

Advies modellering oevertaanpassingen

Toepassing haven De Steeg



Advies modellering oeveeraanpassingen
Toepassing haven De Steeg

Auteur(s)

Anke Becker
Ton Visser

Partners

Rijkswaterstaat Oost Nederland, ARNHEM
Dénes Beyer
Michiel Reneerkens

Advies modellering oeveraanpassingen

Toepassing haven De Steeg

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Dénes Beyer, Michiel Reneerkens
Referenties	
Trefwoorden	Rijntakken, D-HYDRO, detailmodel

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	20-08-2024
Projectnummer	11210364-016
Document ID	11210364-016-ZWS-0001
Pagina's	74
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Anke Becker Ton Visser	

Samenvatting

Steeds vaker krijgt RWS-ON aanvragen voor het rivierkundig beoordelen van oeveraanpassingen in relatie tot nautische en / of ecologische verbeteringen en ontwerpen: denk aan stroomgeleidingswerken en kribaanpassingen, al dan niet gecombineerd met de aanleg van insteekhavens. Er is behoefte om dergelijke ingrepen beter te kunnen doorrekenen, enerzijds voor de morfologische effectbepaling, anderzijds ten behoeve van het uitvoeren van scheepssimulaties. Voor deze laatste is voldoende detail nodig van bijvoorbeeld neren in de haven(monding) en kan een kleine verplaatsing van bijvoorbeeld geleidewerken grote effecten hebben.

Het doorrekenen van de invloed van dit soort ingrepen kan tot op zekere hoogte met de software D-HYDRO gebeuren, echter is het huidige modelinstrumentarium (6^e generatie modellen) daarvoor nog niet geschikt, omdat de stromingspatronen in de havenmond met de huidige resolutie niet worden weergegeven door het model. Ook is vaak een optimalisatie van het ontwerp gewenst, met variaties die te klein zijn voor de huidige resolutie.

In dit rapport wordt een advies (stappenplan) gegeven hoe, op basis van bestaande 6^e generatie modellen in D-HYDRO, verfijnde detailmodellen afgeleid kunnen worden die bruikbaar zijn voor het beantwoorden van bovenstaande vraag. Dit advies kan uiteindelijk weer input zijn voor een discussie binnen RWS of dit een standaardmethode kan worden voor vragen over bijvoorbeeld haveningangen.

Het advies wordt onderbouwd door een eerste toepassing voor een haven bij De Steeg langs de IJssel. Daaruit blijkt dat de neren in de haven en de invloed van de haven op de stroming in het zomerbed voldoende goed kunnen worden berekend met een verfijnd detailmodel in D-HYDRO. Daarvoor is wel enige afregeling nodig, in de toepassing bij De Steeg bijvoorbeeld door het aanpassen van de wervelviscositeit. Voor de afregeling zijn observaties (bij voorkeur metingen) van het stroombeeld in de actuele situatie nodig.

Berekeningen met verschillende roosterresoluties en verschillende ontwerpvarianten tonen aan dat het verfijnde detailmodel stabiele resultaten levert en gebruikt kan worden voor de optimalisatie van het ontwerp. Wel worden er, afhankelijk van de gebruikte wervelviscositeit, duidelijk verschillende stroombeelden berekend voor verschillende roostertypes in het verfijnde deel (curvilineair of driehoeken). Er wordt aanbevolen dit nader te onderzoeken. Op basis van de resultaten voor de haven bij De Steeg gaat de voorkeur op dit moment uit naar een driehoeksrooster in het verfijnde deel.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Achtergrond	7
1.2	Doel	7
1.3	Afbakening	7
1.4	Leeswijzer	8
2	Eisen aan de modellering	9
2.1	Relevante processen	9
2.2	Modelgebied	9
2.3	Roosterresolutie en -uitlijning	9
2.4	Aantal dimensies	11
2.5	Subgrid features	11
2.6	Overige modelinstellingen	13
2.7	Inpassen verfijnd modelgebied in 6 ^e generatie (deel)model	13
3	Toepassing De Steeg	15
3.1	Huidige situatie en geplande maatregel	15
3.2	Vraagstelling	16
3.3	Data voor modelkalibratie	16
3.4	Keuze 6 ^e generatie basisschematisatie en berekeningen	17
3.4.1	Schematisatie	17
3.4.2	Standardsommen	17
3.5	Definitie modelgebied	17
3.6	Keuze aantal dimensies	20
3.7	Roosterverfijning	20
3.7.1	Gebied	20
3.7.2	Resolutie	20
3.7.3	Type rooster	20
3.7.4	Uitlijning	20
3.7.5	Inpassen verfijnd rooster in 20 m rooster deelmodel IJssel	21
3.8	Analyse noodzaak aanpassing Baseline-referentie in interessegebied	22
3.8.1	Invloed overlaten	22
3.8.2	Invloed brugpijlers	25
3.8.3	Invloed ruwheid van de haven	28
3.8.4	Beslissing Baseline-referentie	28
3.9	Open randen en randvoorwaarden	28
3.9.1	Ligging open randen	28

3.9.2	Afleiden randvoorwaarden	28
3.10	Analyse invloed modelparameters	29
3.11	Kalibratie verfijnd detailmodel	30
3.11.1	Stroombeeld	30
3.11.2	Stroomsnelheden langs raaien	32
3.11.3	Waterstand en verhang	36
3.11.4	Keuze modelinstellingen	37
3.12	Schematisatie van de maatregel	37
3.13	Invloed van de maatregel	38
3.13.1	Verandering van het stroombeeld	38
3.13.2	Verandering van de waterstanden	46
3.13.3	Invloed van een kleine aanpassing aan het ontwerp van de maatregel	47
4	Stappenplan voor toepassingen	52
5	Literatuur	55
A	Validatie stroomsnelheden langs raaien	56
A.1	Langsraaien in het zomerbed	56
A.1.1	Berekening S_3000 vs. meting april 2024	56
A.1.2	Berekening S_6000 vs. meting juni 2024	59
A.2	Dwarsraaien in de haveningang	62
A.2.1	Berekening S_3000 vs. meting april 2024	62
A.2.2	Berekening S_6000 vs. meting juni 2024	64
B	Validatie waterstand en verhang	66
B.1	S_3000	66
B.2	S_4000	67
B.3	S_6000	68
C	Vergelijking curvilineair en driehoeksrooster	69
C.1	Wervelviscositeit vicouv = 0,4 m ² /s	69
C.2	Wervelviscositeit vicouv = 0,1 m ² /s	70
D	Opbouw referentieschematisaties	72

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Steeds vaker krijgt RWS-ON aanvragen voor het rivierkundig beoordelen van oeveraanpassingen in relatie tot nautische en / of ecologische verbeteringen en ontwerpen: denk aan stroomgeleidingswerken en kribaanpassingen, al dan niet gecombineerd met de aanleg van insteekhavens.

De behoefte om dergelijke ingrepen beter te kunnen doorrekenen zit enerzijds in de rivierkundige (morfologische) effectbepaling. Deze kan in veel gevallen goed plaatsvinden in D-FAST MI, maar de uitkomsten zijn logischerwijs sterk gekoppeld aan en gevoelig voor de hydraulische resultaten. Anderzijds is er behoefte aan voldoende gedetailleerde stroomsnelheden ten behoeve van het uitvoeren van scheepssimulaties; hiervoor is voldoende detail nodig van bijvoorbeeld neren in de haven(monding). Voor deze laatste toepassing kan een kleine verplaatsing van bv. geleidewerken grote effecten hebben.

Het doorrekenen van de invloed van dit soort ingrepen kan tot op zekere hoogte met de software D-HYDRO gebeuren, echter is het huidige modelinstrumentarium (6^e generatie modellen) daarvoor nog niet geschikt, bijvoorbeeld vanwege een te grof en niet voldoende uitgelijnd rooster. Ook kan, afhankelijk van de vraag die met een model beantwoord moet worden, een overstap naar een 3D-berekening nodig zijn.

1.2 Doel

In dit rapport wordt een advies gegeven hoe, op basis van bestaande 6^e generatie modellen in D-HYDRO, verfijnde detailmodellen afgeleid kunnen worden die bruikbaar zijn voor het beantwoorden van bovenstaande vraag. Dit advies kan uiteindelijk weer input zijn voor een discussie binnen RWS of dit een standaardmethode kan worden voor vragen over bijvoorbeeld haveningangen. Het advies wordt onderbouwd door een eerste toepassing voor een haven bij De Steeg langs de IJssel.

1.3 Afbakening

Naast voorliggend advies heeft Deltares een advies opgesteld hoe lokale roosteraanpassingen toegestaan kunnen worden om effectbepaling in een vergunningverleningstraject te verbeteren (Kosters, 2023). Dat advies gaat nadrukkelijk niet over roosterverfijning, maar aanpassing in de zin van betere uitlijning met bijvoorbeeld geulen in de uiterwaard. Voor de beoordeling van met name de invloed van een oeveraanpassing op de stroming in een havenmond is op voorhand duidelijk dat ook een behoorlijke verfijning van het rooster noodzakelijk is, omdat de stromingspatronen in de havenmond met de huidige resolutie niet worden weergegeven door het model. Ook is vaak een optimalisatie van het ontwerp gewenst, met variaties die te klein zijn voor de huidige resolutie (ongeveer 20 m in de lengte en 5-10 m in de breedte van het zomerbed). De consequenties van een dergelijke verfijning worden in voorliggend rapport behandeld.

De berekende stromingspatronen in de rivier en de haven zijn bedoeld voor studies over de manoeuvreerbaarheid van schepen. Ook zijn de 2D-berekeningen een voldoende goede basis om de morfologische effecten op zowel zomerbed als het havenbekken in te kunnen schatten (met de nodige onzekerheid uiteraard).

De 2D-berekeningen leveren echter geen inzicht over detailstromingen rondom constructies zoals oevers en damwanden, daarvoor zouden 3D CFD-berekeningen nodig zijn. Ze kunnen daarom niet worden gebruikt om het risico op ontgrondingskuilen rondom de constructies in te schatten.

Voorliggend advies wordt gegeven voor toepassingen in de Bovenrivieren, met als uitgangspunt dat getij of dichtheidsstromen vanwege sterke gradiënten in zoutgehalte of temperatuur geen rol spelen.

1.4 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft de relevante processen voor bovenstaande vraag en laat zien welke eisen aan de modellering daaruit voortvloeien (roosterresolutie, schematisatie, modelinstellingen). Daarbij wordt met name gekeken naar eisen die afwijken van de eisen voor de bestaande grootschalige 6^e generatie modellen. Ook geeft hoofdstuk 2 aan hoe de roosterverfijning en overige aanpassingen ingepast kunnen worden in een bestaand 6^e generatie model.

Op dit moment ligt er al een concrete vraag voor een eerste toepassing. Deze gaat over de optimalisatie van de haveningang bij De Steeg aan de IJssel (Figuur 1), met als primaire doel om aanzanding in het zomerbed te beperken. Hiervoor moet de invloed van oeveraanpassingen op zowel de morfologie in het zomerbed als de stroming in de havenmond zelf worden beoordeeld. Hoofdstuk 3 beschrijft de bouw en kalibratie van een verfijnd detailmodel voor deze toepassing.

Hoofdstuk 4 vat de inzichten uit voorgaande hoofdstukken samen in een stappenplan voor toekomstige toepassingen.



Figuur 1 Haveningang bij De Steeg aan de IJssel.

2 Eisen aan de modellering

2.1 Relevante processen

Het verschil in stroomsnelheid tussen rivier en havenmond veroorzaakt een menglaag in de mond van de haven, die een of meerdere ronddraaiende stromingen in de haven aandrijft. Het nerenpatroon in de haven is afhankelijk van de configuratie van de haven. Vanwege de grote waterdiepte en de ten opzichte van de waterdiepte beperkte variatie in diepte in de haveningang is de verwachting dat de hoofdstroming en neren in de haven horizontaal zijn, ook als damwanden of kribben overstromen.

2.2 Modelgebied

Het modelgebied moet groter zijn dan het interessegebied, om te waarborgen dat randeffecten alleen buiten het interessegebied optreden. Daarvoor moeten de boven- en benedenrand van het model minimaal enkele kilometers van het interessegebied verwijderd liggen. Hoe ver hangt af van de geometrie van de rivier en de afvoeren die doorgerekend moeten worden. Als de stroming in de berekeningen binnen de hoofdgeul blijft kan met een kortere afstand worden volstaan dan bij een hoge afvoer met een complex stromingspatroon door brede uiterwaarden. In het eerste geval zou 1-2 km voldoende moeten zijn, in het tweede geval is orde 5-10 km nodig.

Daarnaast wordt aanbevolen om de open randen op gunstige locaties te leggen. Op deze locaties loopt de stroming zo veel mogelijk loodrecht over de rand en lopen de stroombanen liefst parallel aan elkaar, ook in de uiterwaard. Complexe patronen zoals neren kunnen namelijk niet worden gerepresenteerd in de randvoorwaarde.

2.3 Roosterresolutie en -uitlijning

De roosterresolutie wordt bepaald door twee overwegingen:

- 1) De stroming in de haven en de hoofdgeul, en de uitwisseling tussen de twee, moet voldoende nauwkeurig berekend kunnen worden.
- 2) Het rooster moet voldoende mogelijkheid bieden om (kleinere) variaties in het ontwerp van de haveningang te kunnen testen.

De verwachting is dat de stroming in de hoofdgeul met het huidige rooster al voldoende goed wordt weergegeven om de hydrodynamica en de morfologische ontwikkeling van het zomerbed te kunnen berekenen. Voor de uitwisseling met een haven en de detailstroming in de haven is het rooster echter veel te grof.

De ervaring met dit soort vraagstukken in het nieuwe D-HYDRO model is nog beperkt. Naar schatting zouden 10 cellen over de breedte en lengte van een verwachte neer voldoende resolutie moeten bieden. Bij een haveningang van de orde grootte van De Steeg zou dat een resolutie van orde 5 m x 5 m betekenen, oftewel een verfijning met een factor 4 in langsricting ten opzichte van het huidige deelmodelrooster met cellen van ongeveer 20 m x 5 m op de IJssel.

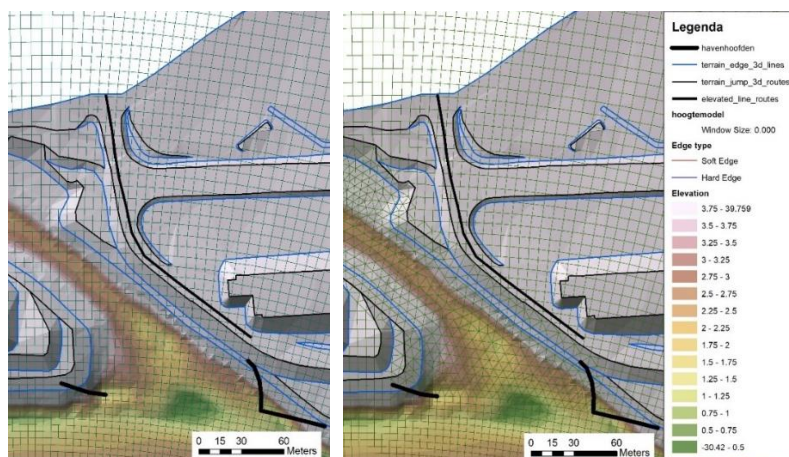
Wel resulteert een resolutie van 5 m x 5 m nog in behoorlijke kartelranden langs de oever wanneer deze niet is uitgelijnd met het rooster, en is de resolutie nog wat aan de lage kant om taluds in detail weer te geven (Figuur 2, links).

Om dit te verbeteren kan de resolutie verder worden verhoogd, bij De Steeg bijvoorbeeld met een factor 2 in dwarsrichting en 8 in langsrichting, wat resulteert in cellen van orde 2,5 m. Of men vult de haven op met driehoekscellen. Dat laatste maakt een betere uitlijning van het rooster met taludranden en de nieuwe havenhoofden mogelijk (Figuur 2, rechts). Wel worden de roostereigenschappen bij de aansluiting van het gebied met driehoeken aan het gebied met vierkante cellen iets minder goed dan in het puur curvilineaire rooster, maar waarden van maximaal 0,10 zijn realiseerbaar (Figuur 3) en lokaal acceptabel.

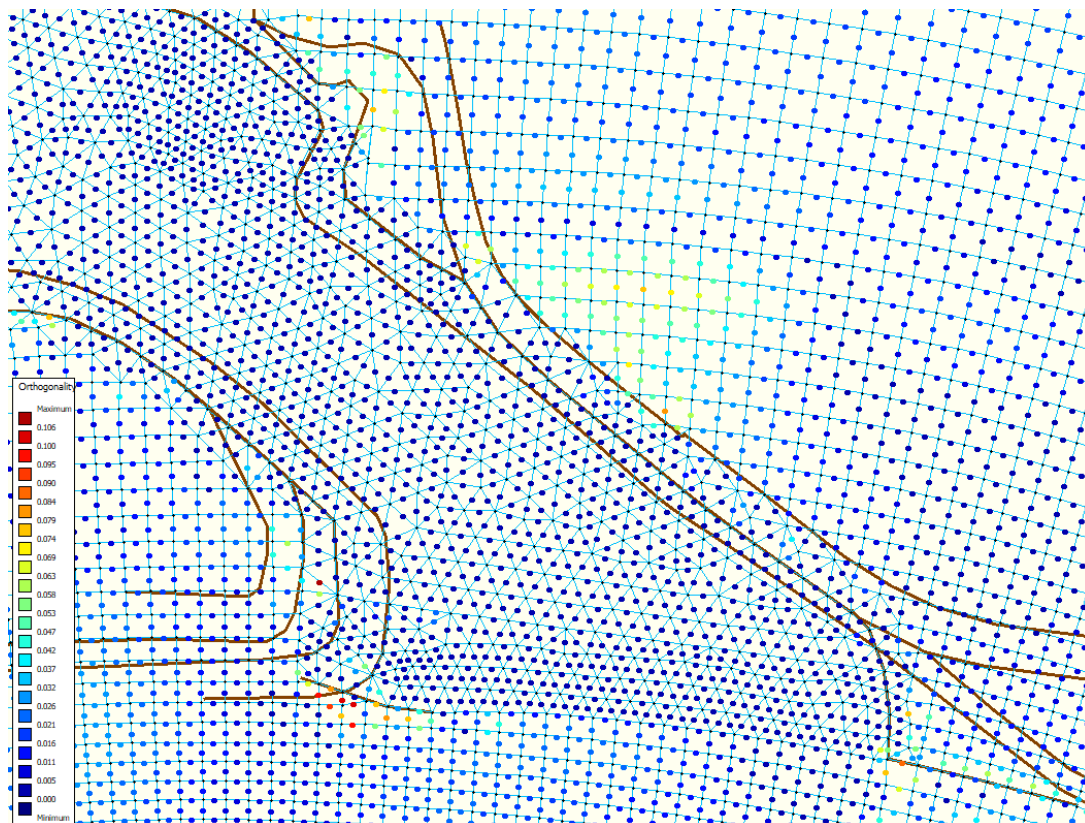
De hierboven beschreven roosterresolutie biedt de mogelijkheid om een verschuiving van havenhoofden of damwand-/oeverlijnen van ongeveer 3-5 m door te voeren. Dit is voldoende om een indruk van het hydrodynamische effect van een verschuiving te geven. Daarnaast is het gewenste detailniveau van de stroming voor de scheepssimulaties van belang. Een resolutie van 5 m lijkt voldoende bij scheepslengtes van rond 80 m. Uit de toepassing bij De Steeg is echter gebleken dat de voor de scheepvaart relevante overgang van hoge stroomsnelheden in de hoofdgeul naar lage snelheden in de neer door te weinig cellen wordt weergegeven (Becker, 2024). In dat geval is een hogere resolutie dan 5 m nodig; voor De Steeg is uiteindelijk gekozen voor 2,5 m (kantlengte zowel in de experimenten met vierkant als met driehoeksrooster).

Naar verwachting wordt de tijdstap-beperking van beide oplossingen, curvilineair en driehoeken, vergelijkbaar. Beide oplossingen gebruiken immers hetzelfde rooster in de hoofdgeul, waar de grootste stroomsnelheden optreden. De toepassing bij De Steeg heeft dit bevestigd. Bovendien bleken de rekentijden geen beperkende factor voor het onderzoek, omdat het model maar een kort traject van de rivier bevat.

Een rooster van driehoekscellen kan optimaal worden uitgelijnd aan de geplande constructies in een haveningang. Ook bij gebruik van een curvilineair rooster wordt aanbevolen om waar mogelijk uitlijning door te voeren langs lijnen die de geometrie en het volume van de haven(ingang) bepalen. De breedte van de haveningang (bij De Steeg de afstand tussen de twee nieuwe havenhoofden) is daarbij bijzonder belangrijk, omdat deze de uitwisseling tussen haven en zomerbed bepaalt.



Figuur 2 Links: curvilineair rooster, verfijnd naar 5 m x 5 m; rechts: verfijnd curvilineair rooster, haven opgevuld met driehoekscellen. N.B.: Het puur curvilineaire rooster kan voor toepassing in de studie over De Steeg nog beter worden uitgelijnd met belangrijke constructies zoals de nieuwe damwand en oeverlijn. Dit zal lokaal voor enige achteruitgang van de orthogonaliteit zorgen, maar het resultaat is naar verwachting nog steeds acceptabel.



Figuur 3 Orthogonaliteit van het 5 m x 5 m rooster opgevuld met driehoeken.

2.4 Aantal dimensies

De verwachting is dat voor de beoogde toepassing een 2D-model over het algemeen voldoet om de dieptegemiddelde stroming te bepalen, omdat het belangrijkste stromingspatroon in de haven een horizontale neer zal zijn. Dit vanwege de beperkte variatie in diepte ten opzichte van de waterdiepte. In labproeven voor het onderzoeken van de stroming in kribvakken is dit ook geobserveerd. Het stroombeeld in de kribvakken bleef ook bij volledig overstroomde kribben voornamelijk uit grootschalige horizontale neren bestaan (Van Schijndel, 1999).

In sommige situaties kan het interessant zijn om ook te testen hoe belangrijk 3D-stromingspatronen zijn, bijvoorbeeld in het geval van scherpe bochten. In dat geval kan in eerste instantie een testberekening worden opgezet waarin orde 10 verticale lagen worden toegevoegd (sigma lagen). Als hieruit een belangrijke verandering in het stromingspatroon en een belangrijke bijdrage van verticale stroming volgt, is het zinvol om het 3D-model beter uit te werken.

2.5 Subgrid features

De bestaande D-HYDRO-modellen van de Rijntakken zijn overzichtsmodellen, waarin de invloed van lijnelementen zoals kribben en kades wordt meegenomen door middel van een “subgrid” aanpak, waarbij lijnelementen als overlaat (“fixed weir”) gemodelleerd worden. Deze aanpak is geldig als de maaswijdte van het rooster minstens 20x de kruinhoogte van de overlaat bedraagt (Van Kester & Uittenbogaard, 2003). Bij een roosterresolutie van enkele meters (paragraaf 2.3) is deze benadering dus niet meer geldig.

In D-HYDRO is het echter ook mogelijk om constructies zoals kribben in de bodem te schematiseren in plaats van met een overlaat.

Er is namelijk een numeriek schema geïmplementeerd dat beter geschikt is voor stromingen met lokale discontinuïteiten zoals bodemsprongen dan het schema in WAQUA/Simona. Dit komt omdat in het nieuwe schema het principe van het behoud van energiehoogte wordt vervangen door het behoud van impuls in situaties met een divergerende stroming. Er is niet onderzocht hoeveel cellen over de breedte van een overlaat nodig zijn om nauwkeurige resultaten voor de afvoer over de overlaat te verkrijgen. Resultaten van Van Kester & Uittenbogaard (2003) tonen echter aan dat in de toen nieuwste versie van dit schema bij een recht aangestroomde overlaat in roosterrichting ("rechte" overlaat in tegenstelling tot "diagonale" overlaat) al met één enkele cel over de breedte goede resultaten worden behaald.

Daarnaast zijn in de beoogde modellen met name stromingspatronen en snelheden in de havenmond en het zomerbed relevant, en niet zozeer de waterstanden of de stroming in de buurt van kribben en kades. Om deze redenen lijkt het bij een roosterresolutie van orde 2,5 m mogelijk om constructies voldoende nauwkeurig te schematiseren in de bodem in plaats van als subgrid-overlaat. We bevelen aan om te testen hoeveel invloed dit op de berekende stroming heeft om te kijken of dit inderdaad noodzakelijk is. Bij dunne en nagenoeg verticale¹ constructies zoals damwanden is het rooster alsnog niet fijn genoeg om deze in de bodem mee te nemen en moet wel gebruik gemaakt worden van subgrid overlaten. Ook kan, als het rooster niet goed uitgelijnd kan worden met de kruin van een kade of krib, bovenop de schematisatie in de bodem een overlaat toegevoegd worden om te kerende hoogte te garanderen.

In het geval er brugpijlers aanwezig zijn kunnen deze, als ze groot genoeg zijn, bij bovengenoemde roosterresolutie gemodelleerd worden als droge cellen of als overlaten in plaats van op de subgrid manier die in de huidige modellen staat. Kleinere pijlers blijven in het model als subgrid pijlers.

Ook het effect van turbulente processen wordt in de 6^e generatie modelschematisaties (deels) opgelost op een subgrid niveau. Dit is nodig omdat de tijdstap te groot en het rooster te grof is om alle turbulente bewegingen te kunnen vatten. In voorliggend advies wordt aanbevolen om het rooster (en daarmee ook de tijdstap) voor de analyse van veranderingen aan oevers en haveningangen sterk te verfijnen (paragraaf 2.3). Daarom moeten ook de keuzes voor turbulentie opnieuw worden bekeken. In de 6^e generatie modelschematisaties is gekozen voor het Smagorinsky-model. Hiermee is het mogelijk om automatisch om te gaan met verschillen in celgrootte en stroomsnelheden. Bij het bepalen van de invoer voor dat model (de C_s -waarde en een constante achtergrondviscositeit) is tot nu toe echter nog niet gekeken naar de invloed op de weergave van neren. Voor voorliggende vraag is dat wel relevant. Daarom wordt aanbevolen bij de eerste toepassing(en) de gevoeligheid van het verfijnde model voor de waardes van deze parameters te analyseren. Daarbij moet met name gekeken worden of er neren vormen in het model, en of deze plausibel zijn. Er wordt daarom aanbevolen de gevoeligheid voor de huidige toestand te testen, dus vóór aanpassing in de havenmond, en de resultaten te vergelijken met het geobserveerde stroombeeld. Voor dit laatste zijn niet per se gedetailleerde stroomsnelheidsmetingen nodig (ook al zou dat optimaal zijn), observaties van de kant en de kennis van de havenmeester en schippers kunnen ook al veel informatie leveren.

N.B.: In de deelmodellen van de 6^e generatie (20 m rooster) is ten opzichte van de modellen van de gehele Rijntakken met 40 m rooster de achtergrondwaarde van de horizontale wervelviscositeit ("eddy viscosity") verhoogd van 0,1 naar 0,4. Daarmee zijn de fluctuaties in berekende waterstand in het 20m-model verminderd en is de waterstand verhoogd, die met het 20m-model structureel lager uitkwam dan met het 40m-model.

¹ zonder of met heel steil talud

Een dusdanig grote verhoging is echter niet wat je zou verwachten, eigenlijk zou je zelfs een verkleining verwachten omdat een groter deel van de wervels wordt meegenomen in het model. Het Smagorinsky-model zou de overgang naar een fijner rooster vanzelf moeten opvangen, zonder aanpassing van de achtergrondviscositeit. Dit onderstreept dat er nog niet voldoende ervaring is opgebouwd met de werking van dit turbulentiemodel.

2.6 Overige modelinstellingen

Eerdere studies door Deltares/het WL hebben uitgewezen dat er soms geen neervorming optreedt als er in een model geen rekening wordt gehouden met wandwrijving (bijvoorbeeld Yossef, 2005, en Platzek & Patzwahl, 2015). Dit staat ook benoemd in de functionele specificaties van de 6^e generatie modellen (Minns et al., 2022).

In de 6^e generatie modellen is de wandruwheid alsnog niet meegenomen, omdat de invloed hiervan op de grootschalige stroming naar verwachting beperkt is. Toch is in deze modellen wel neervorming te zien in bijvoorbeeld aansluitingen van kanalen en zelfs in grotere kribvakken. Voordat deze modellen gebruikt kunnen worden voor detailstromingen in havens of bij oevers (bijvoorbeeld kribvakken) moet dus nog geanalyseerd worden of (en zo ja, welke) wandruwheid opgelegd moet worden (met optie “partial slip”), of dat de huidige aanpak zonder wandruwheid voldoende is.

Zoals in bovenstaande paragraaf al benoemd is het vanwege de roosterverfijning mogelijk nodig om de instellingen voor de wervelviscositeit te veranderen (achtergrondviscositeit en Smagorinsky-factor). Overige numerieke instellingen van de 6^e generatie modellen hoeven niet te worden aangepast. De invloed van de wandruwheid en de achtergrondviscositeit worden voor de toepassing voor de Steegse haven onderzocht in paragraaf 3.10.

In de huidige Rijntakkenmodellen zijn havens in Baseline als “plas” gedefinieerd en daarmee vrij glad, waardoor er mogelijk een scherpe overgang in ruwheid tussen zomerbed en haven ontstaat. Er moet onderzocht worden in hoeverre dat de stroming in de haven en de uitwisseling met het zomerbed beïnvloedt. Zo nodig moet de haven die onderzocht wordt een andere ruwheid toegewezen krijgen. Dit wordt voor de toepassing voor de Steegse haven getest in paragraaf 3.8.3.

2.7 Inpassen verfijnd modelgebied in 6^e generatie (deel)model

Het nieuwe verfijnde model wordt een uitsnede van een volledig model of deelmodel van de Rijntakken, 6^e generatie, van ongeveer 5-20 km lengte met aparte modelranden. Het rooster van dit model moet binnen het interessegebied sterk worden verfijnd. Om de rekentijd te beperken wordt aanbevolen om buiten het interessegebied de grovere resolutie van het volledige model (40m-rooster) of het deelmodel (20m-rooster) aan te houden. De voorkeur van RWS gaat in principe uit naar gebruik van het deelmodel als uitgangspunt, omdat dit standaard wordt gebruikt in het proces van vergunningverlening. In specifieke gevallen kan echter ook het totaalmodel de basis zijn, vooral als de actuele situatie gemodelleerd moet worden voor bijvoorbeeld modelkalibratie. De deelmodellen zijn immers gebaseerd op het beno-model.

Voor de overgang van de resolutie van het (deel)model naar de hoge resolutie in het interessegebied is een transitiezone nodig waarin de resolutie geleidelijk wordt aangepast. In langsrichting is een geleidelijke verfijning richting het interessegebied makkelijk te realiseren door de lengte van de roostercellen geleidelijk te verkorten. Dwars op de rivier moeten driehoekscellen worden gebruikt op de overgang van een grovere naar een fijnere resolutie. Op die manier is een verfijning met een factor 2 per dwarsraai mogelijk.

De verfijning moet dus waarschijnlijk in meerdere stappen plaatsvinden. Op een vergelijkbare manier kan de verfijning in langsricting maar over een deel van de breedte worden aangebracht.

Ondertussen is dit getest voor de haveningang bij De Steeg. Voorbeelden van de hiervoor gebruikte roosters zijn te zien in Becker (2024) en in Figuur 12. De ervaring daarbij was dat geleidelijke verfijning in langsricting de aansluiting in dwarsricting moeilijker maakt en voor het behalen van goede rekenresultaten niet nodig is. Beter werkt het om harde transities in resolutie van een factor 2 te gebruiken.

Als verdere verkorting van de rekentijd nodig is, is het een optie om gebieden buiten de zomerkades van het model af te knippen, mits er alleen met afvoeren wordt gerekend waarbij de zomerkades nog niet overstromen. Daarbij moet wel worden opgelet met aangetakte plassen. Deze staan ook al bij lage afvoeren in verbinding met de rivier en het kan dus nodig zijn deze binnen het modelgebied te houden. Dit is bijvoorbeeld het geval als de plassen meestromen.

De boven beschreven vraagstelling kan worden beantwoord door enkele berekeningen voor een bandbreedte aan relevante afvoeren uit te voeren. Daarbij kan worden volstaan met stationaire berekeningen. Als randvoorwaarden worden op de bovenrand van het verfijnde detailmodel een afvoer opgelegd en op de benedenrand een waterstand. Deze randvoorwaarden kunnen worden afgeleid uit bijpassende berekeningen met het model dat als basis is gebruikt (20m- of 40m-model).

In het verfijnde deel van het modelgebied moet mogelijk de Baseline-schematisatie worden aangepast zoals beschreven in paragraaf 2.5. Dit kan de berekende waterstanden beïnvloeden en moet daarom getoetst worden in een kalibratiestap, waarin de waterstanden en het verhang langs het hele modelgebied vergeleken worden met de resultaten van het 40m- of 20m-model, dat hierop gekalibreerd/gevalideerd is. Bij een groot verschil kan ook de zomerbedruwheid worden gebruikt voor verdere afregeling.

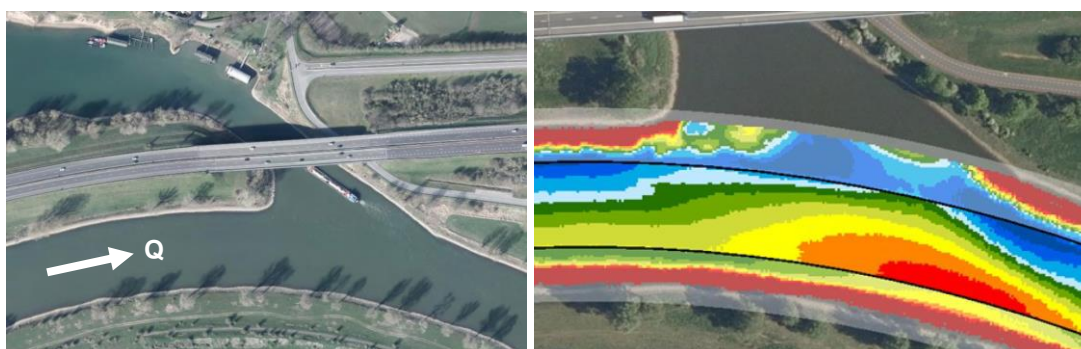
Voor de modellering van de stroming in de havenmond in detail zijn mogelijk andere instellingen voor de wandruwheid en de horizontale wervelviscositeit ("eddy viscosity") nodig, zie paragrafen 2.5 en 2.6. Deze moeten mogelijk dus in het hele detailmodel worden aangepast. Bij de eerste toepassing(en) moeten gevoeligheidsanalyses worden uitgevoerd, om ervaring met de invloed van zowel de wandruwheid als de Smagorinsky-parameter C_s en de achtergrondviscositeit op de neervorming en waterstanden te verkrijgen. Zodra men hiermee voldoende ervaring heeft opgebouwd kan een keuze worden gemaakt voor de te gebruiken waardes. In de toepassing volstaat dan een validatiestap: Lijken de neren in de huidige situatie voldoende op observaties, en wijken de waterstanden niet te sterk af van het 40m/20m-model? De keuzes voor wervelviscositeit en wandruwheid hebben immers ook een invloed op de berekende waterstanden. De kalibratie moet dan ook mogelijk in meerdere iteraties worden uitgevoerd.

De verwachting is dat de wandruwheid met name relevant is voor de neervorming in de havenmond, maar in het gebied met 40m/20m-rooster weinig invloed heeft. Ook de horizontale wervelviscositeit is met name belangrijk voor het reproduceren van de neervorming in de havenmond. De invloed in de rest van het modelgebied moet blijken uit de gevoeligheidsanalyse. Voor de toepassing bij De Steeg is gebleken dat de wandruwheid weinig invloed op de berekende waterstanden of het stroombeeld heeft, en dat de waterstanden het beste worden berekend als de achtergrondviscositeit van het 40m-model wordt gebruikt (Becker, 2024). Er wordt aanbevolen dit bij een volgende toepassing opnieuw te testen om meer ervaring met de werking van deze parameters op te doen.

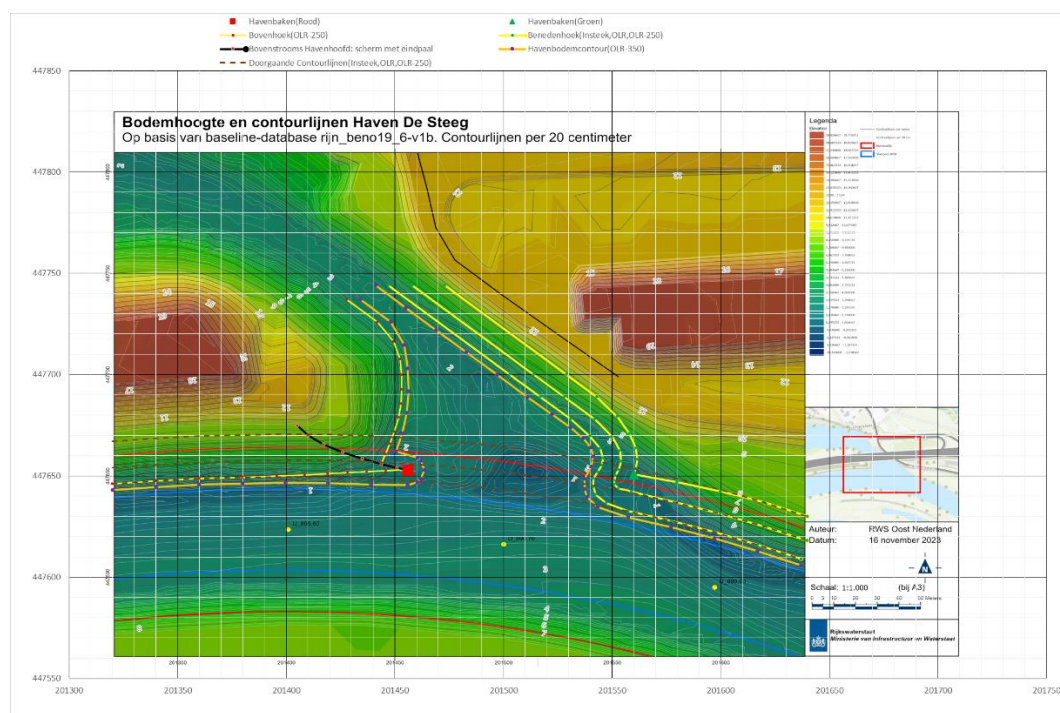
3 Toepassing De Steeg

3.1 Huidige situatie en geplande maatregel

Figuur 4 (links) toont de haveningang bij De Steeg. Deze heeft op dit moment een trompetvorm, wat leidt tot verbreding van de stroming in de hoofdgeul en daardoor tot aanzanding aan de tegenoverliggende kant van de IJssel, ook in de vaargeul (Figuur 4, rechts). Daarom is gepland om de haveningang smaller te maken door aan de bovenstroomse kant een damwand te plaatsen en aan de benedenstroomse kant de haven meer recht op de IJssel aan te sluiten (zie schets in Figuur 5), waardoor de stroming meer richting het zomerbed gestuurd moet worden. De breedte van de ingang moet daardoor versmald worden naar ongeveer 100 m. De damwand en de bovenkant van het talud aan de benedenstroomse kant van de haven liggen in het huidige ontwerp op 8,50 m+NAP.



Figuur 4 Luchtfoto haveningang bij De Steeg (links). Diepte t.o.v. vaardieptecriterium (OLR-2,50 m) (rechts). Blauw: >1 m; groen: >0 m; geel: <0 m; rood: <-0,5 m.



Figuur 5 Ontwerp aanpassing haven De Steeg (ontwerp 1 – “havenpaal”). Bron: RWS.

3.2 Vraagstelling

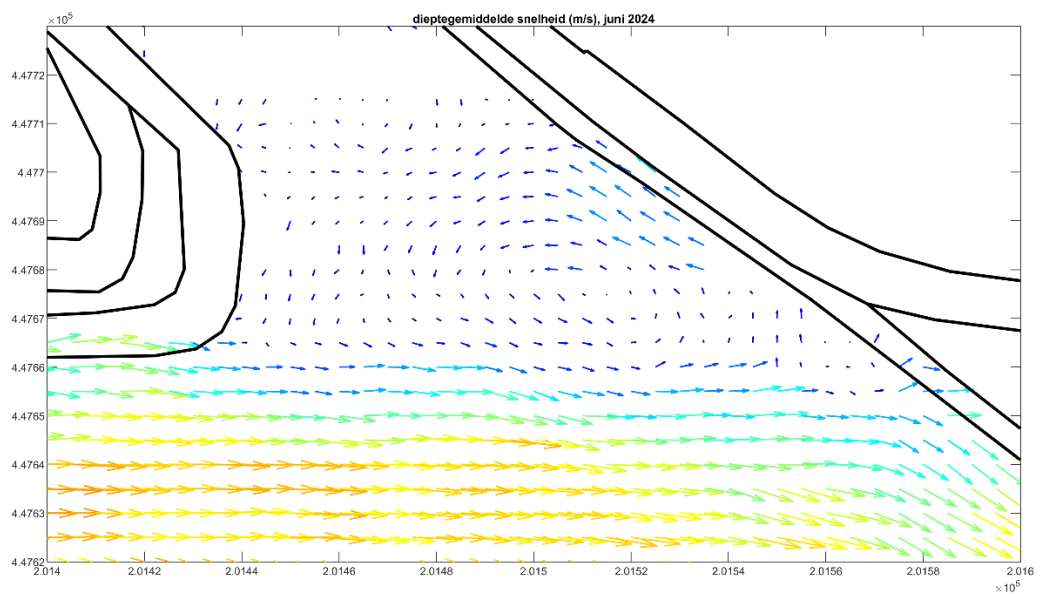
Het verfijnde model moet geschikt zijn om de invloed van de maatregel op de morfologie van het zomerbed en op de stroming (voor scheepvaart) te berekenen. Voor schepen gaat het daarbij vooral om de positie van de overgang tussen stromende rivier (ca. 1 m/s langsstroom) en de neer in de monding (ca. 0,3 m/s tegen de wijzers van de klok in).

3.3 Data voor modelkalibratie

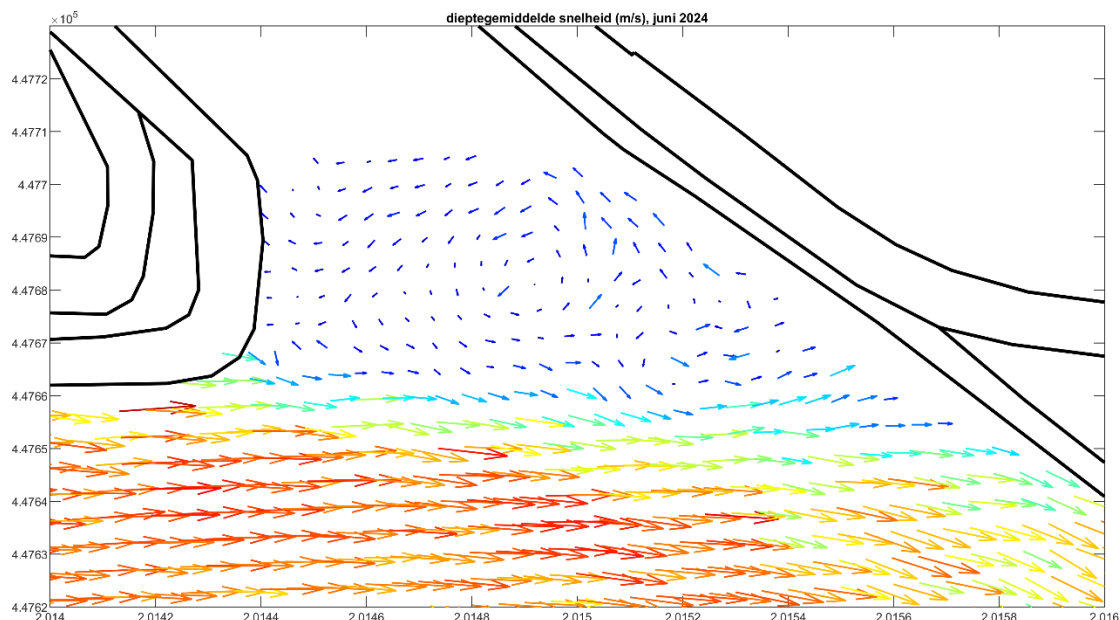
Om het model voor deze eerste toepassing te kunnen kalibreren zijn er twee keer ADCP-stromingsmetingen uitgevoerd in en rondom de haven, waarbij bovenstrooms van de Steegse haven ook de afvoer van de IJssel is bepaald:

- 4 april 2024, bij een afvoer van 452 m³/s op de IJssel (Figuur 6)
- 7 juni 2024, bij een afvoer van 755-758 m³/s op de IJssel (Figuur 7).

Deze afvoeren liggen in de buurt van de IJssel-afvoeren in de standaardberekeningen S_3000 (416 m³/s op de IJssel) en S_6000 (837 m³/s).



Figuur 6 Gemeten stroomsnelheden (dieptegemiddeld) in de haven bij De Steeg en op de IJssel, 4 april 2024. De zwarte lijnen zijn breuklijnen en hoogteverschillijnen uit de Baseline-schematisatie.



Figuur 7 Gemeten stroomsnelheden (dieptegemiddeld) in de haven bij De Steeg en op de IJssel, 7 juni 2024. De zwarte lijnen zijn breuklijnen en hoogteverschillijnen uit de Baseline-schematisatie.

3.4 Keuze 6^e generatie basisschematisatie en berekeningen

3.4.1 Schematisatie

In principe is het handig om een schematisatie te gebruiken die past bij de situatie waarvoor observaties van het stroombeeld beschikbaar zijn voor de kalibratie van het model. Voor de toepassing bij De Steeg is besloten om aan te sluiten bij de projectschematisatie *rkp_ref_incl_nr* (een variatie op beno19_6, deelmodel IJssel met 20m-rooster, zie bijlage D), om het aantal voor dit project gebruikte schematisaties te beperken. De projectschematisatie is naar verwachting in de buurt van De Steeg voldoende representatief voor de actuele situatie, waarvoor de ADCP-metingen beschikbaar zijn.

3.4.2 Standaardsommen

Voor de kalibratie van het model en voor de beoordeling van de invloed van de havenaanpassing worden drie standaardberekeningen uitgevoerd:

- S_3000
- S_4000
- S_6000

Bij de laagste zijn de nieuwe havenhoofden en de kribben benedenstrooms nog niet overstroomd, bij de andere twee naar verwachting wel. Dit zijn tevens vaak voorkomende afvoeren en daarmee relevant voor de morfologie. Voor de verdere uitwerking van de maatregel door een ingenieursbureau zijn tevens randvoorwaarden aangemaakt voor de standaardsommen S_1300 en S_8000.

3.5 Definitie modelgebied

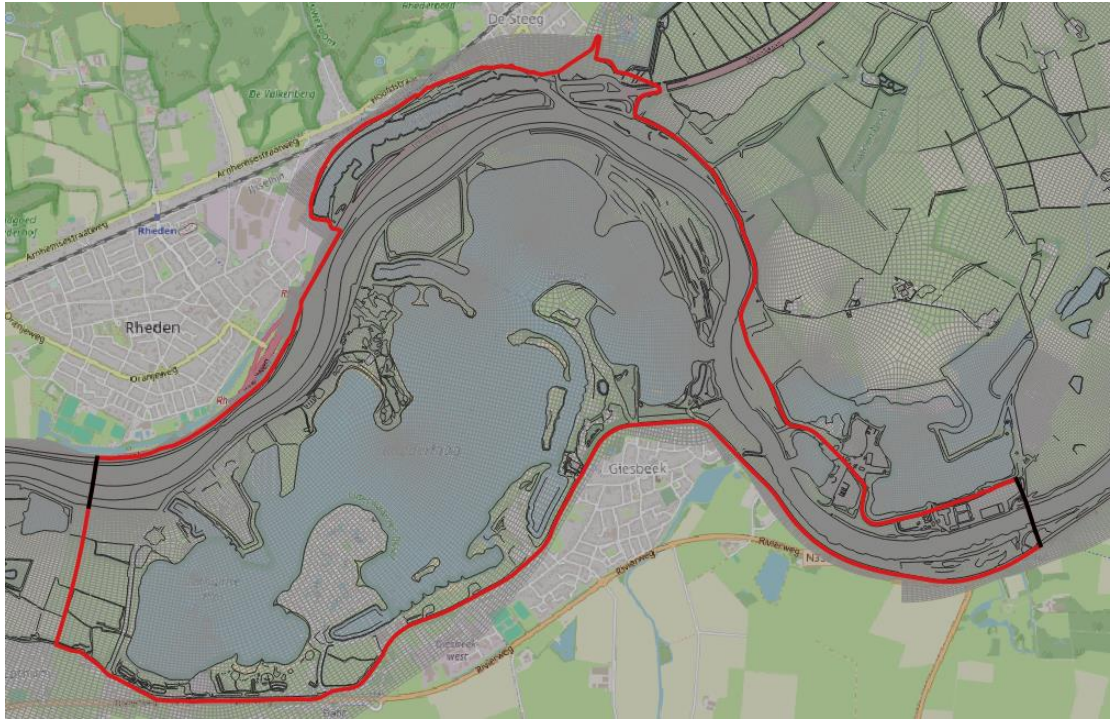
Het interessegebied is de haveningang bij De Steeg. Het gaat daarbij zowel om de havenmond waar de ingreep plaatsvindt en de neervorming gaat veranderen, tot ongeveer de brug van de A348, als om de stroming in de hoofdgeul van de IJssel (Figuur 8, rood vak).

Om de exacte locatie van de modelgrenzen te bepalen moet in detail worden gekeken naar de stroombeelden bij de standaardberekeningen die uitgevoerd moeten worden. De analyse van de stroombeelden laat ook zien welke delen van het winterbed kunnen worden afgeknipt. Voor de toepassing bij De Steeg is dit eind 2023 gedaan met de toen meest actuele schematisatie, j22_6. Later is besloten om over te stappen op de projectschematisatie (paragraaf 3.4.1) met een fijner rooster. Figuur 10 laat zien dat de modelbegrenzing uit 2023 ook bij de hoogste afvoer (som S_8000) nog steeds voldoende is. In een berekening met de hoogste door te rekenen afvoer (berekening S_8000) stroomt er buiten de modelbegrenzing geen water.

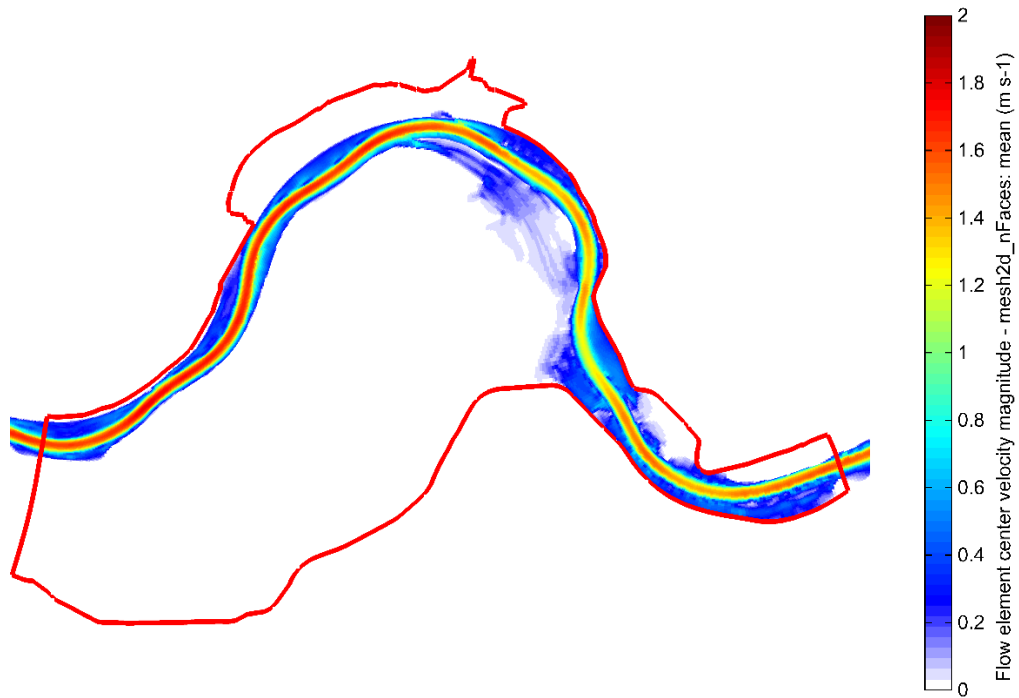
De Havikerwaard hoeft niet meegenomen te worden in de berekeningen. De Rhederlaag is een aangetakte plas die echter voor afvoeren tot 8.000 m³/s nog niet meestroomt. Deze hoeft daarom ook geen onderdeel van het modelgebied te blijven. Omdat de rektijden echter zeer acceptabel waren ook met Rhederlaag in het model is deze uiteindelijk niet verwijderd. Figuur 9 toont de gebruikte rekenroosterbegrenzing. De keuze van de modelranden staat nader beschreven in paragraaf 3.9.



Figuur 8 Modelgebied en interessegebied (rood vak) voor de haveningang van De Steeg. De rode lijnen geven mogelijke locaties van de modelranden aan.



Figuur 9 Rekenroosterbegrenzing (rode lijn) van het verfijnde model. In grijs zijn de roosterlijnen van het met driehoeken (2,5 m) verfijnde rooster getoond. De zwarte lijnen geven de ligging van de boven- en benedenrand van het verfijnde model weer.



Figuur 10 Stroomsnelheden in de projectschematisatie (referentie, berekend met het model van de gehele IJssel voor standaardberekening S_8000) en modelbegrenzing (rode lijn).

3.6 Keuze aantal dimensies

De verwachting is dat een 2D-model voor deze vraag volstaat. Tijdens de modelkalibratie is dit, onder andere met een test met een 3D-model met 10 (sigma-)lagen, bevestigd. De met het 3D-model berekende dieptegemiddelde stroming week nauwelijks af van het resultaat van het 2D-model.

3.7 Roosterverfijning

3.7.1 Gebied

Het rooster moet sterk worden verfijnd in het interessegebied. Daarbuiten kan worden volstaan met het oorspronkelijke 20m-rooster, waarbij een goede overgang naar de fijnere resolutie gerealiseerd moet worden.

Welk deel van de haven verfijnd moet worden hangt ook af van het gebied van de scheepssimulaties. Inmiddels is duidelijk dat stroomsnelheden $< 0,1$ m/s niet van belang zijn. Verfijning verder de haven in dan de brug is dan niet nodig.

3.7.2 Resolutie

Er wordt een resolutie van minstens 5 m x 5 m aanbevolen. De rekenresultaten worden immers gebruikt ten behoeve van de scheepvaart. Bij een scheepslengte van orde 80 m zou een resolutie van 5 m voldoende informatie moeten opleveren. Uit eerste testberekeningen (Becker, 2024) bleek dat de resolutie van 5 m nog te laag is, omdat daarmee maar enkele cellen tussen de hoge stroomsnelheden op de IJssel en het centrum van de neer in de havenmond kwamen te liggen. De gradiënt in stroomsnelheid, waar het de scheepvaart om gaat, wordt daarmee maar met enkele cellen weergegeven. Daarom is uiteindelijk gekozen voor een resolutie van ongeveer 2,5 m. Voor het verkrijgen van goede resultaten van het stromingspatroon en waterdiepten is een resolutie van 5 m overigens wel voldoende.

3.7.3 Type rooster

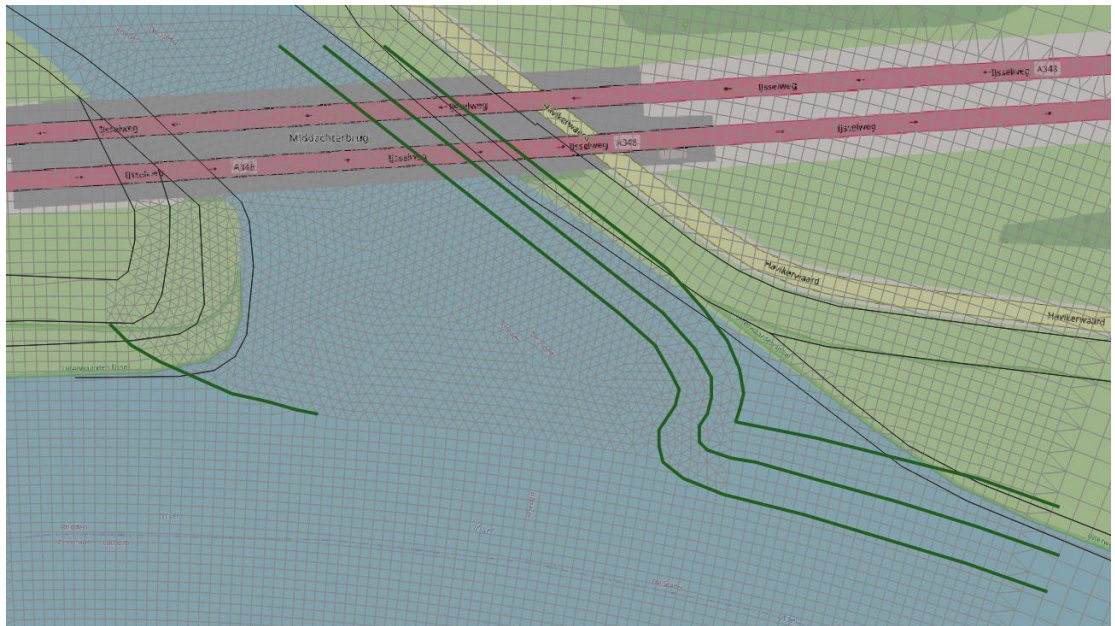
In het zomerbed is het beter als het rooster curvilineair blijft. In de haven zelf kan worden gekozen voor driehoeken, uitgelijnd met het ontwerp van de nieuwe havenhoofden, of voor curvilineair. Omdat in de eerste testberekeningen van Becker (2024) het resultaat door het type rooster werd beïnvloed zijn voor de Steeg testen uitgevoerd met meerdere roostertypes (curvilineair en uitgelijnd driehoeksrooster). De figuren in Bijlage C vergelijken de berekende stroombeelden voor de drie doorgerekende afvoeren en voor twee waarden van de achtergrondviscositeit *vicouv*, die uiteindelijk als kalibratieparameter is gebruikt (paragraaf 3.11). Met een achtergrondviscositeit van $0,4$ m²/s verschillen de berekende stroombeelden weinig, maar met een waarde van $0,1$ m²/s zijn er grote verschillen en wordt met het curvilineaire rooster een onrealistisch stroombeeld berekend. Becker (2024) heeft het stroombeeld onderzocht voor 2 roosterresoluties (ongeveer 2,5 m en 5 m kantlengte), en voor beide resoluties traden de verschillen op. Binnen eenzelfde roostertype had de resolutie daarentegen nauwelijks invloed op de resultaten. De verschillen lijken dus niet te wijten aan een betere weergave van de geometrie van de haven. Mogelijk geeft een regelmatig rooster een bepaalde “voorkeursrichting” voor de stroming. Voor een toepassing als voor de haven bij De Steeg lijkt een onregelmatig driehoeksrooster wat dat betreft beter geschikt.

Daarom is voor het driehoeksrooster gekozen.

3.7.4 Uitlijning

Het driehoeksrooster is uitgelijnd aan de belangrijke hoogteverschillen en breuklijnen die de geometrie van de haven beschrijven (Figuur 11).

Daarnaast is het uitgelijnd aan het ontwerp. Op die manier wordt de geometrie van de stromingsbepalende elementen optimaal weergegeven in het model.

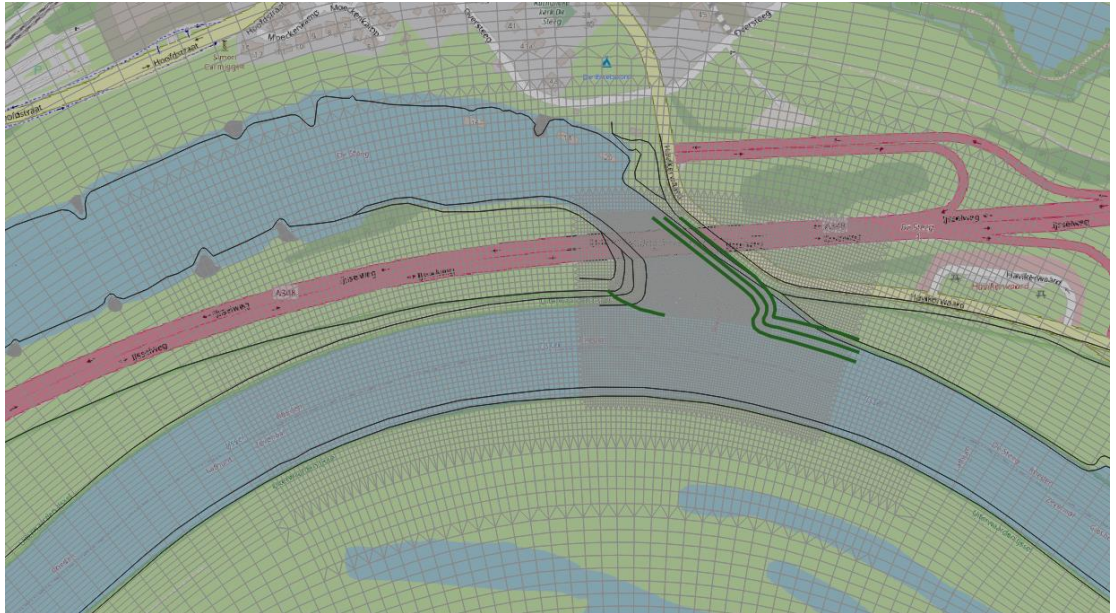


Figuur 11 Uitlijning van het rooster (grijs) aan de breuklijnen en hoogteverschillen (zwart) en het ontwerp van de aanpassing in de haven (groen).

3.7.5 Inpassen verfijnd rooster in 20 m rooster deelmodel IJssel

Vanwege de tijdstapbeperking door het Courant-criterium is het handig om driehoekscellen voor overgangen in roosterresolutie in gebieden te leggen met beperkte stroomsnelheid. De testberekeningen van Becker (2024) hebben echter laten zien dat de reketijden sowieso beperkt zijn. Dit komt enerzijds doordat het model zeer kort is vergeleken met het 20m-deelmodel van de IJssel (de projectschematisatie), en anderzijds omdat daardoor al zeer snel na start van de berekeningen een stationaire toestand is bereikt, waardoor er maar een korte periode hoeft te worden doorgerekend. De testberekeningen zijn uitgevoerd met een rekenperiode van 5 d, maar de stationaire toestand is al na 1 d bereikt. Berekeningen van 5 d duren ongeveer 1,5-3 uur op 4 cores op het rekencluster van Deltares, afhankelijk van de afvoer. Dit is niet nader geoptimaliseerd, omdat deze reketijden acceptabel zijn.

Figuur 12 laat zien hoe het 20 m rooster in 2 stappen verfijnd is naar een curvilineair rooster van ongeveer 2,5 m x 2,5 m resolutie. In de overgangen naar een fijnere resolutie is gebruik gemaakt van driehoekscellen. Bij de haven is vervolgens een stuk uit het curvilineaire rooster geknipt en vervangen door een driehoeksrooster (zie detail in Figuur 11), waarbij rekening gehouden is met uitlijning zoals beschreven in paragraaf 3.7.4.



Figuur 12 Aansluiting van het verfijnde rooster (grijs) aan het 20m-rooster van de projectschematisatie.

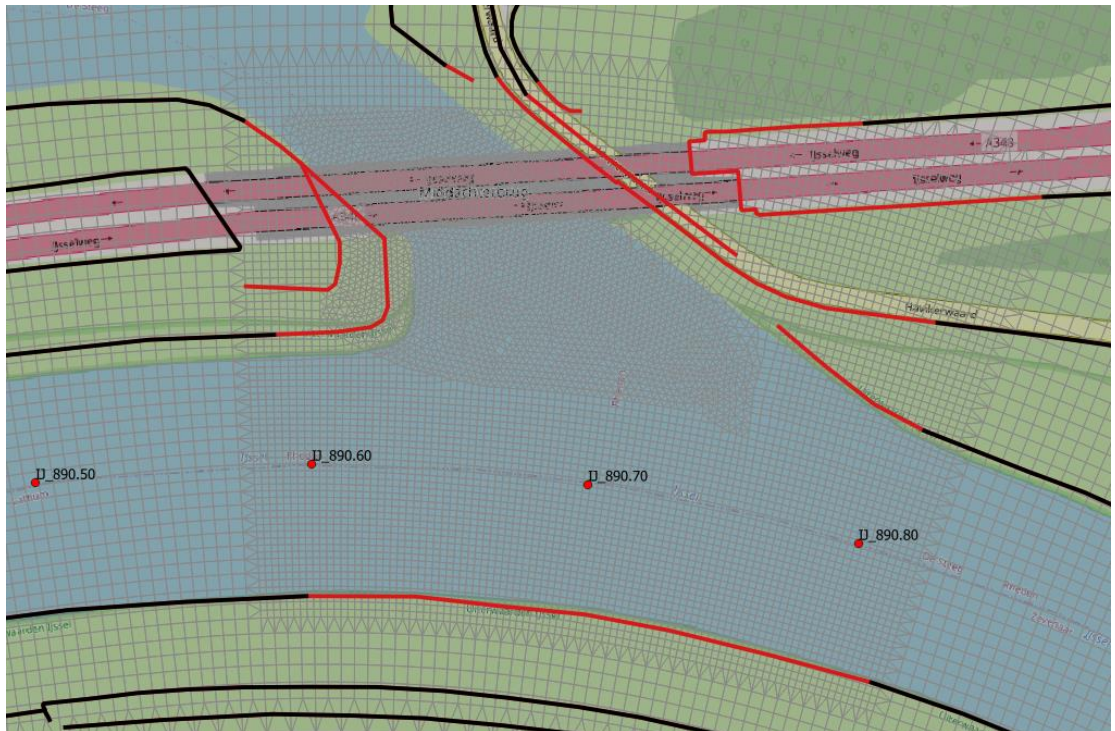
3.8 Analyse noodzaak aanpassing Baseline-referentie in interessegebied

3.8.1 Invloed overlaten

In het gebied met verfijnd rooster rond de haveningang bij De Steeg liggen er geen kribben langs de IJssel (Figuur 13). In de haven zelf wel, maar omdat het water daar bij de doorgerekende afvoeren niet stroomt is het niet nodig om de schematisatie daar aan te passen.

Er liggen wel *terrain_jump_lines* op de bovenranden van de taluds van de haven en de rechteroever van de IJssel (Figuur 13).

De rode overlaten liggen in het gebied met sterke roosterverfijning naar een resolutie van ongeveer 2,5 m en kunnen daarom in de bodem geschematiseerd worden in plaats van als subgrid features. Om te analyseren hoe groot de invloed hiervan op het rekenresultaat is zijn deze in een aantal testberekeningen (S_3000, S_4000 en S_6000) verwijderd.

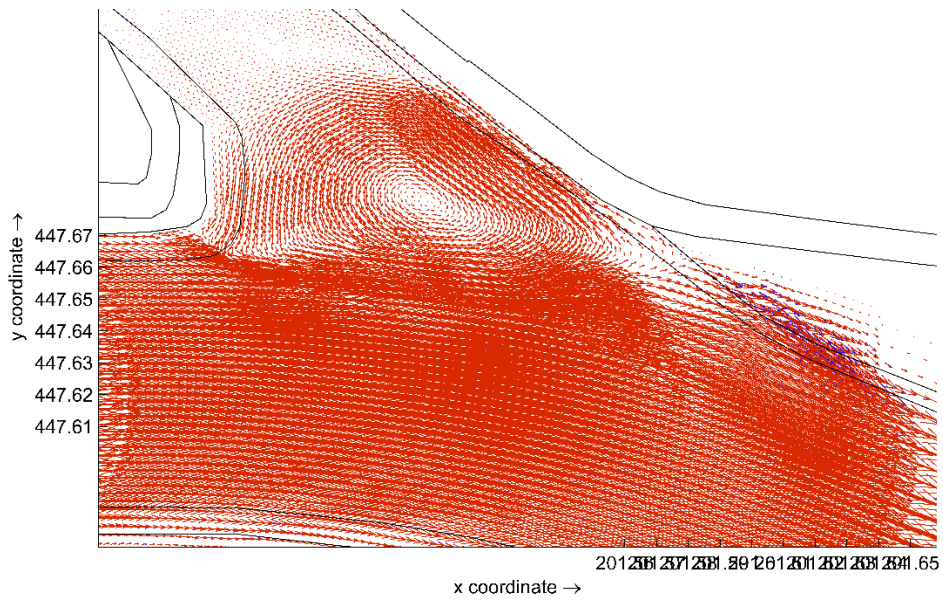


Figuur 13 Overlaten in de referentieschematisatie (rode en zwarte lijnen) en daaraan uitgelijnd verfijnd rooster (grijs).

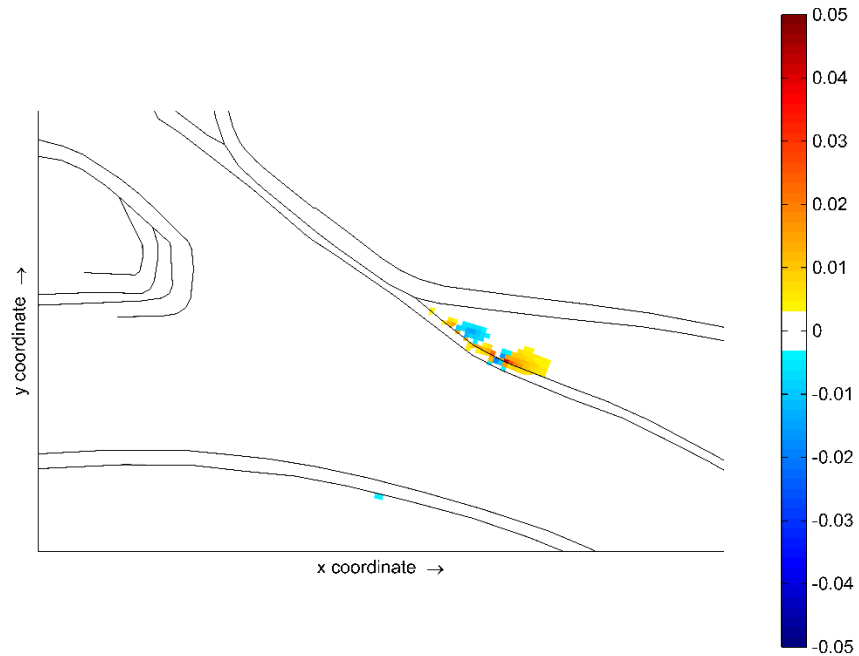
In de berekening S_3000 blijven de locaties waar overlaten zijn verwijderd droog. Daarom is er geen verschil in stroomsnelheden tussen de berekeningen met en zonder deze overlaten.

In berekening S_4000 begint het talud aan de benedenstroomse kant van de haveningang, bij rkm 890,8, te overstroomen (Figuur 14). De verschillen in stroomsnelheid blijven echter klein (grotendeels minder dan 0,01 m/s, in een enkele rooster cel tot 0,04 m/s, Figuur 15). Het stroombeeld in de haven en in het zomerbed wordt niet beïnvloed.

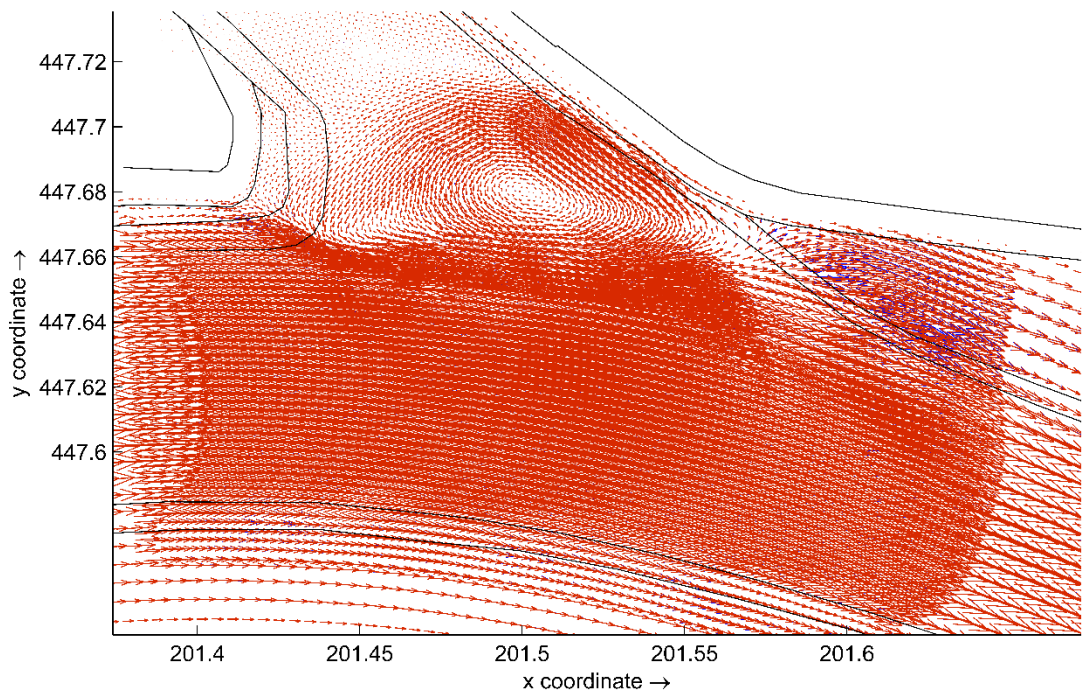
In berekening S_6000 worden de verschillen bij dat talud iets groter en worden ook de taluds aan de bovenstroomse kant van de haveningang en tegenover de haven overstromd (Figuur 16). Alleen aan de benedenstroomse kant van de haveningang verschillen de stroomsnelheden echter meer dan 0,01 m/s, en ook dat maar in een beperkt gebied (Figuur 17).



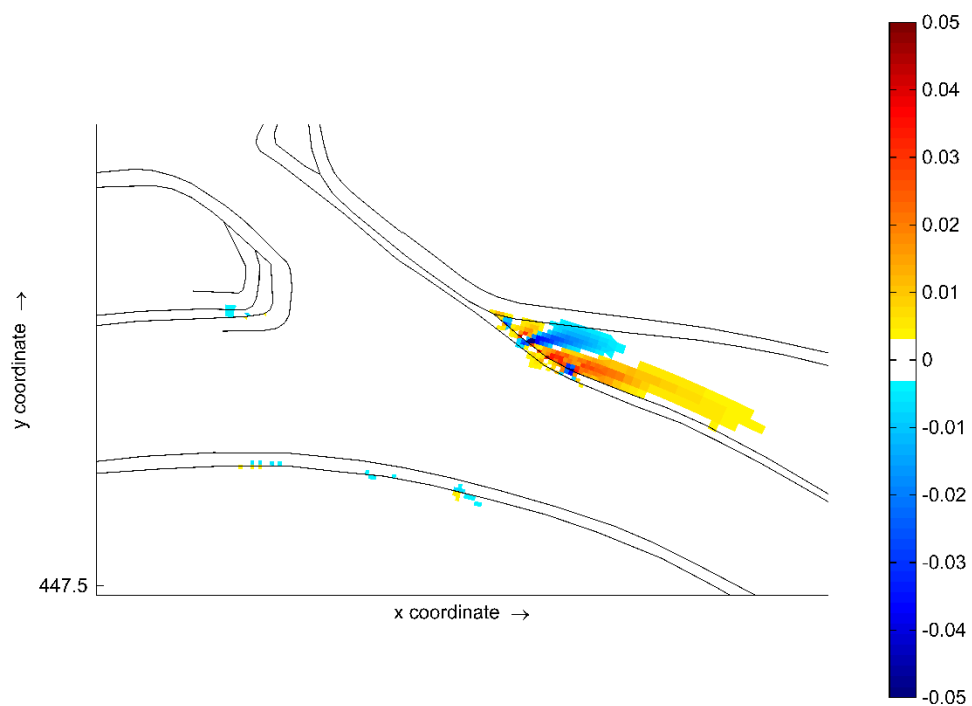
Figuur 14 Stroomsnelheid bij S_4000 in de referentie (blauw) en na verwijderen van de overlaten in het verfijnde gebied (rood).



Figuur 15 Verschil in stroomsnelheid (m/s) bij S_4000 tussen de berekening met verwijderde overlaten in het verfijnde gebied en de referentie.



Figuur 16 Stroomsnelheid bij S_6000 in de referentie (blauw) en na verwijderen van de overlaten in het verfijnde gebied (rood).



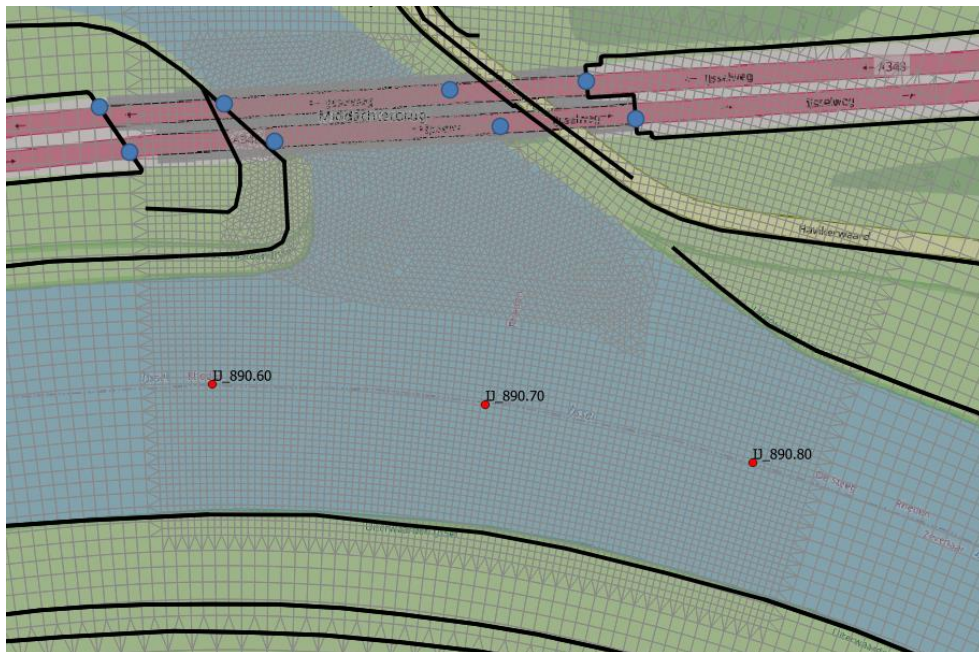
Figuur 17 Verschil in stroomsnelheid (m/s) bij S_6000 tussen de berekening met verwijderde overlaten in het verfijnde gebied en de referentie.

3.8.2 Invloed brugpijlers

De brugpijlers van de snelweg A348 liggen op de taluds in de haven en zijn in het 6^e generatie model geschematiseerd als brugpijlers (Figuur 18). De buitenste pijlers (in werkelijkheid waarschijnlijk de brughoofden) worden bij de doorgeresende afvoeren niet nat.

In een testberekening voor de invloed van de pijlers zijn daarom alleen de vier binnenste pijlers vervangen door overlaten. Op Google Street View leek het in eerste instantie alsof de brugpijlers iets verder in de haven staan dan in Baseline (Figuur 19). Daarom zijn ze in de testberekeningen verder richting de haven geschematiseerd (Figuur 20). Achteraf gezien klopt dat waarschijnlijk niet en wordt de invloed van de pijlers op de rekenresultaten overschat. Figuur 20 laat ook zien dat er bij de uitlijning van het rooster geen rekening gehouden is met de ligging van de pijlers. Dat zou in een volgende toepassing beter gedaan kunnen worden. Bij een roosterresolutie van 2,5 m is het echter sowieso niet mogelijk om de dikte van de pijlers goed te schematiseren.

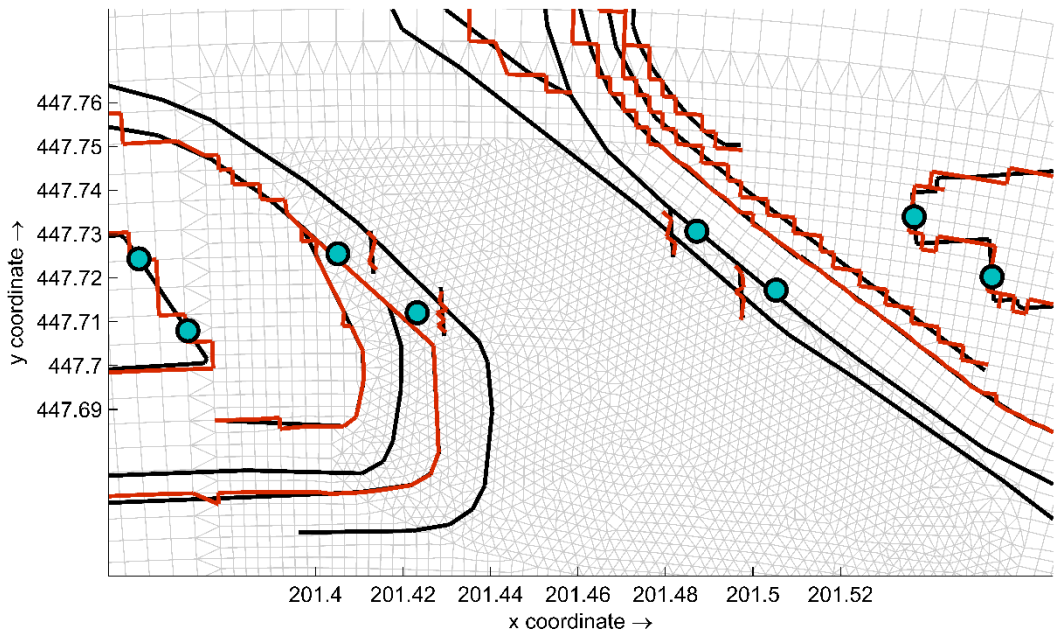
Voor de hoogte van de brugpijler (als overlaten) is 7,50 m+NAP aangenomen, dat ligt onder de bovenkant van de taluds aan weerskanten van de haven. De toegevoegde overlaten beschrijven dus de pijlervoeten die even breed zijn als de brug (Figuur 21). De pilaren daar bovenop zijn niet apart geschematiseerd.



Figuur 18 Brugpijlers in de haven bij De Steeg in de Baseline referentieschematisatie (blauwe stippen).



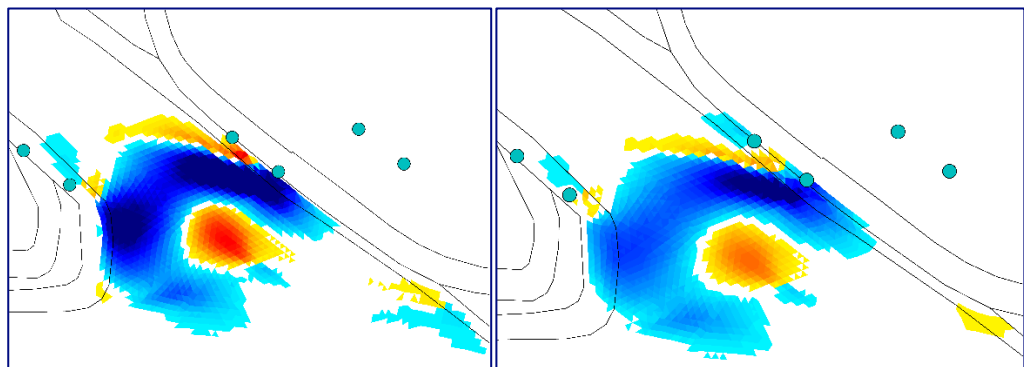
Figuur 19 Brugpijlers in de haven bij De Steeg (bron: Google Street View).

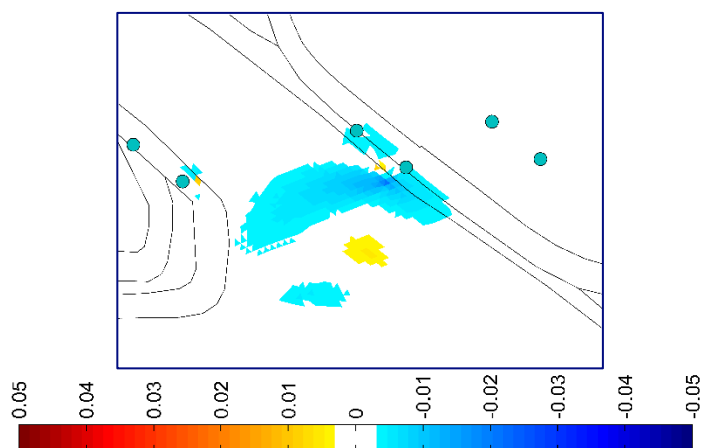


Figuur 20 Schematisatie van de brugpijlers als overlaten (zwarte lijnen: D-HYDRO invoer, rode lijnen: na projectie).

De invloed van de schematisatie van de pijlers op de stroomsnelheden in de haven is het grootst bij lagere afvoeren (Figuur 21), omdat de hoofdneer dan het verst onder de brug komt. Bij S_6000 raakt de neer de pijlers in overlaten nog maar net, en het verschil in stroomsnelheid blijft zeer klein (orde 0,003 m/s).

De validatie van de berekende stroomsnelheden laat zien dat bij lage afvoeren de berekende neer tot te ver onder de brug loopt, onafhankelijk van de manier van schematiseren van de pijlers. In werkelijkheid zal de invloed van de pijlers op de stroomsnelheden dus duidelijk kleiner zijn dan voor S_3000 (en waarschijnlijk ook S_4000) berekend. Bij S_6000 komt de berekende vorm van de neer wel goed overeen met metingen.





Figuur 21 Verschil in stroomsnelheid (m/s) tussen de berekeningen met brugpijlers als overlaten en de referentie. Boven links: S_3000; boven rechts: S_4000; onder: S_6000.

3.8.3 Invloed ruwheid van de haven

De verwachting was dat de havens allemaal met ruwheidsklasse “plas” geschematiseerd zouden zijn en dat dat een onderschatting van de ruwheid kan zijn. Daarom was de aanbeveling in paragraaf 2.6 om een test met een verhoging van de ruwheid uit te voeren. De haven bij De Steeg is in het 20m-model echter geschematiseerd als “water”, met een Nikuradse-waarde van 0,15 m. Dat is al vrij hoog, en verdere verhoging leek niet realistisch. Om alsnog de invloed van de havenruwheid op de resultaten te kunnen analyseren heeft Becker (2024) daarom de ruwheid verlaagd (naar 0,05 m) in plaats van verhoogd. De ruwheid van de haven bleek nauwelijks invloed te hebben op de rekenresultaten.

3.8.4 Beslissing Baseline-referentie

De scheepvaart is vooral geïnteresseerd in de gradiënt in snelheid tussen zomerbed en haven, bij de haveningang. Voor de morfologische reactie op een aanpassing van de haveningang is de snelheid in het zomerbed relevant. De invloed van de overlaten, de brugpijlers en de ruwheid van de haven op het stroombeeld en de stroomsnelheden op die locaties is verwaarloosbaar. Om de vraagstelling te beantwoorden is het daarom niet nodig de overlaten te verwijderen, de pijlers te schematiseren als overlaten of hoogwatervrije terreinen of de ruwheid van de haven aan te passen. Daarom is besloten de referentieschematisatie voor de toepassing voor De Steeg niet aan te passen. Voor andere toepassingen, waar de overlaten of pijlers een grotere invloed op de resultaten hebben, is dat mogelijk wel nodig.

3.9 Open randen en randvoorwaarden

3.9.1 Ligging open randen

De keuze voor het modelgebied voor De Steeg staat beschreven in paragraaf 3.5. Figuur 9 laat de ligging van de open randen boven- en benedenstrooms zien. De randen zijn op locaties met stroombanen parallel aan de rivier gelegd, zonder instromen van plassen o.i.d. in de uiterwaard. De open rand bovenstrooms is niet over de hele breedte van het modelgebied gelegd omdat de stroming bij de hoogste doorgerekende afvoer (S_8000) zich tot een smallere strook beperkt.

3.9.2 Afleiden randvoorwaarden

De open randen zijn op locaties gelegd waar in de projectschematisatie reeds een uitvoerraai voor afvoeren (bovenrand, raai IJ_887.00_QK) of een uitvoerpunt voor waterstanden (benedenrand, observatiepunt IJ_899.00) aanwezig was (Figuur 22).

Daardoor konden de afvoer en de waterstand voor de randvoorwaarden direct uit de resultaten van standaardberekeningen met de projectschematisatie worden gehaald, er hoefden geen aanvullende uitvoerraaien of -punten te worden toegevoegd. Het gaat om constante waarden, omdat met het verfijnde model alleen stationaire berekeningen uitgevoerd hoeven te worden.



Figuur 22 Afvoerraai op de bovenrand (links) en waterstandspunt bij de benedenrand (rechts) van het verfijnde model (bron: Becker (2024), het rooster was toen nog het 40m-rooster).

3.10 Analyse invloed modelparameters

Becker (2024) heeft voor De Steeg berekeningen (S_4000) uitgevoerd met de volgende variaties van parameters (en met een deels verfijnd rooster naar 2,5 m resolutie, uitgaande van het 40m-rooster van model j22_6):

- instellingen uit het 40 m model
- wandruwheid van “free slip” op “no slip”
- wandruwheid van “free slip” op “partial slip” met een wandruwheid van $k_s = 0,3$ m
- verhogen van de achtergrondviscositeit (vicouv) in de Smagorinsky-formulering van 0,1 naar 0,4 m^2/s , net als in de deelmodellen met 20m-rooster.

Daaruit bleek dat bij gebruik van de instellingen van het 40m-model de waterstanden ook na roosterverfijning vrij goed worden berekend, ook al had de verfijning lokaal een waterstandsverlaging van orde 2 cm tot gevolg. De gevoeligheid voor de instelling voor de wandruwheid (no slip, partial slip, free slip) was erg klein. Anders dan op basis van literatuur verwacht wordt, wordt ook zonder wandruwheid (met “free slip”) de neer in de haven goed weergegeven. Daarom is de gevoeligheid niet verder uitgebreid getest. Een andere achtergrondviscositeit leverde een duidelijk ander verhang op. Zonder aanpassing van de achtergrondviscositeit lagen de berekende waterstanden echter dicht bij de resultaten van het 40m-model. Anders dan bij de deelmodellen met 20m-rooster was een aanpassing van de viscositeit in de testberekeningen voor De Steeg ook niet nodig voor stabiliteit, de waterstanden waren met de instellingen van het 40m-rooster al zeer stabiel. Dit komt waarschijnlijk omdat het model vrij kort is en het rooster maar over een kort traject is verfijnd. De vorm van de neer werd echter duidelijk beïnvloed door de keuze van de achtergrondviscositeit (zie ook paragraaf 3.7.3).

Voor scheepvaart is het belangrijker om de neer goed te berekenen dan de absolute waterstanden. Daarom is bij de kalibratie van het verfijnde model (paragraaf 3.11) de gevoeligheid van de neervorming voor de viscositeit voor de projectschematisatie met verfijnd 20m-rooster opnieuw onderzocht en is gekeken welke keuze het beste past bij het geobserveerde stroombeeld. De resultaten worden in paragraaf 3.11 beschreven.

Waarschijnlijk is aanpassing van de wandruwheid en de ruwheid van de haven ook bij volgende toepassingen niet nodig.

Omdat er nog maar weinig ervaring is opgedaan met de invloed van deze parameters wordt echter aanbevolen om ook in de volgende toepassing nog enkele testberekeningen uit te voeren.

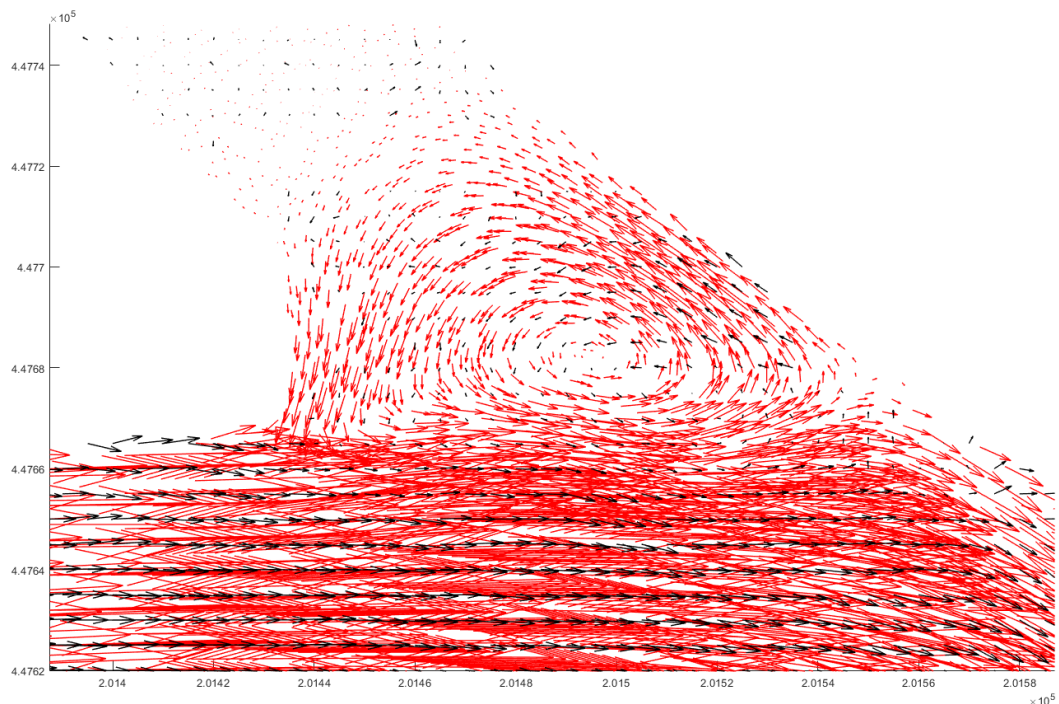
3.11 Kalibratie verfijnd detailmodel

3.11.1 Stroombeeld

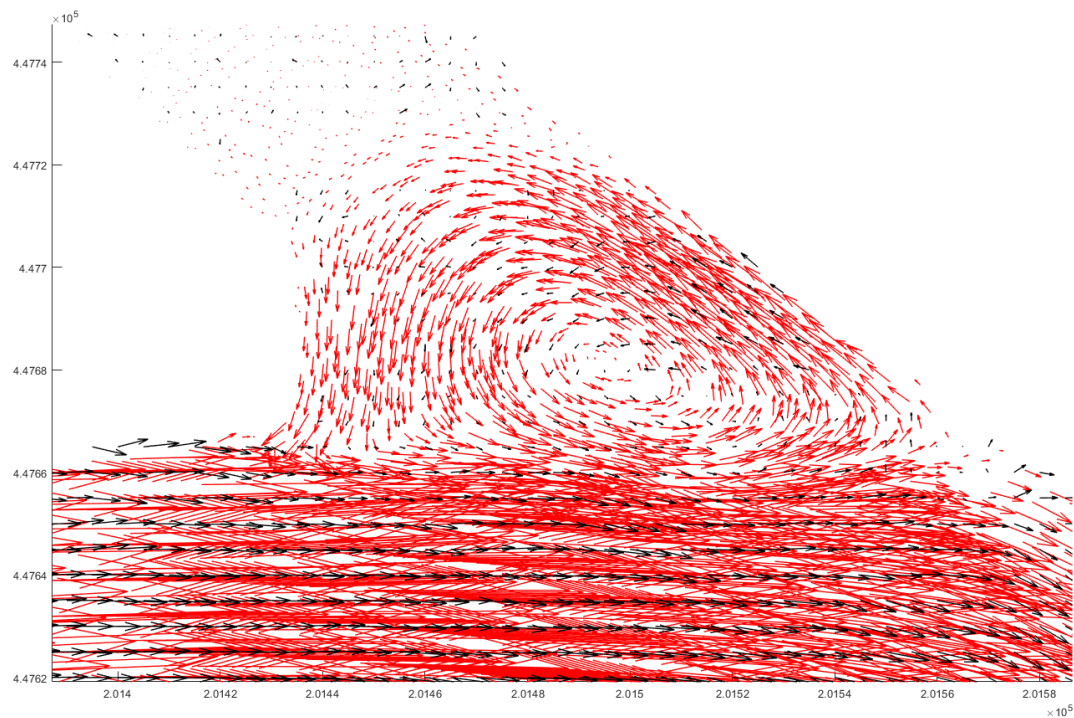
Het dieptegemiddelde stroombeeld uit de ADCP-metingen in april en juni 2024 wordt in Figuur 23 t/m Figuur 26 vergeleken met rekenresultaten van de standaardsommen die het beste bij de situatie tijdens de metingen passen (zie paragraaf 3.3). Vanwege de gevoeligheid van het stroombeeld voor de achtergrondviscositeit in het model zijn berekeningen uitgevoerd met waarden van $0,1 \text{ m}^2/\text{s}$ (de waarde uit het model met 40m-rooster) en $0,4 \text{ m}^2/\text{s}$ (de waarde uit het model met 20m-rooster).

In de berekening S_3000 is de wervel te breed (loopt te ver door richting de brug). Dat geldt voor beide achtergrondwaarden voor de viscositeit. Met een achtergrondviscositeit van $0,1 \text{ m}^2/\text{s}$ wordt het raakvlak tussen stroming in de wervel en in de hoofdgeul echter beter berekend.

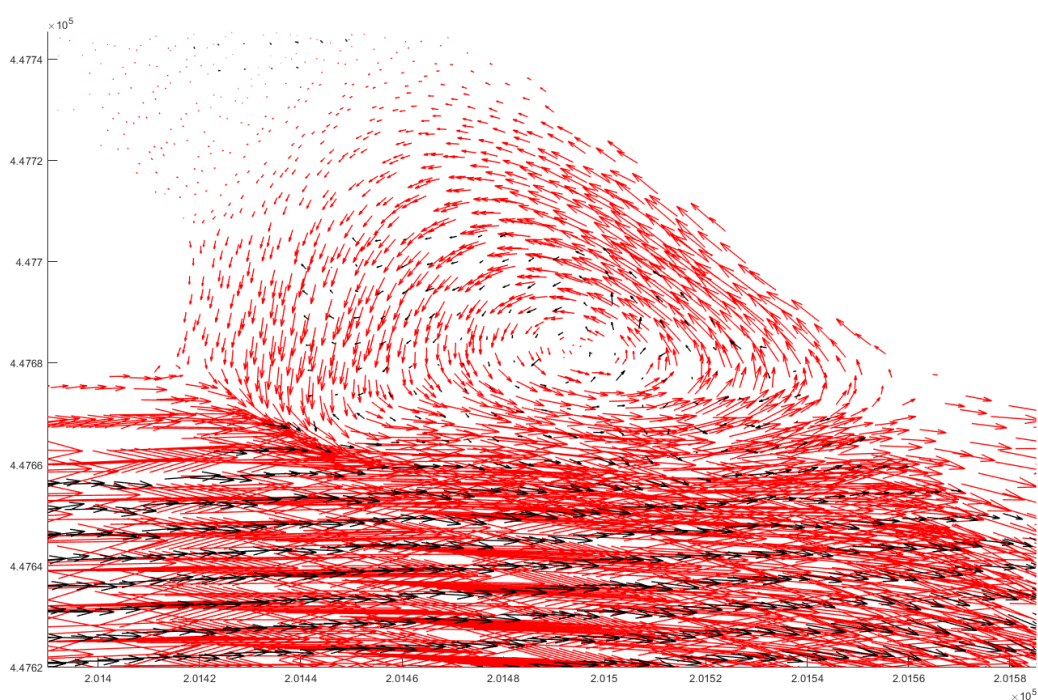
In de berekening S_6000 ligt het centrum van de wervel voor beide waarden van de achtergrondviscositeit vrij goed. Met de kleine achtergrondwaarde wordt echter de breedte van de wervel richting de brug veel beter berekend en is in de simulatie ook de conterwervel goed te zien (iets te ver in het noorden). Ook de aansluiting met de stroming in de hoofdgeul is beter.



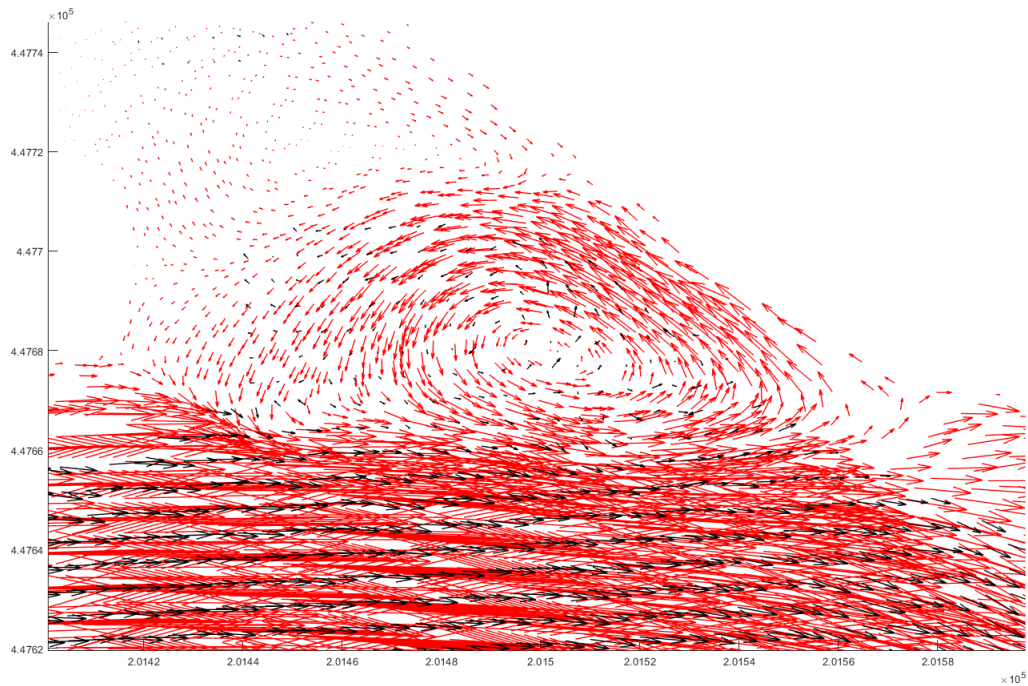
Figuur 23 Vergelijking van het stroombeeld bij S_3000 met een achtergrondviscositeit van $0,4 \text{ m}^2/\text{s}$ (rood, pijltjes uitgedund) met de ADCP-metingen van april 2024.



Figuur 24 Vergelijking van het stroombeeld bij S_3000 met een achtergrondviscositeit van 0,1 m²/s (rood, pijltjes uitgedund) met de ADCP-metingen van april 2024.



Figuur 25 Vergelijking van het stroombeeld bij S_6000 met een achtergrondviscositeit van 0,4 m²/s (rood, pijltjes uitgedund) met de ADCP-metingen van juni 2024.



Figuur 26 Vergelijking van het stroombeeld bij S_6000 met een achtergrondviscositeit van 0,1 m²/s (rood, pijltjes uitgedund) met de ADCP-metingen van juni 2024.

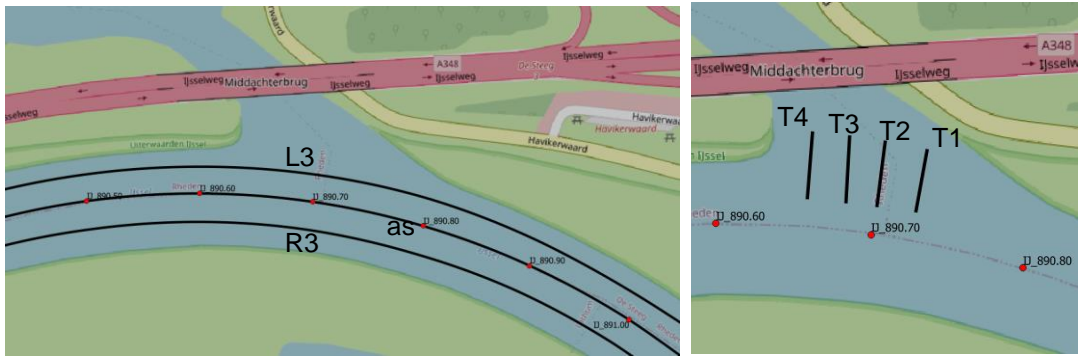
3.11.2 Stroomsnelheden langs raaien

Naast de stromingspatronen zijn de stroomsnelheden langs en dwars op een aantal raaien (Figuur 27) bekeken. Figuur 28, Figuur 29 en Figuur 30 tonen een deel van de resultaten, alle figuren zijn te vinden in Bijlage A. De absolute stroomsnelheden in de hoofdgeul (langs de as, raai L3 (links) en raai R3 (rechts)) worden vrij goed benaderd. De berekening S_3000 komt met een achtergrondviscositeit van $\nu_{\text{icou}} = 0,1 \text{ m}^2/\text{s}$ dicht bij de metingen (iets hogere snelheden), bij de berekening S_6000 is dat de berekening met $\nu_{\text{icou}} = 0,4 \text{ m}^2/\text{s}$ (iets lagere snelheden). Daarbij moet echter bedacht worden dat de afvoeren in de berekeningen niet exact overeenkomen met de metingen. Bij S_3000 is de afvoer in het model iets lager (dus snelheden mogen iets te laag zijn), en bij S_6000 is het andersom.

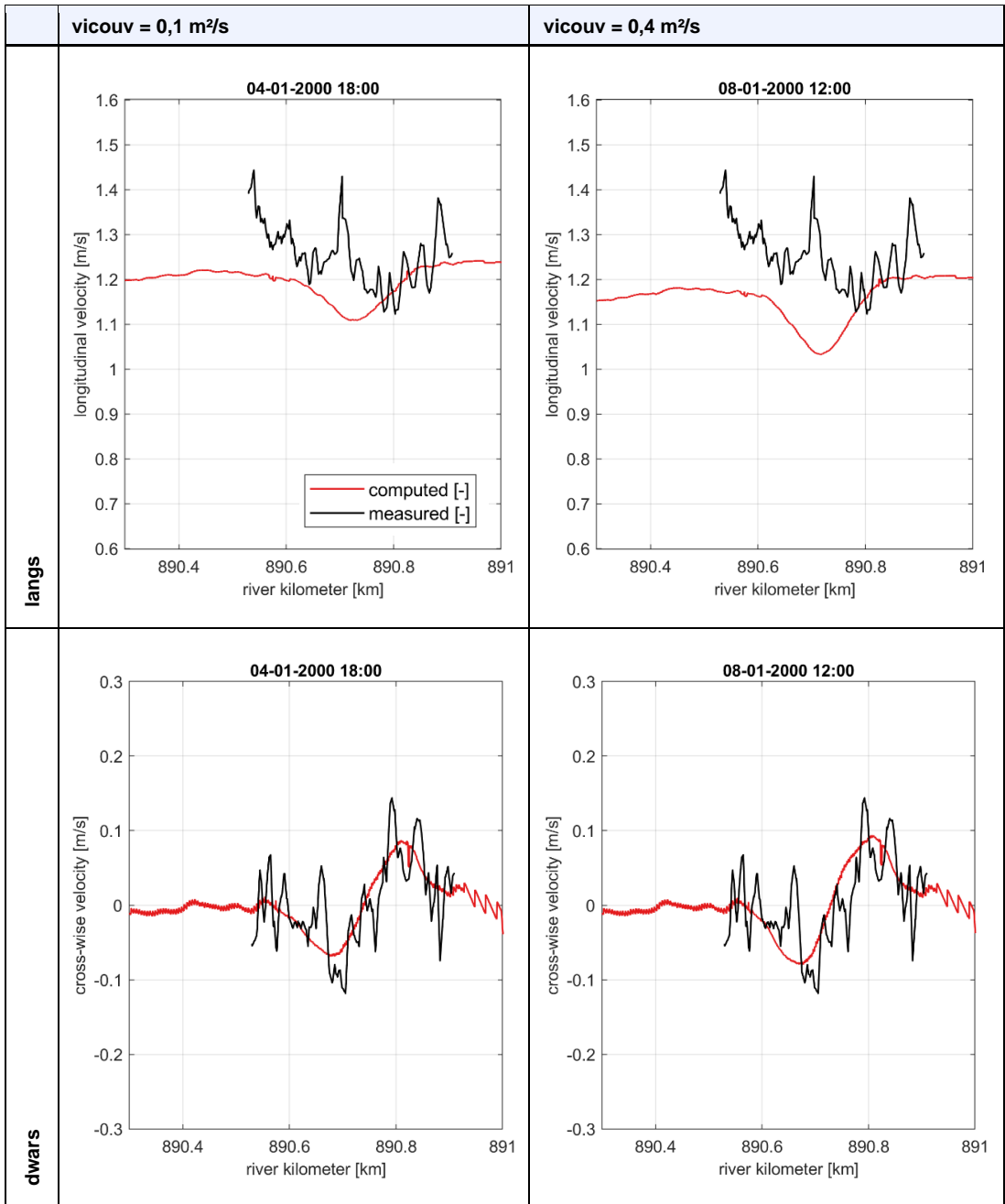
De ogenschijnlijk rare sprongen in het rekenresultaat worden overigens veroorzaakt doordat de meetraai niet parallel aan het rooster loopt en wisselt tussen verschillende celraaien, zie voorbeeld in Figuur 31. Omdat de snelheden discreet per cel worden berekend resulteert dat in een sprong in de figuur.

Zowel in het model als in de metingen is een verlaging van de stroomsnelheid in langsricting te zien bij de haveningang (ongeveer rkm 890,6-890,8). Dat is de reden waarom er in de hoofdgeul lokaal sedimentatie optreedt. Een verbetering van die situatie door een aangepaste haveningang moet dus voorspeld kunnen worden met het huidige model.

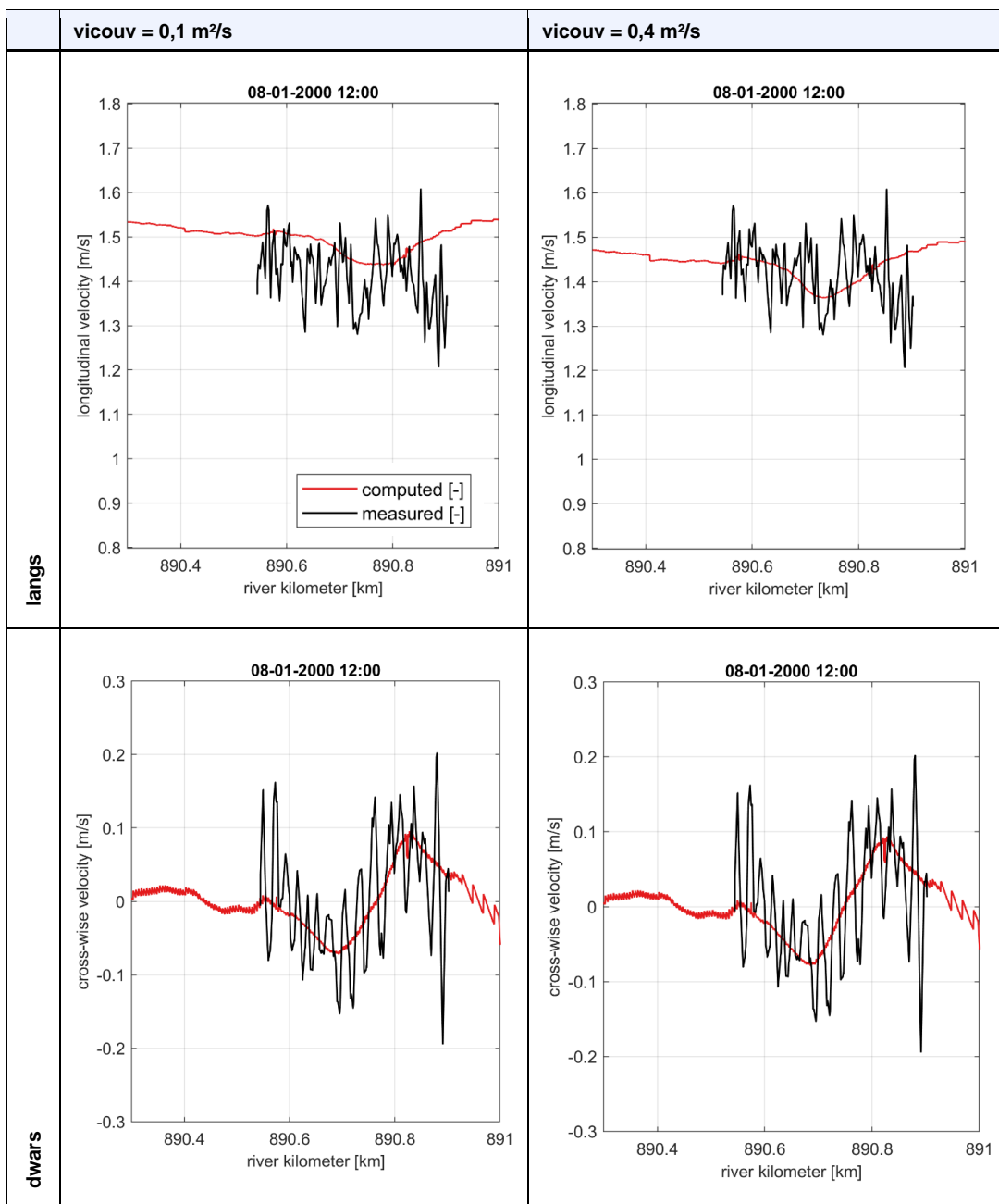
Langs de raaien T1 t/m T4 is vooral naar de dwarssnelheid (dus parallel aan de stroming in de rivier) gekeken, omdat die belangrijk is voor de scheepvaart. Met $\nu_{\text{icou}} = 0,1 \text{ m}^2/\text{s}$ worden de gradiënt in de dwarssnelheid en ook de absolute snelheid vrij goed getroffen voor beide meetmomenten, ook al ligt de wervel bij S_3000 (meting in april) niet helemaal goed.



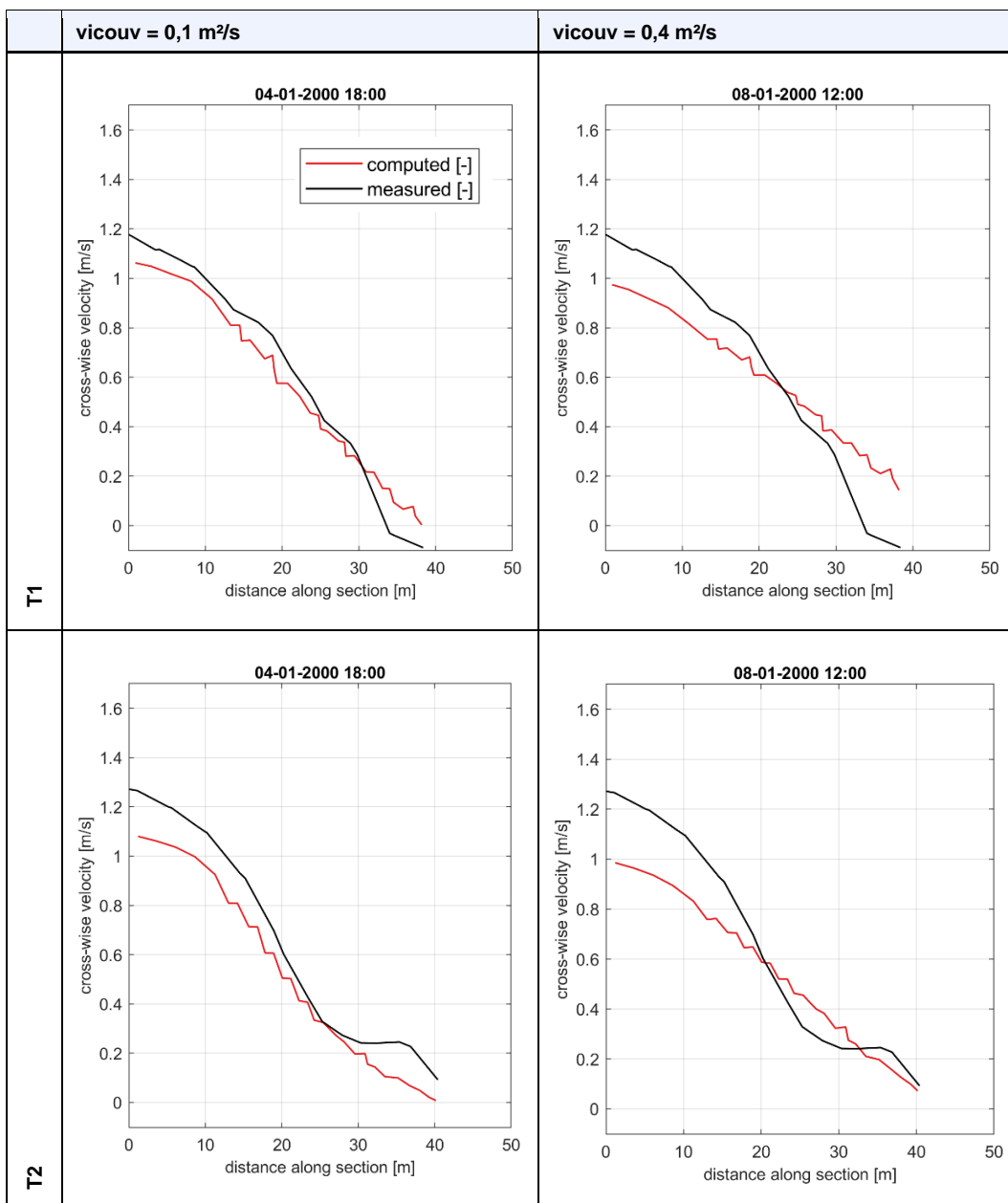
Figur 27 Raaien voor de analyse van stroomsnelheden.



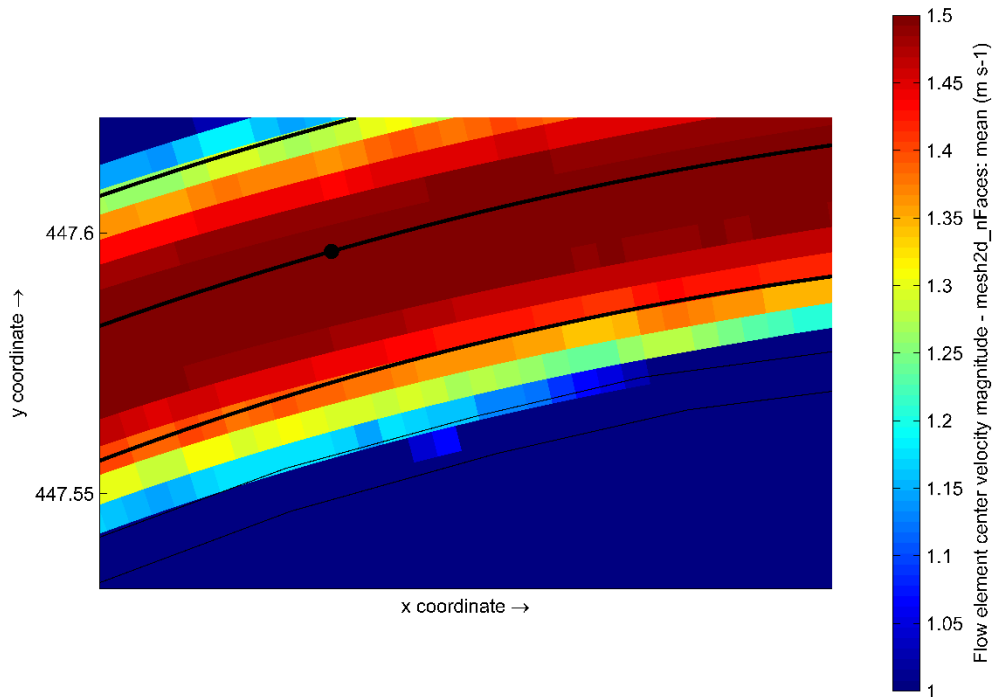
Figur 28 Stroomsnelheden langs de as van de rivier in langs- en dwarsrichting. Berekend S₃₀₀₀ voor verschillende achtergrondviscositeit (rood) en gemeten in april 2024.



Figuur 29 Stroomsnelheden langs de as van de rivier in langs- en dwarsrichting. Berekend S₆₀₀₀ voor verschillende achtergrondviscositeit (rood) en gemeten in juni 2024.



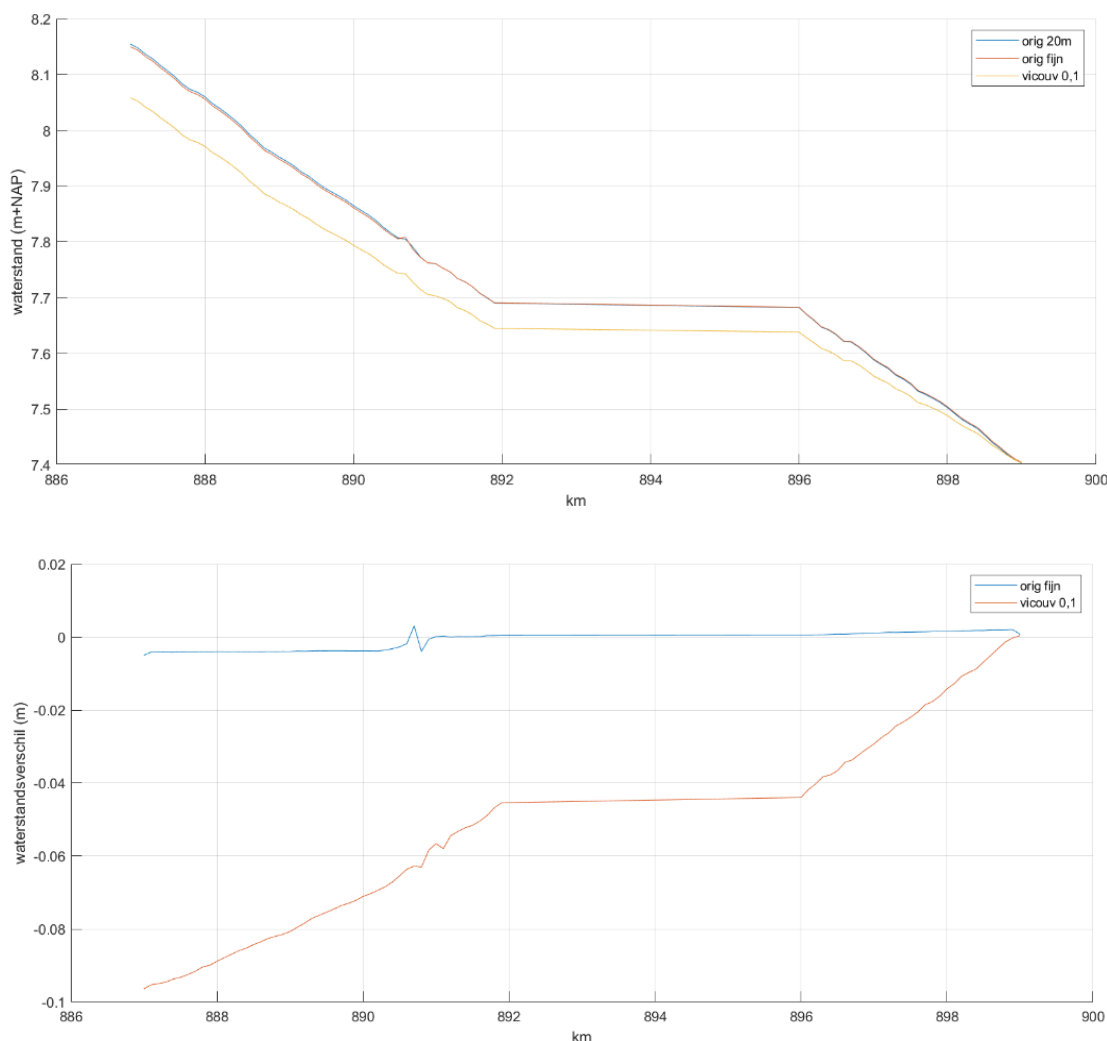
Figuur 30 Dwarsstroomsnelheden langs twee van de dwarsraaien. Berekend S_{3000} voor verschillende achtergrondviscositeit (rood) en gemeten in april 2024.



Figuur 31 Detail van de berekende stroomsnelheden in S_3000 en verloop van de langsvaaien bij rkm 890,4. Raai L3 aan de zuidkant loopt niet parallel aan het rooster.

3.11.3 Waterstand en verhang

Figuur 32 vergelijkt de waterstanden langs de as van de rivier voor verschillende berekeningen S_3000. De waterstanden in het verfijnde deelmodel met dezelfde numerieke instellingen ($\nu_{\text{coulou}} = 0,4 \text{ m}^2/\text{s}$) als de projectschematisatie (deelmodel met 20m rooster) wijken nauwelijks af van het resultaat van de projectschematisatie. Door het verlagen van de achtergrondviscositeit naar een waarde van $0,1 \text{ m}^2/\text{s}$ wordt het verhang kleiner. De waterstanden komen daardoor bij de haveningang van De Steeg (rkm 890,7) ongeveer 5 cm lager uit dan in de projectschematisatie. In de berekening S_3000 ligt deze voor beide parameterwaardes onder de geplande hoogte van het huidige ontwerp (8,50 m, paragraaf 3.1), in de berekeningen S_4000 en S_6000 daarboven.



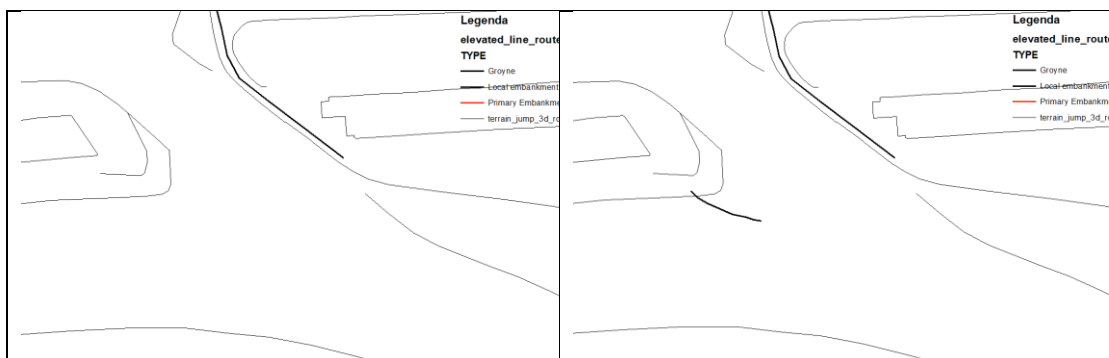
Figuur 32 Langsprofiel van de waterstand en het waterstandsverschil langs de as van de rivier voor verschillende berekeningen S_{3000} . *Orig_20m*: volledig deelmodel IJssel met 20m rooster; *orig_fijn*: verfijnd detailmodel voor De Steeg met achtergrondviscositeit $\text{vicouv} = 0,4 \text{ m}^2/\text{s}$; *vicouv0p1*: verfijnd detailmodel met $\text{vicouv} = 0,1 \text{ m}^2/\text{s}$. N.B.: Het rechte stuk in de profielen is geen riviertraject zonder verhang maar wordt veroorzaakt doordat de rivierkilometers tussen rkm 892 en 896 niet bestaan.

3.11.4 Keuze modelinstellingen

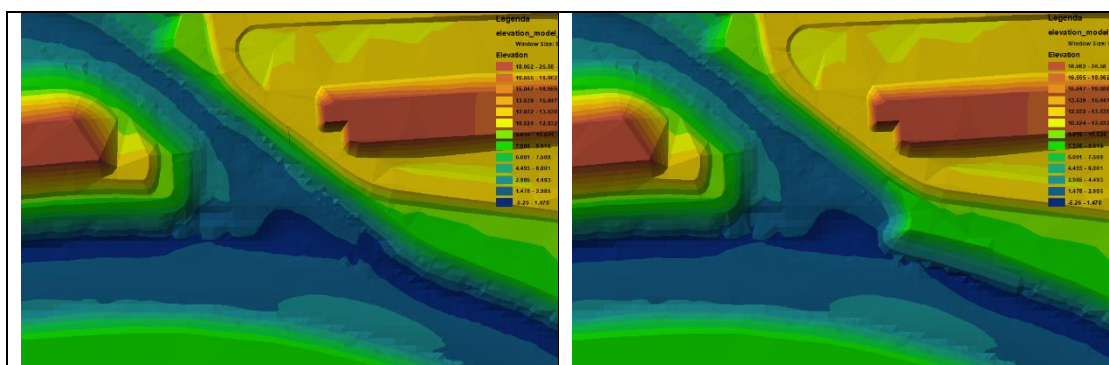
Voor de vraagstelling bij De Steeg (scheepvaart en morfologie) zijn goede stroomsnelheden en vooral een goed stroombeeld belangrijker dan de waterstanden. De achtergrondviscositeit van $\text{vicouv} = 0,1 \text{ m}^2/\text{s}$ geeft daarvoor betere resultaten, vooral wat de vorm van de wervel betreft. Daarom is ervoor gekozen om deze waarde te gebruiken voor de analyse van de invloed van de maatregel.

3.12 Schematisatie van de maatregel

Het huidige ontwerp van de maatregel (paragraaf 3.1) is geschematiseerd in Baseline. De damwand bovenstrooms is geschematiseerd als overlaat (Figuur 33), de aanpassing benedenstrooms in de bodemhoogte (Figuur 34). Via Baseline is de schematisatie met maatregel vertaald naar modelinvoer voor D-HDYRO op het verfijnde rooster.



Figuur 33 Overlaten havenmond De Steeg in Baseline. Links: referentie = projectschematisatie; rechts: na inmixen maatregel.



Figuur 34 Bodemhoogte havenmond De Steeg in Baseline. Links: referentie = projectschematisatie; rechts: na inmixen maatregel.

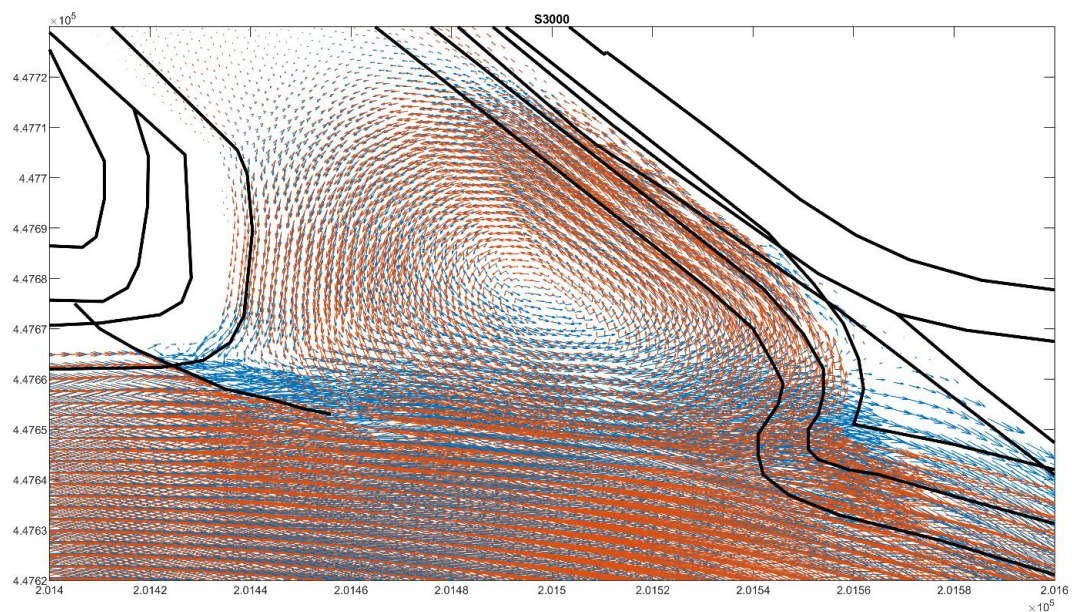
3.13 Invloed van de maatregel

3.13.1 Verandering van het stroombeeld

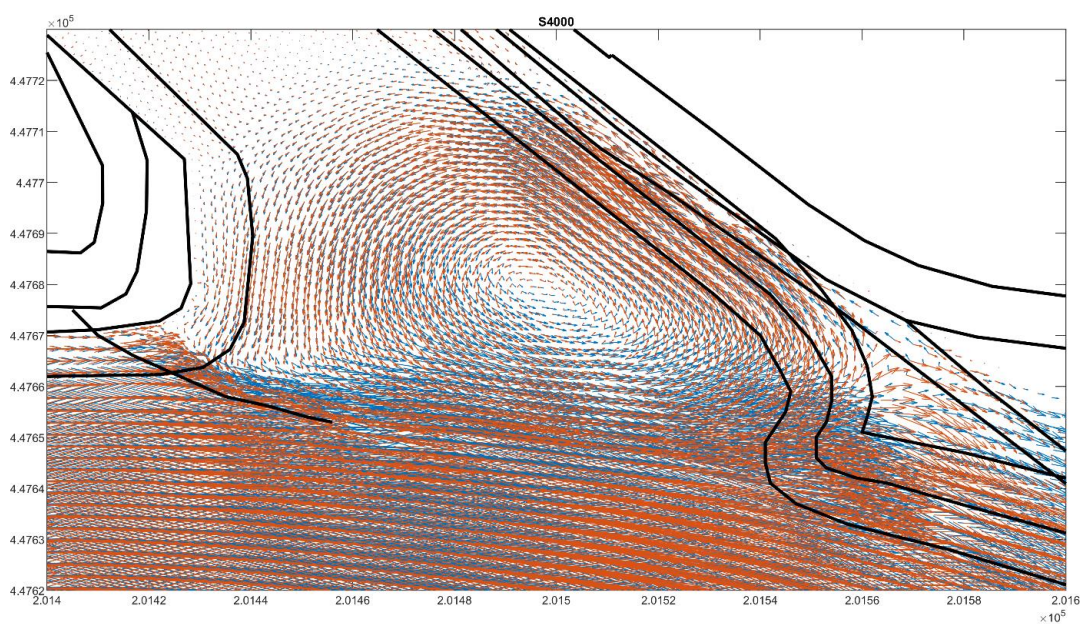
Figuur 35, Figuur 36 en Figuur 37 vergelijken de berekende stroombeelden met en zonder maatregel voor drie standaardafvoeren. De stroming in het zomerbed wordt vernauwd door het nieuwe ontwerp, waardoor de stroomsnelheid in langsricting bij de haveningang niet meer af maar toeneemt. Het centrum van de wervel in de haven schuift iets op naar het zuiden (richting de rivier) en het oosten. De invloed is het grootst bij de lagere afvoeren, wanneer de damwand aan de bovenstroomse kant van de haven nog niet (S_3000) of minder (S_4000) overstroomt.

Dit beeld is ook te zien in de stroming langs de raaien in het zomerbed (Figuur 38, Figuur 39 en Figuur 40), deze wordt door de maatregel wat verhoogd, terwijl dat in de huidige situatie een verlaging is. Figuur 41, Figuur 42 en Figuur 43 tonen het verschil tussen de stroomsnelheden. De snelheid wordt sterker beïnvloed naarmate de afvoer lager is.

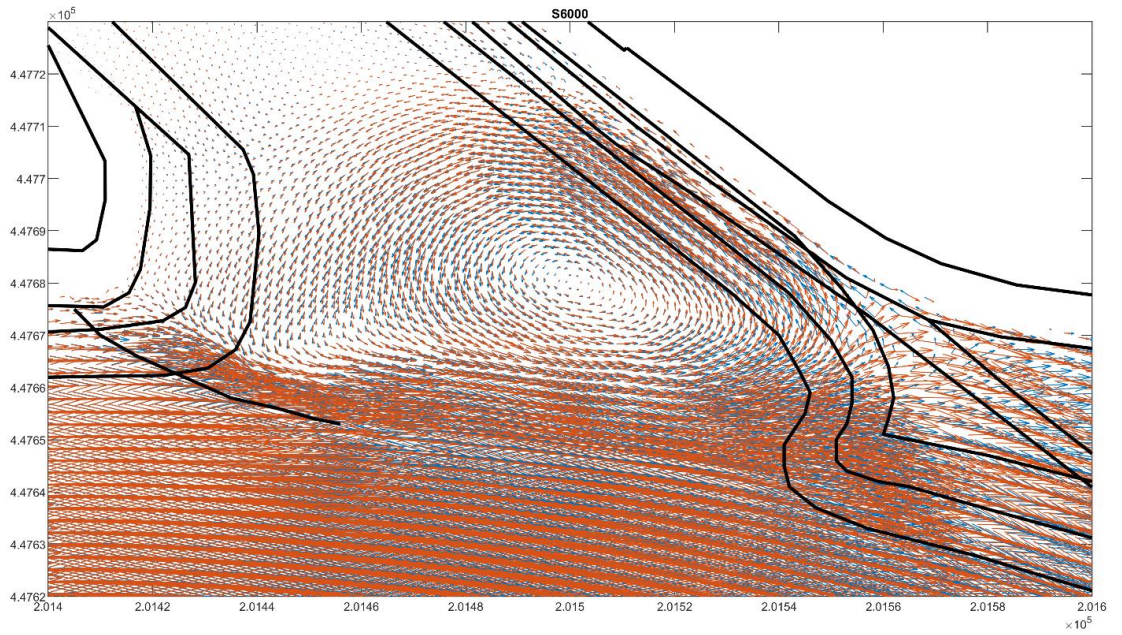
De stroomsnelheid in het zomerbed wordt door de maatregel groter, de snelheid in de wervel wordt aan de kant van het zomerbed kleiner. De dwarsstroming die schepen ondervinden als ze de haven in varen krijgt daardoor een grotere gradiënt (Figuur 44, Figuur 45 en Figuur 46). Dit effect is het sterkst bij de lagere afvoeren, wanneer de damwand bovenstrooms nog niet of minder wordt overstroomd.



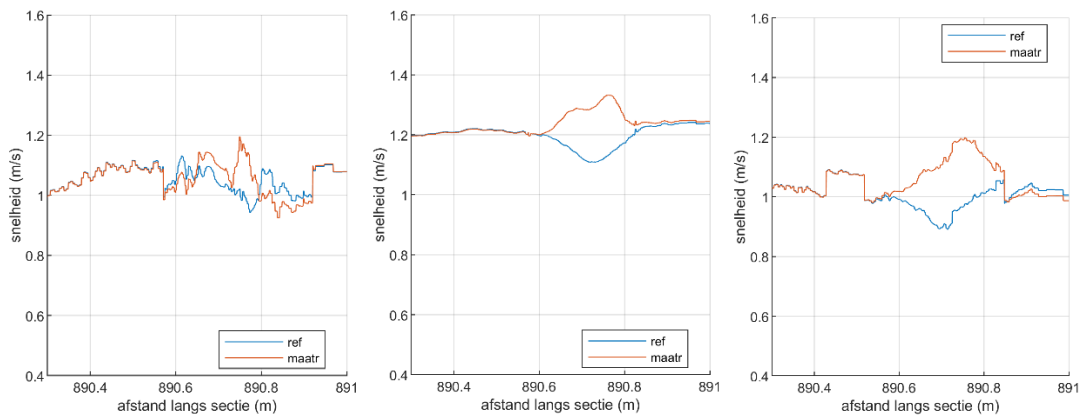
Figuur 35 Berekend stroombeeld in de haven bij De Steeg voor S_3000. Blauw: referentie; rood: met maatregel.



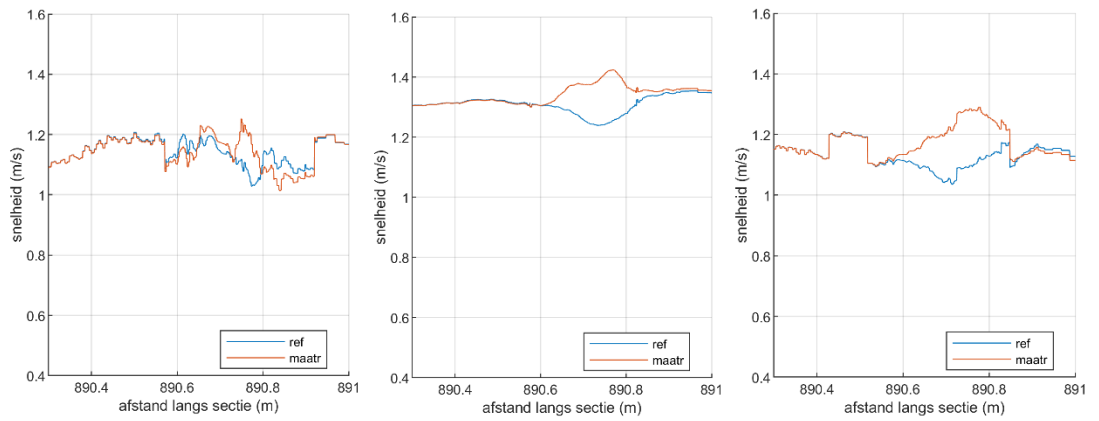
Figuur 36 Berekend stroombeeld in de haven bij De Steeg voor S_4000. Blauw: referentie; rood: met maatregel.



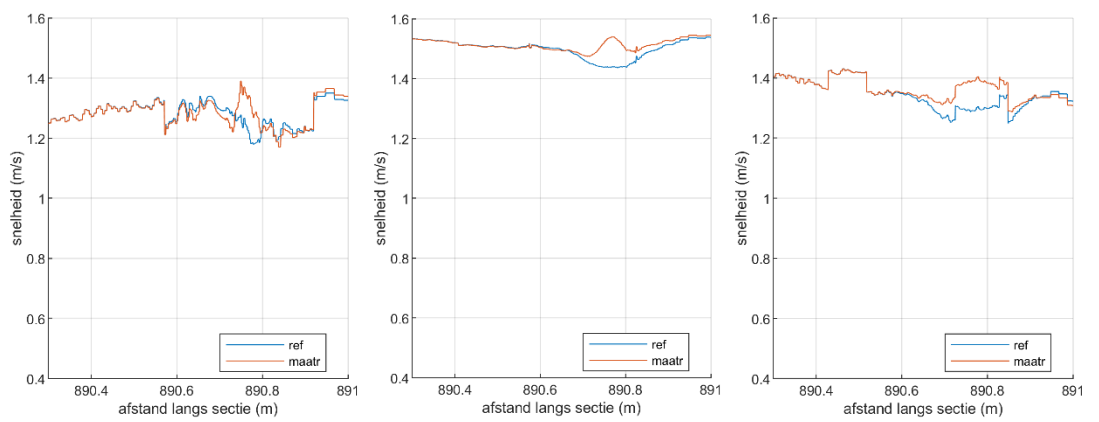
Figuur 37 Berekend stroombeeld in de haven bij De Steeg voor S_6000. Blauw: referentie; rood: met maatregel.



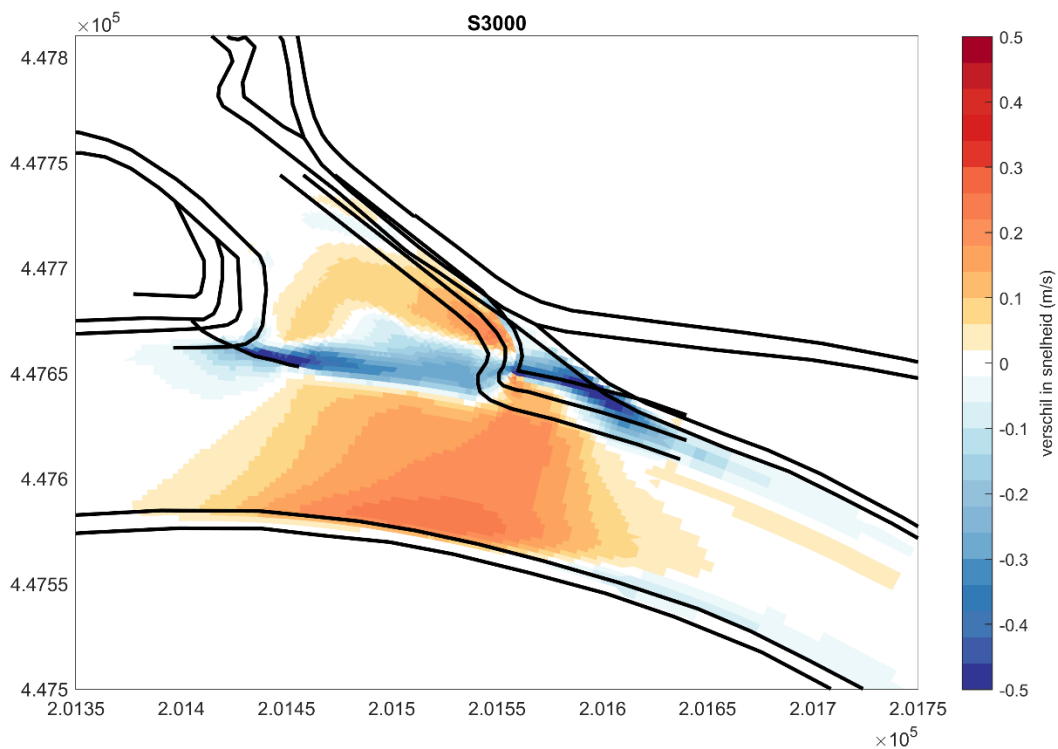
Figuur 38 Stroomsnelheid in langsrichting langs de raaien L3 (links), rivieras (midden) en R3 (rechts) in de berekening S_3000 met (rood) en zonder (blauw) maatregel.



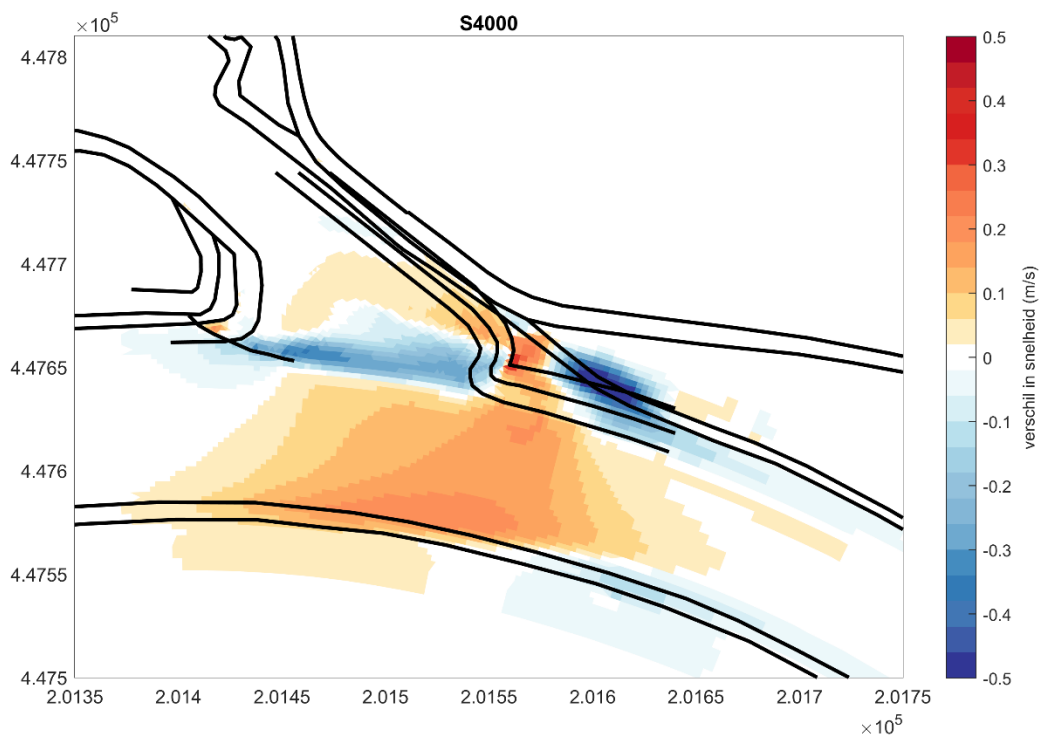
Figuur 39 Stroomsnelheid in langsricting langs de raaien L3 (links), rivieras (midden) en R3 (rechts) in de berekening S_4000 met (rood) en zonder (blauw) maatregel.



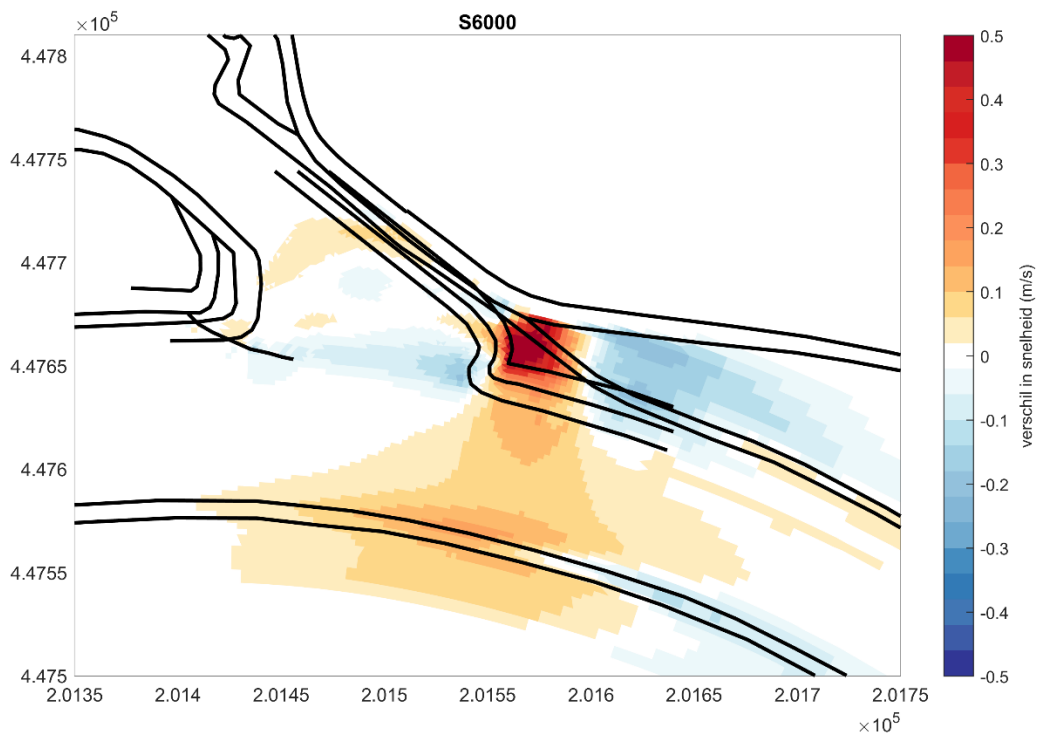
Figuur 40 Stroomsnelheid in langsricting langs de raaien L3 (links), rivieras (midden) en R3 (rechts) in de berekening S_6000 met (rood) en zonder (blauw) maatregel.



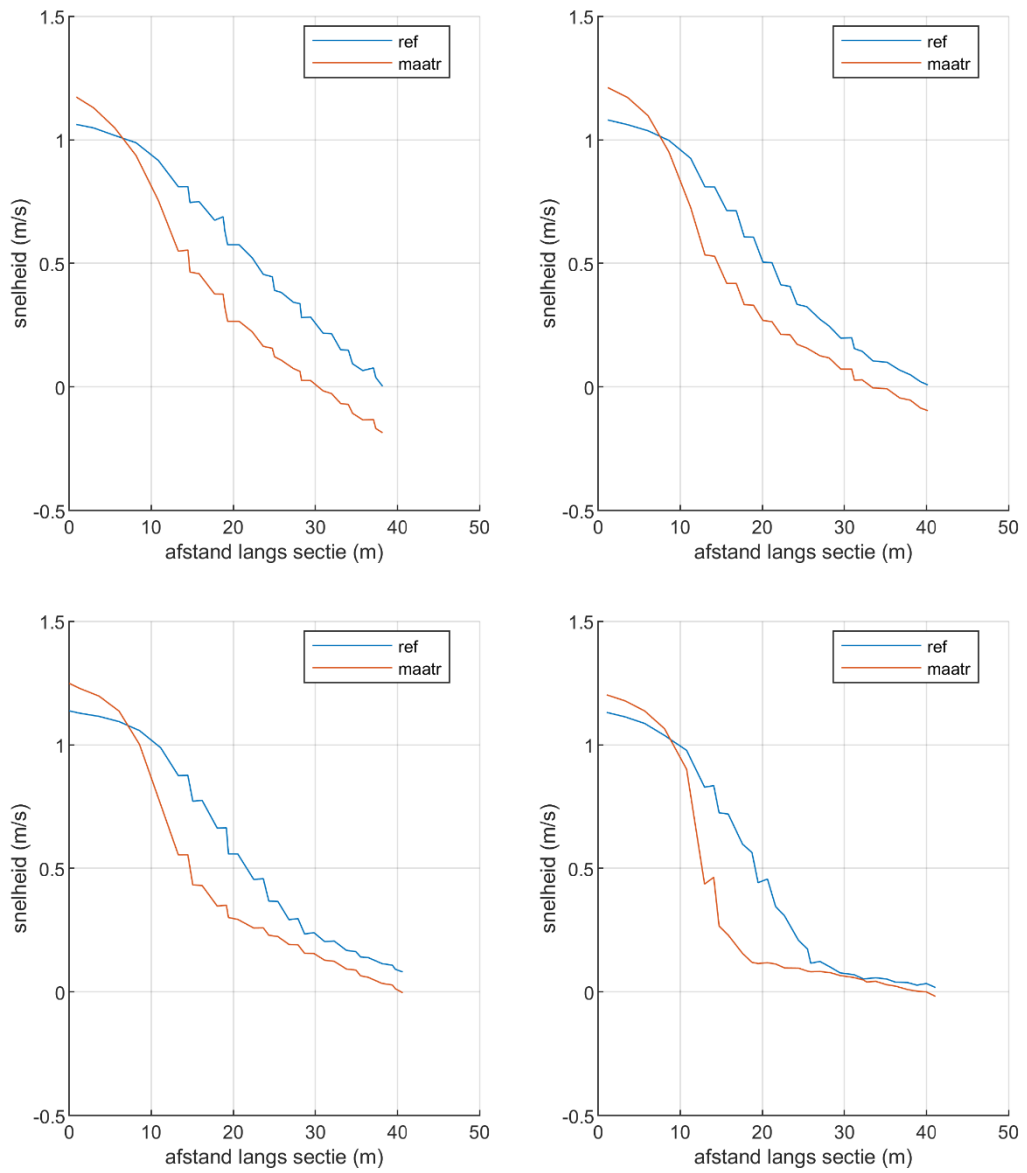
Figuur 41 Verschil in stroomsnelheid (magnitude) tussen de berekeningen S_3000 met en zonder maatregel (met-zonder).



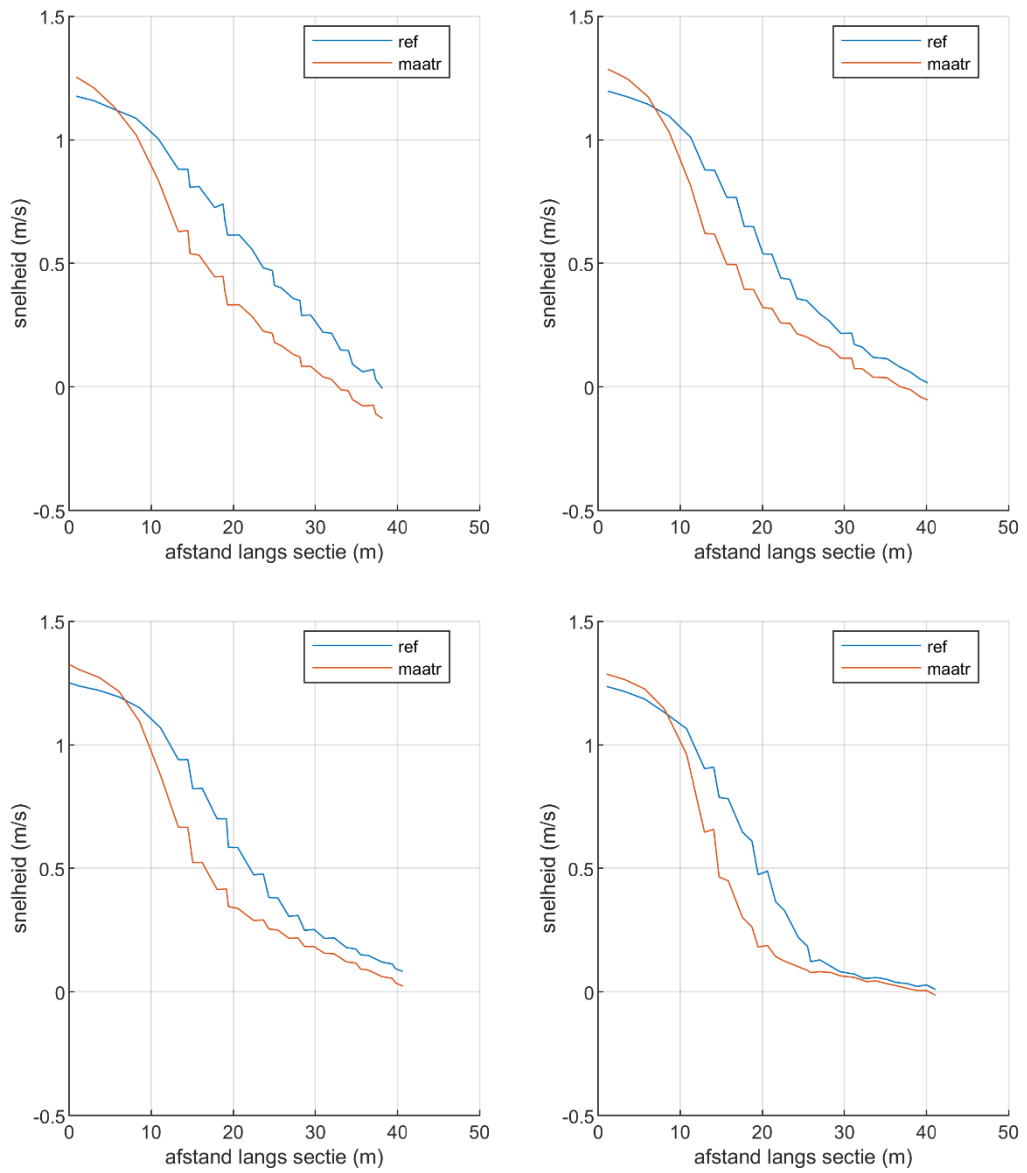
Figuur 42 Verschil in stroomsnelheid (magnitude) tussen de berekeningen S_4000 met en zonder maatregel (met-zonder).



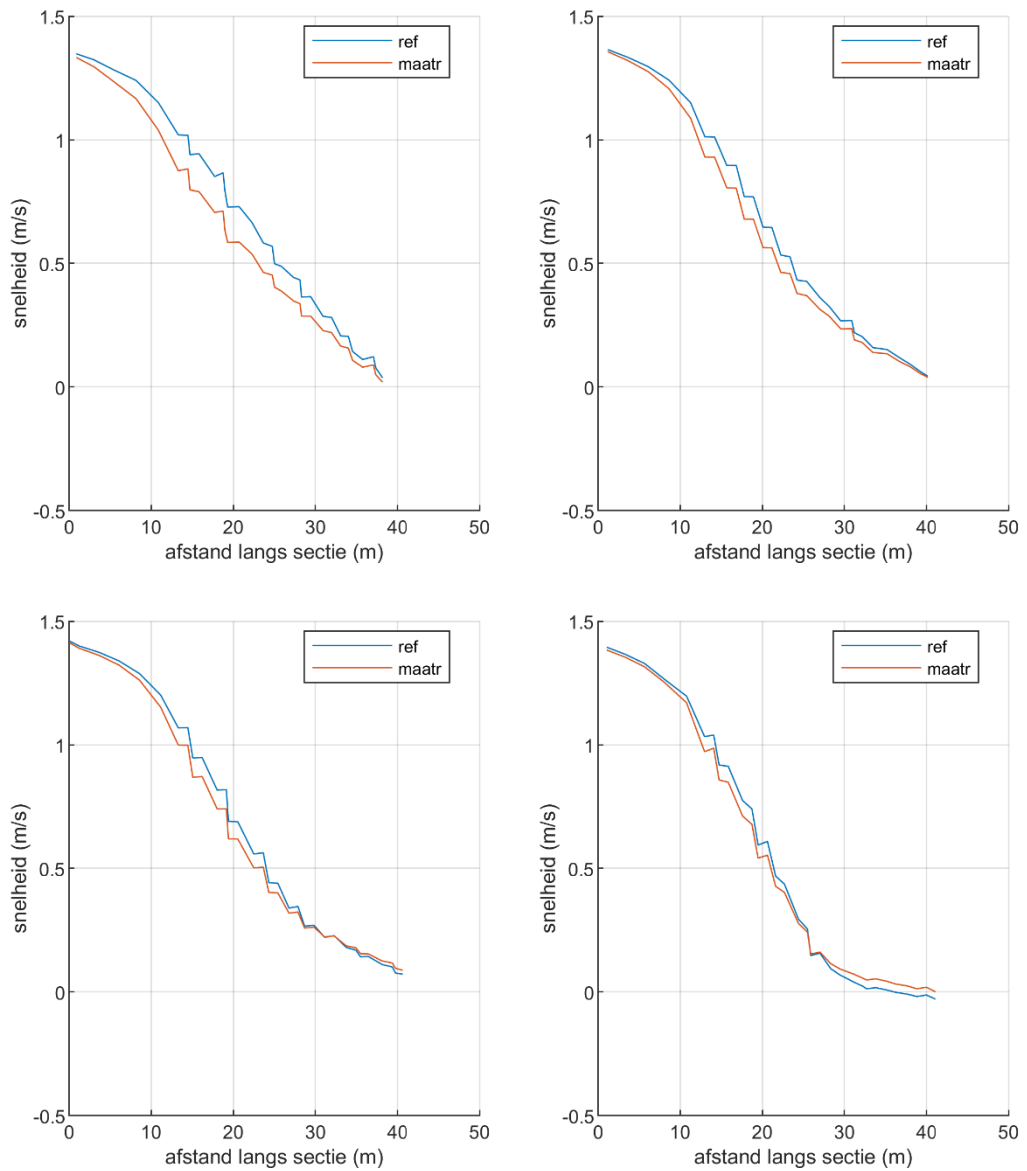
Figuur 43 Verschil in stroomsnelheid (magnitude) tussen de berekeningen S_6000 met en zonder maatregel (met-zonder).



Figuur 44 Dwarsstroomsnelheid op de raaien T1 (links boven) t/m T4 (rechts onder) voor de berekening S_3000 met (rood) en zonder (blauw) maatregel.



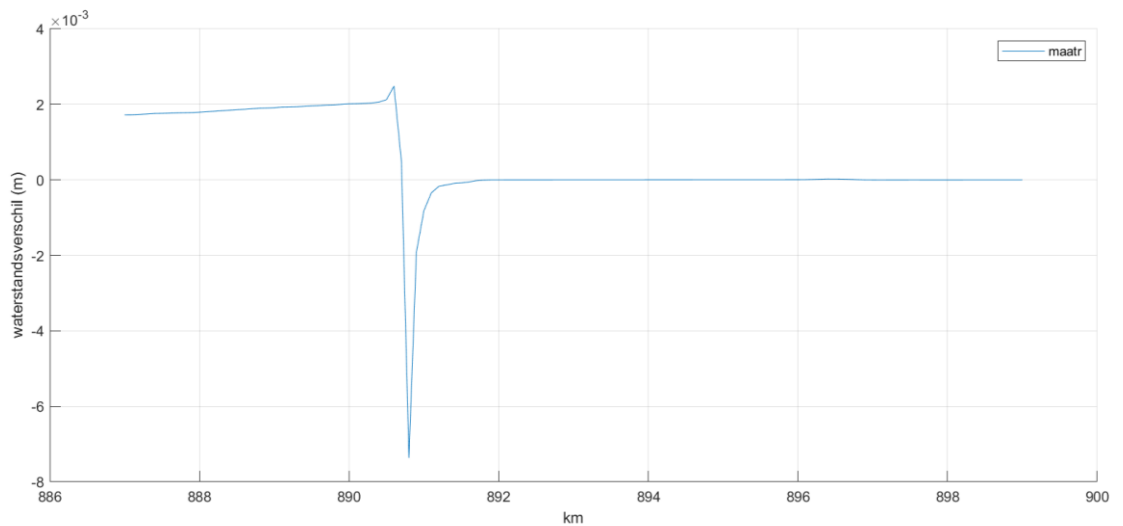
Figuur 45 Dwarsstroomsnelheid op de raaien T1 (links boven) t/m T4 (rechts onder) voor de berekening S₄₀₀₀ met (rood) en zonder (blauw) maatregel.



Figuur 46 Dwarsstroomsnelheid op de raaien T1 (links boven) t/m T4 (rechts onder) voor de berekening S_6000 met (rood) en zonder (blauw) maatregel.

3.13.2 Verandering van de waterstanden

De berekende waterstanden veranderen nauwelijks door de aanpassing van de havenmond. Door de lichte vernauwing van de stroming in het zomerbed wordt de waterstand bij rkm 890,6 met ongeveer 2 mm verhoogd (Figuur 47).



Figuur 47 Invloed van de maatregel op de waterstanden langs de as van de rivier (variant met maatregel-referentie).

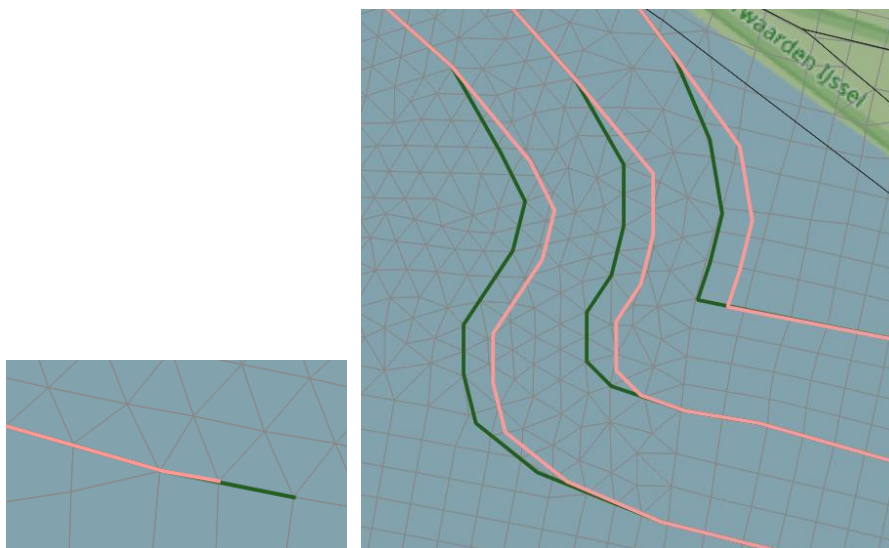
3.13.3 Invloed van een kleine aanpassing aan het ontwerp van de maatregel

Om te verifiëren dat een kleine aanpassing in het ontwerp niet tot grote verschillen in resultaten leidt is de maatregel aangepast zoals getoond in Figuur 48. Figuur 49 laat dit in detail zien met het rooster op de achtergrond. De havendam is met een roostercel ingekort en blijft, omdat de ligging niet is aangepast, goed uitgelijnd met het rooster. De lijnen die het talud beschrijven vallen niet meer perfect op het rooster, dat was immers uitgelijnd op het oorspronkelijke ontwerp.

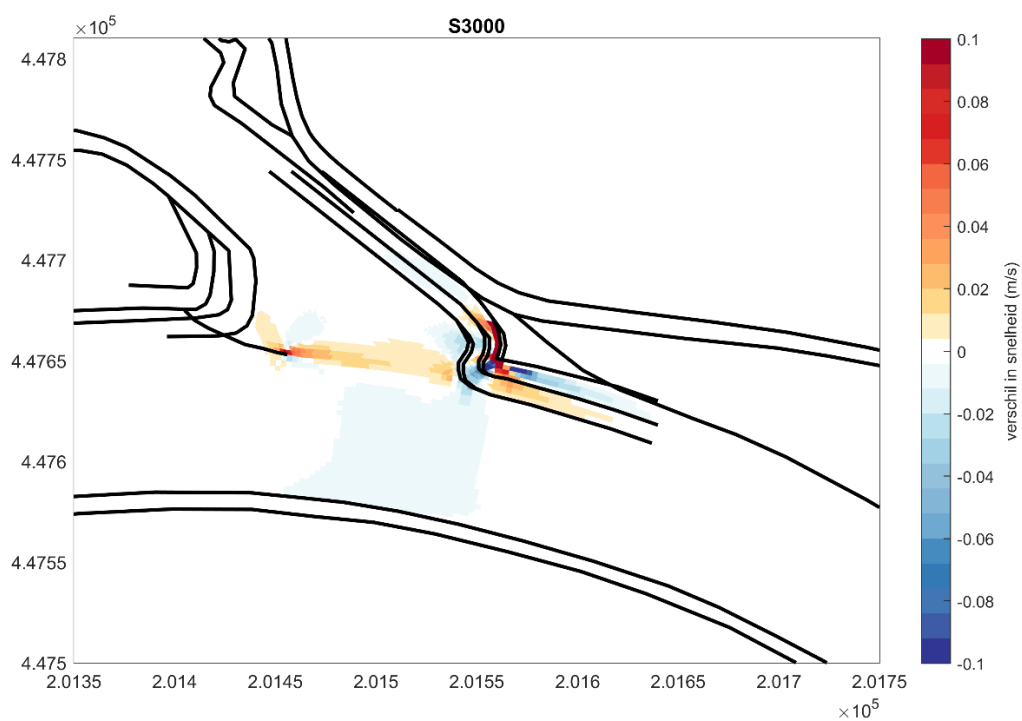
Figuur 50 t/m Figuur 52 laten het verschil in absolute stroomsnelheid zien tussen de berekeningen met aangepast en oorspronkelijk ontwerp. Figuur 53 t/m Figuur 55 vergelijken de stroombeelden. De verschillen zijn zoals verwacht vrij klein. Dit, en de resultaten van Becker (2024), die lieten zien dat het berekende stroombeeld bij roosterresoluties van orde 2,5 en 5,0 m (kantlengte) nauwelijks verschilt, geeft vertrouwen dat het verfijnde detailmodel stabiele resultaten levert en gebruikt kan worden voor de optimalisatie van het ontwerp. Voor toekomstige ontwerpvarianten kan worden overwogen om het rooster opnieuw uit te lijnen met het aangepaste ontwerp. In voorliggende studie is geprobeerd om bij het maken van het verfijnde rooster al rekening te houden met verschillende ontwerpvarianten, maar er werd duidelijk dat niet alle varianten met perfecte uitlijning in één rooster kunnen passen.



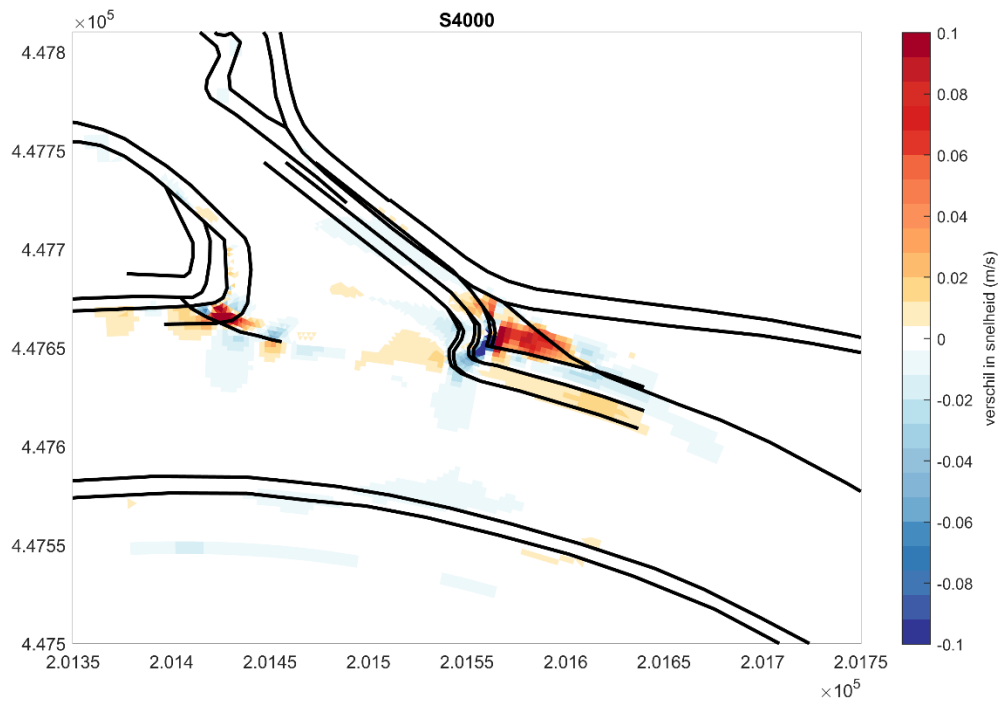
Figuur 48 Aangepaste maatregel (roze) en oorspronkelijk ontwerp (groen). Links in beeld is de havendam te zien, rechts de hoogtelijnen die het nieuwe talud beschrijven.



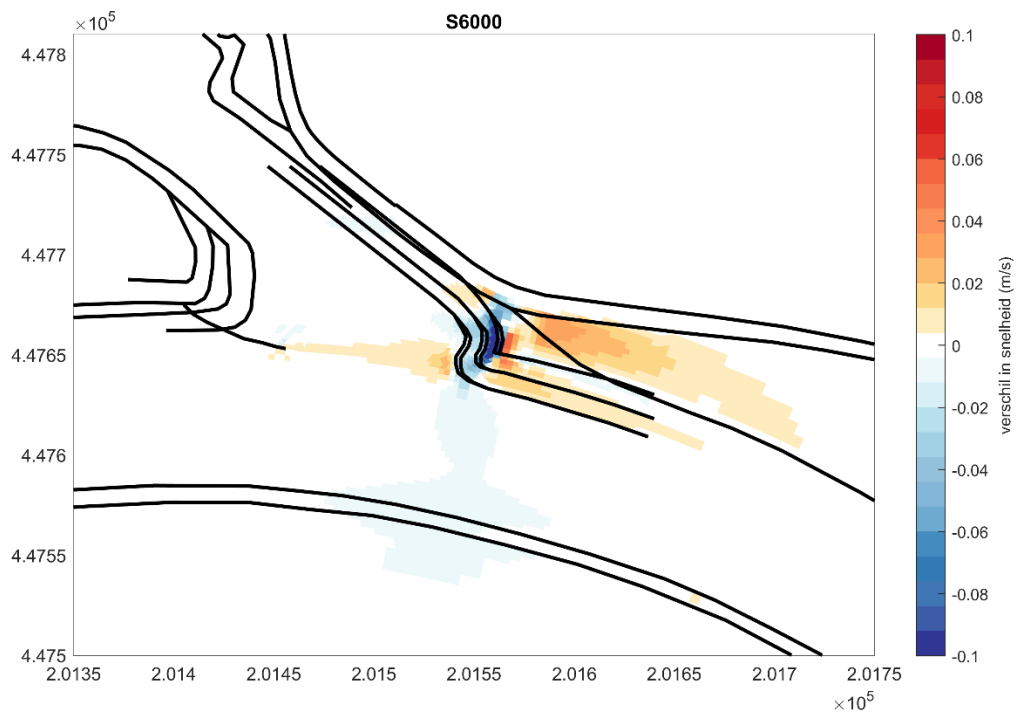
Figuur 49 Details van nieuw ontwerp met het rooster.



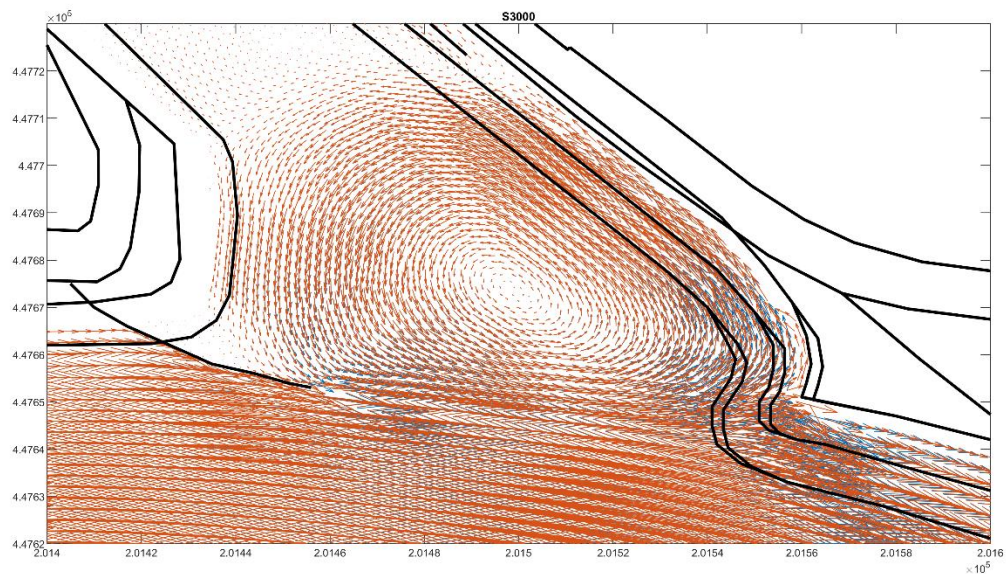
Figuur 50 Verschil in stroomsnelheid (magnitude) tussen de berekeningen S_3000 met aangepaste en oorspronkelijke maatregel (aangepast-oorspronkelijk). De zwarte lijnen geven de contouren van de oorspronkelijke en aangepaste maatregel weer.



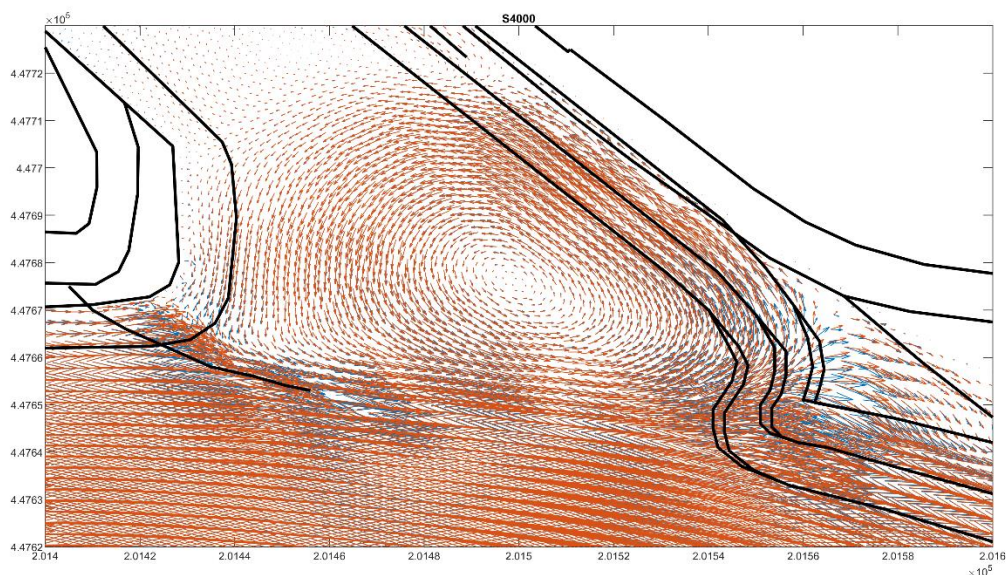
Figuur 51 Verschil in stroomsnelheid (magnitude) tussen de berekeningen S_4000 met aangepaste en oorspronkelijke maatregel (aangepast-oorspronkelijk). De zwarte lijnen geven de contouren van de oorspronkelijke en aangepaste maatregel weer.



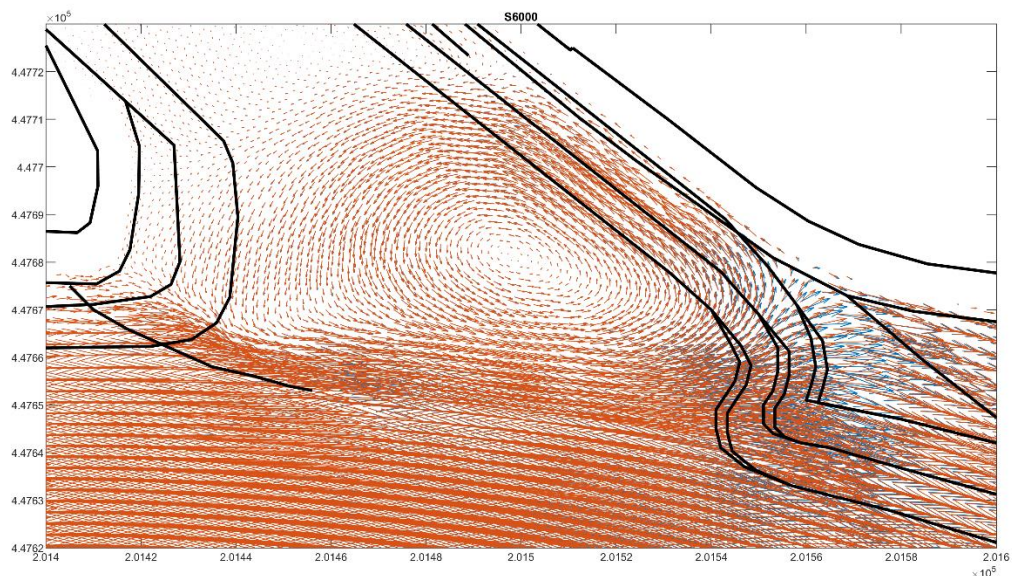
Figuur 52 Verschil in stroomsnelheid (magnitude) tussen de berekeningen S_6000 met aangepaste en oorspronkelijke maatregel (aangepast-oorspronkelijk). De zwarte lijnen geven de contouren van de oorspronkelijke en aangepaste maatregel weer.



Figuur 53 Berekend stroombeeld in de haven bij De Steeg voor S_3000. Blauw: oorspronkelijke maatregel; rood: aangepaste maatregel. De zwarte lijnen geven de contouren van de oorspronkelijke en aangepaste maatregel weer.



Figuur 54 Berekend stroombeeld in de haven bij De Steeg voor S_4000. Blauw: oorspronkelijke maatregel; rood: aangepaste maatregel. De zwarte lijnen geven de contouren van de oorspronkelijke en aangepaste maatregel weer.



Figuur 55 Berekend stroombeeld in de haven bij De Steeg voor S_6000. Blauw: oorspronkelijke maatregel; rood: aangepaste maatregel. De zwarte lijnen geven de contouren van de oorspronkelijke en aangepaste maatregel weer.

4 Stappenplan voor toepassingen

Op basis van de eisen aan de modellering (hoofdstuk 2) en de ervaringen met de eerste toepassing bij De Steeg (hoofdstuk 3) is een stappenplan voor volgende toepassingen opgesteld. Omdat de ervaring met dit soort toepassingen in D-HYDRO tot nu toe beperkt is, wordt aanbevolen om de aanpak ook bij de volgende toepassing(en) grondig te toetsen, en bij deze toepassing(en) onderzoek te doen naar de gevoeligheid van resultaten voor een aantal keuzes.

Het stappenplan is:

1. Verzamelen van informatie over
 - stroombeelden en bodemligging in de havenmond en langs de oever voor de huidige situatie → analyse relevante processen in de huidige situatie, als basis voor de modelkalibratie/validatie
 - de geplande veranderingen: geometrie nieuwe constructies (ligging, hoogte, taluds, ...)
2. Keuze 6^e generatie basisschematisatie (Baseline)

De toepassing van een verfijnd detailmodel valt over het algemeen in een proces van vergunningverlening. Het zou wenselijk zijn om met de schematisatiekeuze zo veel mogelijk aan te sluiten bij de schematisatie die voor de overige stappen in dit proces wordt gebruikt. Dat is normaalgesproken een zogenaamde “beno”-schematisatie, waarin ook reeds verleende maar nog niet uitgevoerde vergunningen en planmaatregelen zijn opgenomen. Voor de kalibratie/validatie van het detailmodel moet echter worden vergeleken met geobserveerde stroombeelden (zie stap 11). Daarom moet de modelschematisatie zo goed mogelijk aansluiten bij de toestand waarvoor de metingen gelden. Per toepassing moet worden bepaald of het “beno”-model daarvoor geschikt is, of dat beter een actuele schematisatie (“j”-schematisatie) gebruikt kan worden.
3. Keuze standaardsommen die relevant zijn voor de vraagstelling en dus doorgerekend moeten worden met het verfijnde model.
4. Definitie interessegebied en modelgebied

Op basis van de resultaten van het totaalmodel (of deelmodel) voor de gekozen standaardsommen kan worden bepaald hoe ver de modelranden van het interessegebied verwijderd moeten liggen en welke uiterwaarden tot hoe ver in het model moeten zitten. De precieze keuze voor de locatie van randen staat beschreven in stap 9.
5. Keuze aantal dimensies verfijnd model (over het algemeen 2D)
6. Keuzes roosterverfijning
 - in welk gebied?
 - en tot welke resolutie?
 - driehoeken of curvilineair? Gebaseerd op de resultaten voor de haven bij De Steeg gaat de voorkeur uit naar een driehoeksrooster.
 - uitlijnen aan welke lijnen?

- Hoe en waar kunnen overgangen in resolutie² en van curvilineair naar driehoeken het beste gemaakt worden?
7. Maken roosteruitsnede en lokale verfijning. Eventueel afknippen modelgebied achter de zomerkades (maar niet bij aangetakte plassen die meestromen), zie paragraaf 2.7. Uittlijnen langs relevante constructies, oevertaluds, etc.. Bij de lokale verfijning kan al zo veel mogelijk rekening worden gehouden met goede uitlijning van te onderzoeken ontwerpvarianten.
 8. Baseline-referentie in interessegebied (het gebied met duidelijk verfijnd rooster) zo nodig aanpassen en afleiden van de invoer voor het D-HYDRO-model
 - constructies zoals dammen en kribben ook in bodemhoogte schematiseren waar mogelijk
 - op die locaties eventueel de overlatten verwijderen (als het rooster goed is uitgelijnd met de kruin van de constructie)
 - routes en events voor de grotere brugpijlers verwijderen en vervangen door hoogwatervrije terreinen (flow_blocking_polygons in Baseline) of overlatten
 - eventueel de ruwheid van de plas/haven aanpassen om een scherpe overgang in ruwheid naar het zomerbed te voorkomen

N.B.: Buiten het interessegebied, waar verder met een 40m- of 20m-rooster wordt gewerkt, hoeft de Baseline-schematisatie niet te worden aangepast.
 9. Definitie ligging open randen en afleiden randvoorwaarden verfijnd model uit het referentiemodel
 - gunstige locaties voor de modelranden boven- en benedenstrooms zoeken, op voldoende afstand van het interessegebied, en bij voorkeur op een smal riviertraject met stroombanen loodrecht op de randlocatie (geen neren over de rand heen)
 - indien nodig cross-sections en/of waterstandspunten langs die randen definiëren en in het referentiemodel zetten
 - de gekozen standaardsommen uitvoeren met het referentiemodel (totaalmodel)
 - resultaten op de nieuwe cross-sections en waterstandspunten verwerken naar randvoorwaarden voor het verfijnde model
 10. In het geval van 3D-berekeningen: keuze aantal lagen in de verticaal (laagtype kan over het algemeen sigma-lagen zijn) en mogelijk aanvullende numerieke parameters
 11. Aanpassen en validatie referentiemodel
 - analyse van de gevoeligheid van de neervorming voor de achtergrondviscositeit en de C_s -waarde
 - analyse van de invloed van overige modelparameters (bijvoorbeeld ruwheid van de haven, wandruwheid, schematisatie van stromingsbepalende elementen in het gebied)
 - keuze en validatie van de achtergrondviscositeit en C_s -waarde en zo nodig de overige modelparameters aan de hand van de plausibiliteit van de neervorming in de haven(mond) door te vergelijken met observaties over de neervorming
 - validatie waterstanden en verhang aan de hand van de resultaten van het 40m- of 20m-model, desnoods aanpassen van de zomerbedruwheid

De keuze van zomerbedruwheid, viscositeit en overige modelparameters moet in een iteratief proces worden uitgevoerd, omdat deze parameters elkaar beïnvloeden.

² Er kan ook overwogen worden om het korte model geheel te verfijnen naar de gewenste resolutie. Dit is een afweging tussen de toenemende rekentijden en het aanvullende handwerk voor het aanpassen van het rooster.

12. Baseline-variant maken (toevoegen verandering in havenmond) en invoer voor D-HYDRO afleiden. Let daarbij op de manier van schematiseren van constructies en brugpijlers, zie punt 8.
13. Uitvoeren berekeningen met het model van de referentie en de variant en analyse van de resultaten. Beoordeel daarbij ook vanuit je eigen kennis de plausibiliteit van het resultaat. Voor de manoeuvreerbaarheid gaat het dan om het absolute stroombeeld, voor de morfologie (ook) om de verschillen met de referentie.
14. Als verschillende ontwerpvarianten moeten worden onderzocht kan worden overwogen om het verfijnde deel van het rooster lokaal opnieuw aan een aangepast ontwerp uit te lijnen. Het is echter niet duidelijk of de winst in nauwkeurigheid van het resultaat opweegt tegen de moeilijkere vergelijkbaarheid van resultaten voor verschillende ontwerpvarianten met verschillende roosters. Naar verwachting is de winst in nauwkeurigheid bovendien kleiner dan de algemene onzekerheid in de modelresultaten (afwijking tussen modelresultaat en werkelijkheid). Dit zal echter per geval beoordeeld moeten worden.

5 Literatuur

Becker, A. (2024): Advies modellering oeveeraanpassingen. Deltares-memo 11209261-006-ZWS-0001.

Kosters, A. (2023): Roosteraanpassing in het proces van vergunningverlening. Deltares-memo 11209233-003-ZWS-0002, 20 november 2023.

Minns, T., A. Spruyt, D. Kerkhoven (2022): Specificaties zesde-generatie modellen met D-HYDRO. Generieke technische en functionele specificaties (v1-2023). Preliminary version, 22 december 2022.

Platzek, F., Patzwahl, R. (2015). Advection and grid effects in river computations: selling some error. Presentatie 12th UnTRIM User Workshop, 19 mei 2015.

Van Kester, J.A.Th.M., R.E. Uittenbogaard (2003): Nader onderzoek overlaatroutines WAQUA. WL|Delft Hydraulics rapport Z3407, september 2003.

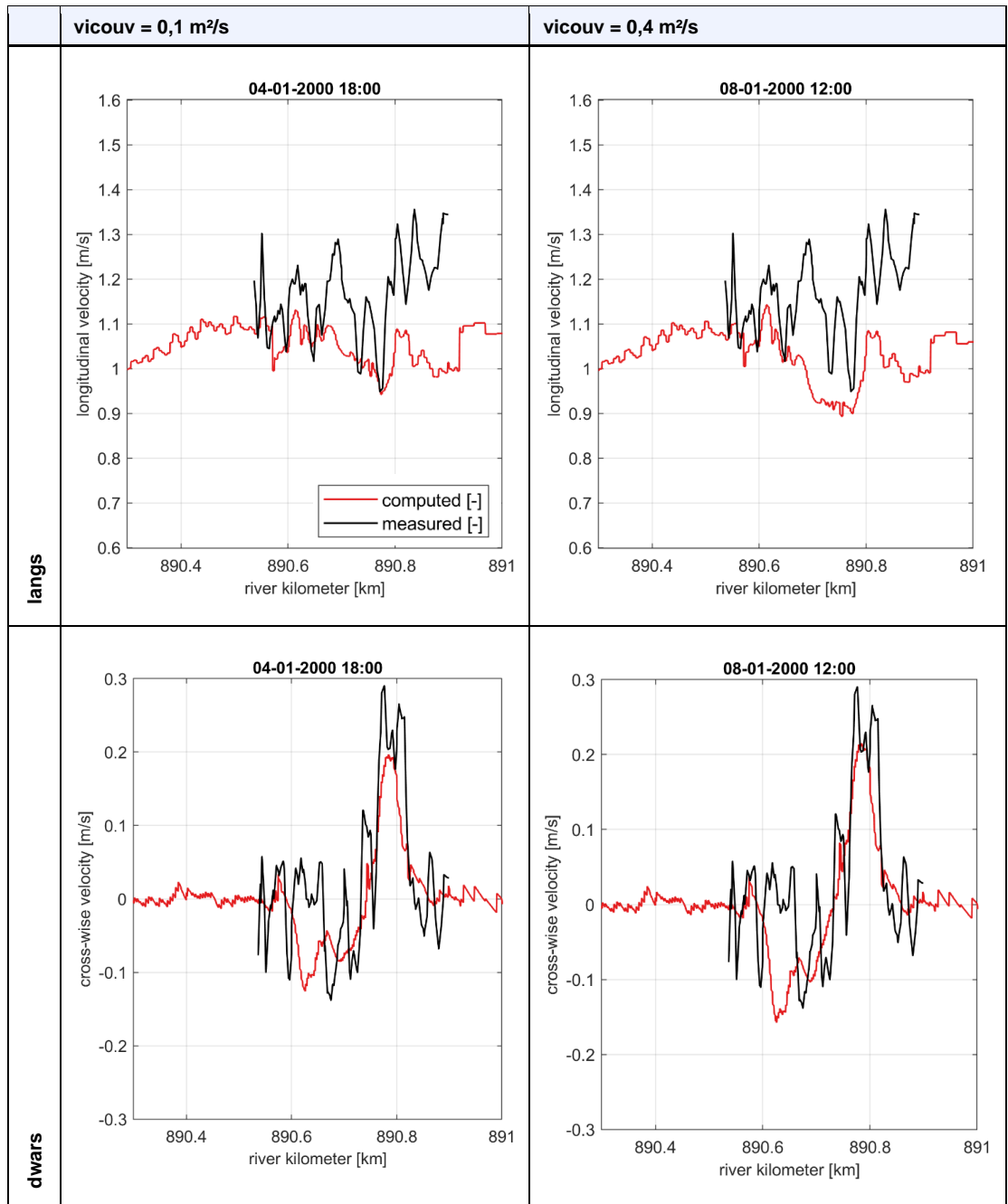
Van Schijndel, S.A.H. (1999): 3D rekenen rondom constructies. Berekeningen met het integrale modelsysteem Delft3D.

Yossef, M. F. M. (2005). Morphodynamics of rivers with groynes. (Ook verschenen als proefschrift Technische Universiteit Delft, 2005 PhD), DUP Science, Delft.

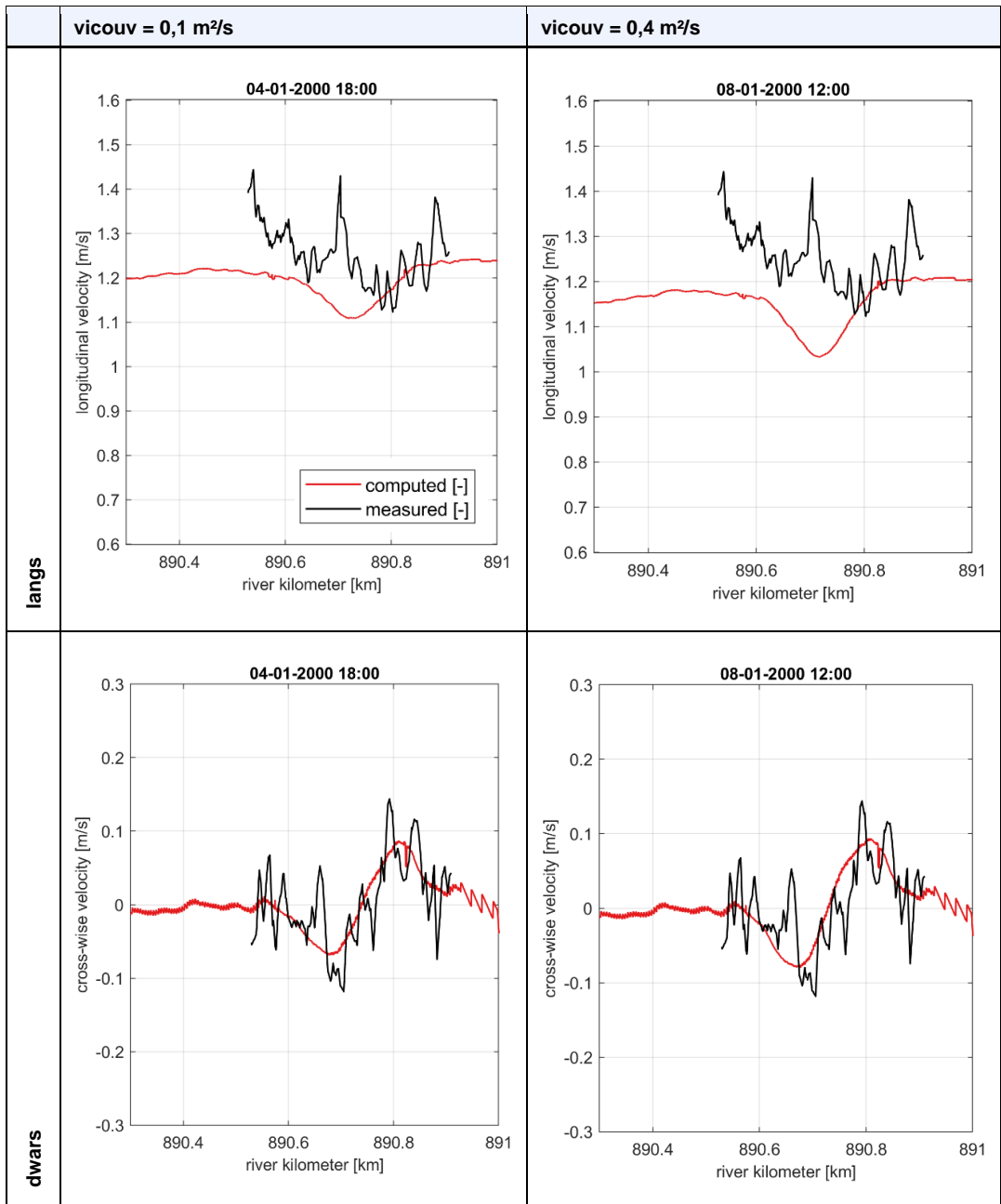
A Validatie stroomsnelheden langs raaien

A.1 Langsraaien in het zomerbed

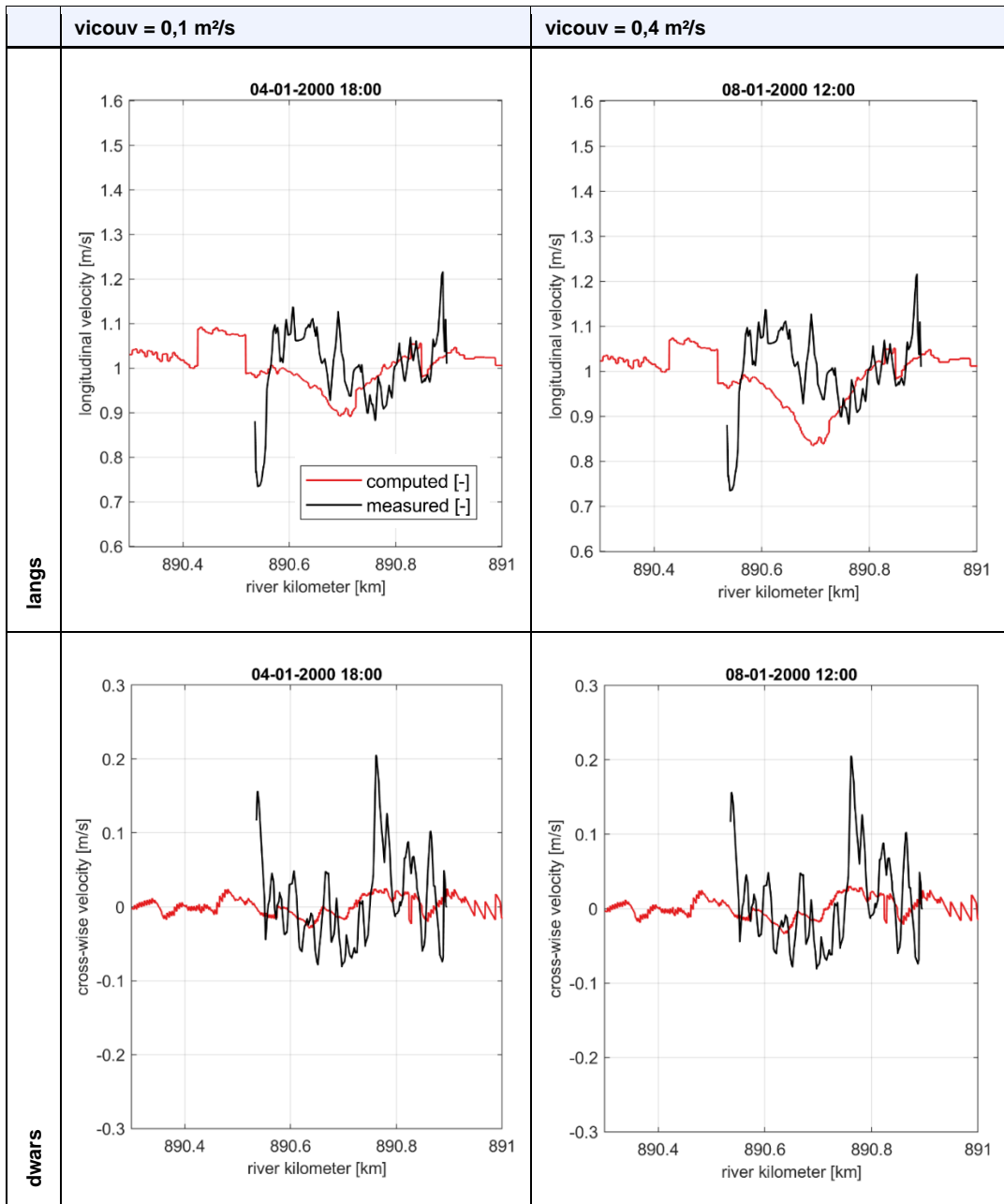
A.1.1 Berekening S₃₀₀₀ vs. meting april 2024



Figuur 56 Stroomsnelheden langs de raai L3 in langs- en dwarsrichting. Berekend S₃₀₀₀ voor verschillende achtergrondviscositeit (rood) en gemeten in april 2024.

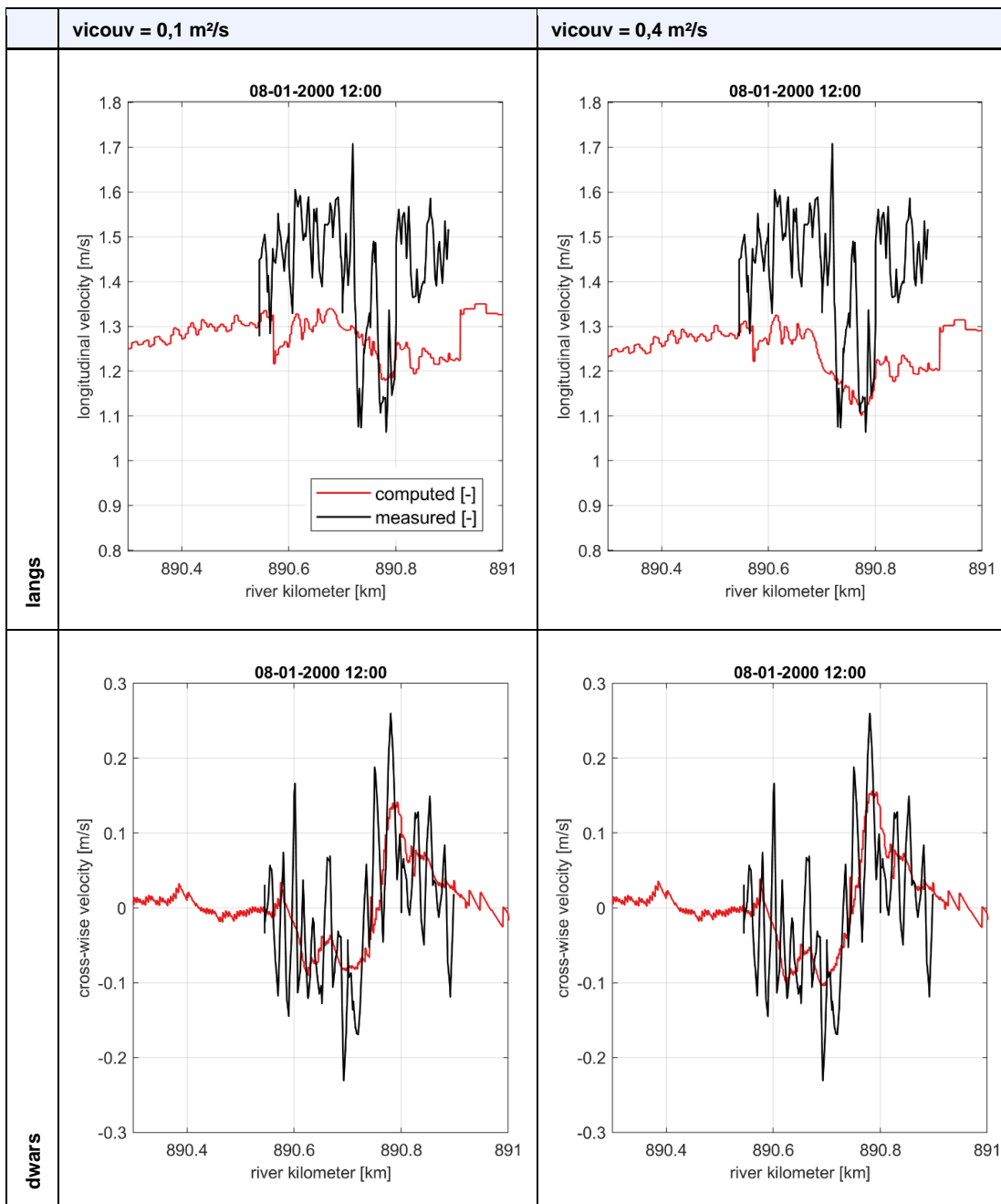


Figuur 57 Stroomsnelheden langs de as van de rivier in langs- en dwarsrichting. Berekend S_3000 voor verschillende achtergrondviscositeit (rood) en gemeten in april 2024.

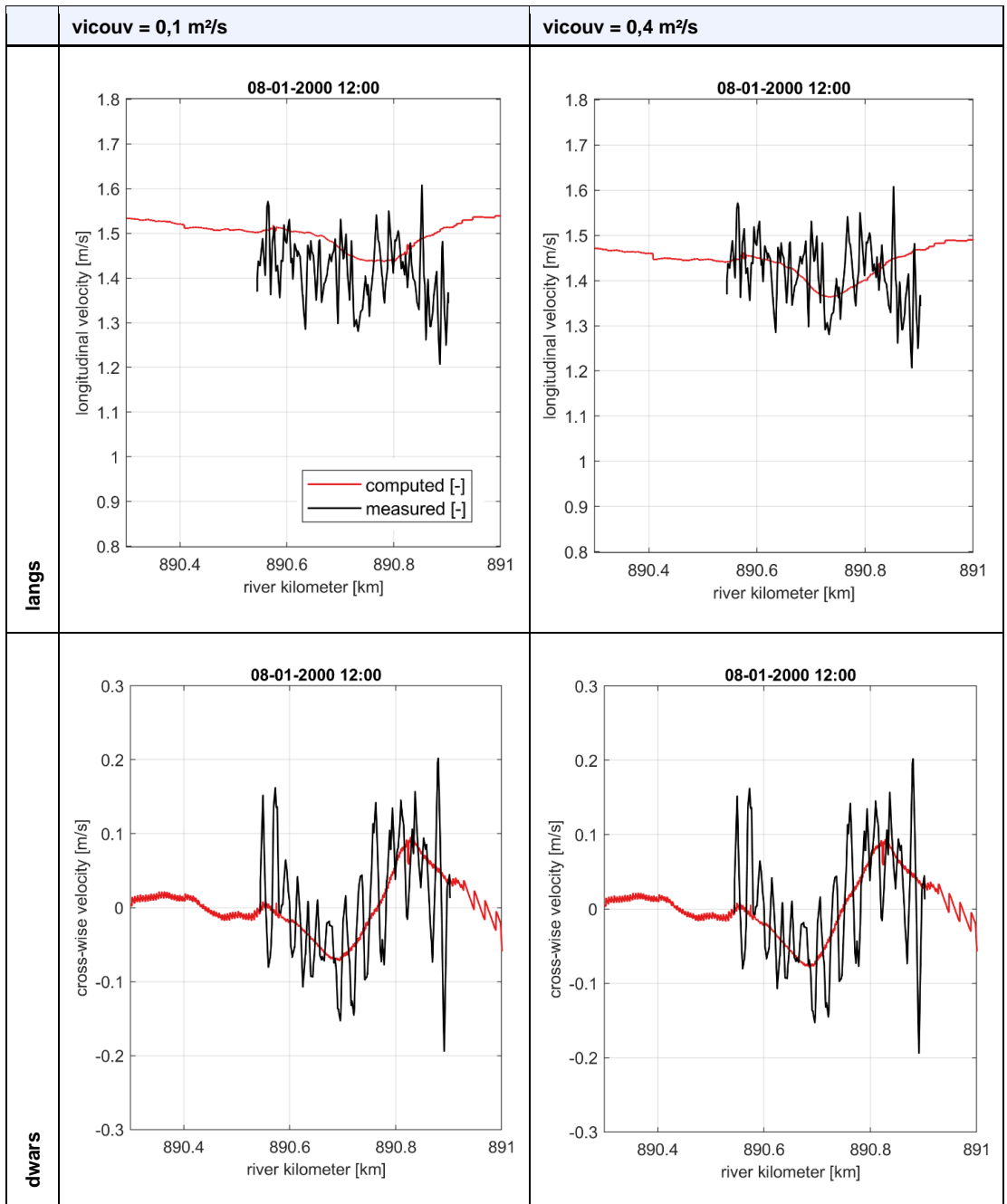


Figuur 58 Stroomsnelheden langs de raai R3 in langs- en dwarsrichting. Berekend S_3000 voor verschillende achtergrondviscositeit (rood) en gemeten in april 2024.

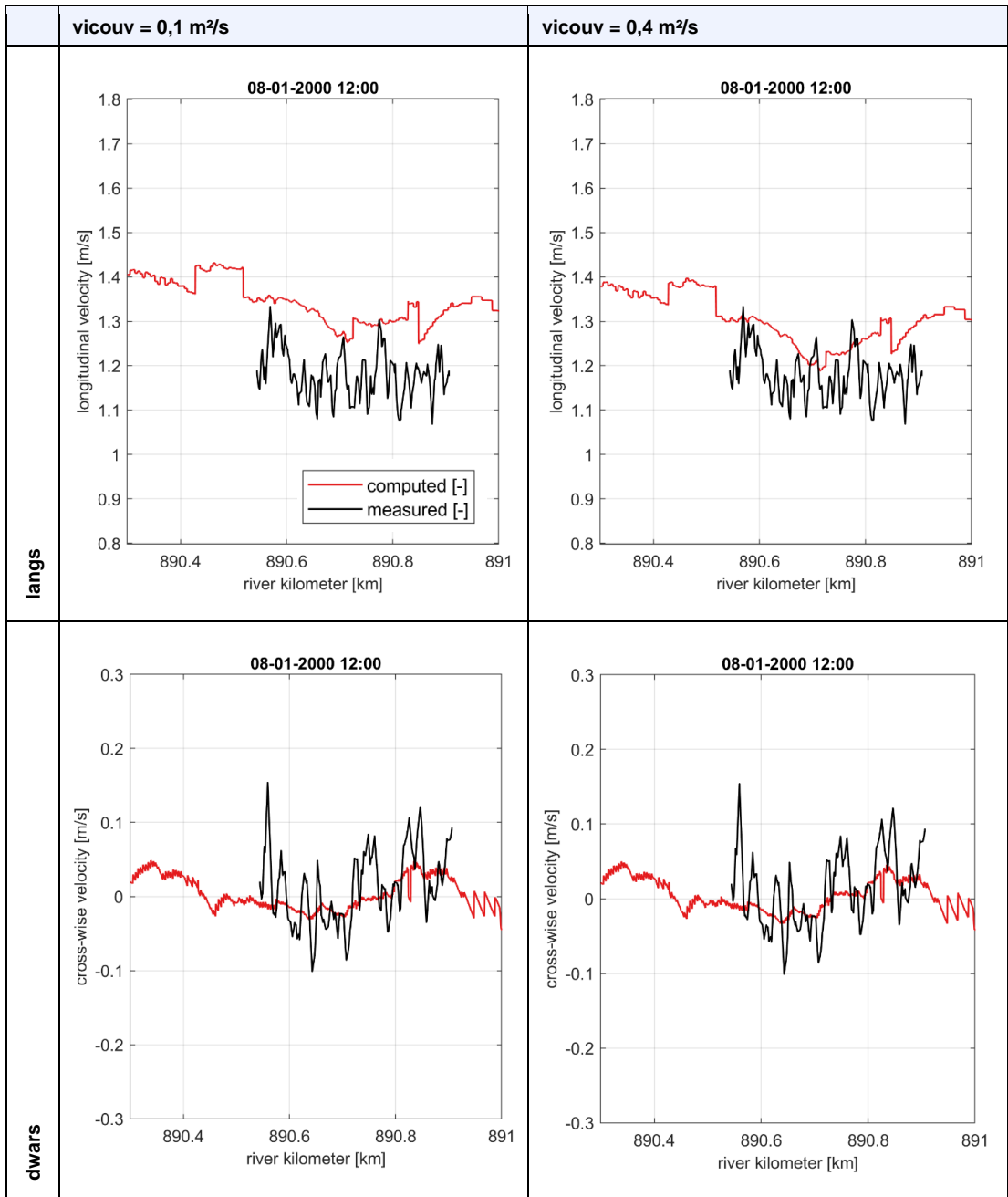
A.1.2 Berekening S_6000 vs. meting juni 2024



Figuur 59 Stroomsnelheden langs de raai L3 in langs- en dwarsrichting. Berekend S_6000 voor verschillende achtergrondviscositeit (rood) en gemeten in juni 2024.



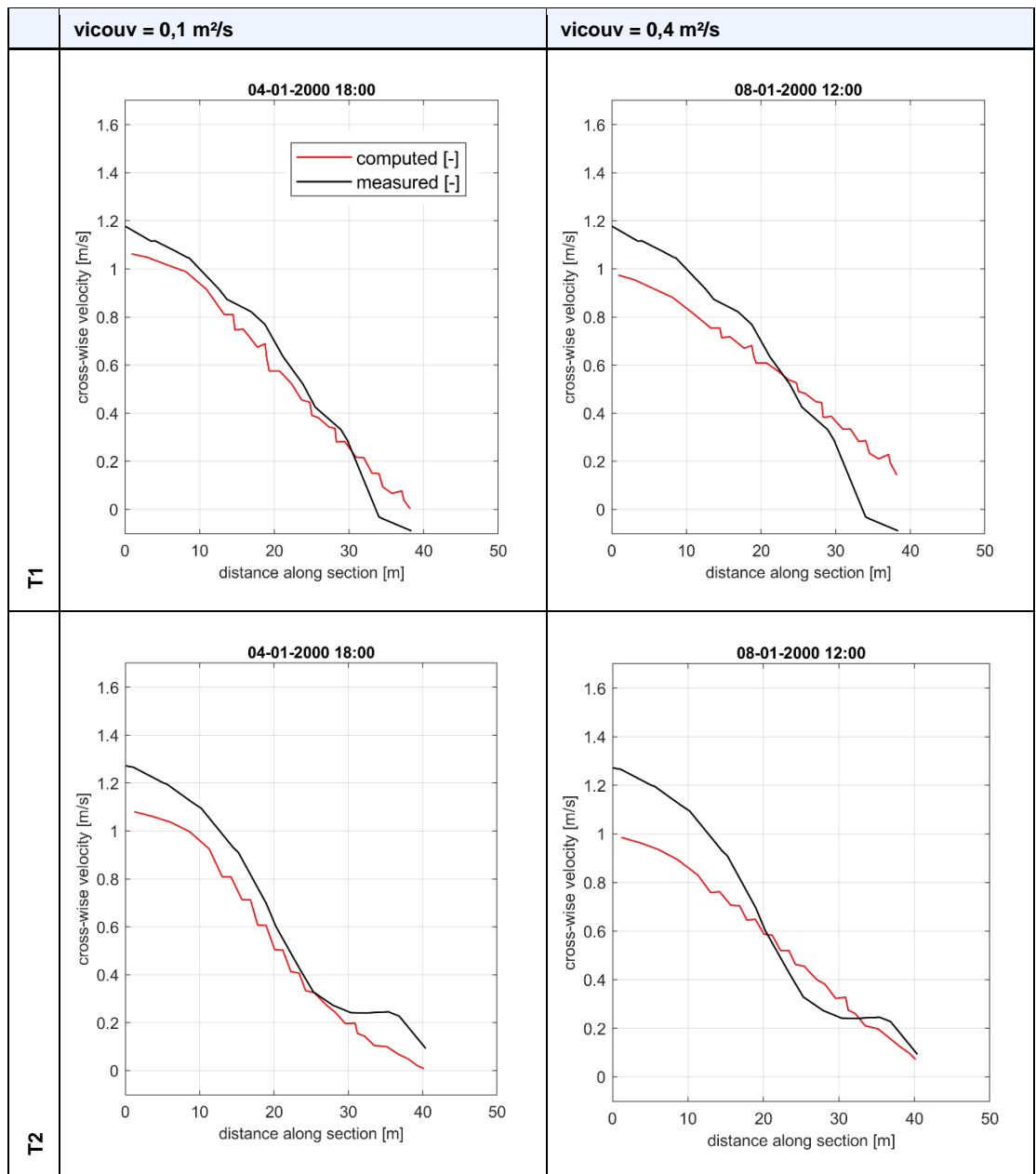
Figuur 60 Stroomsnelheden langs de as van de rivier in langs- en dwarsrichting. Berekend S_6000 voor verschillende achtergrondviscositeit (rood) en gemeten in juni 2024.

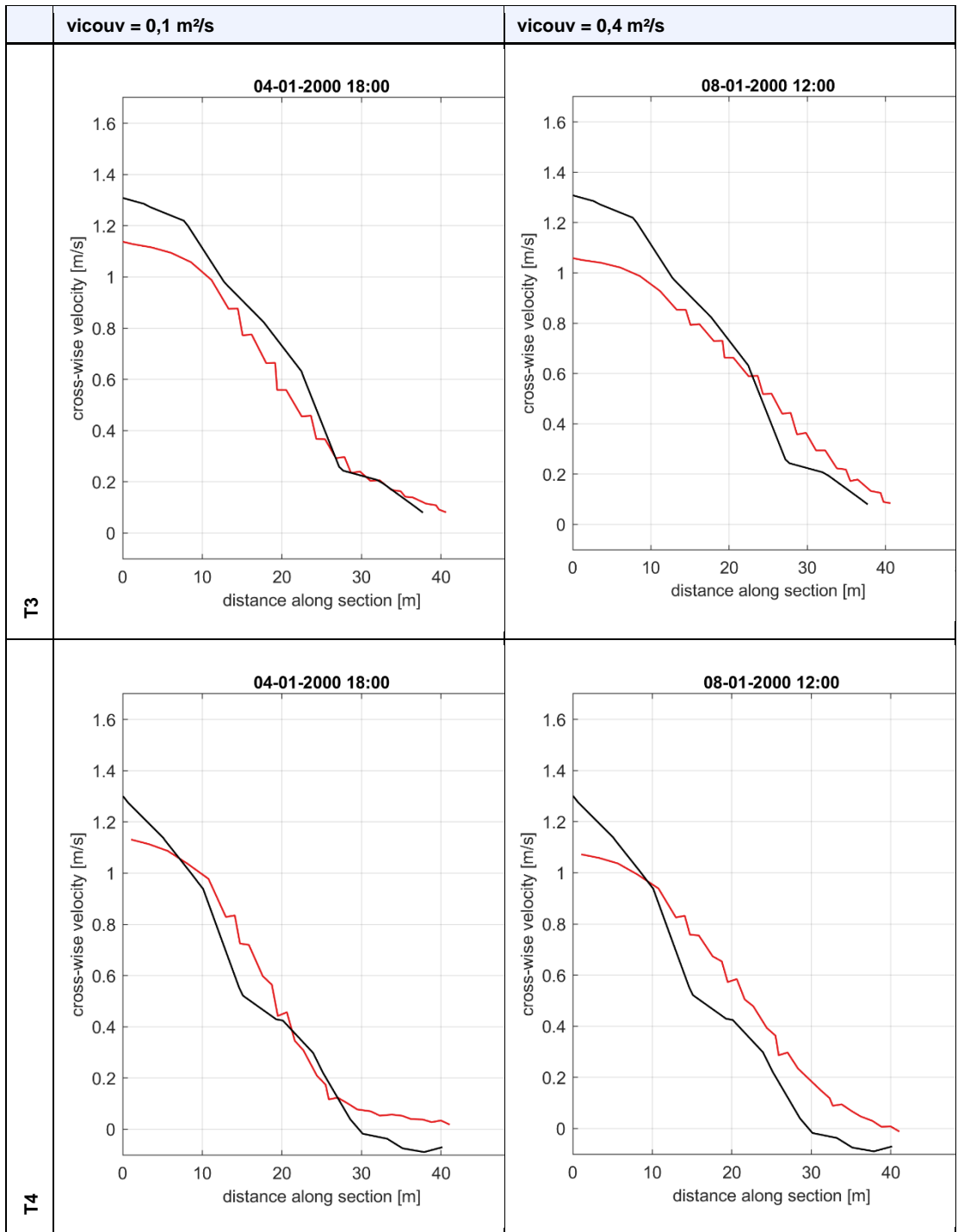


Figuur 61 Stroomsnelheden langs de raai R3 in langs- en dwarsrichting. Berekend S_{6000} voor verschillende achtergrondviscositeit (rood) en gemeten in juni 2024.

A.2 Dwarsraaien in de haveningang

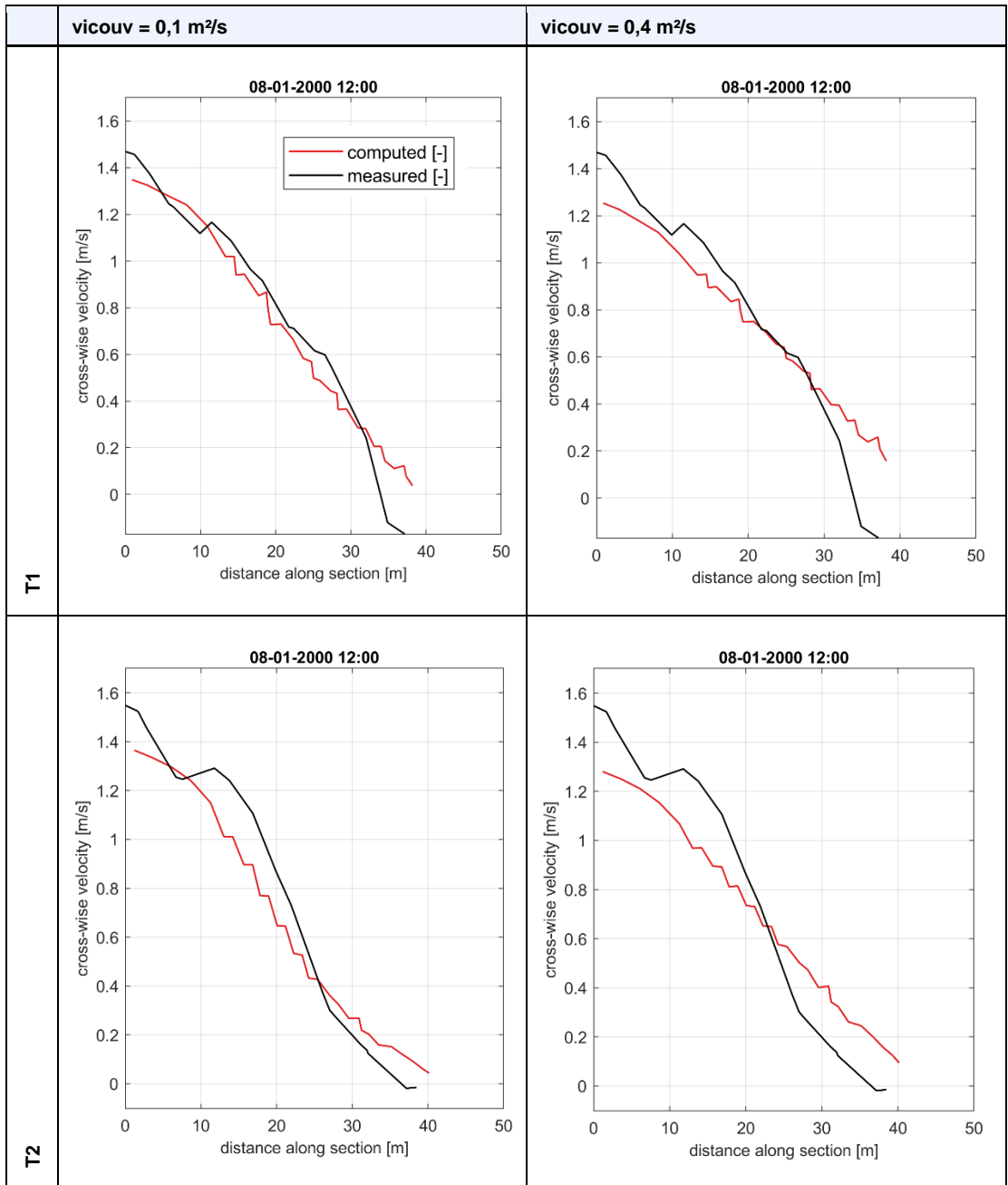
A.2.1 Berekening S_3000 vs. meting april 2024

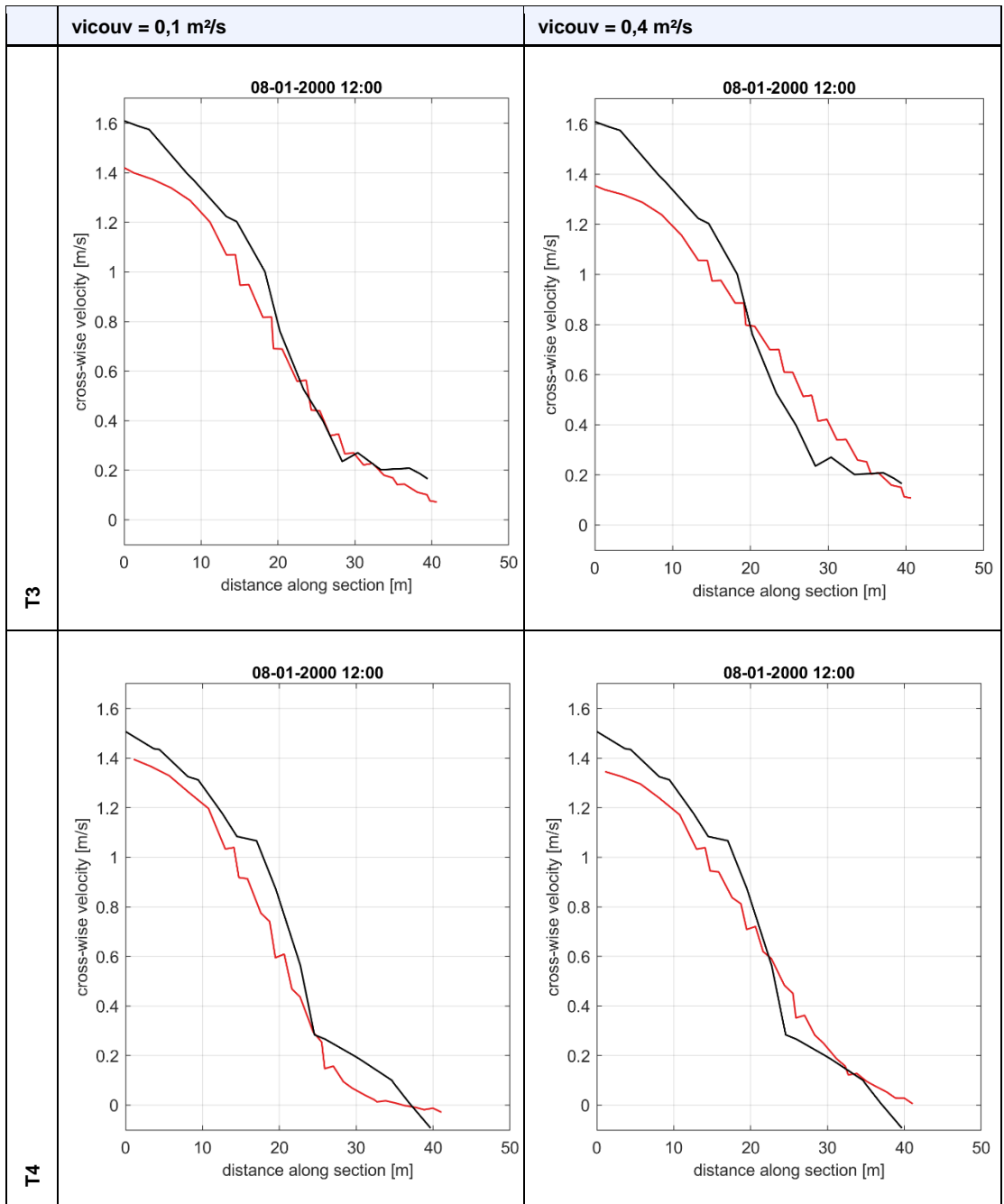




Figuur 62 Dwarsstroomsnelheden langs de dwarsraaien. Berekend S_{3000} voor verschillende achtergrondviscositeit (rood) en gemeten in april 2024.

A.2.2 Berekening S_6000 vs. meting juni 2024

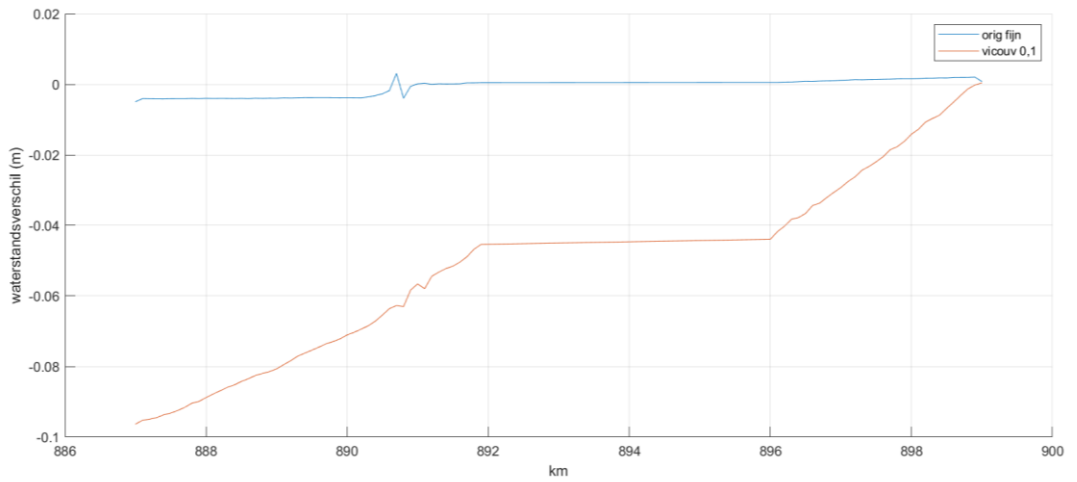
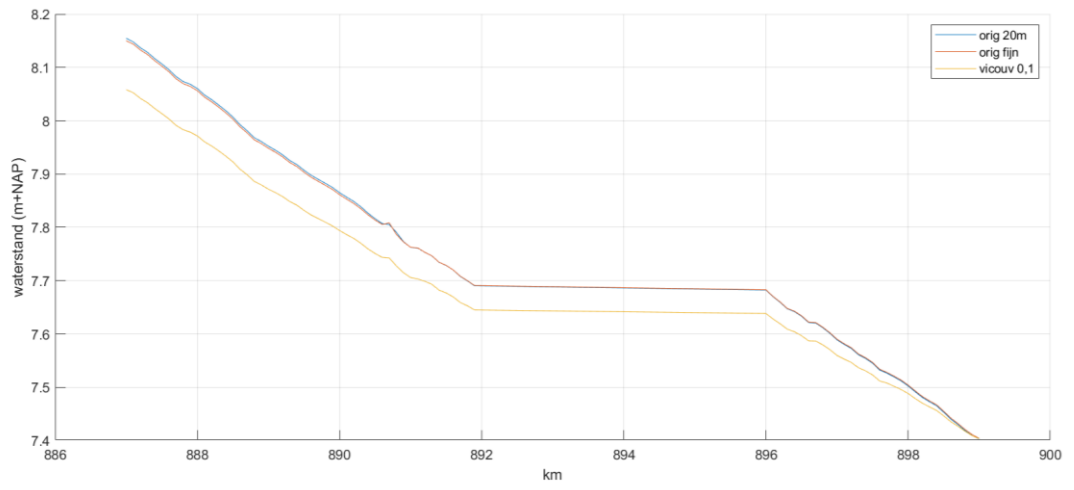


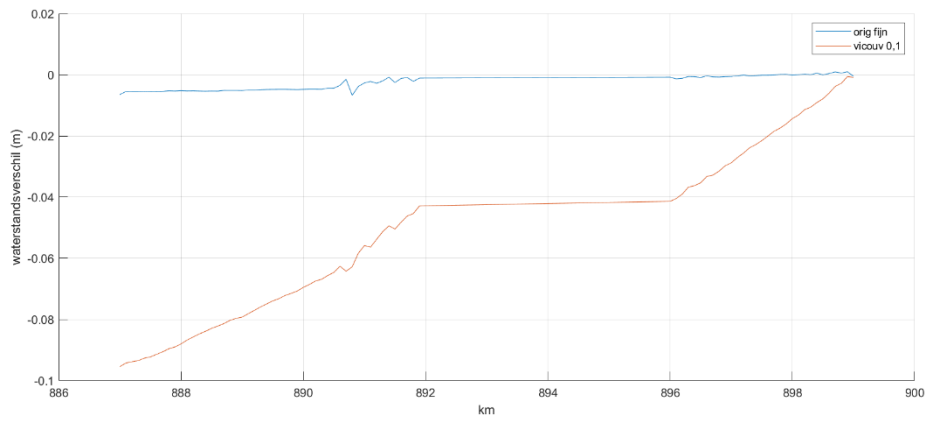
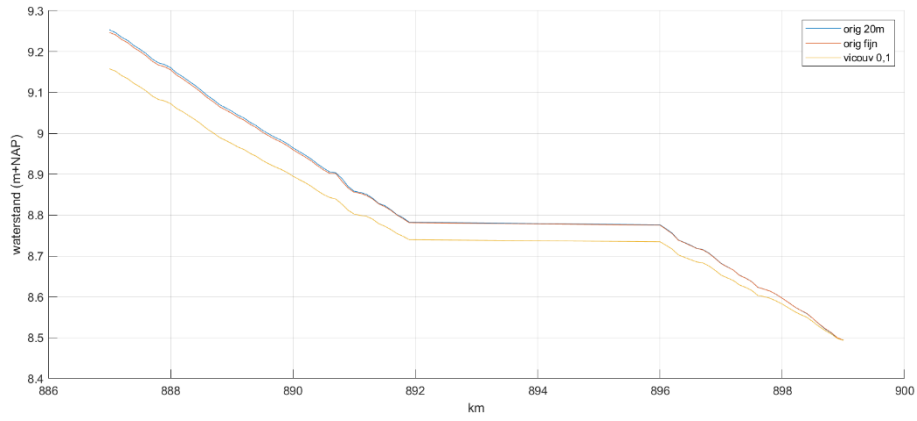


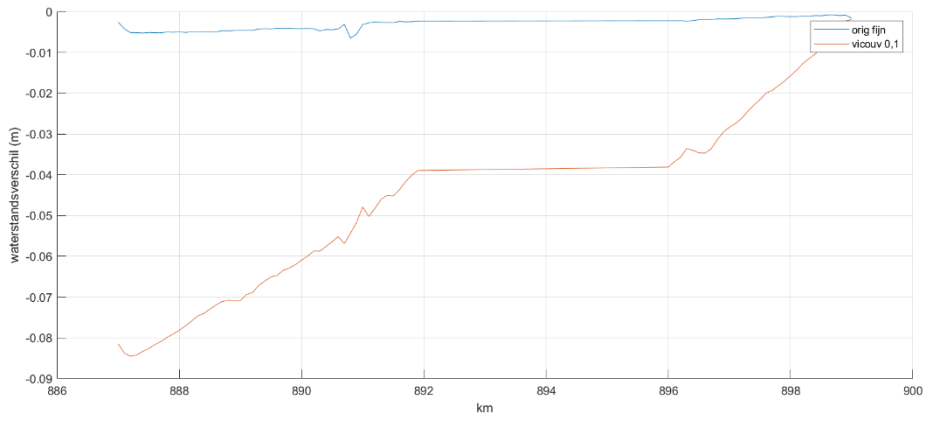
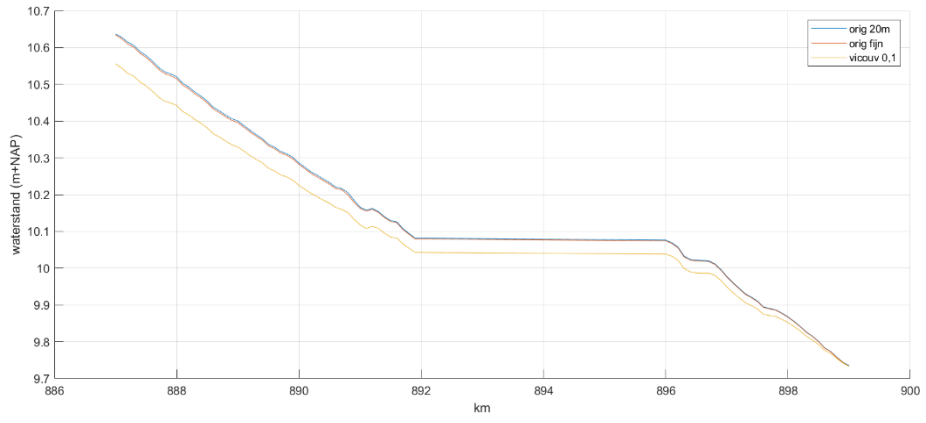
Figuur 63 Dwarsstroomsnelheden langs de dwarsraaien. Berekend S_{6000} voor verschillende achtergrondviscositeit (rood) en gemeten in juni 2024.

B Validatie waterstand en verhang

B.1 S_3000



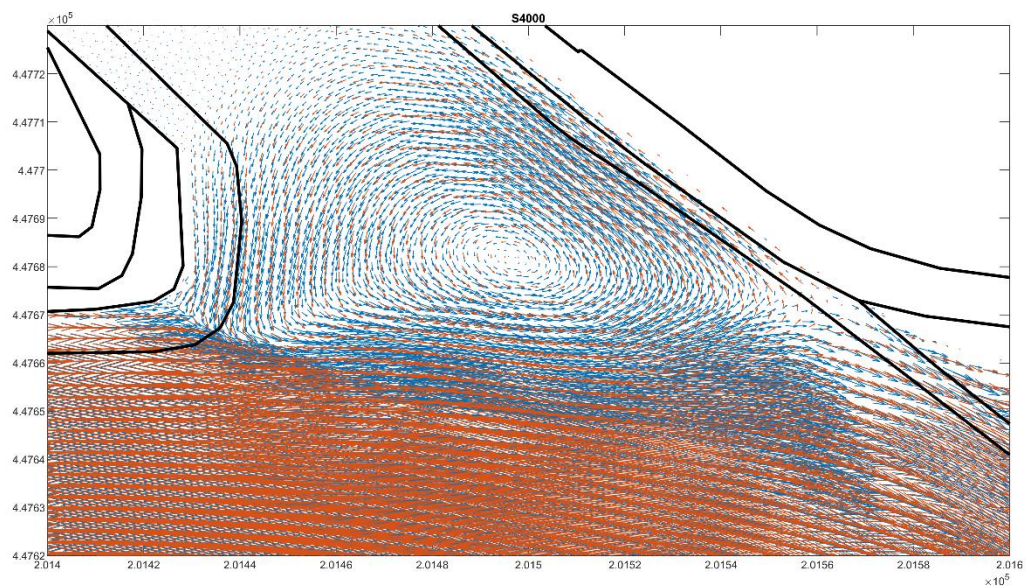
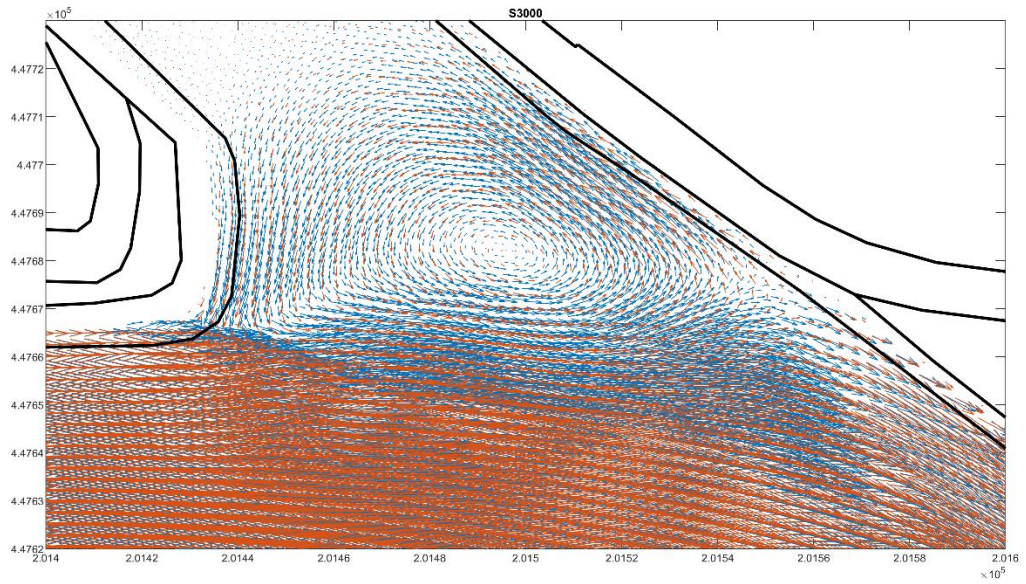


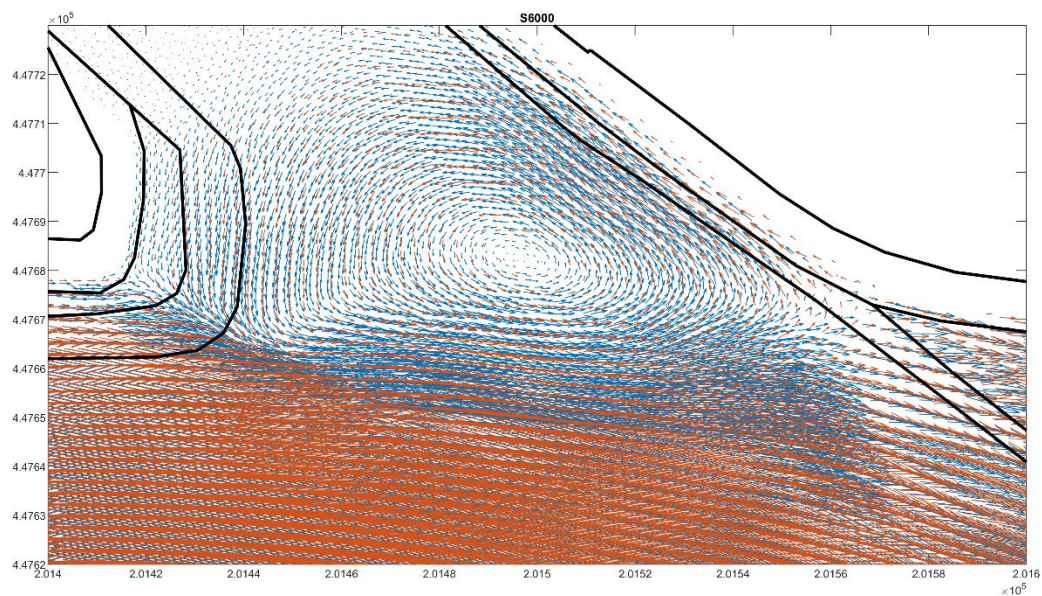


C Vergelijking curvilineair en driehoeksrooster

C.1 Wervelviscositeit $\nu_{\text{t}} = 0,4 \text{ m}^2/\text{s}$

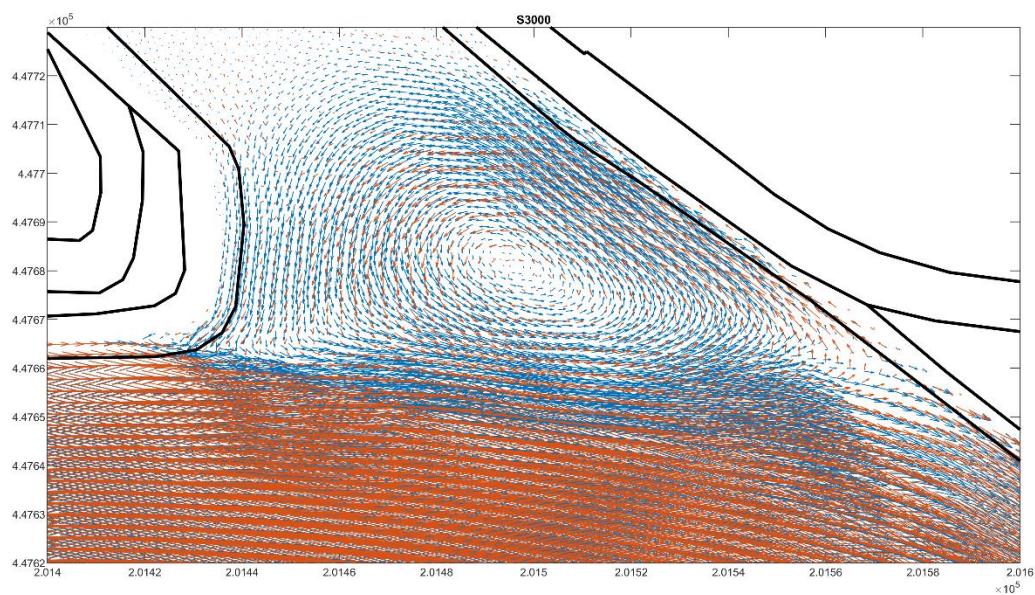
De rode pijltjes geven het stroombeeld van het model met curvilineair rooster weer, de blauwe pijlen het stroombeeld van het model met driehoeksrooster.

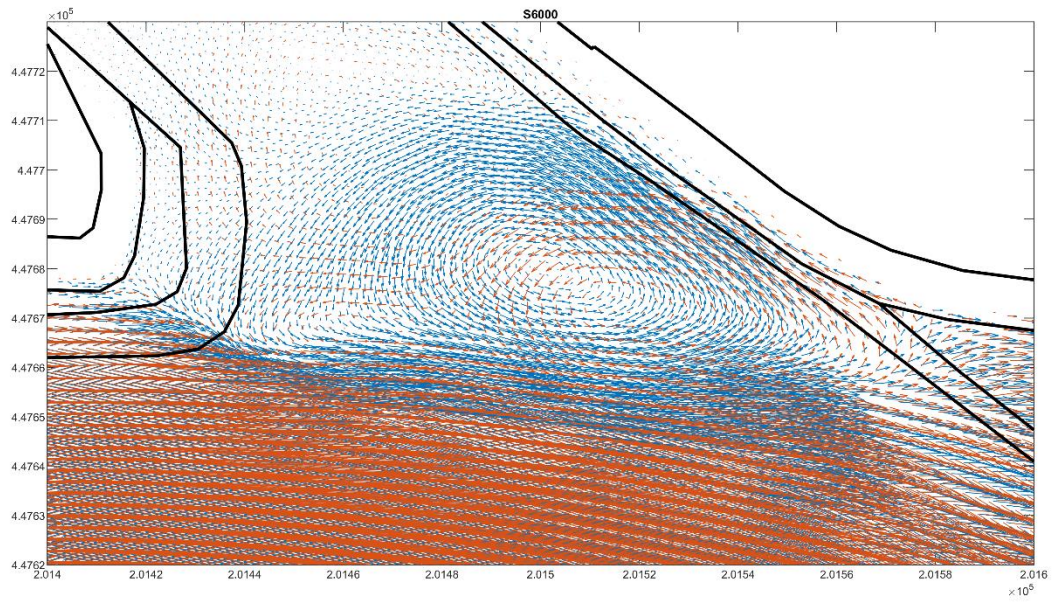
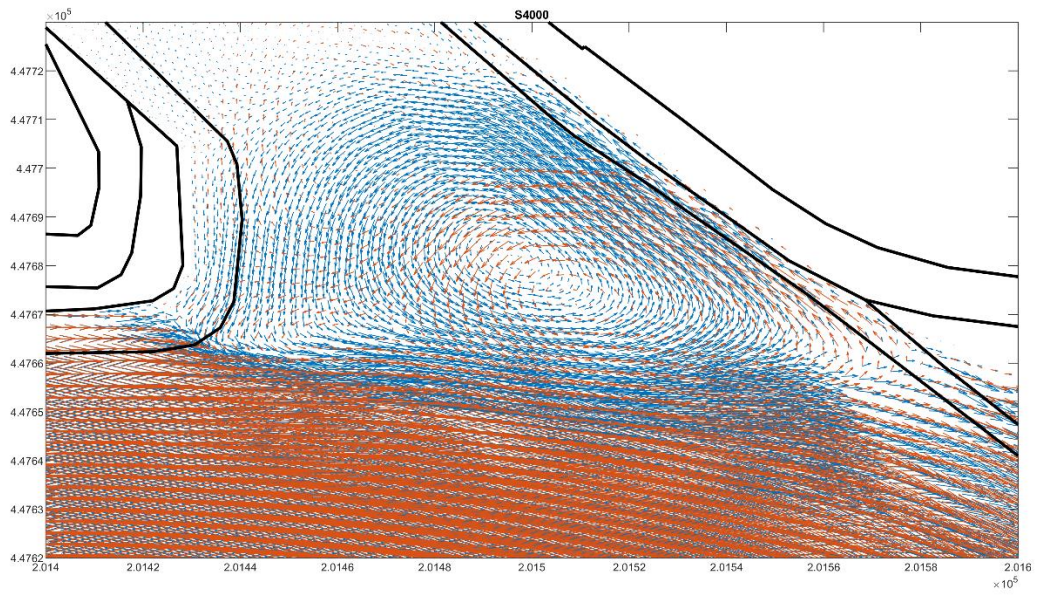




C.2 Wervelviscositeit $\nu_{\text{t}} = 0,1 \text{ m}^2/\text{s}$

De rode pijltjes geven het stroombeeld van het model met curvilineair rooster weer, de blauwe pijlen het stroombeeld van het model met driehoeksrooster.





D Opbouw referentieschematisaties

De projectschematisatie, die in dit onderzoek is gebruikt als referentieschematisatie, is als volgt opgebouwd vanuit *baseline-rijn-beno19_6-v2*:

```
# *****
#
# De naam voor deze variant is : rkp_ref_incl_nederrijn
# De basis voor deze variant is : baseline-rijn-beno19_6-v2
#
# *****
#
# RWS Oost-Nederland
# 31 augustus 2023
#
# Met deze maatregel_lijst kan de definitieve referentieschematisatie voor
# het project Rivierklimaatpark IJsselpoort opgebouwd worden, inclusief
# maatregelen t.b.v. het onderzoek naar ingrepen op de Neder-Rijn.
#
# *****
#
# RKP IJsselpoort
#
# *****
#
# ../rijn-maatr/ij_ijsseld_b1
# ../rijn-maatr/ij_velp_a1
# ../rijn-maatr/ij_koppenw_a1
# ../rijn-maatr/ij_rheder_e1
# ../rijn-maatr/rt_zbhgt21_a1
# ../rijn-maatr/wl_zbhgt20_a1
# ../rijn-maatr/wl_vlnym21_a1
# ../rijn-maatr/wl_bkerl20_a1
# ../rijn-maatr/ij_klimprf_b1
# ../rijn-maatr/ij_ijdwrdd_v11
# ../rijn-maatr/ij_ijdwrdd_v12
# ../rijn-maatr/ij_ijdwrdd_v13
# ../rijn-maatr/ij_rheder_v10
# ../rijn-maatr/ij_rheder_v11
# ../rijn-maatr/ij_rheder_v12
# ../rijn-maatr/ij_klimprf_c1
#
# *****
#
# Havikerwaard Zuid
#
# *****
#
# ../rijn-maatr/ij_havref_d1
# ../rijn-maatr/ij_havikrw_d1
# ../rijn-maatr/ij_havik_v01
```

```
../rijn-maatr/ij_havik_v12
../rijn-maatr/ij_havik_v16
../rijn-maatr/ij_havzuid_a1
../rijn-maatr/ij_hw8an1a_a1
../rijn-maatr/ij_havik_v17
../rijn-maatr/ij_havik_v18
../rijn-maatr/ij_havik_v19
../rijn-maatr/ij_havik_v20
../rijn-maatr/ij_havik_v21
../rijn-maatr/ij_havik_v22
#
# *****
#
# Reparatiemaatregelen
#
# *****
#
../rijn-maatr/ij_klimprf_d1
#
# *****
#
# Maatregelen Neder-Rijn
#
# *****
#
../rijn-maatr/nr_dvsarnh_b1
../rijn-maatr/nr_konpley_a1
#
# *****
#
# Einde lijst
#
# *****
```

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