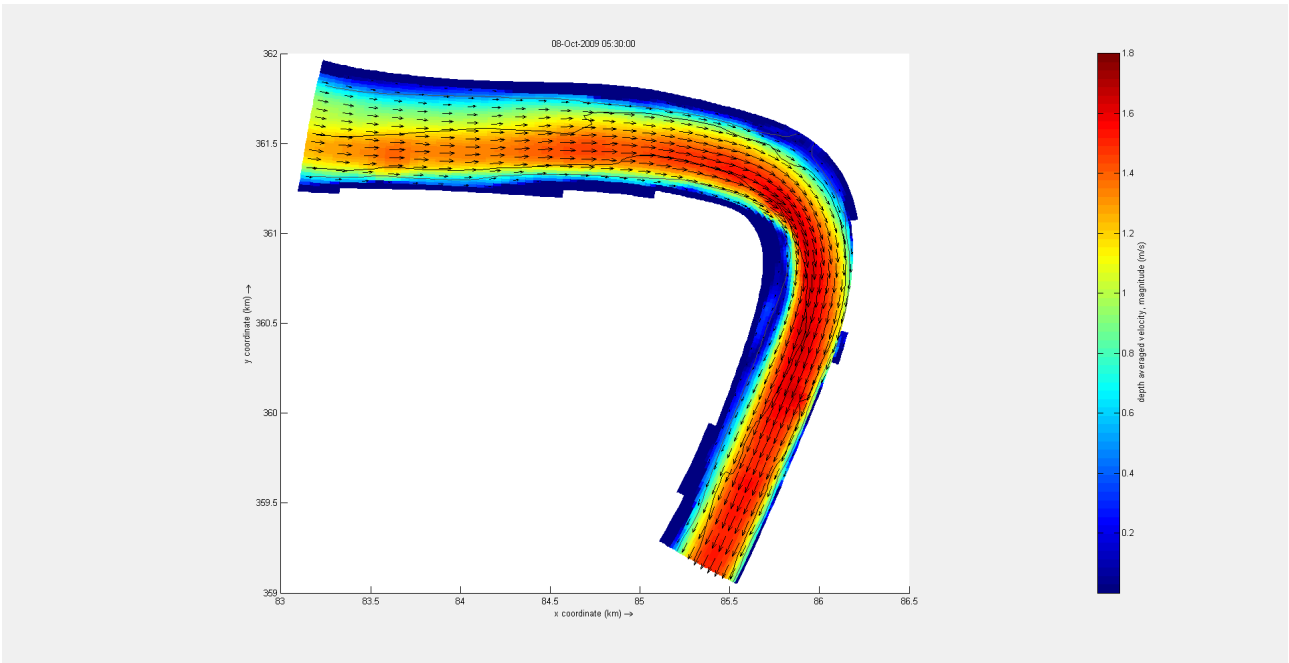
Figuur 27 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai (T = HW – 65')



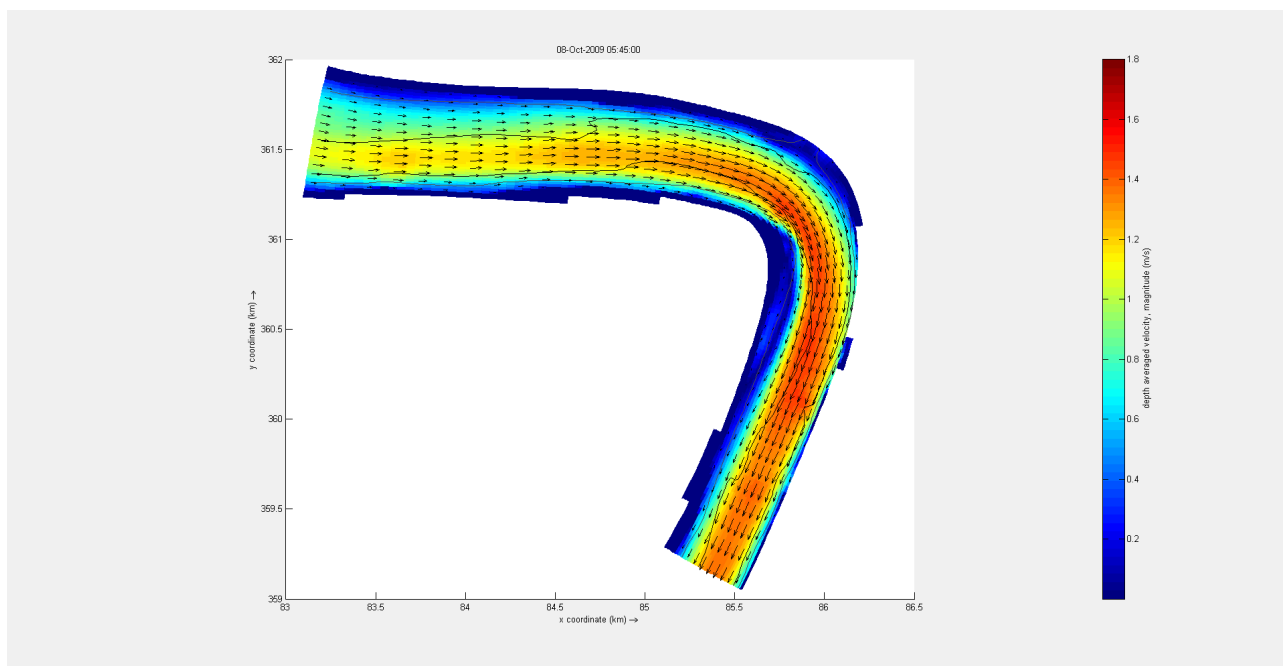
Figuur 28 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai (T = HW – 50')



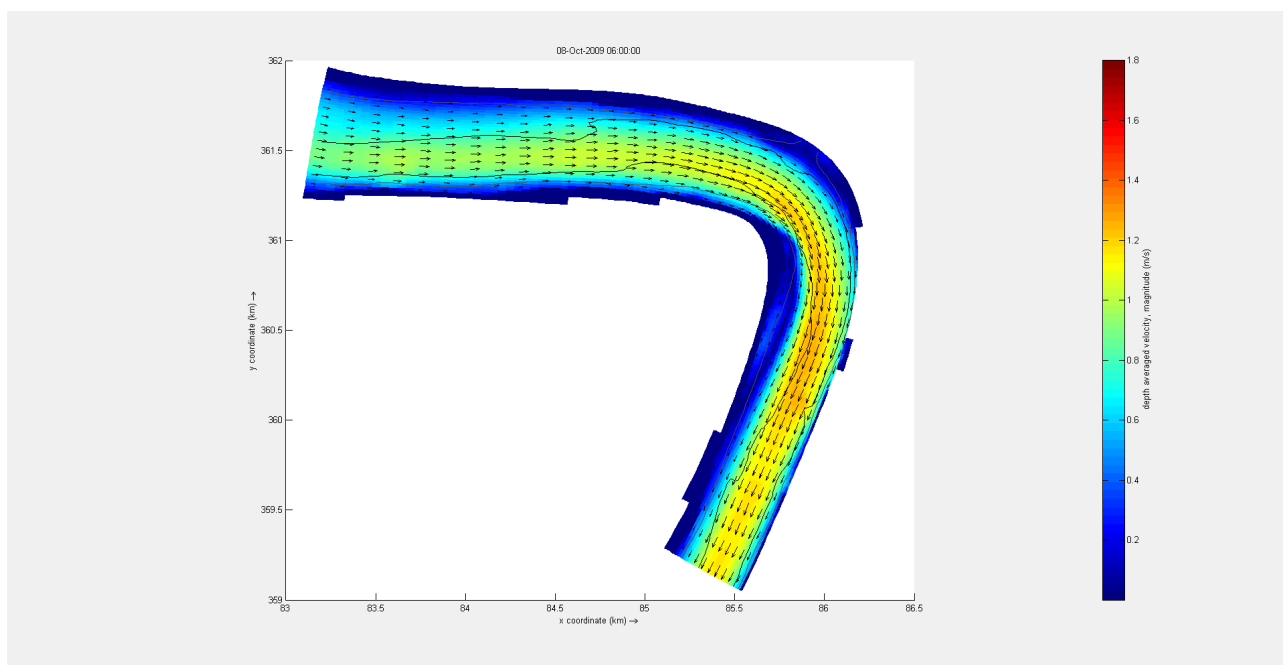
Figuur 29 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai (T = HW – 35’)



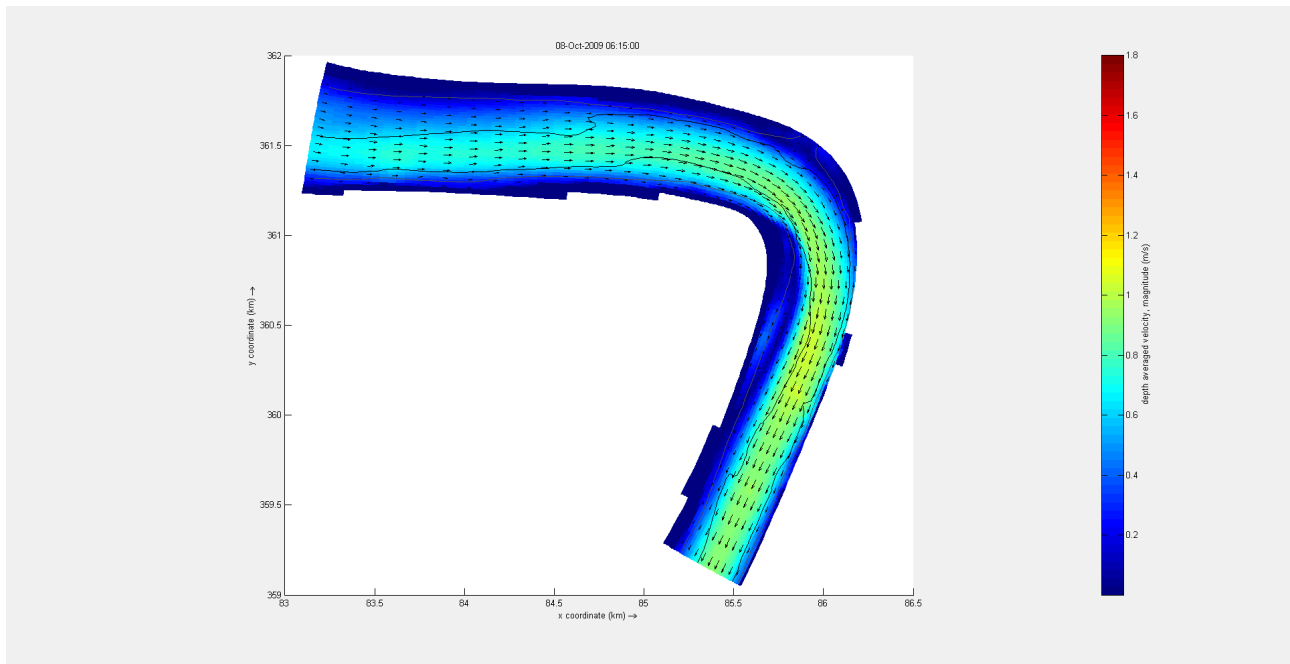
Figuur 30 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai (T = HW – 20’)



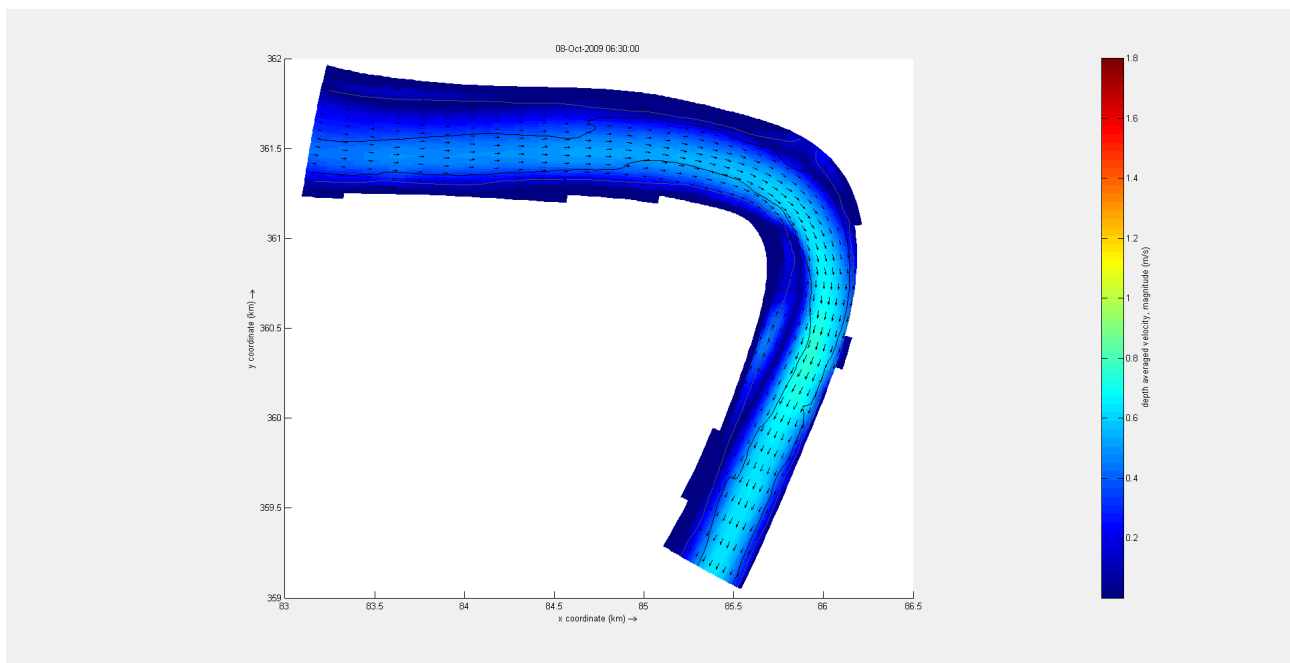
Figuur 31 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW - 5'$)



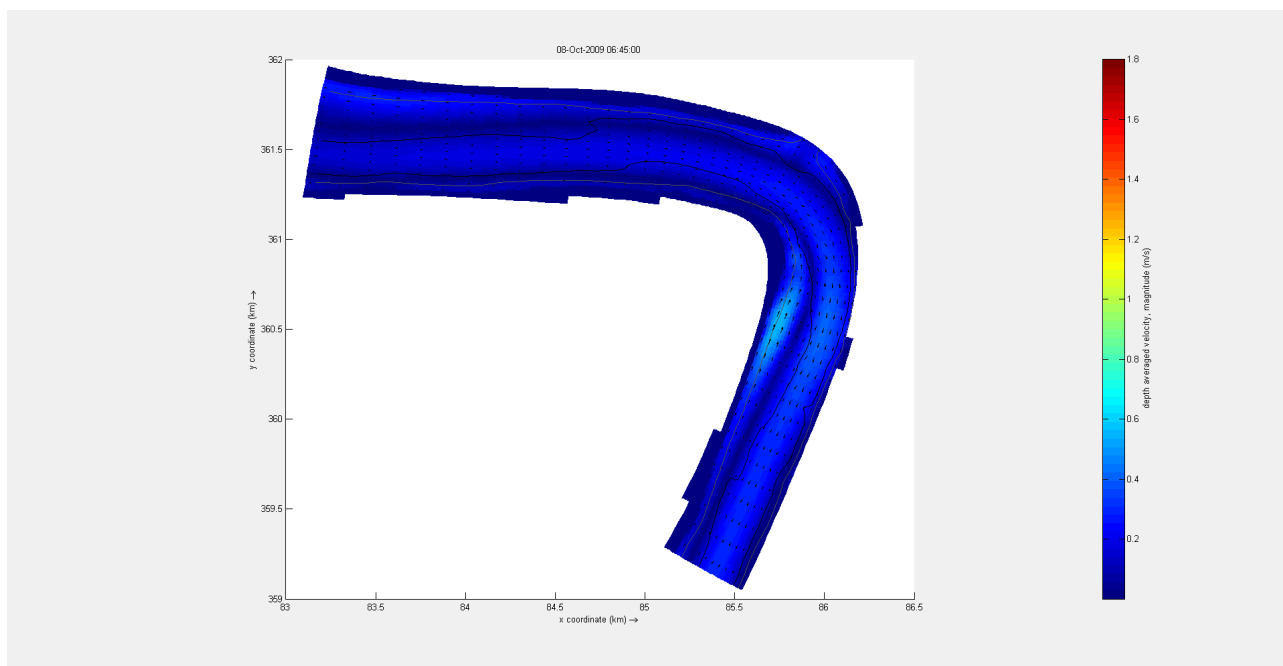
Figuur 32 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 10'$)



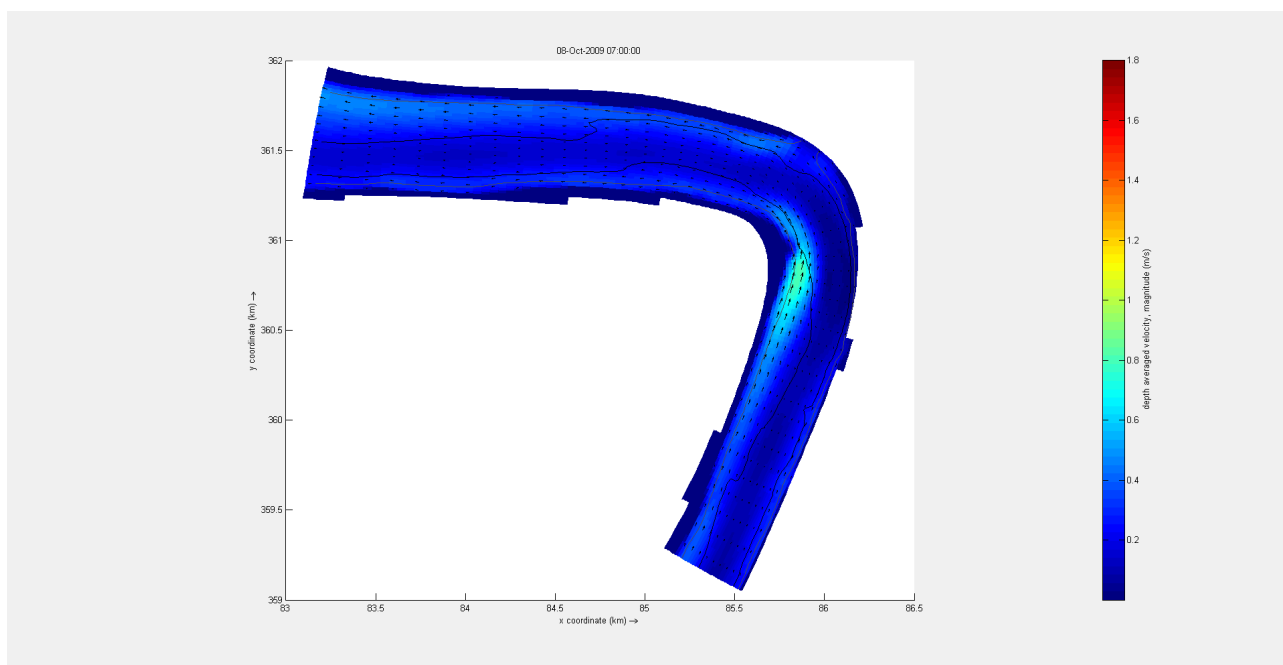
Figuur 33 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai (T = HW + 25')



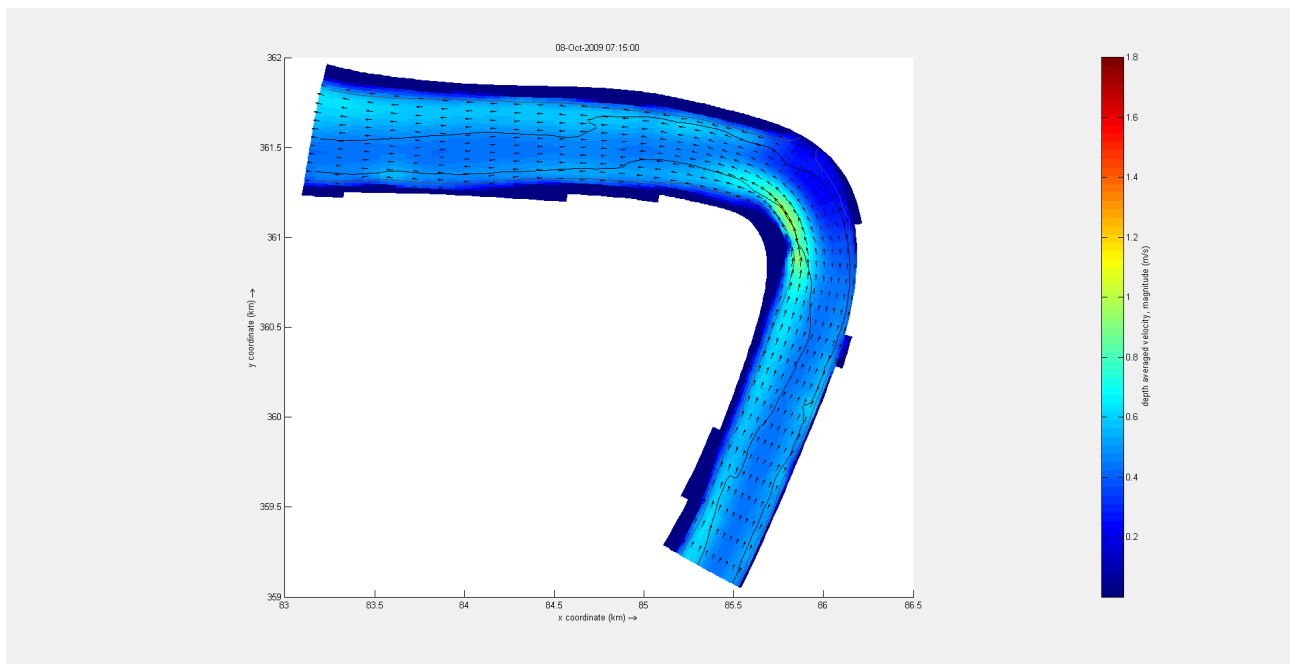
Figuur 34 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai (T = HW + 40')



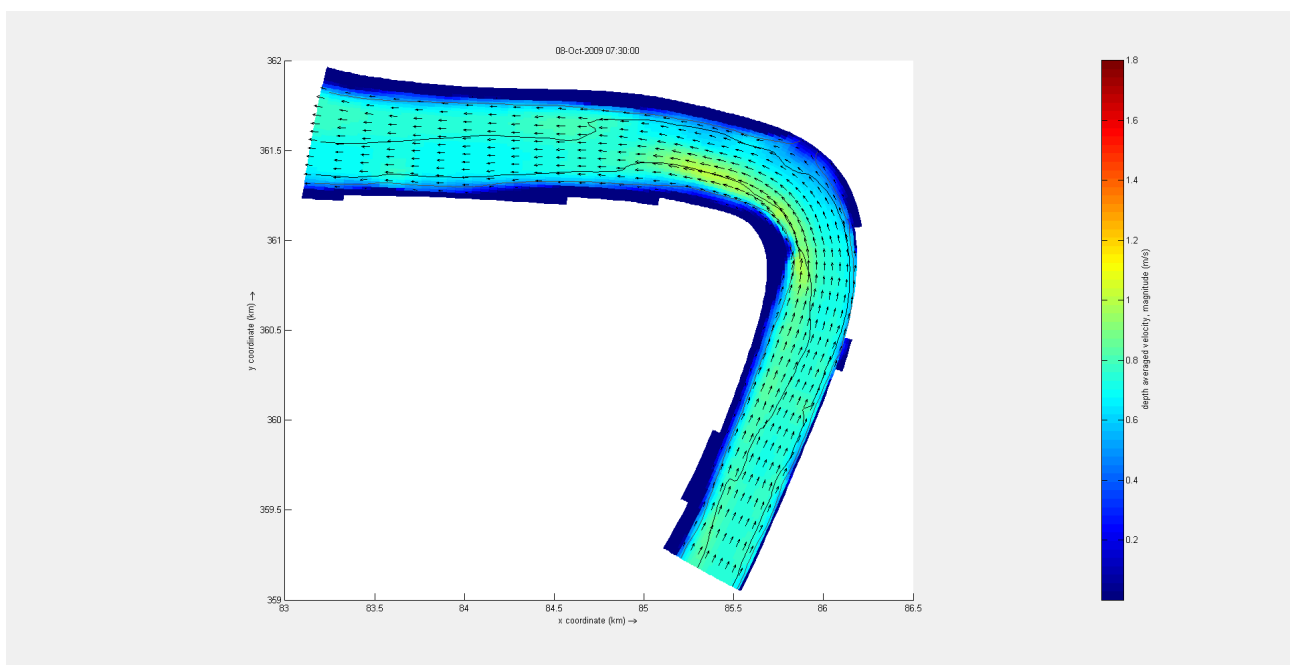
Figuur 35 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai (T = HW + 55')



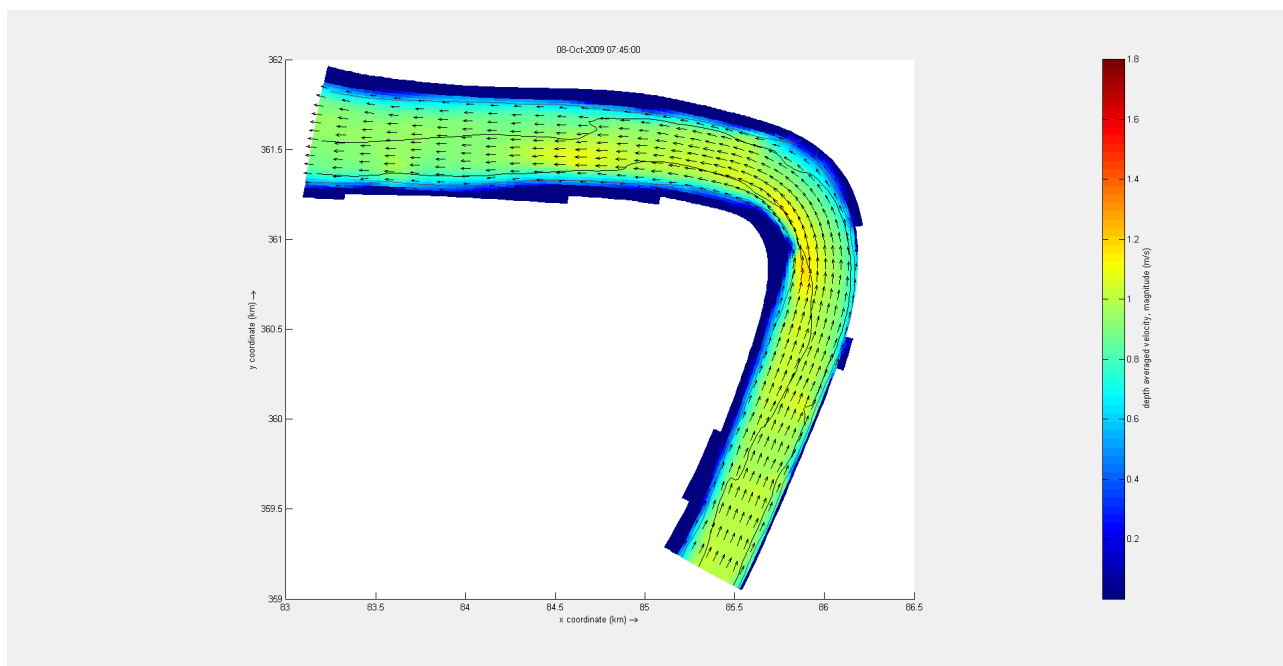
Figuur 36 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai (T = HW + 70')



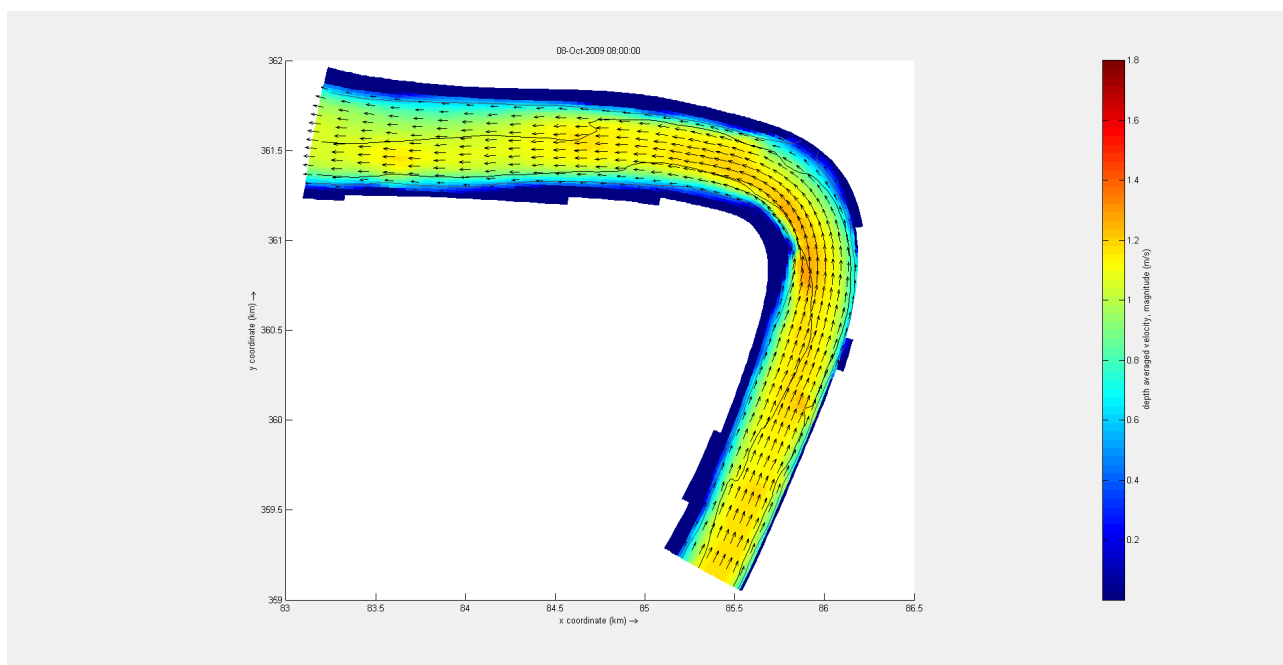
Figuur 37 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai (T = HW + 85')



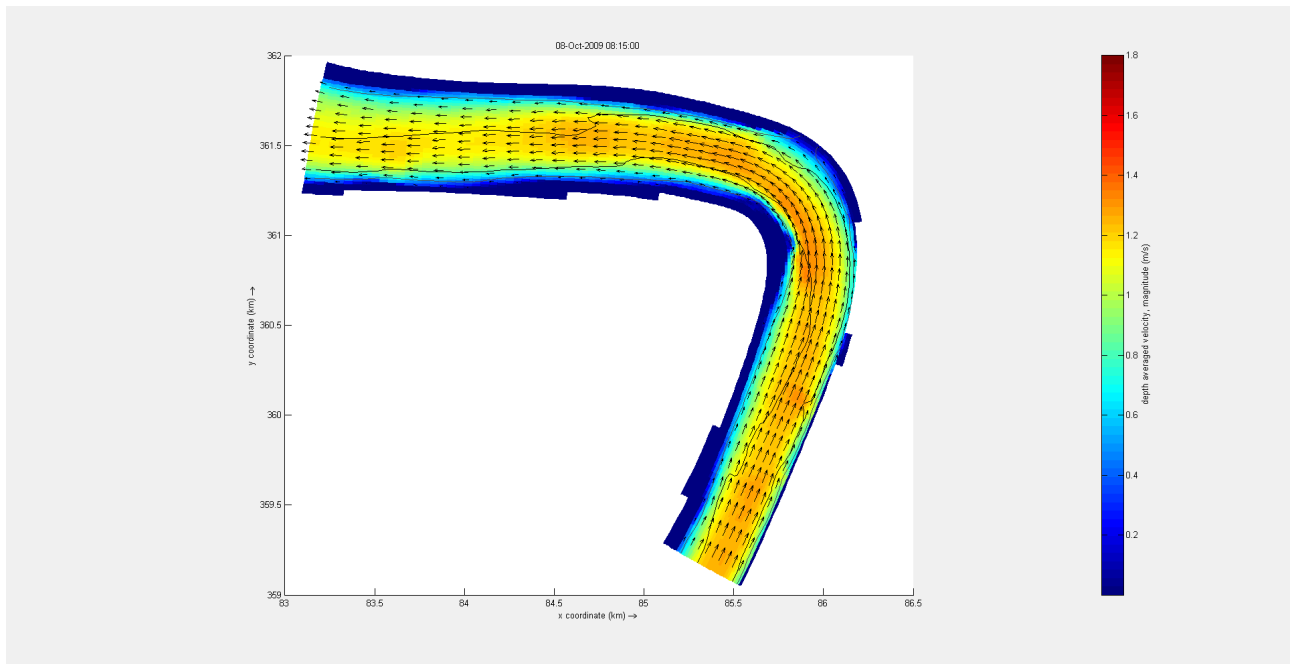
Figuur 38 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai (T = HW + 100')



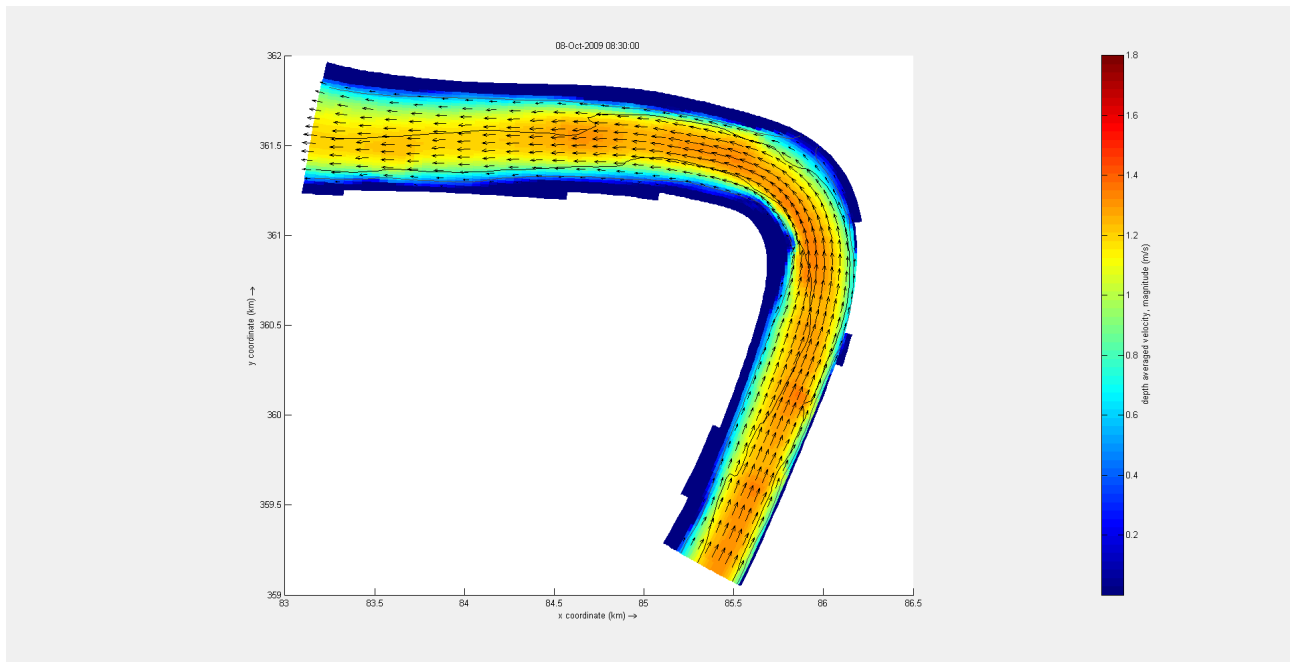
Figuur 39 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 115'$)



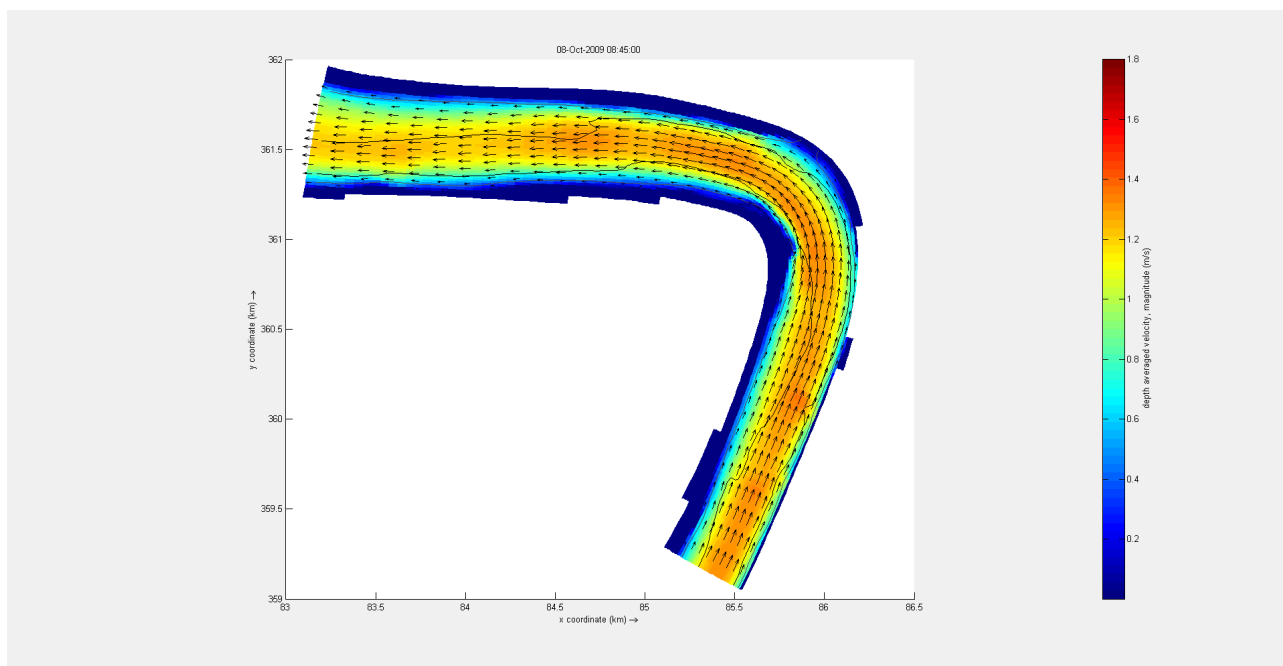
Figuur 40 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 130'$)



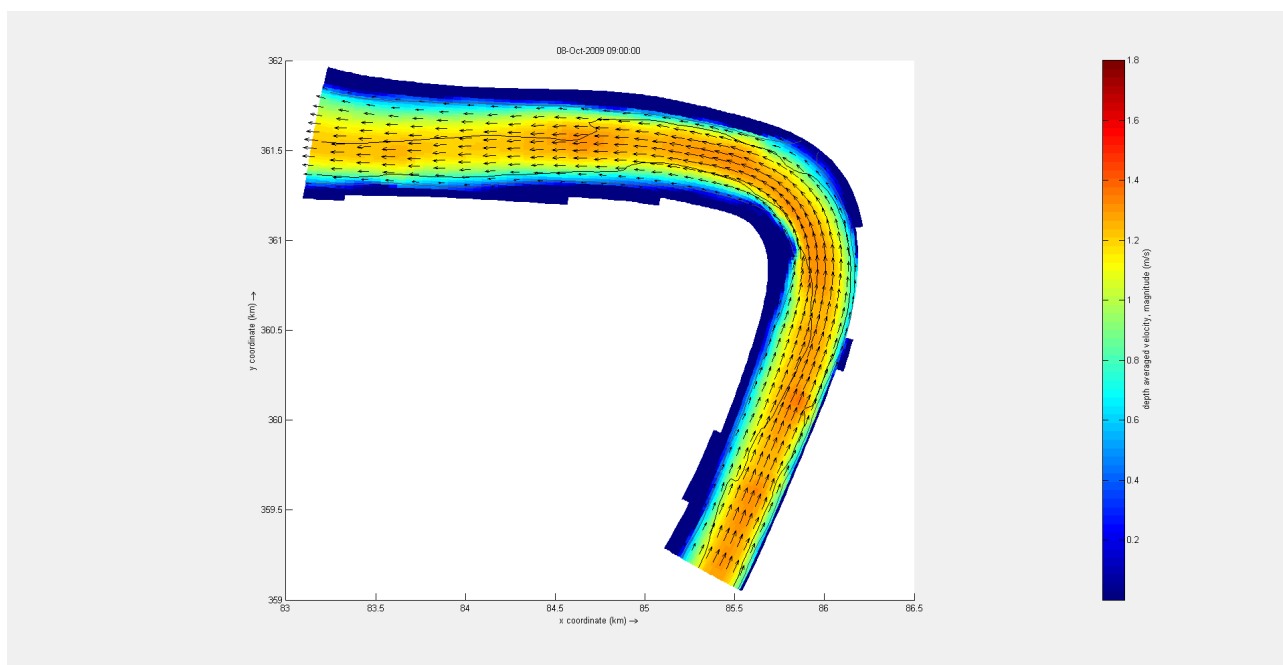
Figuur 41 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai (T = HW + 145')



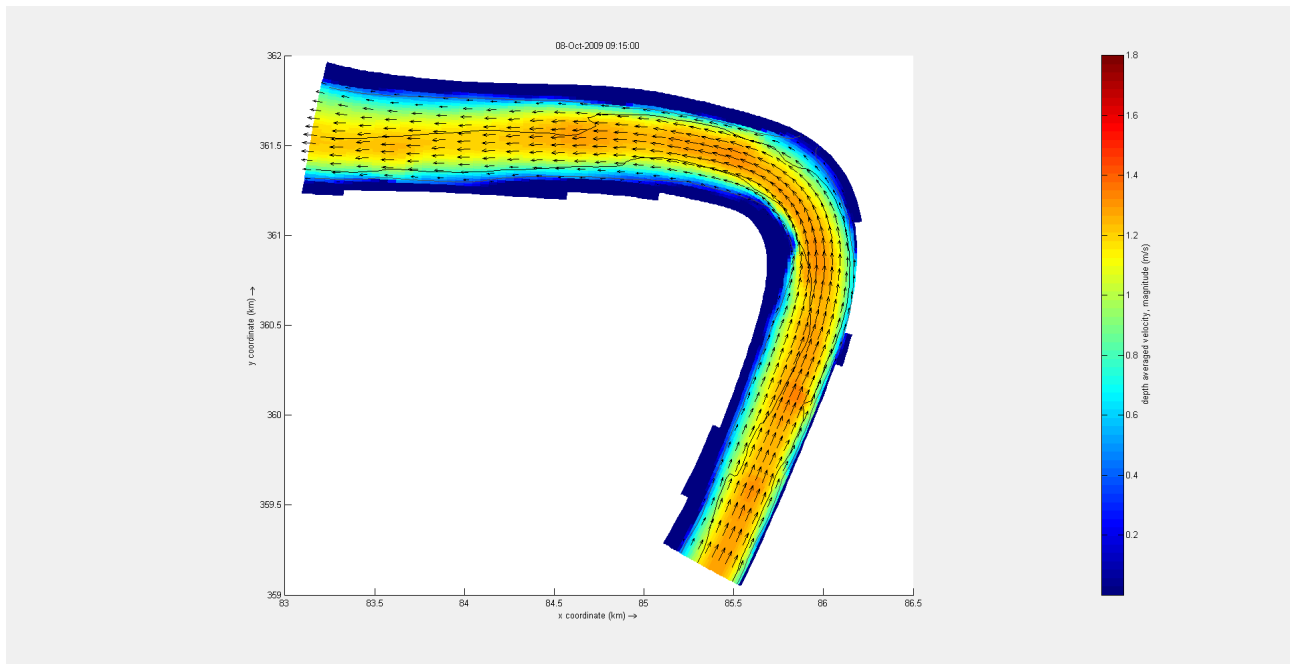
Figuur 42 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai (T = HW + 160')



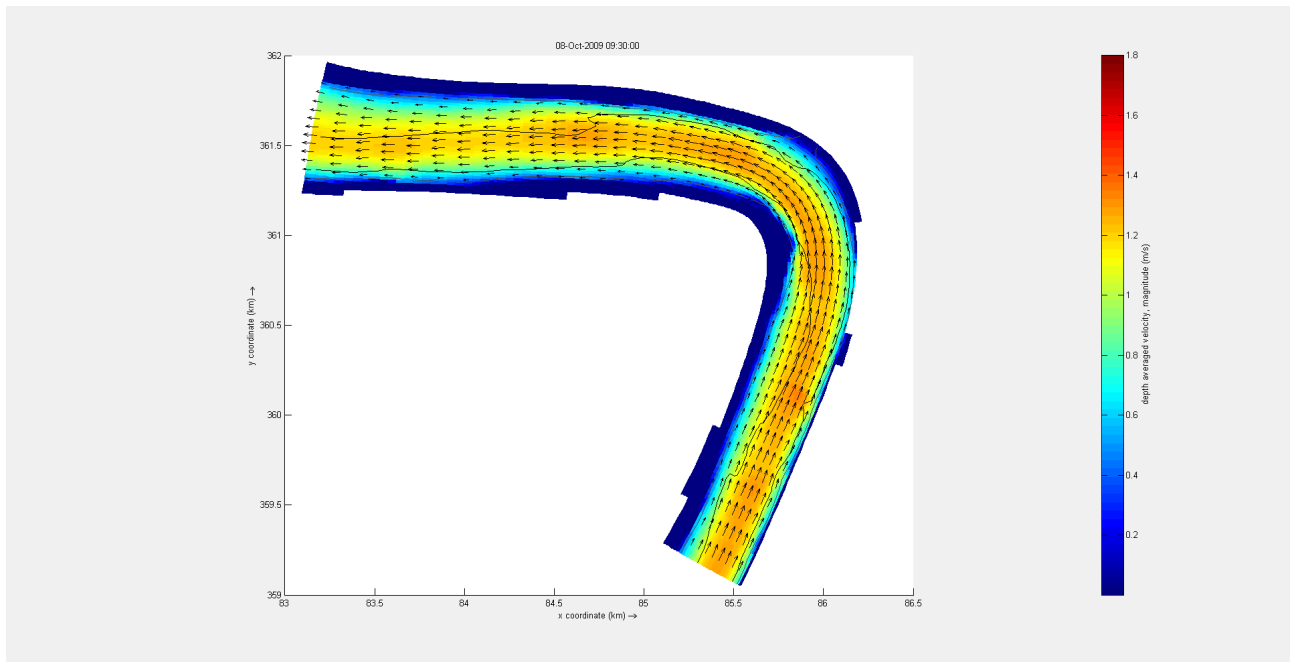
Figuur 43 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 175'$)



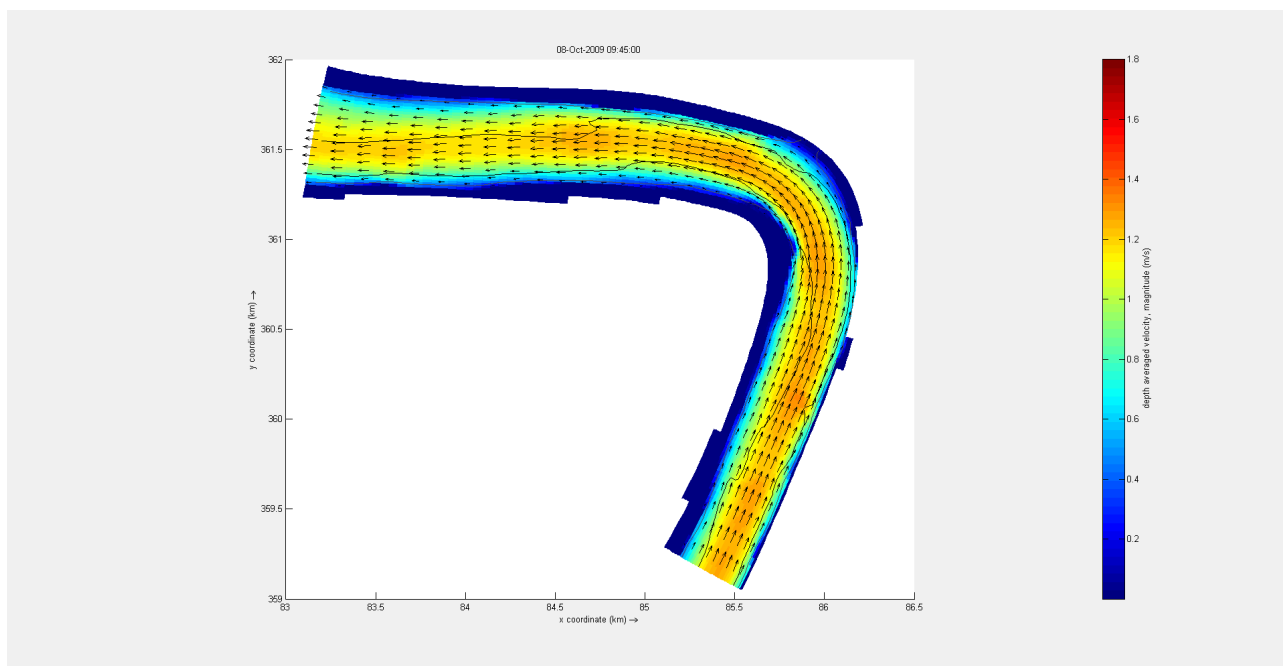
Figuur 44 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 190'$)



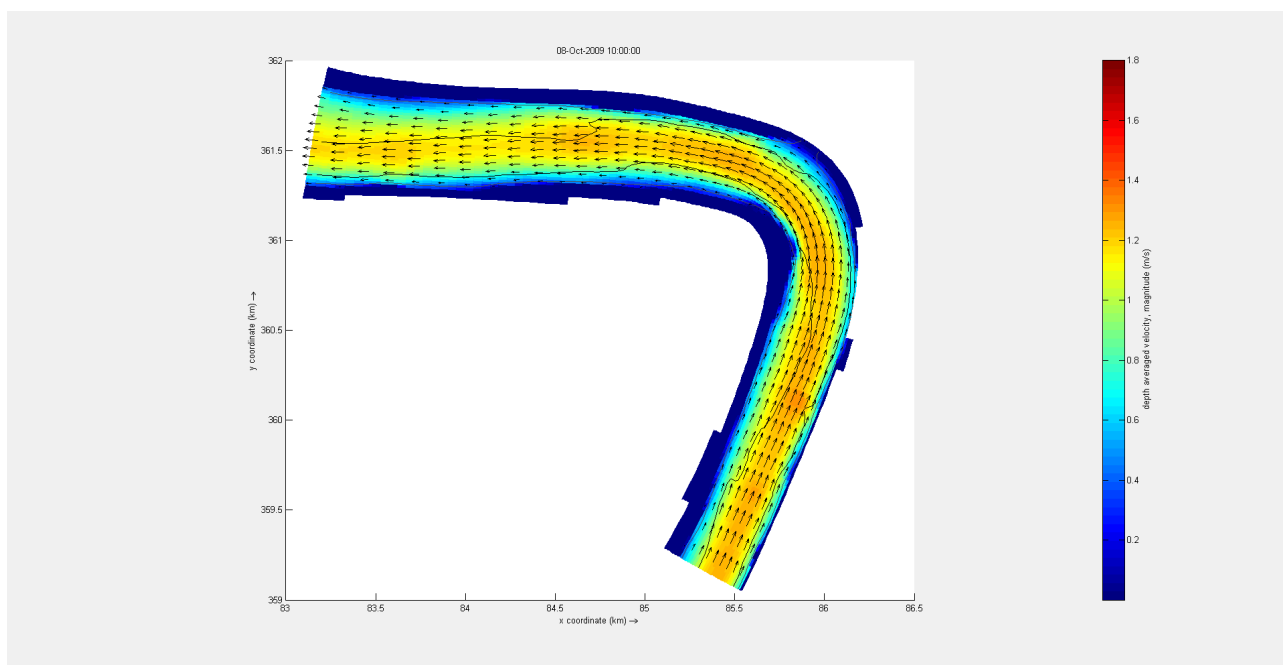
Figuur 45 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 205'$)



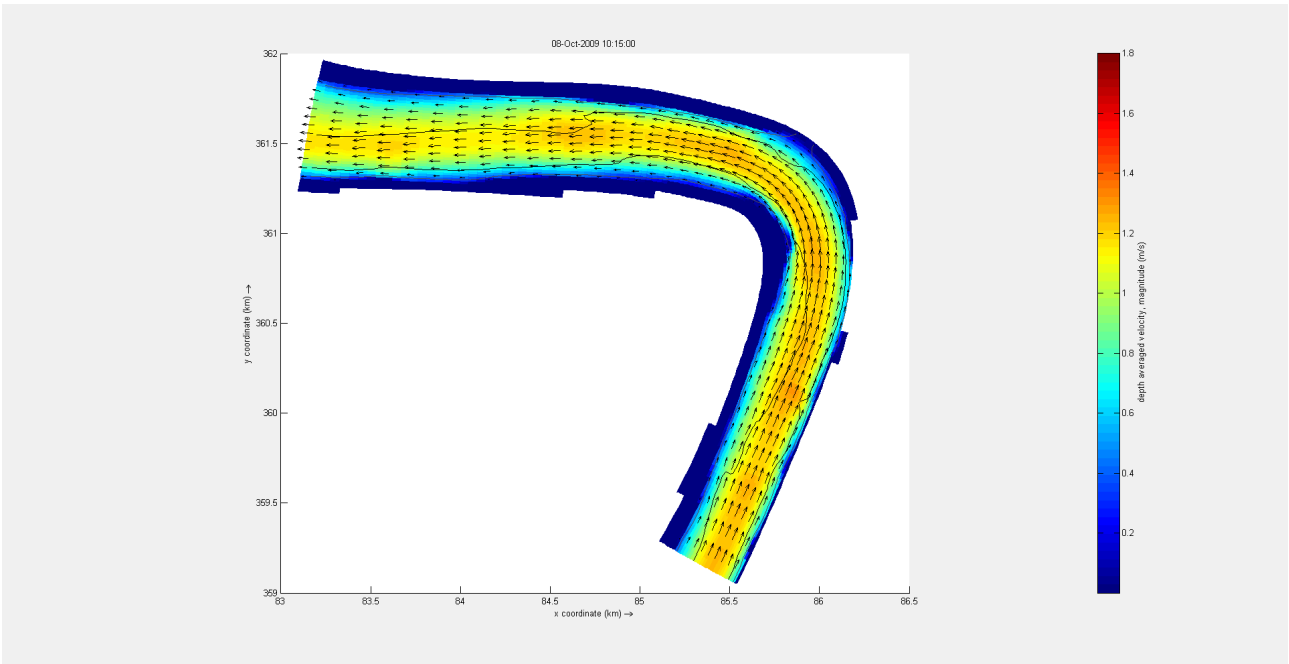
Figuur 46 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 220'$)



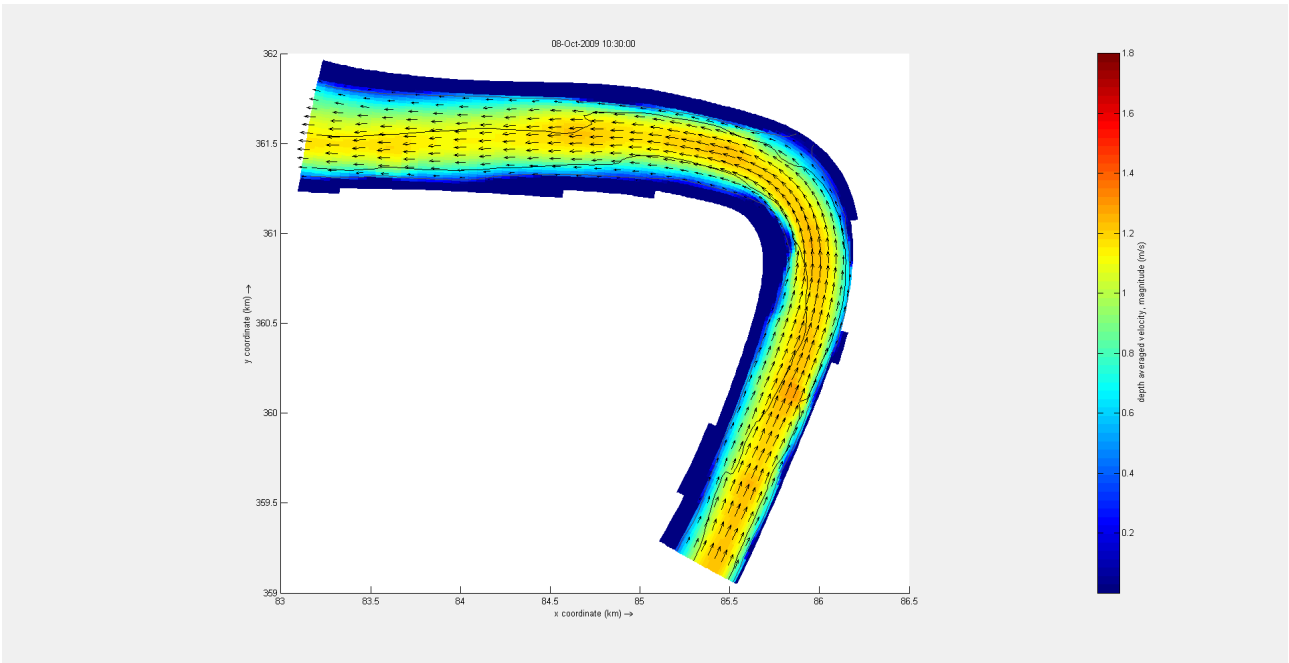
Figuur 47 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 235'$)



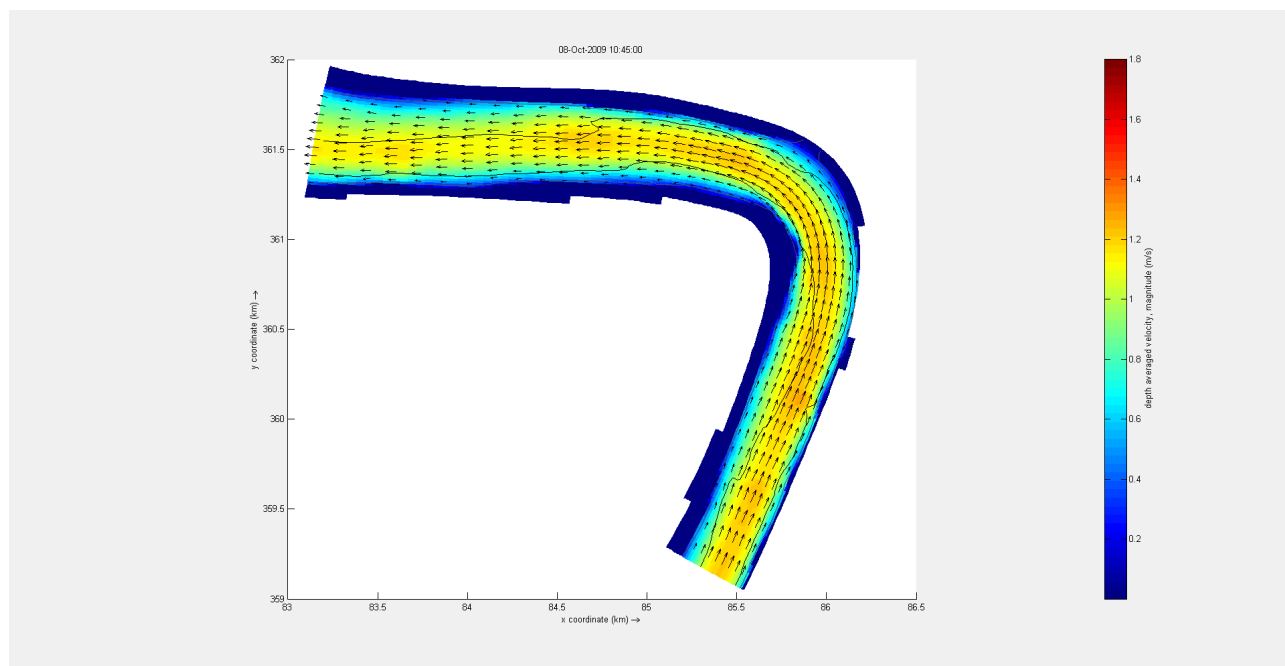
Figuur 48 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 250'$)



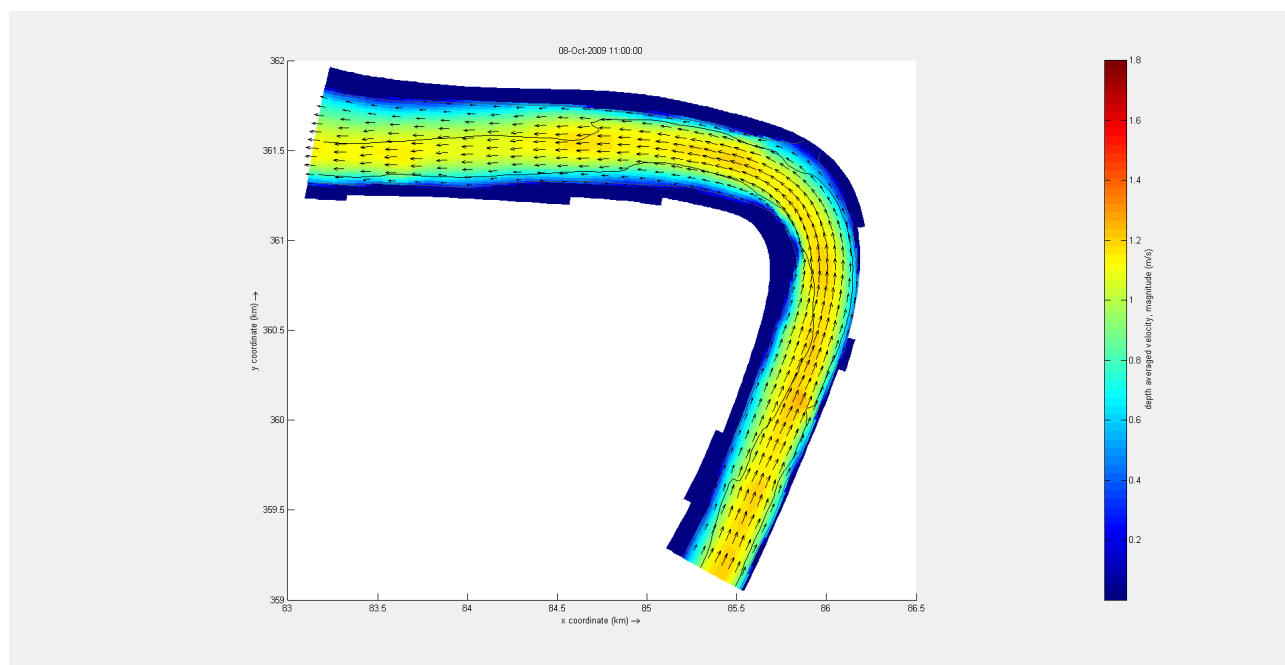
Figuur 49 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai (T = HW + 265’)



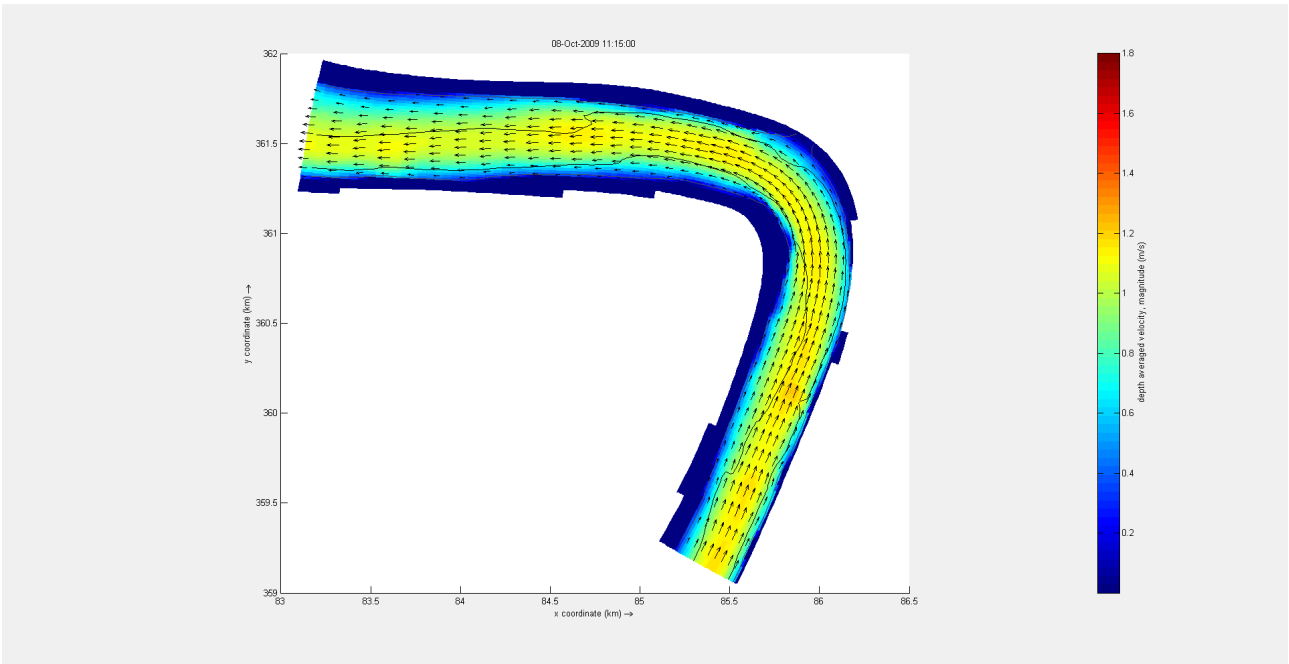
Figuur 50 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai (T = HW + 280’)



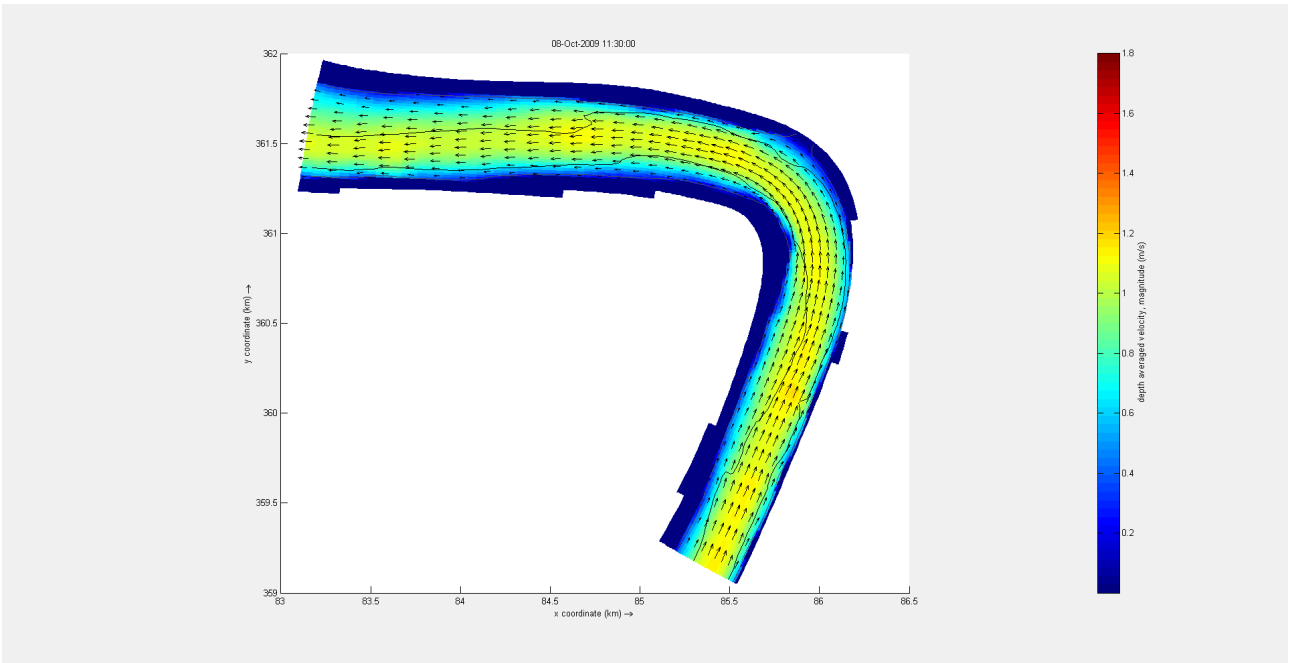
Figuur 51 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 295'$)



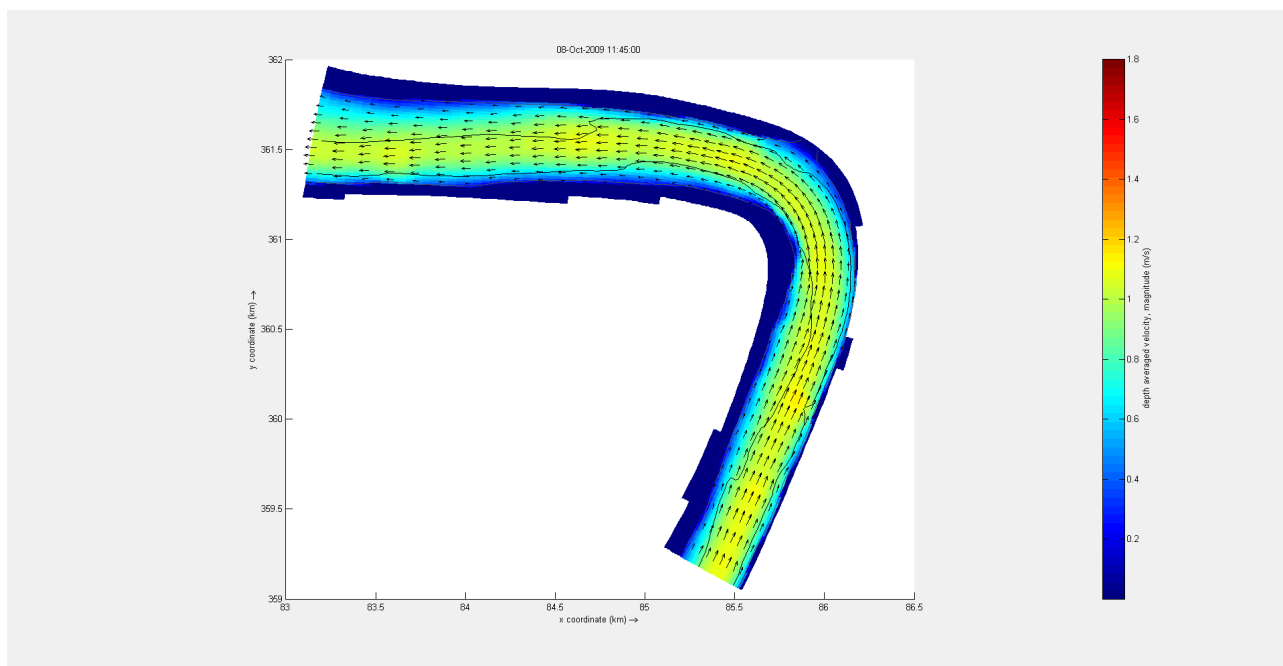
Figuur 52 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 310'$)



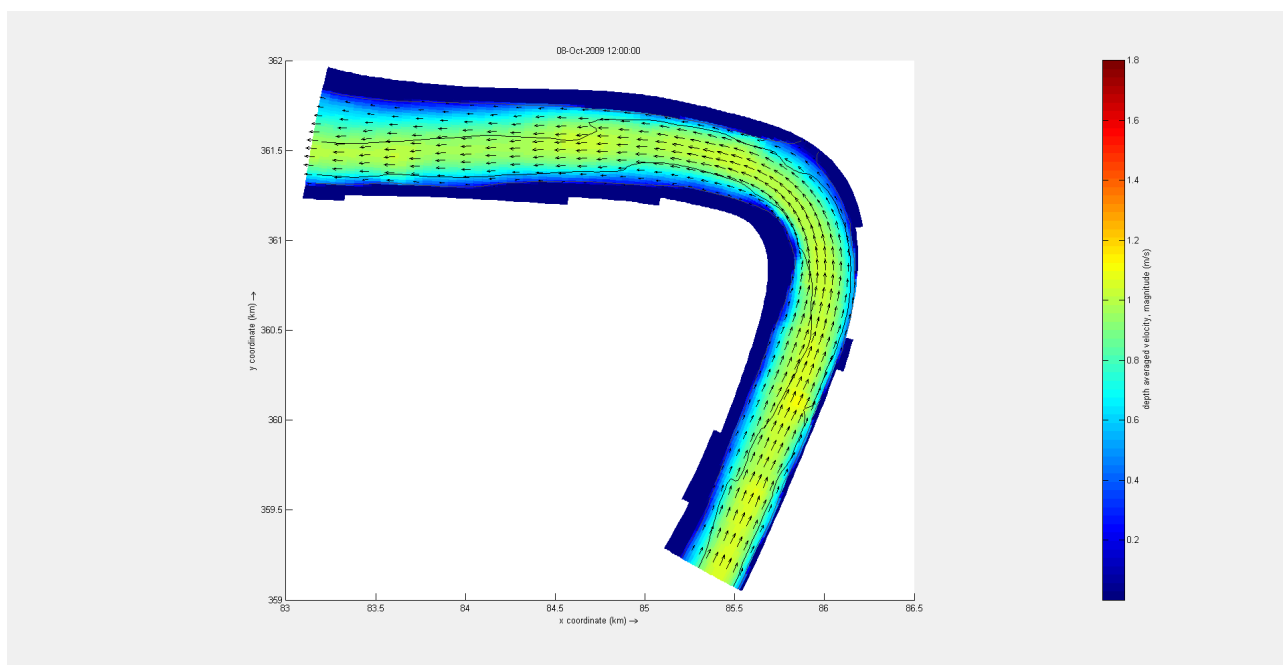
Figuur 53 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai (T = HW + 325’)



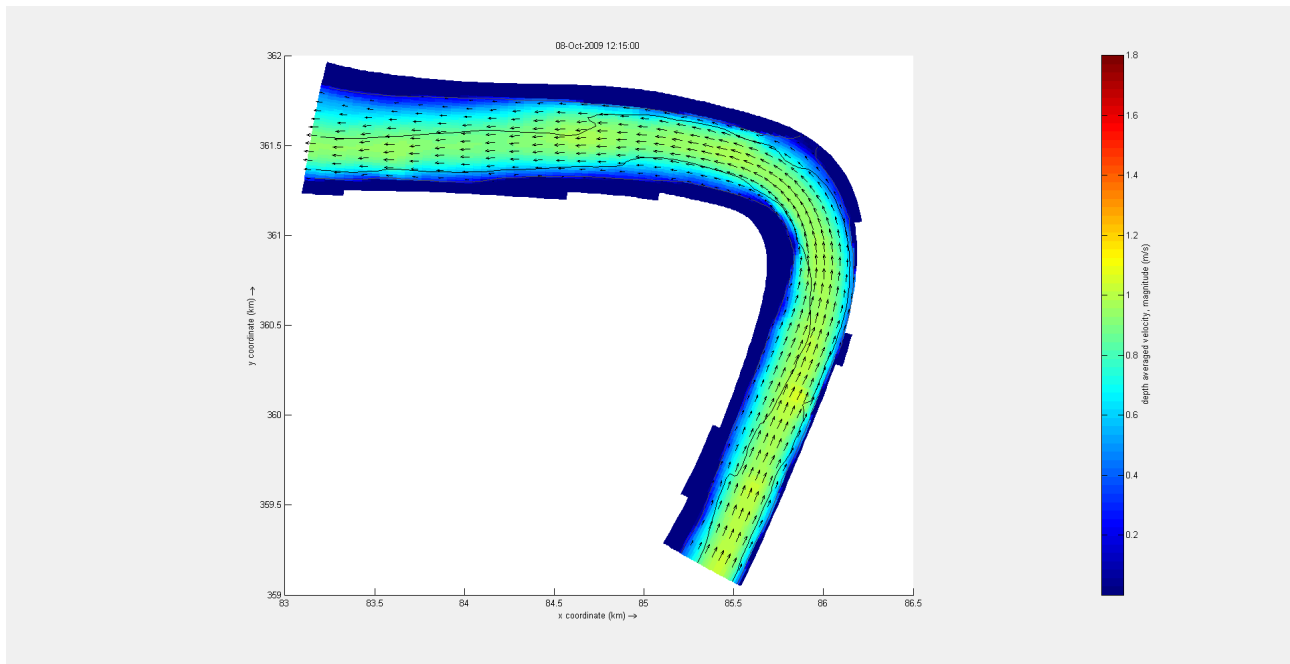
Figuur 54 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai (T = HW + 340’)



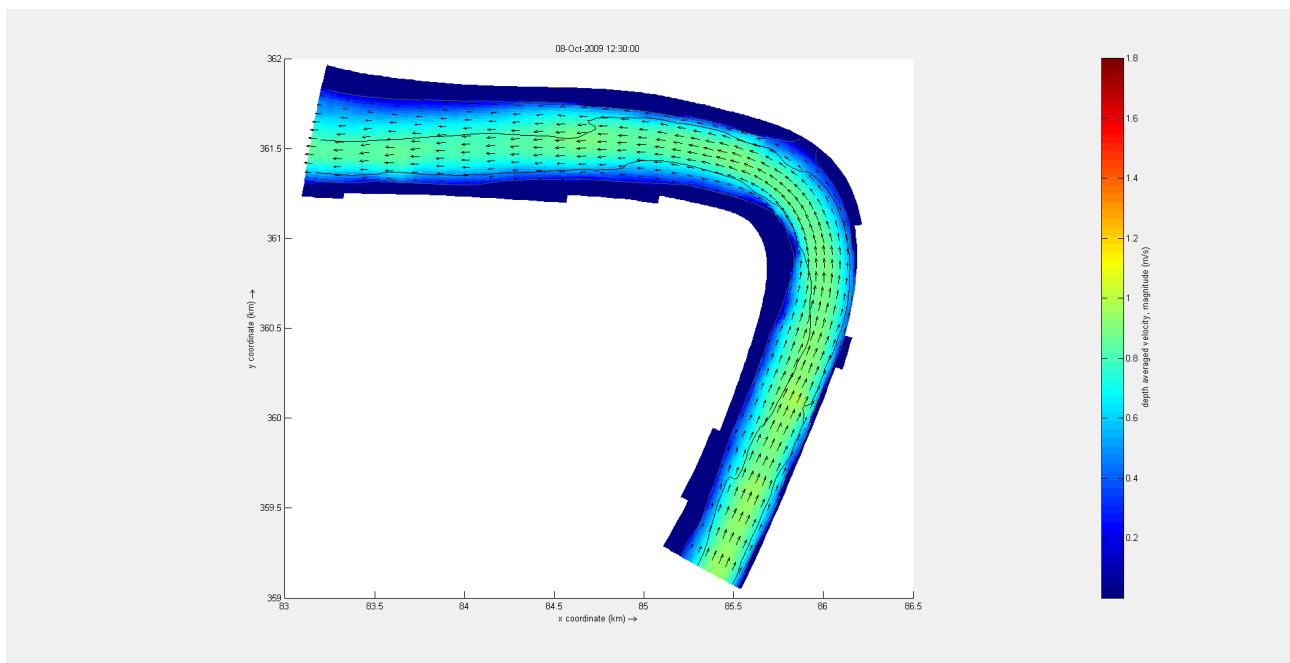
Figuur 55 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 355'$)



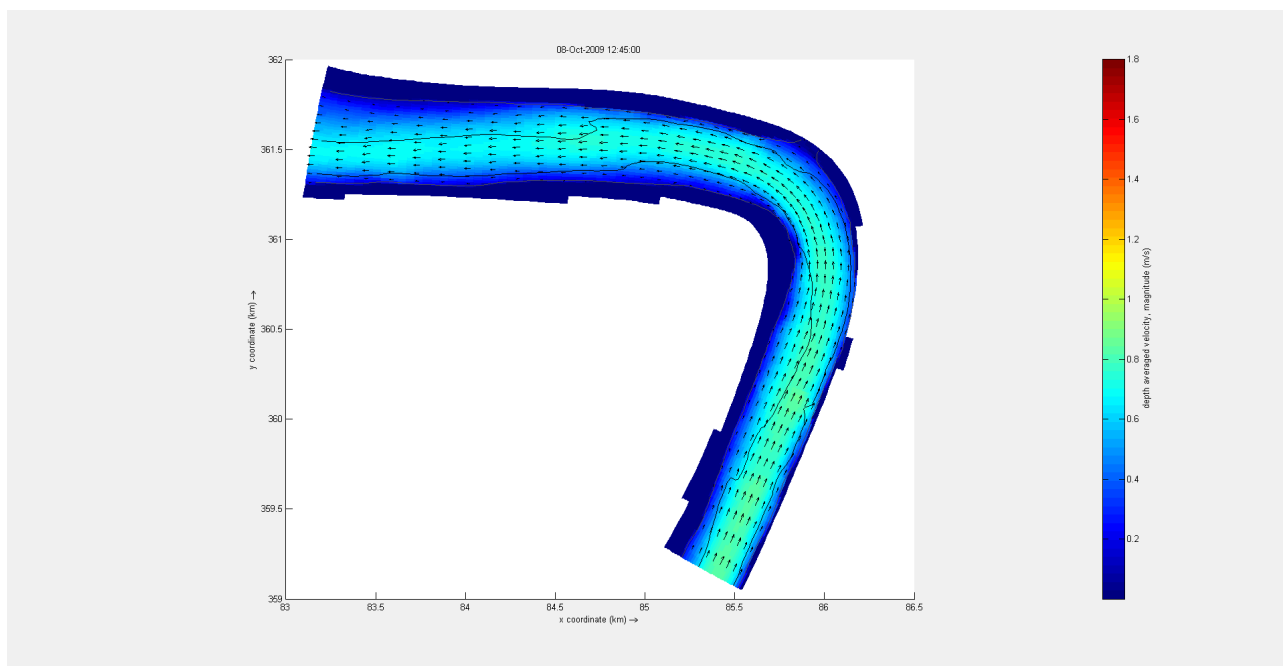
Figuur 56 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 370'$)



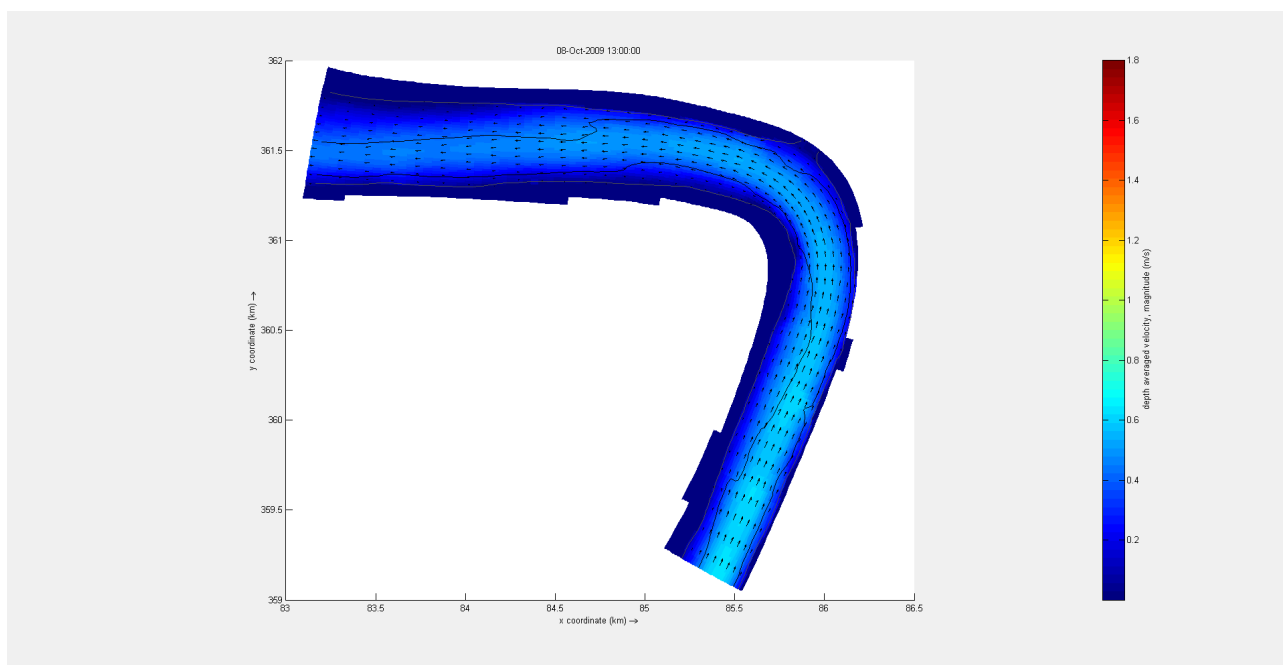
Figuur 57 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 385'$)



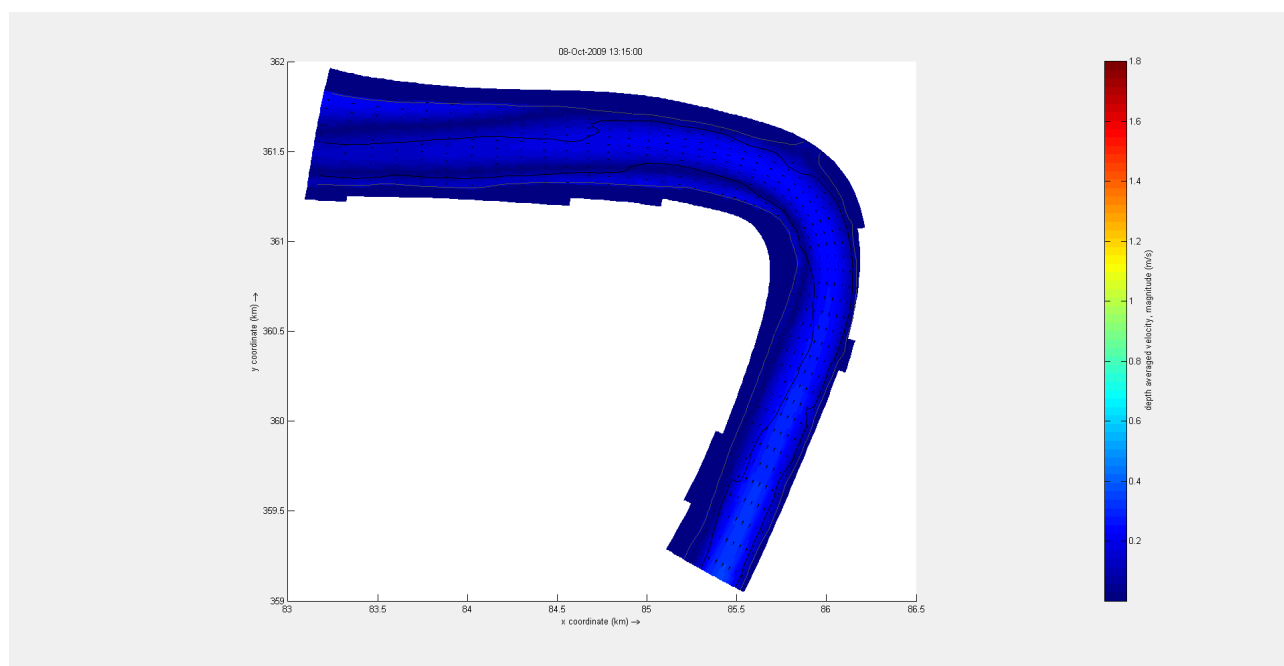
Figuur 58 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 400'$)



Figuur 59 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 415'$)



Figuur 60 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai ($T = HW + 430'$)



Figuur 61 – Stroomveld ter hoogte van de diepe delen aan de Rijnkaai (T = HW + 445')

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