

Validatie Waalmodel hoogwater 2021

Validatie afvoeren en stroomsnelheden in D-HYDRO



Validatie Waalmodel hoogwater 2021

Validatie afvoeren en stroomsnelheden in D-HYDRO

Auteur(s)

Bas Gradussen

Validatie Waalmodel hoogwater 2021

Validatie afvoeren en stroomsnelheden in D-HYDRO

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Martin Scholten
Referenties	-
Trefwoorden	ADCP-metingen, Rijntakkenmodel, Waal, D-HYDRO, validatie

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	18-12-2023
Projectnummer	11209233-003
Document ID	11209233-003-ZWS-0023
Pagina's	86
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Bas Gradussen	

Samenvatting

Op dit moment worden de zesde generatie hydrodynamische- en morfologische modellen van de Rijntakken in de praktijk gebruikt voor rivierkundige studies. Een belangrijk uitgangspunt van deze toepassing is de vergelijking van modeluitkomsten met veldmetingen. Op deze manier wordt inzicht verkregen in de prestaties en betrouwbaarheid van de modellen. Dit rapport focust op de validatie van de gesimuleerde stroming, onder andere met het oog op de toepassing van de modellen voor morfologische studies. Een betrouwbaar morfologisch model bouwt immers voort op een nauwkeurige berekening van de stroming in de rivier.

Tijdens het zomerhoogwater van 2021 in de Rijn bereikte de rivierafvoer ter plaatse van Lobith een maximale waarde van 6.800 m³/s. Tijdens de maand juli zijn diverse metingen uitgevoerd, waaronder Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP-)metingen. Deze ADCP-metingen vormen een waardevol inzicht in stromingspatronen en afvoeren door het zomerbed van de rivier. De validatiedata beslaan 31 dwarsdoorsnedes (transecten) tussen rivierkilometer 900 en 930 op de Waal. Deze uitgebreide dataset vormt de basis voor de validatie van de gemodelleerde stroming.

Twee parameters zijn van belang voor deze validatie: (1) de afvoerverdeling over het zomer- en winterbed en (2) de dieptegemiddelde stroomsnelheid in het zomerbed. De metingen zijn vergeleken met stationaire modelsimulaties met een hydrodynamisch D-HYDRO-model van de Waal, een uitsnede van dflowfm2d-rijn-j22_6-v1a. Op dezelfde transecten als waar de ADCP-metingen op zijn uitgevoerd, zijn de zomerbedafvoer en de dieptegemiddelde stroomsnelheden bepaald. De volgende conclusies kunnen worden getrokken:

Het globale beeld toont een goede overeenkomst tussen de gemodelleerde zomerbedafvoer en de zomerbedafvoer die is geregistreerd in de ADCP-metingen. Op enkele locaties levert het model een over- of onderschatting. De oorsprong van een deel van deze verschillen is te herleiden naar een onnauwkeurige hoogte of ligging van geschematiseerde zomerdijken of oevers ten opzichte van de situatie in de praktijk. In een enkel geval leidt de resolutie van het 40-meterrooster tot een onnauwkeurige weergave van bijvoorbeeld een nevengeul, waardoor de afvoerverdeling niet goed overeenkomt met de metingen.

De gemodelleerde, dieptegemiddelde stroomsnelheden komen grotendeels ook overeen met de gemeten stroomsnelheden uit de ADCP-dataset. Zowel de grootte als de richting van de stroming hebben vergelijkbare waarden. Wel worden op diverse rivierkilometers verschillen vastgesteld. Deze verschillen zijn deels een doorvertaling van de onjuiste afvoerverdeling over het zomer- en winterbed of een gebrek aan resolutie. Daarnaast treden ter plaatse van langsdammen lokale verschillen op, doordat de remmende werking evenwijdig aan de langsdammen niet goed in rekening wordt gebracht. De resulterende overschatting van de stroomsnelheid treedt lokaal rond de langsdam op en werkt niet in het volledige zomerbed door.

Een belangrijke aanbeveling die volgt uit deze studie is het actualiseren van in ieder geval objecten die de wateruitwisseling tussen het zomer- en winterbed controleren, zoals oeverhoogten, drempels en zomerdijken. Deze hebben namelijk een directe invloed op de zomerbedafvoer en op de stroomsnelheden in het zomerbed. Daarnaast kan met een verfijnd model onderzocht worden of een te grove (c.q. versimpelde) schematisatie van nevengeulen en openingen een effect heeft op de afvoerverdeling.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
1.1	Achtergrond	8
1.2	Doel	8
1.3	Leeswijzer	8
2	ADCP-data	9
2.1	Introductie	9
2.2	Verwerking data	9
2.3	Interpretatie data	11
2.3.1	Afvoer door het zomerbed	11
2.3.2	Dieptegemiddelde stroomsnelheid door het zomerbed	11
3	Modelopzet	14
3.1	Introductie	14
3.2	Gebruikte programmatuur en hardware	14
3.3	Modeldomein	14
3.4	Modelrandvoorwaarden	15
3.4.1	Verloop hoogwatergolf en modificatie Qf-relatie	15
3.4.2	Waterstanden Hardinxveld	16
3.4.3	Stationaire simulaties	16
3.4.4	Randvoorwaarden gevoeligheidssimulaties	17
3.4.5	Randvoorwaarden validatiesimulaties	17
3.5	Modeluitvoer	18
3.5.1	Afvoer door het zomerbed	18
3.5.2	Dieptegemiddelde stroomsnelheid door het zomerbed	19
4	Resultaten	20
4.1	Introductie	20
4.2	Gevoeligheidssimulaties	20
4.2.1	Stationaire simulaties (casus 1 – 5)	20
4.2.2	Tijdsafhankelijke simulatie (casus 6)	21
4.3	Validatiesimulaties: afvoer door zomerbed	21
4.3.1	Waterstanden	21
4.3.2	Overzicht resultaten afvoer door meettransect	22
4.3.3	Rivierkilometer 900-901	22
4.3.4	Rivierkilometer 907-909	24
4.3.5	Rivierkilometer 914,6	25
4.3.6	Rivierkilometer 929	26
4.4	Validatiesimulaties: dieptegemiddelde stroomsnelheid	27
4.4.1	Overzicht resultaten	27

4.4.2	Rivierkilometer 907-909	27
4.4.3	Rivierkilometer 912-921	29
4.4.4	Rivierkilometer 914,6	31
5	Conclusie en aanbevelingen	33
5.1	Introductie	33
5.2	Afvoerverdeling zomerbed-winterbed	33
5.3	Dieptegemiddelde stroomsnelheid	33
5.4	Aanbevelingen	34
5.4.1	Actualisatieslag	34
5.4.2	Zomerbedruwheid	34
5.4.3	Verfijnd model	34
5.4.4	Energieverlies in stroomrichting bij langsdammen	34
5.4.5	Validatie voor andere afvoeren	35
5.4.6	Overgangsgebieden tussen zomerbed en kribvak	35
6	Referenties	36
A	Bijlage: Vergelijking stroomsnelheidsvector op rkm 900-930	37
A.1	Rkm 900 (19 juli)	37
A.2	Rkm 901 (19 juli)	39
A.3	Rkm 902 (19 juli)	41
A.4	Rkm 903 (19 juli)	43
A.5	Rkm 904 (19 juli)	45
A.6	Rkm 905 (19 juli)	47
A.7	Rkm 906 (19 juli)	49
A.8	Rkm 907 (19 juli)	51
A.9	Rkm 908 (19 juli)	53
A.10	Rkm 909 (19 juli)	55
A.11	Rkm 910 (20 juli)	57
A.12	Rkm 911 (20 juli)	59
A.13	Rkm 912 (20 juli)	61
A.14	Rkm 913 (20 juli)	63
A.15	Rkm 914 (20 juli)	65
A.16	Rkm 914.6 (20 juli)	67
A.17	Rkm 916 (20 juli)	69
A.18	Rkm 917 (20 juli)	70
A.19	Rkm 918 (20 juli)	71
A.20	Rkm 919 (20 juli)	72
A.21	Rkm 920 (20 juli)	73
A.22	Rkm 921 (20 juli)	74

A.23	Rkm 922 (21 juli)	75
A.24	Rkm 923 (21 juli)	76
A.25	Rkm 924 (21 juli)	77
A.26	Rkm 925 (21 juli)	78
A.27	Rkm 926 (21 juli)	79
A.28	Rkm 927 (21 juli)	80
A.29	Rkm 928 (21 juli)	81
A.30	Rkm 929 (21 juli)	82
A.31	Rkm 930 (21 juli)	84

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Op dit moment worden de zesde generatie hydrodynamische modellen van de Rijntakken in de praktijk gebruikt voor rivierkundige studies. Parallel daaraan worden de morfologische modellen van de Rijntakken ontwikkeld. Een belangrijk uitgangspunt van deze ontwikkelingen is de vergelijking van gemodelleerde hydrodynamica met veldmetingen. Op deze manier wordt inzicht verkregen in de prestaties en betrouwbaarheid van de modellen. Dit rapport focust op de validatie van de stroming die wordt gesimuleerd met een hydrodynamisch D-HYDRO-model van de Waal, een uitsnede uit dflowfm2d-rijn-j22_6-v1a.

Tijdens het zomerhoogwater van 2021 in de Rijn bereikte de rivierafvoer ter plaatse van Lobith een maximale waarde van 6.800 m³/s. Dit is een uitzonderlijk hoge afvoer die tijdens de zomermaanden nooit eerder werd geregistreerd (Rijkswaterstaat Verkeer en Watermanagement, 2022). Tijdens de maand juli zijn diverse metingen uitgevoerd, waaronder Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP-)metingen. Deze ADCP-metingen vormen een waardevol inzicht in stromingspatronen en afvoeren door het zomerbed van de rivier. Hierdoor bieden ze een bron van validatiedata waarmee de modeluitkomsten van de nieuwste generatie modellen kunnen worden vergeleken.

1.2 Doel

Deze studie richt zich op de validatie van het 40-meterrooster model van de Rijntakken, met de focus op de volgende twee aspecten:

- afvoer door het zomerbed;
- dieptegemiddelde stroomsnelheid in het zomerbed.

De validatie richt zich specifiek op de Waal, omdat hier een recente, uitgebreide dataset met ADCP-metingen voor beschikbaar is. Aan de hand van deze validatie wordt inzicht verkregen in de betrouwbaarheid van de gemodelleerde zomerbedafvoer en de gemodelleerde stroomsnelheden.

1.3 Leeswijzer

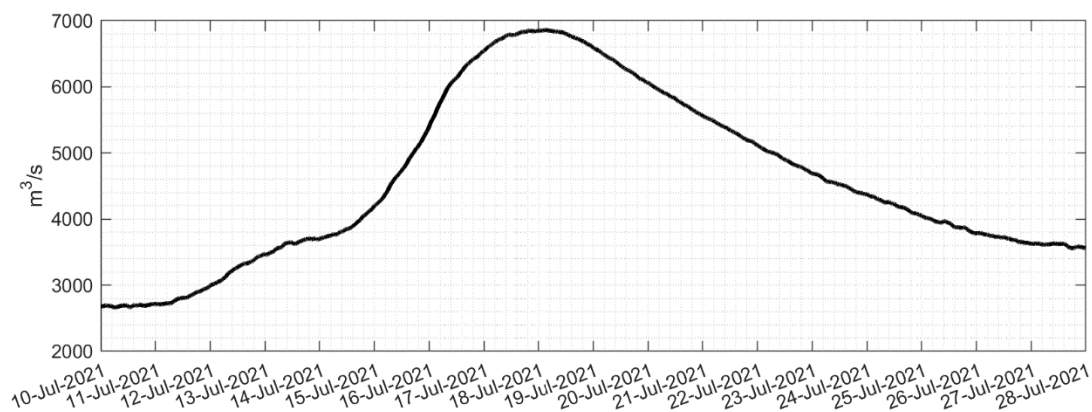
Deze rapportage is als volgt opgebouwd:

- Hoofdstuk 2 geeft een overzicht van de beschikbare ADCP-data en hoe deze zijn geïnterpreteerd voor deze studie;
- Hoofdstuk 3 gaat in op de eigenschappen van het model dat is gebruikt voor de gevoeligheids- en validatiesommen;
- Hoofdstuk 4 presenteert de modelresultaten en de vergelijking ten opzichte van de ADCP-data;
- Hoofdstuk 5 geeft een overzicht van de conclusies en aanbevelingen die volgen uit deze validatie.

2 ADCP-data

2.1 Introductie

Het zomerhoogwater van 2021 vond plaats in de maand juli. De maximale afvoer bij Lobith werd geregistreerd op 18 juli. De afvoergolf kenmerkt zich door zijn korte duur en dus steile verloop (Figuur 2-1). Tijdens dit hoogwater zijn door AquaVision ADCP-metingen uitgevoerd op een set dwarsdoorsnedes (transecten) in de Waal. De metingen zijn verspreid over de dagen 19, 20 en 21 juli. De metingen zijn dus een dag nadat de maximale afvoer Lobith passeerde gestart.



Figuur 2-1 Afvoergolf bij Lobith tijdens juli 2021. Bron data: RWS ON.

De transecten waarover de ADCP-metingen zijn uitgevoerd bevinden zich tussen rivierkilometers (rkm) 900 en 930 op de Waal. Grofweg is op elke kilometerraai een set metingen uitgevoerd, bestaande uit tijdsafhankelijke, driedimensionale metingen van stroomsnelheidsvectoren. Op 19 juli zijn tussen 09:30 en 15:45 uur metingen uitgevoerd op de kilometerraaien 900-909. Op kilometerraaien 910-921 zijn op 20 juli tussen 08:00 en 16:30 uur metingen uitgevoerd. Ten slotte zijn op 21 juli tussen 7:40 en 13:20 uur metingen uitgevoerd op kilometerraaien 922-930.

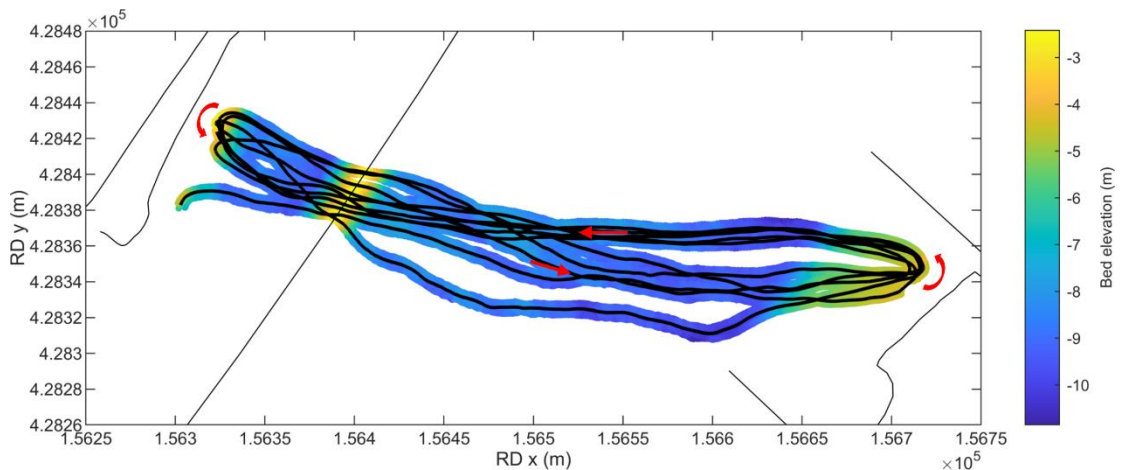
2.2 Verwerking data

De ADCP-dataset bevat voor iedere kilometerraai een collectie aan vaarmomenten. Deze collectie bevat ook data van vaarmomenten voor het bepalen van de horizontale stabiliteit van de bodem, kalibratietransecten voor het kompas op de boot, en stukjes traject die nodig waren voor het correct positioneren van de boot. Deze momenten worden uit de dataset gefilterd zodat de definitieve ADCP-dataset wordt afgeleid waarmee de analyses worden uitgevoerd. Deze filtering gebeurt op basis van de bijgevoegde tabellen en logboeken van de meetcampagne.

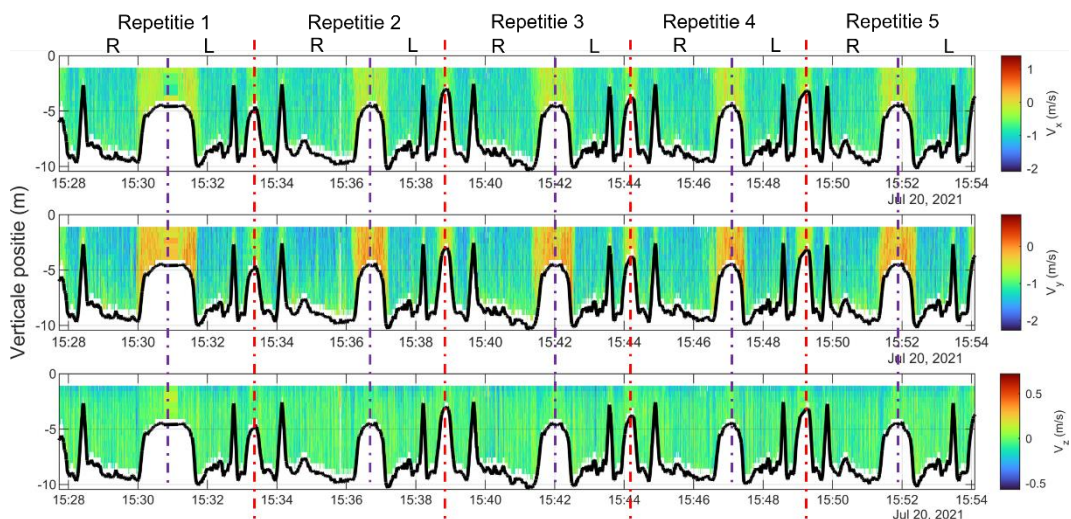
Voor de gefilterde vaarmomenten blijft een collectie bestanden over, bestaande uit onder andere ruwe datafiles (-*.000), transect files (-*t.000), VISEA-extern files (-*extern.dat) en VISEA-logs (-*com12.log). Deze vaarmomenten bestaan uit een aantal repetities waarin het zomerbed wordt gekruist. Hierin wordt onderscheid gemaakt in de richting van overvaren: links (L) of rechts (R).

De data bevatten essentiële eigenschappen van zowel de metingen als de boot waarmee de metingen zijn uitgevoerd. De belangrijkste onderdelen van de (meta)data zijn:

- tijdstip van meting;
- dikte en hoogte van de verticale meetlagen;
- oriëntatie-eigenschappen van de boot: pitch, roll en vaarrichting;
- echo en backscatter van de metingen;
- horizontale positie van de boot tijdens de metingen (zie Figuur 2-2);
- bodemhoogte ter plaatse van de meting (zie Figuur 2-2);
- driedimensionale snelheidsvector ten opzichte van de boot (coördinatenreferentie is de bewegende multibeamsensor). In deze data wordt dus gecompenseerd voor de snelheid en oriëntatie van de boot. Ook wordt de achtergrondruis uit de data gefilterd. De volledige 2DV-tijdreeks van de gemeten snelheidsvector op Waal rkm 920 is weergegeven in Figuur 2-3. Hieruit kan worden opgemaakt dat het verwerven van een ADCP-dataset op een kilometerraai ongeveer een halfuur duurt.



Figuur 2-2 Horizontale positie van de boot en gemeten bodemhoogte (Waal rkm 920).



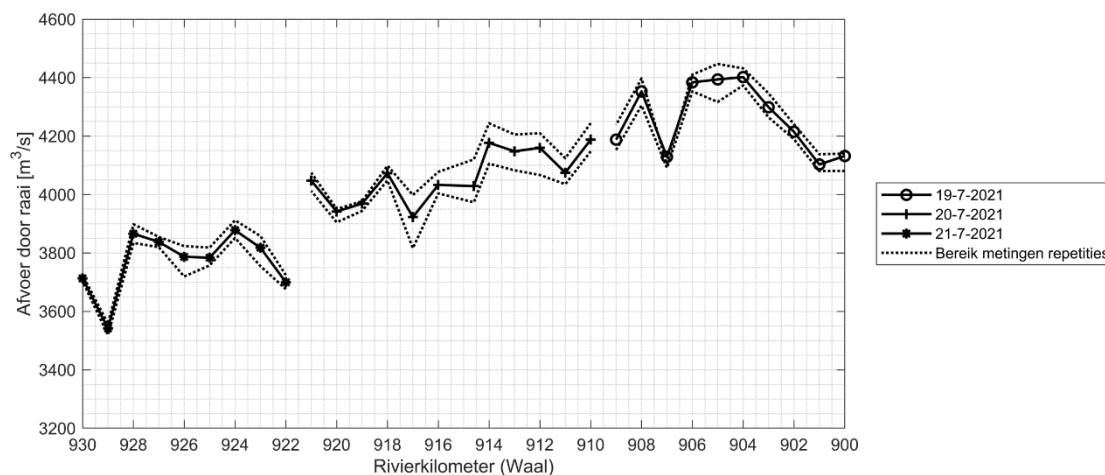
Figuur 2-3 Componenten van de driedimensionale snelheidsvector over de diepte op de gevaren repetities langs het transect Waal rkm 920.

2.3 Interpretatie data

2.3.1 Afvoer door het zomerbed

Op elke kilometerraai is door AquaVision een inschatting gemaakt van de afvoer door het zomerbed op basis van de snelheids- en dieptemetingen. Omdat de boten waarmee de metingen worden uitgevoerd een minimale diepgang nodig hebben om te kunnen varen, is voor de ondiepste delen van het zomerbed (i.e. langs de oevers waar de boot niet kan varen, en het deel dat dus niet is opgenomen in de vaartrajecten) een horizontale extrapolatie van de afvoeren uitgevoerd. Ook is er een verticale extrapolatie uitgevoerd voor de zones langs het wateroppervlak en de bodem in verband met de diepteligging en het meetbereik van de sensoren. Voor de bovenste laag zijn er geen data vanwege de diepteligging van de sensoren. Voor de onderste laag in de waterkolom is het signaal van de data verstoord door de aanwezigheid van de rivierbodem (zie Figuur 2-3).

De geregistreeerde zomerbedafvoeren tijdens de meetcampagne tonen variaties (Figuur 2-4). De afvoer in het zomerbed varieert in de metingen op 19 juli (raaien 900-909) tussen 4.100 m³/s en 4.400 m³/s. Over de raaien 910-921 (20 juli) varieert de afvoer tussen 3.920 m³/s en 4.190 m³/s. Op 21 juli is op de raaien 922-930 een variatie in zomerbedafvoer gemeten tussen 3.540 m³/s en 3.880 m³/s. Variaties in afvoer door het zomerbed zijn voornamelijk afhankelijk van het verloop van de afvoergolf en de geometrie van de rivier (bijvoorbeeld de breedte van het zomer- en winterbed, de hoogteligging van oevers en zomerkes, aanwezigheid van nevengeulen, obstakels en variaties in bodemruwheid).



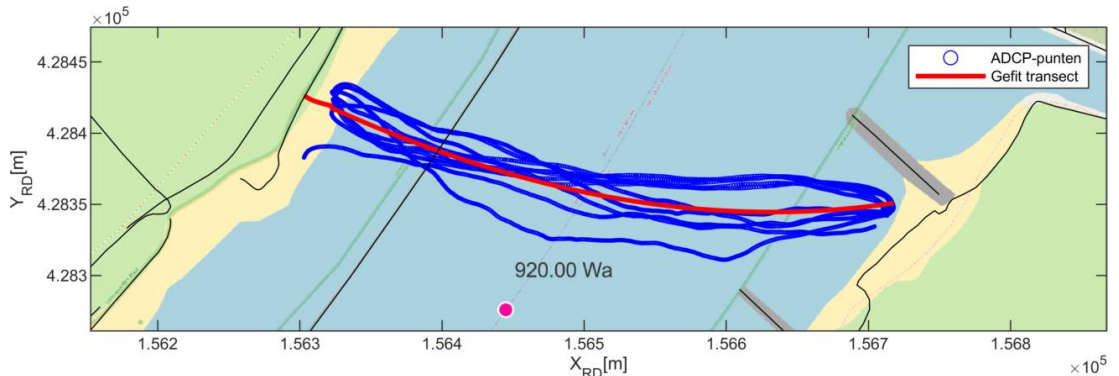
Figuur 2-4 Geregistreeerde afvoer door het zomerbed, volgende uit de ADCP-metingen. Zwarte lijnen geven de gemiddelde afvoeren inclusief extrapolatie weer en de stippellijnen het bereik (maximale en minimale meting) van de repetities van afvoermetingen op de transecten.

2.3.2 Dieptegemiddelde stroomsnelheid door het zomerbed

Op elk transect is een dataset opgebouwd door 5-6 keer heen en weer te varen over ongeveer hetzelfde pad. De driedimensionale ADCP-data voor stroomsnelheden worden ingelezen en geïnterpreteerd met de ADCP-matlabtoolbox (Vermeulen, 2023). De stappen die per kilometerraai zijn uitgevoerd voor de verdere interpretatie van de data zijn als volgt:

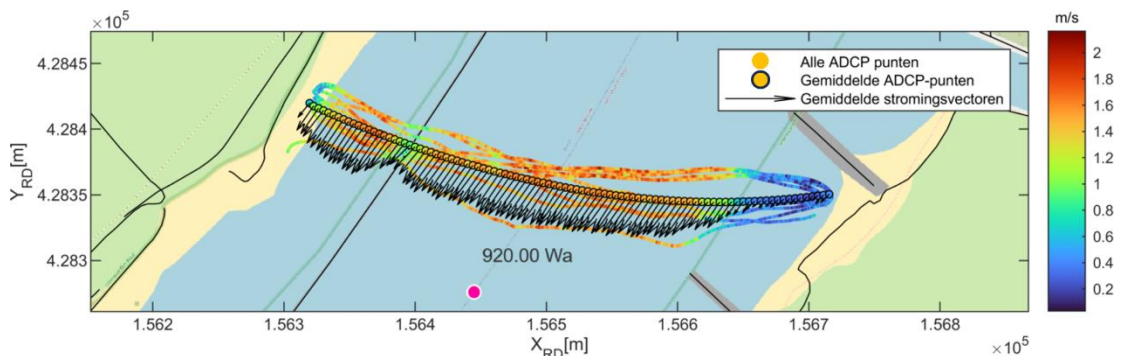
- voor ieder meetpunt is de dieptegemiddelde stroomsnelheid in x- en y-richting, en de resulterende stroomsnelheidsmagnitude in het horizontale vlak bepaald;

- om kortdurende en lokale fenomenen als turbulente wervels uit te middelen, wordt voor iedere kilometerraai een gemiddeld dwarsprofiel bepaald op het gefitte (c.q. gemiddelde) vaartraject, voor het 5-6 keer overvaren. Het gemiddelde vaartraject is bepaald door een derde-orde polygoon te fitten door de geografische coördinaten van de ADCP-meetpunten. Een voorbeeld van een dergelijk gefit transect wordt in Figuur 2-5 getoond voor kilometerraai 920. Tijdens het zomerhoogwater van 2021 was er voldoende diepgang over de langsdammen zodat de boten die de ADCP-metingen uitvoerden, hier overheen konden varen;



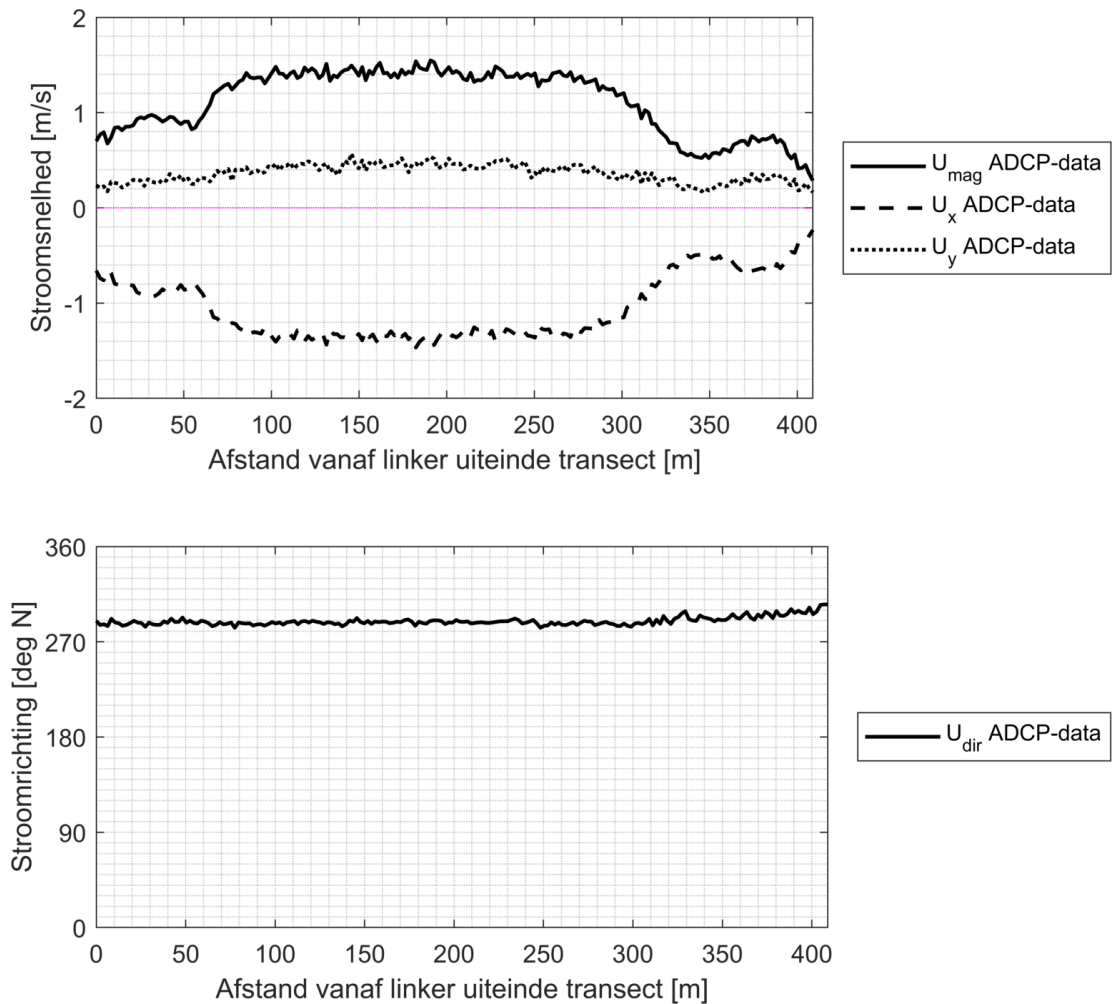
Figuur 2-5 ADCP-meetpunten en het daardoor gefitte vaartraject voor kilometerraai 920.

- De gefitte vaartrajecten worden opgedeeld in 200 punten op een gelijke afstand van elkaar. Voor ieder ADCP-meetpunt wordt bepaald wat het dichtstbijzijnde punt op het gefitte vaartraject is. Ten slotte wordt voor ieder punt op het gefitte traject voor de daarbij horende ADCP-meetpunten de gemiddelde x- en y-component bepaald en de magnitude van de stroomsnelheid berekend. Op deze manier weegt elke keer over varen even zwaar mee in de middeling op het gefitte vaartraject. Zo wordt er een ruimtelijk gemiddelde én een tijdsgemiddelde bepaald. Alle ADCP-meetpunten en de resulterende gemiddelde stroomsnelheidsvectoren op het gefitte traject zijn weergegeven in Figuur 2-6 voor kilometerraai 920;



Figuur 2-6 Vertaling van ADCP-metingen naar de projectie van de gemiddelde stroomsnelheidsvectoren op het gefitte vaartraject bij kilometerraai 920.

- het dwarsprofiel met dieptegemiddelde componenten en de magnitude van de stroomsnelheidsvector en de stroomrichting is weergegeven in Figuur 2-7. Deze gemiddelde stroomsnelheden en -richtingen op de gefitte vaartrajecten worden vervolgens gebruikt om voor ieder transect een vergelijking te maken met de gemodelleerde stroomsnelheid.



Figuur 2-7 De componenten en magnitude van de dieptegemiddelde stroomsnelheidsvector en de stroomrichting langs het gefitte vaartraject ter hoogte van kilometerraai 920. Het linker uiteinde van het transect is genomen ten opzichte van stroomafwaartse richting.

3 Modelopzet

3.1 Introductie

Dit hoofdstuk focust op de modeleigenschappen die van toepassing zijn op de validatiesommen, zoals de gebruikte programmatuur en hardware (paragraaf 3.2), het modeldomein (paragraaf 3.3), de randvoorwaarden (paragraaf 3.4) en de definitie van de modeluitvoer op basis waarvan de validatie wordt uitgevoerd (paragraaf 3.5).

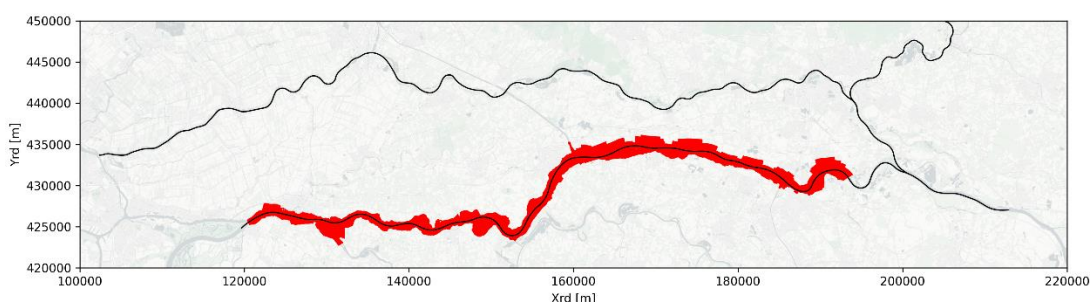
3.2 Gebruikte programmatuur en hardware

Voor het uitvoeren van de modelberekeningen is gebruik gemaakt van D-HYDRO Suite 2023.01. Alle berekeningen zijn uitgevoerd op het Linux H6 cluster bij Deltares, onder het CentOS 7 besturingssysteem. De berekeningen zijn gedraaid op 2 processoren met elk 4 cores. Modeldata worden verwerkt met behulp van Matlab R2023a en Python 3.10.

3.3 Modeldomein

Voor deze studie wordt als basis het 40-meterrooster Rijntakkenmodel (dflowfm2d-rijn-j22_6-v1a) gehanteerd. De validatiesommen richten zich op de Waal, omdat ADCP-data beschikbaar zijn voor rivierkilometers (rkm) 900-930 op de Waal. Het standaard 40-meterrooster Rijntakkenmodel wordt daarom gereduceerd tot een model met een kleiner modeldomein (Figuur 3-1). De bovenrand ligt op rkm 876.00 en komt overeen met de onttrekkingsrand van het deelmodel Nederrijn-Lek (dflowfm2d-rijn-beno19_6_20m_nrlek-v2a) en IJssel (dflowfm2d-rijn-beno19_6_20m_ijssel-v2a). De benedenrand ligt ter plaatse van Hardinxveld. De locatie van de benedenrand komt overeen met de benedenstroomse rand van het (20-meter) deelmodel van de Waal (dflowfm2d-rijn-beno19_6_20m_waal-v2a). Het Amsterdam-Rijnkanaal wordt niet opgenomen, omdat de Bernhardsluizen gesloten zijn bij de randvoorwaarden horende bij deze validatie.

Een belangrijk uitgangspunt van het model is dat het model gebruik maakt van winterruwheden. De hoogwatergolf in 2021 trad op in de maand juli. Hierdoor worden de ruwheden op de uiterwaarden onderschat ten opzichte van de situatie in de praktijk. De bestudeerde rivierafvoer in deze studie is echter niet zodanig extreem, waardoor de fractie van de afvoer die over het winterbed stroomt relatief beperkt is (maximaal ca. 10%). Daardoor wordt verwacht dat de fout die wordt geïntroduceerd door een onderschatting van de winterbedruwheid, beperkt zal zijn.



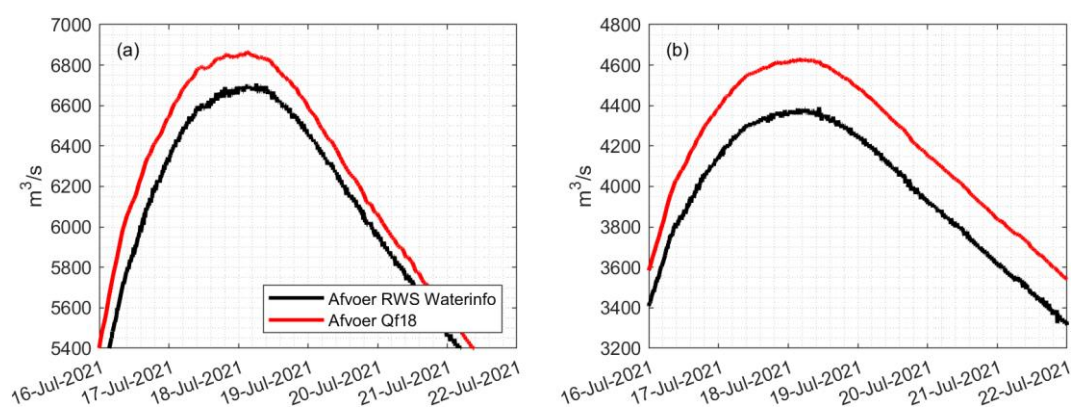
Figuur 3-1 Markering van het modeldomein (rood) ten opzichte van de Rijntakken (zwart).

3.4 Modelrandvoorwaarden

3.4.1 Verloop hoogwatergolf en modificatie Qf-relatie

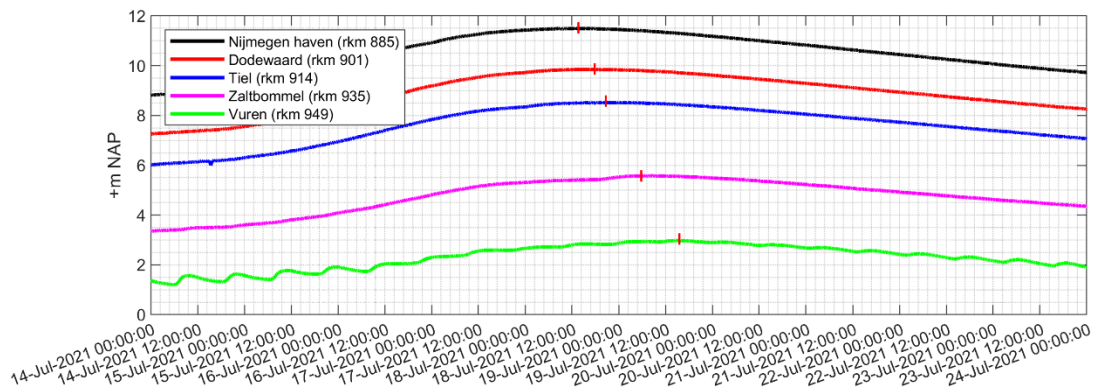
Randvoorwaarden die worden toegepast op het hydrodynamische model zijn afgestemd met de condities die optraden tijdens de ADCP-meetcampagne. De bovenstroomse rand van het model ligt ter hoogte van rkm 876 in de Waal. Tussen de Pannerdense Kop (rkm 867) en de bovenrand van het model (rkm 876) liggen geen lateralen die de afvoer in de Waal (significant) beïnvloeden. Daarom wordt de afvoer zoals geobserveerd ter hoogte van de Pannerdense Kop gebruikt om de afvoerrandvoorwaarde voor het model te construeren.

Hiervoor is in eerste instantie de waterafvoer opgevraagd bij RWS Waterinfo. Echter is in 2019 een update van de Qf-relaties uitgevoerd die pas vanaf maart 2022 operationeel is via Waterinfo. Ter hoogte van Lobith levert dit uiterlijk een toename op van uiterlijk 200 m³/s tijdens de piek van de afvoergolf. Op de Pannerdense Kop, waar een deel van de totale afvoer de Waal in stroomt, levert dit een verschil op van tot wel 250 m³/s tijdens de validatieperiode (Figuur 3-2). Uit de nieuwe Qf-relatie (Qf18) volgt een maximale Waalafvoer op 18 juli van circa 4.600 m³/s.



Figuur 3-2 Vergelijking van de afvoer tijdens de hoogwatergolf in 2021 volgens RWS Waterinfo en de Qf18-relatie ter plaatse van (a) Lobith en (b) de Waal bij de Pannerdense Kop.

De loopsnelheid van de hoogwatergolf is van belang bij het opstellen van de stationaire randvoorwaarden omdat de trajecten waarvoor ADCP-data beschikbaar zijn op een afstand van 30 tot 60 km van de Pannerdense Kop liggen. Dit betekent dus dat de geobserveerde afvoer op een bepaald traject niet op datzelfde moment ter plekke van de Pannerdense Kop geobserveerd werd. De loopsnelheid van de hoogwatergolf is in kaart gebracht door de tijdreeksen van waterstanden voor de maand juli 2021 op verschillende meetstations te vergelijken (Figuur 3-3). Wanneer naar het tijdstip van de maximale waterstand en de afstand tussen de meetstations wordt gekeken, volgt dat de loopsnelheid van de hoogwatergolf ongeveer 2,2 km/u bedroeg. In deze aanpak is het hysteresis-effect buiten beschouwing gelaten, omdat op deze stations geen tijdreeksen van rivierafvoer beschikbaar zijn. De looptijd van de afvoergolf bepalen op basis van enkel tijdreeksen van waterstanden geeft echter wel een globale inschatting die voor deze analyse voldoende is.

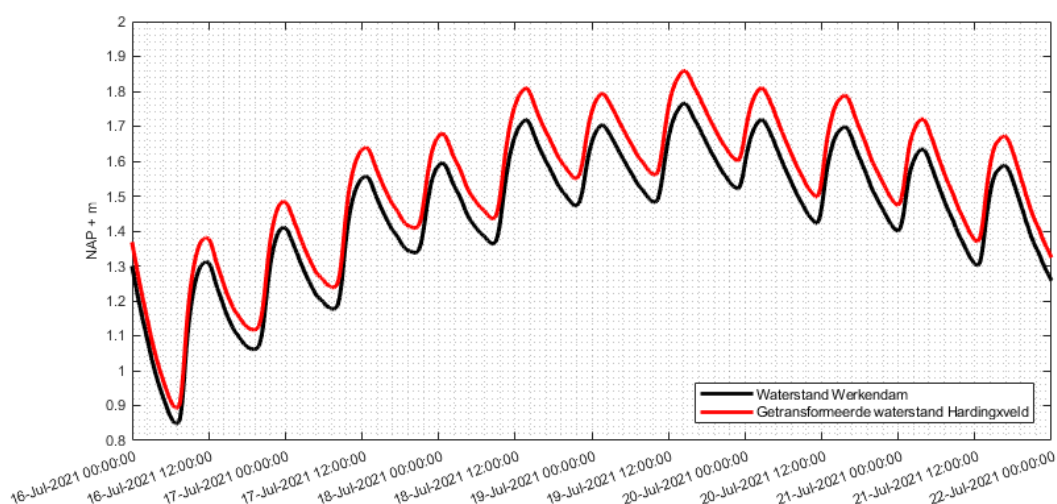


Figuur 3-3 Verloop van de afvoergolf op 5 meetstations, met markering van de maximale waterstand (1)

3.4.2 Waterstanden Hardinxveld

De benedenrand van het model ligt ter hoogte van Hardinxveld. Waterstanden zijn via RWS Waterinfo beschikbaar op het meetstation 'Werkendam buiten'. Deze waterstandsmetingen zijn vertaald naar Hardinxveld volgens de relatie uit Spruyt (2019) om zo het getijdesignaal op de benedenrand van het model te verkrijgen. De resultaten zijn gepresenteerd in Figuur 3-4.

Ter plaatse van de benedenrand heerst tijdens de validatieperiode (19-21 juli) een getij met een amplitude van 10-20 cm. Het effect van de hoogwatergolf is duidelijk aanwezig in deze tijdreeksen, waarin op 19 juli de maximale waterstand van ongeveer NAP +1,85 m optreedt ter hoogte van Hardinxveld.



Figuur 3-4 Tijdreeksen van de geobserveerde waterstand op station 'Werkendam buiten' en het getransformeerde signaal naar de locatie van de benedenrand van het model ter hoogte van Hardinxveld.

3.4.3 Stationaire simulaties

In deze studie worden alleen stationaire simulaties uitgevoerd. Er is gekozen voor stationaire simulaties om de analyse te vereenvoudigen. De belangrijkste redenen hiervoor zijn:

- deze studie is de eerste keer dat een dergelijke vergelijking wordt uitgevoerd. Daarom wordt de analyse zo eenvoudig mogelijk gehouden;
- het doorrekenen van een dynamische afvoergolf vergt ook inzicht in lateralen;
- fouten in waterstanden kunnen mogelijk groter worden;
- op deze manier hoeft er geen rekening gehouden te worden met de precieze tijd waarop de ADCP-metingen zijn uitgevoerd.

Deze keuze heeft een invloed op de resultaten. Voor het opstellen van de randvoorwaarden voor de validatiesommen is het daarom van belang een beeld te hebben hoe groot de impact is op de gesimuleerde stroomsnelheden in het zomerbed. Hiervoor is een reeks gevoeligheidssommen opgesteld. Deze brengen de variatie in beeld die gedurende één (theoretische) meetperiode van 12 uur kan optreden, door combinaties te maken van een bandbreedte aan afvoeren en benedenstroomse waterstanden die binnen 12 uur optreden. De randvoorwaarden voor deze gevoeligheidssimulaties komen in de volgende paragraaf aan bod.

3.4.4 Randvoorwaarden gevoeligheidssimulaties

Als basis voor de gevoeligheidssimulaties wordt uitgegaan van de situatie op 20 juli. Casus 1 is de referentiesimulatie, omdat deze uitgaat van gemiddelde condities op 20 juli. Casus 2-5 gaan uit van minima en maxima die binnen een periode van 12 uur optraden. Casus 2 en 3 hebben ten opzichte van casus 1 respectievelijk een hogere (+13 cm) en een lagere (-17 cm) benedenstroomse waterstand. Casus 4 en 5 hebben ten opzichte van casus 1 respectievelijk een hogere (+ 80 m³/s) en een lagere (- 80 m³/s) rivierafvoer (zie Tabel 3-1).

Naast 5 stationaire condities is ook een tijdsafhankelijke simulatie (casus 6) uitgevoerd met een getijdesignaal op de benedenstroomse rand van het model om in te schatten wat het effect van het getij is op de stroomsnelheden in het zomerbed.

Tabel 3-1 Overzicht van randvoorwaarden voor de gevoeligheidssimulaties.

Casus	Afvoer bovenstrooms	Waterstand benedenstrooms
1	4.100 m ³ /s	NAP +1,64 m
2	4.100 m ³ /s	NAP +1,77 m
3	4.100 m ³ /s	NAP +1,48 m
4	4.180 m ³ /s	NAP +1,64 m
5	4.020 m ³ /s	NAP +1,64 m
6	4.100 m ³ /s	Getijdesignaal

3.4.5 Randvoorwaarden validatiesimulaties

Uit de gevoeligheidsanalyse volgt dat de waterstandsvariatie op de benedenrand van het model van ondergeschikt belang is voor de analyse van gemodelleerde stroomsnelheden, daar waar de bovenstroomse rivierafvoer een grotere invloed heeft (zie paragraaf 4.2). Variaties in gemodelleerde stroomsnelheid die ten gevolge van een variërende afvoer optreden binnen één dag zijn niet significant, maar over een periode van drie opeenvolgende dagen kunnen verschillen in afvoer de resultaten wel beïnvloeden. Er is daarom gekozen om drie stationaire validatiesommen uit te voeren voor de drie verschillende meetdagen waarop ADCP-metingen zijn uitgevoerd, elk met een gemiddelde afvoer over de meetperiode. Ter volledigheid is ook voor iedere simulatie een benedenstroomse waterstand opgelegd die gemiddeld is voor de meetdag (24 uur). De combinaties randvoorwaarden zijn samengevoegd in Tabel 3-2.

Voor de selectie van de afvoer op de bovenrand van het model is rekening gehouden met het moment waarop de metingen zijn uitgevoerd, de loopsnelheid van de afvoergolf en de gemiddelde afstand van de meettrajecten van die dag ten opzichte van de Pannerdense Kop. De benedenstroomse waterstand is gebaseerd op de gemiddelde waterstand bij Hardinxveld op de meetdag.

Tabel 3-2 Overzicht van randvoorwaarden voor de validatiesimulaties.

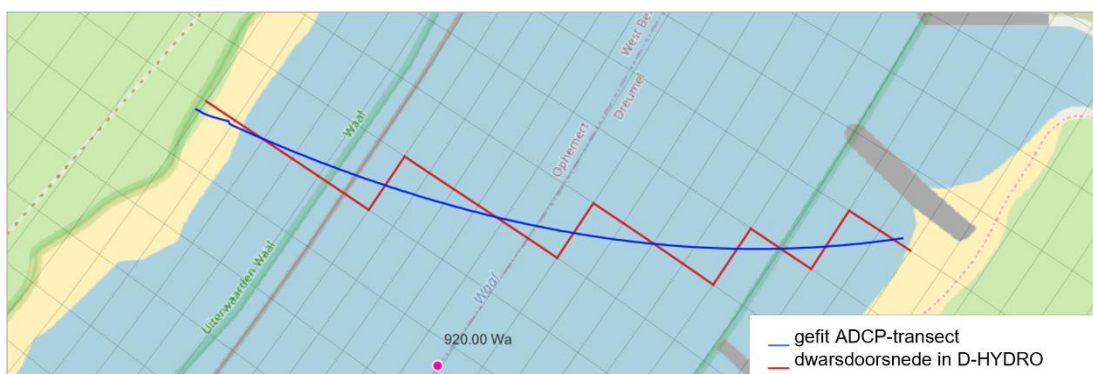
Dag	Trajecten	Gemiddelde afstand tot Pannerdense Kop	Looptijd afvoergolf	Tijdstip metingen	Afvoer Pannerdense Kop	Waterstand Hardinxveld
19 juli	rkm 900 – 909	38 km	17 uur	9:30 – 15:45	4.535 m ³ /s	NAP +1,71 m
20 juli	rkm 910 - 921	49 km	22 uur	8:00 – 16:30	4.298 m ³ /s	NAP +1,65 m
21 juli	rkm 922 - 930	59 km	27 uur	7:40 – 13:00	4.064 m ³ /s	NAP +1,54 m

In de bepaling van de afvoer op de bovenrand van het model is topvervlakking van de hoogwatergolf buiten beschouwing gelaten. Dit houdt in, dat wordt aangenomen dat de maximale afvoer in de afvoergolf constant blijft en lateralen (zoals het Hollands-Duitsch-gemaal, of het schutverlies bij de Prins Bernhardsluizen) geen rol spelen. In Kosters & Visser (2022) wordt aangetoond dat het verschil in afvoerpiek ten gevolge van topvervlakking bij een afvoergolf met een maximale Bovenrijnafvoer van 6.000 m³/s ongeveer 80 m³/s kan bedragen tussen de Pannerdense Kop en rivierkilometer 930 op de Waal. Dit principe is in deze studie buiten beschouwing gelaten, omdat de mate van topvervlakking sterk afhankelijk is van de vorm en maximale afvoer van de afvoergolf. Dit is dus een onzekere factor die niet op voorhand bepaald kan worden. Daarnaast is de relatieve verandering in afvoer door topvervlakking relatief beperkt ten opzichte van de absolute afvoerniveaus die zijn bestudeerd (ca. 1-2%).

3.5 Modeluitvoer

3.5.1 Afvoer door het zomerbed

De gefitte ADCP-transecten worden ook als lijn opgegeven in het D-HYDRO-model. Het model vertaalt deze lijnen naar dwarsdoorsnedes waar de waterafvoer door wordt bepaald (Figuur 3-5). Op deze manier kan het gemodelleerde debiet door deze trajecten worden verkregen. Omdat de lijnen worden geprojecteerd op het rekenrooster, kan het voorkomen dat een dwarsdoorsnede in het model niet helemaal overeenkomt met de lijn van het gefitte ADCP-transect. Zo wordt de dwarsdoorsnede hoekiger door de projectie en kan het voorkomen dat aan de uiteindes een cel net wel of net niet wordt opgenomen in de dwarsdoorsnede. Omdat het aan de uiteindes van de dwarsdoorsnedes ondiepe delen betreft, waar de bijdrage van de afvoer aan het totaal gering is, is de invloed van deze roosterprojectie op de resultaten verwaarloosbaar.



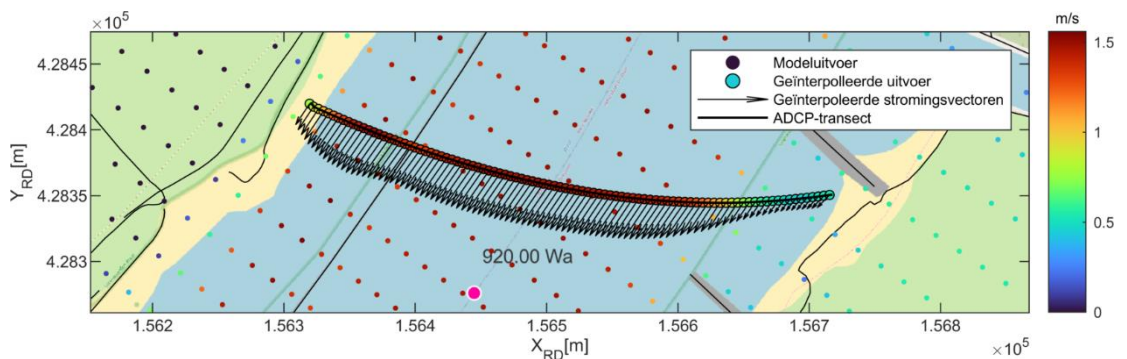
Figuur 3-5 Vergelijking tussen het gefitte ADCP-transect en de bijhorende dwarsdoorsnede in D-HYDRO.

Voor de debieten door de transecten geldt dat het gemiddelde over de laatste 25 tijdstappen (met een tijdsinterval van 5 minuten) van de simulatie wordt geanalyseerd. Dit gemodelleerde debiet wordt vergeleken met de geobserveerde debieten uit de ADCP-meetcampagne (zie Figuur 2-4), zonder extrapolatie naar de ondiepe oevers. Deze ondiepe oevers vallen namelijk buiten de ADCP-transecten en maken dus ook geen onderdeel uit van de dwarsdoorsneden in het D-HYDRO-model.

3.5.2 Dieptegemiddelde stroomsnelheid door het zomerbed

Voor de gevoeligheidssimulaties is gekeken naar de magnitude van dieptegemiddelde stroomsnelheid op de rivieras. Hiervoor zijn de standaard 20m-uitvoerpunten op de rivieras gebruikt. De magnitude van de stroomsnelheden is vervolgens gemiddeld over de laatste 25 tijdstappen (met een tijdsinterval van 5 minuten) van de simulatie.

Voor de validatiesimulaties is de Fourier map-uitvoer van de D-HYDRO-simulaties gebruikt om de (stationaire) dieptegemiddelde stroomsnelheden te analyseren. Daarin worden de tweedimensionale velden van de x- en y-component gemiddeld over de laatste 25 tijdstappen van de simulatie. De tweedimensionale uitvoer wordt door middel van lineaire interpolatie geprojecteerd op de gefitte ADCP-transecten. Dit betekent dat, op basis van de afstand tot het gefitte ADCP-traject, een gewogen gemiddelde wordt bepaald van de omliggende snelheidspunten. Ten slotte wordt op basis van de geïnterpoleerde x- en y-vectoren de magnitude van de stromingsvectoren bepaald op het gefitte ADCP-transect. Een overzicht van de modeluitvoer en de geïnterpoleerde modeluitvoer voor het transect bij rkm 920 wordt gegeven in Figuur 3-6.



Figuur 3-6 Tweedimensionale modeluitvoer, en de interpolatie naar het ADCP-transect.

4 Resultaten

4.1 Introductie

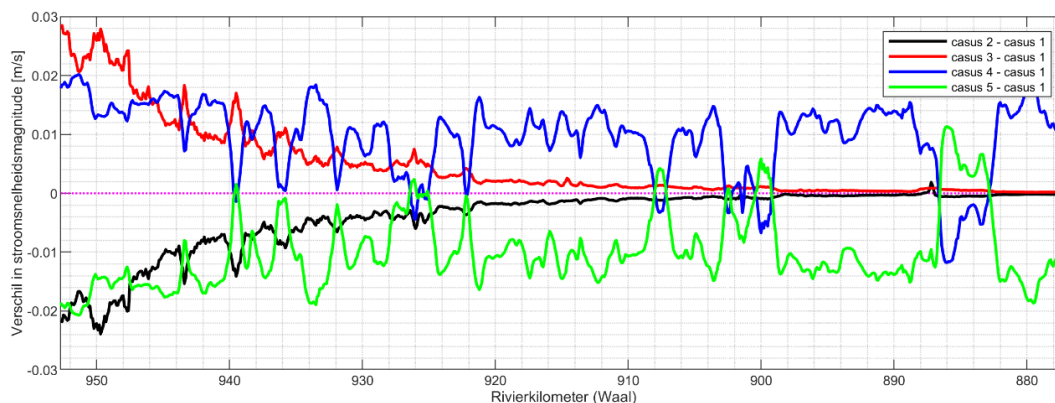
Dit hoofdstuk behandelt de resultaten van de gevoeligheidssimulaties (paragraaf 4.2) en de validatiesimulaties. Voor de validatiesimulaties wordt onderscheid gemaakt in de afvoer door het zomerbed (paragraaf 4.3) en de dieptegemiddelde stroomsnelheid langs de ADCP-transecten (paragraaf 0).

4.2 Gevoeligheidssimulaties

4.2.1 Stationaire simulaties (casus 1 – 5)

Figuur 4-1 toont de verschillen in stroomsnelheid op de rivieras ten opzichte van casus 1. De invloed van variatie in waterstand op de benedenstroomse rand van het model neemt af in bovenstroomse richting (casus 2 en 3). Tussen rivierkilometer (rkm) 900 en 930 leiden dagelijkse variaties in de waterstand tot een verschil in stroomsnelheid van ± 5 mm/s. Deze variatie heeft een verwaarloosbare invloed op de validatie van de stroomsnelheden. Er kan voor de validatiesommen dus worden gerekend met een daggemiddelde waterstand op de benedenrand van het model.

De invloed van 80 m³/s afvoervariatie gedurende een dag (casus 4 en 5) is over het volledige rekendomein merkbaar en is gemiddeld ongeveer $\pm 1,5$ cm/s. Omdat de volledige validatieperiode 3 dagen duurt, kunnen variaties in stroomsnelheid ten gevolge van een verandering in afvoer over deze periode oplopen tot ongeveer ± 5 cm/s. De resultaten lijken dus gevoeliger voor dagelijkse variatie in rivierafvoer dan de variatie in benedenstroomse waterstanden. Hieruit volgt dat het van belang is per meetdag een set randvoorwaarden te hanteren. Hierdoor wordt de modelfout zoveel mogelijk beperkt.



Figuur 4-1 Verskil in stroomsnelheidsmagnitude op de rivieras ten opzichte van casus 1.

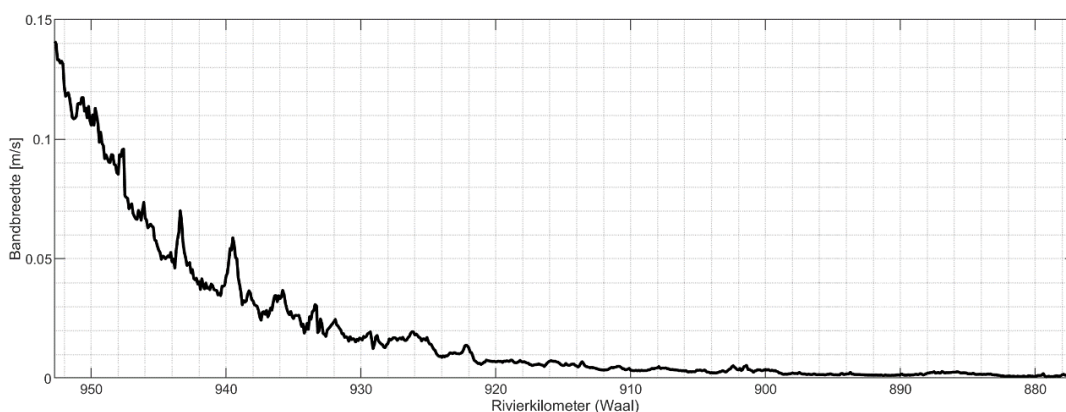
Opvallend is dat voor een afnemend debiet (casus 5 ten opzichte van casus 4) de stroomsnelheid op de as toeneemt op bijvoorbeeld rkm 883 – 886 (nevengeul Lent) en rkm 899 – 901 (Afferdensche Waard). Dit zijn locaties waar relatief veel water het winterbed instroomt. Het kan voorkomen dat bij grotere afvoeren een grotere deel via het winterbed wordt afgevoerd, waardoor de stroomsnelheden afnemen in het winterbed.

4.2.2 Tijdsafhankelijke simulatie (casus 6)

Ten slotte is gekeken naar de invloed van getijdynamiek op de stroomsnelheden op de rivieras. De variatie in stroomsnelheid die wordt veroorzaakt door het getij is in beeld gebracht door de bandbreedte in stroomsnelheid (het verschil tussen maximale en minimale stroomsnelheden) te bepalen over een periode van 5 dagen tussen 18 juli en 22 juli.

De bandbreedte in stroomsnelheid is gepresenteerd in Figuur 4-2. Aan de benedenstroomse zijde van het domein, waar de waterstandsvariatie ten gevolge van het getij het grootst is, is de bandbreedte in stroomsnelheid ook het grootst en maximaal ongeveer 14 cm/s. In bovenstroomse richting neemt deze bandbreedte geleidelijk af.

Tussen rkm 925 en 930 leidt het getij tot een maximaal verschil in stroomsnelheid van 1,5 – 2 cm/s. Over het grootste deel van het interessedomein voor de vergelijking met ADCP-data (rkm 900-925) is de bandbreedte kleiner dan 1 cm/s. Daarom wordt de invloed van getij als ondergeschikt gezien in de validatie van stroomsnelheden en volstaat een daggemiddelde benedenstroomse waterstand als randvoorwaarde.

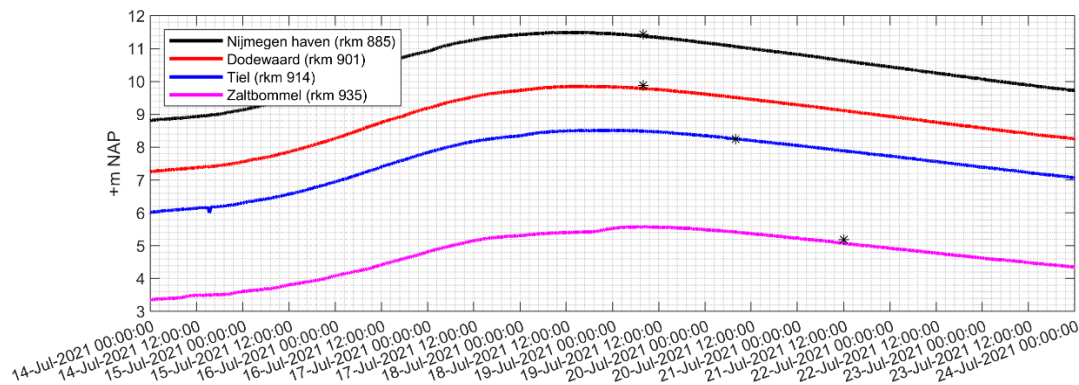


Figuur 4-2 Bandbreedte in stroomsnelheidsmagnitude op de rivieras over een periode van 5 dagen.

4.3 Validatiesimulaties: afvoer door zomerbed

4.3.1 Waterstanden

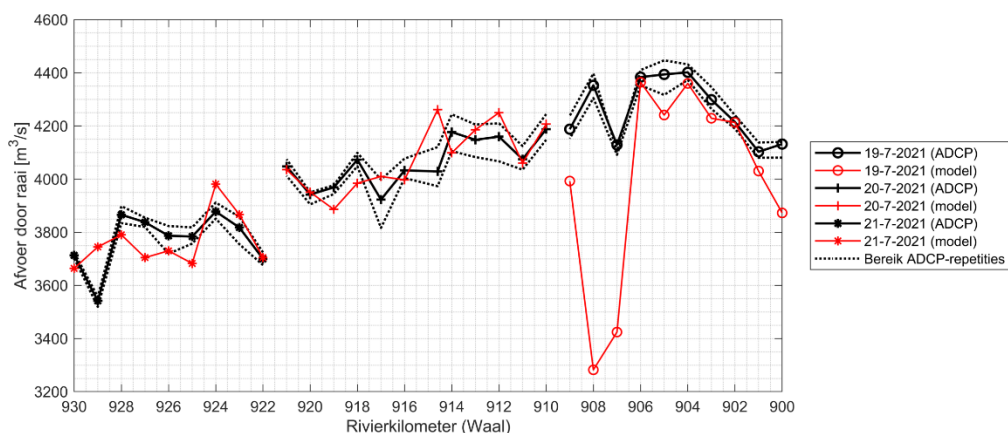
Ten eerste presenteert Figuur 4-3 de geobserveerde en gemodelleerde waterstanden op vier verschillende meetstations langs de Waal. Voor Nijmegen haven (rkm 885) en Dodewaard (rkm 901) worden de resultaten uit de eerste validatiecase (19 juli, zie Tabel 3-2) getoond. Het model overschat de waterstand in beide gevallen met ongeveer 10 cm. De tweede validatiecase (20 juli, zie Tabel 3-2) wordt getoond ter plaatse van het meetstation bij Tiel, waar de stationaire waterstand goed overeenkomt met de gemeten tijdreeks. De waterstand te Zaltbommel wordt vergeleken met de derde validatiecase (21 juli, zie Tabel 3-2). Hier bedraagt het verschil in waterstand ook zo'n 10 cm.



Figuur 4-3 Verloop van de afvoergolf op 4 meetstations, met de gemodelleerde, stationaire waterstand (*).

4.3.2 Overzicht resultaten afvoer door meettransect

De afvoer bepaald door de ADCP-metingen (zonder extrapolatie voor de ondiepe oevers) en door het D-HYDRO-model is gepresenteerd in Figuur 4-4. In de figuur wordt onderscheid gemaakt tussen de verschillende meetdagen.

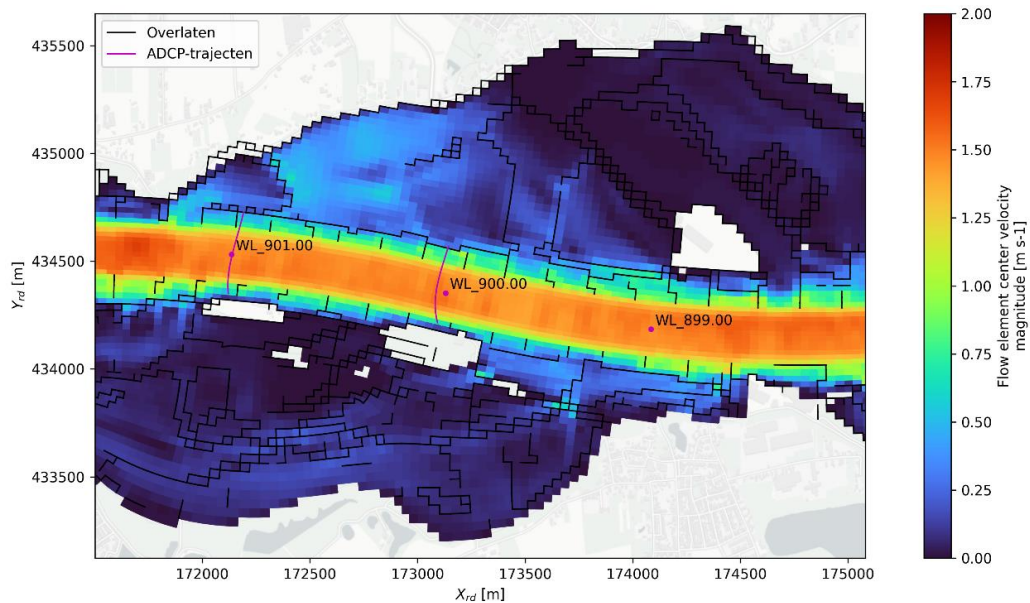


Figuur 4-4 Waterafvoer door de transecten in de Waal op basis van de ADCP-data (zwart) en de modelsimulatie (rood).

Het globale beeld is dat de gemodelleerde waterafvoer door het ADCP-meettransect vergelijkbaar is met de geregistreeerde afvoer in de ADCP-metingen. Enkele uitzonderingen vallen op en worden hieronder toegelicht. Deze uitzonderingen zijn geselecteerd op basis van een verschil in zomerbedafvoer van ten minste 200 m³/s (ca. 5% van totale afvoer).

4.3.3 Rivierkilometer 900-901

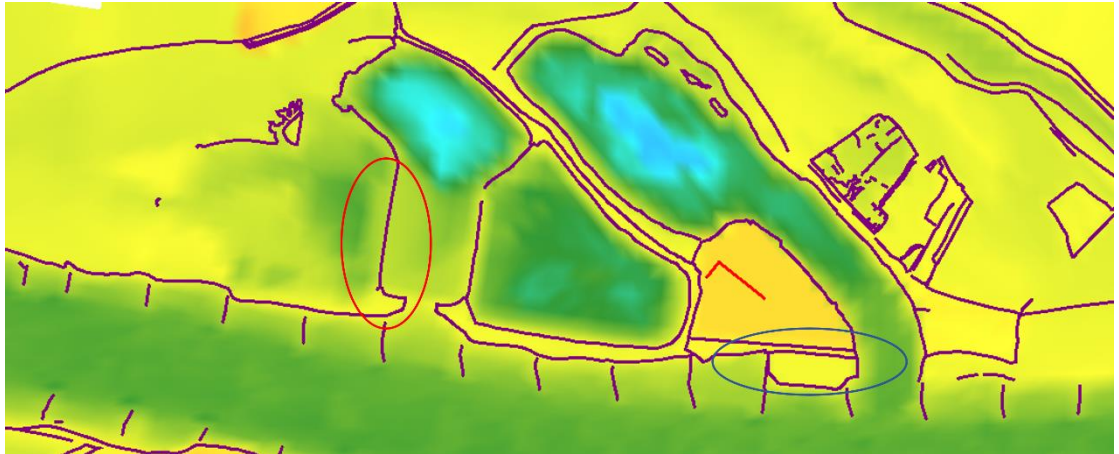
Op deze locaties levert het model een onderschatting van de zomerbedafvoer ten opzichte van de ADCP-metingen. Het stroombeeld ter hoogte van rkm 900 is weergegeven in Figuur 4-5. Op dit punt in de rivier ligt aan de rechteroever de Hiense Waard en aan de linkeroever de Afferdense en Deestse Waard.



Figuur 4-5 Stroombeeld ter hoogte van rivierkilometer 900 in de Waal.

Direct bovenstrooms van rkm 900, en direct benedenstrooms van rkm 899 stroomt een deel van de totale afvoer beide uiterwaarden in. In het model wordt de zomerbedafvoer ter hoogte van rkm 900 onderschat ten opzichte van de ADCP-metingen. Dit betekent dat in het model te veel water vanuit het zomerbed de uiterwaarden instroomt. Waarschijnlijk stroomt er vooral te veel water richting de Hiense Waard (rechter uiterwaard, rkm 899,5), omdat de gemodelleerde zomerbedafvoer ter plaatse van rkm 901 veel dichterbij de ADCP-meting ligt. De Hiense Waard eindigt namelijk ter hoogte van rkm 901, de locatie waar het water vanuit deze uiterwaard terug de rivier in stroomt. Het resterende verschil in zomerbedafvoer ter plaatse van rkm 901 tussen de ADCP-data en het model kan worden veroorzaakt doordat er ook te veel water de Afferdense en Deestse waard instroomt (linker uiterwaard, rkm 899,5), zij het dat dit aandeel kleiner is dan de afvoer richting de Hiense Waard.

Een oorzaak voor de overschatting van het debiet door de uiterwaarden is het feit dat de hoogte van de zomerbedafvoer of oevers langs de rivier in het model niet goed overeenkomt met de realiteit. Een vergelijking tussen het AHN4 (ingewonnen tussen december 2021 en maart 2022) en de hoogte van de rechteroever bij de instroomopening van de Hiense Waard (fixed weir) toont aan dat de overlaathoogte op sommige stukken maximaal 0,5 – 1,0 meter lager is dan de bodemhoogte op dit punt volgens het AHN4 (Figuur 4-6). Daarnaast heeft de bodem ten zuiden van het fabrieksterrein De Beijer in het model een hoogteligging die tot ongeveer 1 meter lager is dan in het AHN4 is vastgelegd, zie ook Figuur 4-6.

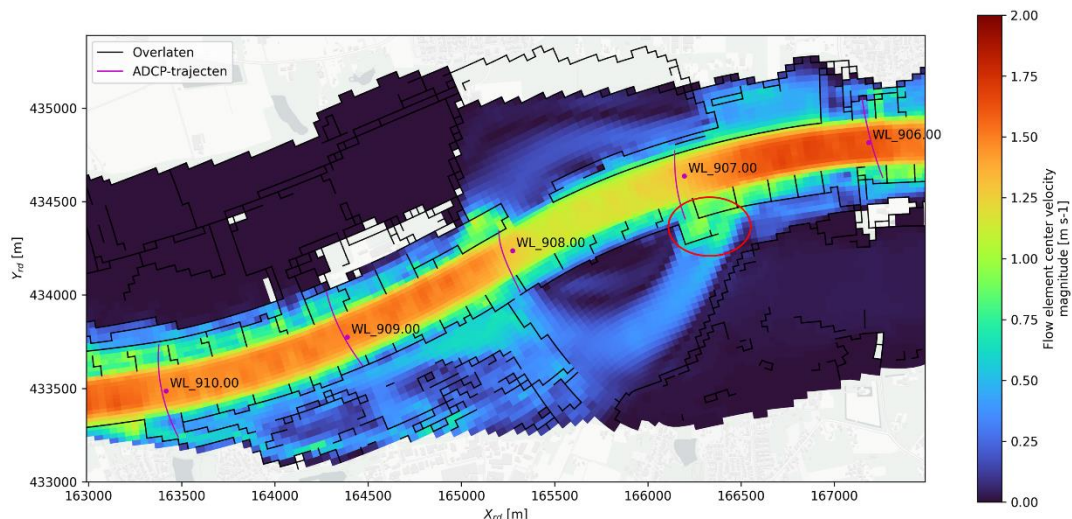


Figuur 4-6 Detail van overlaat (rood omcirkeld) met een onjuiste overlaathoogte ten opzichte van AHN4 die mogelijk invloed heeft op de te grote instroom richting de Hiense Waard, en de bodem ten zuiden van het fabrieksterrein De Beijer (blauw omcirkeld).

4.3.4 Rivierkilometer 907-909

Op dit traject levert het model een relatief grote onderschatting (ca. 700 m³/s – 1.100 m³/s) van de zomerbedafvoer ten opzichte van de ADCP-data. Figuur 4-7 toont het stroombeeld ter plaatse van rivierkilometer 907-909. Op rkm 907 stroomt het water vanuit het zomerbed over de linkeroever de uiterwaard bij Beneden-Leeuwen in (Drutense waarden / Leeuwens waard). Het water stroomt tussen rkm 908 en 910 terug richting de hoofdgeul. Langs de rechteroever stroomt op rkm 907 een (kleiner) deel van de afvoer de overnachtingshaven IJzendoorn binnen, dat op rkm 908 weer terug de hoofdgeul instroomt.

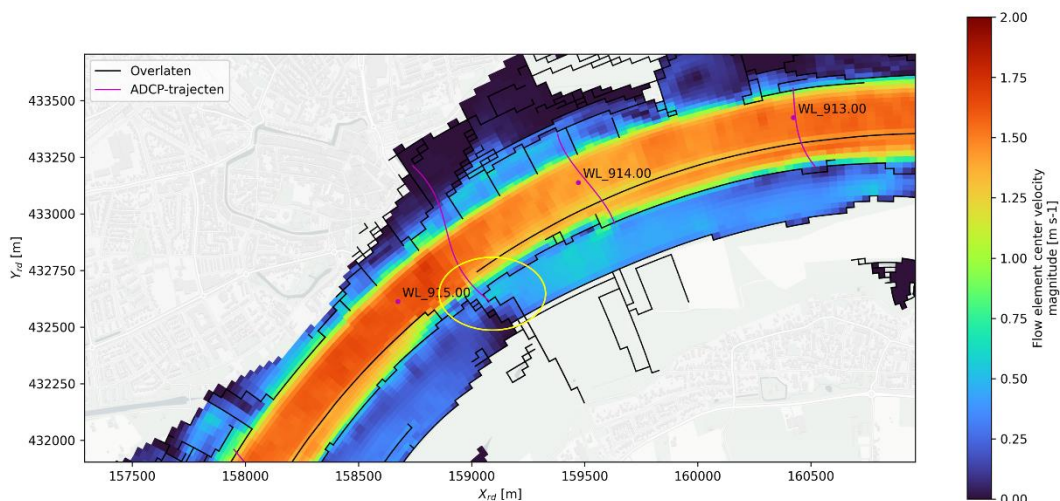
Tussen rivierkilometer 907 en 908 wordt de zomerbedafvoer relatief het meest onderschat door het model. Tussen rkm 908 en 909 neemt dit verschil af. Vanaf 910 komt de gemodelleerde zomerbedafvoer overeen met de ADCP-registratie. De oorzaak voor dit verschil in zomerbedafvoer tussen 907 en 909 ontstaat doordat er te veel water de uiterwaard bij Beneden Leeuwen instroomt via de Kaliwaal. Via een kade stroomt een geconcentreerde stroming via de noordoostelijke zijde van de Kaliwaal de uiterwaard in. Langs deze noordoostelijke zijde staan geen bomen. Volgens het AHN4 heeft deze kade een kruinhoogte van circa NAP +9,4 – 9,6 m. In het D-HYDRO-model lijkt deze drempel nog niet te zijn geïmplementeerd. De huidige overlaat die op de plaats van de drempel ligt (rood omcirkeld in Figuur 4-7) heeft een kruinhoogte van ongeveer NAP +5,5 – 6,5 m. Dit is ruim 3-4 m te laag, met als gevolg dat er te veel water de uiterwaard van Beneden Leeuwen instroomt. Daarnaast is de linkeroever (c.q. overlaat) tussen rkm 908 en 910 in het model tot ongeveer 1 m lager dan in AHN4.



Figuur 4-7 Stroombeeld ter hoogte van rivierkilometer 907-909 in de Waal.

4.3.5 Rivierkilometer 914,6

Voor het transect op rkm 914,6 geeft het model een overschatting van de zomerbedafvoer. Het stroombeeld rondom deze raai is weergegeven in Figuur 4-8. De ADCP-data horende bij deze raai zijn niet enkel over het zomerbed opgenomen, maar reikt aan de noordzijde tot in de vluchthaven bij Tiel en aan de zuidzijde tot een ondiep deel direct bovenstrooms van een veerweg (gele markering in Figuur 4-8). In dit deel van de Waal liggen ook langsdammen, in combinatie met gestrekte oevers aan de linkerzijde in het zomerbed.

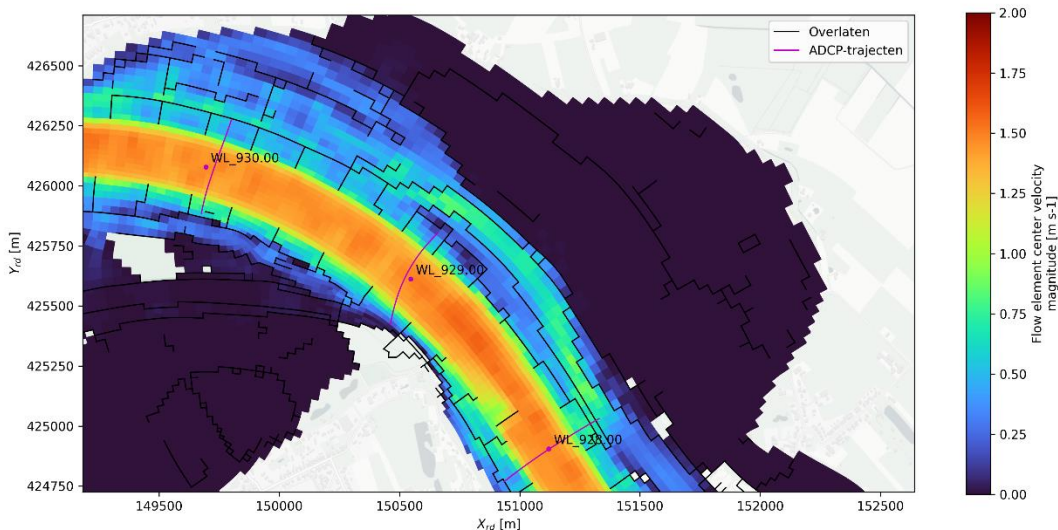


Figuur 4-8 Stroombeeld ter hoogte van rivierkilometer 914,6 in de Waal met een paarse markering van het ADCP-transect en een gele cirkel om de locatie waar de afvoer wordt overschat.

De overschatting van de zomerbedafvoer komt vooral door een overschatting van de stroomsnelheden aan de zuidkant van het ADCP-transect, zoals in paragraaf 0 verder wordt toegelicht. Aan het zuidelijke uiteinde van het transect ligt een ondiep deel en een veerstoep. Door de relatief grove roosterresolutie kan het zijn dat deze ondiepte, in combinatie met een veerstoep leidt tot een onnauwkeurige representatie die de stroming hier beïnvloedt en leidt tot een overschatting van het debiet dat hier passeert. Een andere mogelijke oorzaak voor dit lokale verschil in stroomsnelheid is de inundatiefrequentie van de linker uiterwaard. Deze stroomt bij de gesimuleerde afvoer maar deels over en staat dus gedeeltelijk droog, terwijl deze in werkelijkheid mogelijk volledig inundeert, en dus een deel van het debiet kan afvoeren.

4.3.6 Rivierkilometer 929

Ten slotte is het stroombeeld rondom rkm 929 weergegeven in Figuur 4-9. Over deze raai levert het model een overschatting van de zomerbedafvoer op ten opzichte van de ADCP-meting. Langs de rechteroever ligt de uiterwaard bij Heesselt, waar onder de gesimuleerde condities alleen over de benedenstroomse helft water stroomt. Wel ligt er rechts van de hoofdgeul een eenzijdig aangetakte nevengeul. Aan de bovenstroomse zijde van deze nevengeul bevindt zich een flauwe drempel met een kruin op circa NAP +3,5 – 4 m, die gemiddeld ongeveer een maand per jaar overstroomt (Rijkswaterstaat, 2021).



Figuur 4-9 Stroombeeld ter hoogte van rivierkilometer 929 in de Waal.

De overschatting van de zomerbedafvoer ten opzichte van de ADCP-metingen betekent dat er in het model relatief te weinig water door de aangetakte nevengeul stroomt. De nevengeul heeft een breedte van twee à drie roosterzellen. Het is daarom aannemelijk dat de geometrie van de nevengeul niet nauwkeurig genoeg in de modelschematisatie is opgenomen om het debiet dat door de nevengeul wordt afgevoerd goed te simuleren. Ook komt de bodemhoogte rechts van de nevengeul (overlaat langs de rechteroever) niet goed overeen met de hoogte uit AHN4. Deze heeft een uniforme kruinhoogte van NAP +4 m, terwijl deze in AHN4 varieert tussen NAP +4 en NAP +7 m. Ten opzichte van de andere, hiervoor besproken raaien waar duidelijke verschillen te zien zijn in zomerbedafvoer tussen de ADCP-metingen en het model, zijn de verschillen op deze raai relatief klein (ca. 200 m³/s).

Ten slotte is in dit stroombeeld een opvallende verlaging van de stroomsnelheid te zien op rivierkilometer 928,3. Dit is de ontgrondingskuil direct benedenstrooms van de vaste laag bij Sint-Andries. De bovenstroomse zijde van deze ontgrondingskuil is geschematiseerd met een overlaat om het energieverlies in rekening te brengen ten gevolge van loslating en wervelvorming van de stroming langs de bodem.

4.4 Validatiesimulaties: dieptegemiddelde stroomsnelheid

4.4.1 Overzicht resultaten

Net als voor de zomerbedafvoeren, is het globale beeld dat de modelresultaten van de dieptegemiddelde stroomsnelheid in lijn zijn met de ADCP-metingen. De bestaande verschillen ontstaan over het algemeen rondom trajecten waar ook een significant verschil in zomerbedafvoer is waargenomen, in de buurt van langsdammen en in kribvakken. De overgangen tussen zomerbed en kribvak zijn in het model minder scherp dan in de ADCP-metingen. Mogelijke oorzaken hiervoor zijn:

- de afwezigheid van driedimensionale stromingspatronen die in het 2DH-DHYDRO-model niet direct worden gesimuleerd;
- de grofheid van het rekenrooster, waardoor scherpe gradiënt (in dwarsrichting) niet voldoende in beeld worden gebracht;
- de berekende (lokale) energieverliezen;
- de lokale modelinstellingen rondom kribvakken met betrekking tot de viscositeit.

Deze oorzaken kunnen in een vervolgonderzoek met een verfijnd (detail-)model rondom kribvakken worden onderzocht.

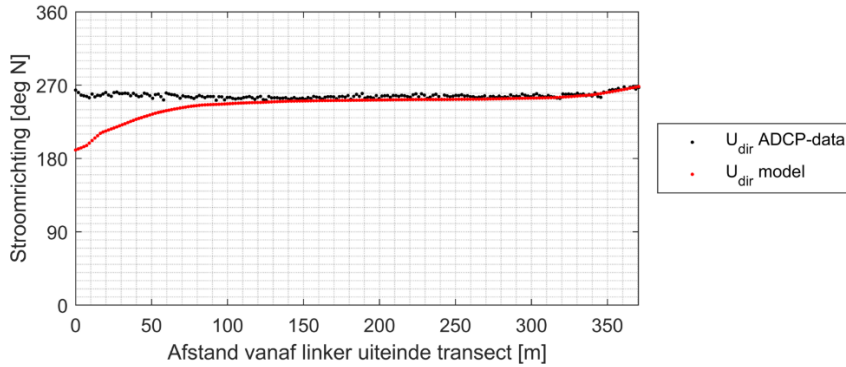
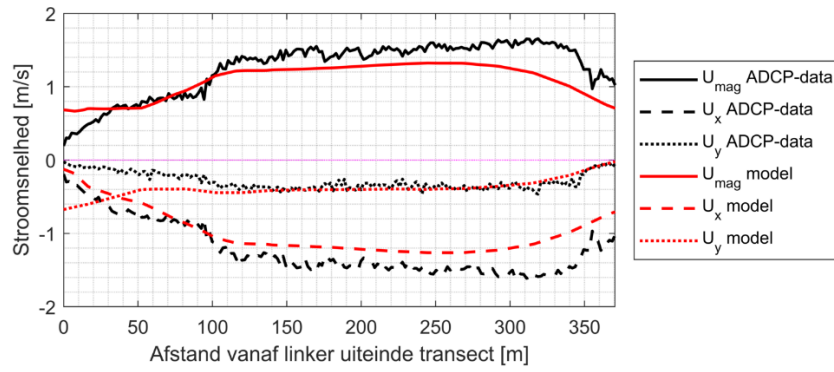
De resultaten voor alle transecten zijn weergegeven in Bijlage A. In dit hoofdstuk komen de transecten aan bod waarvoor noemenswaardige verschillen op te merken zijn tussen de ADCP-metingen en de gemodelleerde stroomsnelheid.

4.4.2 Rivierkilometer 907-909

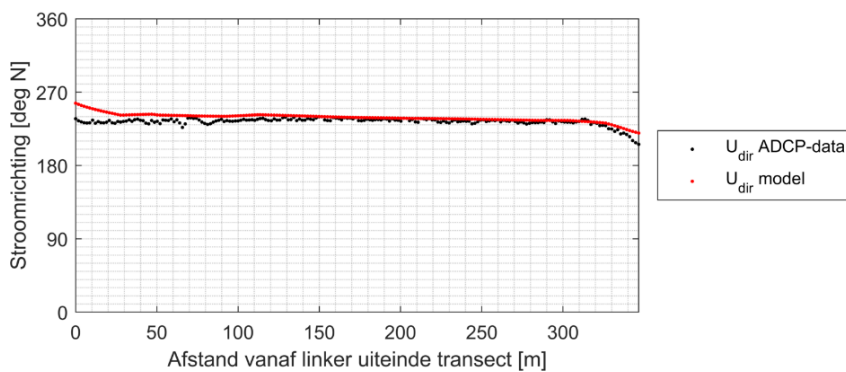
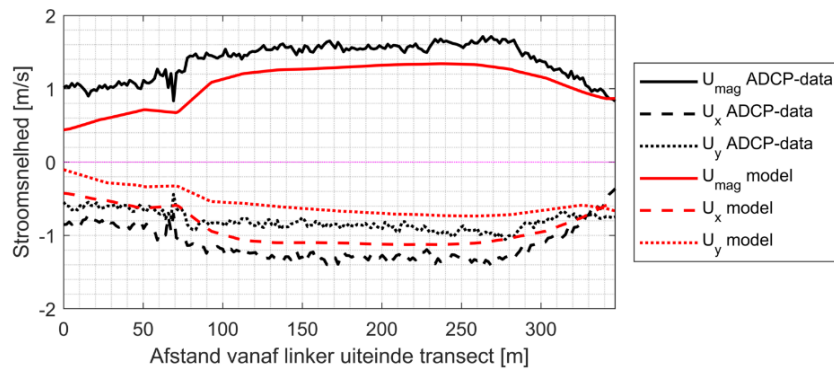
Het verschil in zomerbedafvoer tussen de ADCP-metingen en het model (paragraaf 4.3.4) vertaalt zich door in verschillen in dieptegemiddelde stroomsnelheden voor de rivierkilometers 907-909. De resultaten zijn voor deze raaien weergegeven in Figuur 4-10 t/m Figuur 4-12.

Het patroon van de stroomsnelheid en de stromingsrichting langs het transect zijn vergelijkbaar voor de ADCP-metingen en de modelresultaten. Echter is de magnitude van de stroomsnelheid op rkm 907 en 908 over vrijwel de volledige breedte van het zomerbed in het model ongeveer 0,2 – 0,4 m/s lager dan in de ADCP-metingen. Dit verschil is toe te schrijven aan het verschil in zomerbedafvoer.

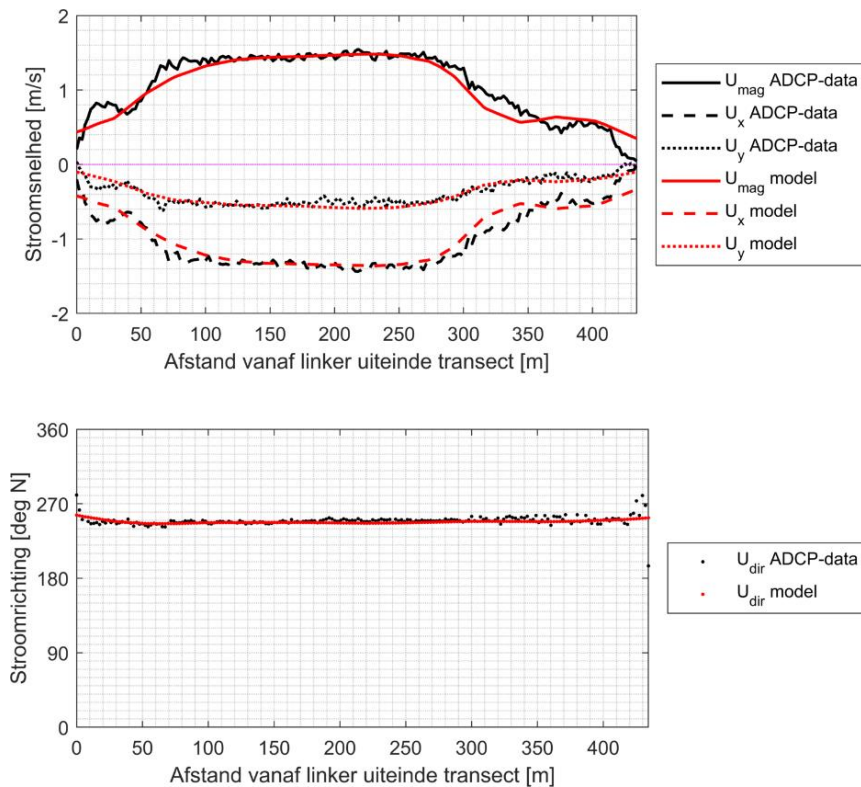
Het is opmerkelijk dat op rivierkilometer 907 de y-component van de stromingsvector aan de linkeroever wordt overschat en de stroming relatief te veel in zuidwaartse richting stroomt in het model. Dit duidt op te hoge stroomsnelheden richting de linker uiterwaard, wat ook leidt tot een te hoog debiet naar de Drutense en Leeuwense waard. Op rivierkilometer 908 is te zien dat de stroming in het model langs de linkeroever juist te veel in noordwaartse richting stroomt, wat erop duidt dat het water vanuit de linker uiterwaarde weer terugstroomt richting het zomerbed.



Figuur 4-10 Vergelijking van de stromingsvectoren (richting en magnitude) van de ADCP-,metingen en het model voor rivierkilometer 907. Het linker uiteinde van het transect is genomen ten opzichte van de stroomrichting.



Figuur 4-11 Vergelijking van de stromingsvectoren (richting en magnitude) van de ADCP-,metingen en het model voor rivierkilometer 908. Het linker uiteinde van het transect is genomen ten opzichte van de stroomrichting.

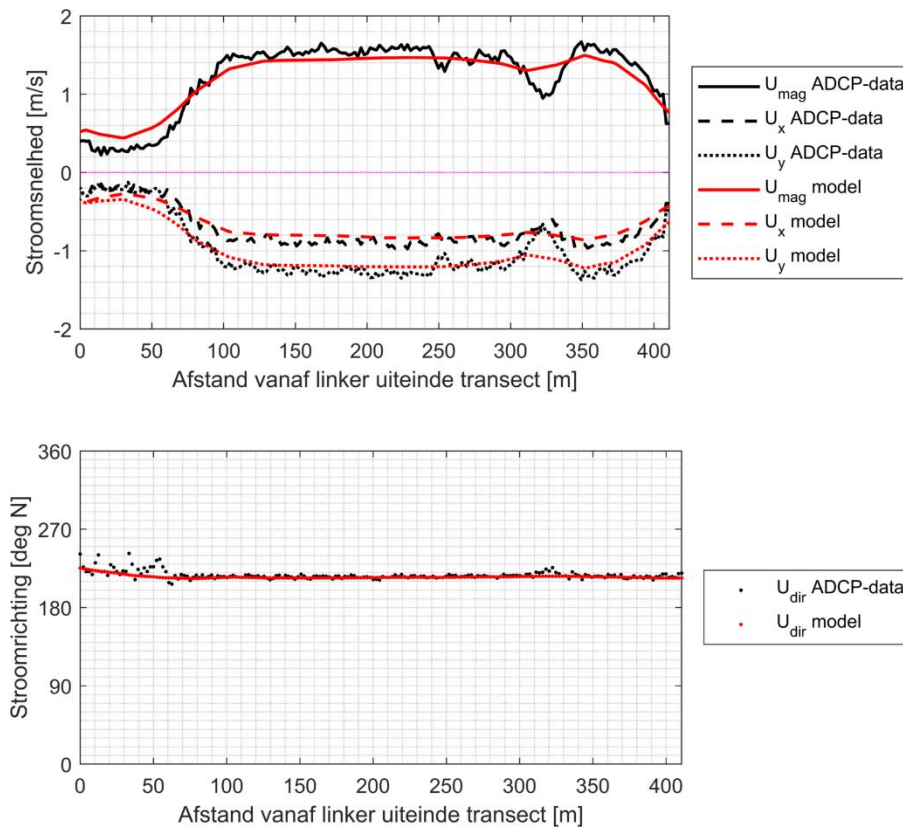


Figuur 4-12 Vergelijking van de stromingsvectoren (richting en magnitude) van de ADCP-metingen en het model voor rivierkilometer 909. Het linker uiteinde van het transect is genomen ten opzichte van de stroomrichting.

4.4.3 Rivierkilometer 912-921

De Waal is tussen rkm 912-921 voorzien van langsdammen, evenwijdig aan de gestrekte oevers die daarachter liggen. Achter de langsdammen liggen oevergeulen met daarachter de oeverlijn. Tussen rkm 912-918 liggen de langsdammen aan de linkerzijde van het zomerbed. Tussen rkm 919-921 liggen de langsdammen aan de rechterzijde.

Tijdens het zomerhoogwater van 2021 was er voldoende diepgang over de langsdammen zodat de boten die de ADCP-metingen uitvoerden, hier overheen konden varen. De aanwezigheid van de langsdammen is daarom ook terug te zien in de ADCP-metingen van de dieptegemiddelde stroomsnelheid. De resultaten voor rkm 920 zijn weergegeven in Figuur 4-13.



Figuur 4-13 Vergelijking van de stromingsvectoren (richting en magnitude) van de ADCP-metingen en het model voor rivierkilometer 920. Het linker uiteinde van het transect is genomen ten opzichte van de stroomrichting.

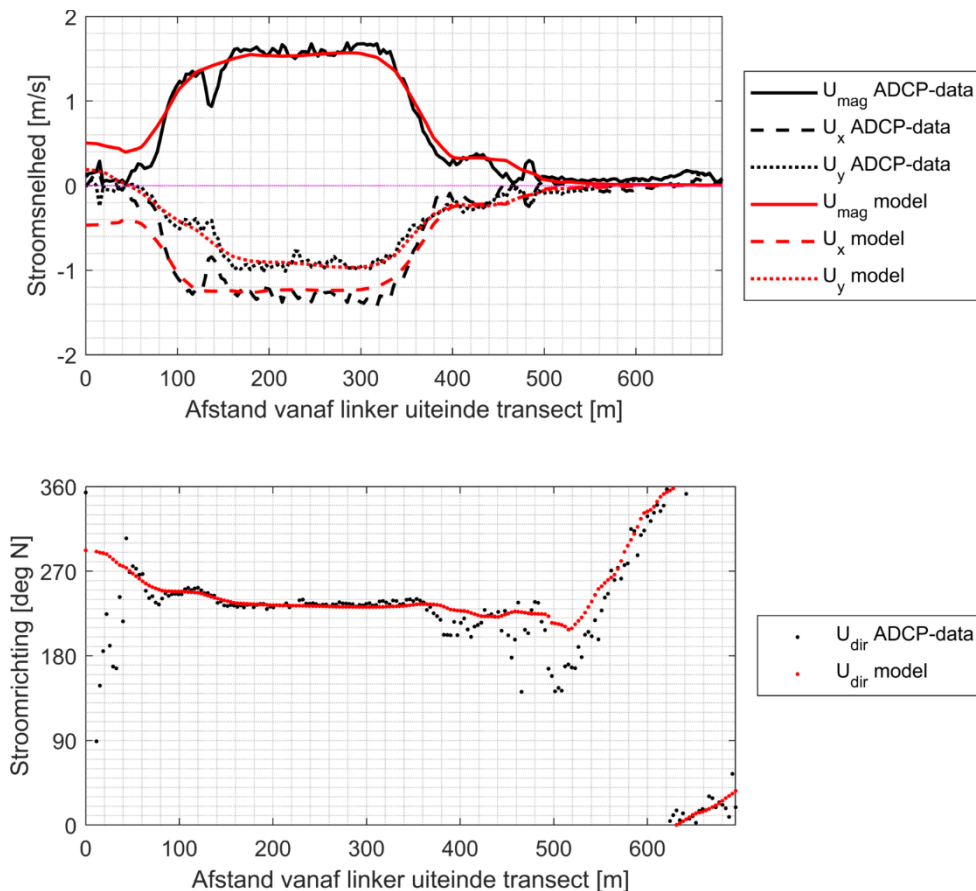
In de ADCP-metingen is een duidelijke afname in stroomsnelheid te zien rond 320 meter van het linker uiteinde van het transect. Deze wordt veroorzaakt door energieverliezen ten gevolge van de langsdam. De langsdam is in het model deels geschematiseerd in de modelbodem (onder de waterlijn bij gemiddelde afvoer), bodemruwheid (classificatie bebouwd/verhard terrein) en als kade (boven de waterlijn bij gemiddelde afvoer). Voor dit laatste element wordt alleen energieverlies in rekening gebracht voor de stroming loodrecht op de overlaat. Ook heeft de kade geen invloed op het natte doorstroomoppervlak in langrichting, terwijl deze in de werkelijkheid kleiner is door het talud boven de waterlijn

Remming door de langsdammen in de richting van de stroming wordt in de modelschematisatie dus enkel in rekening gebracht via de bodemhoogte en -ruwheid, wat leidt tot een onderschatting van het energieverlies en een overschatting van de stroomsnelheden. Dit effect is zichtbaar op alle raaien tussen rkm 912-921.

De overschatting van stroomsnelheden door de onderschatting van de invloed van langsdammen is lokaal en leidt niet tot verschillen in ADCP-metingen en gemodelleerde stroomsnelheid langs de rest van het transect.

4.4.4 Rivierkilometer 914,6

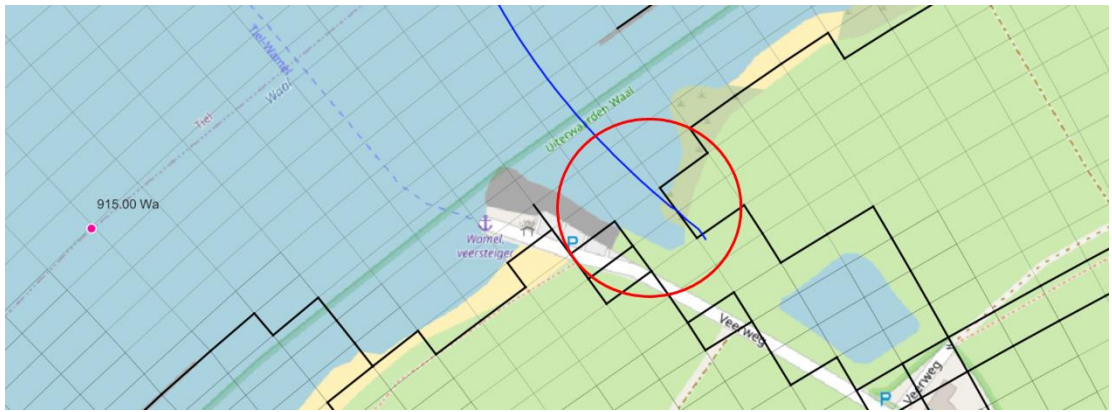
Hoewel het globale beeld van de gemodelleerde stroomsnelheid langs dit transect vooral overeenkomsten toont met de ADCP-data, zijn twee verschillen opmerkelijk (Figuur 4-14).



Figuur 4-14 Vergelijking van de stromingsvectoren (richting en magnitude) van de ADCP-,metingen en het model voor rivierkilometer 914,6. Het linker uiteinde van het transect is genomen ten opzichte van de stroomrichting

Ten eerste is de langsdam zichtbaar in de vergelijking op ongeveer 140 meter vanaf het linker uiteinde van het transect. Daarnaast wordt de stroomsnelheid en -richting aan de linkeroever overschat. Op deze locatie ligt een ondiepe vlakte met direct benedenstrooms een veerstoep. De roosterresolutie is hier grof. Het ondiepe deel wordt gevangen door één roostercel in de richting van de stroming, begrensd door een overlaat boven- en benedenstrooms (Figuur 4-15). Het is daarom onwaarschijnlijk dat het detailniveau van de geometrie hier voldoende wordt gerepresenteerd door het 40-meterrooster. Vergelijking met AHN4 maakt duidelijk dat ook de hoogteligging van de veerstoep niet goed in het model zit. Het steile benedenstroomse talud ontbreekt in de overlaten (overgang naar kribvak) en het uiteinde ligt een meter te laag.

Ondanks dat de stroomsnelheden tussen 400 en 600 meter vanaf het linker uiteinde van het meettransect globaal gezien vergelijkbaar zijn, treden er hier lokale verschillen op in stroomrichting tot zo'n 90 graden. Dit stuk bevindt zich in een kribvak langs een buitenbocht waarachter de opening naar een overnachtingshaven ligt (Figuur 4-16). De breedte van de opening naar de overnachtingshaven beslaat maar twee roostercellen, waardoor de modelresolutie lokaal te laag is om de driedimensionale stromingsprocessen nauwkeurig te simuleren.



Figuur 4-15 Detail van het modelrooster in combinatie met de overlaten. Het ondiepe deel is rood omcirkeld. Het ADCP-transect is gemarkeerd met een blauwe lijn.



Figuur 4-16 Detail van het modelrooster in combinatie met de overlaten ter plaatse van de opening naar de vluchthaven. Het ADCP-transect is gemarkeerd met een blauwe lijn.

5 Conclusie en aanbevelingen

5.1 Introductie

Dit hoofdstuk vat de belangrijkste conclusies en bevindingen uit deze rapportage samen (paragraaf 5.2 – 5.3). Ten slotte wordt een set aanbevelingen gegeven om de prestatie van het hydrodynamische model te verbeteren (paragraaf 5.4).

5.2 Afvoerverdeling zomerbed-winterbed

Het globale beeld toont een goede overeenkomst tussen de gemodelleerde zomerbedafvoer en de zomerbedafvoer die is geregistreerd in de ADCP-metingen. Op enkele locaties levert het model een over- of onderschatting. De oorsprong van een deel van deze verschillen is voor rkm 900 en rkm 907 – 908 te herleiden naar een onjuiste hoogteligging of oriëntatie van de geschematiseerde zomerdijken of oevers. Deze oorzaak is te verhelpen door deze objecten te actualiseren op basis van de huidige vormgeving.

In een enkel geval is ook het vermoeden dat de resolutie van het rooster leidt tot een onnauwkeurige weergave van bijvoorbeeld een nevengeul (rkm 929) of een veerweg (rkm 914,6). Het is onwaarschijnlijk dat het model met het 40-meterrooster geschikt is voor het accuraat modelleren van de stroming door relatief smalle geulen.

5.3 Dieptegemiddelde stroomsnelheid

De gemodelleerde, dieptegemiddelde stroomsnelheden en -richtingen komen grotendeels ook overeen met de gemeten stroomsnelheden uit de ADCP-dataset. Zowel de magnitude, als de componenten van de dieptegemiddelde stromingsvectoren hebben vergelijkbare waarden. Wel worden op diverse rivierkilometers opmerkelijke verschillen vastgesteld.

Ten eerste vertaalt het verschil in gemodelleerde zomerbedafvoer ten opzichte van de ADCP-data zich door in de stroomsnelheden. Op het traject waar de onderschatting van zomerbedafvoer in het model het grootst is (rkm 907 – 908), levert dit een onderschatting van de dieptegemiddelde stroomsnelheid op van 0,2 – 0,4 m/s over vrijwel het hele transect.

Daarnaast is het opvallend dat de stroomsnelheden rondom de langsdammen op traject rkm 913 – 921 onnauwkeurig worden gemodelleerd. In het model wordt de stromingsremming ten gevolge van de langsdammen onderschat. Deze onderschatting vindt zijn oorsprong in de manier waarop langsdammen worden geschematiseerd in het model, namelijk door een combinatie van bodemhoogte, bodemruwheid (classificatie bebouwd/verhard terrein) en overlaten ('fixed weirs'). Ten eerste is het rooster relatief grof en kunnen lokale effecten rondom langsdammen lastig worden meegenomen. Daarnaast brengen de overlaten alleen energieverlies loodrecht op de langsdam in rekening, waardoor het energieverlies evenwijdig aan de langsdammen (en dus de remmende werking) wordt onderschat en het energieverlies alleen door de opgegeven bodemruwheid in rekening wordt gebracht. Echter is de overschatting van de dieptegemiddelde stroomsnelheid op de langsdammen lokaal en vertaalt het zich niet door naar de rest van het zomerbed.

Verschillen tussen het model en de ADCP-metingen ontstaan ook in en rondom kribvakken. De overgangen tussen zomerbed en kribvak zijn in het model minder scherp dan in de ADCP-metingen. Mogelijke oorzaken hiervoor zijn:

- de afwezigheid van driedimensionale stromingspatronen die in het 2DH-DHYDRO-model niet direct worden gesimuleerd;
- de grofheid van het rekenrooster, waardoor scherpe gradiënt (in dwarsrichting) niet voldoende in beeld worden gebracht;
- de exacte hoogteligging van de kribben en berekende (lokale) energieverliezen;
- de lokale instellingen rondom kribvakken met betrekking tot de viscositeit.

5.4 Aanbevelingen

5.4.1 Actualisatieslag

Een deel van de verschillen in zomerbedafvoer en stroomsnelheden is afkomstig van een schematisatie van het rivierenlandschap die niet strookt met de werkelijkheid. Deze verschillen kunnen worden verholpen door een actualisatieslag uit te voeren van in ieder geval de objecten (zoals zomerdijken, oevers, drempels) die de uitwisseling van water tussen het zomer- en winterbed controleren.

5.4.2 Zomerbedruwheid

Binnen deze studie is er niet gekeken naar de invloed van seizoensafhankelijkheid van de bodemruwheid op de resultaten. In deze studie is gerekend met vegetatieruwheid zoals deze in de winter aanwezig is, terwijl de ADCP-meetcampagne heeft plaatsgevonden in het zomerseizoen. Dit kan leiden tot verschillen in aanwezige vegetatietypen tussen model en meetomstandigheden, maar ook tot verschillen in ruwheid per vegetatietype, bijvoorbeeld omdat vegetatie in de zomer hoger is en een hogere bladdichtheid heeft.

De bestudeerde rivierafvoer in deze studie is echter niet extreem, waardoor de fractie van de afvoer die over het winterbed stroomt relatief beperkt is (maximaal ca. 10%). Wanneer een validatie wordt uitgevoerd voor extremere rivierafvoeren, wordt het belang van de seizoensafhankelijke vegetatieruwheid groter. Echter is de kans op extremere zomerafvoeren dan de afvoer in de zomer van 2021 klein.

Het maken van een vergelijking van waterstands- en stromingseffecten bij seizoensvariaties in ruwheid, geeft inzicht in de gevoeligheid van de hydrodynamica voor de modelinstellingen voor ruwheid.

5.4.3 Verfijnd model

De validatiestudie kan herhaald worden met een model dat een fijnere roosterresolutie bevat. Op deze manier kan worden beoordeeld in hoeverre de verschillen in gemodelleerde stroming en ADCP-data worden veroorzaakt door een onnauwkeurige (te grove) schematisatie van de werkelijke ruimtelijke objecten.

5.4.4 Energieverlies in stroomrichting bij langsdammen

Deze validatie van stroomsnelheden langs de kilometerraaien toont ook aan dat het energieverlies ten gevolge van langsdammen in de stroomrichting nog niet nauwkeurig wordt gesimuleerd. Een vervolgstap voor het verbeteren van de hydrodynamische modellen is het opstellen van een aanvullende parametrisatie voor het energieverlies in langsrichting, of het kiezen voor een hogere bodemruwheidswaarde voor de langsdammen. Ook kan worden overwogen het rooster rondom de langsdammen te verfijnen, om de geometrie van de langsdammen beter te representeren in het model. Ten slotte kan de kade boven de waterlijn zelf in de bodemhoogte worden opgenomen.

5.4.5 Validatie voor andere afvoeren

Voor morfologische ontwikkeling leveren met name middenafvoeren (waarbij het winterbed nog niet onderstroomd) een grote bijdrage. Voor deze toepassing wordt daarom aangeraden ook een validatie op stroomsnelheden in dit afvoerbereik uit te voeren.

5.4.6 Overgangsgebieden tussen zomerbed en kribvak

De onscherpe overgangen in stroomsnelheid die in het model worden waargenomen van het zomerbed naar de kribvakken kunnen in een vervolgonderzoek nader worden beschouwd met een (detail-)model waarin de resolutie is verhoogd. Ook is het relevant te onderzoeken of de resultaten gevoelig zijn voor veranderingen in viscositeit.

6 Referenties

Kosters, A. en Visser, T. (2022). Jaarlijkse Actualisatie Modellen Rijn 2022. Baseline en D-HYDRO j22_6. Deltares rapport 11208053-003-ZWS-0007

Rijkswaterstaat (2021). Betrekkingslijnen Rijn versie 2018

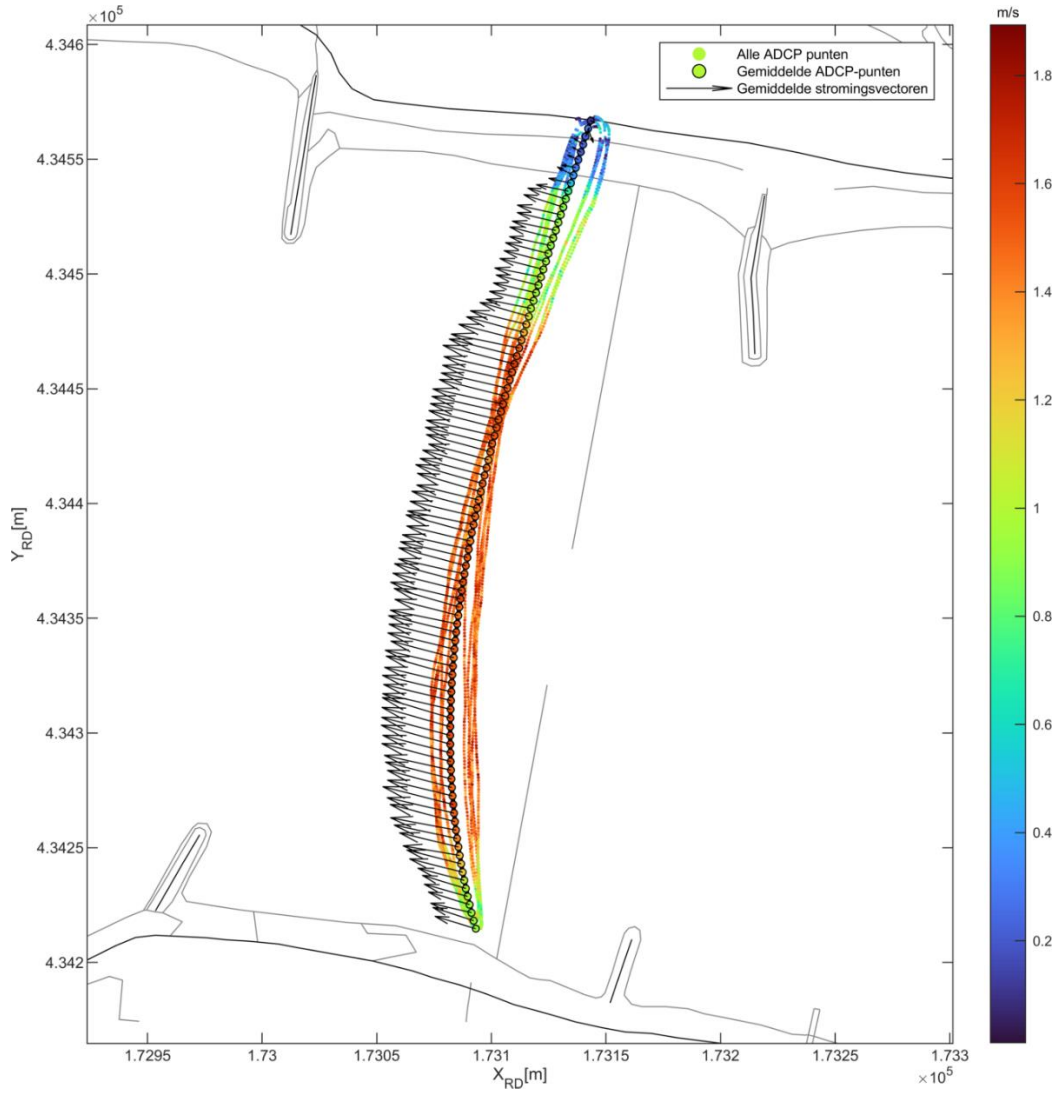
Rijkswaterstaat Verkeer en Watermanagement (2022). Jaaroverzicht 2021. Watermanagementcentrum Nederland

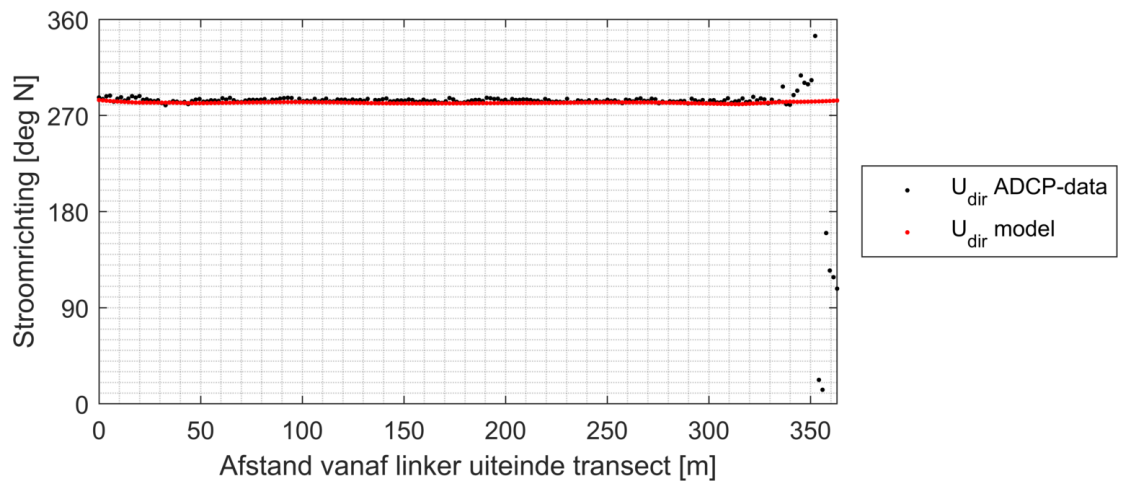
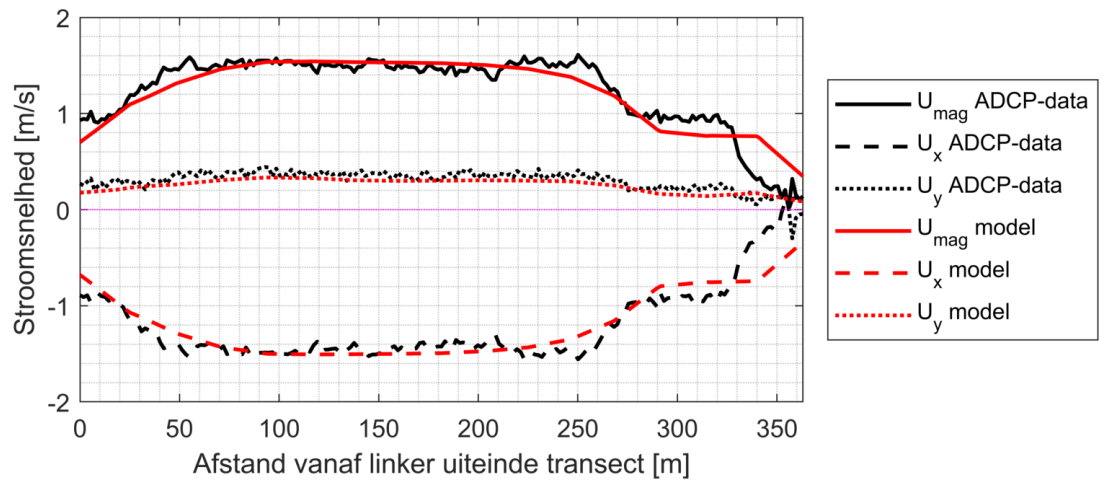
Spruyt, A. (2019). Relatie waterstand Hardinxveld en Werkendam. Deltares rapport 11203714-005-ZWS-0001

Vermeulen, B. <https://github.com/bartverm/adcptools>. Gesynchroniseerd op 8 augustus 2023

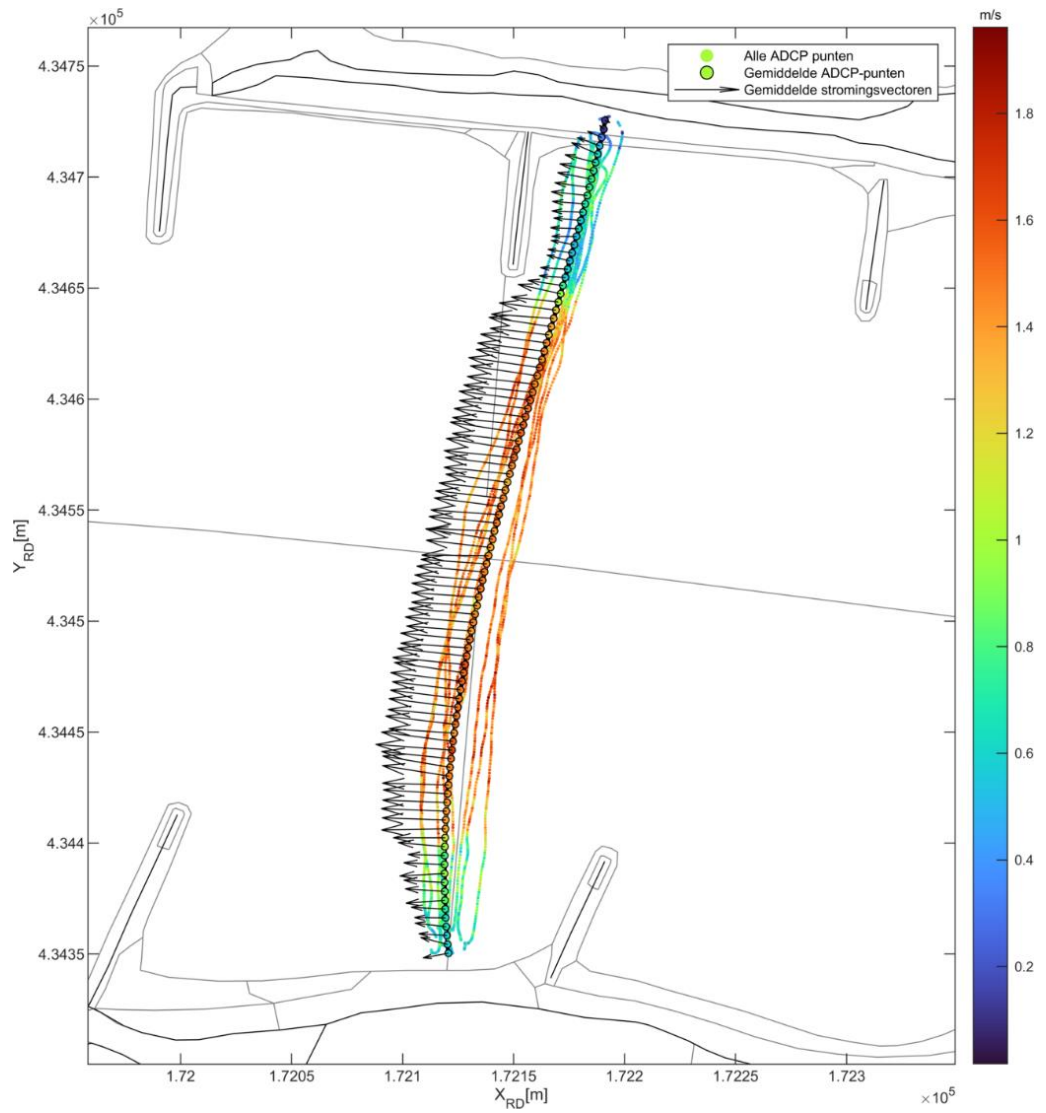
A Bijlage: Vergelijking stroomsnelheidsvector op rkm 900-930

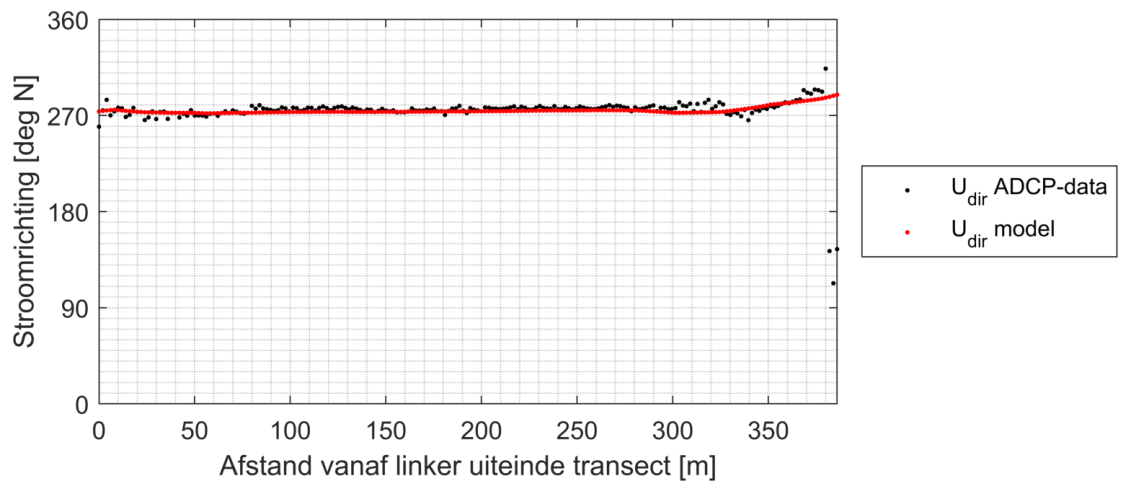
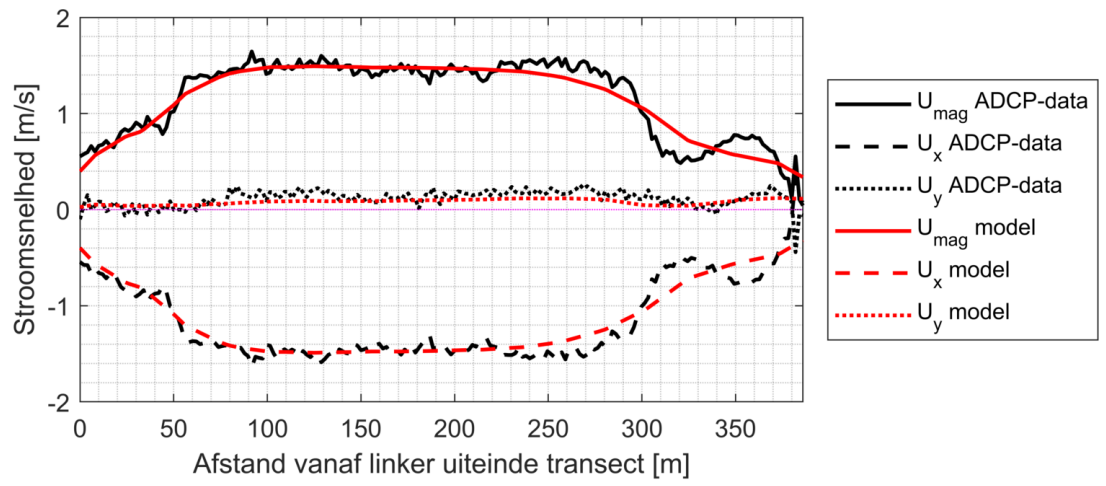
A.1 Rkm 900 (19 juli)



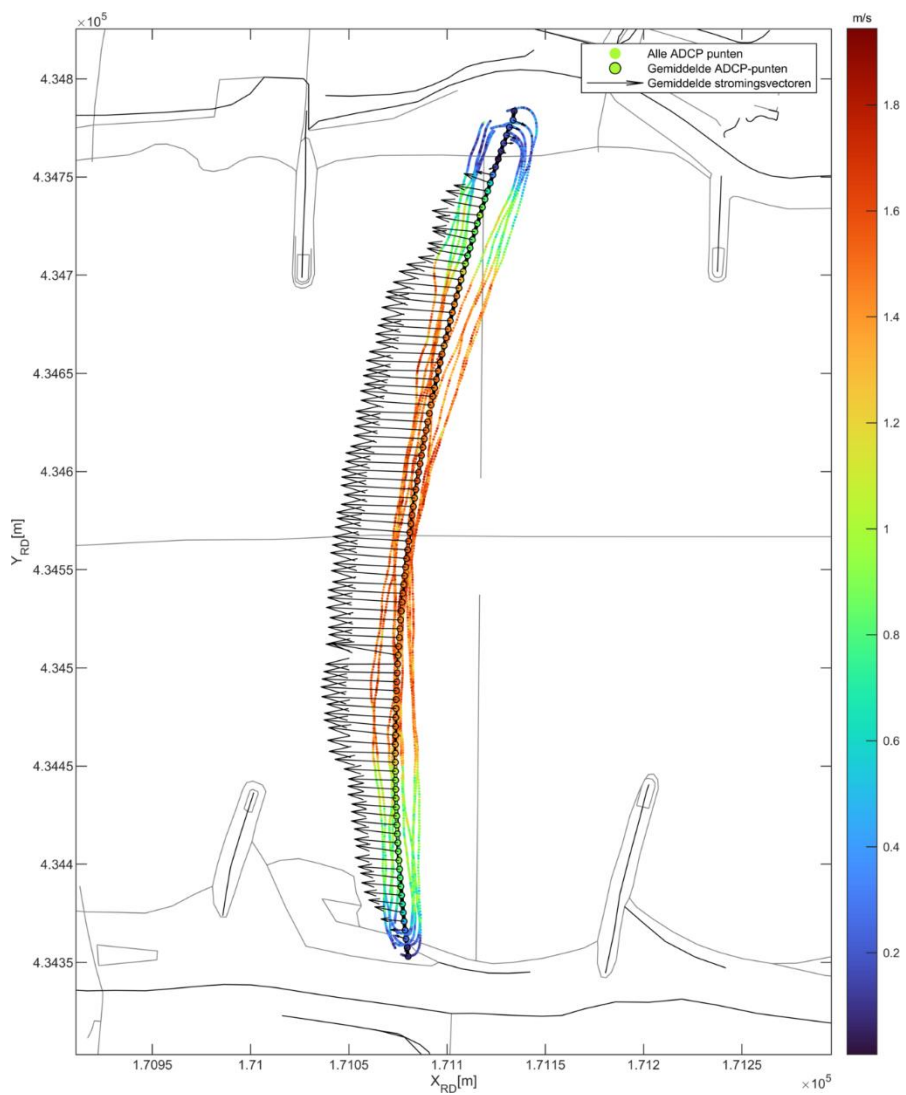


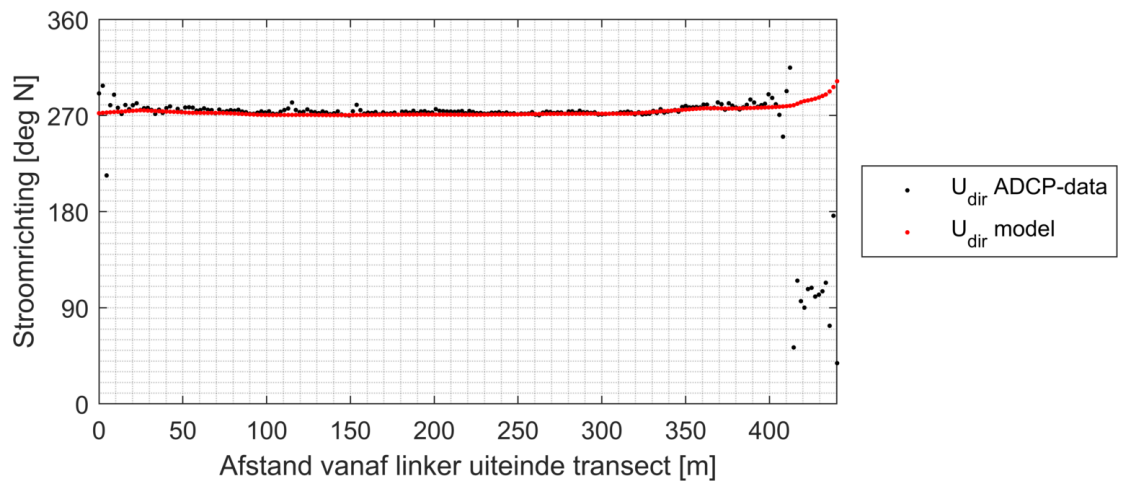
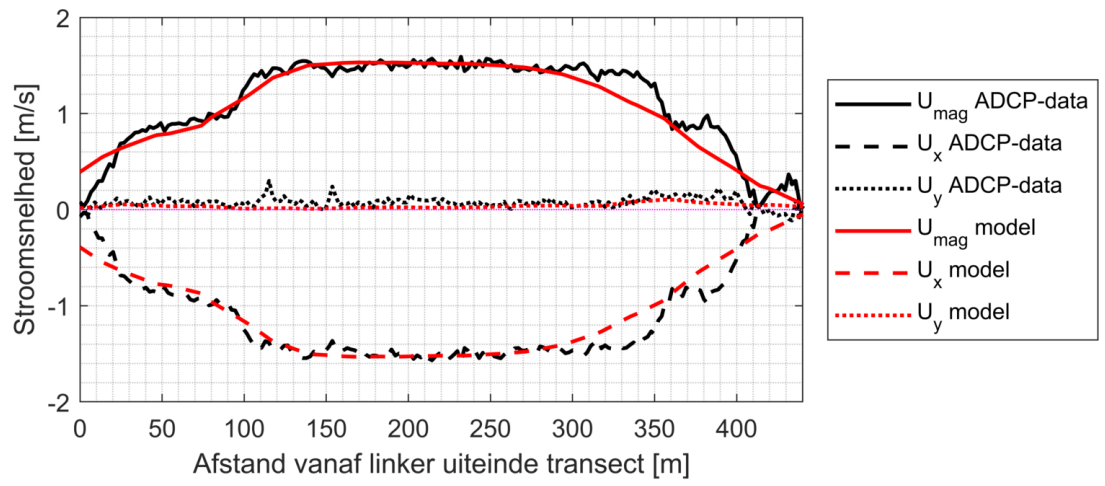
A.2 Rkm 901 (19 juli)



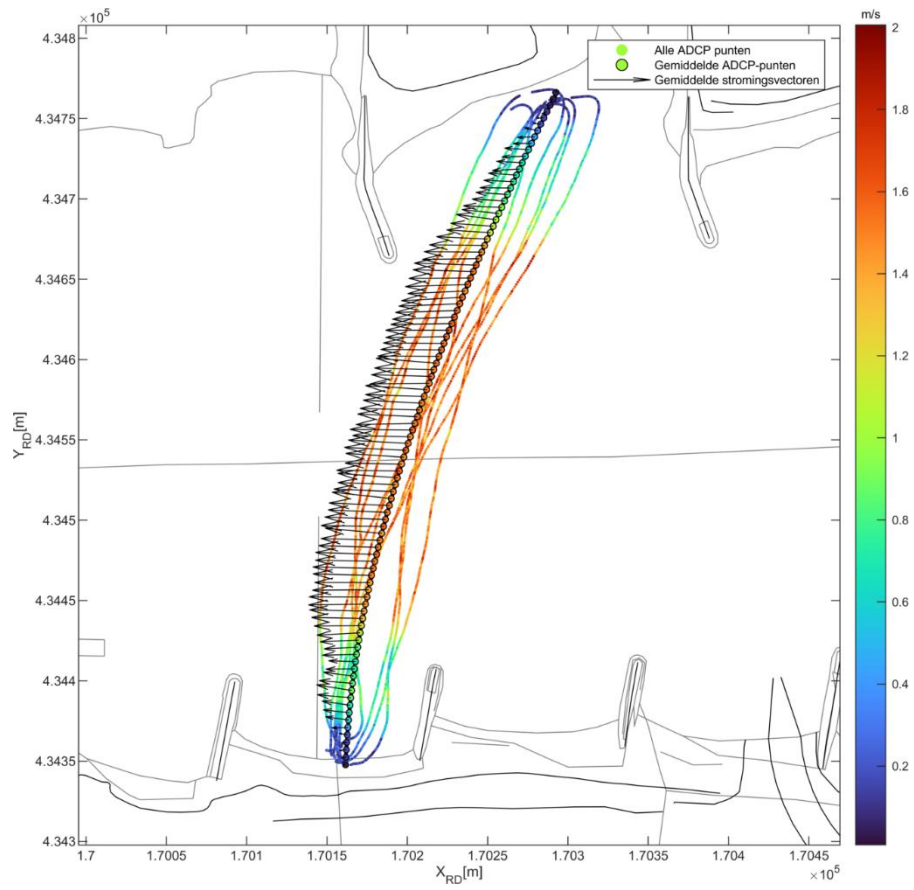


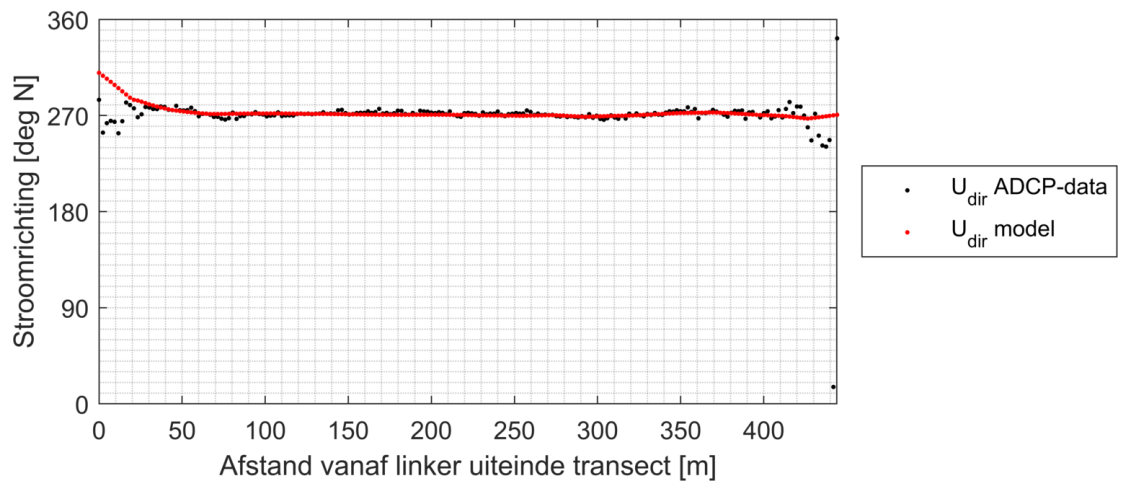
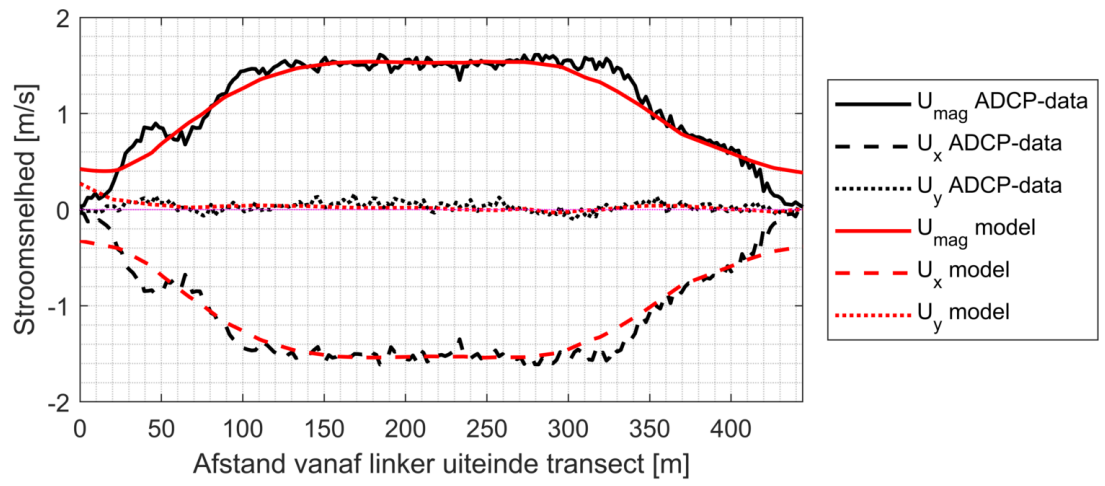
A.3 Rkm 902 (19 juli)



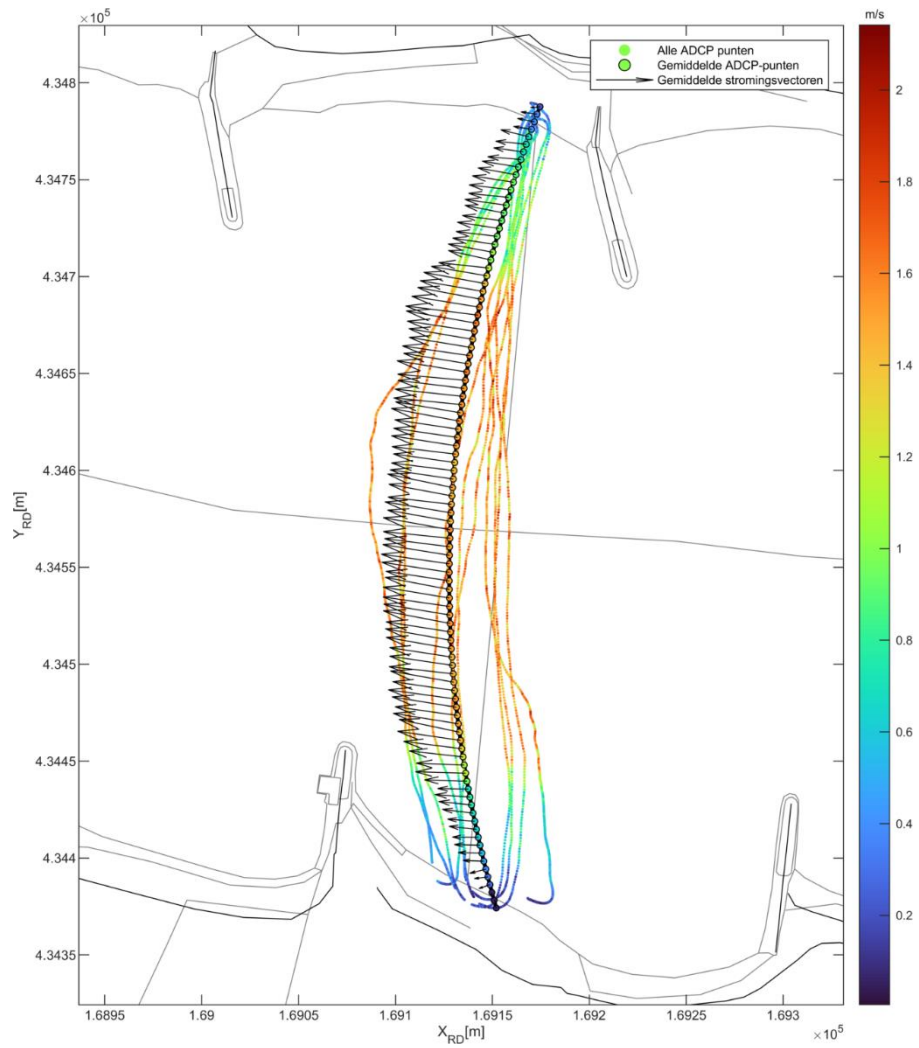


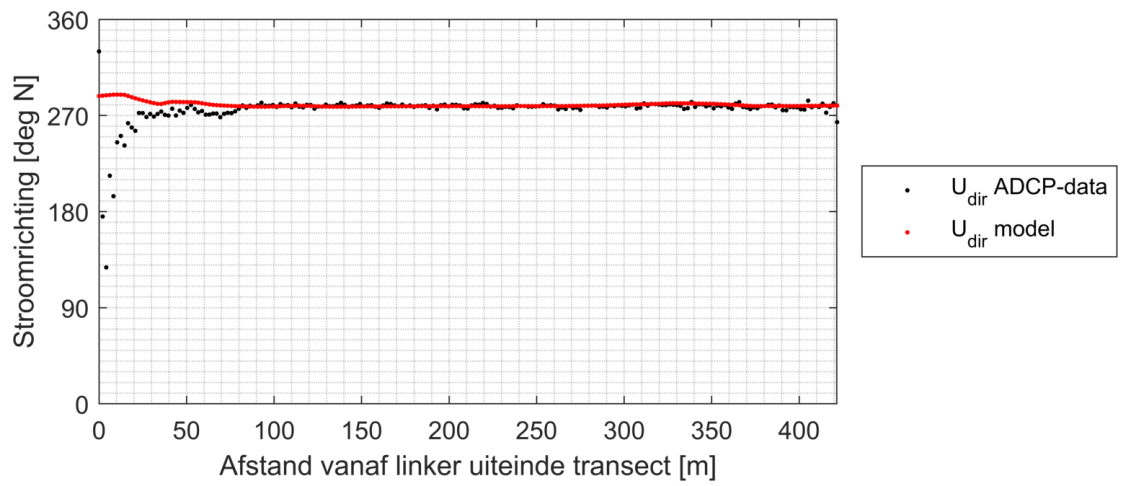
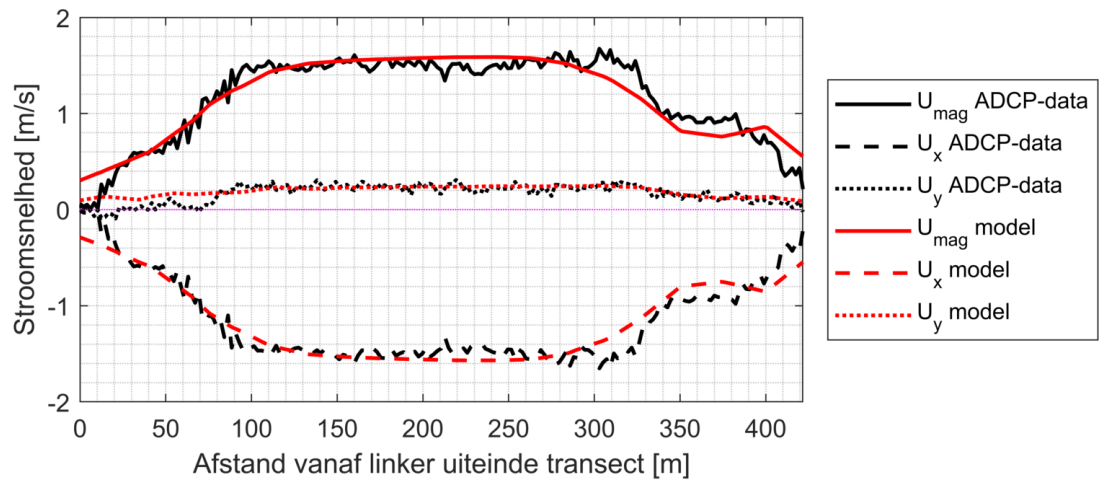
A.4 Rkm 903 (19 juli)



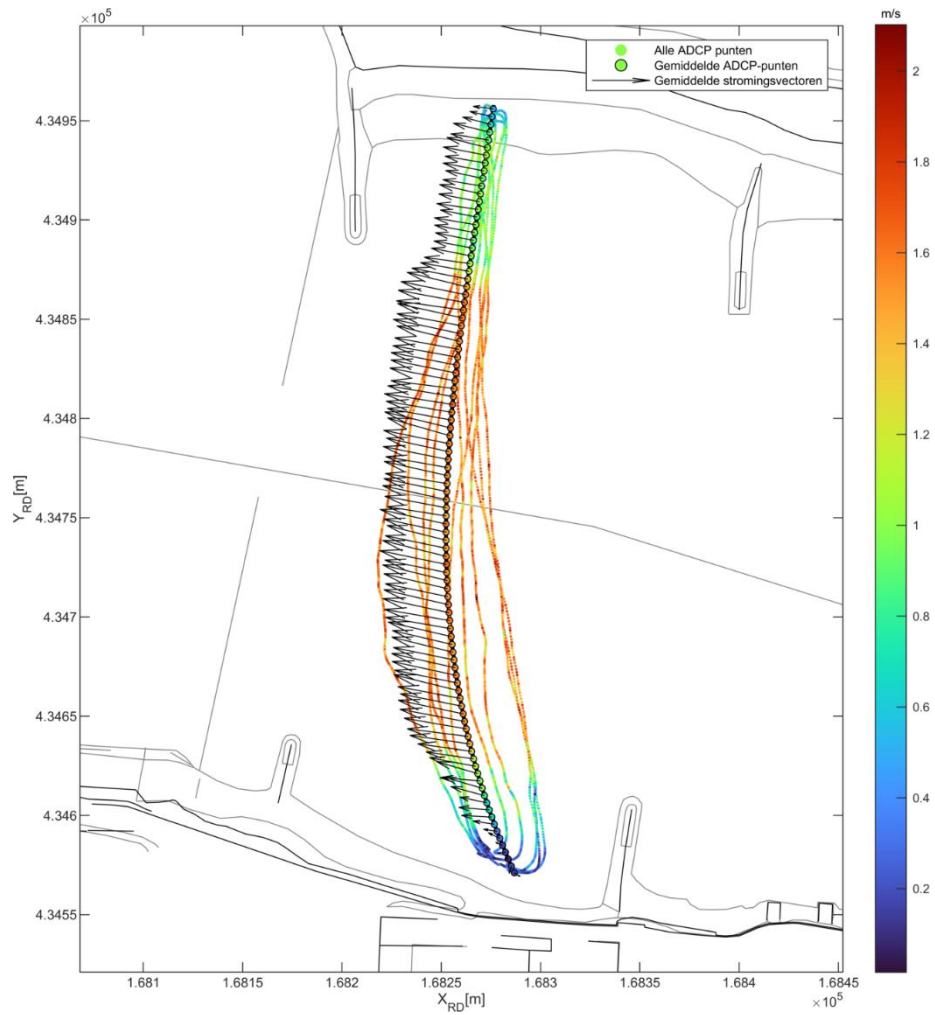


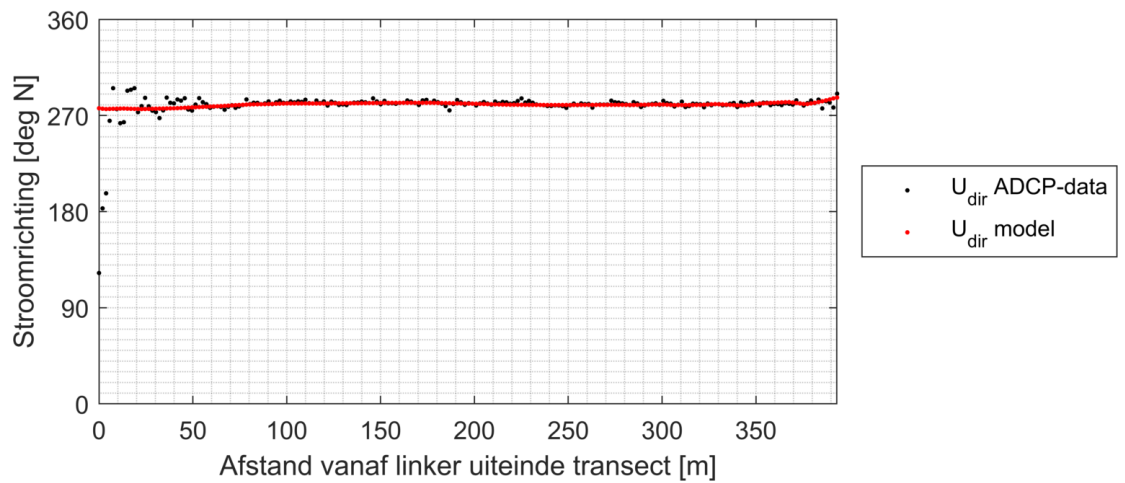
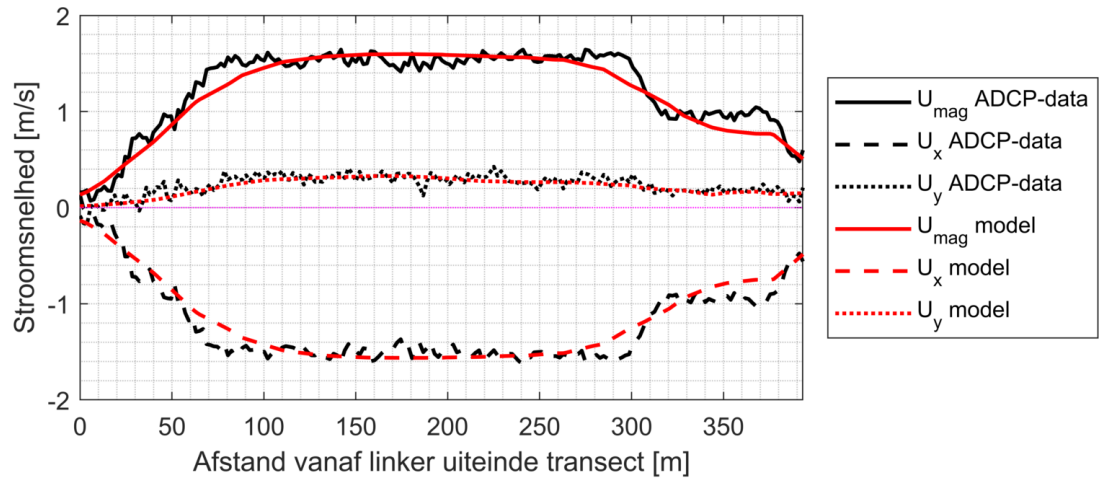
A.5 Rkm 904 (19 juli)



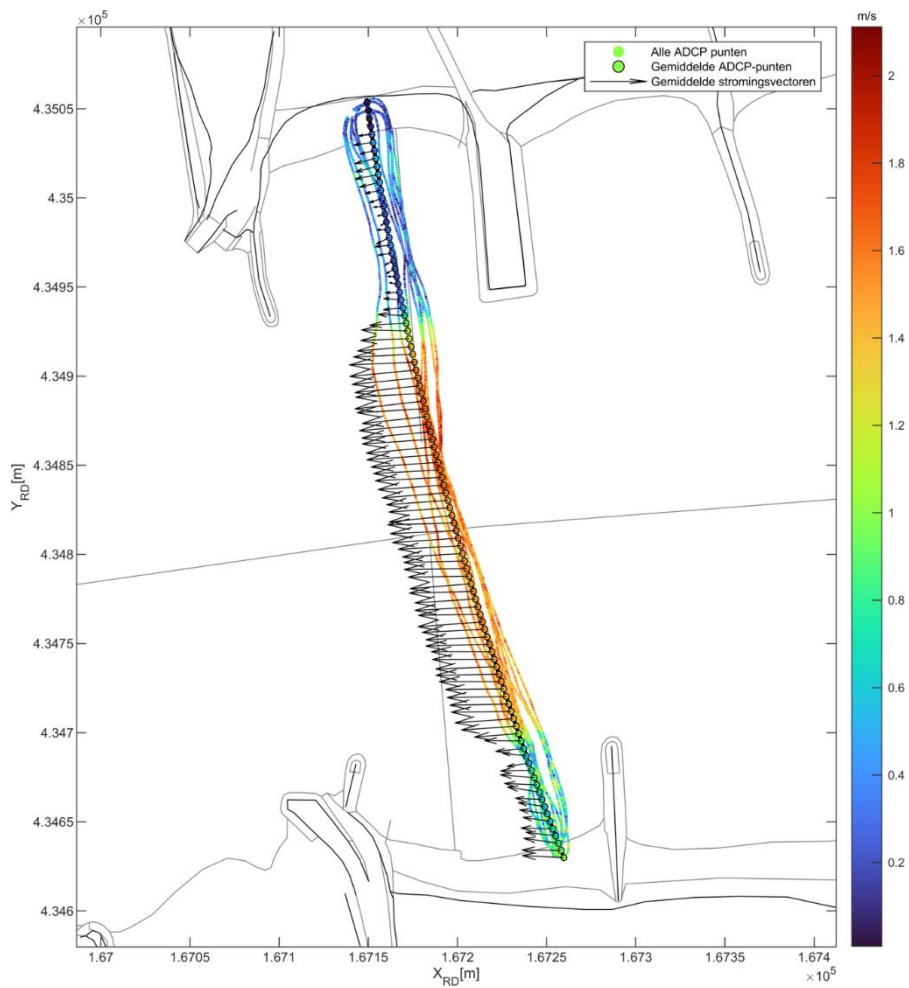


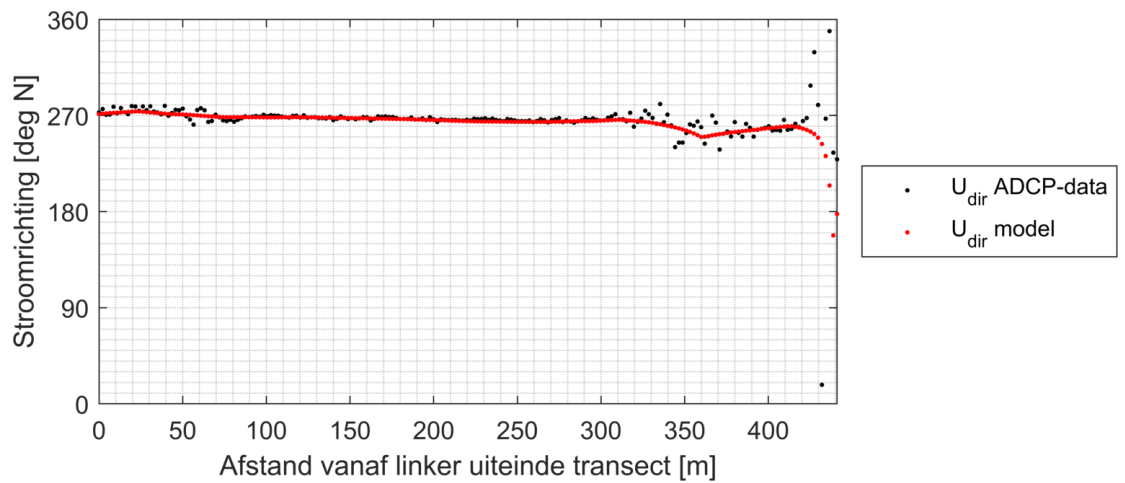
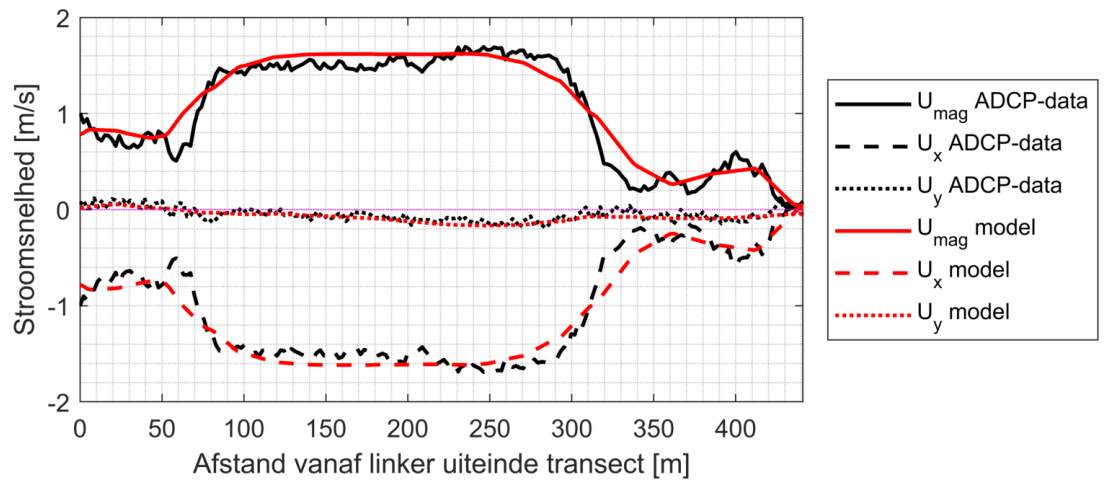
A.6 Rkm 905 (19 juli)



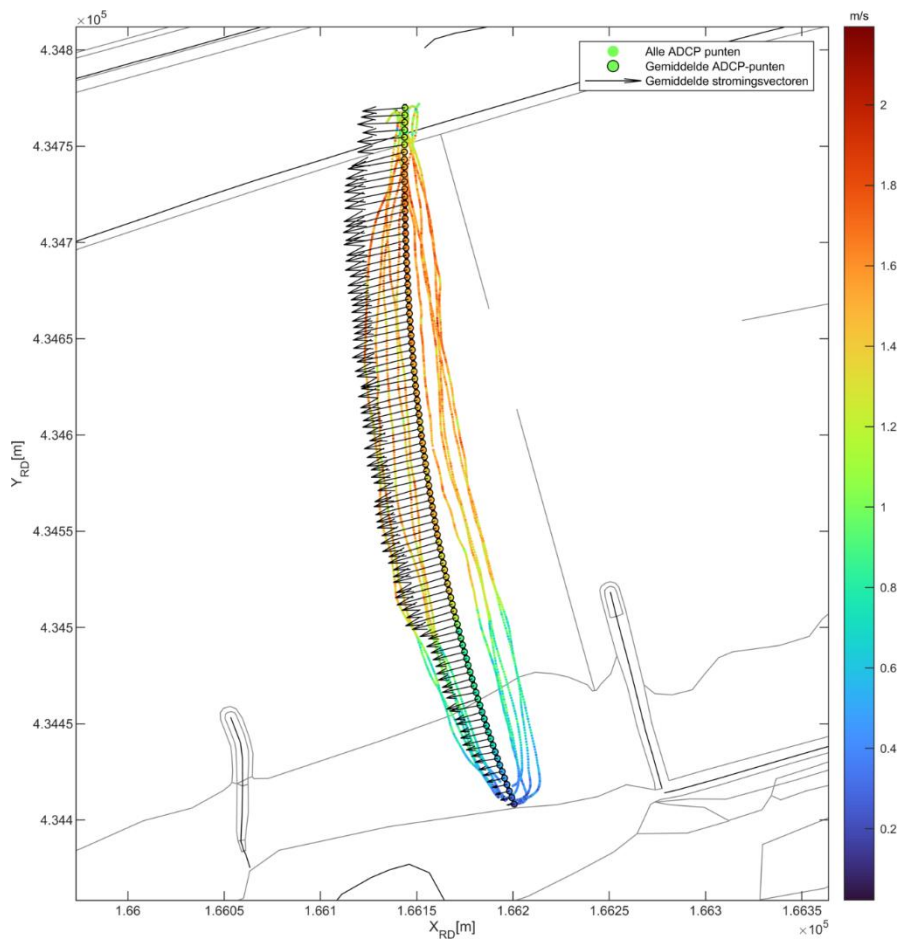


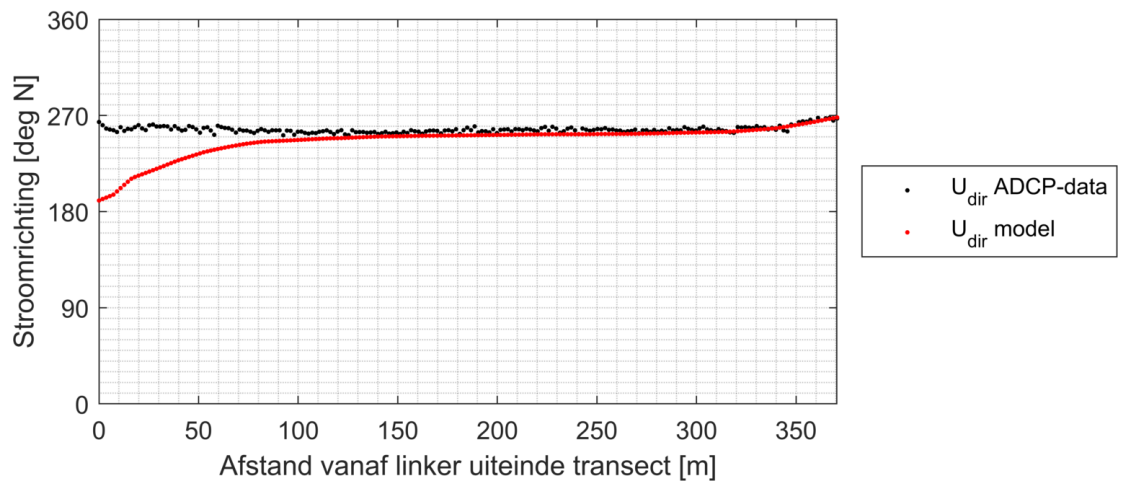
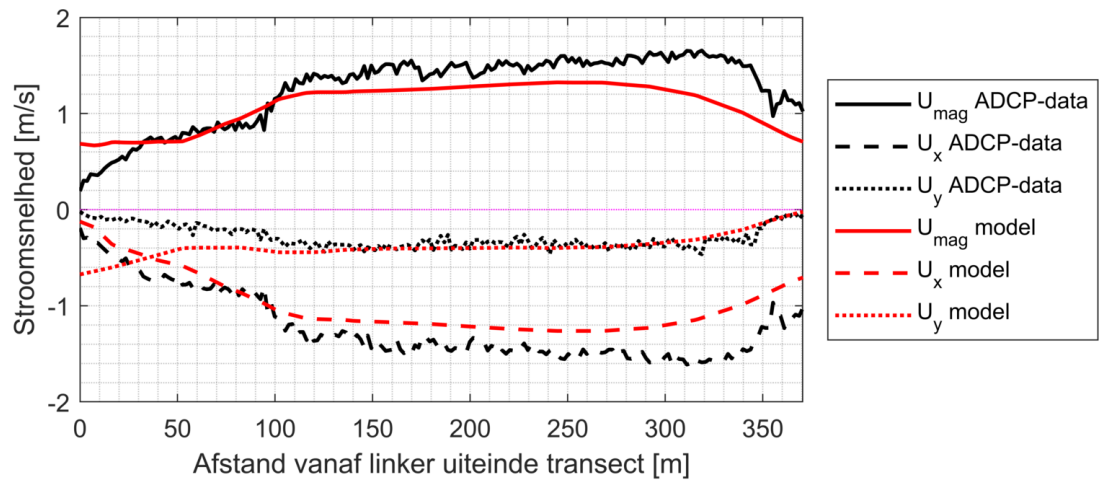
A.7 Rkm 906 (19 juli)



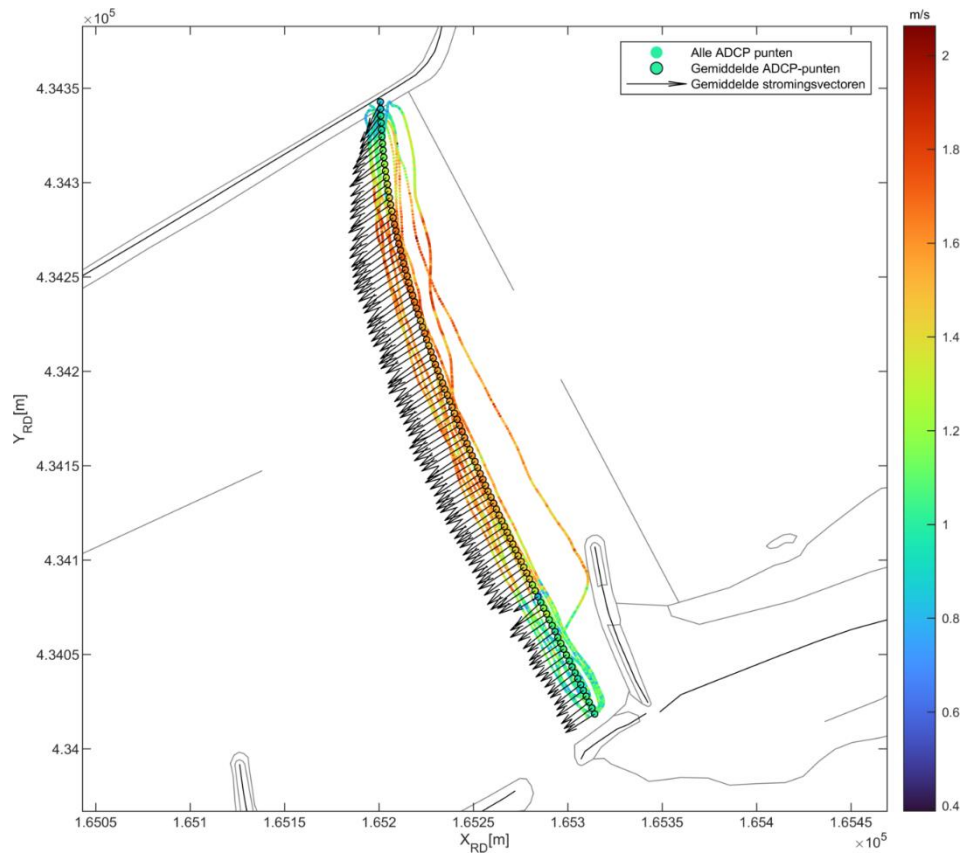


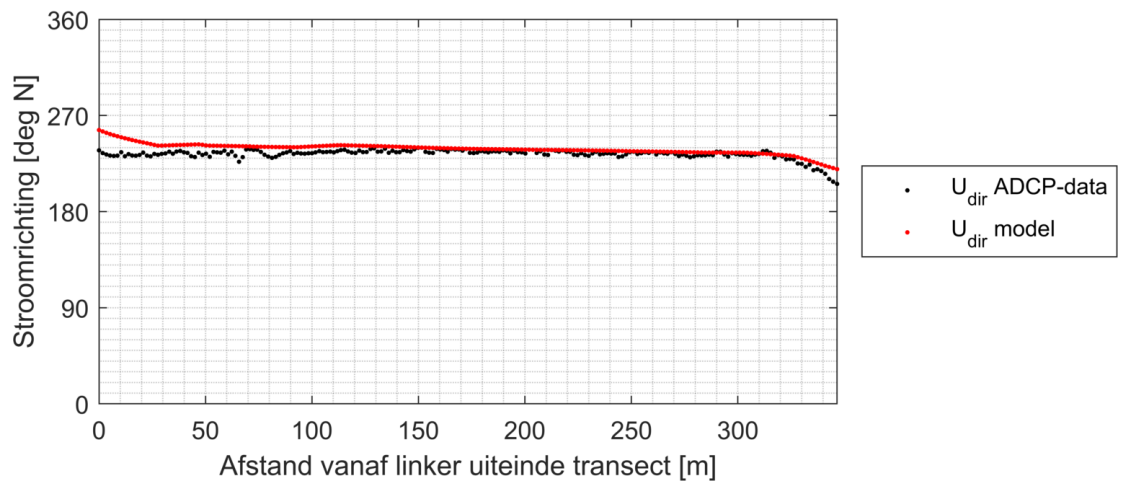
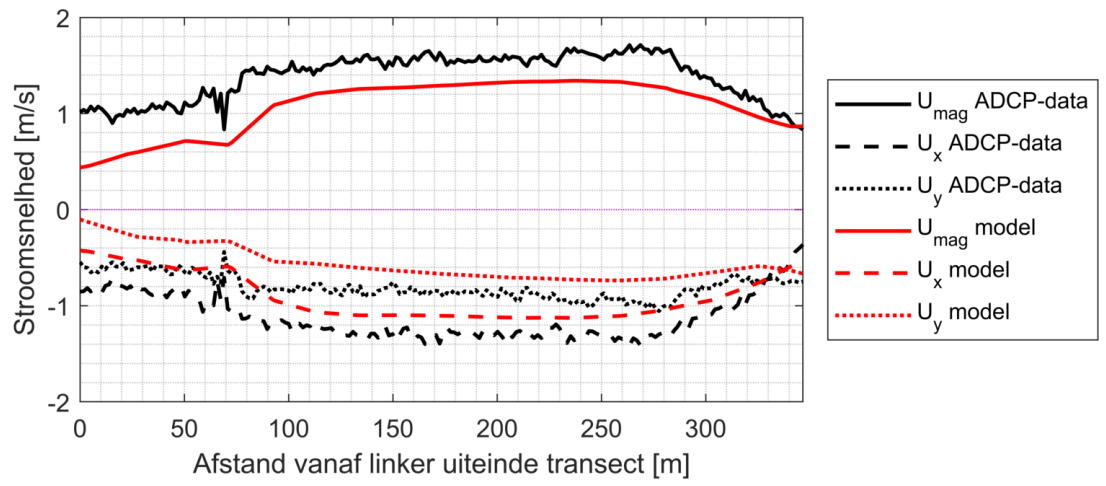
A.8 Rkm 907 (19 juli)



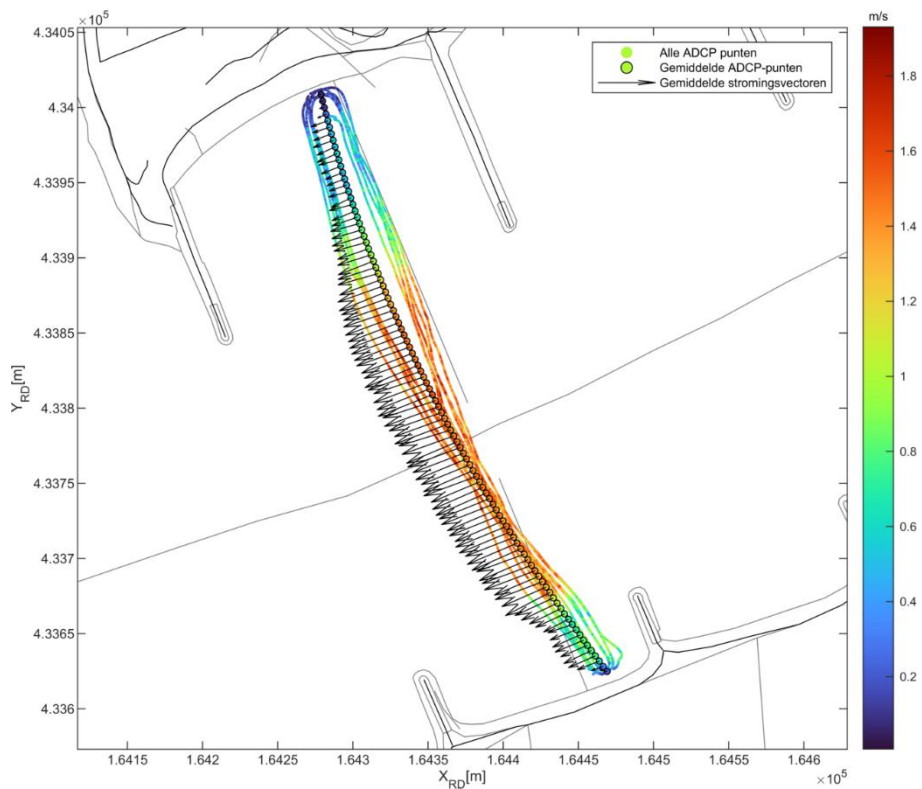


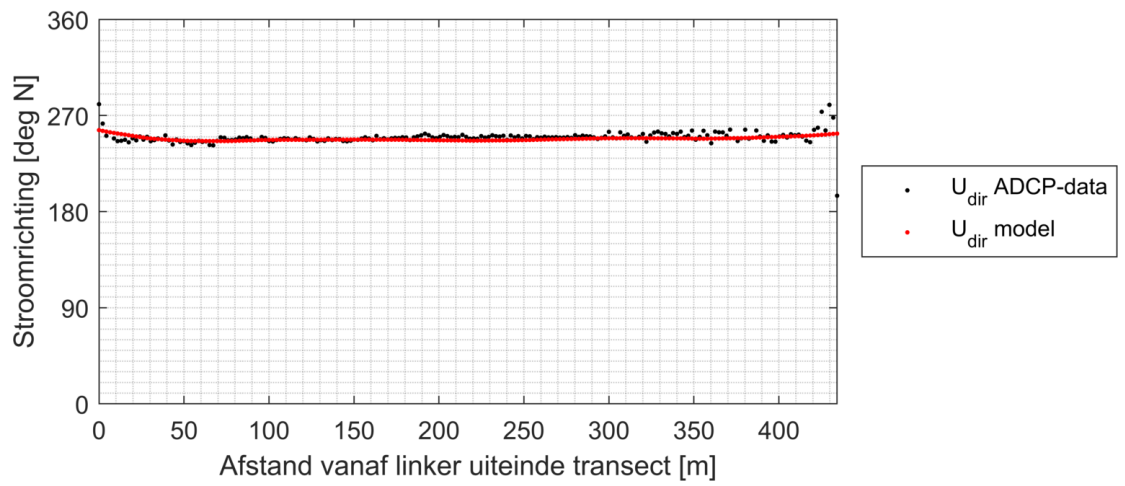
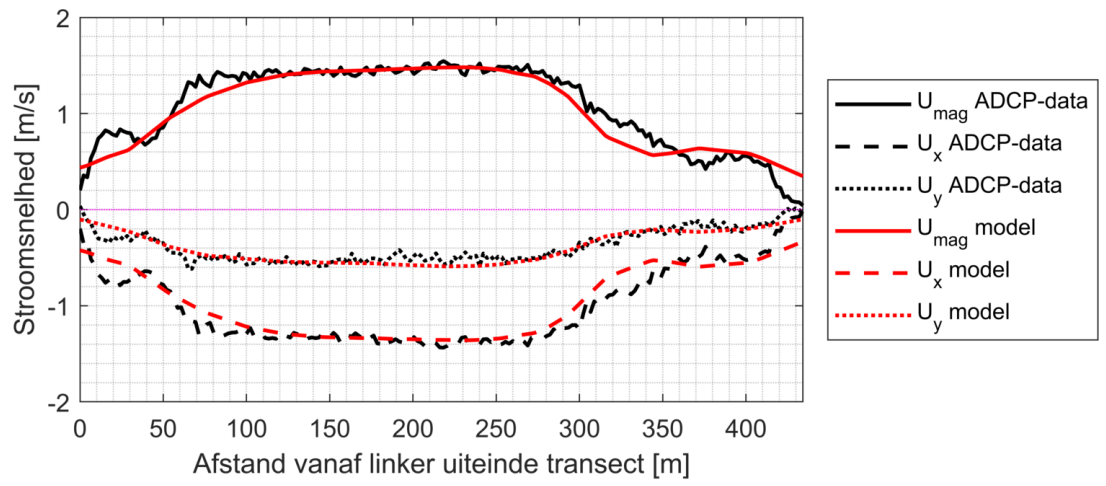
A.9 Rkm 908 (19 juli)



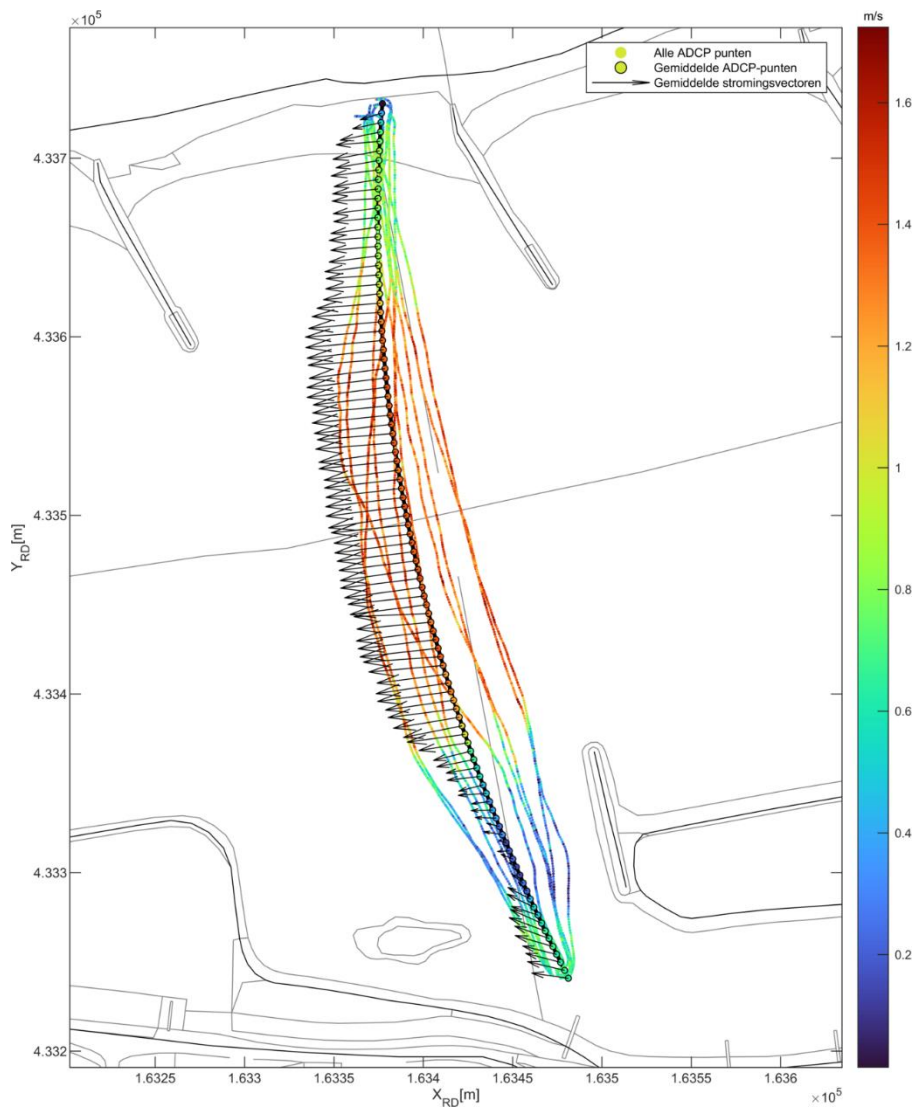


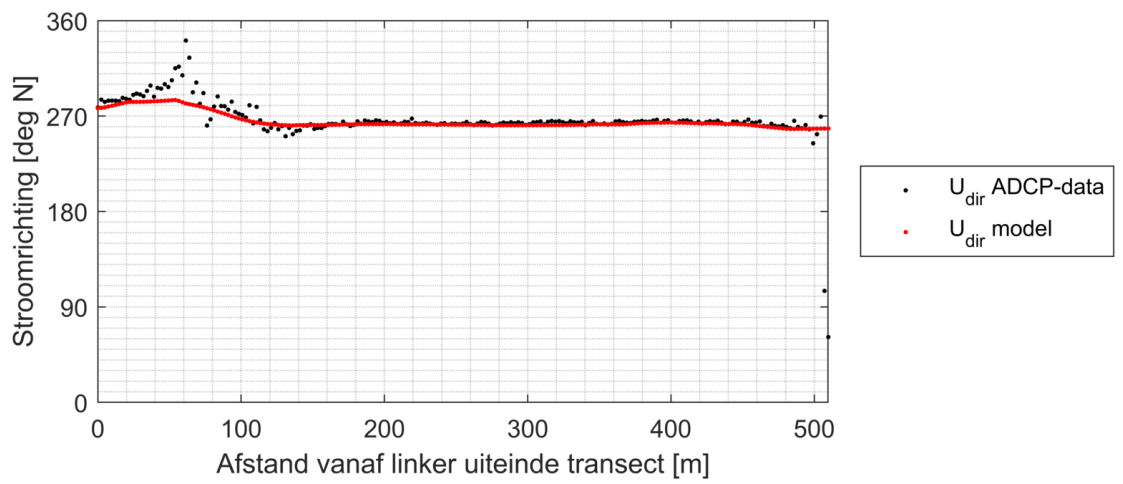
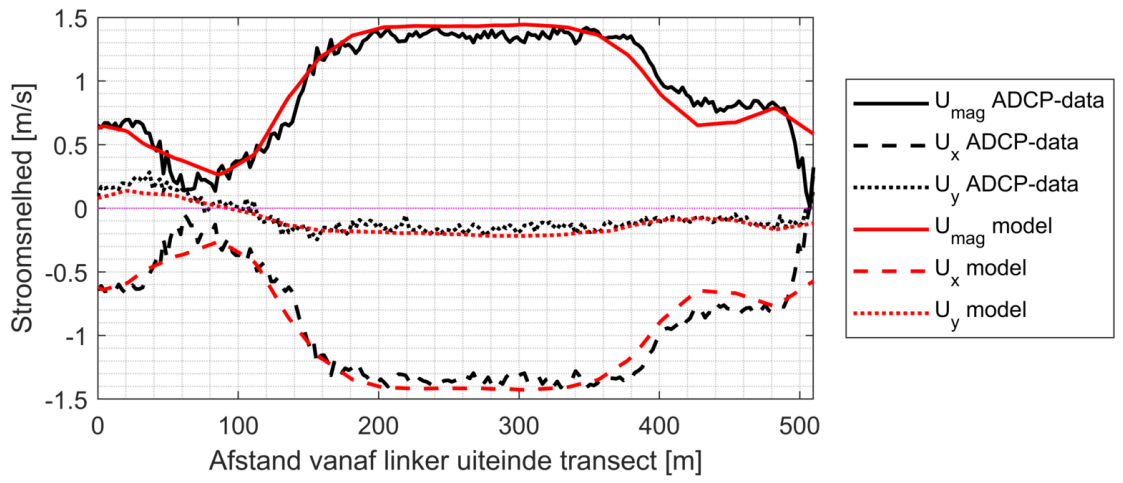
A.10 Rkm 909 (19 juli)



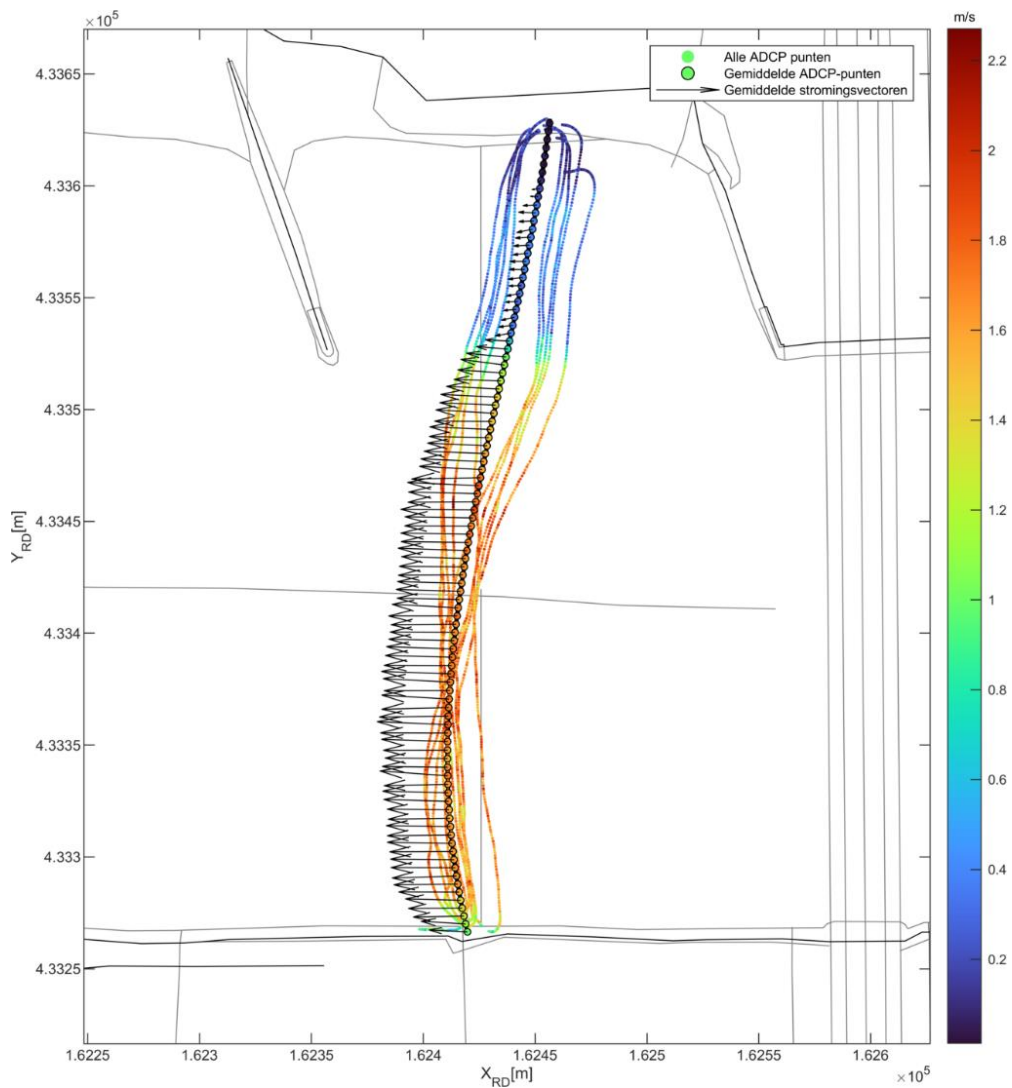


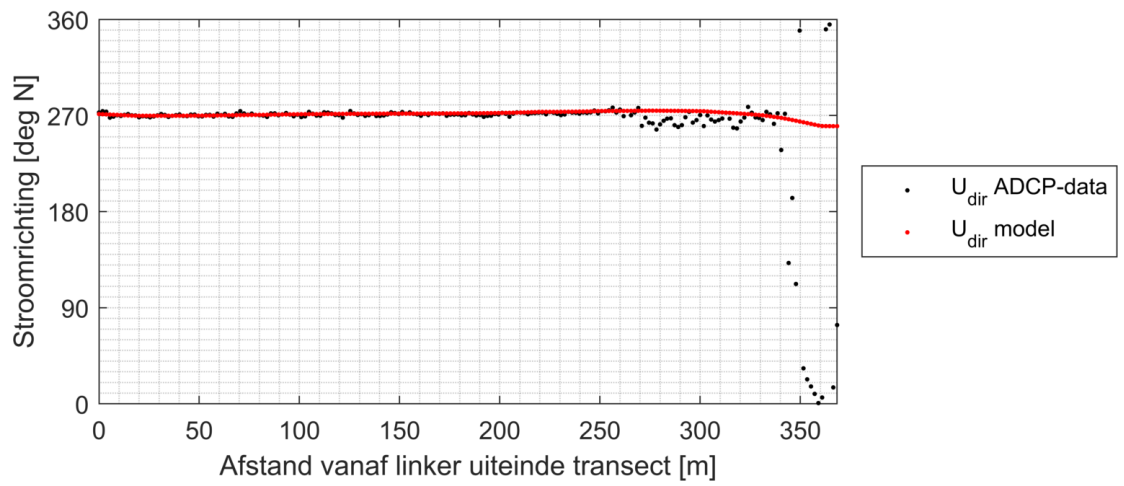
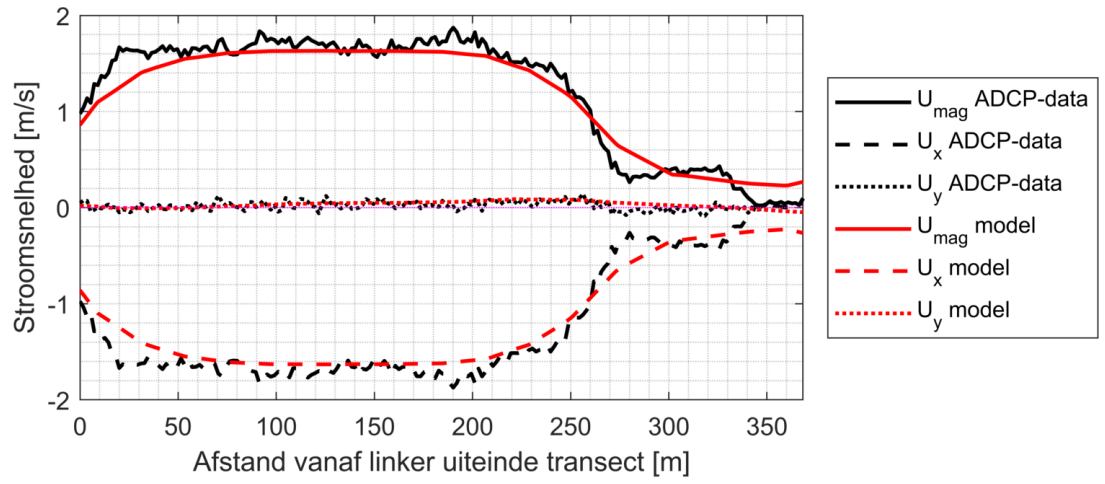
A.11 Rkm 910 (20 juli)



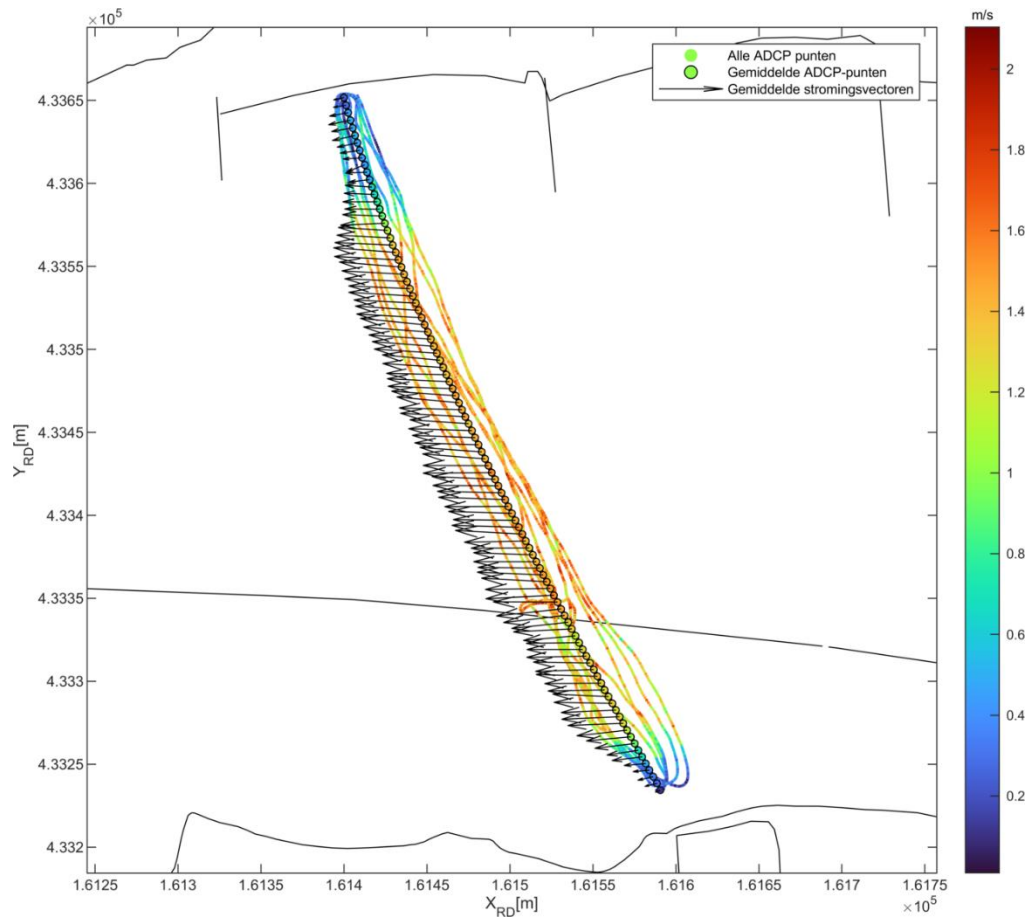


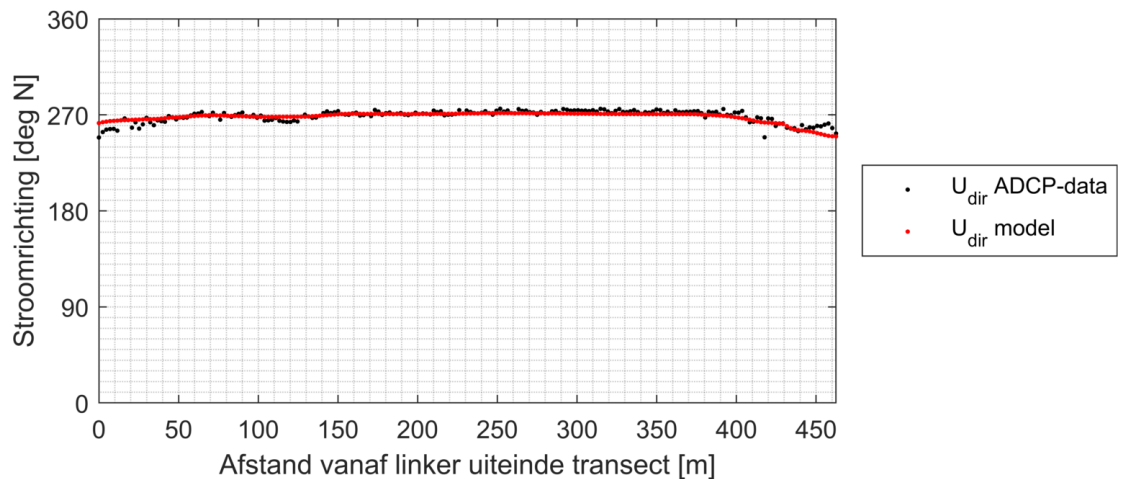
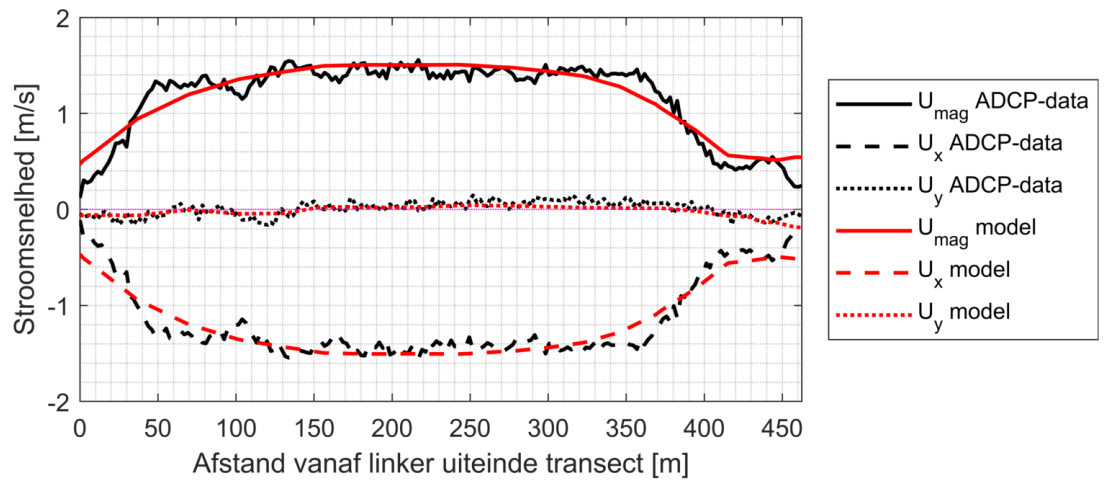
A.12 Rkm 911 (20 juli)



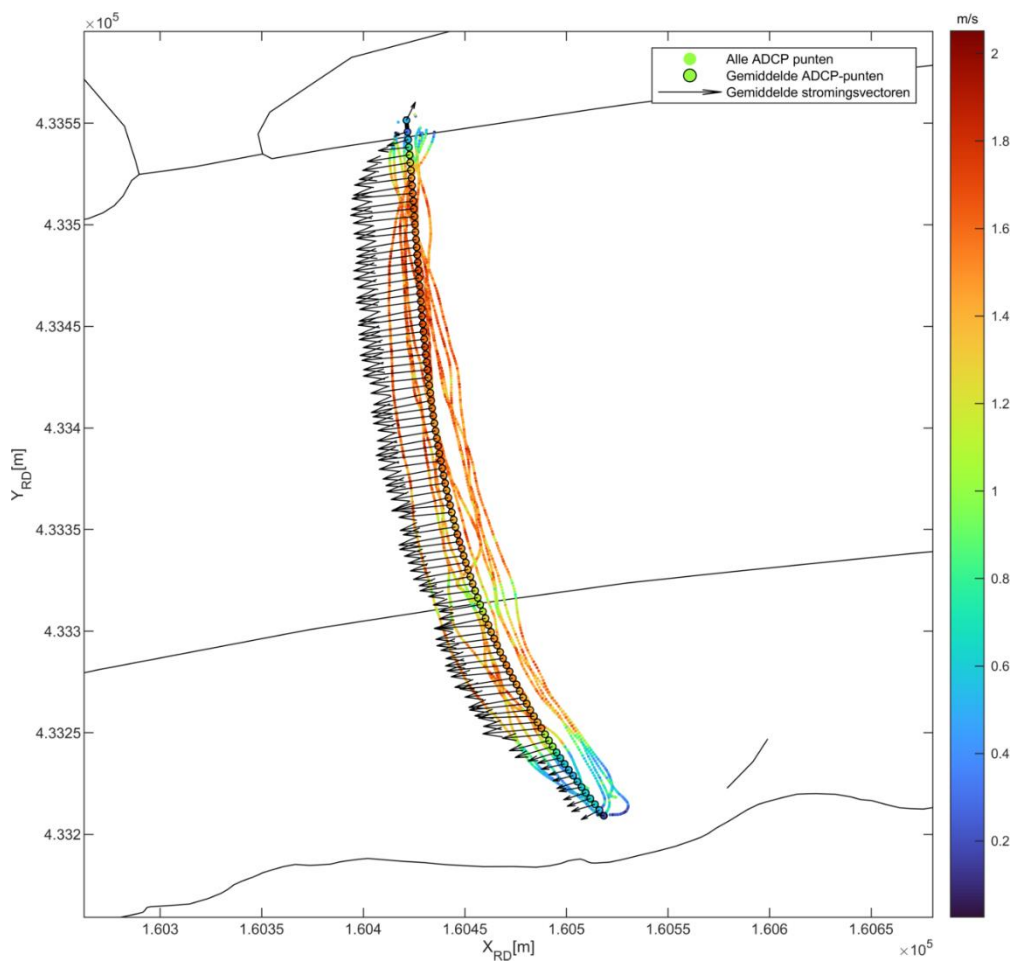


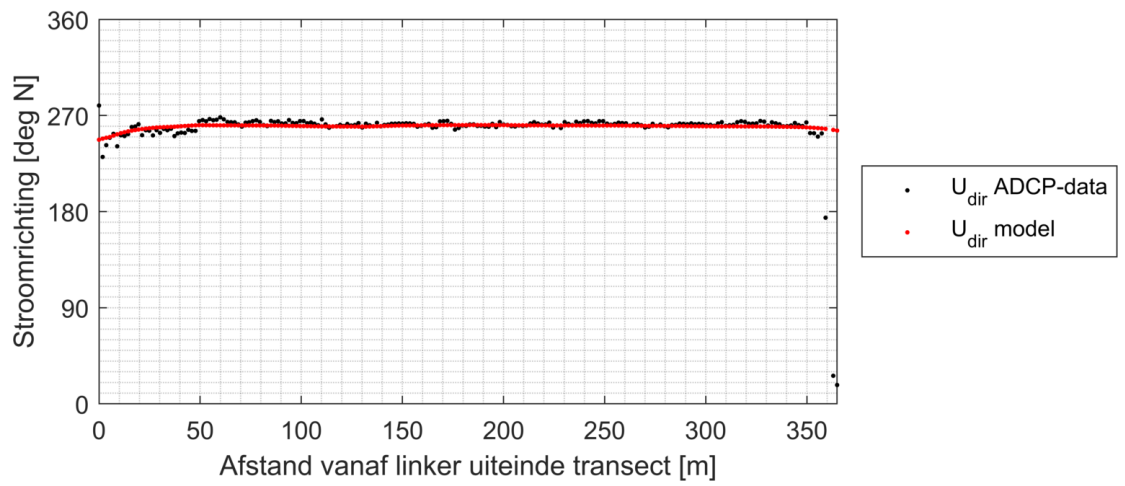
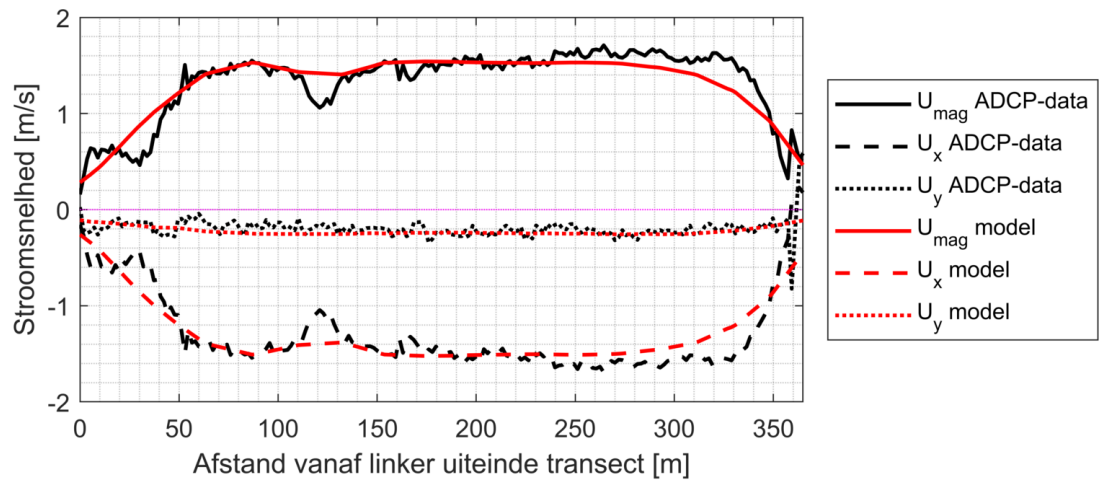
A.13 Rkm 912 (20 juli)



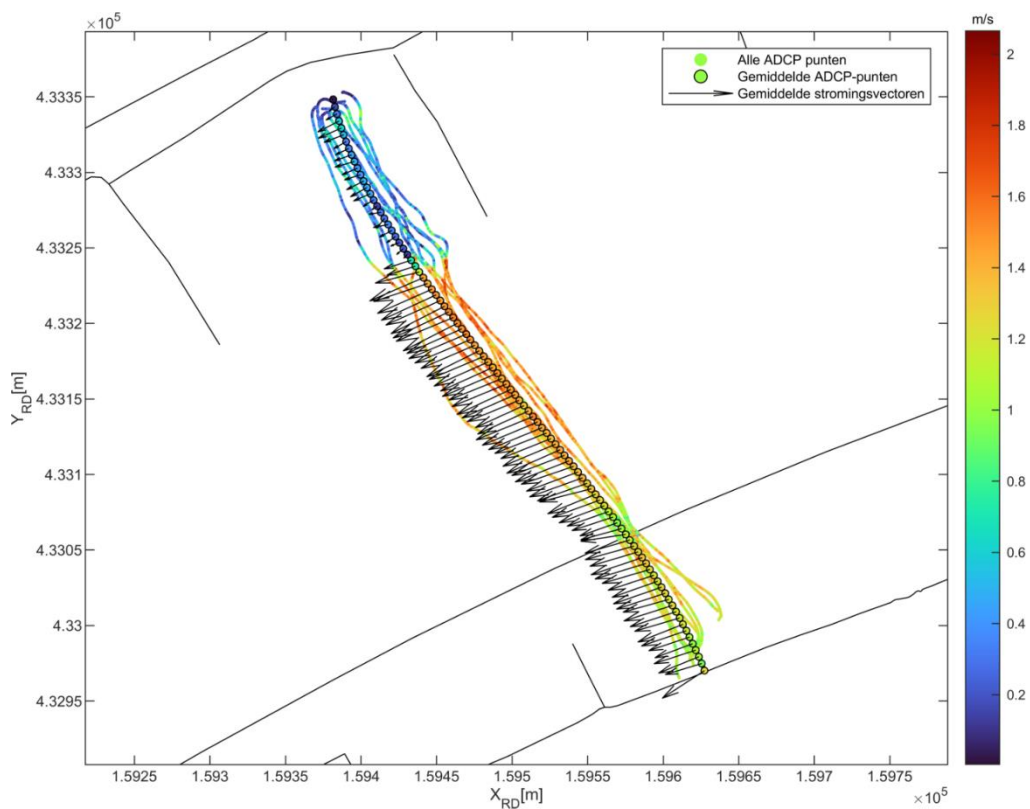


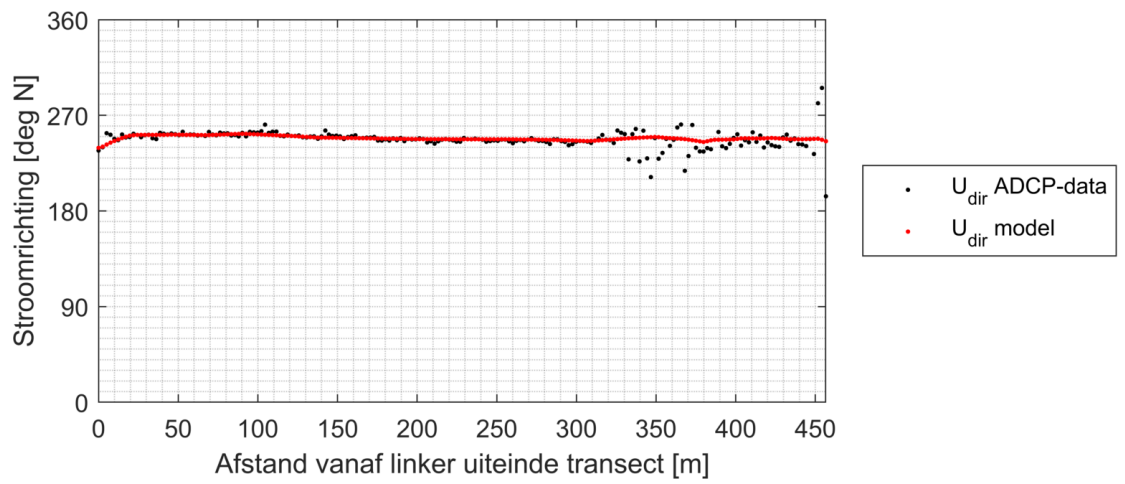
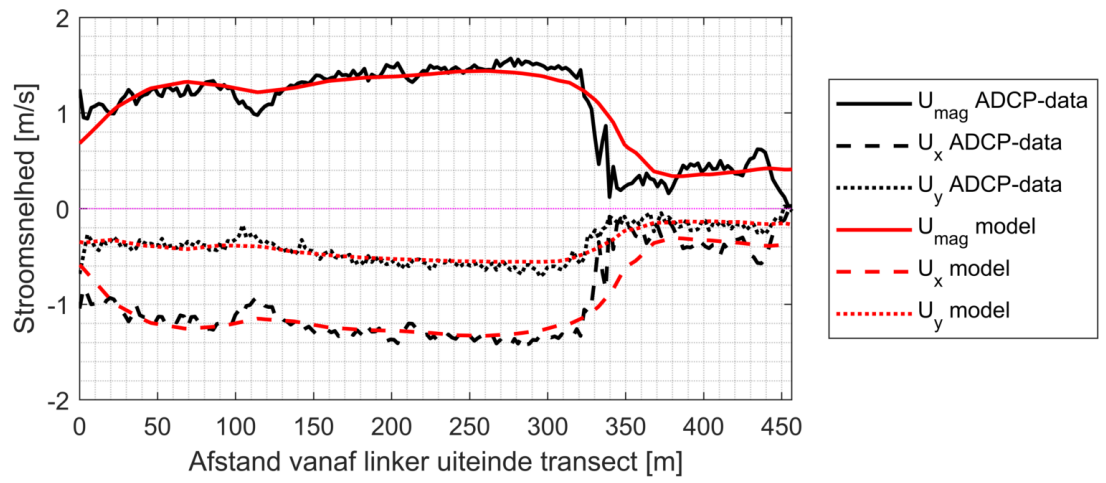
A.14 Rkm 913 (20 juli)



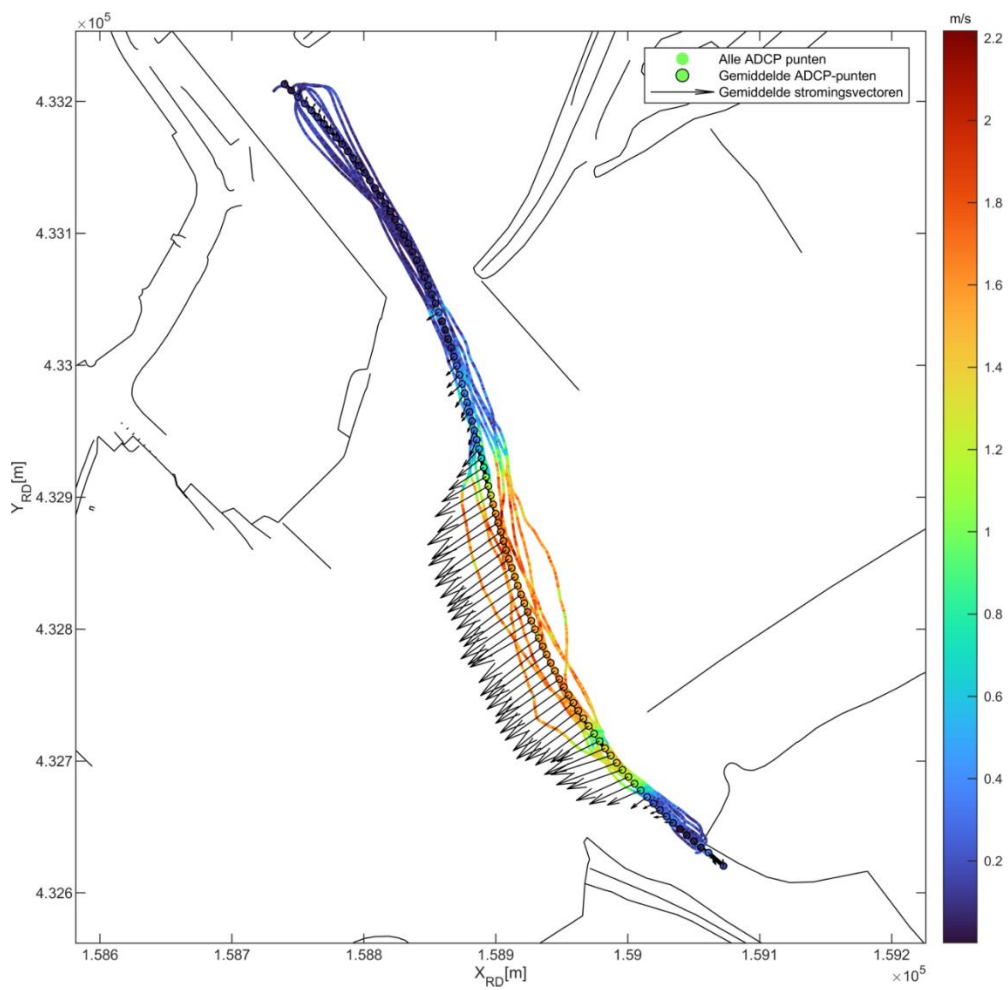


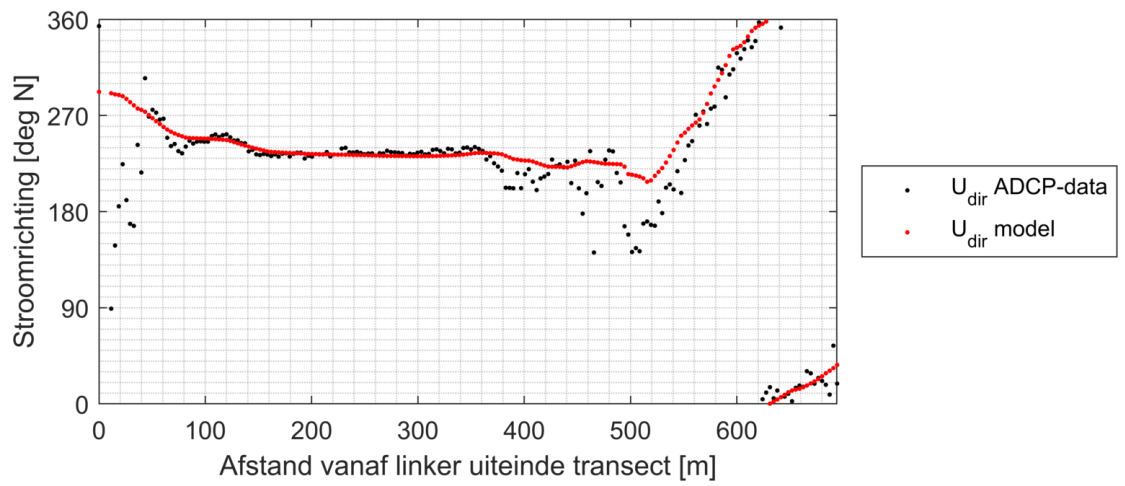
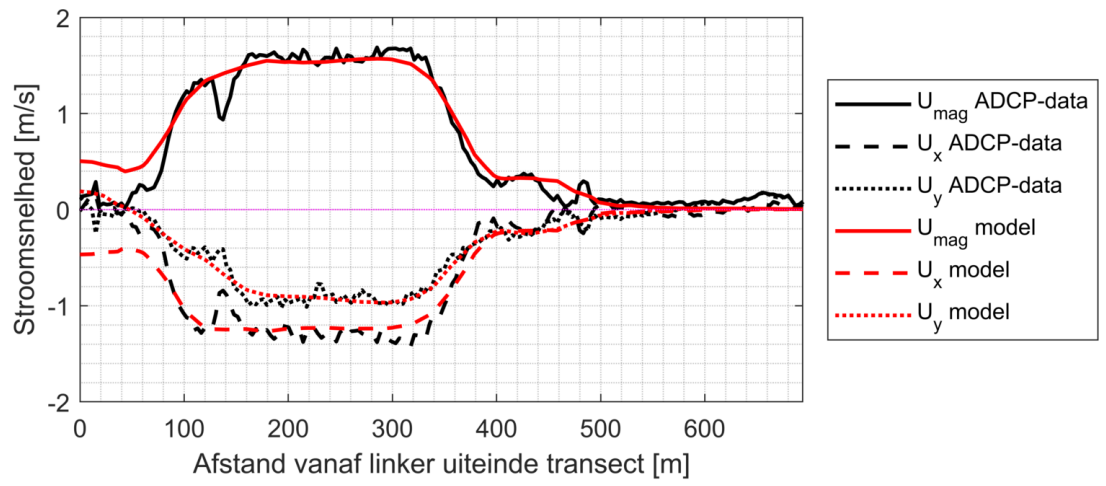
A.15 Rkm 914 (20 juli)



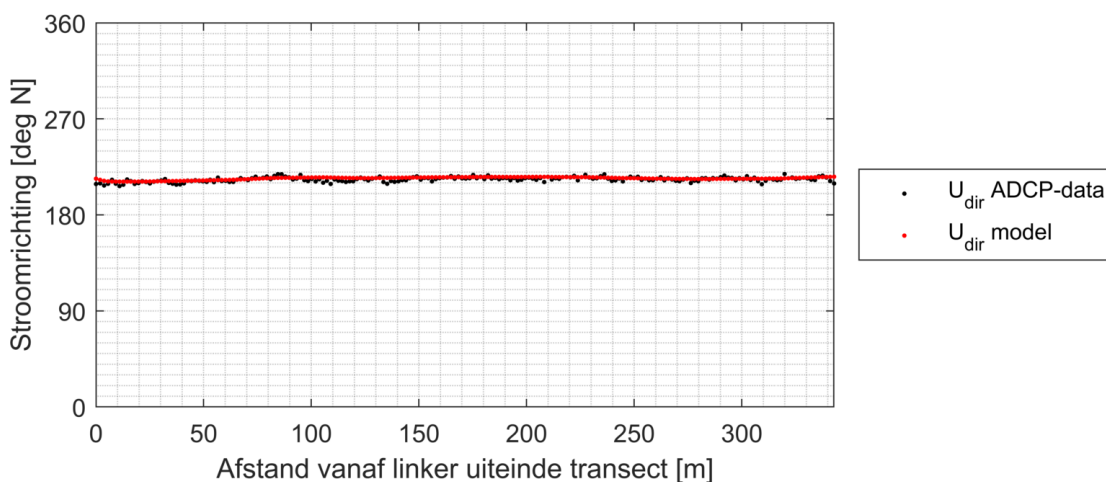
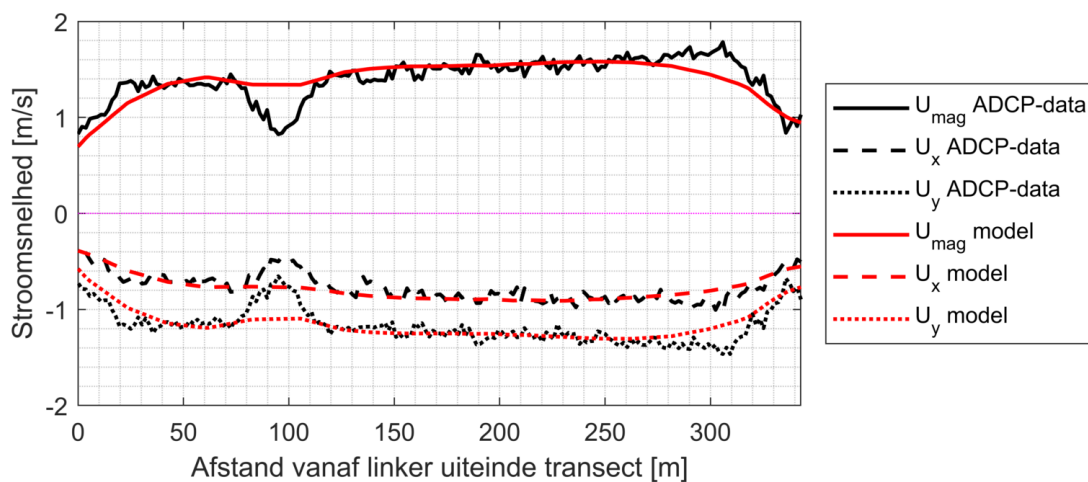
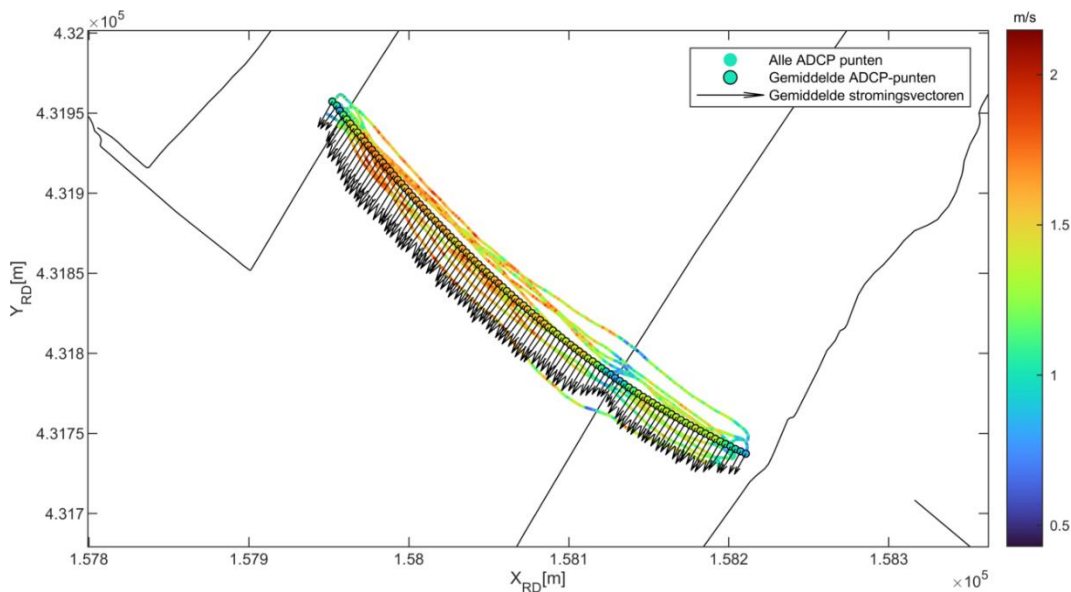


A.16 Rkm 914.6 (20 juli)

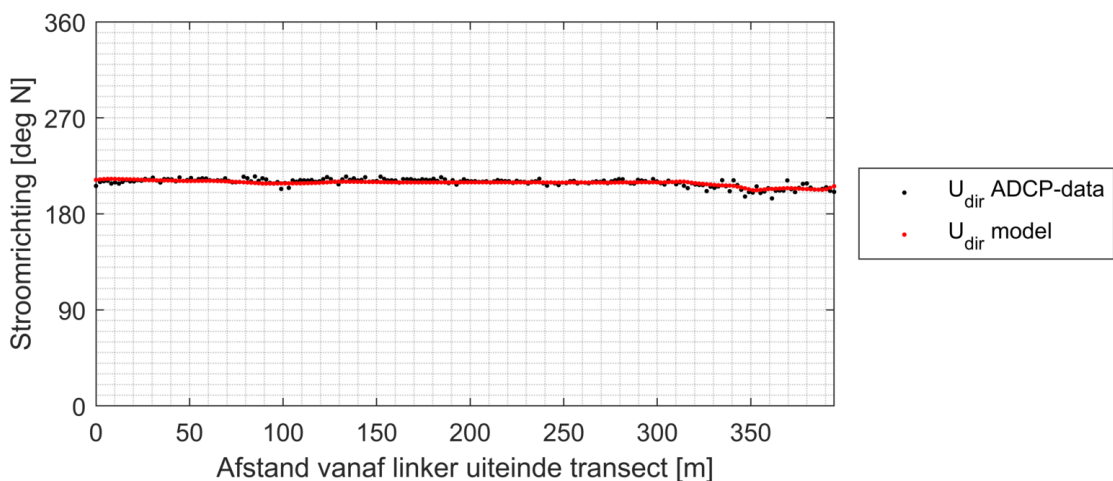
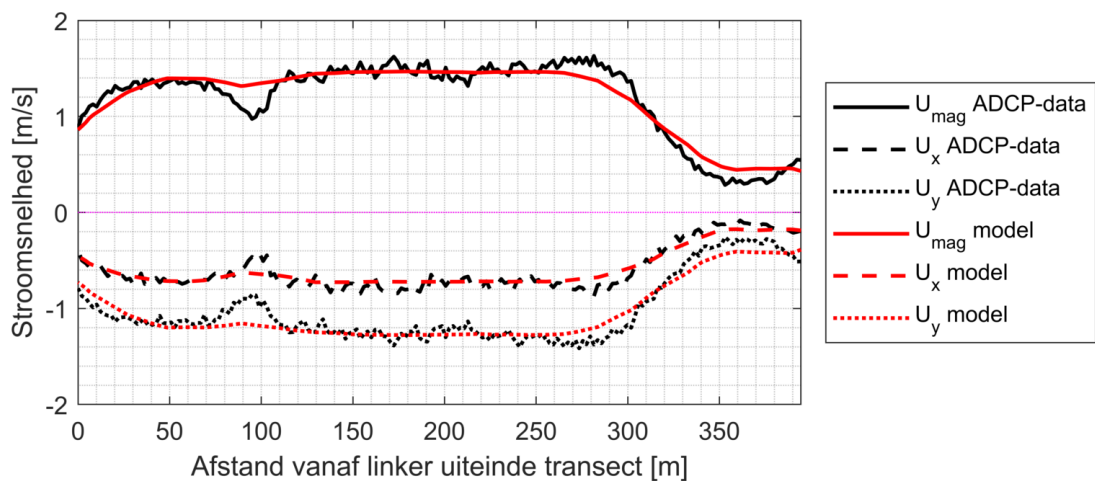
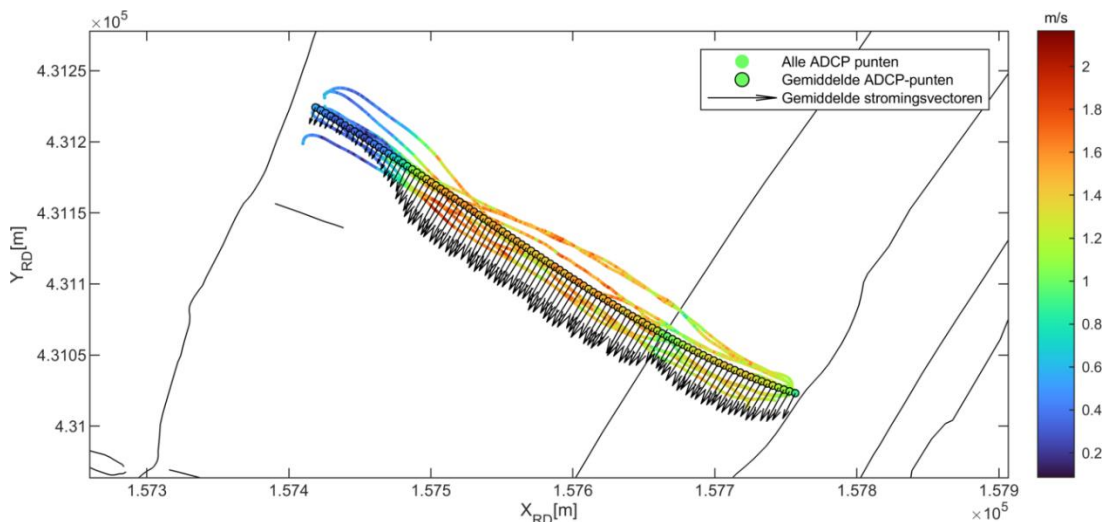




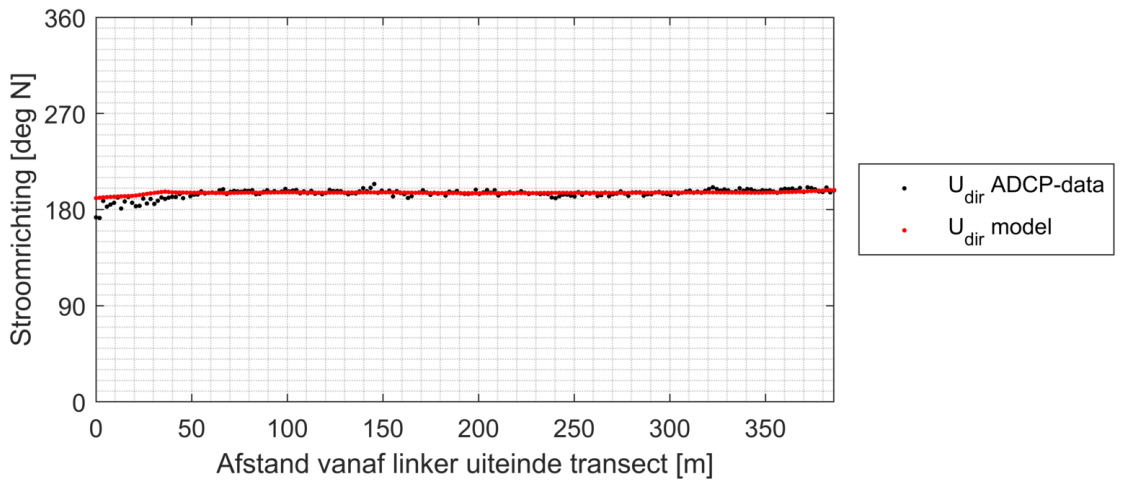
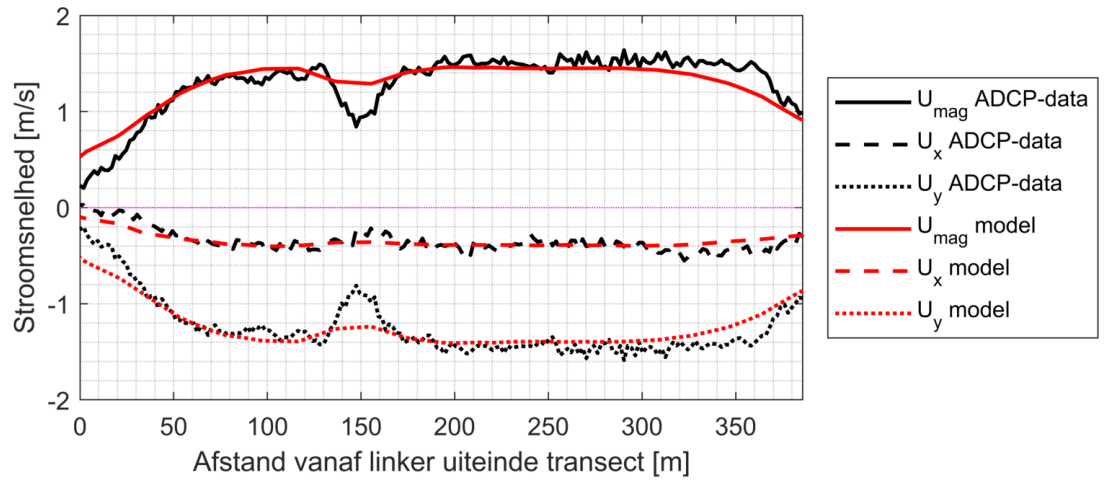
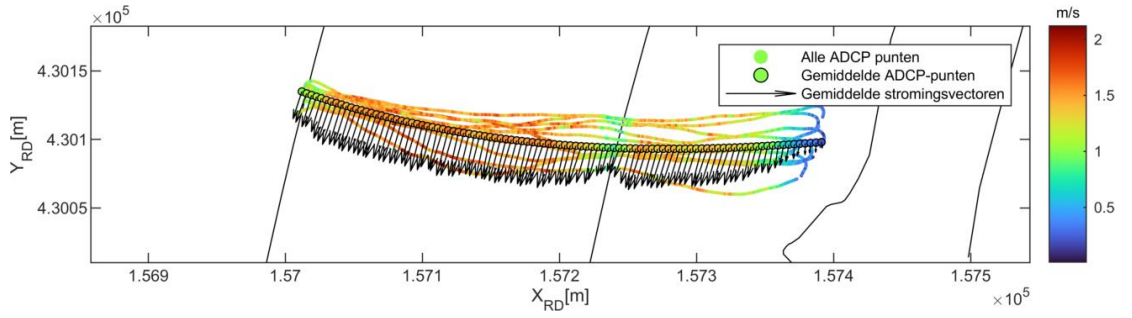
A.17 Rkm 916 (20 juli)



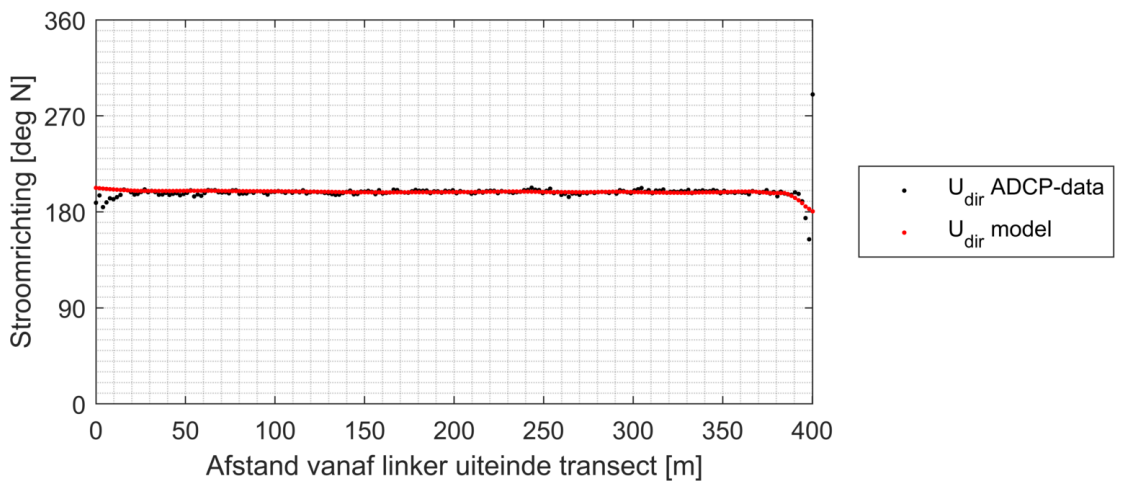
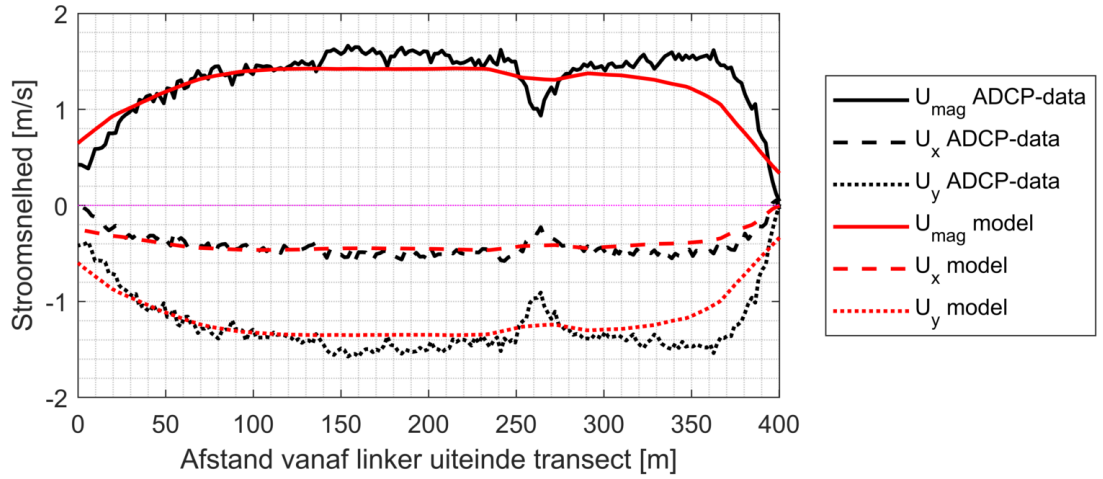
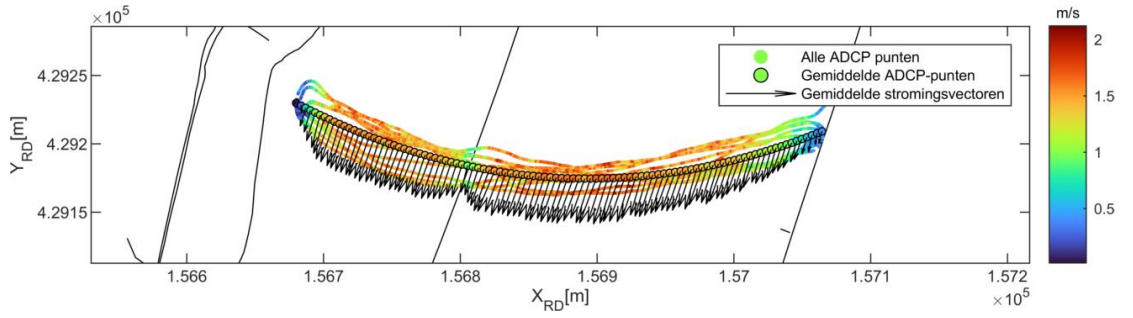
A.18 Rkm 917 (20 juli)



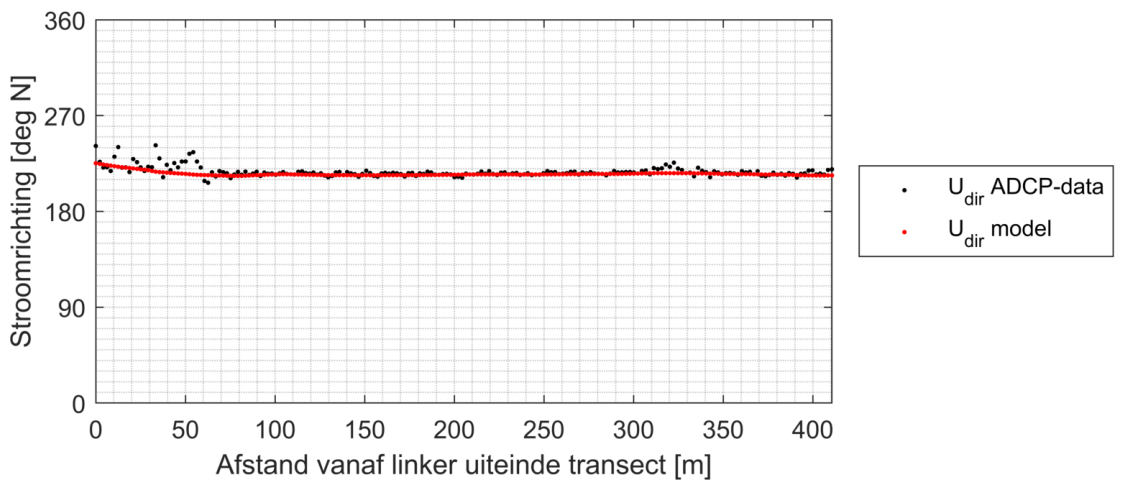
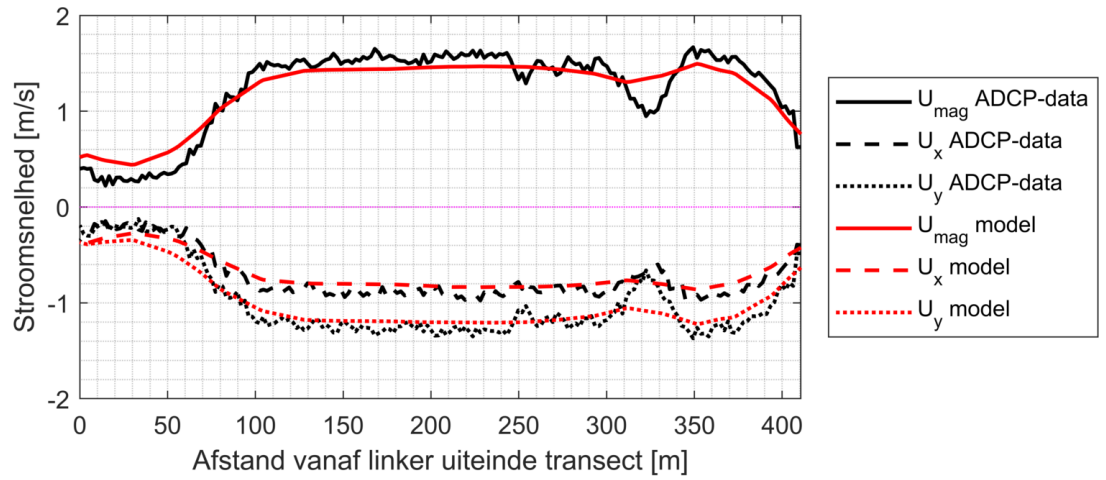
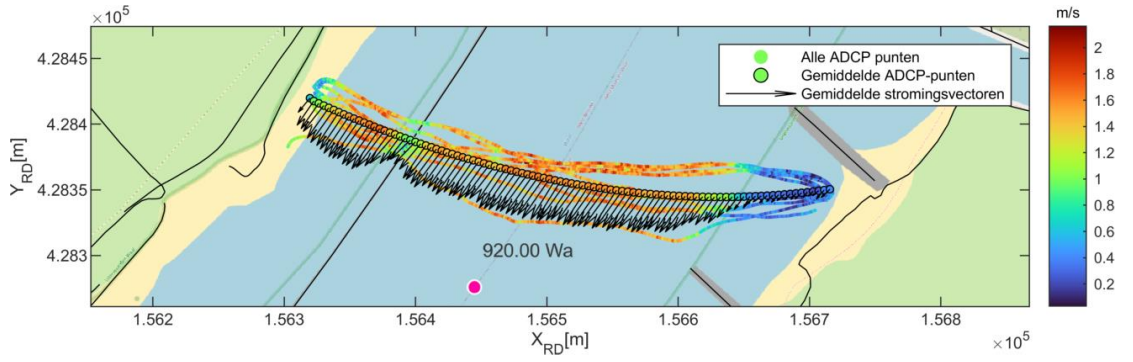
A.19 Rkm 918 (20 juli)



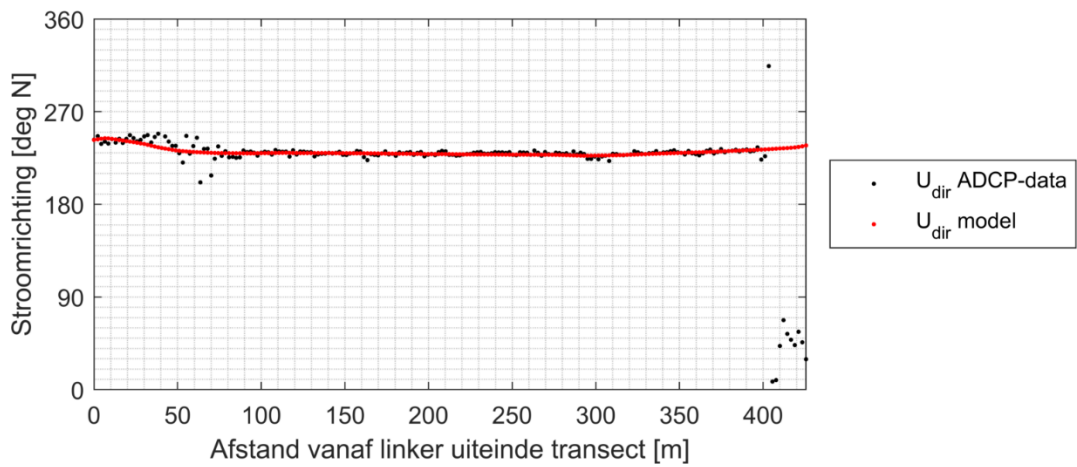
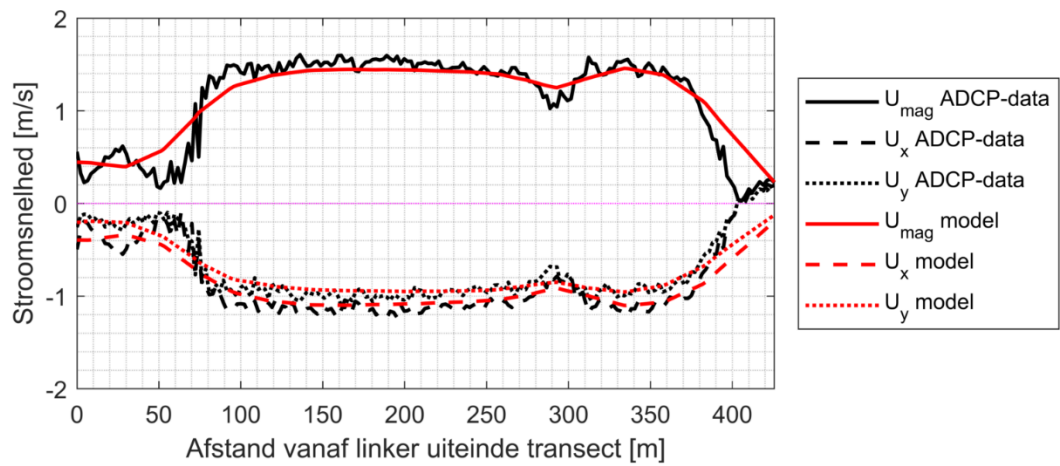
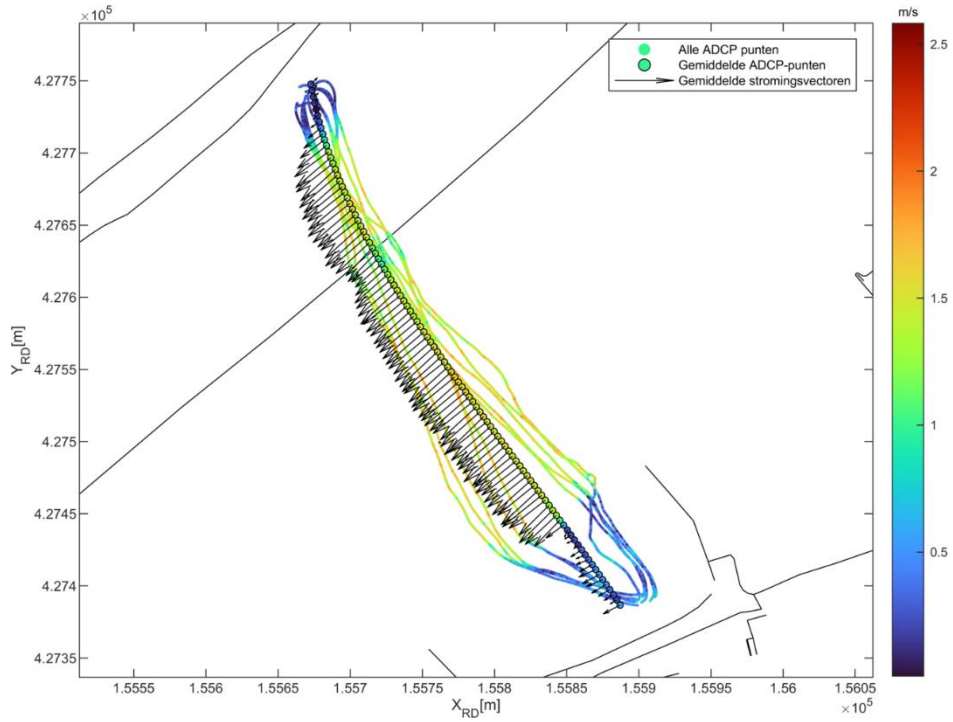
A.20 Rkm 919 (20 juli)



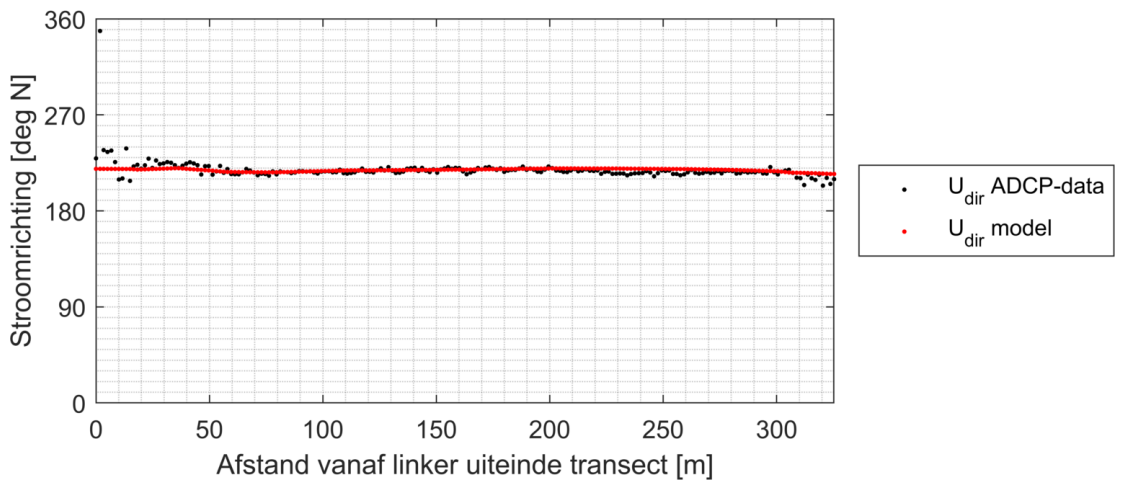
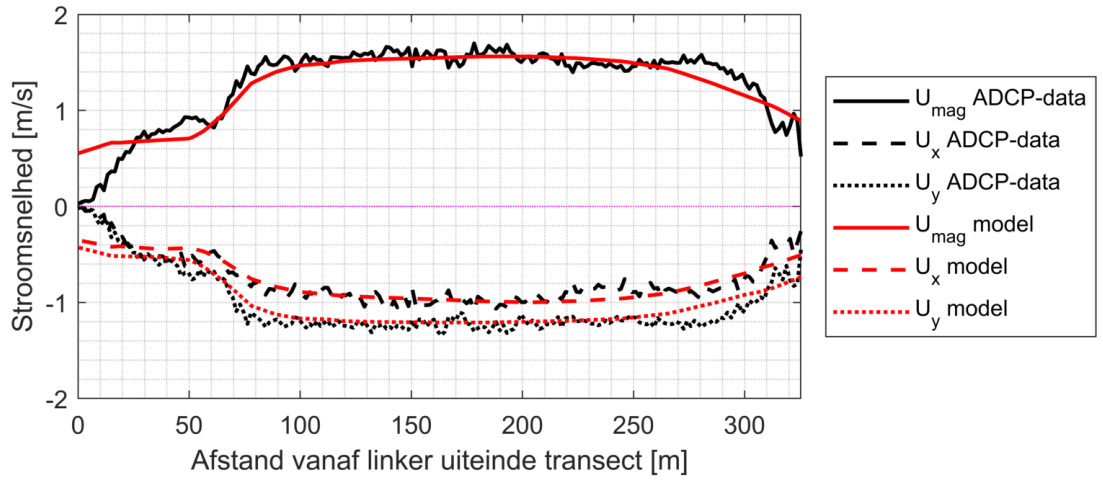
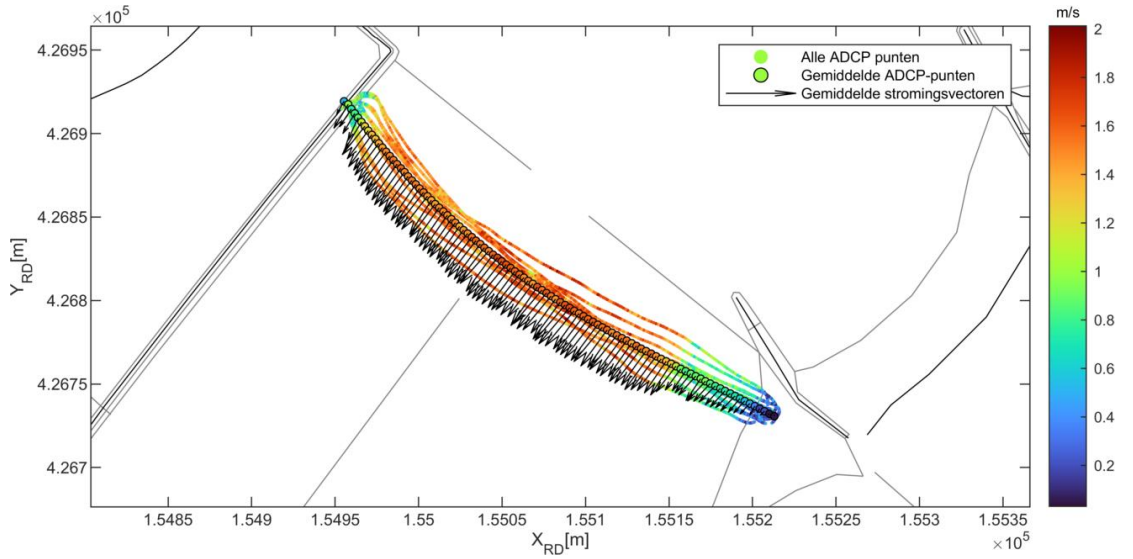
A.21 Rkm 920 (20 juli)



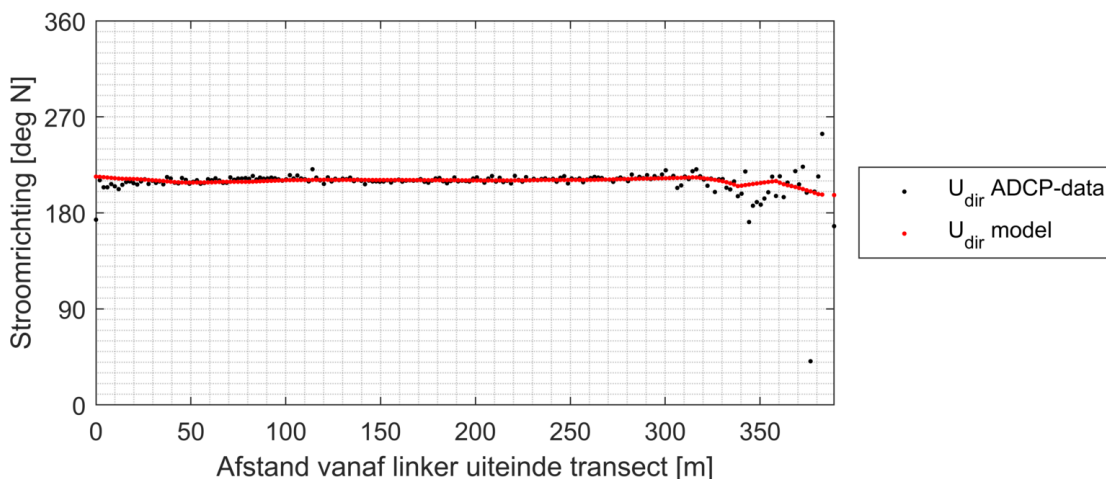
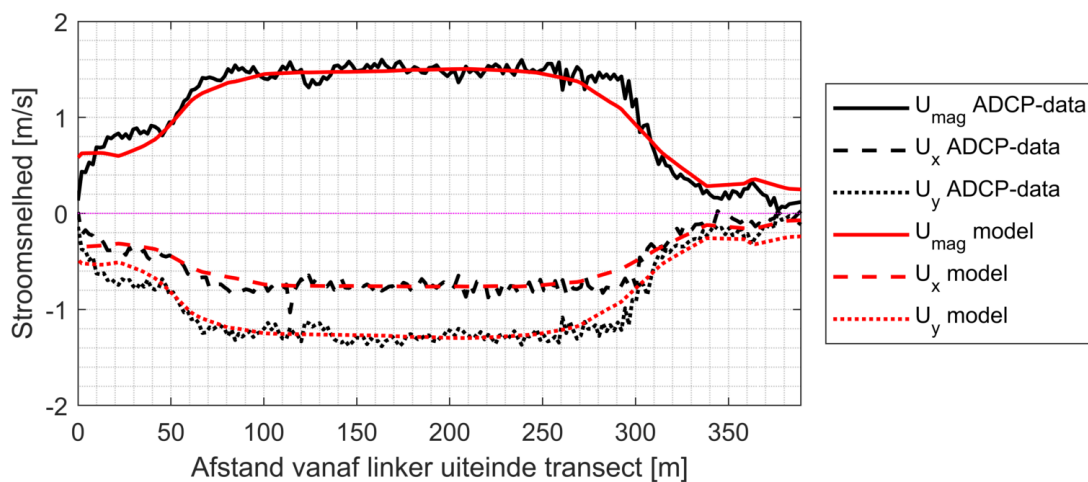
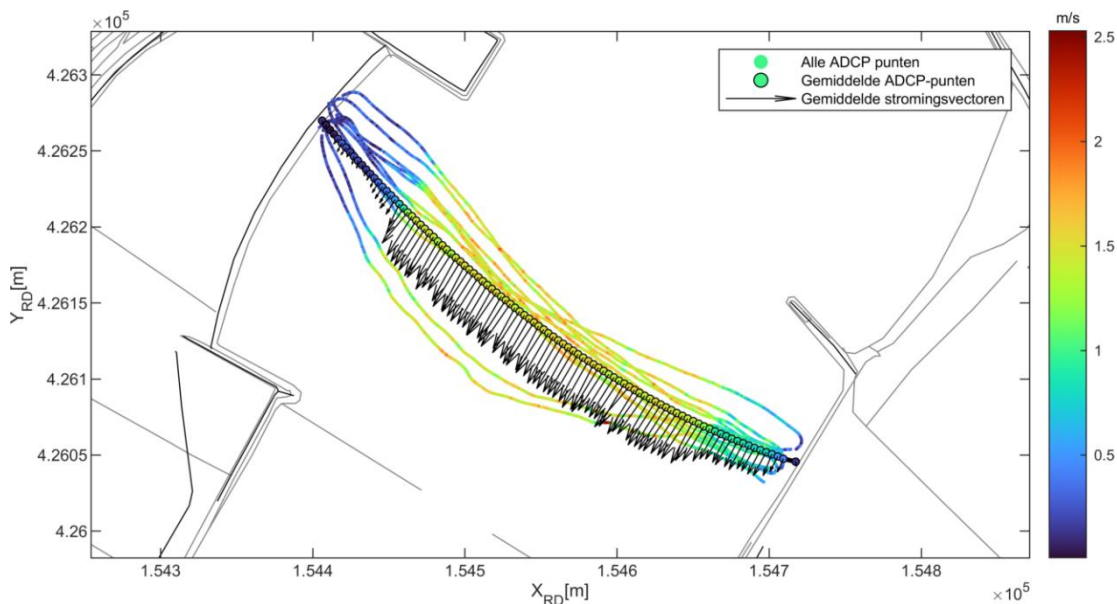
A.22 Rkm 921 (20 juli)



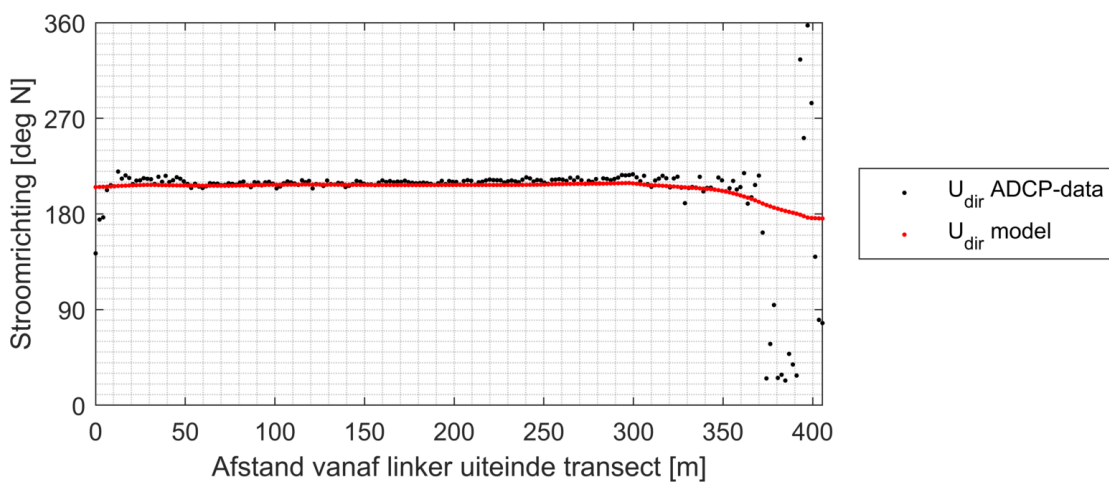
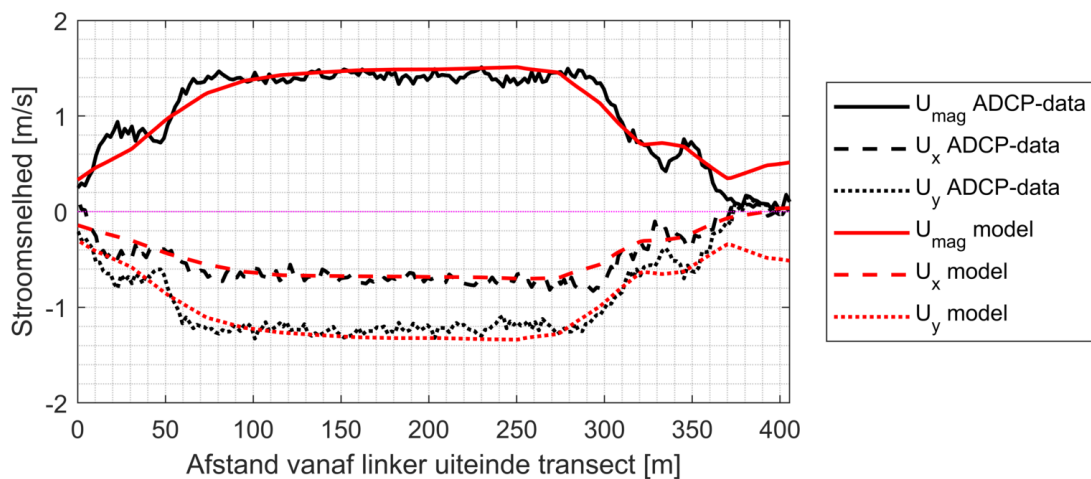
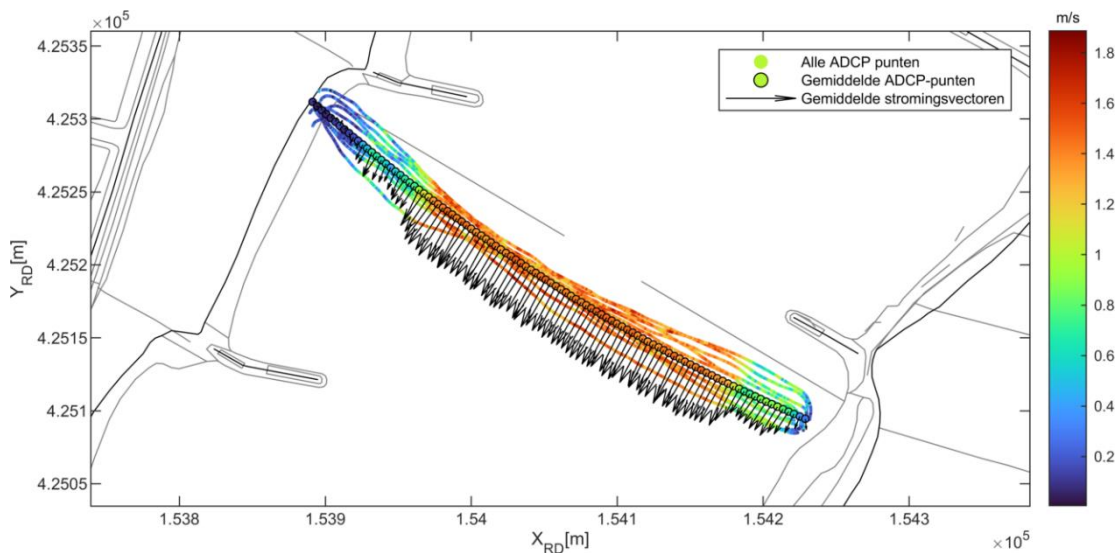
A.23 Rkm 922 (21 juli)



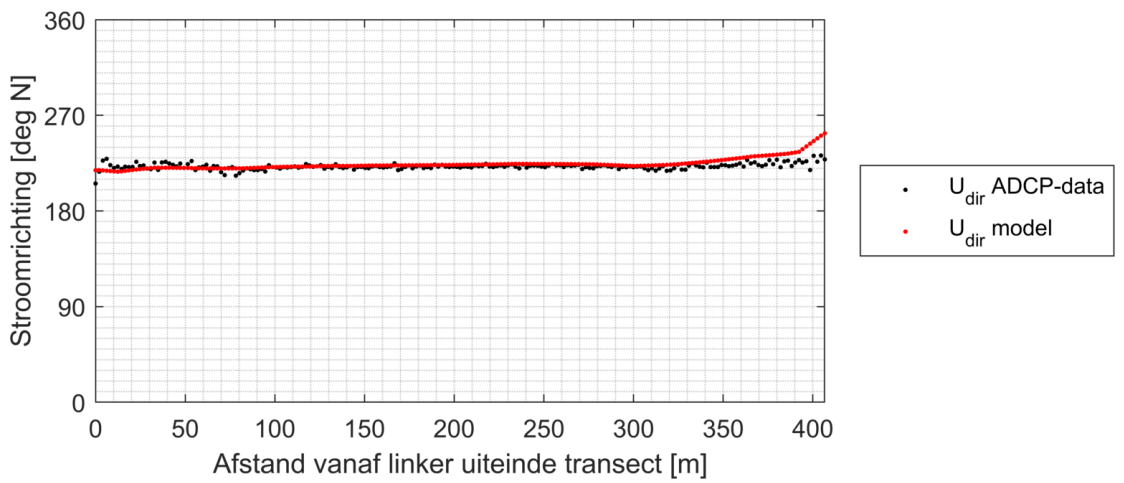
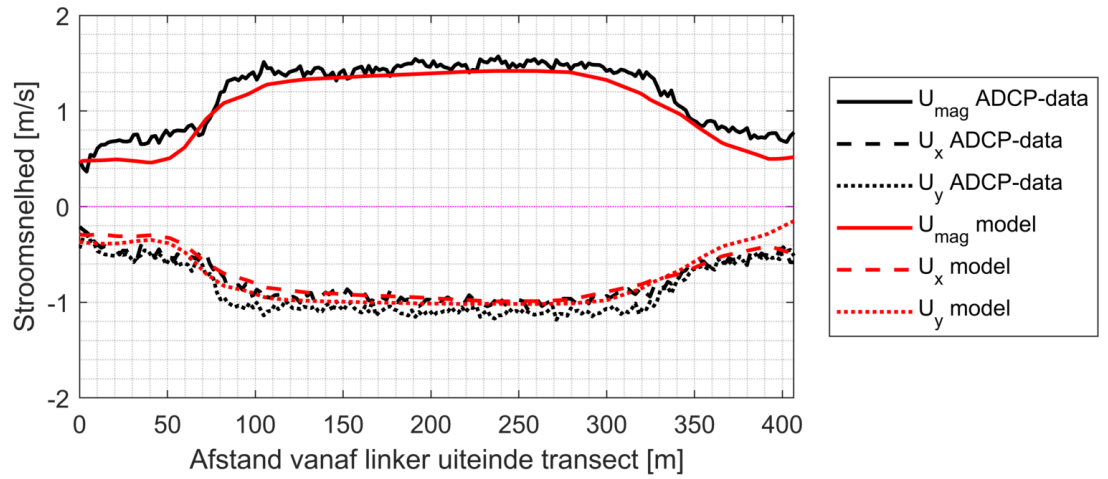
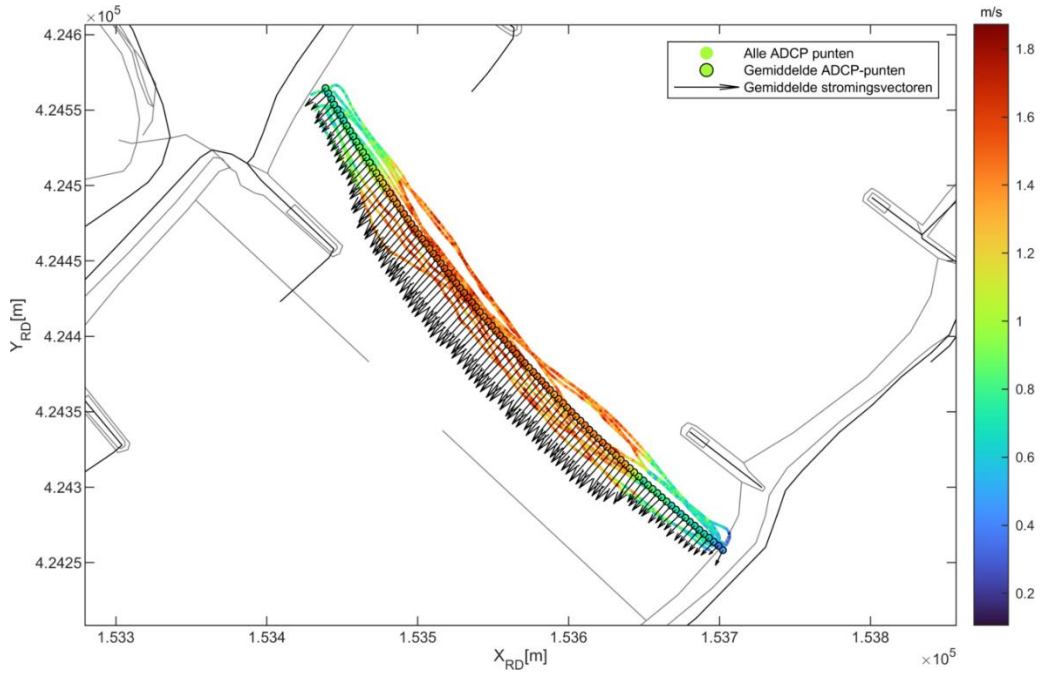
A.24 Rkm 923 (21 juli)



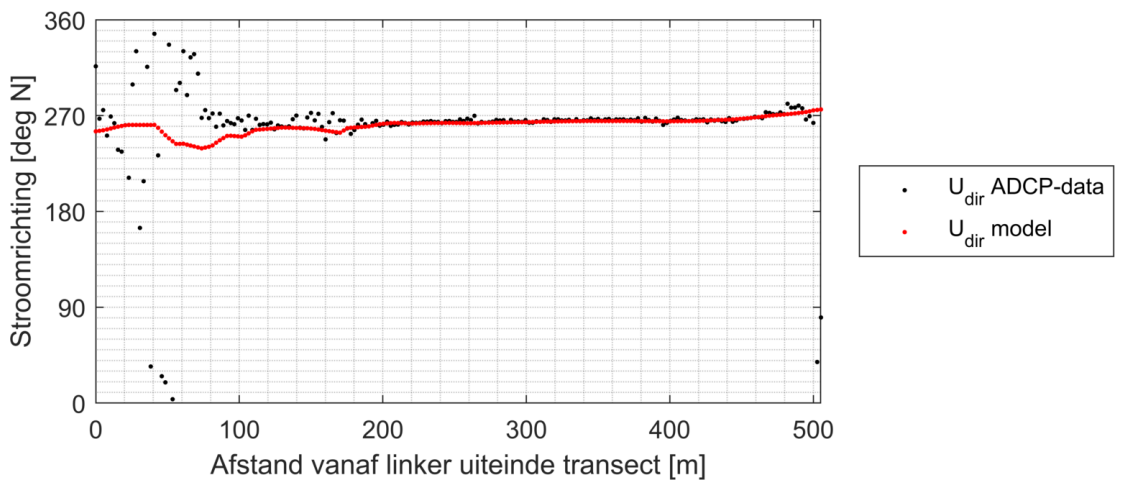
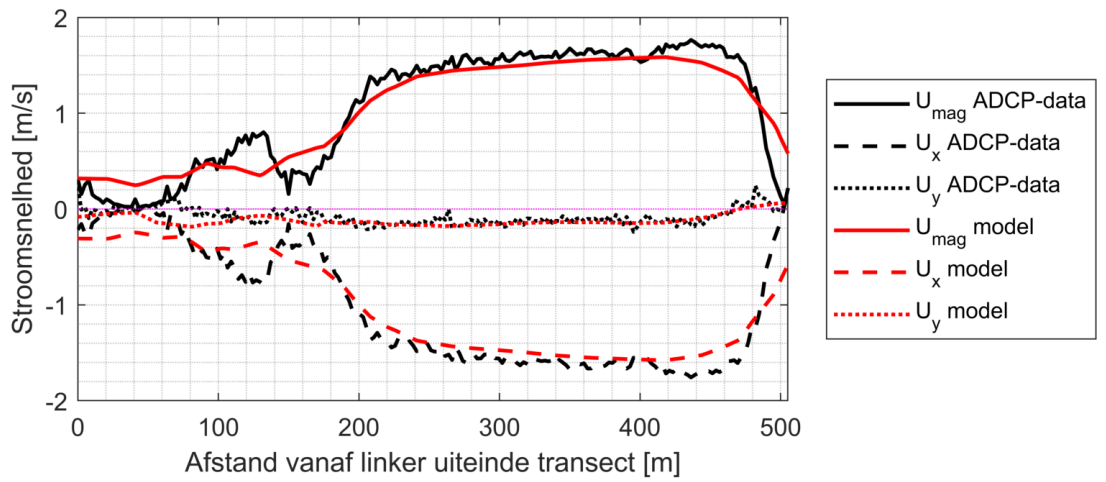
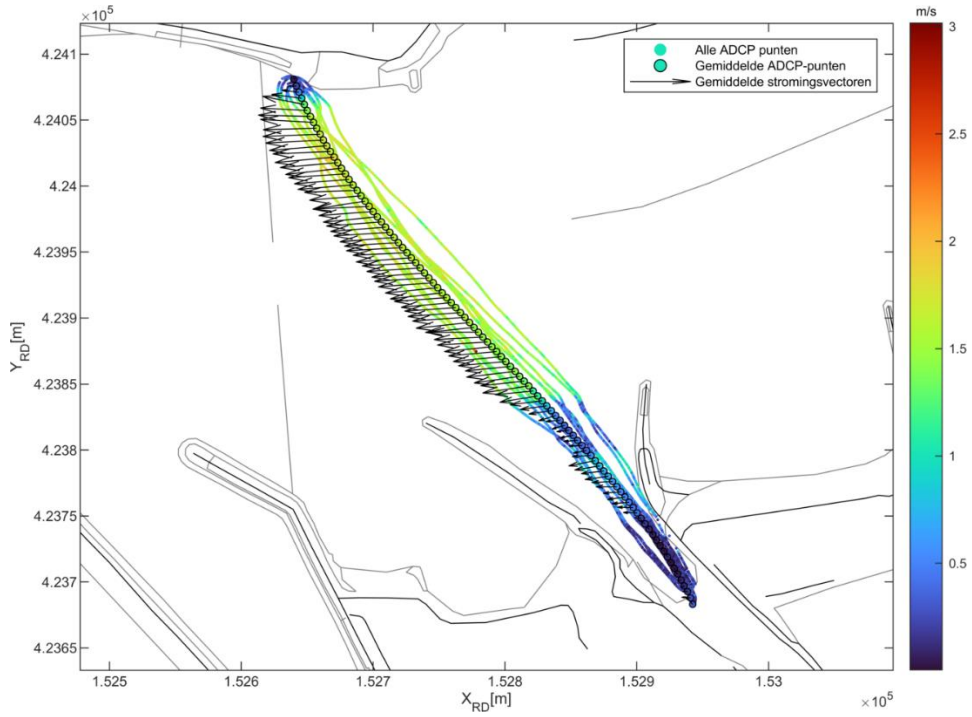
A.25 Rkm 924 (21 juli)



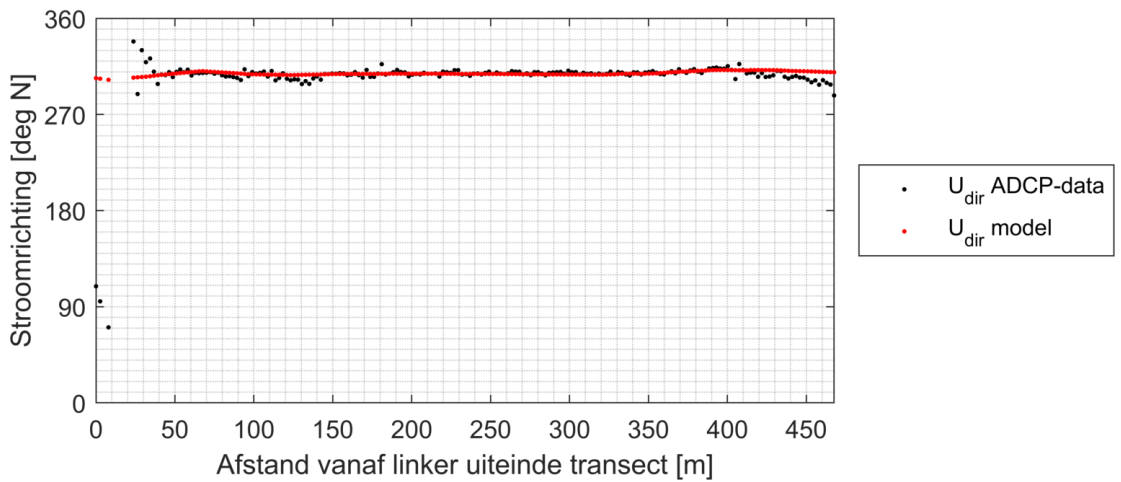
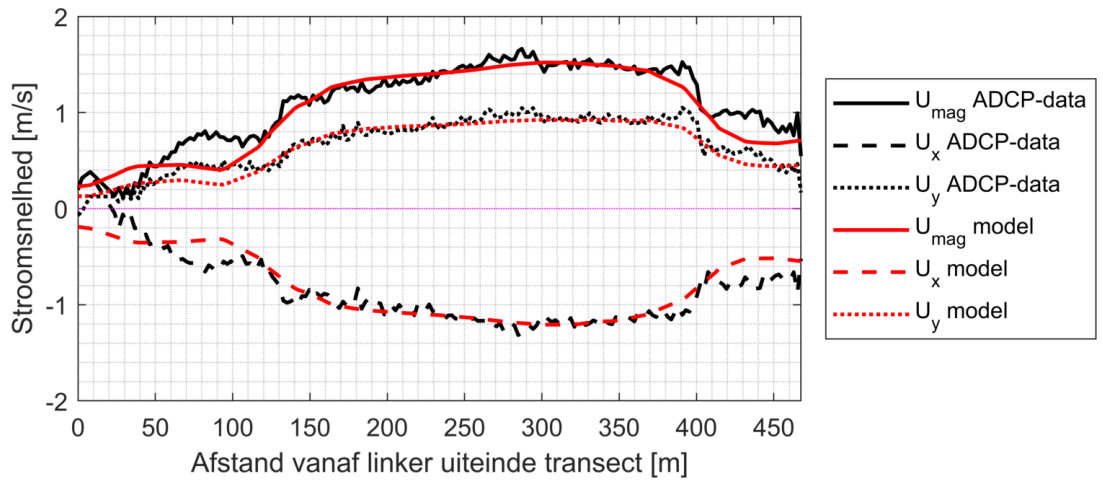
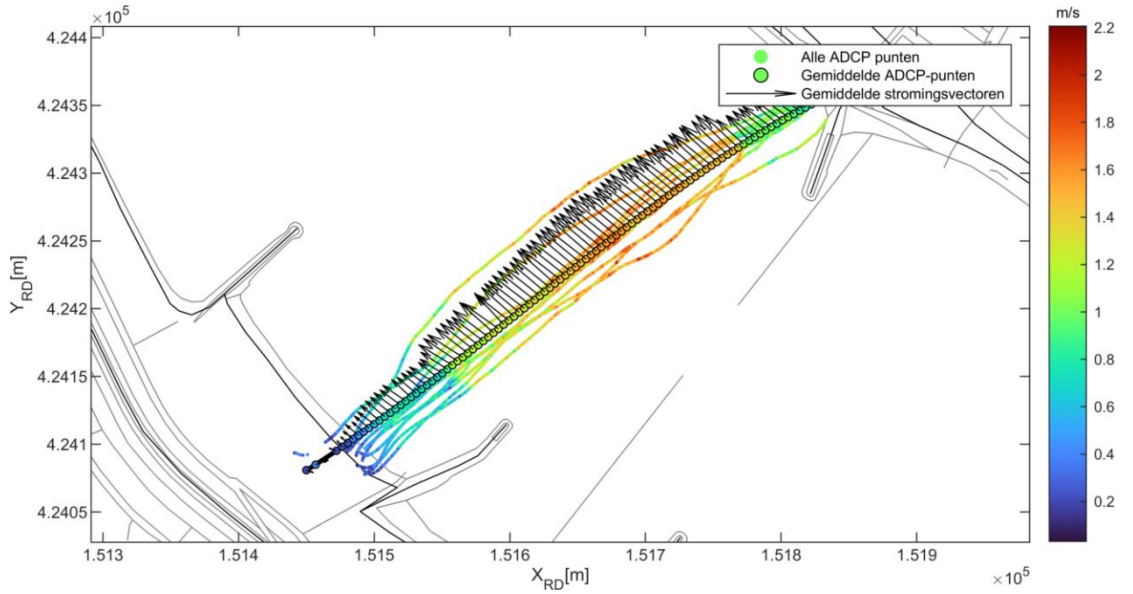
A.26 Rkm 925 (21 juli)



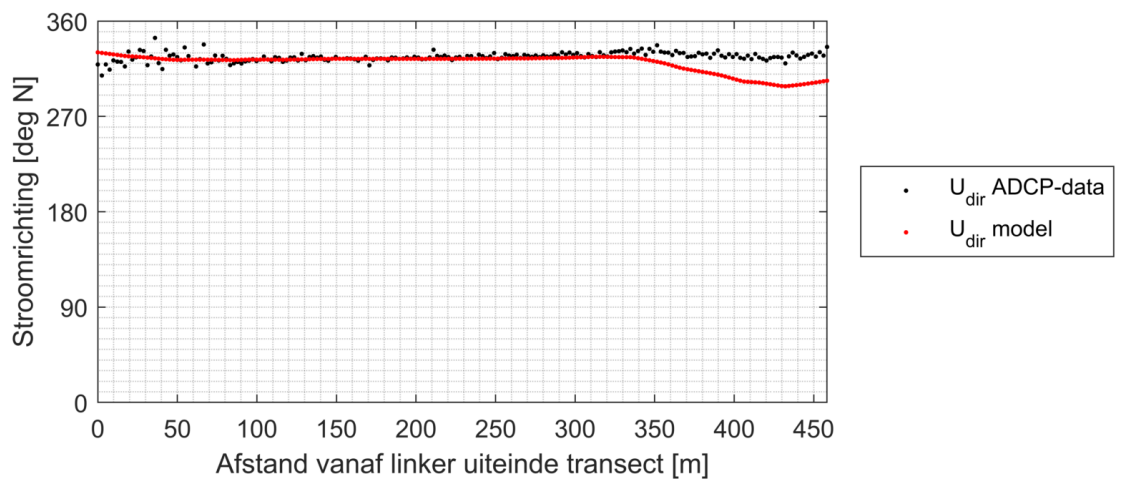
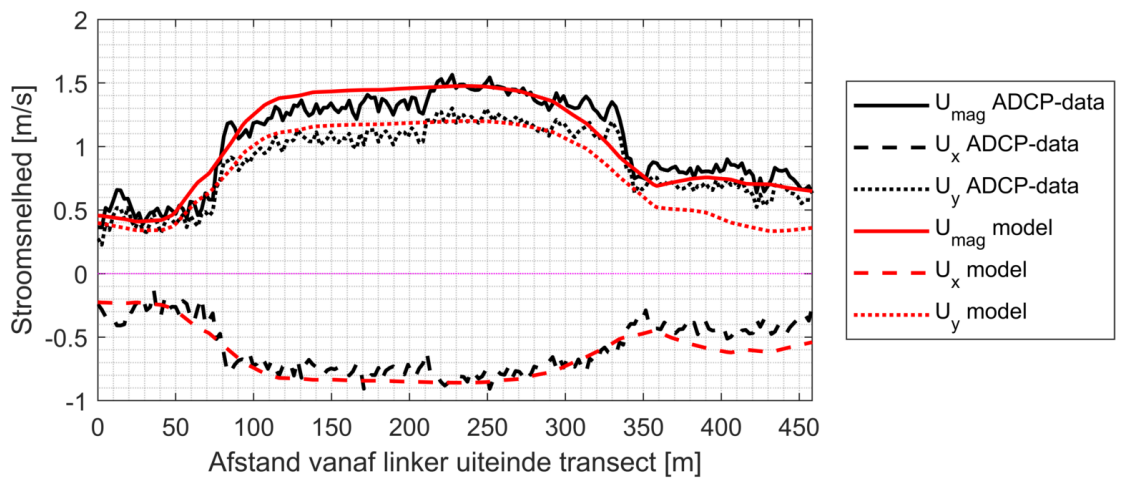
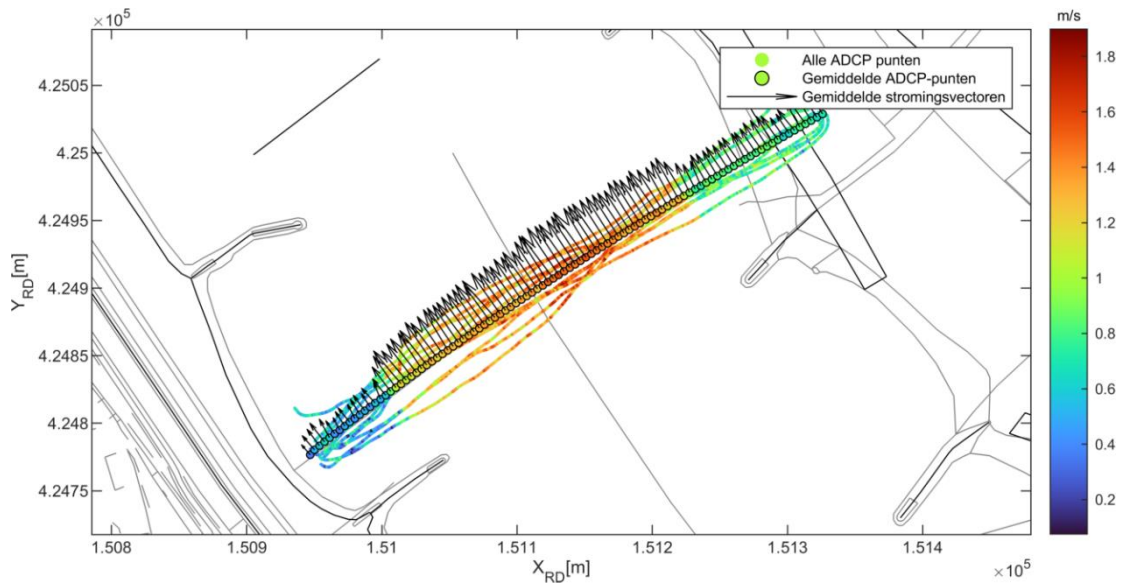
A.27 Rkm 926 (21 juli)



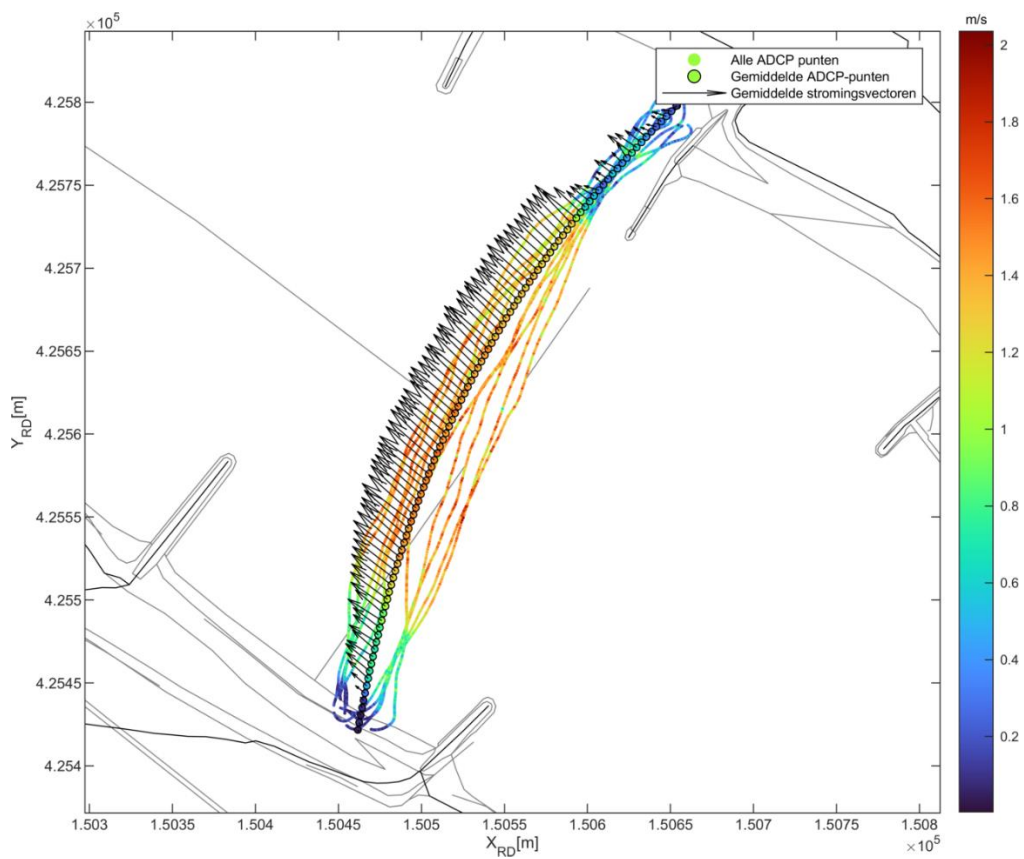
A.28 Rkm 927 (21 juli)

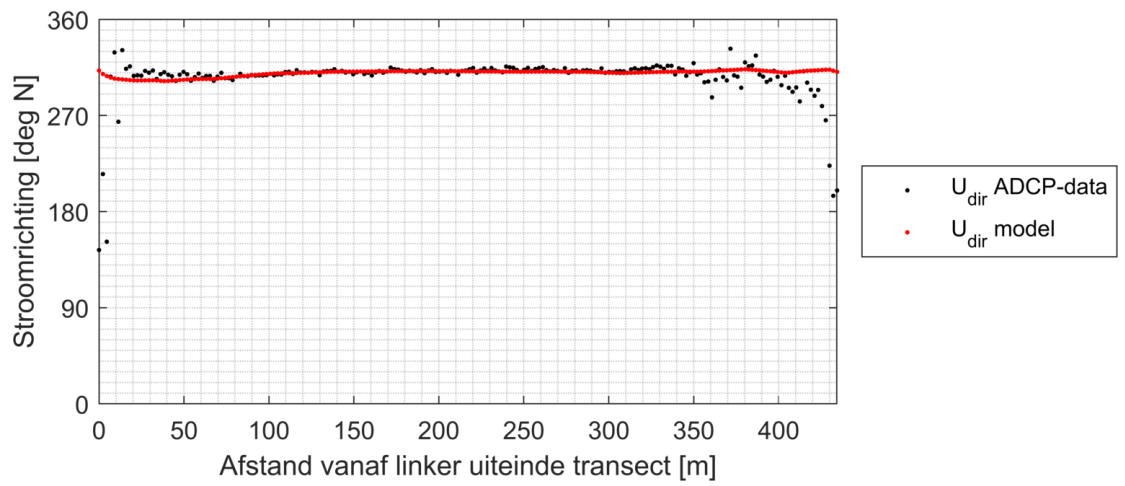
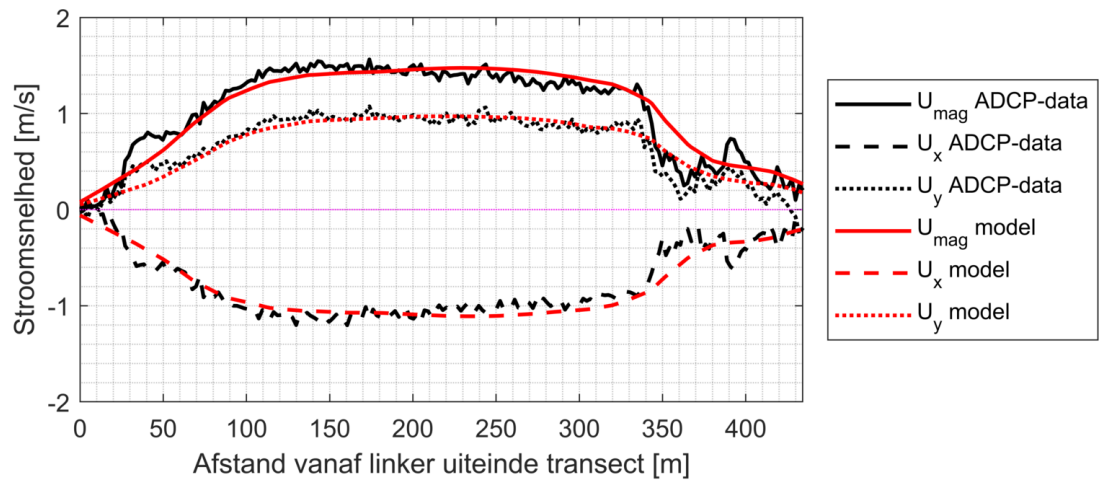


A.29 Rkm 928 (21 juli)

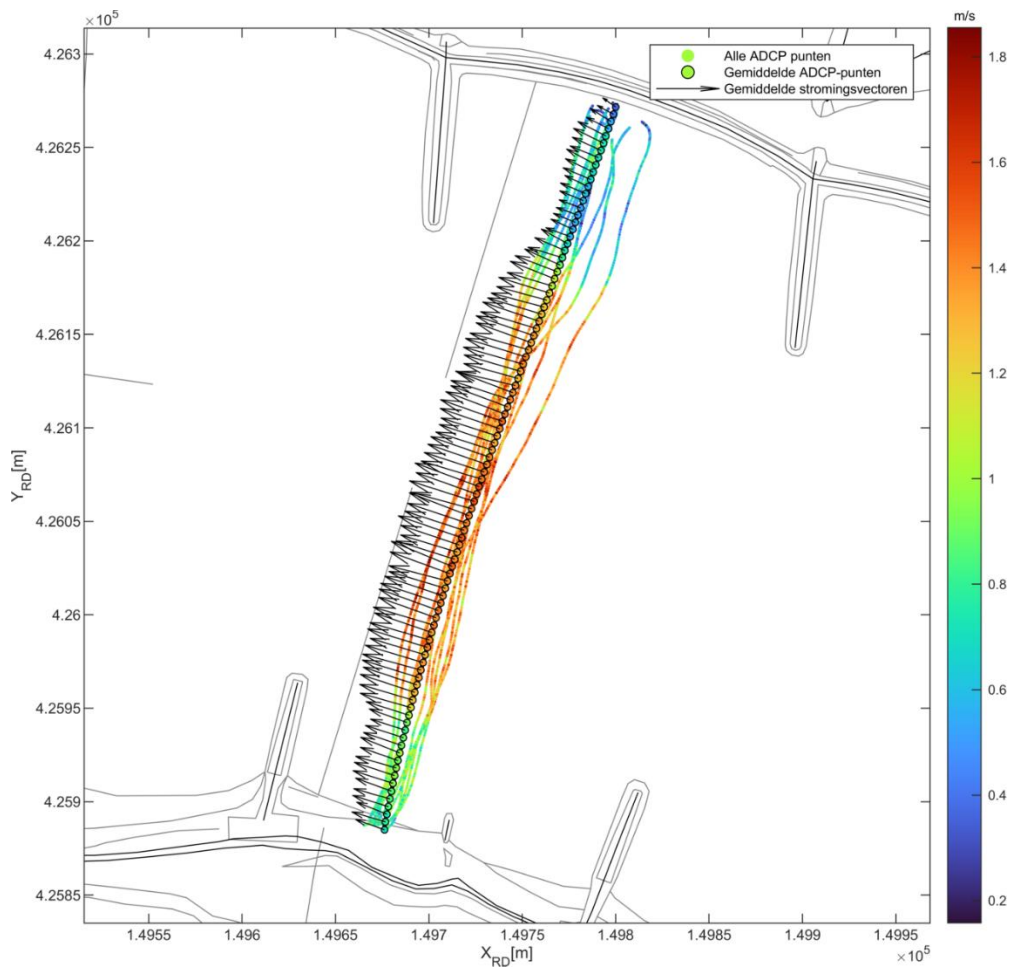


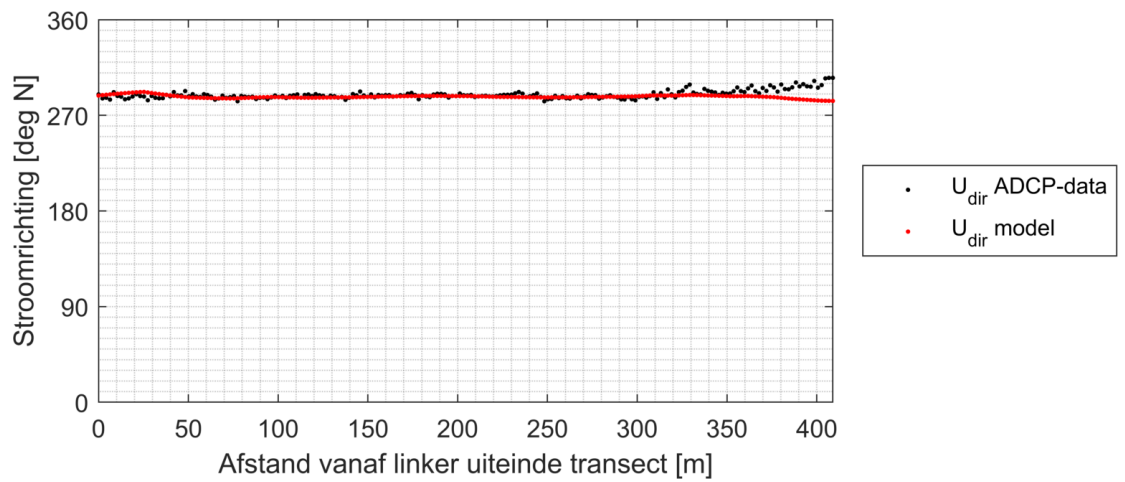
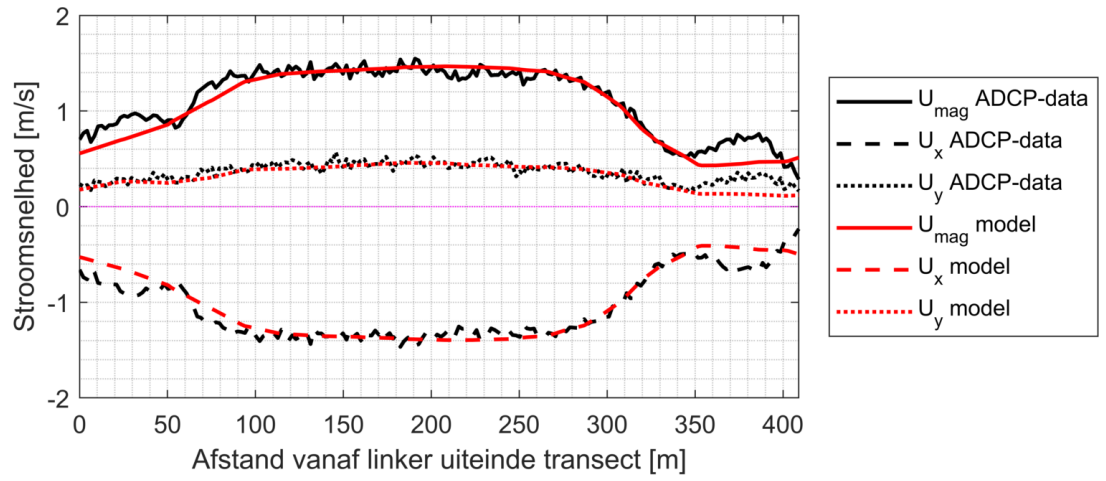
A.30 Rkm 929 (21 juli)





A.31 Rkm 930 (21 juli)





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

Deltares

www.deltares.nl