

# Vermindering slibbezwaar Noordpolderzijl

Verkenning hydrodynamische effecten spoelmeer

**Klant:**

Gemeente Eemmond/ Waterschap  
Noorderzijlvest/ Provincie Groningen

**Datum**

30/mei/2017

**Referentienummer:**

WP2016\_1032\_R1r1

**Versie:**

Final



Marine Consultancy  
& Services BV.



Dit project is een samenwerking tussen de  
HYSAS partners: WaterProof BV,  
VanRijnSediment &, Wiertsema&Partners BV

## Titel

Vermindering slibbezwaar Noordpolderzijl; verkenning hydrodynamische effecten spoelmeer.

## Klant

Gemeente Eemsmond,  
Waterschap Noorderzijlvest,  
Provincie Groningen

## Referentie

WP2017\_1032\_R1r1

## Kernwoorden

Spoelmeer, regelwerk, waterbeweging, sedimentatie, Noordpolderzijl, Groningen

## Samenvatting

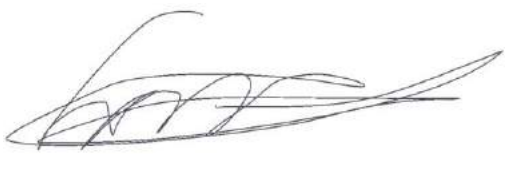
De haven van Noordpolderzijl ligt in de gemeente Eemsmond, aan de kust van de Waddenzee. Het is een kleine getijdhaven die via een 3 kilometer lange geul verbonden is met de Waddenzee. De jaarlijkse onderhoudsbehoefte van de haven en geul is groot. Een goede mogelijkheid om de aanslibbing te verminderen is de aanleg van een spoelmeer. Het doel van de studie is om te onderzoeken of het mogelijk is om, door het toepassen van een spoelmeer, de waterbeweging in de geul dusdanig te beïnvloeden dat de geul op een natuurlijke manier op diepte kan worden gehouden.

De onderzoeksvragen zijn beantwoord door een vijftal sporen te volgen: (1) Analyse van de huidige situatie, (2) analyse van het bestaande spoelmeer Nessmersiel, (3) een meetcampagne van de waterbeweging en de erosiebestendigheid van het bodemmateriaal, (4) numerieke modelsimulaties waarin in detail de waterbeweging is gemodelleerd voor een aantal geselecteerde layouts en (5) analytische berekeningen waarin de waterbeweging meer schematisch is berekend en die is ingezet om gevoeligheden in modelinstellingen af te tasten. Alle resultaten van de verschillende toegepaste sporen zijn vervolgens samengebracht in een synthese. De overall conclusie van de studie is dat door toepassing van een spoelmeer (met regelwerk) de stroomsnelheden in de geul aanzienlijk kunnen toenemen waardoor de evenwichtsbodemligging van de vaargeul naar Noordpolderzijl dieper komt te liggen. Daardoor zal het benodigd onderhoud van de geul en de haven aanzienlijk lager zijn dan in de huidige situatie en in het beste geval zelfs achterwege kunnen blijven. Het spoelmeer heeft daarmee een groot positief effect op de benodigde ploeg- c.q. baggerinspanning in geul en haven. De mate waarin nog onderhoud moet worden gepleegd in de situatie met spoelmeer, dient in de eventuele verdere planuitwerking nauwkeuriger te worden onderzocht.




| Versie | Datum     | Auteur               | Review & Goedkeuring |
|--------|-----------|----------------------|----------------------|
| R1r0   | 10-apr-17 | L. Perk/ L. van Rijn | R. Snoek             |
| R1r1   | 30-mei-17 | L. Perk/ L. van Rijn | R. Snoek             |

Geschreven door | Luitze Perk



Goedgekeurd door | Roelant Snoek



Dit project is een samenwerking tussen de HYSAS partners: WaterProof BV, VanRijnSediment & Wiertsema&Partners BV.



# INHOUDSOPGAVE

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Inhoudsopgave</b> .....  | <b>4</b>  |
| <b>1 Achtergrond</b> .....  | <b>7</b>  |
| <b>1.1 Introductie</b> .....  | <b>7</b>  |
| <b>1.2 Doel</b> .....   | <b>7</b>  |
| <b>1.3 Aanpak en leeswijzer</b> .....                                     | <b>8</b>  |
| <b>2 Hydro-morfologische beschrijving van het gebied</b> .....            | <b>10</b> |
| <b>2.1 Inleiding</b> .....  | <b>10</b> |
| <b>2.2 Gebiedsbeschrijving</b> .....                                      | <b>10</b> |
| 2.2.1 Locatie .....   | 10        |
| 2.2.2 Bodemligging .....  | 11        |
| 2.2.3 Doorstroomoppervlak van de getijdegeul.....                         | 12        |
| 2.2.4 Rijshouten dammen.....  | 12        |
| <b>2.3 Hydrodynamische aspecten</b> .....                                 | <b>13</b> |
| 2.3.1 Waterstanden .....  | 13        |
| 2.3.2 Stroomsnelheden.....  | 13        |
| 2.3.3 Gemaal .....  | 14        |
| <b>2.4 Morfologische aspecten</b> .....                                   | <b>15</b> |
| 2.4.1 Sediment eigenschappen .....  | 15        |
| 2.4.2 Erosiebestendigheid van het bodemmateriaal .....                    | 16        |
| 2.4.3 Beknopte historische analyse bodemligging en sedimentatie.....      | 17        |
| <b>2.5 Ervaring met spoelmeer Nessmersiel</b> .....                       | <b>19</b> |
| <b>3 Effecten Spoelmeer; numerieke methode</b> .....                      | <b>21</b> |
| <b>3.1 Inleiding</b> .....  | <b>21</b> |
| <b>3.2 Model simulaties</b> .....   | <b>21</b> |
| <b>3.3 Model resultaten</b> .....   | <b>23</b> |
| 3.3.1 Effect verdieping bodemligging van de geul (zonder spoelmeer) ..... | 23        |
| 3.3.2 Effect van een spoelmeer .....                                      | 26        |
| 3.3.3 Effect van een regelwerk.....                                       | 29        |
| 3.3.4 Effect van spoelmeer grootte.....                                   | 32        |
| 3.3.5 Effect doorlaatopening .....  | 35        |
| 3.3.6 Effect andere modelinstellingen .....                               | 35        |



|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>4</b> | <b><i>Effecten spoelmeer: Analytische methode</i></b> .....            | <b>36</b> |
| 4.1      | <b>Inleiding</b> .....   | <b>36</b> |
| 4.2      | <b>Analytisch Spoelmeer model Flushing Basin</b> .....                 | <b>36</b> |
| 4.3      | <b>Model simulaties</b> .....  | <b>37</b> |
| 4.4      | <b>Resultaten modelsimulaties</b> .....                                | <b>38</b> |
| 4.4.1    | Effect spoelmeer zonder regelwerk.....                                 | 38        |
| 4.4.2    | Effect spoelmeer met regelwerk .....                                   | 39        |
| 4.4.3    | Optreden van een translatiegolf door regelwerk.....                    | 42        |
| <b>5</b> | <b><i>Synthese</i></b> .....   | <b>43</b> |
| 5.1      | <b>Inleiding</b> .....   | <b>43</b> |
| 5.2      | <b>Beschouwing spoor 1-3</b> .....                                     | <b>43</b> |
| 5.3      | <b>Beschouwing spoor 4 en 5</b> .....                                  | <b>44</b> |
| 5.4      | <b>Overall conclusie gebaseerd op de 5 beschouwde sporen</b> .....     | <b>45</b> |
| 5.5      | <b>Optimale dimensies</b> .....  | <b>46</b> |
| 5.6      | <b>Aandachtspunten</b> .....   | <b>46</b> |
| 5.6.1    | Erosie van de oevers van de geul .....                                 | 46        |
| 5.6.2    | Sedimentatie in het spoelmeer .....                                    | 46        |
| 5.6.3    | Onderhoud regelwerk.....   | 46        |
| 5.6.4    | Hoge waterstanden door opwaaiing .....                                 | 46        |
| 5.6.5    | Aansluiting spoelmeer op de haven en geul .....                        | 47        |
| 5.6.6    | Optreden van een translatiegolf door toepassen van het regelwerk ..... | 47        |
| 5.6.7    | Optreden van een watersprong nabij het regelwerk.....                  | 47        |
| <b>6</b> | <b><i>Conclusies en aanbevelingen</i></b> .....                        | <b>48</b> |
| 6.1      | <b>Conclusies</b> .....  | <b>48</b> |
| 6.2      | <b>Aanbevelingen</b> .....   | <b>49</b> |
| <b>7</b> | <b><i>Referenties</i></b> .....  | <b>50</b> |
|          | <b><i>Bijlagen</i></b> .....   | <b>51</b> |
|          | <b><i>Bijlage A: Beschrijving numeriek model</i></b> .....             | <b>52</b> |
| A.1      | <b>Model opzet</b> .....   | <b>52</b> |
| A.1.1    | Model instellingen.....  | 53        |
| A.1.2    | Model kalibratie.....  | 53        |
|          | <b><i>Bijlage B: Analytische berekeningen</i></b> .....                | <b>57</b> |
| B.1      | <b>Flushingbasin</b> .....   | <b>57</b> |



|  |   |           |
|--|---|-----------|
| <b>B.2</b>                                   | <b>Spoelbekkenbeschouwing .....</b>                       | <b>58</b> |
| B.2.1  | Doorlaatwerk en schuifregeling .....                      | 59        |
| <b>Bijlage C: Meetcampagne.....</b>          |   | <b>62</b> |
| <b>C.1</b>                                   | <b>Meetlocaties.....</b>                                  | <b>62</b> |
| <b>C.2</b>                                   | <b>Meetopstelling.....</b>                                | <b>63</b> |
| <b>C.3</b>                                   | <b>Resultaten.....</b>                                    | <b>64</b> |
| <b>Bijlage D: Spoelmeer Nessmersiel.....</b> |   | <b>65</b> |
| <b>D.1</b>                                   | <b>Introduction .....</b>                                 | <b>65</b> |
| <b>D.2</b>                                   | <b>Environmental conditions .....</b>                     | <b>65</b> |
| D.2.1  | Description of flushing regime Nessmersiel, Germany ..... | 65        |
| D.2.2  | Sediment composition.....                                 | 66        |
| <b>D.3</b>                                   | <b>Tidal flow with and without flushing.....</b>          | <b>67</b> |
| D.3.1  | Flow velocity (averaged over cross-section) .....         | 67        |
| <b>D.4</b>                                   | <b>Mud concentrations with and without flushing.....</b>  | <b>69</b> |
| D.4.1  | Effect of wind-induced surface waves .....                | 71        |
| D.4.2  | Effect of ferry boat.....                                 | 72        |
| <b>D.5</b>                                   | <b>Effect of mud stirring activities.....</b>             | <b>72</b> |
| D.5.1  | Bed sediment and suspended sediment composition.....      | 73        |
| D.5.2  | Suspended sediment concentrations .....                   | 74        |
| D.5.3  | Mud stirring capacity.....                                | 74        |
| <b>D.6</b>                                   | <b>Effect of flushing on the channel bed level .....</b>  | <b>75</b> |
| <b>D.7</b>                                   | <b>Sediment trapping in reservoir .....</b>               | <b>76</b> |
| <b>Bijlage E: Figuren .....</b>              |   | <b>78</b> |
| <b>E1:</b>                                   | <b>Stromingsfiguren langs de geul.....</b>                | <b>78</b> |
| <b>E2:</b>                                   | <b>Tijdseries van stromingen en debieten .....</b>        | <b>79</b> |
| <b>E3:</b>                                   | <b>12-uurs overzichten .....</b>                          | <b>80</b> |



# 1 ACHTERGROND

## 1.1 INTRODUCTIE

De haven van Noordpolderzijl ligt in de gemeente Eemsmond, aan de kust van de Waddenzee. Het is een kleine getijdhaven die via een geul met aan weerszijden rijshouten dammen vanaf de Lauwers door de kwelders lopend verbonden is met de Waddenzee.

Sinds enige tijd slibt de haven steeds sneller dicht en wordt, ondanks intensief baggeren, steeds slechter toegankelijk. Voornamelijk in het gebied waar de geul op de hoofdgeul aansluit vindt een verhoging van de bodem plaats. Het sediment dat in de geul neerslaat bestaat voornamelijk uit slib. Er wordt verwacht dat zonder baggeren de geul dichtslibt tot circa NAP +0,3 m.

Elke circa 5 jaar wordt de vaargeul en haven gebaggerd tot de ontwerpdiepte van NAP -0,85 m. Echter, in 2009 is voor de laatste keer gebaggerd. In de overige jaren wordt de geul jaarlijks geploegd in het voorjaar: een boot sleept bij afgaand tij een ploeg over de bodem. In het voorjaar van 2016 lag de bodem na ploegen op circa NAP -0,25 m. De havenkom wordt zelf jaarlijks uitgebaggerd met een kraan vanaf de kant. Geschat wordt dat het baggerbezwaar in de geul ca. 30.000 m<sup>3</sup> per jaar is. In de haven is dat circa 3.000 m<sup>3</sup> per jaar.

De Gemeente Eemsmond is samen met het Waterschap Noorderzijlvest verantwoordelijk voor het baggeren van de haven en de geul daarnaartoe. In het verleden werd de haven regelmatig gebruikt door garnalenvissers die Noordpolderzijl als thuishaven hadden. De laatste jaren zijn de haven en de geul vaak te ondiep voor toegang van schepen. Voor schepen met meer diepgang is de haven onbereikbaar. Garnalenvissers zijn nu ook uitgeweken naar de Lauwersoog. Door het toegenomen baggervolume en afname van het gebruik van de haven is het de verwachting dat het steeds lastiger en duurder wordt om de geul bevaarbaar te houden.

Het streven is om de haven van Noordpolderzijl weer aantrekkelijk te maken voor scheepvaart. Een goede mogelijkheid om de aanslibbing te verminderen is de aanleg van een spoelmeer (zoals in Nessmersiel). Een spoelmeer kan worden gezien als een bekken waarvan het waterpeil, al dan niet vertraagd, mee-fluctueert met de getijdenbeweging in de Waddenzee. Als dit bekken aan het eind van de geul naar de haven van Noordpolderzijl ligt, dan is het mogelijk om de hoeveelheid water dat door de geul stroomt te vergroten.

In eerdere studies zijn de voor- en nadelen van een binnendijks of buitendijks gelegen spoelmeer onderzocht. In deze studie is een buitendijkse variant meegenomen omdat dat een worst-case situatie is; er wordt verwacht dat een binnendijkse variant iets beter kan werken. Worst-case analyse is bij deze exercitie methodisch de beste keuze, omdat immers onderzocht is of een spoelmeer afdoende kan gaan werken. Deze keuze komt dus puur voort uit een methodisch/analytische overweging.

In onderliggend rapport is onderzocht wat de hydrodynamische effecten zijn van een spoelmeer en, daarop gebaseerd, is een inschatting gegeven of deze oplossing ook bij Noordpolderzijl het slibbezwaar kan verminderen.

## 1.2 DOEL

Het doel van de studie is om de mogelijkheden om middels aanleg van een spoelmeer de aanslibbing van de haven en vaargeul van Noordpolderzijl te reduceren te onderzoeken.

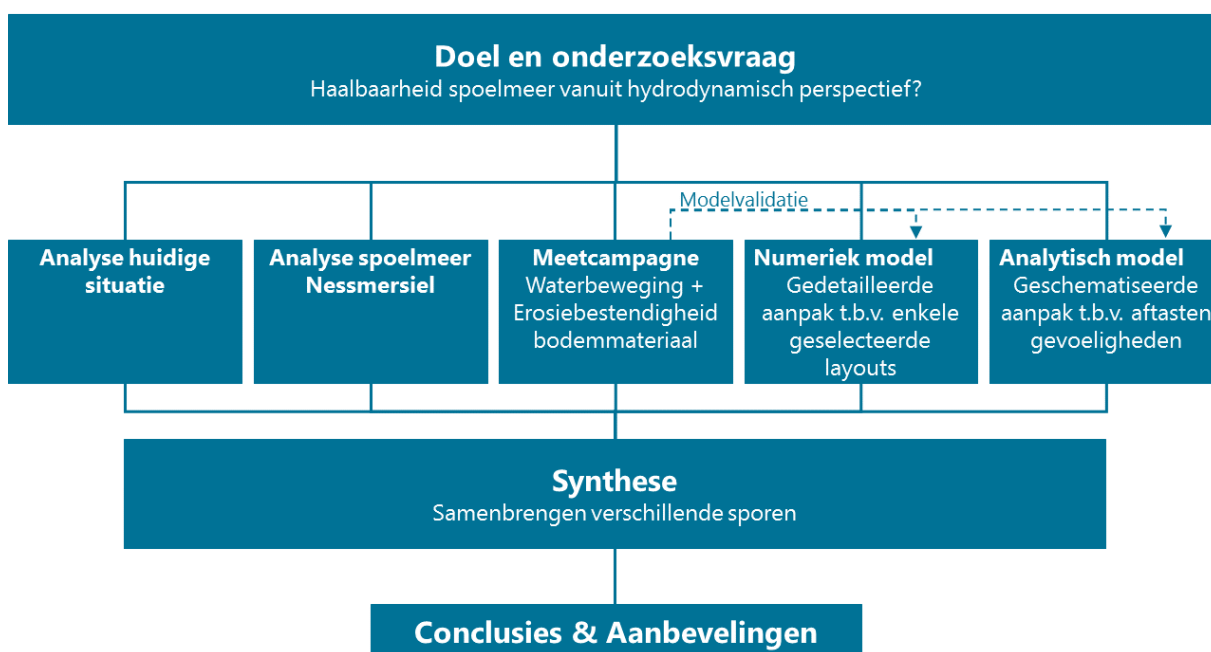


Dit rapport gaat in op de volgende onderzoeksvragen:

- Kan inzicht worden verkregen in de huidige hydromorfologische situatie en de historische ontwikkeling van het gebied?
- Is het mogelijk om, door het toepassen van een spoelmeer, de waterbeweging in de geul dusdanig te beïnvloeden dat de geul op een natuurlijke manier op diepte kan worden gehouden?
- Zo ja, kan dan een eerste afschatting worden gegeven van benodigde dimensies van zo'n spoelmeer.

## 1.3 AANPAK EN LEESWIJZER

Om de gestelde onderzoeksvragen goed te kunnen beantwoorden worden verschillende sporen gevolgd. In Figuur 1.1 is de aanpak van de studie weergegeven waarin de vijf sporen zijn gepresenteerd. In de synthese zijn de verschillende sporen samengebracht en is een onderbouwde inschatting gemaakt van de effecten van het toepassen van een spoelmeer.



*Figuur 1.1: Schematische aanpak van de studie*

Het rapport begint met een beschrijving van de huidige hydro-morfologische situatie van het gebied in hoofdstuk 2. Hiertoe is een analyse gemaakt van de beschikbare rapporten en data van het gebied. Daarnaast zijn aanvullende hydrodynamische metingen in het gebied uitgevoerd gedurende een beknopte meetcampagne (zie bijlage C). In paragraaf 0 en in bijlage D wordt ingegaan op het bestaande spoelmeer in Nessmersiel.

Vervolgens is de effectiviteit van een spoelmeer onderzocht door gebruik te maken van twee methoden. Er is een numeriek model opgezet (hoofdstuk 3) waarin in detail de waterbeweging is gemodelleerd voor een aantal geselecteerde layouts. Daarnaast is een analytisch model (hoofdstuk 4) toegepast waarin de waterbeweging meer schematisch is berekend en die is ingezet om gevoeligheden in modelinstellingen af te tasten. In hoofdstuk 5 zijn de resultaten van de verschillende toegepaste sporen samengebracht in een synthese waar antwoord wordt gegeven op de gestelde onderzoeksvragen. Tenslotte wordt in hoofdstuk 6 ingegaan op de belangrijkste conclusies en aanbevelingen.



Deze studie is een samenwerking tussen WaterProof Marine Consultancy & Services BV, Wiertsema & Partners (W&P) en Leovanrijn Sediment binnen het zogenaamde HySaS consortium. Het verslag is samengesteld door Ir. L. Perk van WaterProof bv. in samenwerking met Prof. Dr. Ir. L.C. van Rijn van LVRS-consultancy.



# 2 HYDRO-MORFOLOGISCHE BESCHRIJVING VAN HET GEBIED

## 2.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk wordt de huidige situatie van het projectgebied beschreven. Dit omvat een gebiedsomschrijving in paragraaf 2.2, en een hydrodynamische en morfologische analyse gebaseerd op meetdata in paragrafen 2.3 en 2.4. Vervolgens worden in paragraaf 0 de belangrijkste ervaringen van een spoelmeer in een soortgelijk project in Nessmersiel, Duitsland beschreven.

## 2.2 GEBIEDSBESCHRIJVING

### 2.2.1 Locatie

In 1811 is de Noordpolder ontstaan door bedijking. Het gebied is vervolgens ingericht voor agrarisch gebruik en bewoning. Tot halverwege 1980 vond de afwatering van de Noordpolder plaats via een spuisluis. Het was mogelijk om de geul voor het grootste gedeelte baggervrij te houden. Na begin jaren 80 is de spuisluis vervangen door een gemaal om het overtollige polderwater te lozen op het wad. Men denkt dat o.a. als gevolg van het wegvallen van het spuien de aanslibbing niet meer wordt tegengegaan.

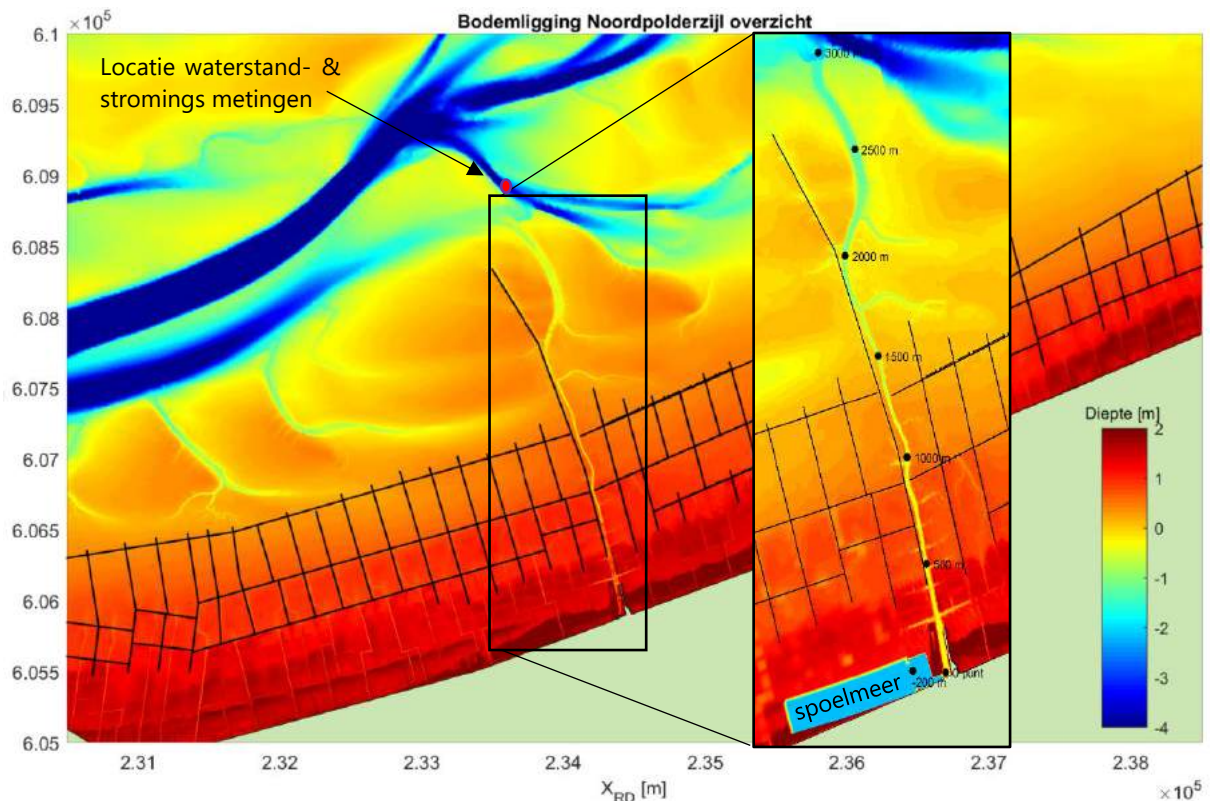
Tegenwoordig is de haven van Noordpolderzijl via een smalle geul verbonden met de Zuidoost-Lauwers, zoals te zien is in Figuur 2.1.



Figuur 2.1: Locatie Noordpolderzijl. De geullocatie is aangegeven met het blauwe kader.

## 2.2.2 Bodemligging

In Figuur 2.2 is de bodemligging van het gebied rondom de geul van Noordpolderzijl gepresenteerd. Hierbij zijn de kwelderschermen en rijshoutendammen in zwart weergegeven. In dezelfde figuur is een inzet van de geul opgenomen waarin een kilometreringslijn is aangegeven. Deze kilometreringslijn wordt in deze hele studie gebruikt, de lengte van de geul vanaf de havenkom is circa 3 kilometer. Naast de kilometreringslijn is ook de ligging van een eventueel toekomstig spoelmeer zichtbaar gemaakt.



*Figuur 2.2: Bodemligging rondom Noordpolderzijl. De kwelderschermen en rijshoutendam zijn aangeduid met zwarte lijnen. In het zwarte kader is een close-up weergegeven met een kilometrage aanduiding en met het spoelmeer.*

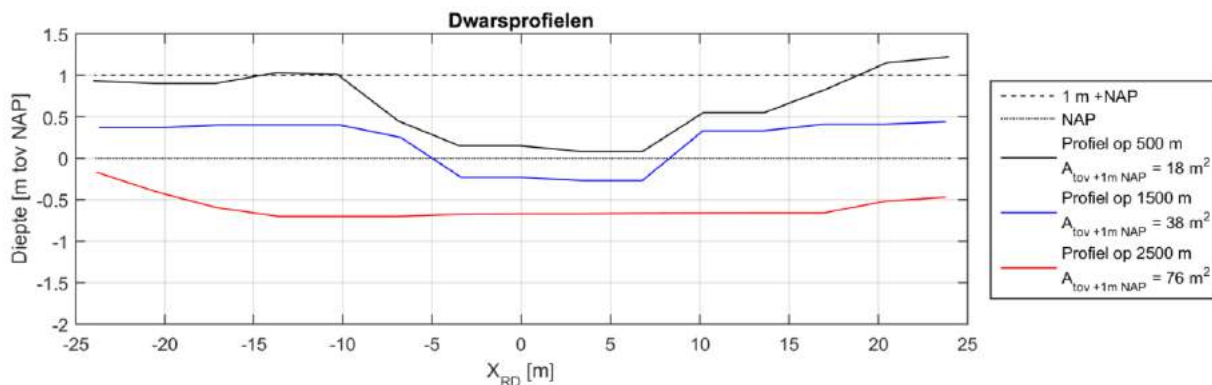
Uit bovenstaand figuur is op te maken dat de buitendijkse bodemligging varieert, met maximale hoogte van NAP+2,0 tot 2,5 m NAP in de kwelders. De diepte van de geul loopt uiteen tussen -0,5 m NAP bij de verbinding met het Zuidoost Lauwers en circa +0,3 m NAP in de havenkom. Over de lengte varieert de geul tussen 5 en 10 m breedte. De streefdiepte voor de geul is NAP -0,85 m maar deze wordt vrijwel nergens gehaald. Bij de huidige diepte valt de geul tijdens een groot deel van het getij grotendeels droog, zoals te zien in Figuur 2.3.



*Figuur 2.3: Impressie van de geul, grotendeels drooggevallen voor/na hoogwater.*

### 2.2.3 Doorstroomoppervlak van de getijdegeul

In Figuur 2.4 is het doorstroomoppervlak op 3 locaties in de geul (500, 1500 en 2500 m) weergegeven (locatie zie Figuur 2.2). De dimensies van de geul worden kleiner in de richting van de havenkom. Op 2500 m van de haven is het doorstroomoppervlak beneden NAP +1,0 m circa 77 m<sup>2</sup> en neemt af naar 38 en 18 m<sup>2</sup> op respectievelijk 1500 en 500 m.



Figuur 2.4: Dwarsdoorsneden op 3 locaties in de geul: op 500, 1500 en 2500 meter van de havenkom. De zwarte lijn duidt de huidige situatie aan.

### 2.2.4 Rijshouten dammen

Zoals langs vrijwel de gehele Groninger kustzone zijn ook in dit gebied kwelderwerken met rijshouten dammen aanwezig. De westkant van de geul wordt over vrijwel de gehele lengte (tot circa x=2700 m) beschermd door een rijshouten dam (zie zwarte lijnen in Figuur 2.2). In Figuur 2.5 is de dam zichtbaar op een foto gemaakt tijdens de meetcampagne in februari 2017. De hoogte is circa GHW + 0,3 m (circa NAP +1,4 m). De dammen houden de stroming deels tegen maar in het verleden zijn ze niet altijd goed onderhouden waardoor gaten in de dammen zijn ontstaan. Onlangs (2016) zijn gedeelten van de westelijk gelegen dam weer gerepareerd. De buitenste kwelderschermen, gelegen tussen x=1000–1500m worden momenteel niet meer onderhouden waardoor een groot deel van de wilgentakken zijn verdwenen en alleen palenrijen zijn overgebleven.

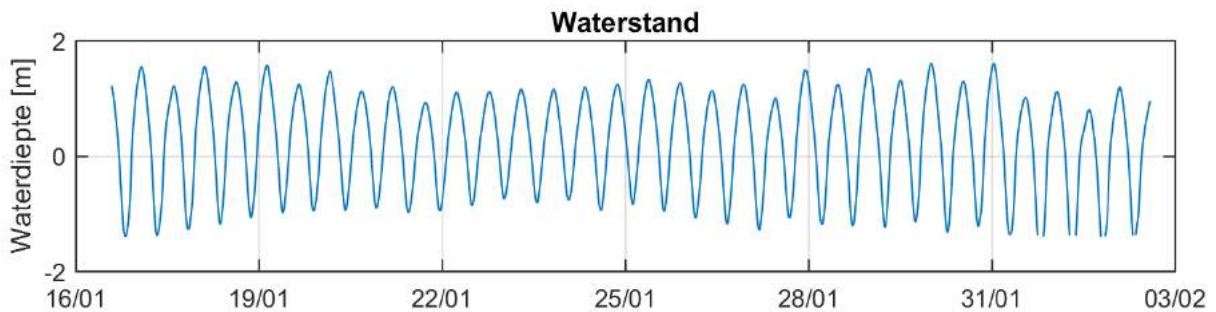


Figuur 2.5: Impressie van de rijshouten dam westelijk langs de geul (foto: Luitze Perk).

## 2.3 HYDRODYNAMISCHE ASPECTEN

### 2.3.1 Waterstanden

De geul naar Noordpolderzijl staat in verbinding met de Noordzee via het Zuidoost Lauwers. Tijdens vloed vult het systeem zich met water via deze getijdegeul en gedurende eb stroomt het water weer terug in de richting van de Noordzee. De dagelijkse ongelijkheid in waterstanden (2x hoogwater per dag) is het grootst tijdens doortij en het kleinst net na springtij. De gemiddelde hoogwaterstand (GHW) ligt rond +1,1 m NAP en de gemiddelde laagwaterstand (GLW) ligt rond de -1,3 m NAP. Gezamenlijk levert dit een gemiddeld getijslag van 2,4 m op. Tijdens stormen kan de waterstand gemakkelijk een meter hoger/ lager komen te staan als gevolg van opwaaiing of afwaaiing. In Figuur 2.6. is een tijdserie van gemeten waterstanden in de Zuidoost Lauwers gepresenteerd in januari 2017 (zie locatie meetpunt Figuur 2.1 en Bijlage C).

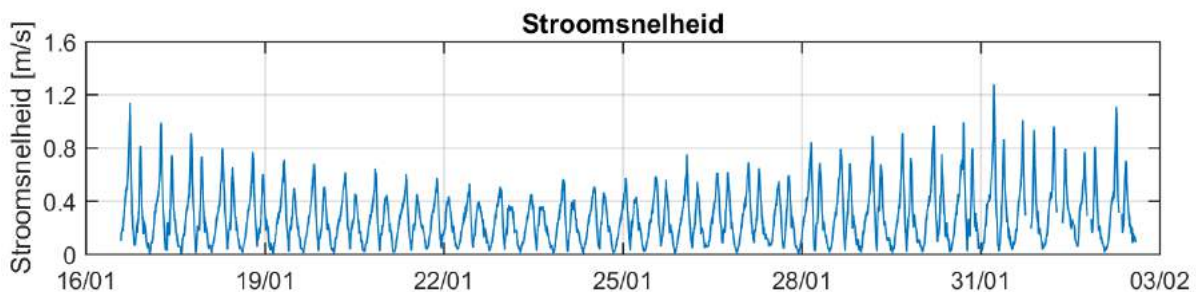


Figuur 2.6: Gemeten waterstandsverloop in de Waddenzee nabij de aansluiting van de geul met het Zuidoost Lauwers. Zie voor locatie Bijlage C: Meetcampagne.

### 2.3.2 Stroomsnelheden

#### Zuidoost Lauwers

Tijdens de meetcampagne (Bijlage C: Meetcampagne) zijn ook de stroomsnelheden nabij de aansluiting van de geul met de Zuidoost Lauwers gemeten (zie locatie meetpunt Figuur 2.1). Figuur 2.7 geeft de gemeten stroomsnelheden weer op deze locatie gedurende de meetcampagne. Over het algemeen zijn de perioden van eb en vloed ongeveer gelijk, maar zijn er verschillen in de maximale snelheden. De maximale snelheden tijdens eb en springtij zijn circa 1,2-1,3 m/s. Tijdens vloed zijn de snelheden over het algemeen 0,1-0,2 m/s lager.

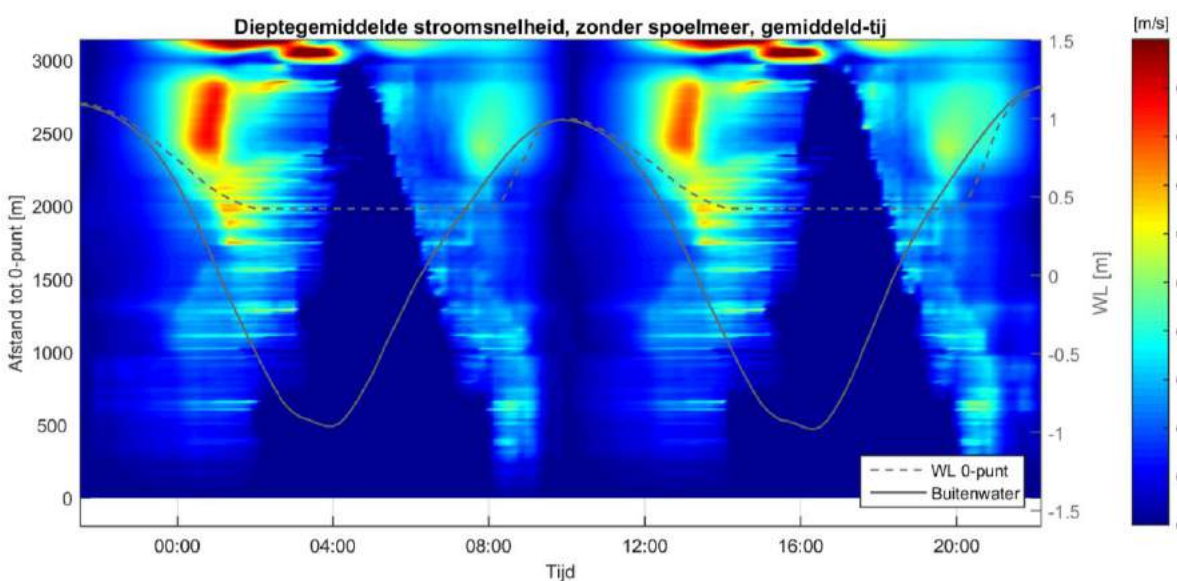


Figuur 2.7: Gemeten stroomsnelheden nabij de aansluiting van de geul met het Zuidoost Lauwers. Zie locatie meetpunt Figuur 2.1 en Bijlage C.

## In de geul naar Noordpolderzijl

In de geul naar Noordpolderzijl zijn geen stroomsnelheidsmetingen beschikbaar. Zoals beschreven in paragraaf 1.3 is voor deze studie een Delft3D stromingsmodel opgezet (zie hoofdstuk 3 en bijlage B) waarmee het vullen en ledigen van de geul inzichtelijk kan worden gemaakt. In Figuur 2.8 zijn de stroomsnelheden langs de geul (langs de y-as) en in de tijd (langs de x-as) weergegeven. Middels kleuren is de stroomsnelheid in de geul weergegeven. Uit de figuur kan duidelijk worden opgemaakt dat de door het getij aangedreven stroomsnelheden variëren over de lengte van de geul. Op een afstand van 2800 meter vanaf de havenkom wordt er tijdens het gemiddeld getij een maximale eb stroomsnelheid van ongeveer 0,8 m/s en een maximale vloed stroomsnelheid van 0.5 m/s bereikt.

Gaande naar het 0-punt (de locatie van de havenkom) nemen de stroomsnelheden steeds verder af van circa 0,6-0,7 m/s nabij  $x=2000$  naar 0,1-0,2 m/s nabij de haven als gevolg van een afname van het kombergend volume dat door de geul stroomt. Daarnaast maakt het figuur inzichtelijk dat in het binnengebied alleen stroming rond hoogwater optreedt omdat tijdens laagwater het gebied vrijwel droogvalt.



Figuur 2.8: Gemodelleerde stroomsnelheden in de tijd en langs de geul-as (in kleuren) en waterstanden (grafieken) in het Delft3D model voor de huidige situatie tijdens het gemiddeld tij. De doorgetrokken lijn is de waterstand buiten in de Zuidoost Lauwers, de gestippelde lijn de waterstand in de haven van Noordpolderzijl.

### 2.3.3 Gemaal

In 1981 is het gemaal Noordpolderzijl gebouwd vanwege de aanleg van de deltidijk en het wijzigen van het waterbeheer (Haven Noordpolderzijl, 2016). Het gemaal loost via de geul op de Waddenzee. Om al het overtollig water uit de Noordpolder te kunnen afvoeren, heeft het gemaal 2 pompen, beide met een capaciteit van 120 m<sup>3</sup>/min. Dit brengt de totale capaciteit van het gemaal op 240 m<sup>3</sup>/min, ofwel 4 m<sup>3</sup>/s (Noordpolderzijl | NGS, n.d.). Het doorstroomoppervlak van de spuikokers is circa 4,5 m<sup>2</sup>, de lengte van spuikokers is 90 m.



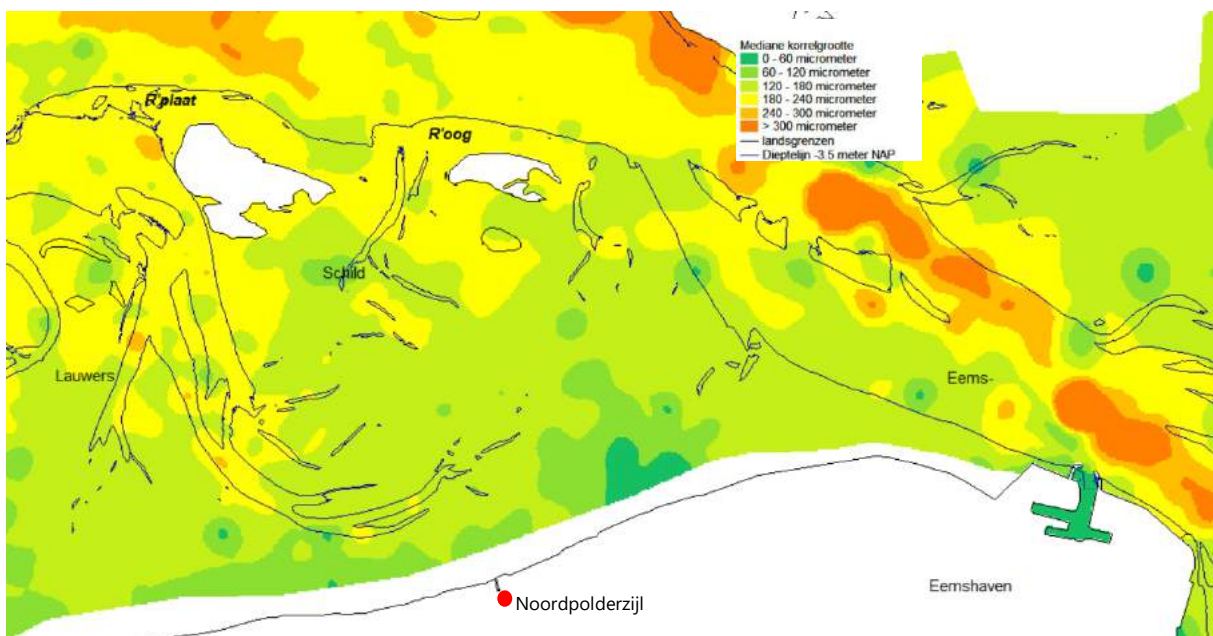
Figuur 2.9: Locatie van het gemaal Noordpolderzijl (Noordpolderzijl | NGS, n.d.). Zie bijlage C voor de betekenis van de monsterpunten.

## 2.4 MORFOLOGISCHE ASPECTEN

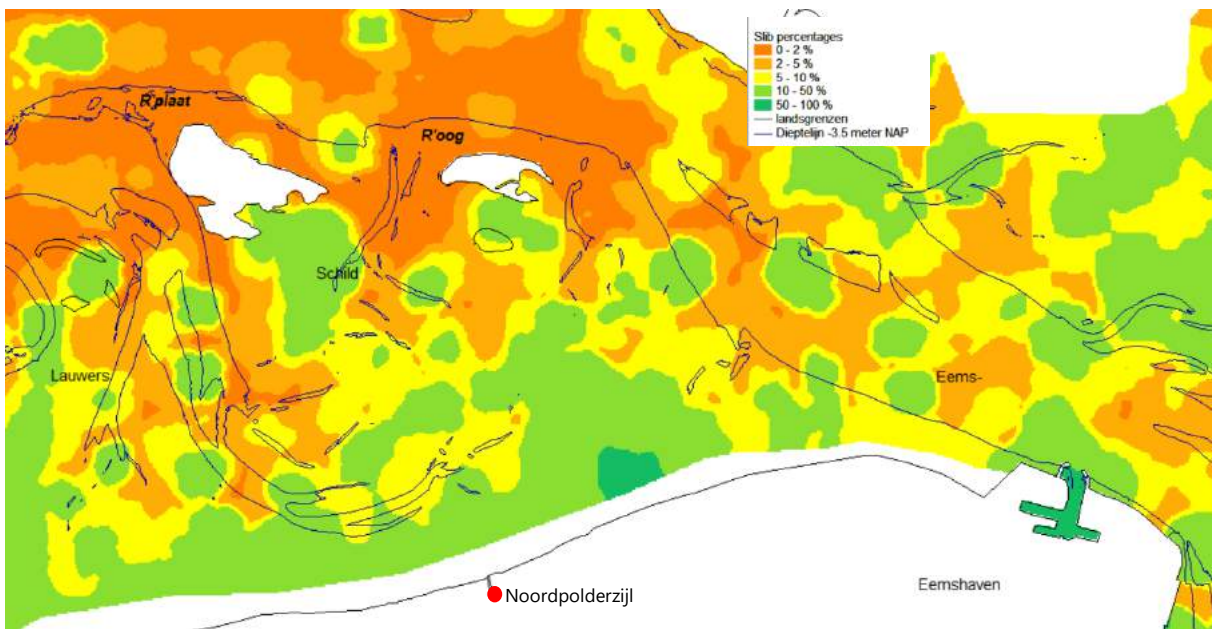
### 2.4.1 Sediment eigenschappen

De bodem van de Noordpolder bestaat vooral uit poldervaaggronden die hoofdzakelijk bestaan uit klei. In Figuur 2.10 is de mediane korrelgrootte van het bodemmateriaal nabij de projectlocatie weergegeven. Uit de figuur volgt dat de mediane korrelgrootte klein is met waarden rond de 60-120  $\mu\text{m}$ . Daarbij is het percentage slib hoog (zie Figuur 2.11) met over het algemeen waarden boven de 10% oplopend tot 50%.

Uit bodemmonsters in de havenkom (zie locatie Figuur 2.9) (Koetsier & Simmes, 2017) is bepaald dat de dichtheid van de bodem varieert tussen 1200 en 1450  $\text{kg}/\text{m}^3$  (natte dichtheid) en tussen 300 en 700  $\text{kg}/\text{m}^3$  (droge dichtheid).



Figuur 2.10: Mediane korrelgrootte (SedimentAtlas)



Figuur 2.11: Percentage slib in bodemmateriaal (SedimentAtlas)

## 2.4.2 Erosiebestendigheid van het bodemmateriaal

De bodem van de getijgeul en de havenkom bestaat uit zandig en modderig sediment. De precieze bodemsamenstelling van de geul is op dit moment niet bekend.

Eind 2016 zijn er bodemmonsters genomen (zie Bijlage C: Meetcampagne) van het materiaal aanwezig in de haven (zie locatie Figuur 2.9). Het bodemsediment van de havenkom is geanalyseerd en bestaat uit een dik pakket slib bestaande uit:

- 35% klei/lutum < 4  $\mu\text{m}$ ,
- 30% silt tussen 4 en 63  $\mu\text{m}$
- 35% fijn zand > 63  $\mu\text{m}$ .

De natte dichtheid varieert tussen 1200 kg/m<sup>3</sup> en 1450 kg/m<sup>3</sup>; droge dichtheid tussen 300 en 700 kg/m<sup>3</sup>. De D<sub>50</sub> van het bodemmateriaal is ca. 15  $\mu\text{m}$ . De D<sub>50</sub> van de zandfractie is ca. 85  $\mu\text{m}$ . Er zijn ook laboratorium testen uitgevoerd om de erosiebestendigheid van het bodemmateriaal te bepalen. Aan de hand van stroomgoot proeven en EROMES testen zijn de stroomsnelheden bepaald waarop begin van bewegen (het in beweging komen van het sediment) en bodemerosie optreedt. De EROMES is een meetinstrument dat erosie kan meten, door een stroming in een buis te genereren aan de hand van een propeller. Het meetinstrument kan ook direct in het veld gebruikt worden (Schünemann, 1991).

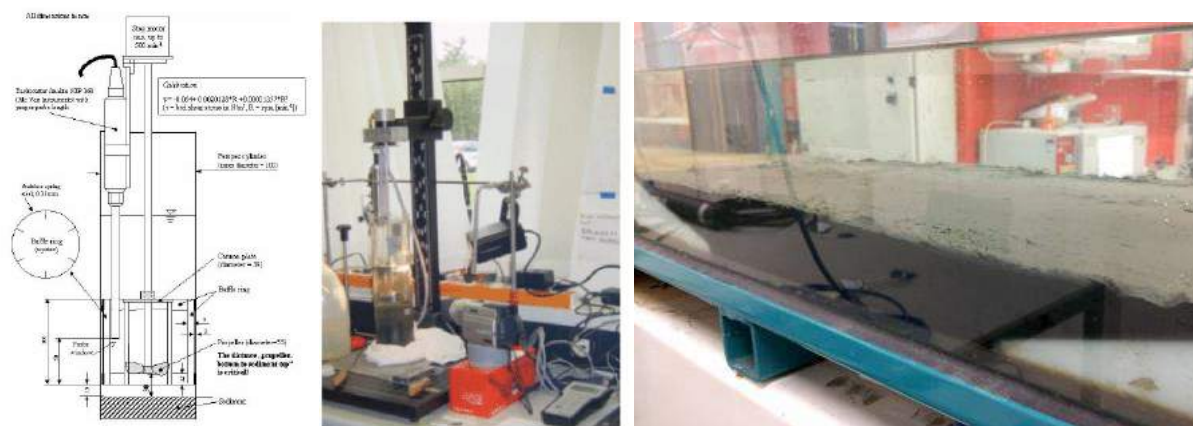
Tabel 2.1: Erosie stroomsnelheid van slib uit de havenkom, op basis van 1 m waterstand en een laagdikte van 0.05m. Waterdiepte = 1 m; Chézy coefficient  $C = 90 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$ ;  $\rho_{\text{zee}} = 1025 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;  $u_{\text{stroom,cr}} = [\tau_{\text{bodem,cr}} C^2 / (\rho g)]^{0.5}$

| Laboratorium test | Droge dichtheid  | Begin erosie | Begin bezwijken |
|-------------------|--|--------------|-----------------|
| Onverdund         | $\approx 685 \text{ kg}/\text{m}^3$ (geconsolideerd slib)          | 1.1 m/s      | 1.25 m/s        |
| Verdund           | $\approx 350\text{-}400 \text{ kg}/\text{m}^3$ (vers afgezet slib) | 0.45 m/s     | 0.7 m/s         |

Uit de laboratoriumproeven volgt dat de stroomsnelheden vrij hoog dienen te zijn om een geconsolideerde ondergrond te eroderen. Begin van erosie treedt op bij 1,1 m/s en begin bezwijken



(aanzienlijke toename in sediment transport) bij circa 1,25 m/s. Wanneer het materiaal verdund wordt en daarmee een meer ongeconsolideerde situatie wordt nagebootst zijn de kritische snelheden lager met 0,45 m/s en 0,7 m/s. De resultaten van de laboratoriumtesten zijn weergegeven in Tabel 2.1. Deze gegevens kunnen later gerelateerd worden aan de verwachte stroomsnelheden bij gebruik van het spoelmeer.

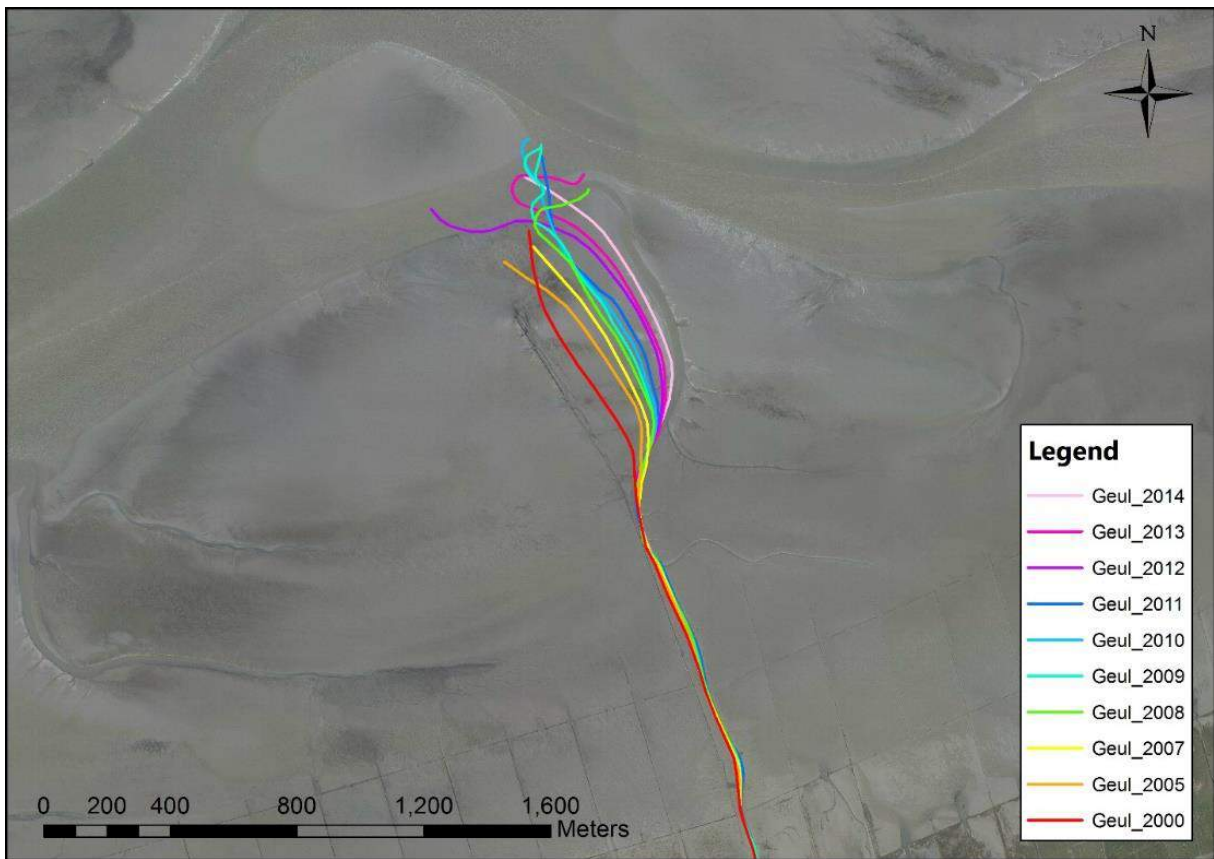


Figuur 2.12: EROMES-instrument (linker en middelste foto) en gootproef (rechter foto) met het slib uit Noordpolderzijl (Koetsier & Simmes, 2017)

### 2.4.3 Beknopte historische analyse bodemligging en sedimentatie

Door de grote hoeveelheid aanslibbing is het steeds moeilijker geworden voor de gemeente en Rijkswaterstaat om de geul te onderhouden. Tot nu toe heeft Rijkswaterstaat ervoor gezorgd dat de geul op een diepte van ongeveer NAP-0.85 m is onderhouden, door ploeg en baggerwerk. In 2016 is er bijna 11.000 m<sup>3</sup> sediment uit de geul verwijderd, waarvan ruim 6.000 m<sup>3</sup> in het zomerseizoen weer is aangeslibd. Dit komt overeen met een sedimentatie van 2 tot 5 mm per dag, ofwel 0,5 tot 1 m per jaar.

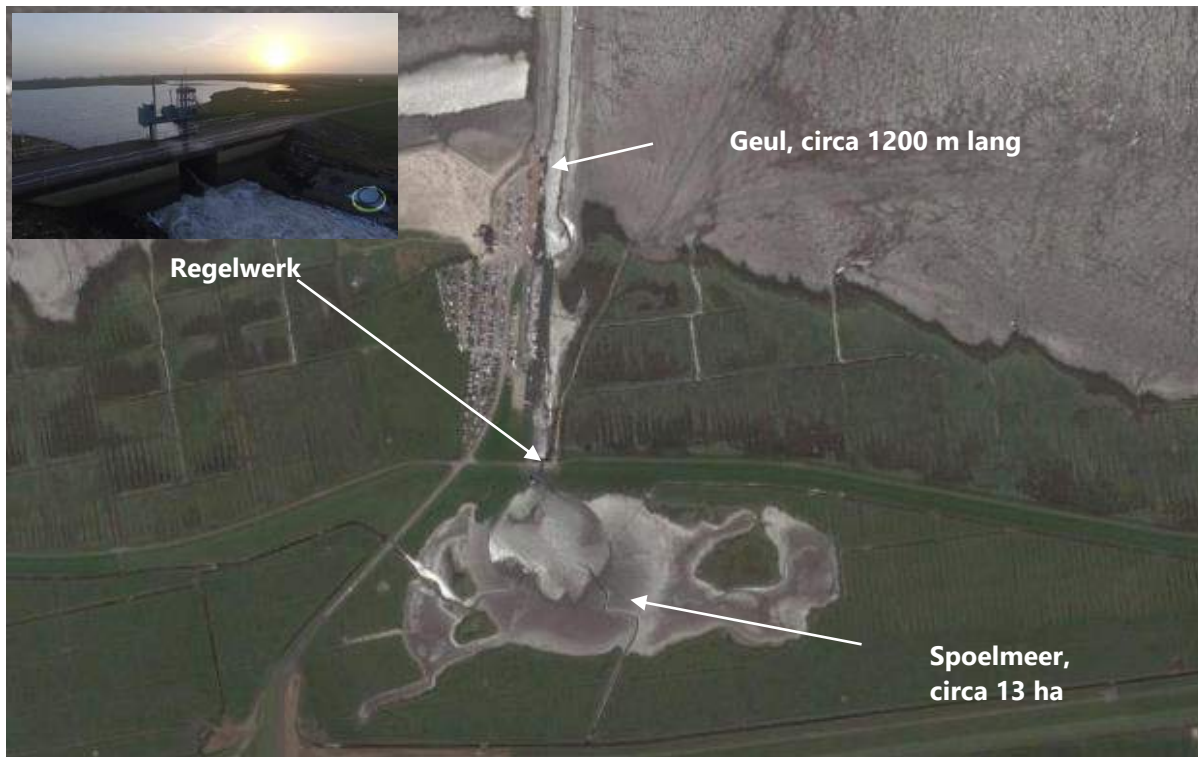
Over het algemeen is de ligging van de geul tussen de Zuidoost Lauwers en de haven van Noordpolderzijl vrij stabiel. Alleen tussen x=2000 en 3000 is de geul aanzienlijk instabieler. In Figuur 2.13 is de ligging van de buitenste delen van de geul tussen de jaren 2000 en 2014 weergegeven. Het figuur maakt duidelijk dat in het jaar 2000 de geul nog vrij dicht langs de rijshoutendam lag en in 14 jaar tijd bijna 400 m meer naar het oosten is komen te liggen. Daarnaast valt op dat de buitenste geulsecties, waar de geul uitmondt in de Zuidoost Lauwers, zeer mobiel is. De Zuidoost Lauwers is het laatste decennium naar het noorden verplaatst waardoor de geul in de tijd ook iets (enkele honderden meters) langer is geworden.



Figuur 2.13: Locatieomschrijving (2). De ontwikkeling van het gebied van 2000 tot en met 2014

## 2.5 ERVARING MET SPOELMEER NESSMERSIEL

In 1977 is bij Nessmersiel (Waddenzee, Noord-Duitsland) een spoelbekken aangelegd, zoals gepresenteerd in Figuur 2.14 met afmetingen zoals weergegeven in Tabel 2.2. De ervaringen bij Nessmersiel zijn belangrijk omdat de afmetingen en omstandigheden enigszins overeenkomen met Noordpolderzijk.



*Figuur 2.14: Spoelmeer met regelsysteem, Nessmersiel, Duitsland.*

Een uitgebreidere beschrijving van Nessmersiel is opgenomen in Bijlage D. De belangrijkste ervaringen zijn hieronder beschreven:

- De extra bijdrage aan de ebstroomsnelheid in de geul door spoelen is ca 0,35 m/s (maximum spoeldebiet  $\cong$  15 m<sup>3</sup>/s op 4,5 uur na HW);
- Door continu spoelen wordt een erosiediepte van circa 0,4 m bereikt (geuldiepte op NN -1,8 m in plaats van op NN -1,4 m);
- Na een periode van enige weken zonder spoelen (wegens onderhoud) is er een geconsolideerde sliblaag in de geul aanwezig van ca 0,2 tot 0,4 m die niet met spoelen alleen kan worden verwijderd. Een ploegboot is regelmatig nodig om geconsolideerd slib na een onderhoudsperiode te verwijderen en om slibafzetting op plaatsen met weinig stroom te verwijderen.
- Een gedetailleerde regeling met boven- en onderschuif is nodig voor optimale bedrijfsvoering.

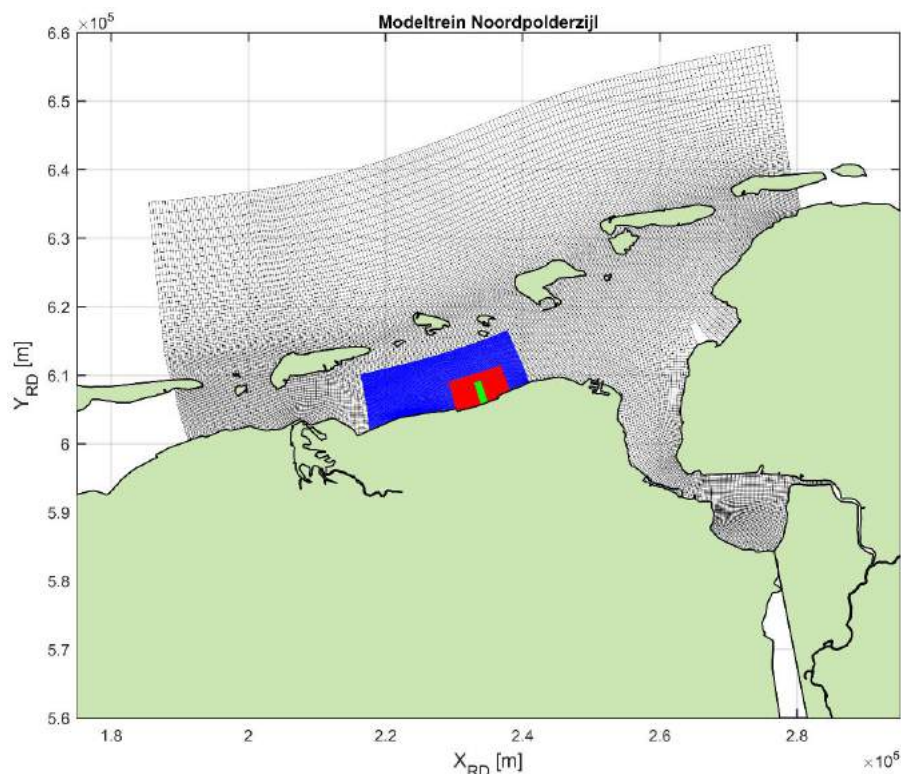
Tabel 2.2: Afmetingen van het spoelmeer te Nessmersiel, Duitsland

| Parameter Spoelbekken Nessmersiel, Duitsland  | Waarde                  |
|---|-------------------------|
| Oppervlakte spoelbekken [m <sup>2</sup> ]   | 130000 (13 ha)          |
| Gemiddelde getijslag [m]  | 2,5                     |
| Lengte van de geul [m]  | 1200                    |
| Breedte van het doorlaatwerk [m]  | 4,5                     |
| Oppervlakte van geuldwersprofiel [m <sup>2</sup> ]  | 50                      |
| Gemiddelde effectieve breedte van de geul [m]   | 30                      |
| Diepte van drempel van het doorlaatwerk onder gemiddeld zeeniveau [m]                             | 1                       |
| Gemiddelde geuldiepte ten opzichte van gemiddeld zeeniveau voor en na de bouw van spoelbekken [m] | 1.2 – 1.4;<br>1.6 – 1.8 |
| Maximum spoeldebiet [m <sup>3</sup> /s]   | 15                      |
| Maximale stroomsnelheid tijdens eb zonder spoelen [m/s]   | 0.6 – 0.7               |
| Maximale stroomsnelheid tijdens eb met spoelen [m/s]  | 0.8 – 1.1               |

# 3 EFFECTEN SPOELMEER; NUMERIEKE METHODE

## 3.1 INLEIDING

In deze paragraaf zijn de effecten van een spoelmeer bij Noordpolderzijl op de waterbeweging gepresenteerd. Daartoe is gebruik gemaakt van het numeriek stromingsmodel Delft3D (Deltares, 2011)) die voor deze studie is opgezet en afgeregeld op metingen. In bijlage B is een beschrijving gegeven van het model en zijn de modelinstellingen en kalibratie resultaten weergegeven. In Figuur 3.1 is de toegepaste modellentrein weergegeven.



*Figuur 3.1: Modellentrein ingezet ten behoeve van de numerieke analyse bij Noordpolderzijl*

Ten behoeve van deze studie zijn simulaties uitgevoerd met verschillende modelinstellingen. In paragraaf 3.2 zijn de uitgevoerde modelsimulaties gepresenteerd. In paragraaf 3.3 zijn de belangrijkste modelresultaten gepresenteerd.

## 3.2 MODEL SIMULATIES

Ten behoeve van deze studie zijn modelsimulaties uitgevoerd om de effecten van keuzes (doorstroomoppervlak geul, spoelmeeroppervlak, openingsmoment regelwerk, etc.) te kunnen bepalen. In Tabel 3.1 is een overzicht gegeven van de parameters die in de modelsimulaties zijn gevarieerd.

Tabel 3.1: Instellingen die in de modelsimulaties zijn meegenomen

| 1. Geul dieptes   | Runnaam  | 2. Spoelmeer oppervlakken   | Runnaam   |
|---|--|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Bestaande situatie</li> <li>-0.85 m NAP</li> <li>-1.50 m NAP</li> </ul>                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>[Runhuidig]</li> <li>[Run085]</li> <li>[Run150]</li> </ul>            | <ul style="list-style-type: none"> <li>Geen spoelmeer</li> <li>10 ha</li> <li>15 ha</li> <li>20 ha</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>[_spm_10ha]</li> <li>[_spm_15ha]</li> <li>[_spm_20ha]</li> </ul> |
| 3. Spui regimes   |  | 4. Klep breedtes  |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Geen spui regime</li> <li>3 uur na HW</li> <li>5 uur na HW</li> <li>8.5 uur na HW</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>[_spm]</li> <li>[_spm3]</li> <li>[_spm5]</li> <li>[_spm85]</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>5 m</li> <li>10 m</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>[_klep10]</li> </ul>   |

Om de effecten van gemaakte keuzes overzichtelijk te beschrijven, zijn in dit rapport niet alle uitgevoerde modelsimulaties gepresenteerd. Alleen de modelsimulaties die bijdragen aan een begrip van het systeem en te maken keuzes in het ontwerp zijn gepresenteerd. Ook zijn alleen de resultaten gepresenteerd gedurende gemiddeld getij condities. De simulaties voor springtij en doortij laten zien dat over het algemeen de stroomsnelheden met respectievelijk 10-20% toenemen tijdens springtij en 10-20% afnemen tijdens doortij.

Om de leesbaarheid van het rapport te bevorderen zijn niet alle figuren opgenomen tussen de tekst. Een grotere set figuren zijn gepresenteerd in Bijlage E. De figuurnummers die beginnen met een 'E' zijn in deze bijlage terug te vinden.

Hieronder wordt kort ingegaan op de modelsimulaties die zijn uitgevoerd.

### Bodemligging van de geul

Om de effecten van het doorstroomoppervlak en bodemligging van de geul te bepalen zijn simulaties uitgevoerd voor drie geuldieptes:

- |   |                  |
|---|------------------|
| Bestaande situatie                          | <i>Runhuidig</i> |
| Bodemligging op NAP -0,85 m (ontwerpdiepte) | <i>Run085</i>    |
| Bodemligging op NAP -1,50 m                 | <i>Run150</i>    |

Voor de verdiepte situaties is de geul over een breedte van circa 15-20 m verdiept. De doorstroomprofielen voor de drie beschouwde situaties zijn opgenomen in Bijlage E in figuur E1.01.

### Toepassen van een spoelmeer

Vervolgens zijn voor de drie verschillende bodemliggingen van de geul ook simulaties uitgevoerd waarin een spoelmeer is aangebracht. Daarbij zijn drie verschillende spoelmeer oppervlakken beschouwd:

- |                              |                        |
|------------------------------|------------------------|
| Geen spoelmeer aanwezig      | <i>Run085</i>          |
| Spoelmeer aanwezig van 10 ha | <i>Run085_spm_10ha</i> |
| Spoelmeer aanwezig van 15 ha | <i>Run085_spm_15ha</i> |
| Spoelmeer aanwezig van 20 ha | <i>Run085_spm_20ha</i> |

De spoelmeren takken aan de zuidwestzijde van de bestaande haven aan (zie Figuur 2.2). In de modelsimulaties is het spoelmeer buitendijks gelegen. De diepte van het spoelmeer is NAP -1,5 m.



## Toepassen van een regelwerk

Er zijn simulaties uitgevoerd met een regelwerk. Middels het regelwerk kan het spoelmeer zich gedurende opkomend tij met water vullen, tijdens hoogwater wordt het spoelmeer afgesloten en op een nader te kiezen tijd na hoogwater wordt de kering instantaan geopend. De volgende simulaties zijn uitgevoerd:

- Spoelmeer zonder regelwerk (als hierboven) *Run085\_spm\_10ha*
- Spoelmeer met regelwerk die 3 uur na HW wordt geopend. *Run085\_spm3\_10ha*
- Spoelmeer met regelwerk die 5 uur na HW wordt geopend. *Run085\_spm5\_10ha*
- Spoelmeer met regelwerk die 8,5 uur na HW wordt geopend. *Run085\_spm85\_10ha*

## Breedte van het regelwerk

Tenslotte zijn simulaties uitgevoerd waarbij de breedte van het regelwerk is gevarieerd:

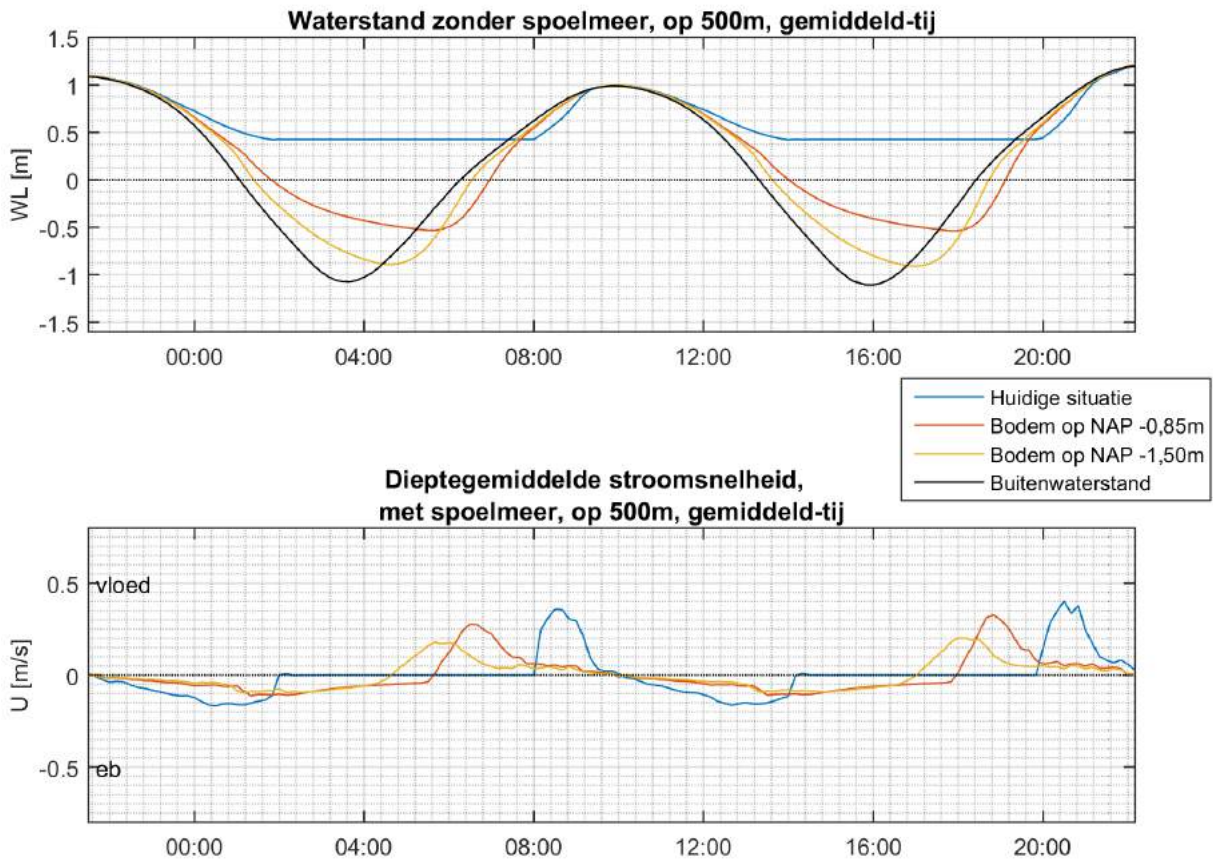
- Breedte doorstroomopening regelwerk 5 m (als hierboven) *Run085\_spm\_10ha*
- Breedte doorstroomopening regelwerk 10 m *Run085\_spm\_10ha\_10m*

## 3.3 MODEL RESULTATEN

### 3.3.1 Effect verdieping bodemligging van de geul (zonder spoelmeer)

#### Waterstanden

In Figuur 3.2 zijn de waterstanden (bovenste paneel) en stroomsnelheden (onderste paneel) weergegeven voor de situaties zonder spoelmeer (*Runhuidig*, *Run085* en *Run150*). Uit het figuur kan duidelijk worden opgemaakt dat de waterstanden (op  $x=500$  m vlakbij de haven van Noordpolderzijl, zie Figuur 2.2), de buitenwaterstand (zwarte lijn in Figuur 3.2) beter kan volgen naarmate de bodemligging van de geul lager komt te liggen. In de huidige situatie waarbij de bodem nabij de haven op circa NAP +0,3 m ligt is alleen tijdens hoogwater een waterstandsverhoging zichtbaar. Bij een geuldiepte van NAP -1,5 m volgt de waterstand nabij de haven de buitenwaterstand met een fase verschuiving. Laag water vindt ongeveer een uur later plaats dan buiten in de Zuidoost Lauwers.

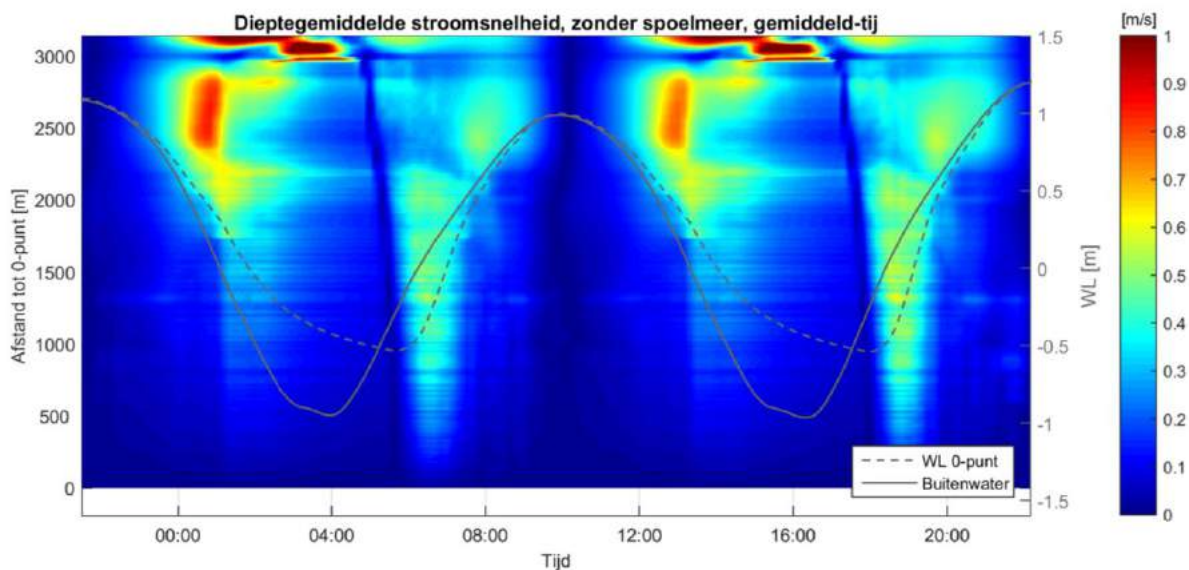


*Figuur 3.2: Effect van de bodemligging in de geul op de waterstanden (bovenste paneel) en stroomsnelheden (onderste paneel) nabij de haven van Noordpolderzijl ( $x=500$  m)*

### Stroomsnelheden

Nabij de haven van Noordpolderzijl op  $x=500$  m zijn de snelheden in de huidige situatie zeer gering. In het onderste paneel van Figuur 3.2 is te zien dat gedurende eb snelheden tot circa 0,1-0,15 m/s worden gehaald en gedurende vloed circa 0,2-0,35 m/s. De vloodsnelheden zijn hoger en hebben een kortere duur dan de eb snelheden die lager zijn en over een langere periode aanwezig zijn. Door deze asymmetrie in de stroming en het feit dat vooral de hoogste stroomsnelheden voor onevenredig meer sedimenttransport zorgen, zal vooral tijdens vloed sediment worden getransporteerd. Daarmee is het systeem (gebaseerd op analyse van de snelheden alleen) sediment importerend. In Figuur E2.01 zijn ook de snelheden voor  $x=1500$  m en  $2500$  m gepresenteerd.





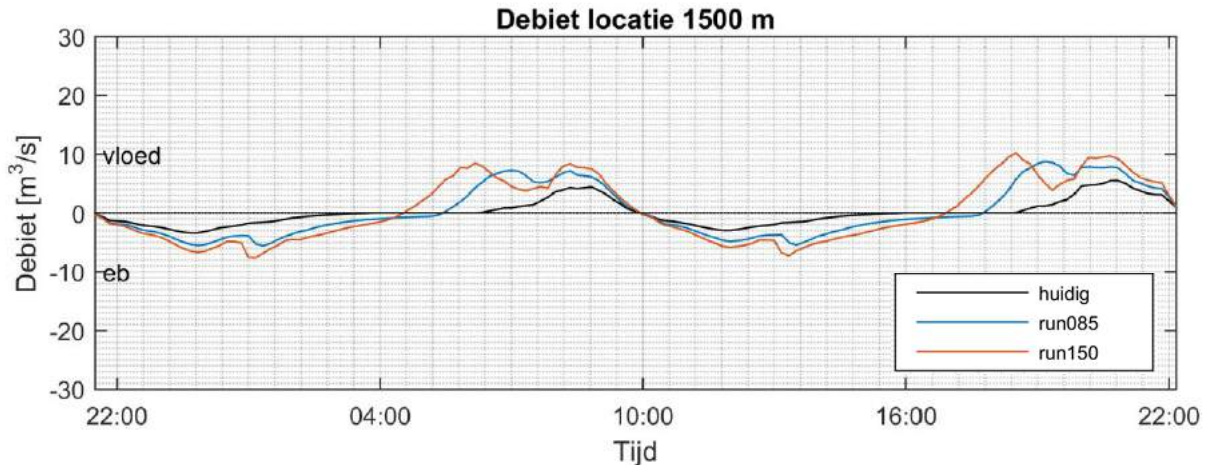
*Figuur 3.3: Gemiddelde stroomsnelheden in de tijd en langs de geul-as (in kleuren) en waterstanden (grafieken) in het Delft3D model voor de situatie met een bodemligging op NAP -0,85 m tijdens het gemiddeld tij*

In Figuur 3.3 zijn de stroomsnelheden langs de geul en in de tijd weergegeven voor simulatie [Run085]. In de figuur is op de x-as de tijd uitgezet en op de y-as de afstand tot Noordpolderzijl. Middels kleuren is de stroomsnelheid in de geul weergegeven. Uit de figuur kan duidelijk worden opgemaakt dat de door het getij aangedreven stroomsnelheden variëren over de lengte van de geul. Wanneer Figuur 3.3 [Run085] wordt vergeleken met Figuur 2.8 [Runhuidig] valt op dat door de verdieping van de geul de stroomsnelheden tijdens vloed langs de gehele geul tussen  $x=0-2300$  toenemen (zie ook Figuur E1.04 waarin de verschillen worden gepresenteerd). Tijdens eb nemen de snelheden juist af doordat het water langer de tijd krijgt om af te stromen (zie ook onderste paneel Figuur 3.2). In de secties tussen  $x = 2300 - 3000$  zijn de veranderingen een stuk kleiner. Dit komt doordat bij  $x=2300$  een zijgeul aantakt aan de geul naar Noordpolderzijl. Deze zijtak heeft een belangrijke watervoerende functie voor de oostelijk gelegen intergetijdgebieden die de stroming in dat deel van de geul sterk beïnvloeden.

In Figuur E1.01 tot E1.06 in Bijlage E zijn ook de snelheden voor de andere situaties en de verschillen in snelheden tussen twee situaties gepresenteerd.

### Debiten

In Figuur E2.07 zijn de debieten gepresenteerd door doorsneden op  $x=500, 1500$  en  $2500$  m voor de drie beschouwde situaties. In onderstaande Figuur 3.4 is het debiet op  $x=1500$  gepresenteerd. Uit de figuur kan worden opgemaakt dat de hoeveelheid water dat gedurende gemiddeld getij naar binnen en buiten stroomt door de verdieping aanzienlijk vergroot. Bij een geuldiepte van NAP -1,5 m stroomt er circa 3x zoveel water door de geul ten opzichte van de huidige situatie.



Figuur 3.4: Debieten door een doorsnede gelegen op  $x=1500$  m voor de huidige situatie [Runhuidig], en verdiepte situaties zonder spoelmeer [Run085, Run150]

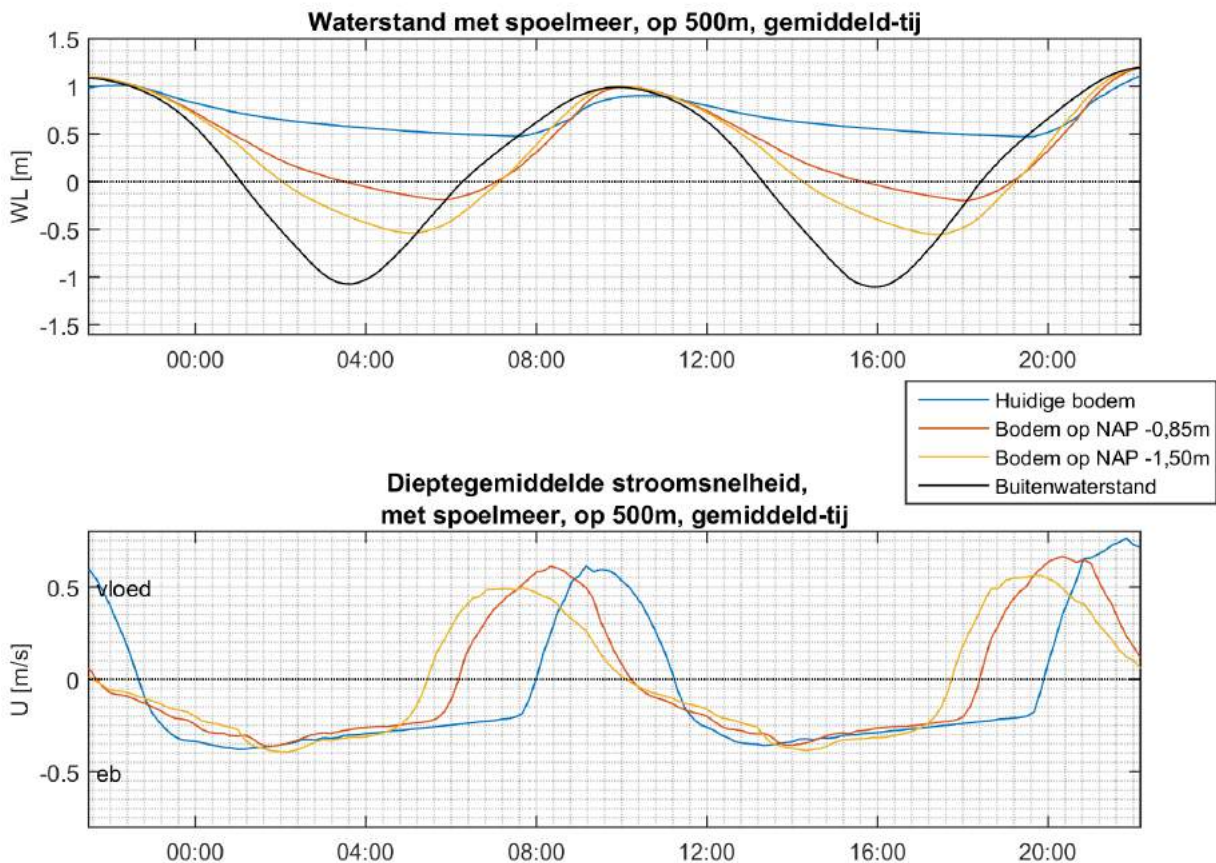
### Conclusie

Door het verdiepen van de geul nemen de debieten door de geul toe en de stroomsnelheden vooral tussen  $x=0-2300$  m af. Daarnaast neemt de getij-asymmetrie toe (hogere vloedstroming dan ebstroming). Een verdieping van de geul zonder toepassing van een spoelmeer zal de mate van sediment import in dat deel van het systeem naar verwachting dan ook doen toenemen. Daardoor zal door de verdieping de mate van aanslibbing ook toenemen.

## 3.3.2 Effect van een spoelmeer

### Waterstanden

Het effect van een spoelmeer is inzichtelijk gemaakt door in de hierboven beschouwde simulaties een spoelmeer met een oppervlak van 10 hectare op te nemen [Runhuidig\_spm\_10ha, Run085\_spm\_10ha, Run150\_spm\_10ha]. Tussen het spoelmeer en de haven van Noordpolderzijl is nog geen regelwerk meegenomen. Het spoelmeer staat middels een open verbinding in contact met de haven en het water kan vrij in- en uitstromen. In Figuur 3.5 zijn de waterstanden en snelheden op  $x=500$  gepresenteerd voor bovengenoemde simulaties. Wanneer de waterstanden met- en zonder spoelmeer worden vergeleken (vergelijk bovenste paneel van Figuur 3.2 en Figuur 3.5) valt op dat in de situaties met spoelmeer de waterstanden de buitenwaterstand moeilijker kunnen volgen. Dit komt doordat nu ook het spoelmeer met water (dat door de geul moet stromen) gevuld dient te worden en daarmee de waterstand minder snel meebeweegt. In Run150\_spm op  $x=500$  bereikt de waterstand zijn laagste punt op circa 1,5 uur na laagwater in de Zuidoost Lauwers, zonder spoelmeer was dat circa 1,2 uur. Daardoor is laagwater circa 0,35 m hoger gelegen (NAP -0,55) dan zonder spoelmeer (NAP -0,9).

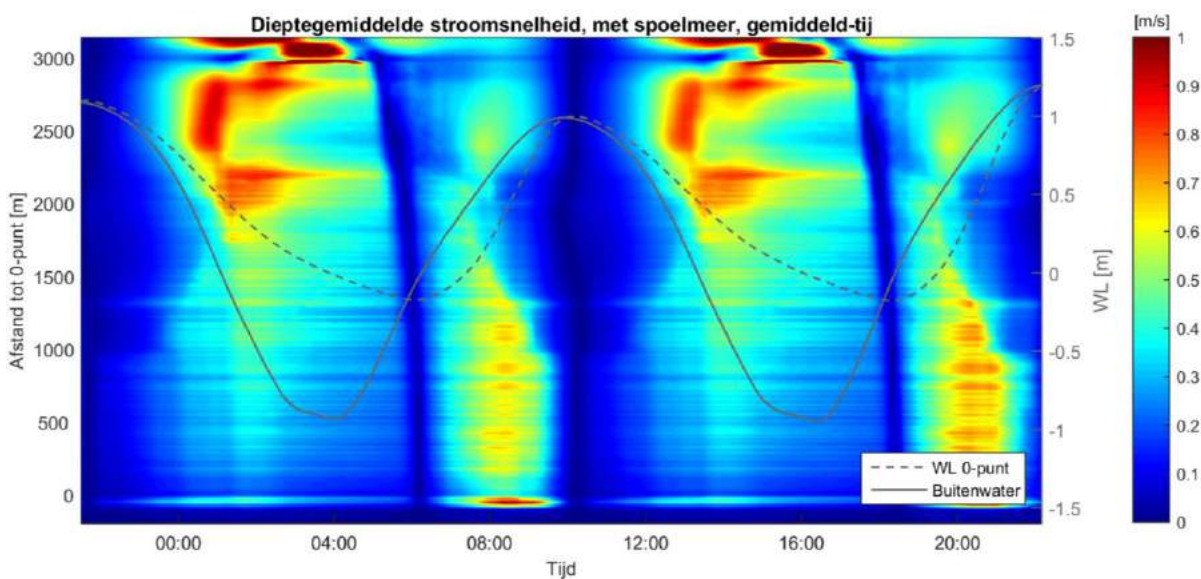


Figuur 3.5: Effect van de bodemligging in de geul op de waterstanden (bovenste paneel) en stroomsnelheden (onderste paneel) nabij de haven van Noordpolderzijl ( $x=500$  m) waarin een spoelmeer (zonder regelwerk) is meegenomen.

### Stroomsnelheden

Door het spoelmeer nemen de stroomsnelheden in de geul aanzienlijk toe. In Figuur 3.5 is te zien dat de maximale stroomsnelheden tijdens vloed circa 0,5 tot 0,6 m/s bedraagt. Tijdens eb zijn de snelheden langer aanwezig maar met circa 0,4 m/s wel lager. Verder valt op dat een diepere geul de vloodsnelheden verlaagt maar de eb-snelheden ongeveer gelijk blijven. Daarmee wordt ook de periode van vloed langer en periode van eb korter. De asymmetrie in de stroomsnelheden (en waarschijnlijk mate van sediment import) neemt met toenemende geuldiepte iets af maar de vloodsnelheden blijven groter dan de eb-snelheden en houdt daarmee een sediment importerend karakter. In Figuur E2.02 zijn ook de snelheden voor  $x=1500$  m en  $2500$  m gepresenteerd.

In Figuur 3.6 zijn de stroomsnelheden langs de geul gepresenteerd voor [Run085\_spm\_10ha]. Wanneer deze figuur wordt vergeleken met Figuur 3.3 (zie ook Figuur E1.10) is zichtbaar dat de stroomsnelheden langs vrijwel de gehele geul, zowel tijdens eb als tijdens vloed met circa 0,3-0,4 m/s toenemen. Dit is het logische gevolg van het additionele watervolume dat elk getij door de geul het spoelmeer in- en uit stroomt. Nabij  $x=0$  neemt de stroomsnelheid plotseling toe als gevolg van de vernauwing in de uitstroomopening van het spoelmeer.

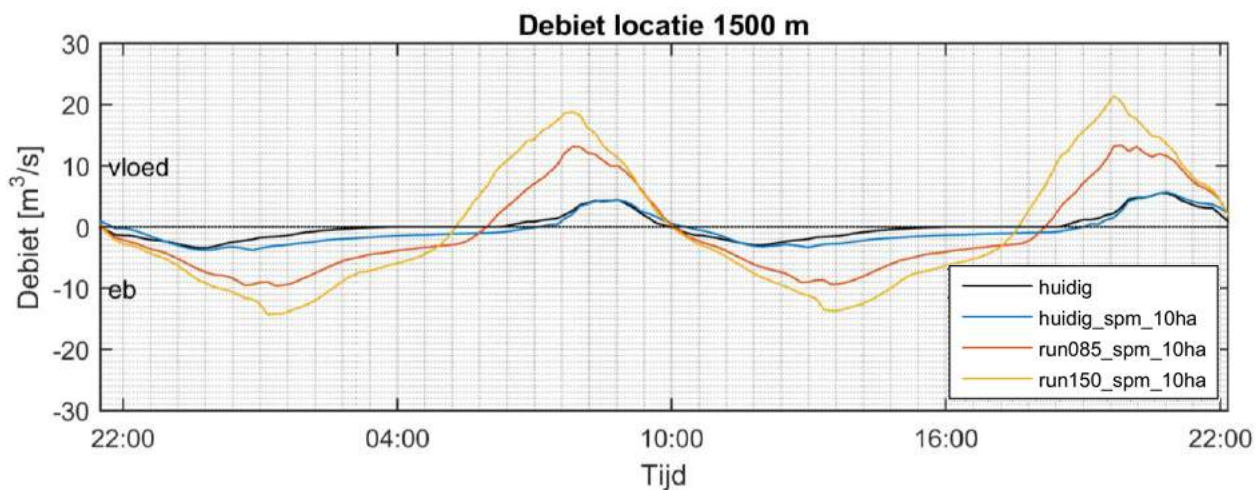


Figuur 3.6: Gemiddelde stroomsnelheden in de tijd en langs de geul-as (in kleuren) en waterstanden (grafieken) in het Delft3D model voor de situatie met een bodemligging op NAP -0,85 m en inclusief 10 ha spoelmeer tijdens gemiddeld tij

In Figuur E1.07 tot E1.12 in Bijlage E zijn ook de snelheden voor de andere situaties en de verschillen in snelheden met de huidige situatie zonder spoelmeer gepresenteerd.

### Debieten

In Figuur 3.7 zijn de debieten door een doorsnede op  $x = 1500$  m gepresenteerd. De figuur laat zien dat het spoelmeer in de huidige situatie, waar de bodemligging zeer hoog gelegen is slechts een beperkt effect zou hebben. In de verdiepte situaties is het debiet wel sterk toegenomen (vergelijk Figuur 3.4 met Figuur 3.7).



Figuur 3.7: Debieten door een doorsnede gelegen op  $x=1500$  m voor de huidige situatie [Runhuidig] en de drie beschouwde situaties met spoelmeer [Runhuidig\_spm\_10ha, Run085\_spm\_10ha en Run150\_spm\_10ha]

## Conclusie

Door het toepassen van een spoelmeer worden de maximale debieten een factor 4 groter dan in de huidige situatie. Ook de stroomsnelheden nemen flink toe met over vrijwel de gehele geul een toename in snelheden van circa 0,4 m/s waardoor sediment aan de bodem makkelijker kan worden geërodeerd.

Daarnaast neemt ook de getij-asymmetrie iets toe (hogere vloedstroming dan ebstroming) waardoor een spoelmeer (zonder toepassing van een regelwerk) de mate van sediment import in het systeem naar verwachting zal doen toenemen.

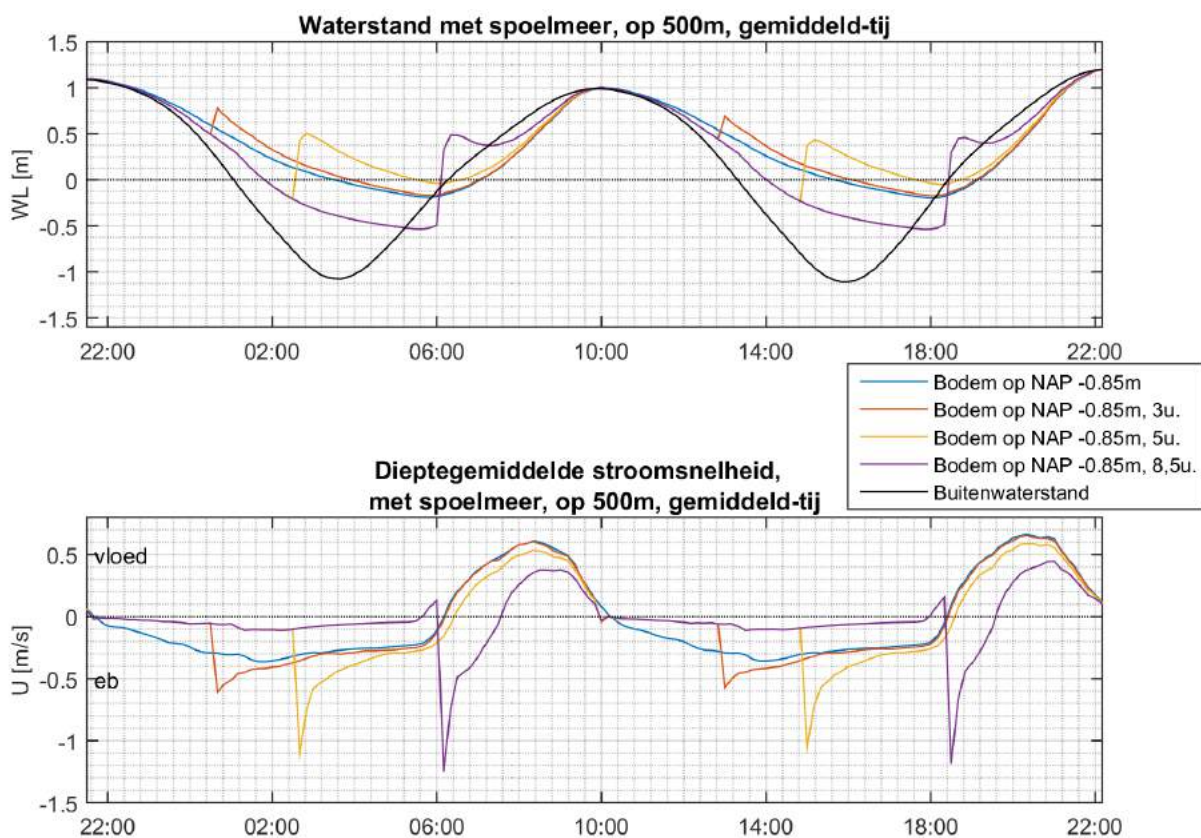
### 3.3.3 Effect van een regelwerk

De simulaties waarin alleen een spoelmeer is ingevoegd zonder regelwerk laten zien dat weliswaar de stroomsnelheden in de geul hoger worden, de asymmetrie van het getij blijft bestaan en wordt zelfs groter. Door toepassing van een regelwerk tussen het spoelmeer en de haven kunnen de stroomsnelheden kunstmatig beïnvloed worden.

Een doorlaatwerk zonder schuifregeling is niet de meest efficiënte manier om het spoelbekken te benutten voor het 'schoonsoelen' van de geul. De stroomsnelheden in de geul tijdens eb kunnen worden verhoogd door het doorlaatwerk bij het bereiken van de hoogste waterstand in het spoelbekken te sluiten en pas te openen als de waterstand in de Waddenzee een flink stuk is gedaald. Bij voorkeur moet de waterstand dusdanig laag zijn dat er alleen nog water in de geul staat en de omringende kweldervlaktes droogvallen. In dit geval gaat de gehele ebstroom door de geul. Bij een waterstand die hoger is dan de omringende kweldervlaktes zal een deel van het water dat uit het spoelbekken komt, wegstromen over de kweldervlaktes en deze stroming komt niet ten goede aan de geul.

### Waterstanden

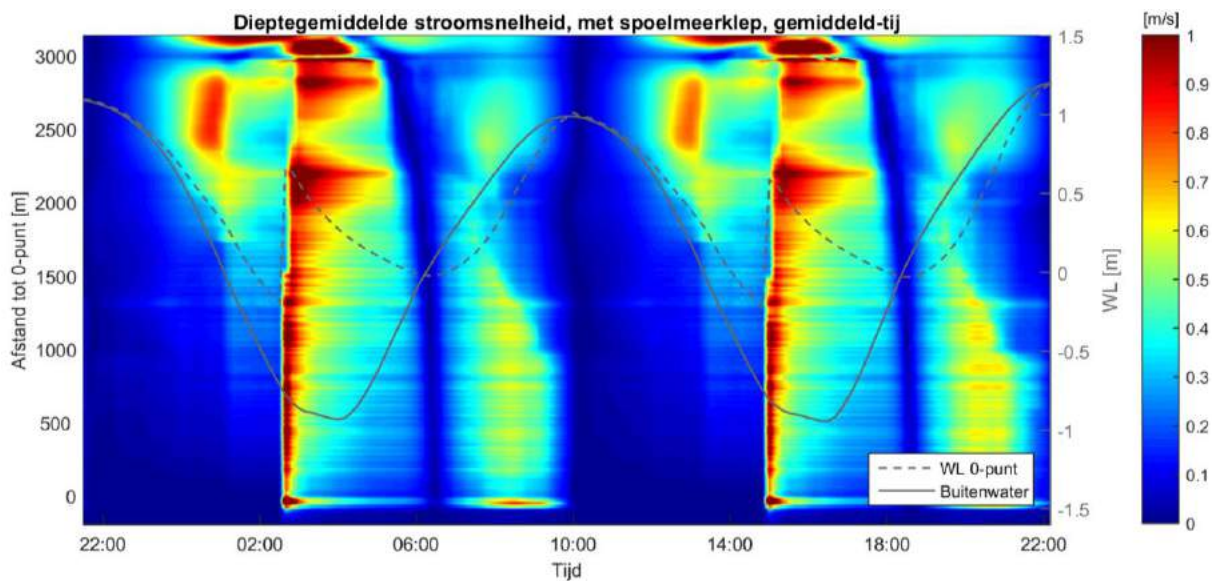
Om de effecten van een regelwerk op de waterstanden en stroomsnelheden te bepalen zijn simulaties uitgevoerd waarbij het regelwerk op 3 uur, 5 uur en 8,5 uur na hoogwater instantaan is geopend [*Run085\_spm3\_10ha*, *Run085\_spm5\_10ha*, *Run085\_spm85\_10ha*]. In het bovenste paneel van Figuur 3.8 zijn de waterstanden op  $x=500$  m en de buitenwaterstand gepresenteerd voor de drie simulaties met regelwerk en simulatie zonder regelwerk. In de figuur is een plotselinge waterstandsverhoging zichtbaar als gevolg van het instantaan volstromen van de haven en geul met water uit het spoelmeer. De figuur maakt inzichtelijk dat in alle gevallen een gelijke hoogwaterstand wordt bereikt. De laagwaters zijn verschillend, met een laagste waterstand van NAP -0,5 m in de situatie waarin het regelwerk 8,5 uur na hoogwater wordt geopend.



Figuur 3.8: Effect van een regelwerk tussen spoelmeer en haven op de waterstanden (bovenste paneel) en stroomsnelheden (onderste paneel) nabij de haven van Noordpolderzijl ( $x=500$  m)

### Stroomsnelheden

In het onderste paneel van Figuur 3.8 zijn de stroomsnelheden op  $x=500$  m gepresenteerd voor de vier simulaties. In Figuur E2.04 zijn ook de snelheden voor  $x=1500$  m en  $2500$  m gepresenteerd. Wanneer het regelwerk 3 uur na HW wordt geopend nemen de maximale stroomsnelheden tijden eb toe tot  $0,6$  m/s (was  $0,4$  m/s in de situatie zonder regelwerk). Bij 5 en 8,5 uur zijn de maximale snelheden aanzienlijk hoger met respectievelijk  $1,15$  en  $1,25$  m/s. De vloedstroom wordt voornamelijk beïnvloed wanneer het regelwerk 5 tot 8,5 uur na HW wordt geopend. Bij 8,5 uur neemt de vloedstroom zelfs af van  $0,6$  naar  $0,35$  m/s en duurt aanzienlijk korter dan in de situatie zonder regelwerk.



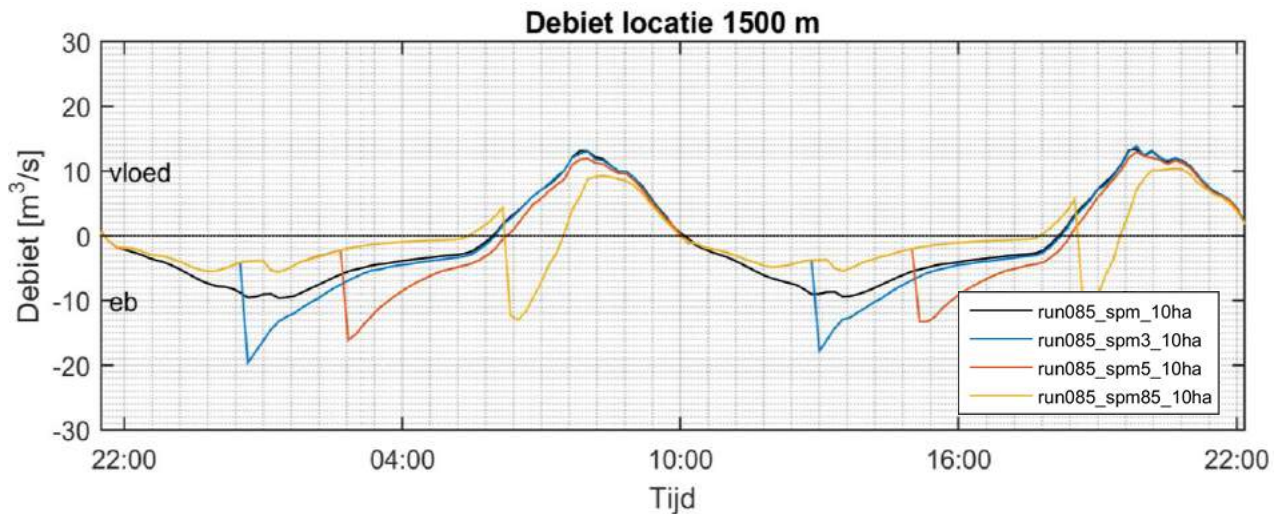
*Figuur 3.9: Gemiddelde stroomsnelheden in de tijd en langs de geul-as (in kleuren) en waterstanden (grafieken) in het Delft3D model voor de situatie met een bodemligging op NAP -0,85 m, inclusief 10 ha spoelmeer en een regelwerk die 5 uur na HW wordt geopend, tijdens gemiddeld tij.*

Figuur 3.9 maakt duidelijk dat de toename in stroomsnelheden na openen van het regelwerk langs de gehele geul optreedt en er op veel plaatsen gedurende 10-30 minuten snelheden boven de 1,0 m/s worden gehaald. In Figuur E1.17 zijn ook de snelheden gepresenteerd voor de situatie waarin het regelwerk 8,5 uur na hoogwater wordt geopend. In die figuur is te zien dat dan alleen in de eerste 1500 m van de geul de snelheden worden verhoogd.

In Figuur E1.13 tot E1.18 in Bijlage E zijn ook de snelheden voor de andere situaties en de verschillen in snelheden gepresenteerd.

### Debiten

In Figuur 3.10 zijn de debieten door een dwarsdoorsnede gepresenteerd voor de beschouwde situaties. Ook in deze figuur is zichtbaar dat het instromende (vloed) debiet afneemt wanneer het regelwerk op HW+8,5 uur wordt geopend. Het maximum van het uitstromende debiet is wel lager dan bij de HW +3 en +5 openingsmomenten.



Figuur 3.10: Debieten door een doorsnede op  $x = 1500$  m voor de simulaties [Run085\_spm\_10ha, Run085\_spm3\_10ha, Run085\_spm5\_10ha, Run085\_spm85\_10ha]

### Conclusie

Bij het toepassen van een regelwerk kunnen de vloedsnelheden worden verkleind en de eb snelheden aanzienlijk worden vergroot. Hierdoor kan naar verwachting (geen sediment transport simulaties uitgevoerd onder deze fase) de import van sediment aanzienlijk worden verkleind en de erosie en daarmee uitstroom van slib worden verhoogd.

Het regelwerk kan op 2 manieren worden ingezet.

- Wanneer het tussen 0 en circa 5 uur na HW wordt geopend worden voornamelijk de eb-snelheden versterkt. Daardoor worden tijdens eb snelheden bereikt die bodemmateriaal kunnen eroderen en in richting de Zuidoost Lauwers kunnen transporteren.
- Wanneer het regelwerk tussen 5 en circa 9 uur na HW wordt geopend treden ook kortstondig hoge eb-snelheden op, vooral in de secties tussen  $x=0-1500$  m maar worden ook de vloedsnelheden gereduceerd. Hierdoor zullen de sedimenttransporten vanaf de Zuidoost Lauwers worden gereduceerd en zal waarschijnlijk minder sedimentrijk water de geul (en spoelmeer) kunnen bereiken.

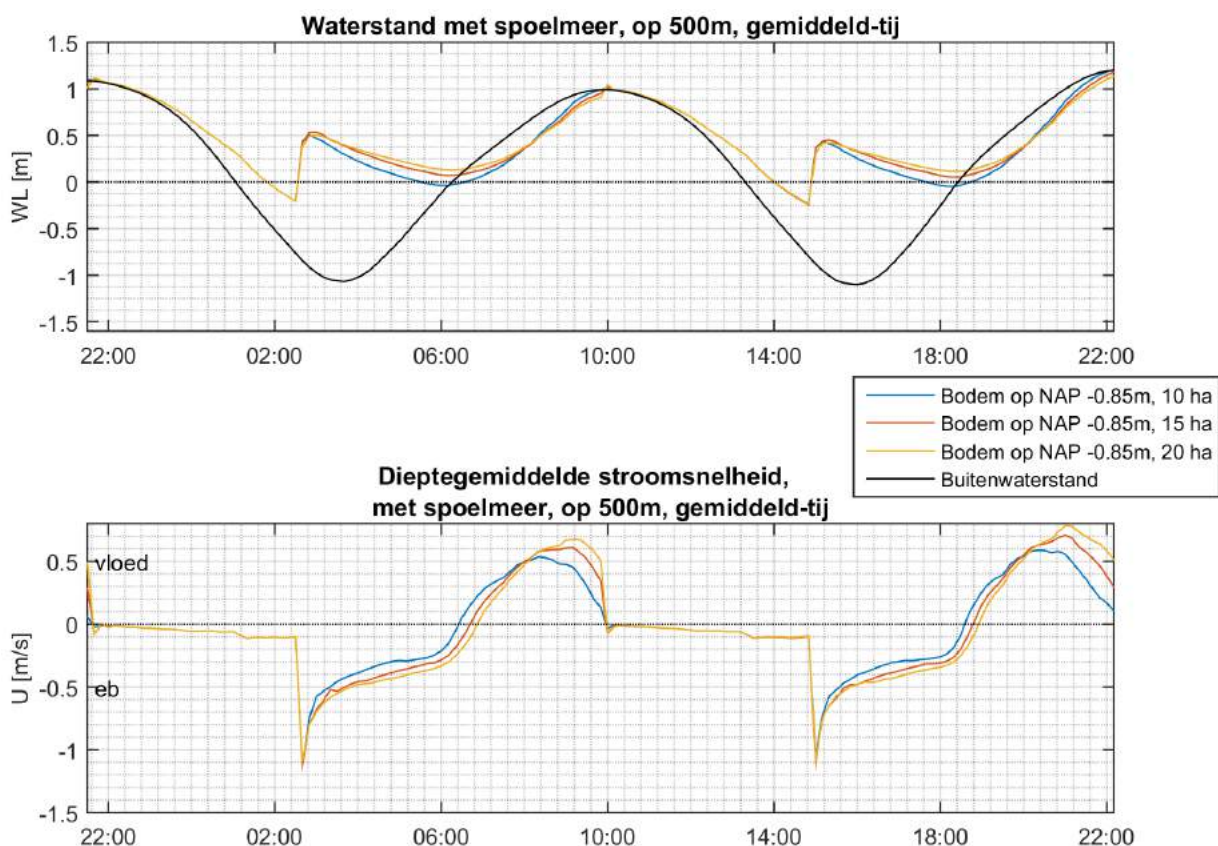
Een combinatie tussen die 2 lijkt het meest optimaal.

### 3.3.4 Effect van spoelmeer grootte

#### Waterstanden

Door drie verschillende spoelmeerooppervlaktes te beschouwen is de optimale grootte om in Noordpolderzijl toe te passen onderzocht. Daartoe zijn naast de hierboven beschouwde 10 hectare ook simulaties uitgevoerd voor 15 en 20 hectare. In Figuur 3.11 zijn de resultaten van deze simulaties gepresenteerd voor een situatie waarbij het regelwerk op 5 uur na HW wordt geopend. In het bovenste paneel is zichtbaar dat hoe groter het oppervlak van het spoelmeer is, hoe minder makkelijk de waterstanden de buitenwaterstand kunnen volgen.

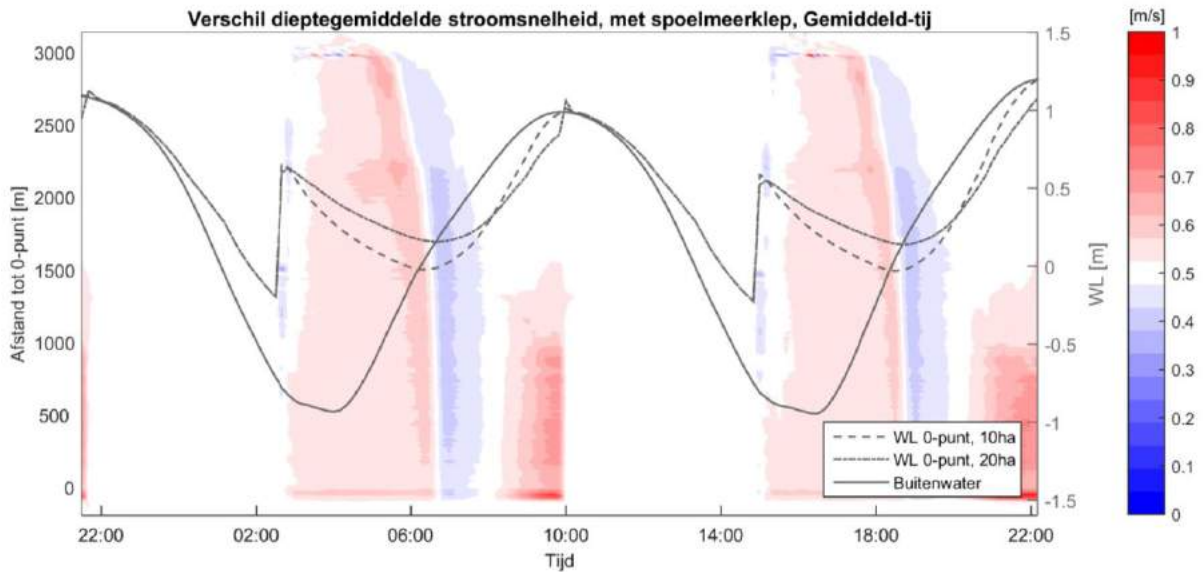




Figuur 3.11: Effect van de grootte van een spoelmeer op de waterstanden (bovenste paneel) en stroomsnelheden (onderste paneel) nabij de haven van Noordpolderzijl ( $x=500$  m)

### Stroomsnelheden

In het onderste paneel van Figuur 3.11 zijn de stroomsnelheden weergegeven voor de drie spoelmeer groottes bij  $x=500$  m. In Figuur E2.05 zijn ook de snelheden voor  $x=1500$  m en  $2500$  m gepresenteerd. De figuur laat zien dat de maximale eb-snelheden in alle drie de gevallen even groot zijn maar dat gedurende een periode van circa 4 uur de snelheden met circa 0,05 tot 0,10 m/s toenemen bij respectievelijk 15 hectare en 20 hectare. Ook wordt de eb-periode circa 30 tot 40 minuten langer. Daardoor wordt de vloed periode korter en heeft hogere stroomsnelheden die een negatief effect hebben op de sediment import. Dit effect treedt voornamelijk op tussen  $x=0-1000$  zoals te zien is in Figuur 3.12 waar het verschil in stroomsnelheden in de tijd en ruimte is gepresenteerd voor een spoelmeer van 20 hectare en 10 hectare. De stroomsnelheden in de geul bij een spoelmeer van 20 ha zijn bij eb circa 0,1 m/s hoger en bij vloed circa 0,2-0,3 m/s hoger (wanneer het regelwerk op HW +5 uur wordt geopend).

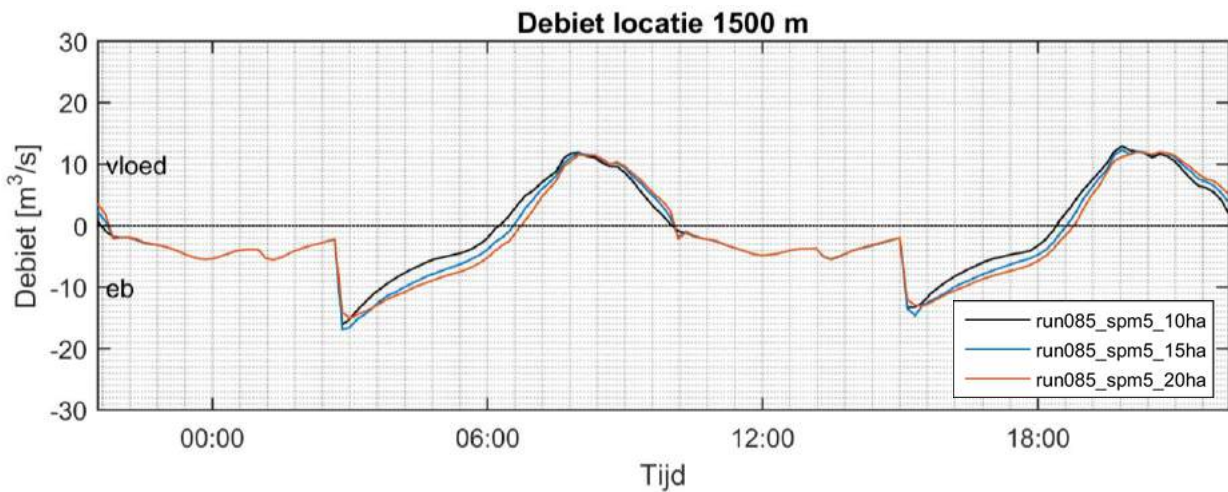


Figuur 3.12: Verschil in stroomsnelheden in de tijd en langs de geul-as (in kleuren) en waterstanden (grafieken) in het Delft3D model tussen een spoelmeergrootte van 10 en 20 hectare. Situatie met een bodemligging op NAP -0,85 m en een regelwerk die 5 uur na HW wordt geopend, tijdens gemiddeld tij. Rode kleuren presenteren dat de snelheden bij 20 ha groter zijn dan bij 10 ha, bij de blauwe kleuren zijn deze lager.

In Figuur E1.19 tot E1.22 in Bijlage E: Figuren zijn ook de snelheden voor de andere situaties en de verschillen in snelheden gepresenteerd.

### Debieten

Door toepassing van een spoelmeer groter dan 10 hectare neemt weliswaar het volume water toe dat in het bekken geborgen kan worden, echter doordat er een 3 km lange relatief ondiepe geul tussen buitenwater en spoelmeer zit duurt het een tijd voordat het spoelmeer vol- en leeg is gestroomd. Dat zorgt ervoor dat de waterstandsvariatie bij een groter spoelmeer iets afneemt. Daardoor zijn de debieten door het kanaal bij een 2x zo groot spoelmeer niet 2x zo groot. In Figuur 3.13 is het effect van verschillende spoelmeer oppervlaktes op debieten op  $x=1500$  m inzichtelijk gemaakt.



Figuur 3.13: Debieten door een doorsnede op  $x = 1500$  m voor drie verschillende spoelmeer oppervlakten

## Conclusie

Uit de simulaties volgt dat naarmate het spoelmeer groter wordt de stroomsnelheden niet evenredig toenemen met de grootte van het spoelmeer. Daarnaast nemen de vloedsnelheden in de eerste 1500 m van de geul sterker toe dan de eb-snelheden en zijn sterk afhankelijk van de uiteindelijke diepte van de geul. Omdat de uiteindelijke diepte van de geul op dit moment lastig is in te schatten kan geen nauwkeurige afschatting worden gegeven van de optimale grootte van het spoelmeer. Er wordt aanbevolen het spoelmeer iets groter te dimensioneren dan nodig lijkt. Alle beschouwde oppervlakken (10 – 20 ha) geven een aanzienlijke toename in stroomsnelheden. Gebaseerd op de uitgevoerde hydrodynamische modelberekeningen lijkt een spoelmeer van circa 15 ha voldoende.

### 3.3.5 Effect doorlaatopening

Naast de gehanteerde doorlaatopening van 5 m is ook onderzocht wat het effect is van een doorlaatopening van 10 m.

Bij toepassing van een breed regelwerk ( $b = 10$  m) is er een relatief groot debiet, maar een nadeel is dat er een relatief zware kering met schuiven nodig is. Een ander nadeel van een groot debiet met hoge stroomsnelheden is het ontstaan van een onrustig stromingspatroon in de havenkom met afgemeerde boten en kans op een watersprong.

Bij toepassing van een smal doorlaatwerk ( $b = 5$  m) is er een relatief klein debiet, maar de kering met schuiven kan relatief licht worden uitgevoerd. Een klein debiet levert wel kleinere stroomsnelheden in de geul. De stroomsnelheden kunnen weer worden vergroot door de schuif op een later tijdstip te openen, wanneer het verval over de schuif groter is.

De resultaten laten zien dat de toename in stroomsnelheden in de geul als gevolg van een breed regelwerk beperkt zijn (maximaal 0,05-0,10 m/s). Er wordt voorgesteld om een regelwerk met doorlaatbreedte van minimaal 5 m te hanteren.

### 3.3.6 Effect andere modelinstellingen

Naast dat er verschillende simulaties zijn uitgevoerd waarin fysische parameters als bodemligging en spoelmeerooppervlakken zijn gevarieerd zijn er ook simulaties uitgevoerd waarin modelparameters zijn gevarieerd om gevoeligheden af te tasten. Hierdoor kan een beeld verkregen worden wat de effecten zijn van variaties van die instellingen op de waterstanden en stroomsnelheden. Dit geeft een beeld van de onzekerheden in de modelresultaten.

*Tabel 3.2: Instellingen die in de modelsimulaties zijn gevarieerd*

| Parameter    | Originele instelling | Aangepaste instelling | Effect op stroomsnelheden |
|--------------|----------------------|-----------------------|---------------------------|
| Bodemruwheid | 1 mm                 | 5 mm                  | -5%                       |
| Springtij    | Getijslag 2,2 m      | Getijslag 2,5 m       | +20%                      |
| Doodtij      | Getijslag 2,2 m      | Getijslag 1,8 m       | -20%                      |

# 4 EFFECTEN SPOELMEER: ANALYTISCHE METHODE

## 4.1 INLEIDING

In hoofdstuk 3 zijn de effecten van een spoelmeer op de stroomsnelheden bepaald middels een numerieke analyse met Delft3D. Naast deze numerieke analyse is in dit hoofdstuk 4 een analytische aanpak gehanteerd. De analytische methode heeft als voordeel dat snel veel verschillende berekeningen kunnen worden uitgevoerd. Daardoor kan snel inzicht worden verkregen in effecten van parameterinstellingen. Nadeel van de analytische methode is dat veel aspecten (sterk) worden geschematiseerd.

In onderstaande paragrafen zijn de resultaten van de analytische methode gepresenteerd. In hoofdstuk 5 zijn de verschillende sporen samengebracht in een synthese waarin ook de resultaten tussen de numerieke aanpak en de analytische aanpak vergeleken worden.

## 4.2 ANALYTISCH SPOELMEER MODEL FLUSHING BASIN

De stroomsnelheden die door spoelen in de getijdegeul worden opgewekt, kunnen worden berekend met het spreadsheet model FLUSHINGBASIN.xls Dit model is in eerdere studies opgezet en afgeregeld op numerieke modellen van onder andere Rijkswaterstaat. De komberging en het verval door bodemwrijving over de geullengte worden in dit model op eenvoudige wijze meegenomen.

De onderliggende aannamen zijn:

- sinusvormig getij; getijslag is constant in de komende 50 jaar; geen waterstandsveranderingen door op- en afwaaiing;
- geen zeespiegelstijging;
- waterstand op zeerand wordt niet beïnvloed door het getijbekken;
- overlaatformules voor subkritische stroming ( $Froude < 1$ );
- Chézy-formule voor het geulverhang.

De invoerparameters zijn:

- getijamplitude en getijperiode;
- gemiddeld zeeniveau boven NAP;
- oppervlakte van het spoelbekken;
- tijd van schuifopening na hoogwater;
- breedte van doorlaatwerk;
- breedte van getijgeul; lengte van getijgeul;
- diepte van getijgeul ten opzichte van NAP;
- diepte van doorlaatsdempeling ten opzichte van NAP;
- bodemruwheid;
- afvoercoëfficiënt.

De aanname is dat de waterstand in de Waddenzee bepalend is voor het waterniveau in de geul en dat het debiet van het doorlaatwerk geen merkbare invloed heeft op de waterstand in de geul. Bij lage waterstanden is deze aanname waarschijnlijk een te eenvoudige weergave van de situatie.

De gebruikte formules van het spoelmodel behoren tot het standaardformules uit de vloeistofmechnica (afvoerformules voor een overlaat) en zijn voldoende gevalideerd. De afvoercoëfficiënt ( $m$ ), ofwel efficiency van het doorlaatwerk, is een parameter die op basis van kenmerken van de constructie in meer detail kan worden berekend. Uiteindelijk blijkt de efficiency tijdens het gebruik. De gehanteerde waarde van 0,8 is gebaseerd op praktijkervaring (conservatief).

De nauwkeurigheid van de berekende debieten en stroomsnelheden in de geul wordt bepaald door de  $m$ -waarde (afvoercoëfficiënt) in combinatie met de definitie van de waterdiepte boven de drempel van de doorlaat. Bij eb zijn de waterdiepten boven de drempel relatief klein ( $< 0,5$  m) en is de onnauwkeurigheid van debiet en stroomsnelheden relatief groot. In de praktijk is schaalonderzoek nodig om vooraf een nauwkeurige debietberekening mogelijk te maken.

In dit stadium van het onderzoek is de onnauwkeurigheid van de berekende debieten en stroomsnelheden van de orde 15% tot 20%.

Het model vertoont instabiliteit (oscillaties van de binnen- en buitenwaterstand) als de binnen- en buitenwaterstand bij benadering gelijk worden (laagwaterkentering). Dit wordt versterkt door het meenemen van het verval in de geul. Voor meer informatie aangaande het analytische model wordt verwezen naar Bijlage A.

### 4.3 MODEL SIMULATIES

Met het analytische model zijn een groot aantal simulaties uitgevoerd. Modelsimulaties die zijn meegenomen zijn:

| Parameter              |   |
|------------------------|---|
| Lengte geul            | 200 – 3000 m in stappen van 500 m                 |
| Breedte geul           | 15 – 25 m in stappen van 5 m                      |
| Diepte geul            | 0,5 – 1,5 m onder NAP in stappen van 0,25 m       |
| Regelwerk breedte      | 5 en 10 m   |
| Regelwerk opening      | 1,0 tot 9,0 uur na hoogwater in stappen van 1 uur |
| Spoelmeer oppervlakken | 10 – 20 hectare in stappen van 2,5 ha             |
| Bodemruwheid           | 0,001 en 0,005 m                                  |

Het voert te ver om in dit rapport alle resultaten te presenteren. Onder paragraaf 4.4 worden daarom alleen de resultaten van de belangrijkste berekeningen besproken. Een overzichtstabel van de resulterende stroomsnelheden en waterstanden voor de verschillende beschouwde situaties voor zowel de analytische aanpak als de numerieke aanpak is gepresenteerd onder hoofdstuk 5.

## 4.4 RESULTATEN MODELSIMULATIES

### 4.4.1 Effect spoelmeer zonder regelwerk

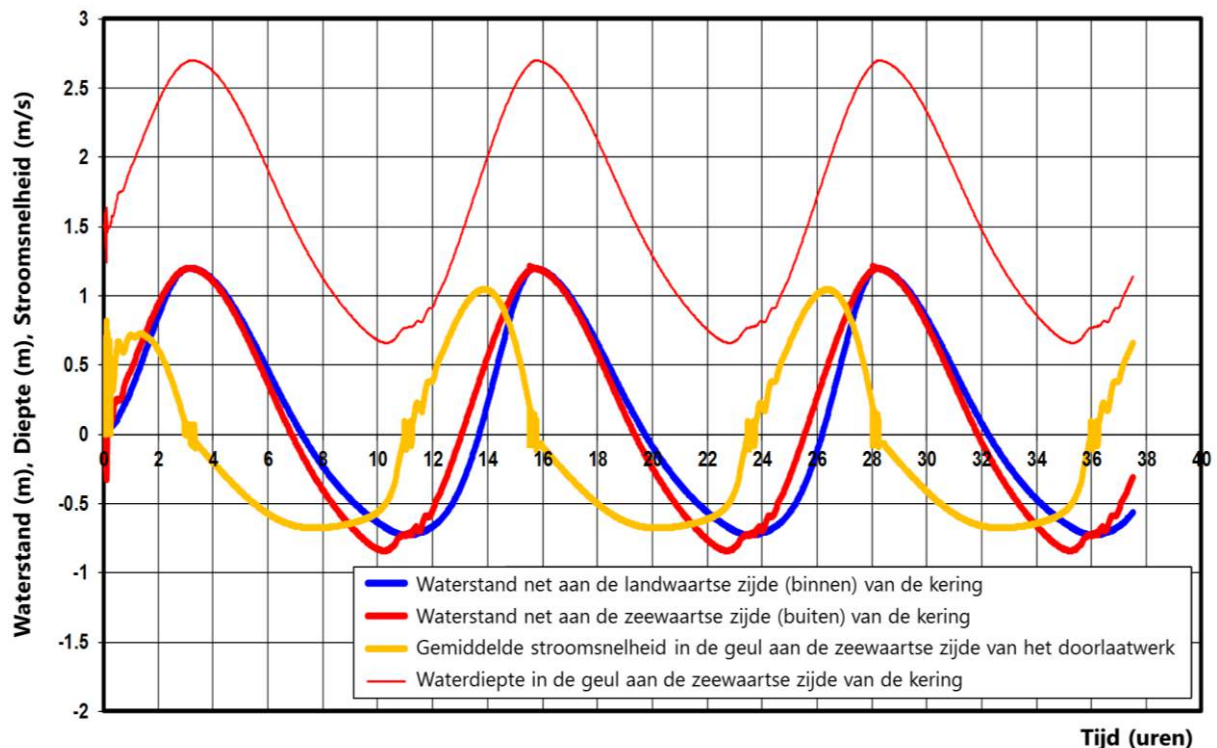
De berekeningen met het analytische model zijn uitgevoerd met de volgende invoerparameters:

- oppervlakte= 15 ha;
- getijslag= 2,2 m (gemiddeld getij);
- geullengte= 3000 m; geulbreedte= 15 m; geuldiepte = NAP -1,4 m;
- breedte doorlaat= 10 m; drempel op -1 m NAP;
- bodemwrijving  $k_s = 0,001$  m.
- open doorlaatwerk zonder schuifregeling.

De belangrijkste resultaten zijn:

- waterspiegel gaat bij benadering horizontaal omhoog en omlaag;
- maximale vloedstroomsnelheid is ca. 1 m/s op ca. 2 uur voor hoogwater;
- maximale ebstroomsnelheid is ca. 0,7 m/s op ca. 4 uur voor laagwater;
- minimale waterdiepte in de geul is ca. 0,7 m tijdens laagwater.

Gelijk aan de resultaten van het numerieke model (zie hoofdstuk 3) zijn de maximale ebstroomsnelheden kleiner dan de maximale vloedsnelheden. Dit wordt veroorzaakt door de geul. Als gevolg van de bodemweerstand in de geul is er een waterstandsverval over de geullengte nodig om het water door de geul te doen stromen. De waterstand bij eb nabij de haven blijft daardoor relatief hoog.



Figuur 4.1: Berekende waterstanden en stroomsnelheden met open doorlaat ( $b = 10$  m).

#### 4.4.2 Effect spoelmeer met regelwerk

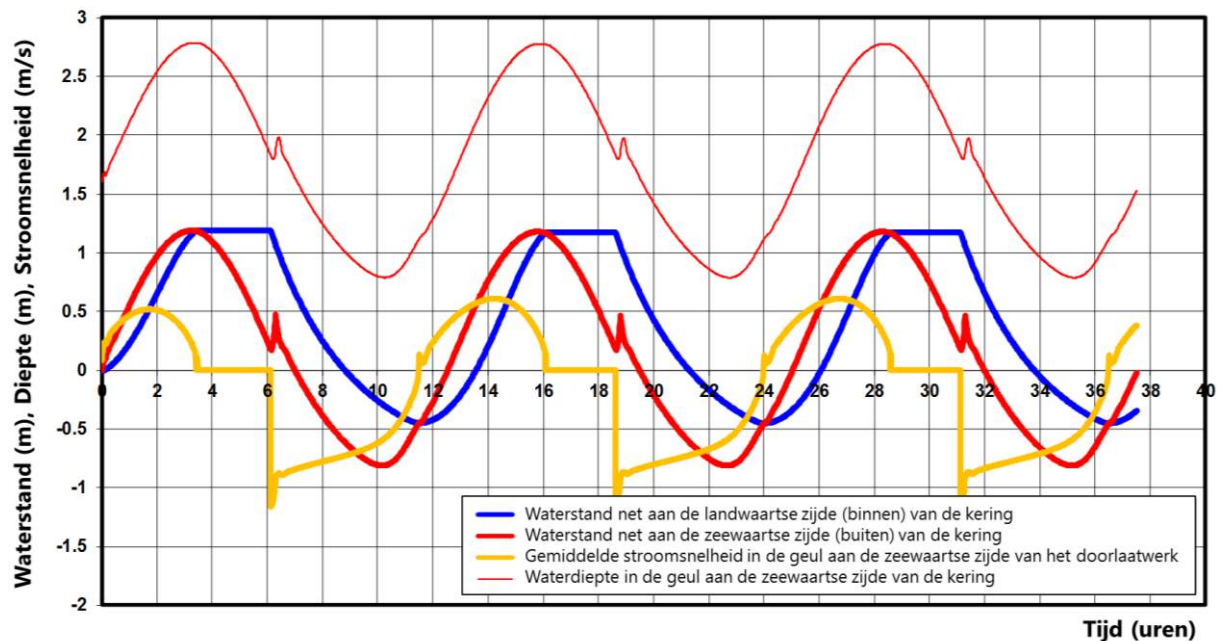
Met behulp van een schuifregeling kunnen de stroomsnelheden in de geul worden gemanipuleerd. In onderstaande secties zijn de resultaten van drie berekeningen gepresenteerd:

- Spoelen tijdens eb, 3 uur na HW
- Spoelen tijdens eb, 5 uur na HW
- Spoelen tijdens opkomende vloed, 8,5 uur na HW.

##### A. Spoelen tijdens eb, 3 uur na HW

Figuur 4.2 toont de resultaten van een berekening met een doorlaat van 5 m en schuifregeling die 3 uur na hoogwater open gaat. De belangrijkste invoerparameters van deze berekening zijn:

- oppervlakte= 15 ha; kering open na 3 uur;
- getijslag= 2,2 m (gemiddeld getij); gemiddeld zeeniveau op 0,1 m boven NAP;
- geulbreedte= 15 m; geullengte= 3000 m; geuldiepte = -1,5 m NAP; drempel doorlaat= -1 m NAP; breedte doorlaat= 5 m;
- bodemruwheid  $k_s = 0,001$  m; afvoercoëfficiënt  $m = 0,8$ .



Figuur 4.2: Berekende waterstanden en stroomsnelheden met doorlaatwerk ( $b = 5$  m; open na 5 uur); Getijslag= 2,2 m; Oppervlakte= 15 ha, geuldiepte = -1,5 m NAP; geulbreedte= 15 m.

De belangrijkste resultaten van deze berekening zijn:

- maximale vloedstroomsnelheid (gele lijn) is ca. 0,6 m/s op ca. 2 uur voor hoogwater;
- maximale ebstroomsnelheid (gele lijn) is ca. 0,9 m/s op ca. 3 uur na hoogwater; gemiddeld ca. 0,8 m/s gedurende 1 uur;
- maximale ebdebiet is ca. 32 m<sup>3</sup>/s; Froude-getal kort na opening van de schuif is ca. 1 (kritische stroming, waardoor de stroming instabiel is met mogelijk het ontstaan van een watersprong);
- maximale stroomsnelheid aan de zeerand is ca. 0,2 m/s groter dan aan de landrand door de komberging in de lange geul;
- grote asymmetrie in stroomsnelheden ten gunste van de ebstroming (maximaal spoel effect);

- maximale stroomsnelheid in doorlaatwerk= 3,5 m/s (kortstondig; zware bodembescherming nodig);
- minimale waterdiepte in de geul is ca. 0,8 m tijdens laagwater;
- de buitenwaterstand vertoont een klein piekje (orde 0,5 m op circa t= 7, 19, 31 uur) door het plotseling openen van de schuif.

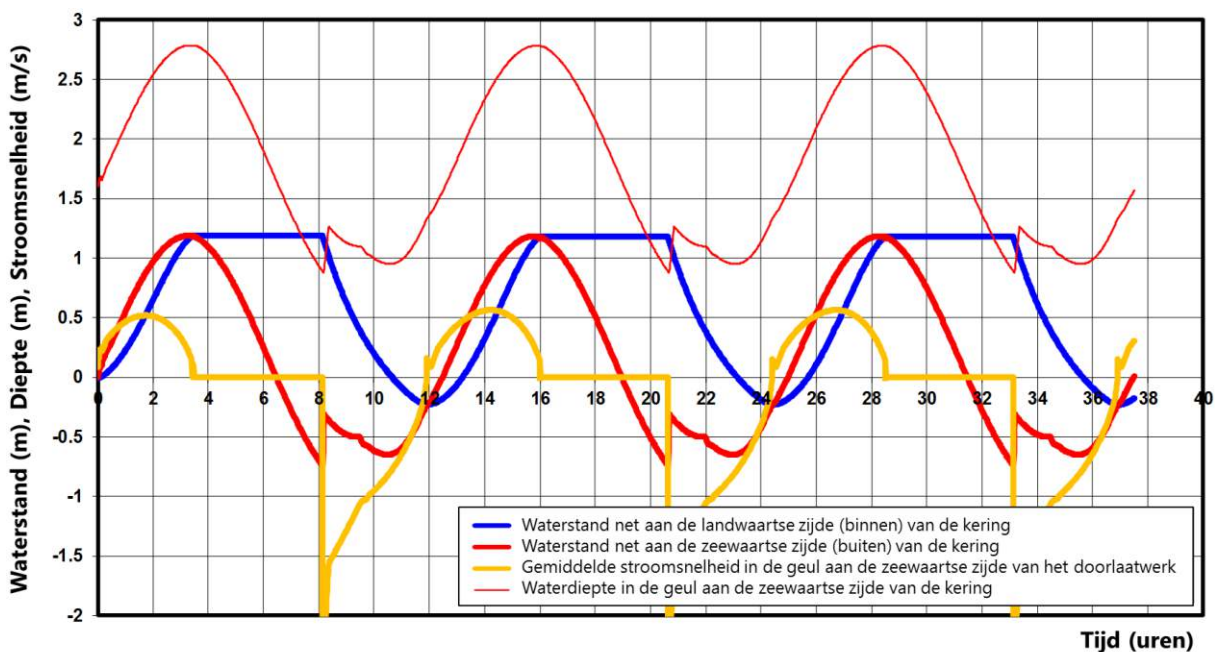
Indien de schuif na 5 uur wordt geopend, zal er benedenstrooms van de schuif een watersprong kunnen ontstaan omdat het Froude-getal > 1 wordt.

## B. Spoelen tijdens eb, 5 uur na HW

Figuur 4.3 toont de resultaten van een berekening met schuifregeling waarbij de schuif 5 uur na hoogwater wordt geopend). De belangrijkste invoerparameters van deze berekening zijn:

- oppervlakte= 15 ha; kering open na 5 uur;
- getijslag= 2,2 m (gemiddeld getij); gemiddeld zeeniveau op 0,1 m boven NAP;
- geulbreedte= 15 m; geullengte= 3000 m; geuldiepte = -1,5 m NAP; drempel doorlaat= -1 m NAP; breedte doorlaat= 5 m
- bodemruwheid  $k_s = 0,001$  m; afvoercoëfficiënt  $m = 0,8$ .

De ebstroomsnelheid is maximaal 1,5 m/s en ca. 1,3 m/s gemiddeld over 1 uur. De waterdiepte van de stroming benedenstrooms van het doorlaatwerk is ca. 1 m met een Froude-getal van 1,4 (super-kritische stroming) waardoor er een kleine watersprong kan ontstaan als overgang naar sub-kritische stroming. Het debiet is ca 33 m<sup>3</sup>/s.



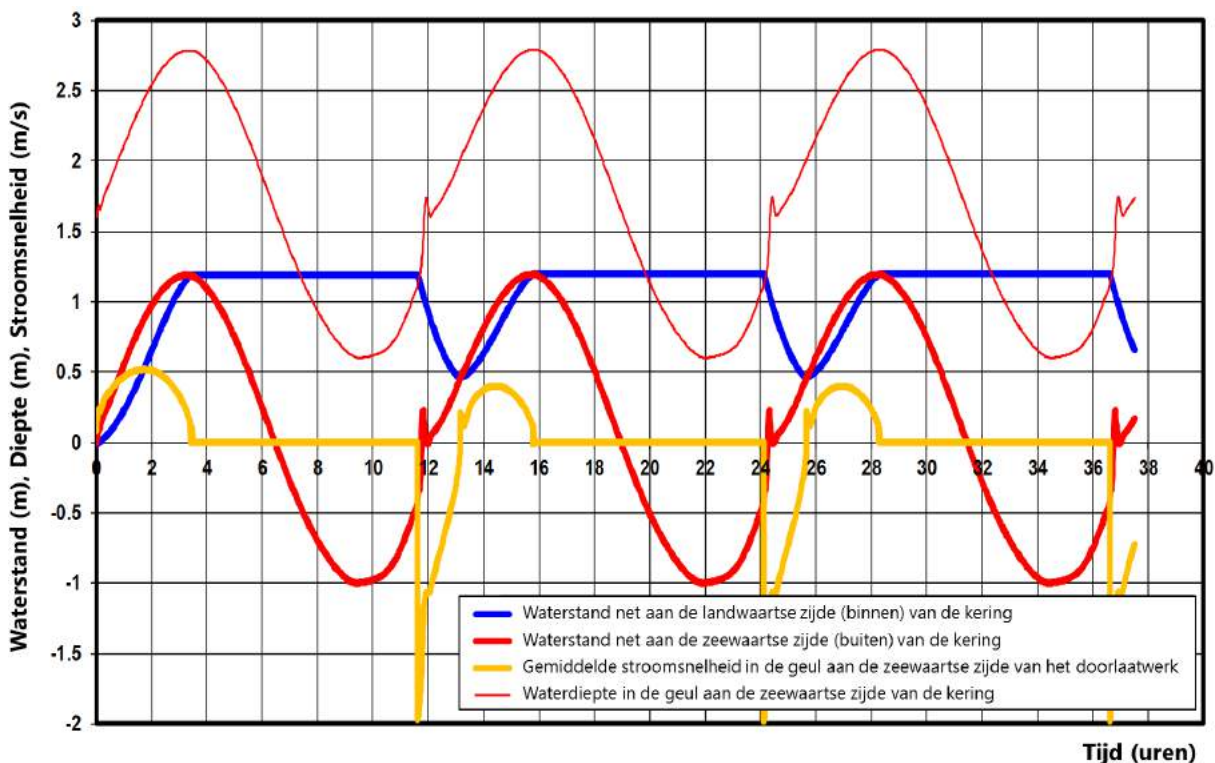
Figuur 4.3: Berekende waterstanden en stroomsnelheden met doorlaatwerk ( $b=5$  m; schuif open na 5 uur). Getijslag= 2,2 m; Oppervlakte= 15 ha, geuldiepte = -1,5 m NAP; geulbreedte= 15 m.

## C. Spoelen tijdens opkomende vloed

Een mogelijke optie is om te gaan spoelen tijdens de opkomende vloed. De schuiven worden dan pas na de laagwaterkering geopend; bijvoorbeeld op 8,5 uur na het voorafgaande hoogwater (3,5 uur



voor het volgende hoogwater). Deze optie kan worden gezien als het zoveel mogelijk tegenhouden van de vloedstroom. De invoerparameters zijn gelijk aan die onder A en B, behalve het tijdstip van spoelen. De schuiven worden geopend op 3,5 uur voor het volgende hoogwater.



*Figuur 4.4: Berekende waterstanden en stroomsnelheden met doorlaatwerk (b=5 m; schuif open 8,5 uur). Getijslag= 2,2 m; Oppervlak= 15 ha, geuldiepte = -1,5 m NAP; geulbreedte= 15 m*

De belangrijkste resultaten van deze berekening zijn (zie Figuur 4.4):

- de maximale spoelduur is maar ca. 1 tot 1,5 uur; de waterstand in het spoelbekken komt niet lager dan +0,5 m NAP;
- maximale vloedstroomsnelheid (gele lijn) is ca. 0,35 m/s (vullen van spoelbekken);
- maximale ebstroomsnelheid (gele lijn) is zeer kortstondig ca. 1,5 m/s; gemiddeld ca. 0,7 m/s gedurende 1 uur;
- maximale ebdebiet is ca. 33 m<sup>3</sup>/s; Froude-getal kort na opening van de schuif is ca. 1 (kritische stroming, waardoor de stroming instabiel is met mogelijk het ontstaan van een watersprong);
- waterdiepte in de geul is ca. 1,5 m tijdens spoelen (gunstig omdat Froude-getal daardoor niet groter 1 kan worden);
- grote asymmetrie in stroomsnelheden ten gunste van de ebstroming;
- maximale stroomsnelheid in doorlaatwerk= 4 m/s (kortstondig; zware bodembescherming nodig).

De vloedstroom wordt gedeeltelijk tegengehouden, maar nog steeds zijn er vloedstroomsnelheden van 0,3 m/s gedurende ca. 3 tot 4 uur. Deze stroomsnelheden zijn enigszins groter dan die in de bestaande situatie zonder spoelmeer. De tijd waarin hoge eb-snelheden voorkomen is aanzienlijk kleiner dan wanneer het regelwerk op 5 uur na hoogwater wordt geopend, echter de maximale snelheden zijn groter. De vraag is of het slib dat door de vloedstroom wordt aangevoerd, weer kan worden verwijderd tijdens de korte spoelduur van ca. 1 uur met een zeer kortstondige pieksnelheid van 1,5 m/s.

Een voordeel van het spoelen op 8,5 uur na hoogwater is dat de aanslibbing van het spoelmeer kleiner zal zijn omdat een deel van het sedimentrijke Waddenzeewater buiten wordt gehouden.

#### 4.4.3 Optreden van een translatiegolf door regelwerk

Tijdens de periode met gesloten schuif blijft de waterstand in het spoelmeer constant en is slechts beperkte stroming in de geul. Als de kering wordt geopend, nemen de stroomsnelheden ineens flink toe. Er zal een kleine translatiegolf ('bore') langs de geul gaan lopen, die naar het einde van de geul dempt.

Middel de 'bore'-formule kan een inschatting worden gemaakt van de hoogte en snelheid van zo'n golf. Voor Noordpolderzijl is uitgerekend dat de frontsnelheid van een bore circa 3 m/s is en de hoogte van de 'bore' boven de waterstand in de geul tot circa 1 m kan oplopen. In werkelijkheid zal het front wat meer worden gedempt omdat er ook water in zijdelingse richting weg kan lopen. Het front met een realistische hoogte van ca. 0,3 tot 0,5 m loopt in circa 10 tot 15 minuten naar het einde van de geul. Door de schuiven langzaam te openen kunnen de meest extreme snelheden in het front van de bore worden voorkomen.

Omdat de breedte na het doorlaatwerk in de havenkom toeneemt, zal de stroomsnelheid snel afnemen waardoor een eventueel optredende watersprong wordt onderdrukt. Een watersprong zal mogelijk wel kunnen optreden bij aanwezigheid van een regelwerk met een grote breedte van 10 m, omdat de stroomsnelheid dan minder sterk afneemt na het doorlaatwerk. Het ontstaan van een watersprong met hoge stroomsnelheden en veel turbulentie is een ongewenste situatie.

# 5 SYNTHESE

## 5.1 INLEIDING

Onder dit hoofdstuk zijn de verschillende sporen die zijn uitgevoerd (zie Figuur 1.1) samengebracht. Gebaseerd op alle informatie die is verzameld is vervolgens een onderbouwde inschatting gemaakt van de effecten van het toepassen van een spoelmeer. De volgende sporen zijn in de beschouwing meegenomen:

- 1) Analyse van de huidige situatie bij Noordpolderzijl (Hfst. 2)
- 2) Meetcampagne hydrodynamica en kritische bodemschuifspanning (Bijlage C: Meetcampagne)
- 3) Analyse van bestaand spoelmeer Nessmersiel (Bijlage D: Spoelmeer Nessmersiel)
- 4) Numerieke modelberekeningen (Hfst 3)
- 5) Analytische model berekeningen (Hfst 4).

## 5.2 BESCHOUWING SPOOR 1-3

### Spoor 1: analyse huidige situatie Noordpolderzijl

Uit de spoor 1 volgt dat de locatie Noordpolderzijl met de aanwezige geul die een relatief hoogliggend gebied doorkruist, een vormgeving heeft waarin een spoelmeer effectief zou kunnen zijn. Een eventueel te maken spoelmeer kan zo worden ingevoegd dat het vullen en ledigen van het bassin alleen door de bestaande geul plaatsvindt waardoor de stroomsnelheden door de geul (aanzienlijk) zullen toenemen. De geul is met 3 kilometer wel relatief lang en momenteel erg ondiep om een spoelmeer effectief te laten werken.

Het bestaande gemaal heeft slechts een zeer beperkte capaciteit ( $4 \text{ m}^3/\text{s}$ ) om stroomsnelheden in de geul noemenswaardig te laten toenemen om erosie te initiëren. Wel kan het gemaal positief gebruikt worden om sedimentrijk water buiten te houden. Indien het gemaal tijdens of vlak na laagwater in werking treedt kan het maalwater een deel van het vloedvolume bergen en er daarmee voor zorgen dat minder sedimentrijk water vanaf de Waddenzee in de geul/ spoelmeer terecht komt.

Momenteel vindt er jaarlijks onderhoud van de geul plaats middels ploegen. Daarbij wordt tijdens hoogwater het bodemmateriaal opgewoeld waardoor het met de ebstroom uit de geul richting de Waddenzee wordt getransporteerd. Het ploegen is de afgelopen jaren vrij succesvol geweest. Echter, door de hoge mate van aanslibbing in het gebied heeft de geul zich na het ploegen veelal in relatief korte tijd weer gevuld met sediment.

### Spoor 2: Meetcampagne hydrodynamica en kritische bodemschuifspanning

Uit spoor 2 volgt dat het bodemmateriaal in de haven van Noordpolderzijl zeer cohesief materiaal betreft. Zeker wanneer het materiaal enige tijd krijgt om te consolideren zijn relatief hoge snelheden nodig (circa  $1,0 \text{ m/s}$ ) om het materiaal te doen eroderen. Wanneer het materiaal niet de kans krijgt om te consolideren, treedt erosie reeds op bij aanzienlijk lagere snelheden. Het zeer losse materiaal zal bij  $0,2 \text{ m/s}$  al getransporteerd worden, de iets meer geconsolideerde bodem bij  $0,5 \text{ m/s}$ .

De huidige stroomsnelheden in de geul zijn gedurende vloed aanzienlijk groter (150%) dan tijdens eb. De stroomsnelheden tijdens vloed zijn daarmee veel beter in staat om sediment te eroderen en in de richting van de haven te transporten. Het systeem is daarmee sterk sediment importerend met relatief



hoge sedimentatie hoeveelheden. Dit komt overeen met de huidige waarnemingen in het systeem van circa 0,5 tot 1,0 m aanslibbing per jaar.

### Spoor 3: Analyse van bestaand spoelmeer Nessmersiel

Analyse van het spoelmeer bij Nessmersiel laat zien dat door het regelwerk bij Nessmersiel de snelheden tijdens eb met circa 0,35 m/s kunnen toenemen. Door de aanleg van het spoelmeer is de evenwichtsbodemligging in de geul met circa 0,4 m lager komen te liggen. De sedimentatie in het spoelmeer zelf is, in tegenstelling tot wat verwacht zou worden, vrij beperkt. De relatief hoge concentraties slib in de Waddenzee bereiken ofwel het spoelmeer niet of krijgen in het spoelmeer niet de kans om te bezinken. Het spoelmeer bij Nessmersiel is dus vrij succesvol.

Er bestaan wel verschillen tussen Nessmersiel en Noordpolderzijk. Zo is de geul bij Nessmersiel met 1200 m aanzienlijk korter dan bij Noordpolderzijk en is het omliggende intergetijd gebied lager gelegen. Daarentegen is de geul bij Noordpolderzijk minder diep en is het doorstroomprofiel kleiner. Dit heeft als voordeel dat sneller hogere snelheden in de geul bereikt kunnen worden maar als nadeel dat het vullen en ledigen van het systeem langzamer zal verlopen dan bij Nessmersiel.

Na een onderhoudsperiode (van 2 tot 4 weken) waarin het regelwerk niet wordt gebruikt (niet spoelen) wordt er vrij snel een laag slib op de bodem van het kanaal afgezet. Er dient dan een ploegboot te worden gebruikt om het geconsolideerde slib weer te verwijderen.

## 5.3 BESCHOUWING SPOOR 4 EN 5

Onder spoor 4 en 5 zijn numerieke en analytische berekeningen uitgevoerd naar de effectiviteit van het spoelmeer. In Tabel 5.1 is een overzichtstabel gepresenteerd met daarin de resultaten van zowel de numerieke als analytische berekeningen. In zwart zijn de resultaten van de numerieke berekeningen gepresenteerd en in rood zijn de resultaten van de analytische berekeningen gepresenteerd.

Uit Tabel 5.1 volgt dat over het algemeen de twee aanpakken redelijk goed overeenkomen en in ongeveer dezelfde orde van grootte snelheden resulteren. Het belangrijkste verschil komt voort uit het feit dat het analytische model lagere laagwaterstanden berekend dan het numerieke model (zie kolom "WLmin binnen"). In andere woorden, het leeglopen van het spoelmeer gaat in de analytische berekeningen sneller dan in de numerieke berekeningen. Daardoor zijn de eb-snelheden in het analytische model hoger dan in het numerieke model. Zeker bij het toepassen van een regelwerk zijn grotere verschillen zichtbaar.

In het numerieke model zijn de belangrijkste fysische processen beter meegenomen dan in het analytische model. Wel verwachten we dat het numerieke model iets conservatief is in het laten leeglopen van het spoelmeer. De reden daarvoor kan zijn dat ondanks de lage resolutie van het rooster (3,5 x 7,0 m), de geul nog door onvoldoende roostercellen wordt gerepresenteerd (de geul beslaat momenteel circa 6 cellen), Hierdoor wordt een numerieke ruwheid in het model geïntroduceerd waardoor het spoelmeer langzamer leegloopt dan in werkelijkheid het geval zal zijn.

Aan de andere kant lijkt het analytische model de snelheden te overschatten doordat vereenvoudigingen in de formules zijn meegenomen en niet alle processen in detail worden berekend zoals wel het geval is in de numerieke aanpak. Naar verwachting zijn de berekende stroomsnelheden van de numerieke aanpak dus iets te laag en die van de analytische aanpak te hoog.

Door beide aanpakken naast elkaar te gebruiken wordt direct een bandbreedte zichtbaar van de nauwkeurigheid van de modelresultaten. Gegeven bovengenoemde onzekerheden laten beide aanpakken zien dat de stroomsnelheden in de geul door het spoelmeer aanzienlijk zullen toenemen.



Er worden snelheden bereikt die sediment, dat in voorgaande dagen (tot weken) op de bodem is bezonken, van de bodem kan eroderen.

## 5.4 OVERALL CONCLUSIE GEBASEERD OP DE 5 BESCHOUWDE SPOREN

Door toepassing van een spoelmeer (met regelwerk) nemen de stroomsnelheden in de geul aanzienlijk toe en komt de evenwichtbodempligging van de vaargeul naar Noordpolderzijl dieper te liggen. Daardoor zal het benodigd onderhoud van de geul en de haven aanzienlijk lager zijn dan in de huidige situatie en in het beste geval zelfs achterwege kunnen blijven. Het spoelmeer heeft daarmee een groot positief effect op de benodigde ploeg- c.q. baggerinspanning in geul en haven. De mate waarin nog onderhoud moet worden gepleegd in de situatie met spoelmeer, dient in de eventuele verdere planuitwerking nauwkeuriger te worden onderzocht.

Tabel 5.1: Overzichtstabel van resultaten van de analytische en numerieke berekeningen. In rood zijn de resultaten van de analytische berekeningen gepresenteerd, in zwart de resultaten van de numerieke berekeningen.

| Situaties  | Diepte geul tot NAP (m) | Spoelmeer | Tijdstip van openen na HW (uur) | WL max (mNAP) | WL min Binnen (mNAP) | Vloed Max. stroom (m/s) | Eb                |                              |
|--|-------------------------|-----------|---------------------------------|---------------|----------------------|-------------------------|-------------------|------------------------------|
|  |                         |           |                                 |               |                      |                         | Max. stroom (m/s) | Gem. stroom over 1 uur (m/s) |
| Met spoelmeer, geen regelwerk                            |                         |           |                                 |               |                      |                         |                   |                              |
| 1S.  | 0                       | Ja, 10ha  | 0                               | 1,0<br>1,0    | +0,5<br>+0,2         | 0,7<br>0,55             | 0,2<br>0,5        | 0,2<br>droog                 |
| 2S.  | -0.85                   | Ja, 10ha  | 0                               | 1,1<br>1,1    | -0,2<br>-0,5         | 0,65<br>0,65            | 0,3<br>0,5        | 0,3<br>0,5                   |
| 3S.  | -1.5                    | Ja, 10ha  | 0                               | 1,1<br>1,1    | -0,5<br>-0,65        | 0,45<br>0,45            | 0,35<br>0,35      | 0,35<br>0,35                 |
| Met spoelmeer, met regelwerk                             |                         |           |                                 |               |                      |                         |                   |                              |
| 2Sr3.  | -0.85                   | Ja, 10ha  | 3                               | 1,1<br>1,1    | -0,2<br>-0,5         | 0,70<br>0,65            | 0,65<br>1,0       | 0,6<br>0,7                   |
| 2Sr5.  | -0.85                   | Ja, 10ha  | 5                               | 1,1<br>1,1    | -0,1<br>-0,4         | 0,60<br>0,55            | 1,2<br>1,9        | 0,8<br>1,5                   |
| 2Sr9.  | -0.85                   | Ja, 10ha  | 8,5                             | 1,1<br>1,1    | +0,4<br>+0,3         | 0,35<br>0,35            | 1,4<br>1,3        | 0,7<br>0,7                   |
| Met spoelmeer, met regelwerk, verschillende oppervlakten |                         |           |                                 |               |                      |                         |                   |                              |
| 2Sr5_10ha  | -0.85                   | Ja, 10ha  | 5                               | 1,1<br>1,1    | -0,1<br>-0,4         | 0,6<br>0,55             | 1,2<br>1,9        | 0,8<br>1,5                   |
| 2Sr5_15ha  | -0.85                   | Ja, 15ha  | 5                               | 1,0<br>1,1    | 0,1<br>-0,1          | 0,65<br>0,6             | 1,2<br>1,7        | 0,85<br>1,4                  |
| 2Sr5_20ha  | -0.85                   | Ja, 20ha  | 5                               | 0,9<br>1,0    | 0,2<br>0,0           | 0,7<br>0,6              | 1,2<br>1,5        | 0,90<br>1,3                  |

## 5.5 OPTIMALE DIMENSIES

Gebaseerd op de uitgevoerde hydrodynamische studie zijn de voorgestelde optimale dimensies:

- Spoelmeerooppervlak  $\pm 12 - 15$  ha
- Breedte geul  $\pm 15 - 20$  m
- Diepte geul initieel  $\pm \text{NAP} -1,0$  m
- Openen 5 – 9 uur na hoogwater
- Breedte doorlaatwerk  $\pm 5$  m
- Drempel doorlaatwerk  $\pm \text{NAP} -1,0$  m
- Hefkering met dubbel uitgevoerde schuiven (ivm onderhoud)
- Bodembescherming bij doorlaatwerk

## 5.6 AANDACHTSPUNTEN

### 5.6.1 Erosie van de oevers van de geul

Effectief spoelen vereist dat er wordt gespoeld bij laagwater, zodanig dat de waterdiepte niet veel groter is dan 1,5 m omdat er anders te veel uitwaaiing van de stroming over de aangrenzende kwelders zal optreden. De ebstroom dient zoveel mogelijk in de geul te blijven stromen.

Ook dient te worden voorkomen dat de oevers eroderen door de hoge spoelsnelheden in de geul. Op termijn zou er dan een brede, ondiepe geul kunnen ontstaan met onvoldoende vaardiepte. Toepassen van palenrijen langs de geul kan ervoor zorgen om de stroming meer in het midden van de geul te houden.

### 5.6.2 Sedimentatie in het spoelmeer

Om sedimentatie in het spoelmeer zoveel mogelijk te voorkomen kan een kering met twee schuiven worden toegepast: bovenschuif en onderschuif waarbij de vloedstroom zoveel mogelijk door de bovenschuif wordt binnengelaten om relatief slibarm water dat zich hoger in de waterkolom bevindt in te laten.

### 5.6.3 Onderhoud regelwerk

Indien het regelwerk stuk gaat/ onderhoud nodig heeft krijgt sediment in de geul tijd om te consolideren. Zoals uit de huidige onderhoudscijfers volgt kan de aanslibbing vrij snel gaan. Om dit probleem te voorkomen, kan er worden gedacht aan een oplossing met twee kleine spoelbekkens of toepassing van een dubbel regelwerk. Bij onderhoud van één van de keringen, kan het andere regelwerk worden gebruikt om slibafzetting in de geul zoveel mogelijk te beperken. Een bijkomend voordeel is dat er in plaats van één grote, twee lichtere keringsconstructies kunnen worden toegepast.

### 5.6.4 Hoge waterstanden door opwaaiing

Hoge waterstanden (tot maximaal +5 m NAP; allerhoogste gemeten waterstand is + 4,83 m NAP op 6 november 2006 te Delftzijl) treden vooral op in situaties met stormwind uit West tot Noord-Oost waarbij het water in de Waddenzee wordt opgestuwd.

De waterstand in het spoelbekken mag niet veel hoger worden dan NAP + 2 m. Tijdens hoogwaterpieken in de Waddenzee blijft het doorlaatwerk gesloten. Deze waterstand van NAP + 2 m is een keuze die gemaakt moet worden bij het ontwerpen van het spoelmeer. Het is niet raadzaam om het doorlaatwerk



langdurig te sluiten in de stormperiodes, omdat juist dan veel sediment in de Waddenzee wordt herverdeeld en het baggerbezwaar in de geul toeneemt.

### 5.6.5 Aansluiting spoelmeer op de haven en geul

Door het spoelen zal er tijdelijk (gedurende ca. 2 uur per getijperiode van 12 uur) een onrustig stroompatroon met relatief veel turbulentie in de havenkom ontstaan, waardoor er voor kleine boten geen rustige afmeerplaatsen langs de bestaande rechte kade kunnen worden gerealiseerd. De aansluiting van het spoelmeer op de haven en geul dient in een volgende fase nadere aandacht te krijgen.

### 5.6.6 Optreden van een translatiegolf door toepassen van het regelwerk

Tijdens de periode met gesloten schuif blijft de waterstand in het spoelmeer constant en is slechts beperkte stroming in de geul. Als de kering wordt geopend, nemen de stroomsnelheden ineens flink toe. Er zal een kleine translatiegolf ('bore') langs de geul gaan lopen, die naar het einde van de geul dempt.

Voor Noordpolderzijl is uitgerekend dat de frontsnelheid van een bore circa 3 m/s is en de hoogte van de "bore" boven de waterstand in de geul tot circa 1 m kan oplopen. In werkelijkheid zal het front wat meer worden gedempt omdat er ook water in zijdelingse richting weg kan lopen. Het front met een realistische hoogte van ca. 0,3 tot 0,5 m loopt in circa 10 tot 15 minuten naar het einde van de geul. Te hoge snelheden is ongewenst voor de scheepvaart. Door de schuiven langzaam te openen kunnen de meest extreme snelheden in het front van de bore worden voorkomen.

### 5.6.7 Optreden van een watersprong nabij het regelwerk

Bij een relatief beperkte breedte van het regelwerk van 5 m en is de kans op een watersprong beperkt. Een watersprong zal mogelijk wel kunnen optreden bij aanwezigheid van een regelwerk met een grote breedte van 10 m, omdat de stroomsnelheid dan minder sterk afneemt na het doorlaatwerk. Het ontstaan van een watersprong met hoge stroomsnelheden en veel turbulentie is een ongewenste situatie. Deze kan worden onderdrukt door de schuiven langzamer te openen zodat de buitenwaterstand geleidelijker omhoog kan komen en het waterstandsverschil over het regelwerk kleiner wordt.

# 6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

## 6.1 CONCLUSIES

### Huidige situatie

In de huidige situatie is de vaargeul sterk sediment importerend van karakter. De eb-snelheden zijn kleiner dan de vloed snelheden.

Door het verdiepen van de geul (zonder spoelmeer) nemen de debieten door de geul toe en de stroomsnelheden vooral tussen  $x=0-2300$  m af. Daarnaast neemt de getij-asymmetrie toe (hogere vloedstroming dan ebstroming). Een verdieping van de geul zonder toepassing van een spoelmeer zal de mate van sediment import in dat deel van het systeem doen toenemen. Daardoor zal door de verdieping de mate van aanslibbing toenemen.

### Toepassen van een spoelmeer zonder regelwerk

Door het toepassen van een spoelmeer worden de maximale debieten een factor 4 groter dan in de huidige situatie. Ook de stroomsnelheden nemen flink toe met over vrijwel de gehele geul een toename in snelheden van circa 0,4 m/s waardoor sediment aan de bodem makkelijker kan worden geërodeerd.

Daarnaast neemt ook de getij-asymmetrie iets toe (hogere vloedstroming dan ebstroming) waardoor een spoelmeer (zonder toepassing van een regelwerk) de mate van sediment import in het systeem naar verwachting zal doen toenemen.

### Toepassen van een spoelmeer met regelwerk

Bij het toepassen van een regelwerk kunnen de vloedsnelheden worden verkleind en de eb snelheden aanzienlijk worden vergroot. Hierdoor kan de import van sediment aanzienlijk worden verkleind.

Het regelwerk kan op 2 manieren worden ingezet.

- Wanneer het tussen 0 en circa 5 uur na HW wordt geopend worden voornamelijk de eb-snelheden versterkt. Daardoor worden tijdens eb snelheden bereikt die bodemmateriaal kunnen eroderen en richting de Zuidoost Lauwers kunnen transporteren.
- Wanneer het regelwerk tussen 5 en circa 9 uur na HW wordt geopend treden ook kortstondig hoge eb-snelheden op, vooral in de secties tussen  $x=0-1500$  m maar worden ook de vloedsnelheden gereduceerd. Hierdoor zullen de sedimenttransporten vanaf de Zuidoost Lauwers worden gereduceerd en zal waarschijnlijk minder sedimentrijk water de geul (en spoelmeer) kunnen bereiken.

Een combinatie tussen die 2 mogelijkheden lijkt het meest optimaal.

De optimale tijd van het openen van de schuif zal liggen tussen HW+5 en HW+9.

- HW+5: langere periode met hogere eb stroom (3 uur  $\pm 0,7$  m/s) vooral tijdens laagwater
- HW+9: korte heftige periode met hoge eb stroom (1 uur  $\pm 1,0$  m/s), reduceren vloedstroom (van 0,7 m/s naar 0,4 m/s)





## Optimale spoelmeer oppervlak

Uit de simulaties volgt dat naarmate het spoelmeer groter wordt de stroomsnelheden niet evenredig toenemen met de grootte van het spoelmeer. Daarnaast nemen de vloedsnelheden in de eerste 1500 m van de geul sterker toe dan de eb-snelheden en zijn sterk afhankelijk van de uiteindelijke diepte van de geul. Omdat de uiteindelijke diepte van de geul op dit moment lastig is in te schatten kan geen nauwkeurige afschatting worden geven wat de optimale grootte van het spoelmeer zou zijn. Er wordt aanbevolen het spoelmeer iets groter te dimensioneren dan nodig lijkt. Alle beschouwde oppervlakken (10 – 20 ha) geven een aanzienlijke toename in stroomsnelheden. Gebaseerd op de uitgevoerde hydrodynamische modelberekeningen lijkt een spoelmeer van circa 15 ha voldoende.

## Overall conclusie

Door toepassing van een spoelmeer (met regelwerk) nemen de stroomsnelheden in de geul aanzienlijk toe en komt de evenwichtbodempligging van de vaargeul naar Noordpolderzijl dieper te liggen. Daardoor zal het benodigd onderhoud van de geul en de haven aanzienlijk lager zijn dan in de huidige situatie en in het beste geval zelfs achterwege kunnen blijven. Het spoelmeer heeft daarmee een groot positief effect op de benodigde ploeg- c.q. baggerinspanning in geul en haven. De mate waarin nog onderhoud moet worden gepleegd in de situatie met spoelmeer, dient in de eventuele verdere planuitwerking nauwkeuriger te worden onderzocht.

## 6.2 AANBEVELINGEN

In deze studie is een positief antwoord gegeven op de vraag of een spoelmeer vanuit hydrodynamisch oogpunt haalbaar kan zijn. Er wordt opgemerkt dat in deze studie voornamelijk de effecten op de waterbeweging zijn bestudeerd maar dat het effect op sedimenttransporten nog niet is onderzocht. We bevelen aan om in een mogelijke vervolgfase de morfologische aspecten in meer detail te onderzoeken om bijvoorbeeld het effect van het spoelmeer op de sedimentatie in het spoelmeer te bepalen. Of om beter te kwantificeren wat het effect van verschillende spoelregimes is op de mate van aanslibbing van het spoelmeer en geul.

In de onderliggende studie zijn op enkele plekken in de haven van Noordpolderzijl de erosiebestendigheid van het bodemmateriaal onderzocht. Gebaseerd daarop zijn er indicaties dat de stroomsnelheden die kunnen worden bereikt middels een spoelmeer met regelwerk van de goede orde van grootte zijn om afgezet slib uit de geul te verwijderen. Echter dit onderzoek betreft laboratoriumonderzoek en geen in-situ veldonderzoek. We bevelen aan om in een vervolgfase in-situ veldonderzoek uit te voeren, niet alleen in de haven maar ook in de geul naar de haven toe.

Verder bevelen we aan om de aandachtspunten zoals beschreven onder paragraaf 5.6 in een vervolgfase nader uit te werken.



## 7 REFERENTIES

- coaching, H. A. (2017). *Evaluatie baggeren, Aanloopgeul (en jachthaven) Noordpolderzijl 2016*. Gemeente Eemsmond.
- Deltares. (2011). *Delft3D-FLOW User Manual version 3.15*. Delft.
- Haven Noordpolderzijl*. (2016, Maart). (Waterschap Noorderzijlvest) Retrieved April 2017, from [https://www.noorderzijlvest.nl/ons-werk/projecten/projecten-\(lopend\)/haven/](https://www.noorderzijlvest.nl/ons-werk/projecten/projecten-(lopend)/haven/)
- Koetsier, B., & Simmes, N. (2017). *Erodeerbaarheid slib Noordpolderzijl*. Groningen: Hanzehogeschool Groningen.
- Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut. (2017). *Klimatologie, uurgegevens*. Retrieved Maart 2017, from <http://projects.knmi.nl/klimatologie/uurgegevens/selectie.cgi>
- Noordpolderzijl | NGS*. (n.d.). (NGS) Retrieved April 2017, from [http://www.gemalen.nl/gemaal\\_detail.asp?gem\\_id=399](http://www.gemalen.nl/gemaal_detail.asp?gem_id=399)
- Schünemann, M. &. (1991). *A device for erosion-measurements on naturally formed, muddy sediments: the EROMES-System (p. 28)*. GKSS-Forschungszentrum.
- Waddenzee, P. n. (2016). *NOORDPOLDERZIJL, Verkenning duurzame bereikbaarheid haven met kansen voor de regio*. Leeuwarden.

# BIJLAGEN

Bijlage B: Analytische berekeningen

Bijlage A: Beschrijving numeriek model

Bijlage C: Meetcampagne

Bijlage D: Spoelmeer Nessmersiel

Bijlage E: Figuren

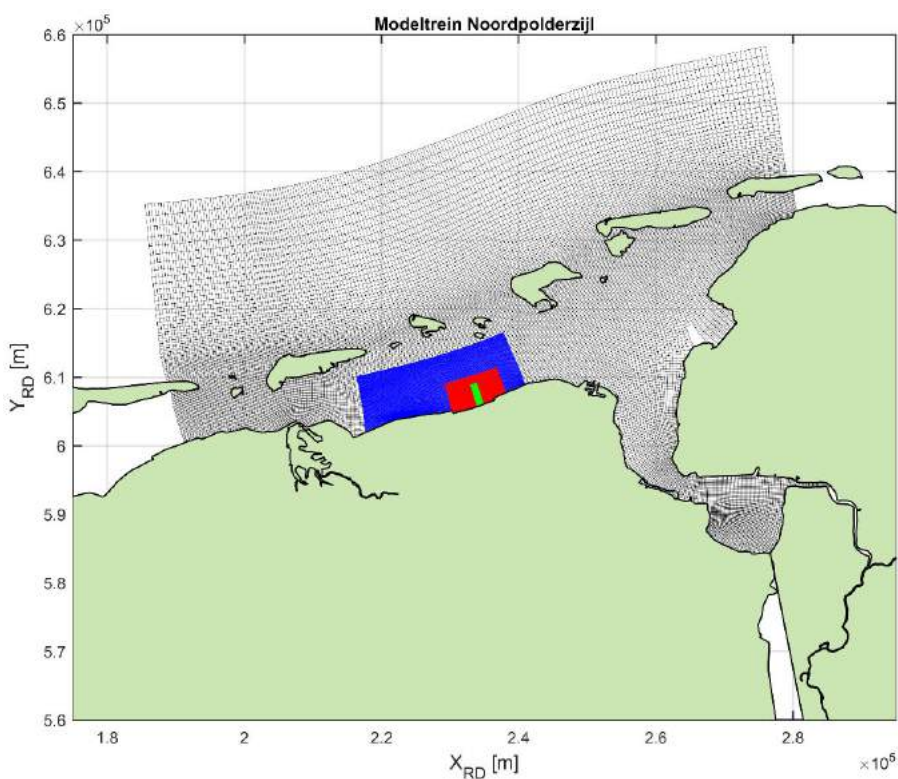


# BIJLAGE A: BESCHRIJVING NUMERIEK MODEL

## A.1 MODEL OPZET

Om een indruk te krijgen van de hydro-morfologische effecten van een spoelmeer is een numeriek Delft3D model opgezet. Door toepassing van dit model kunnen de effecten op de waterbeweging van verschillende ontwerpen van het spoelmeer en de geul met elkaar worden vergeleken.

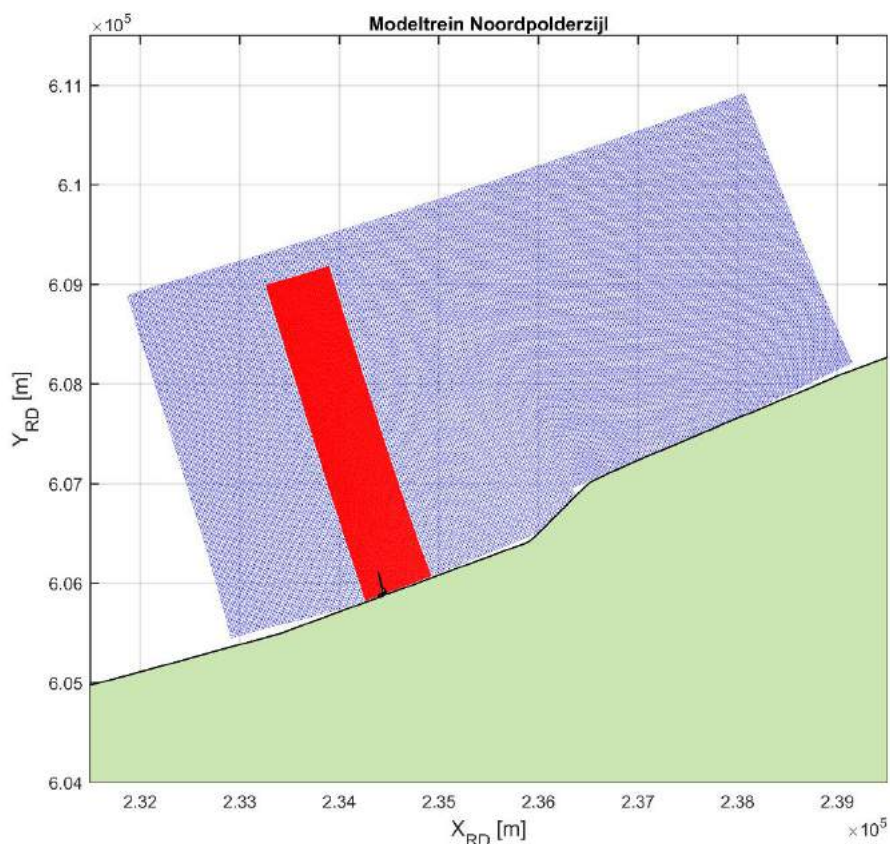
In eerste instantie is voor de randvoorwaarden van dit model het kuststrookmodel uit de modellentrein van Rijkswaterstaat toegepast (zie Figuur A1.0.1.). Daartoe zijn vier verschillende roosters toegepast die middels domein decompositie zijn genest.



*Figuur A1.0.1: Modellentrein waarin de randvoorwaarden zijn afgeleid van het Kuststrookmodel (zwart). Binnen dit model zijn een drietal verfijningsslagen toegepast om een resolutie < 5m in de geul te verkrijgen.*

Uit de vergelijking van bovengenoemd model met de gemeten waterstanden en snelheden (zie Bijlage C) volgde dat het model niet in een voldoende nauwkeurige representatie van de waterbeweging resulteerde. Om die reden is besloten om de rekenroosters zoals weergegeven in Figuur A1.0.2 toe te passen waarbij de randvoorwaarden (de gemeten waterstanden) in de ZuidOost Lauwers zijn opgelegd (zie verder paragraaf A1.2).

In Figuur A1.0.1 zijn de rekenroosters van het uiteindelijk toegepaste model weergegeven. De resolutie van het fijnste rooster is 3.6 x 7 m.



Figuur A1.0.2: Toegepaste rekenroosters van definitieve model

### A.1.1 Model instellingen

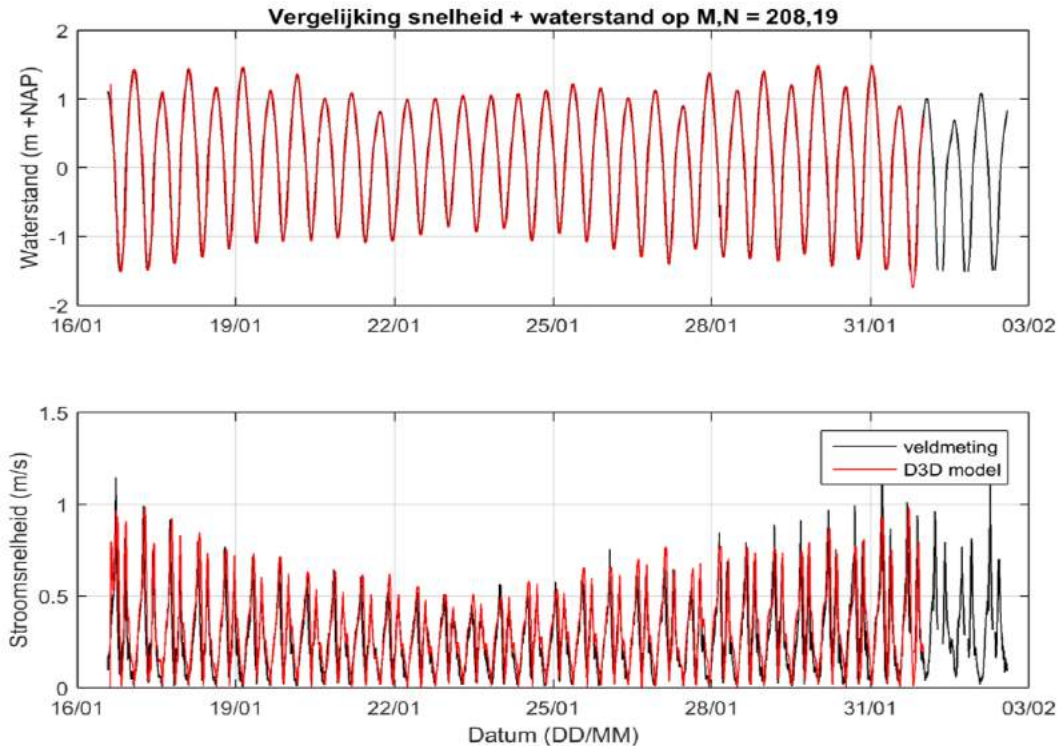
- Tijdstap: 3 seconden
- Viscositeit: 1 m<sup>2</sup>/s
- Diepte gemiddelde simulaties (2D)
- Geulbreedte: circa 17 m
- Resolutie rekenrooster nabij geul (3,5 m dwars op de geul, 7,0 m langs de geul)
- Diepte spoelmeer: NAP -1.5 m
- Rekenperiode: Doodtij-Springtij cyclus (15 dagen)
- Bodemruwheid: 1 mm (White Colebrook formulering)
- Geen wind
- Geen zoutindringing
- Geen golven
- Bodemligging Waddenzee: gebaseerd op Vaklodging RWS uit 2013 (meest recent)
- Bodemligging intergetijden gebied: LIDAR data RWS uit 2013

### A.1.2 Model kalibratie

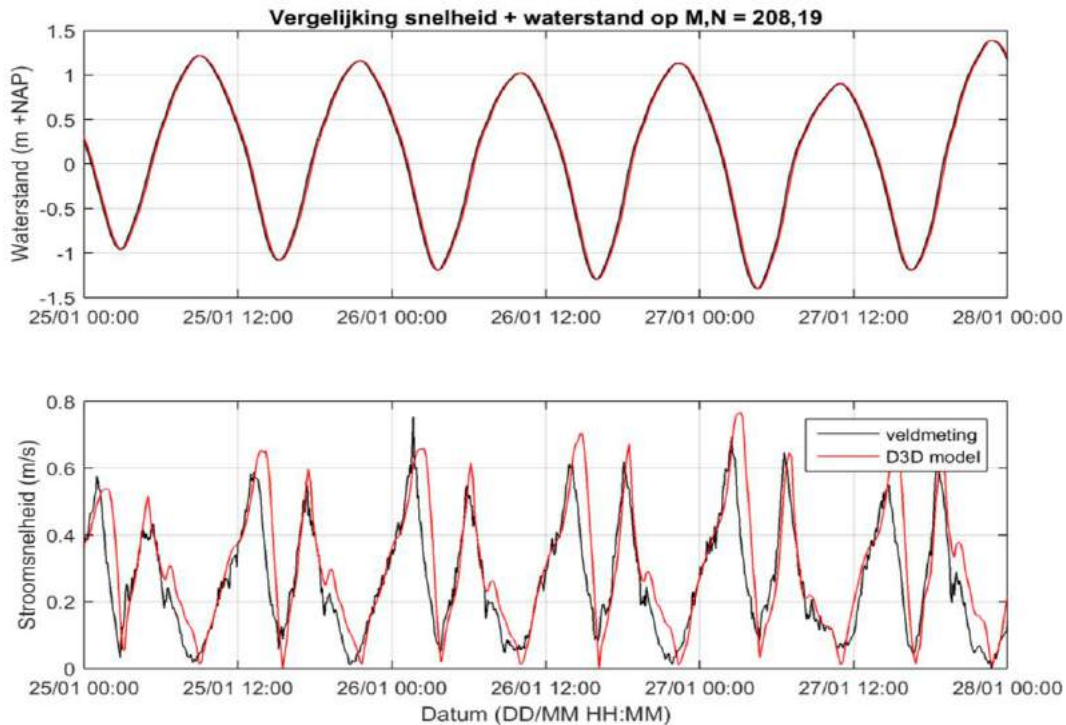
Ten behoeve van dit project is het model afgeregeld op de waterstands- en stroomsnelheidsmetingen bij de geulingang. In figuur A1.03 en A1.04 zijn de waterstanden (bovenste paneel) en stroomsnelheden (onderste paneel) van zowel het model (rood) als meting (zwart) in de ZuidOost Lauwers op de meetlocatie (zie Bijlage C) gepresenteerd. De figuren laten zien dat de overeenkomst in waterstanden zeer goed is. Dit is het logische gevolg van het opleggen van de gemeten waterstanden op de rand van

het numerieke model. De stroomsnelheden in de ZuidOost Lauwers zijn iets minder goed maar komen nog steeds erg goed in de buurt van de metingen. Dat betekent dat het kombergend oppervlak dat in het model is meegenomen en die door de geul de Zuidoost Lauwers wordt gevuld goed overeenkomt met de werkelijkheid. Het model kan daarmee zeer goed toegepast worden om de effecten van het spoelmeer te onderzoeken.

In de modelsimulaties die zijn uitgevoerd ter bepaling van de effecten zijn niet de gemeten randvoorwaarden opgelegd maar is een tijdserie opgelegd van een harmonische analyse op de gemeten waterstanden. Op die manier zijn de effecten op de waterstanden door wind- en druk verschillen, die nog in de metingen aanwezig waren (zie fluctuaties in waterstanden in onderstaande figuur) eruit gefilterd.

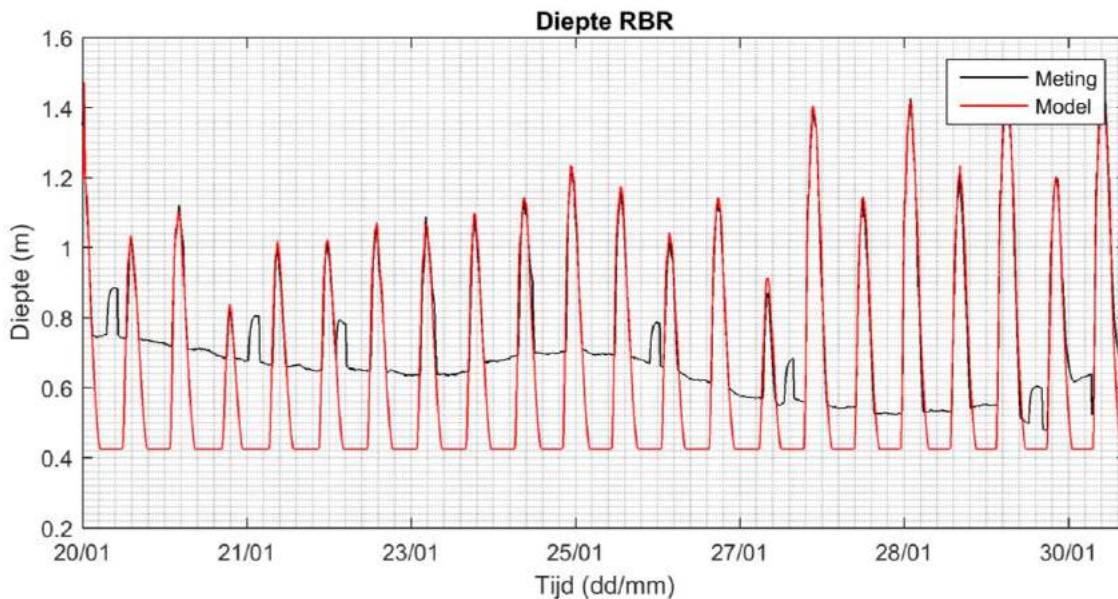


*Figuur A1.0.3: Vergelijking tussen de metingen en modelresultaten, van de waterstanden (bovenste paneel) en stroomsnelheden (onderste paneel)*



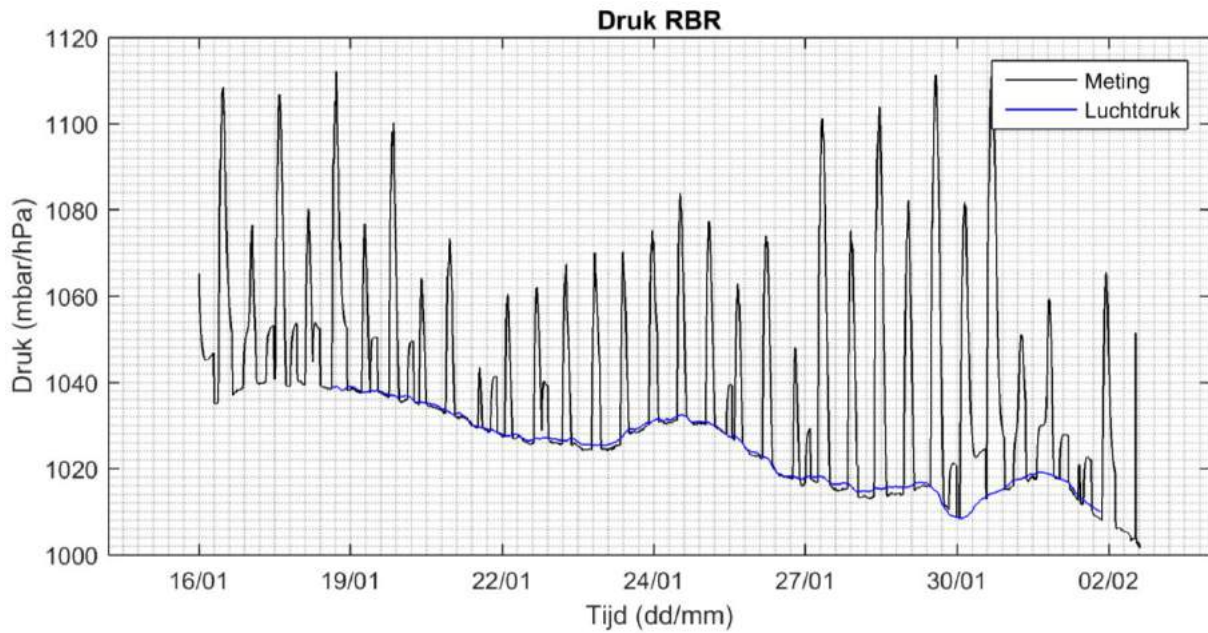
*Figuur A1.0.4: Vergelijking tussen de metingen en modelresultaten rond het gemiddelde getij, van de waterstanden (bovenste paneel) en stroomsnelheden (onderste paneel)*

Vervolgens zijn de gemodelleerde waterstanden in de haven vergeleken met de gemeten waterstanden in de haven. De resultaten hiervan zijn gepresenteerd in Figuur A1.0.5. De figuur laat zien dat de hoogwaterstanden goed met elkaar overeenkomen. Verder is zichtbaar dat in de metingen piekjes zichtbaar zijn die niet in het model voorkomen. Deze piekjes zijn naar aller waarschijnlijkheid veroorzaakt door het gemaal. Tijdens het malen wordt de waterstand voor een korte periode verhoogd wat duidelijk zichtbaar is in de metingen.



*Figuur A1.0.5: Vergelijking van de gemeten en gemodelleerde waterstanden nabij de haven*

In bovenstaande figuur is te zien dat het model de hoogwaterstanden goed representeert. Ook zijn de fases van de gemeten en gemodelleerde hoogwaterstanden vergelijkbaar. De metingen geven tijdens laag water echter een hogere waarde dan het model; dit is uit te leggen door de gemeten druk te vergelijken met de luchtdruk metingen van het KNMI te Eelde (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, 2017) zoals weergegeven in Figuur A1.0.6.



*Figuur A1.0.6: Vergelijking van de gemeten druk nabij de haven en de luchtdruk data te Eelde (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, 2017)*



# BIJLAGE B: ANALYTISCHE BEREKENINGEN

## B.1 FLUSHINGBASIN

De stroomsnelheden die door spoelen in de getijdegeul worden opgewekt, kunnen worden berekend met het spreadsheet model FLUSHINGBASIN.xls. Dit model is in eerdere studies opgezet en afgeregeld op numerieke modellen van onder andere Rijkswaterstaat. De komberging en het verval door bodemwrijving over de geullengte worden in dit model op eenvoudige wijze meegenomen.

De onderliggende aannamen zijn:

- sinusvormig getij; getijslag is constant in de komende 50 jaar; geen waterstandsveranderingen door op- en afwaaiing;
- geen zeespiegelstijging;
- waterstand op zeerland wordt niet beïnvloed door het getijbekken;
- overlaatformules voor subkritische stroming ( $Froude < 1$ );
- Chézy-formule voor het geulverhang.

De invoerparameters zijn:

- getijamplitude en getijperiode;
- gemiddeld zeeniveau boven NAP;
- oppervlakte van het spoelbekken;
- tijd van schuifopening na hoogwater;
- breedte van doorlaatwerk;
- breedte van getijgeul; lengte van getijgeul;
- diepte van getijgeul ten opzichte van NAP;
- diepte van doorlaatsdrempel ten opzichte van NAP;
- bodemruwheid;
- afvoercoëfficiënt.

De aanname is dat de waterstand in de Waddenzee bepalend is voor het waterniveau in de geul en dat het debiet van het doorlaatwerk geen merkbare invloed heeft op de waterstand in de geul. Bij lage waterstanden is deze aanname waarschijnlijk een te eenvoudige weergave van de situatie.

De gebruikte formules van het spoelmodel behoren tot de standaardformules uit de vloeistofmechanica (afvoerformules voor een overlaat) en zijn voldoende gevalideerd. De afvoercoëfficiënt ( $m$ ), ofwel efficiency van het doorlaatwerk, is een parameter die op basis van kenmerken van de constructie in meer detail kan worden berekend. Uiteindelijk blijkt de efficiency tijdens het gebruik. De gehanteerde waarde van 0,8 is gebaseerd op praktijkervaring (conservatief).

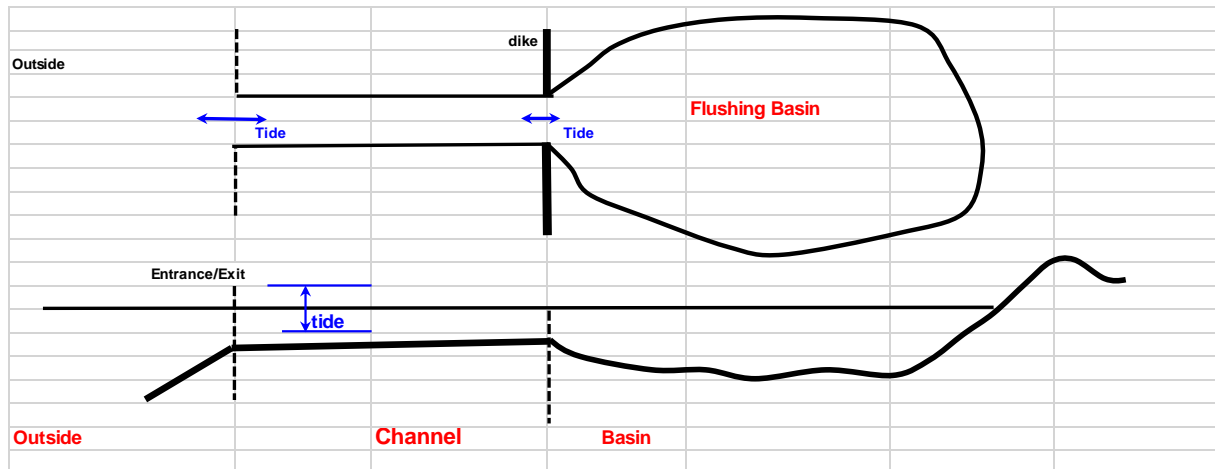
De nauwkeurigheid van de berekende debieten en stroomsnelheden in de geul wordt bepaald door de  $m$ -waarde (afvoercoëfficiënt) in combinatie met de definitie van de waterdiepte boven de drempel van de doorlaat. Bij eb zijn de waterdiepten boven de drempel relatief klein ( $< 0,5$  m) en is de onnauwkeurigheid van debiet en stroomsnelheden relatief groot. In de praktijk is schaalonderzoek nodig om vooraf een nauwkeurige debietberekening mogelijk te maken.

In dit stadium van het onderzoek is de onnauwkeurigheid van de berekende debieten en stroomsnelheden van de orde 15% tot 20%.

Het model vertoont instabiliteit (oscillaties van de binnen- en buitenwaterstand als de binnen- en buitenwaterstand bij benadering gelijk worden (laagwaterkentering). Dit wordt versterkt door het meenemen van het verval in de geul.

## B.2 SPOELBEKKENBESCHOUWING

Een spoelbekken is een klein getijdebekken aan het einde van een getijgeul, zie Figuur B2.0.1. Een spoelbekken kan functioneren met en zonder regelwerk ter plaatse van het doorlaatwerk.



Figuur B2.0.1: Spoelbekken met getijgeul (plattegrond en doorsnede)

### Zonder regelwerk (open doorlaat)

In het geval van een open doorlaat kan het water uit de geul vrij in het spoelbekken stromen. De waterstand aan binnenzijde gaat dan in gelijke mate omhoog en omlaag als aan die aan de buitenzijde. Uitgaande van een sinusvormige waterstandsvariatie ( $\eta = \eta_o \sin(\omega t)$ ), kan de afvoer ter plaatse van de doorgang worden berekend met behulp van de kombergingsformule:

$$Q_t = A \, d\eta/dt = A \, \omega \, \eta_{\text{buiten}} \cos(\omega t)$$

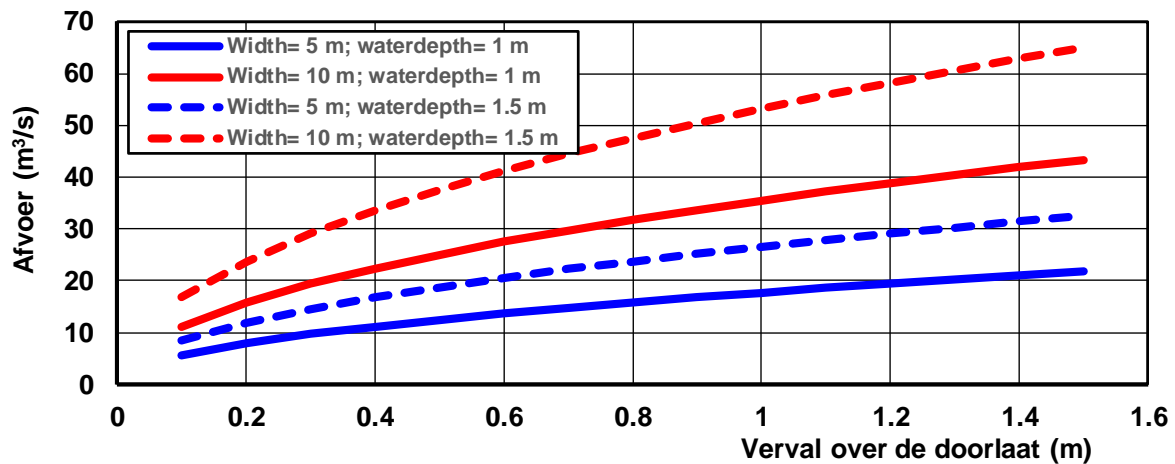
Waarin:  $A$  = oppervakte van spoelbekken,  $\eta_{\text{buiten}}$  = waterstandsamplitude,  $\omega = 2\pi/T$ ,  $T$  = getijperiode,  $Q$  = afvoer. Met realistische waarden voor een spoelbekken:  $A = 150.000 \text{ m}^2$  (15 ha),  $\eta_o = 1,1 \text{ m}$ ,  $T = 12 \text{ uur} = 43200 \text{ s}$ , geeft dit een maximaal debiet  $Q_{\text{max}} \approx 25 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### Met regelwerk

In het geval van een doorlaatwerk met regelschuiven om de binnenwaterstand te kunnen regelen, kan de afvoer worden berekend met de afvoerformule voor een onvolkomen overlaat, als volgt (zie Figuur B2.0.2):

$$Q_t = m \, b \, h \, [2g(\Delta\eta_t)]^{0.5}$$

Waarin:  $m$  = afvoercoëfficiënt,  $b$  = breedte doorlaatwerk,  $h$  = waterdiepte boven de drempel van het kunstwerk,  $\Delta\eta_t$  = verval over de doorlaat. Een maximale afvoer voor een doorlaat van 5 m breed is ca. 30  $\text{m}^3/\text{s}$ , zie Figuur B2.0.2. Het debiet kan worden verdubbeld door een bredere doorlaat van 10 m te kiezen.



Figuur B2.0.2: Afvoer van doorlaat; breedte doorlaat= 5 en 10 m; waterdiepte= 1 en 1,5 m ( $m=0,8$ )

### Spoelduur en stroomsnelheden in de geul

Bij een geulbreedte van 15 m, een geulwaterdiepte van 1,5 m en een afvoer van ca.  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  kan er een stroomsnelheid van maximaal 1 tot  $1,3 \text{ m/s}$  worden opgewekt in de geul. Het verval over de lengte van de geul mag niet te groot zijn, omdat anders de waterstand in de havenkom te hoog wordt, waardoor het verval over de doorlaat en dus de afvoer afnemen.

Aan de zeerand van de geul is er een extra afvoer (en stroomsnelheid) van de orde  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  door het kombergingsoppervlak van de geul met lengte van ca. 2 km. Uitgaande van een beschikbaar watervolume van  $150.000 \text{ m}^3$  (oppervlak x getijamplitude) en een spoeldebiet van ca.  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  kan er ca. 1,5 uur met hoge stroomsnelheid worden gespoeld.

Om voldoende hoge stroomsnelheden in de geul te krijgen (anders aanslibbing) moet het een relatief smalle en diepe geul zijn en blijven.

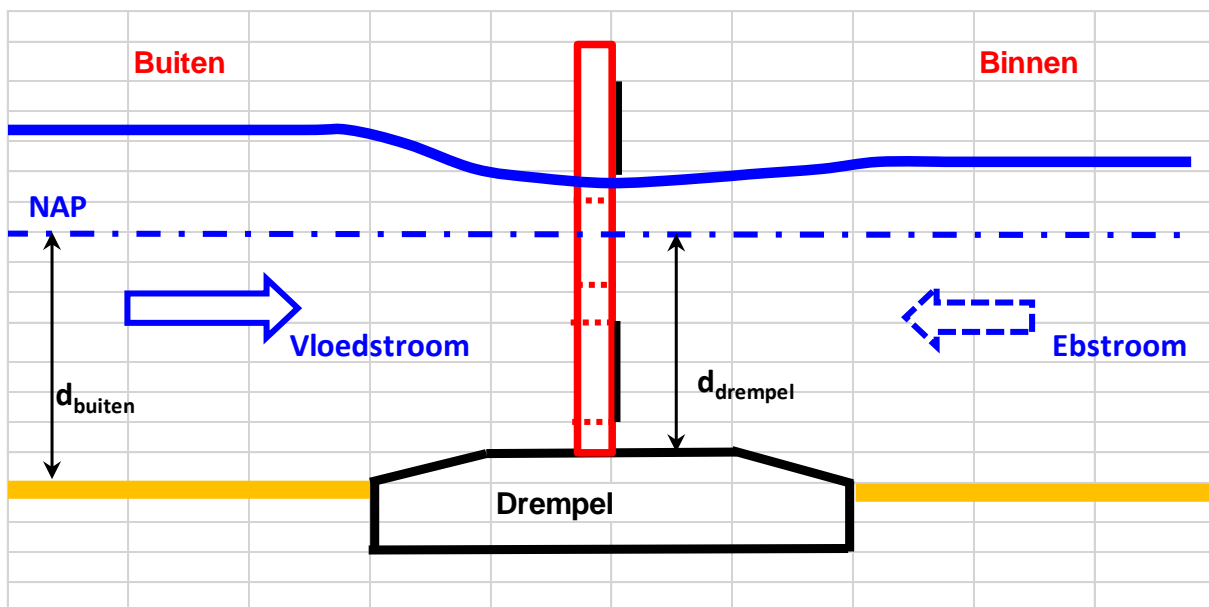
### B.2.1 Doorlaatwerk en schuifregeling

Een doorlaatwerk zonder schuifregeling is niet de meest efficiënte manier om het spoelbekken te benutten voor het 'schoonsoelen' van de geul. De stroomsnelheden in de geul tijdens eb kunnen worden verhoogd door het doorlaatwerk bij het bereiken van de hoogste waterstand in het spoelbekken te sluiten en pas te openen als de waterstand in de Waddenzee een flink stuk is gedaald. Bij voorkeur moet de waterstand dusdanig laag zijn dat er alleen nog water in de geul staat en de omringende kweldervlaktes droogvallen. In dit geval gaat de gehele ebstroom gebruikt door de geul. Bij een waterstand die hoger is dan de omringende kweldervlaktes zal een deel van het water dat uit het spoelbekken komt, wegstromen over de kweldervlaktes en deze stroming komt niet ten goede aan de geul.

Het regelwerk (Figuur B2.0.3) zorgt voor het sluiten van het doorlaatwerk bij het bereiken van het hoogste niveau van hoogwater in het spoelbekken. Door in de Waddenzee en in het spoelbekken de waterstand te meten, kan worden vastgesteld wanneer het waterniveau in het spoelbekken groter wordt dan het waterniveau in de Waddenzee. Dat is het moment om de kering te sluiten. De kering wordt gesloten gehouden totdat het waterniveau in de Waddenzee een bepaalde waarde bereikt, of totdat het verschil tussen de waterstanden in de Waddenzee en het spoelbekken een bepaalde waarde bereikt. Ook kan een bepaalde tijd worden gewacht totdat de kering weer wordt geopend. In de elektronische bediening van de kering kan dit naar wens worden geprogrammeerd.



Met behulp van de schuifregeling kunnen de stroomsnelheden in het doorlaatwerk en in de geul worden ge-manipuleerd. Een goede oplossing is een kering met twee schuiven: bovenschuif en onderschuif (vloed zoveel mogelijk door de bovenschuif om slibarm water in te laten).



Figuur B2.0.3: Doorsnede over het doorlaatwerk (instroom tijdens vloed)

### Effect van de lange geul

De getijdegeul is relatief lang (2 tot 3 km) en de waterdiepte is relatief klein (0,5 tot 1 m) tijdens de ebstroming. Als gevolg daarvan is er een vrij groot verval nodig om het water bij eb door de geul te doen stromen. Daardoor kan het water in de havenkom niet voldoende zakken en neemt het verval over de doorlaat en dus ook het spoelvermogen af.

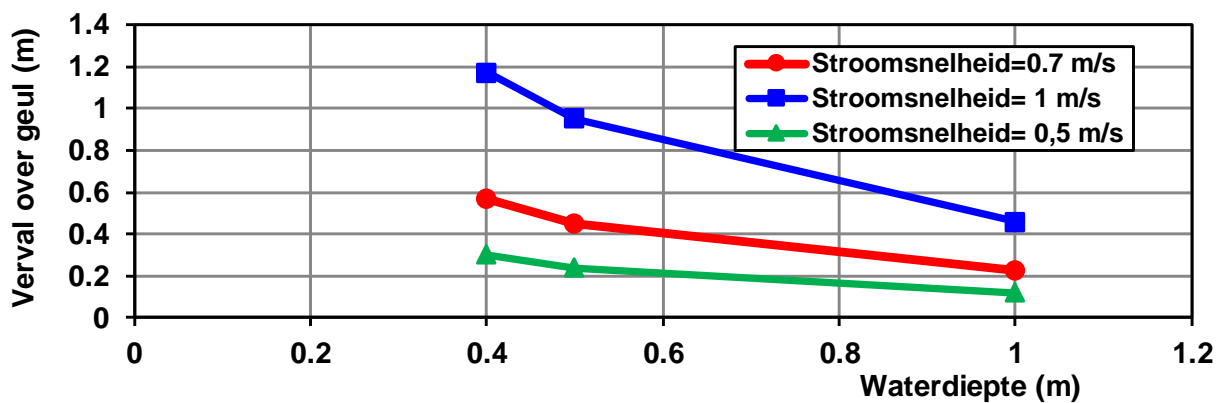
Het verval over de lengte van de geul kan worden afgeschat met de formule van Chézy:  $V=C (h l)^{0,5}$ ,

waarin:  $V$ = stroomsnelheid in geul=  $Q/A$ ,  $Q$ = debiet ( $m^3/s$ ),  $A$ = oppervlak geul,  $h$ = waterdiepte in geul,  $l=\Delta h_g/L$ = verhang in geul,  $\Delta h_g$ = verval over geul,  $L$ = lengte geul,  $C= 18\log(12 h/k_s)$ = Chézy coefficient,  $k_s$ = bodemruwheid.

De Chézy-formule kan worden omgezet naar:  $\Delta h_g= (V^2/C^2h)L$

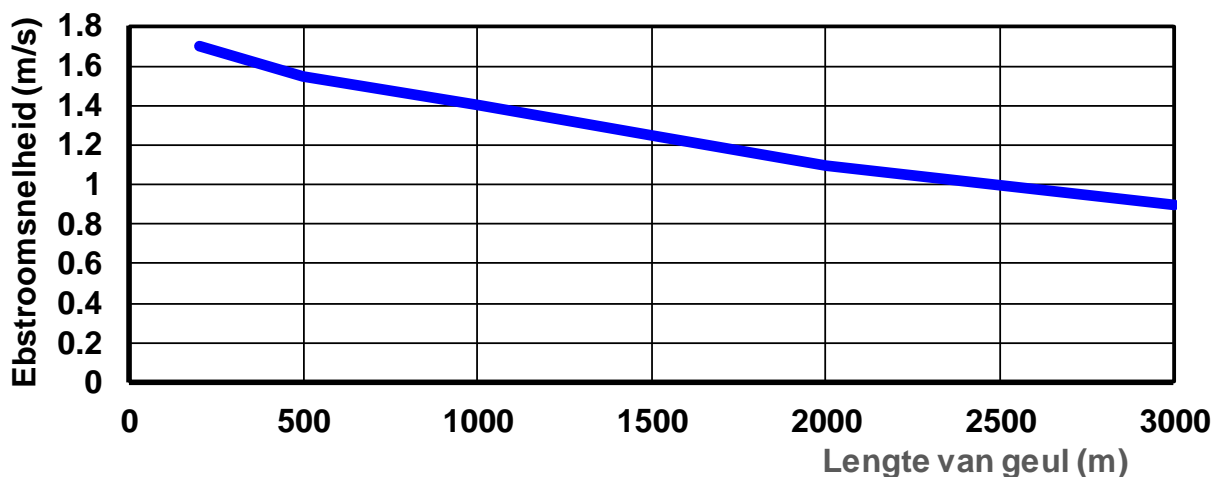
Het verval is berekend voor een aantal situaties met waterdieptes tussen 0.4 en 1 m;  $C = 80 m^{0.5}/s$ ; lengte= 2000 m en drie stroomsnelheden van 0,5, 0,7 en 1 m/s. Het verval neemt lineair toe met de geullengte.

Figuur B2.0.4 toont het te verwachten verval over de geul. Tijdens het spoelen bij eb neemt de waterdiepte in de geul af van ca. 2 m tot ca. 0,7 m, zie Figuur B2.0.3. Het maximum verval is ca. 0,8 m. Het verval is de oorzaak van de plotselinge waterstandsverhoging na het openen van de schuif (zie Figuur B2.0.3). In het Flushing-model wordt het verval momentaan opgelegd. In werkelijkheid is er enige tijd nodig om het verval op te bouwen.



Figuur B2.0.4: Berekend verval over de geul ( $L = 3000$  m,  $C = 80$  m<sup>0.5</sup>/s)

Om het opstuwende effect van de lange geul duidelijk te maken, zijn er ook berekeningen met kortere geulen uitgevoerd, zie Figuur B2.0.5. Bij een korte geul van 200 m is de ebstroomsnelheid ca. 1,7 m/s, omdat er minder verval over de geul nodig is en er dus meer verval over de doorlaat beschikbaar is om een groter debiet te leveren.



Figuur B2.0.5: Ebstroomsnelheid gemiddeld over 1 uur na openen van schuif bij verschillende geullengtes. Getijslag = 2,2 m; Oppervlak = 15 ha, geuldiepte = -1,4 m NAP; geulbreedte = 15 m; schuif open op 3 uur na HW

# BIJLAGE C: MEETCAMPAGNE

## C.1 MEETLOCATIES

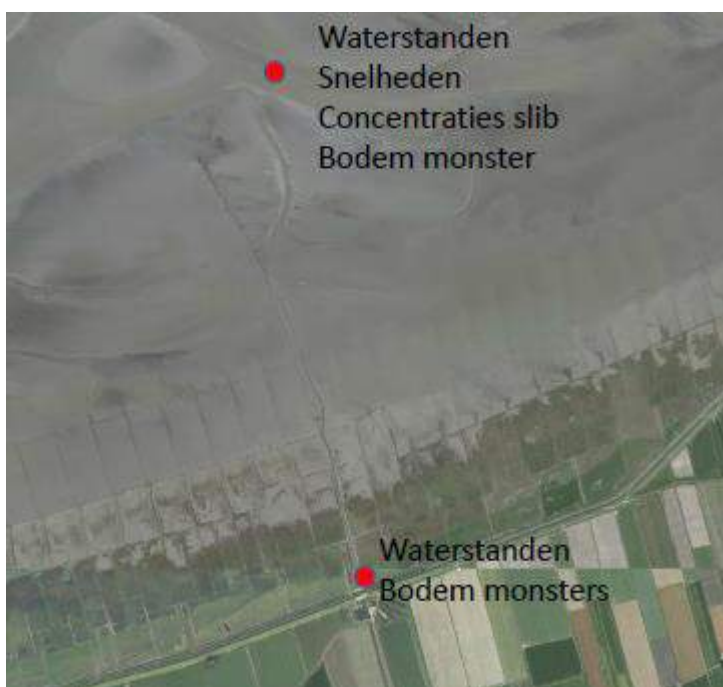
Tussen 17 januari en 3 februari is een meetcampagne uitgevoerd nabij de projectlocatie. De doelen van deze meetcampagne zijn als volgt:

- Bekend raken met het project gebied
- Het genereren van realistische randvoorwaarden voor het numerieke model
- Het afregelen van ruwheden in de geul
- De prestaties van het model te kunnen verifiëren.

De volgende aspecten zijn gedurende de meetcampagne gemeten:

- Waterstanden (drukdoos) nabij de haven en in de Zuidoost Lauwers
- Stroomsnelheden en richting (Aquadopp) in de Zuidoost Lauwers
- Slib concentraties in de Zuidoost Lauwers

Ook zijn op beide locaties bodemmonsters genomen met een Van Veen happer ter visuele inspectie.



*Figuur C1.0.1: Locaties van de metingen, en welke metingen er per locatie zijn uitgevoerd*

Naast de hydrodynamische metingen zijn ook monsters genomen van slib in de haven van Noordpolderzijl (zie Figuur C1.0.2).



*Figuur C1.0.2: Locaties van de monsters uit de haven van Noordpolderzijl*

## C.2 MEETOPSTELLING

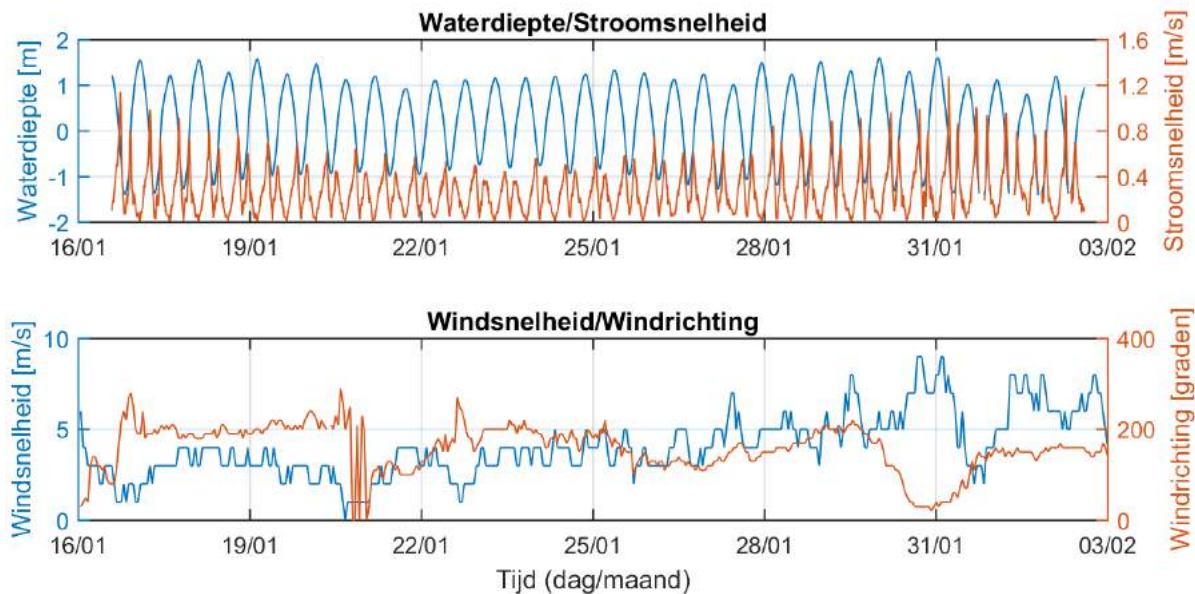
De meetlocaties zijn gepresenteerd in Figuur C1.0.1. De locatie van het meetpunt is WGS 84: 53,36314 Noord, 5,33099 Oost. Het instrument is in de getijgeul van het Zuidoost Lauwers ten Noorden van de projectlocatie geplaatst. De parameters zijn op een hoogte van 1,0 m boven de bodem gemeten. De opstelling is in onderstaande figuur gepresenteerd.



*Figuur C1.0.3: Meetopstelling*

### C.3 RESULTATEN

In onderstaande figuur zijn in het bovenste paneel de gemeten waterstanden, stroomsnelheden gedurende de meetcampagne gepresenteerd. In het onderste paneel zijn de windsnelheden en richtingen weergegeven die nabij Eemshaven door het KNMI worden gemeten.



Figuur C1.0.4: Gemeten waterstanden, stroomsnelheden, windsnelheden en richtingen gedurende de meetcampagne.



# BIJLAGE D: SPOELMEER NESSMERSIEL

## D.1 INTRODUCTION

The Dutch and German Wadden Sea is a tidal back-barrier basin in North-West Europe. Various small-scale fishery ferry landings and harbours are situated along the coasts of the mainland. The latter coasts are typified by mud flats and flat muddy banks. Most often, the harbour/landing places are connected to deeper channels by relatively long and shallow channels protected by a training/guiding dam on the updrift side. The harbour basins and channels generally suffer from heavy deposition of fine sediments and the required annual maintenance dredging coast are often excessively large. Many of these small-scale landing places are only accessible during a short time period at High Water.

At Nessmersiel in Germany, a small-scale flushing reservoir (of about 13 ha) is present which is filled during flood and drained during ebb by an automatic gatesystem with the aim to flush the ferry landing channel, see Figure D1.0.1.



Figure D1.0.1: Ferry harbour Nessmersiel, Germany: A=Low Water, B= Low Water, C= High Water

## D.2 ENVIRONMENTAL CONDITIONS

### D.2.1 Description of flushing regime Nessmersiel, Germany

The German authorities have performed a research project in the period 1982 to 1987 to study the tidal flow velocities and mud concentrations in the tidal channel near the ferry landing Nessmersiel (Bauamt, 1987).



The Nessmersiel channel has a length of 1200 m outside the landing pier. A long guiding dam with crest level varying between 0.5 and 0.9 m NN is present on the west side of the channel. The channel length between the ferry pier and the flushing gate under the main road is about 500 m. The channel width is about 30 to 40 m. The channel bed consists of muddy/sandy sediments. Various small-scale creeks running through the extensive mud flat area drain into the channel. The surroundings of the channel undergo a longterm process of slow continuous sedimentation by fine sediments.

The inland flushing reservoir (about 13 ha) with a capacity of 0.1 million m<sup>3</sup> of seawater was built in 1977. The deepest part of the reservoir bed is at -5 m to -6 m NN; about 0.3 million m<sup>3</sup> of soil has been removed during construction. The gate width is 4.5 m and consists of two vertically moving lift gates (lower and upper gate). The sill of the gate is situated at -1 m NN (NN ≡ Mean Sea Level; MSL).

The tidal characteristics at Nessmersiel are: mean High Water MHW= +1.3 m NN and Mean Low Water MLW ≡ -1.26 m NN. The flood period is about 6 hrs 35 minutes; the ebb period is about 5 hrs 50 minutes.

The flushing regime can be described, as follows:

- opening of lowest gate at halftide water level when the water level is at 0.1 m (+0.1 m NN) above the underside of the lowest gate (to exclude the entrance of sediment-rich initial flood water);
- closing of gate after filling of the reservoir;
- opening of lowest gate during the last 2 hours of the ebb period to generate flow velocities of 0.5 to 0.8 m/s in the channel during about 3 hours; peak ebb depends on the type of tide (springtide) and wind conditions;
- flushing regime is optimized to reduce the inflow of high-concentration flood water (especially during spring tide) and to increase the outflow velocities; this requires manipulation of the start of flushing period and the gate opening in relation to the outside and inside water levels (ebb flow must be larger than 0.7 m/s during at least 2 hours of flushing).

## D.2.2 Sediment composition

Various bed samples (core samples: diameter 40 mm; length= 100 mm) have been taken during conditions without any mud layer deposits on the fine sandy channel bed. The bed samples were analysed using sieve analysis and settling test results to determine the sediment composition of the bed. The settling tests consisted of the determination of the settling velocities of the sample sediments which were converted to an equivalent grain diameter using the settling velocity formula of Stokes.

The percentage of organic materials was found to be relatively small (<2%). The bed at Station II (halfway) consists of fine sand with  $d_{50}$  of about 100 to 150  $\mu\text{m}$  in the middle of the cross-section, see Table D2.1. The percentage of fines < 60  $\mu\text{m}$  varies between 5% and 25%, mostly in the corners (east, west) of the cross-sections. The channel bed is slightly less fine at Station III near the entrance of the channel.

Table D2.1: Sediment composition of channel bed samples (without mud deposits)

| Sample location    | Percentage < 60 $\mu\text{m}$ | $d_{10}$ ( $\mu\text{m}$ ) | $d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ ) | $d_{90}$ ( $\mu\text{m}$ ) |
|--------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Station II middle  | 10%                           | 60                         | 130 (range 100-150)        | 200                        |
| Station II west    | 10%                           | 60                         | 130                        | 200                        |
| Station III east   | 25%                           | <10                        | 100                        | 200                        |
| Station III middle | 5%                            | 140                        | 170 (range 120-170)        | 200                        |
| Station III west   | 20%                           | 20                         | 160                        | 200                        |
| Station III east   | 25%                           | <5                         | 150                        | 200                        |

## D.3 TIDAL FLOW WITH AND WITHOUT FLUSHING

Measurements of tidal water levels (pressure), flow velocities (electromagnetic) and sediment concentrations (mechanical and optical) have been taken at three stations (at 600 m, 1000 m and 1500 m from the gate station), see Figure D1.0.1.

The flow velocity measurements have been done at various positions across the cross-section and at various levels over the depth. The mud concentration measurements are largely based on the analysis of water-sediment taken by a pump at 0.4 m above the local bed. Sediment concentrations of sediments finer than 5  $\mu\text{m}$  based on pumped samples were not detected. Special calibration experiments have been done to calibrate the optical sensor. The instruments were attached to supports which were connected to steel poles standing at the side of the channel. Special calibration experiments have been done to relate the measured velocity to the cross-section-averaged velocity.

### D.3.1 Flow velocity (averaged over cross-section)

Typical flow velocity variations over the tidal cycle are shown in Figure D3.0.2 and Figure D3.0.3 for flushing and no-flushing conditions. The channel bed is situated at -1.9 m to -2 m below NN (about Mean Sea Level).

The most important characteristics are:

- flow velocities at stations II and III are approximately equal (see Table D3.2);
- maximum flood and ebb velocity depend on the type of tide and the wind-setup (magnitude and direction of the wind); values are largest for springtide and onshore wind (HW is largest);
- peak flood velocity can be up to 1.1 m/s without flushing in a short period of about 0.5 hrs of spring tide;
- peak flood velocity without flushing occurs at 1 hour after low water (LW); after that the flood velocity rapidly reduces to about 0.3-0.4 m/s; water level wiggles with along-channel variations of 0.25 m do occur (flood propagates as a bore through the channel); water depth in channel during peak flood flow is about 1 to 2 m;
- peak ebb velocity without flushing occurs at 3 hours after high water (HW); water depth in the channel during peak ebb flow is about 0.5 to 1 m;
- flood flow duration is about 4 to 5 hours; ebb flow duration is about 6 to 7 hours;
- based on water surface slope measurements, the Chézy-coefficient is found to be about 50  $\text{m}^{0.5}/\text{s}$  (bed roughness of about 0.01 to 0.2 m at a water depth of 1 to 1.5 m);



- flushing reduces the peak flood velocity and generates a second ebb flow peak at the end of the ebb phase of the tide; flushing regime can be manipulated by the gate system (varying gate openings and duration).

Table D3.2: Peak flow velocities in channel

| Flushing conditions | Peak flood velocity (m/s) |                 | Peak ebb velocity (m/s) |                  |
|---------------------|---------------------------|-----------------|-------------------------|------------------|
|                     | Station II                | Station III     | Station II              | Station III      |
| No flushing         | 0.7-1.1                   | 0.7-1.1         | 0.6-0.7                 | 0.6-0.7          |
|                     | 3% of time >0.4           | 3% of time >0.4 | 1% of time >0.4         | 1% of time >0.4  |
| Flushing            | 0.4-0.6                   | 0.4-0.6         | 0.7-1.1                 | 0.7-1.1          |
|                     | 1% of time >0.4           | 2% of time >0.4 | 10% of time >0.4        | 17% of time >0.4 |

Figure D3.0.2 shows the flow velocity, the water level and the mud concentration as function of time for spring tide conditions without flushing. The tidal range is about 2.8 m. The maximum flood flow (1.1 m/s) is larger than the maximum ebb flow (0.7 m/s), but the duration of the flood peak with is rather short (about 1 hour). The maximum mud concentration during flood flow is about 0.7 kg/m<sup>3</sup> (700 mg/l) and about 0.45 kg/m<sup>3</sup> during ebb flow.

Figure D3.0.3 shows the flow velocity, the water level and the mud concentration as function of time for mean tide conditions with flushing. The tidal range is about 2.2 m. The ebb period has two peaks; the second peak is caused by the outflow of the reservoir water during flushing generating a maximum ebb velocity of about 0.75 m/s and mud concentration of about 1.5 kg/m<sup>3</sup>. The maximum flood velocity and mud concentration are smaller than during ebb conditions resulting in net tide-integrated seaward transport of sediment. The peak ebb velocity during flushing in spring tide conditions can be as large as 1.1 m/s.

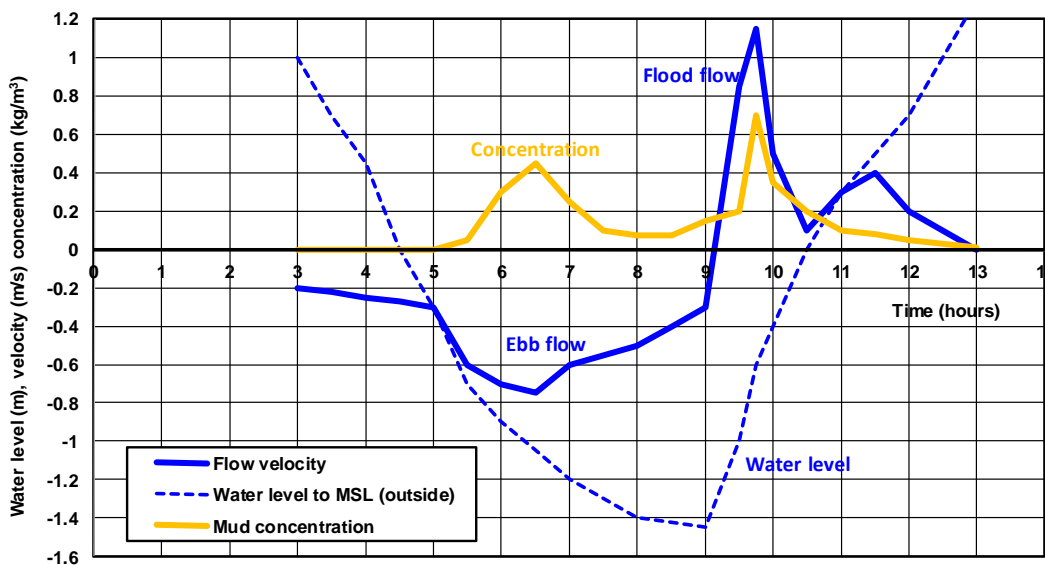


Figure D3.0.2: Flow velocity and mud concentration variation over the tidal cycle for no-flushing conditions; Station II, Springtide 30-7-1984

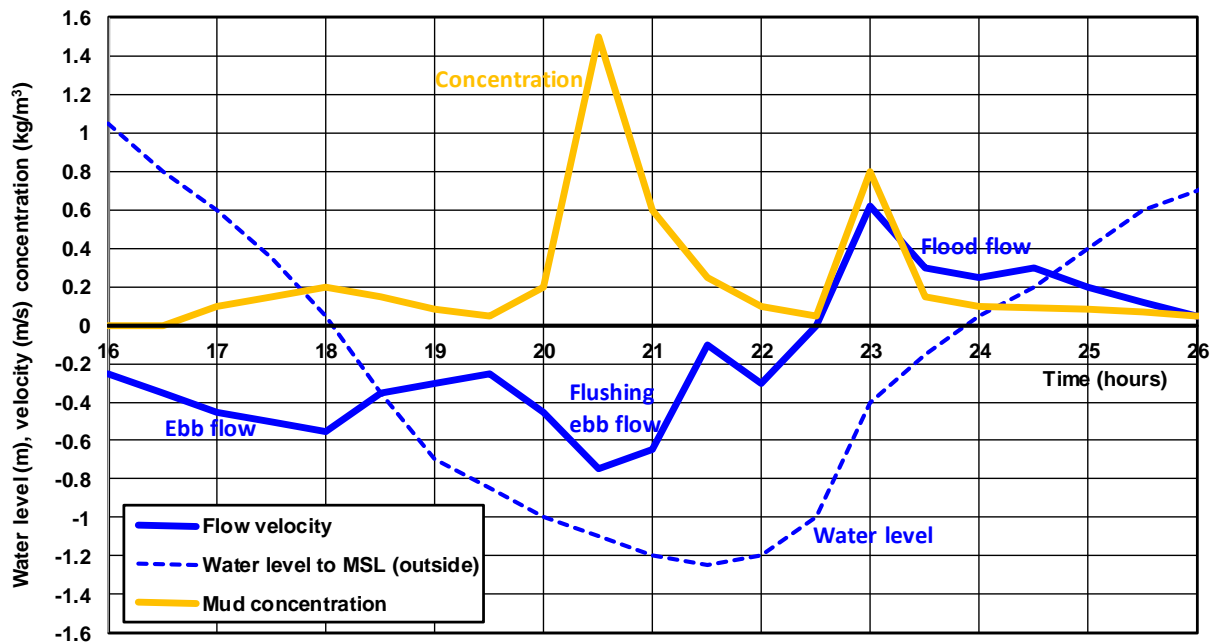


Figure D3.0.3: Flow velocity and mud concentration variation over the tidal cycle with flushing; Station III, Mean tide 2-9-1985

## D.4 MUD CONCENTRATIONS WITH AND WITHOUT FLUSHING

Typical mud concentration variations over the tidal cycle are shown in Figure D3.0.2 and Figure D3.0.3 for flushing and no-flushing conditions. The mud concentrations are based on mechanical water samples taken at 0.4 m above the bed. The channel bed consists of silty/muddy sands with median sediment size of 60 to 110  $\mu\text{m}$ . In periods without flushing a thin layer of muddy sediments is deposited on the channel bed.

The most important characteristics are:

- the flood flow (no flushing conditions) with water depth of 1 to 2 m has relatively high mud concentrations up to 1000 mg/l during a short-duration period of 0.5 hours with flood velocities up to 1.1 m/s (see Table D4.3);
- the ebb flow (no flushing conditions) with water depth of 0.5 to 1 m has mud concentrations up to 500 mg/l for ebb velocities up to 0.75 m/s (see Table D4.3);
- mud concentrations are relatively large (up to 1500 mg/l at ebb velocity of 0.7 m/s) after a period with interrupted flushing due to the presence of a fresh layer of mud deposited at the channel bed; fresh mud can be more easily eroded by ebb velocities  $> 0.2$  m/s at depths of 0.5 to 1 m;
- transport capacity during flushing period is relatively large due to additional turbulence generated during outflow through the gate openings (deceleration losses);
- the mud concentrations fall back to values below 50 mg/l for velocities  $< 0.2$  m/s;
- critical flow velocity for erosion of sandy channel bed is about 0.4 to 0.5 m/s;
- critical flow velocity for erosion of fresh mud layer on channel bed is about 0.2 m/s (without biological effects);
- long term averaged mud concentrations vary in the range of 50 to 100 mg/l (Table D4.4);
- ferry boat generates additional local clouds of mud concentrations of 500 to 1000 mg/l;

- net landward transport of mud during natural tidal conditions without flushing; net seaward transport of mud during flushing; the ebb-integrated mass of mud during flushing is about 3 times larger than the flood-integrated mass of mud;
- interruption of the flushing process leads to rapid siltation at the channel bed as the peak flood velocity increases and the peak ebb velocity reduces significantly.

Table D4.3: Peak flow velocities and mud concentrations in channel

| Flushing conditions               | Peak flood velocity (m/s) and Peak mud concentration (mg/l)                        |   | Peak ebb velocity and Peak mud concentration (mg/l)                               |   |
|-----------------------------------|--|---|---|---|
|                                   | Station II   | Station III   | Station II  | Station III   |
| Date 30-7-1984 (no flushing)      | $v_{\text{flood}} = 1.15 \text{ m/s}$<br>$C_{\text{mud}} = 700 \text{ mg/l}$       |   | $v_{\text{ebb}} = 0.75 \text{ m/s}$<br>$C_{\text{mud}} = 500 \text{ mg/l}$        |   |
| Date 3-9-1985 (no flushing)       |  | $v_{\text{flood}} = 1.05 \text{ m/s}$<br>$C_{\text{mud}} = 1000 \text{ mg/l}$ |   | $v_{\text{ebb}} = 0.65 \text{ m/s}$<br>$C_{\text{mud}} = 250-1000 \text{ mg/l}$ |
| Date 12/15-7-1985 (with flushing) | $v_{\text{flood}} = 0.4-0.5 \text{ m/s}$<br>$C_{\text{mud}} = 50-200 \text{ mg/l}$ |   | $v_{\text{ebb}} = 0.6-0.8 \text{ m/s}$<br>$C_{\text{mud}} = 300-600 \text{ mg/l}$ |   |
| Date 2-9-1985 (with flushing)     |  | $v_{\text{flood}} = 0.6 \text{ m/s}$<br>$C_{\text{mud}} = 800 \text{ mg/l}$   |   | $v_{\text{ebb}} = 0.7 \text{ m/s}$<br>$C_{\text{mud}} = 800 \text{ mg/l}$       |
| Date 19-8-1986 (with flushing)    |  | $v_{\text{flood}} = 0.6 \text{ m/s}$<br>$C_{\text{mud}} = 700 \text{ mg/l}$   |   | $v_{\text{ebb}} = 0.6 \text{ m/s}$<br>$C_{\text{mud}} = 700 \text{ mg/l}$       |

Table D4.4: Long-term tide-averaged and maximum tide-averaged concentrations in stations II and III

| Conditions                                      | Mud concentration (mg/l) in Station II | Mud concentration (mg/l) in Station III |
|---|--|---|
| Long-term tide-averaged value during flood flow | 60                                     | 75                                      |
| Long-term tide-averaged value during ebb flow   | 92                                     | 87                                      |
| Maximum tide-averaged value during flood flow   | 132 (1/7-7-1985)                       | 100 (2/8-9-1985)                        |
| Maximum tide-averaged value during ebb flow     | 174 (1/7-7-1985)                       | 138 (2/8-9-1985)                        |

Figure D4.0.4 shows the fine sediment concentrations as function of the cross-section averaged flow velocities for all measured data. Two curves are shown: a) fresh mud layer deposits which are present after interruption of the daily flushing process and b) natural fine sandy channel bed. Fresh mud deposits are eroded by flow velocities  $>0.2 \text{ m/s}$ , whereas the natural channel bed without mud deposits is eroded for velocities  $>0.4 \text{ m/s}$ . The maximum concentrations are of the order of 1000 to 1500 mg/l for peak velocities of 1 to 1.1 m/s.



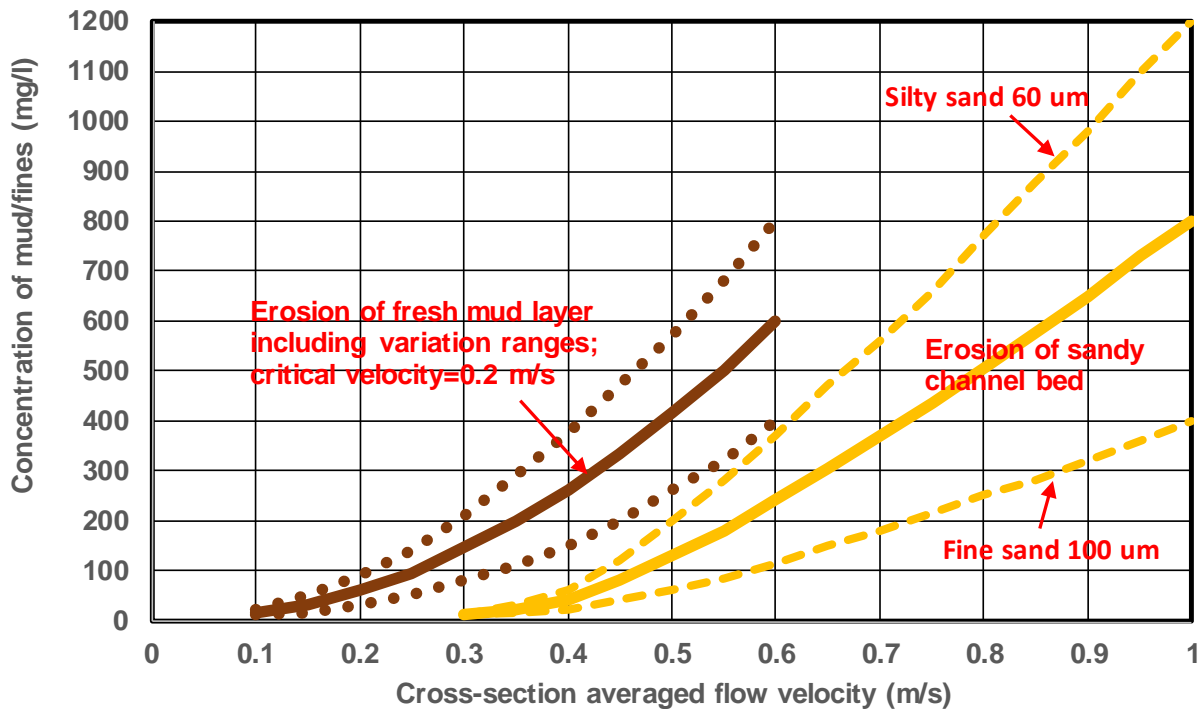


Figure D4.0.4: Sediment concentration as function of cross-section averaged flow velocity, Stations II and III

#### D.4.1 Effect of wind-induced surface waves

Wind from South-West directions have a strong effect on the mud concentrations (averaged over 1 to 3 hours) during high water (water depths of 2.5 m) at stations II and III.

Table D4.5 shows the mud concentrations for wind velocities up to 14 m/s (Beaufort 6 to 7) and wave heights of the order of 0.5 m in water depths of about 2 to 3 m with relatively low flow velocities. The mud concentrations increase by a factor of about 10 due a wind velocity increase from 8 m/s to 14 m/s. Most likely, this increase is primarily caused by advective transport processes rather than by local stirring of sediments due to wave orbital velocities

Table D4.5: Effect of wind and waves on mud concentrations at low velocities

| Wind velocity (m/s) | Beaufort scale | Mud concentrations (mg/l) at 0.4 m above the bed for Station II and III |
|---------------------|----------------|---|
| 4                   | 3              | 10-30   |
| 6                   | 3-4            | 20-60   |
| 8                   | 4-5            | 40-80   |
| 10                  | 5              | 50-150  |
| 12                  | 6              | 100-300   |
| 14                  | 6/7            | 300-600   |

## D.4.2 Effect of ferry boat

The arrival and departure of the ferry boat causes spikes (duration of 15 to 30 minutes) of mud concentrations with values between 200 and 1000 mg/l during arrival and values between 100 and 500 mg/l during departure. The boat-related mud concentrations are roughly twice as large during arrival than during departure, which is most caused by the more energy-consuming arrival procedure than the departure procedure. Furthermore, the local water depth is slightly smaller during early flood arrival than during later ebb departure. The ferry boat generates local cloud of sediments which are transported with a tidal velocity of the order of 0.3 m/s over distance of about 0.5 kilometer and simultaneous deposition of muddy sediments.

Transport computations show that the mud transport during flood and ebb caused by ferry boat movements contributes to about 30% of the total mud transport at that location. The flushing transport contributes to about 50% of the total mud transport. The tidal transport values during flood and ebb contribute to about 20% of the total transport during flood and ebb.

## D.5 EFFECT OF MUD STIRRING ACTIVITIES

Rapid siltation of mud (layer of 0.1 to 0.2 m) is observed along the channel bed if the flushing is interrupted for some weeks (maintenance works). The medium-consolidated mud deposits cannot easily be removed by flushing alone.

A mud stirring boat (MSB) with two vertically movable propellers is available for mud stirring activities during ebb flow, see Figure D5.0.5. The MSB is also used to clean up various places along the banks where the velocities are too small to cause sufficient erosion. The boat dimensions are: length= 12 m, width= 3.3 m and draft= 0.7 m. The maximum depth of the propellers is 2.5 m.

The MSB was tested at a traject of 350 m just seaward of the ferry landing. Measuring station I is at 400 m seaward of the MSB-traject and station II is at 1000 m from the MSB-traject. High Water was about +1.25 to 1.35 m above NN and Low Water was -1.15 to 1.3 m below NN (about MSL) during the tests.

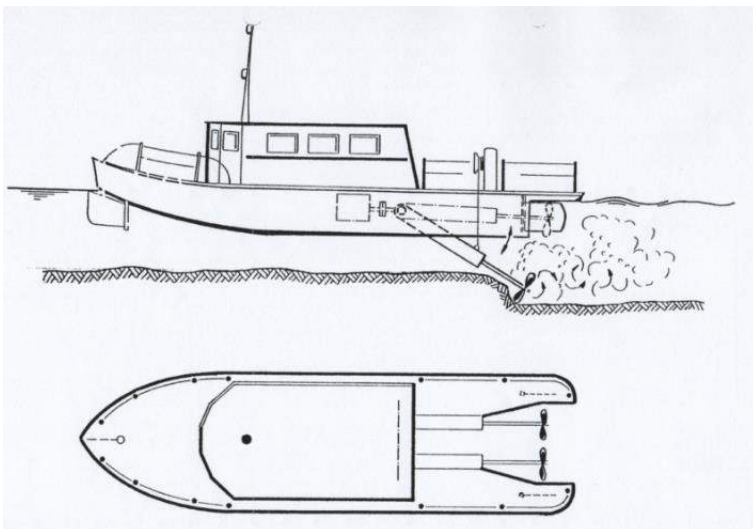


Figure D5.0.5: Mud stirring boat



## D.5.1 Bed sediment and suspended sediment composition

Bed sample composition at the test-traject just before and just after MSB-activities shows no significant changes, see Table D5.6. The bed composition at Stations II and III also show no changes before and after the MSB-activities.

*Table D5.6: Sediment composition of channel bed samples (without mud deposits)*

| Sample location     | West corner of cross-section | Middle of cross-section | East corner of cross-section |
|---------------------|------------------------------|-------------------------|------------------------------|
| MSB-traject, before | 75 µm                        | 90 µm                   | 80 µm                        |
| MSB-traject, after  | 75 µm                        | 95 µm                   | 90 µm                        |
| Station II before   | 95 µm                        | 100 µm                  | 90 µm                        |
| Station II after    | 100 µm                       | 100 µm                  | 80 µm                        |
| Station III before  | 100 µm                       | 105 µm                  | 90 µm                        |
| Station III after   | 100 µm                       | 105 µm                  | 95 µm                        |

Suspended samples have also been taken at Stations II and III (about 0.4 to 1 km downstream of the MSB-traject). Various analysis methods have been used, see Table D5.7. Most suspended samples have been treated with hydrogen-peroxide solution to remove the organic materials and to break down flocculated sediments. Some samples have not been treated to see its effect on the sediment size. The results of the electro-microscopic method is based on small subsamples, which may have given undersampling of fine sand particles.

The suspended sediment samples are relatively muddy during low ebb velocities (0.3 m/s). During flushing conditions without MSB-activities, fine sand particles up to about 100 µm are suspended. Flushing combined with MSB leads to very muddy sediments in suspension at Stations II and III at about 0.4 to 1 km downstream of the MSB-site. Most likely, the fine sand particles suspended at the MSB-site are deposited again at the channel bed upstream of Stations II and III. Most fines at Stations II and III are flocculated with an effective diameter of about 20 to 30 µm.

The most important conclusions for the suspended sediments are:

- suspended sediment size < 10 µm during natural ebb flow with velocities of order 0.3 m/s;
- fine sand is carried in suspension during flushing conditions;
- bed stirring activities generate much fine flocculated sediments of 20 to 30 µm in suspension; fine sand brought in suspension at the MSB-site will deposit quickly downstream of the MSB-site.

Table D5.7: Mean sediment size of suspended samples

| Sampling conditions   | Analysis methods   |  |  |
|---|--|--|--|
|   | Laser<br>Diffraction method<br>(CILAS) with<br>hydrogenperoxide<br>treatment | Electro-Microscopic<br>(subsample without<br>sand; with<br>hydrogenperoxide<br>treatment | Electro-Microscopic<br>(subsample without<br>sand; without<br>hydrogenperoxide<br>treatment) |
| Station II and III<br>natural ebb flow 0.3 m/s<br>no flushing; no MSB | 7-10 $\mu\text{m}$   |  |  |
| Station II and III<br>ebb flow+flushing; no MSB                       | 70-95 $\mu\text{m}$  | 10-20 $\mu\text{m}$  |  |
| Station II and III<br>ebb flow + flushing; with<br>MSB                | 7-10 $\mu\text{m}$   | 3-5 $\mu\text{m}$  | 20-30 $\mu\text{m}$  |

### D.5.2 Suspended sediment concentrations

The mud concentrations in Stations II and III show a considerable increase in the case of mud stirring activities by boat. Figure D5.0.6 shows the upper limit of the measured mud concentrations as function of the flow velocity. Mud stirring is applied after a long period without flushing. In that case a deposit layer with medium consolidated mud is present at the bed of the channel which cannot be easily removed by flushing alone. Mud stirring is combined with flushing. The maximum mud concentrations observed during mud stirring vary roughly between 500 mg/l at velocities of 0.2 m/s to 3000 mg/l at a velocity of 0.8 m/s. This latter value is a factor of 4 larger than that (about 800 mg/l) without mud stirring. In the absence of mud stirring the suspended sediment mainly consists of fine silt and sand.

The increase of the mud concentration over the duration of the flushing period of 2 to 3 hours with an average flow velocity of 0.5 to 0.7 m/s is approximately 1000 mg/l.

### D.5.3 Mud stirring capacity

The additional flushing capacity due to mud stirring can be roughly computed as:  $V_{MS} = A_c V_{ebb} \Delta c \Delta t / \rho_{dry,mud}$  with  $V_{MS}$  = mud volume,  $A_c$  = area cross-section ( $\text{m}^2$ ),  $V_{ebb}$  = flushing velocity (m/s),  $\Delta c$  = mud concentration increase ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $\Delta t$  = flushing duration (seconds),  $\rho_{dry,mud}$  = dry mud density of mud deposit layer ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

Using:  $A_c = 20$  ( $\text{m}^2$ ),  $V_{ebb} = 0.5$  (m/s),  $\Delta c = 1$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $\Delta t = 7200$  (s),  $\rho_{dry,mud} = 400$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), it follows that  $V_{MS} = 180$   $\text{m}^3$  or 90  $\text{m}^3/\text{hour}$ . The effective stirring capacity is found to be about 50  $\text{m}^3/\text{hour}$ .

It is essential to stop the mud stirring activities at about 1.5 to 2 hours before slack tide so that the mud in suspension has sufficient time to settle to the bed before the flood flow enters the channel. Otherwise, the mud cloud due to stirring activities may enter the channel and reservoir causing excessive deposition.



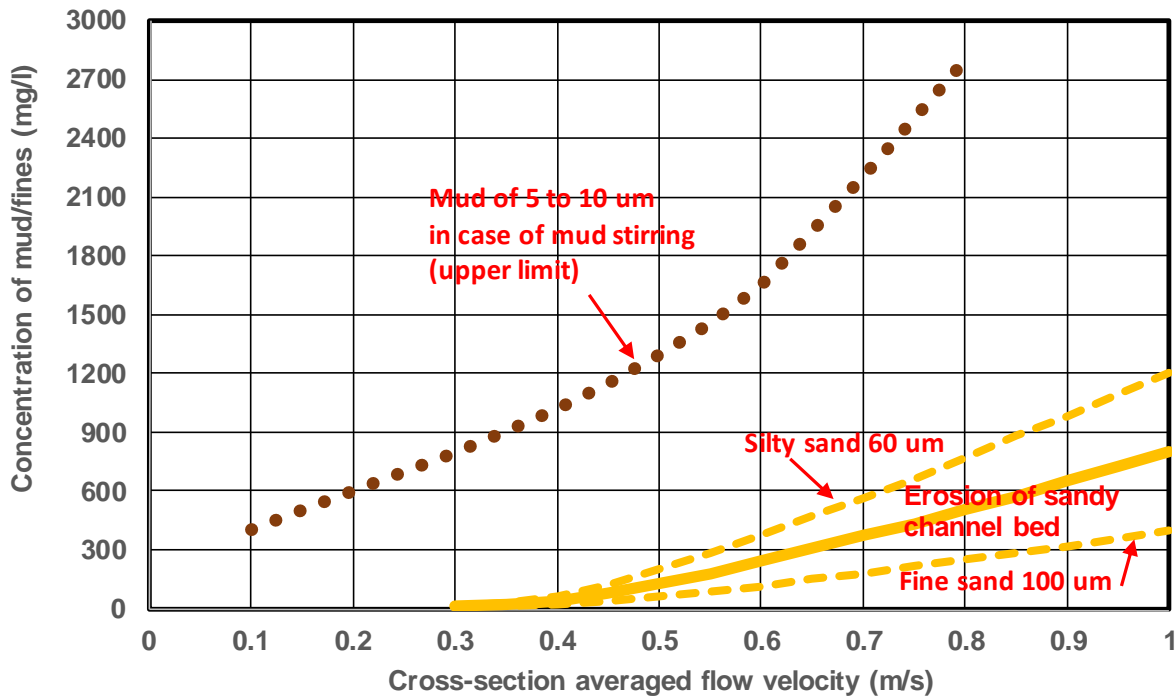


Figure D5.0.6: Sediment concentration as function of cross-section averaged flow velocity, Stations II and III with additional mud stirring by boat

## D.6 EFFECT OF FLUSHING ON THE CHANNEL BED LEVEL

Before the construction of the flushing reservoir in 1977, the channel bed was dredged every two years to maintain the required bed level. After the construction of the flushing reservoir, the required bed level can be maintained by flushing in combination with mud stirring activities by boat. During the first years after construction, the flushing was operated manually resulting in a mean bed level of about -1.6 m below NN. After 1982 the flushing was done automatically which has resulted in a channel bed level of -1.8 m below NN. During short periods of strong onshore winds (autumn, winter), rapid siltation of the channel bed may occur.

Figure D6.0.7 and Figure D6.0.8 show the cross-section and longitudinal section of the channel. Summarizing, the flushing has resulted in:

- increase of channel depth with 0.3 to 0.4 m without dredging;
- increase of channel area (below -0.5 m NN) by about 60%.

During the period September 1985 to July 1986, more siltation was observed resulting in a reduction of the channel cross-section. Simultaneously, a gradual reduction of the flushing velocities during the ebb period was observed which was caused by a slight change of the tidal conditions at the seaward boundary (entrance of channel). The tidal range during this period was about 0.1 m less than before September 1986.

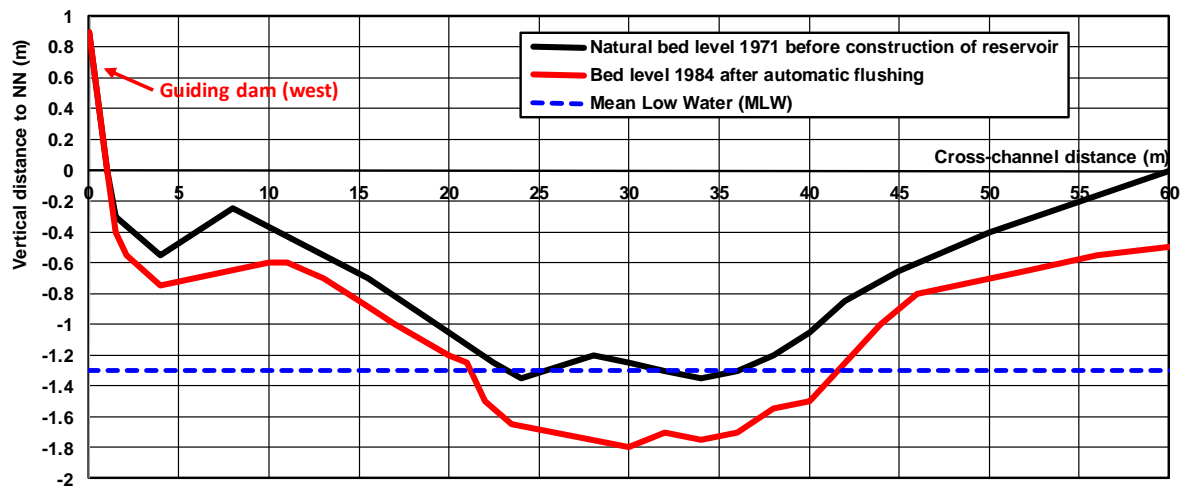


Figure D6.0.7: Cross-section of channel

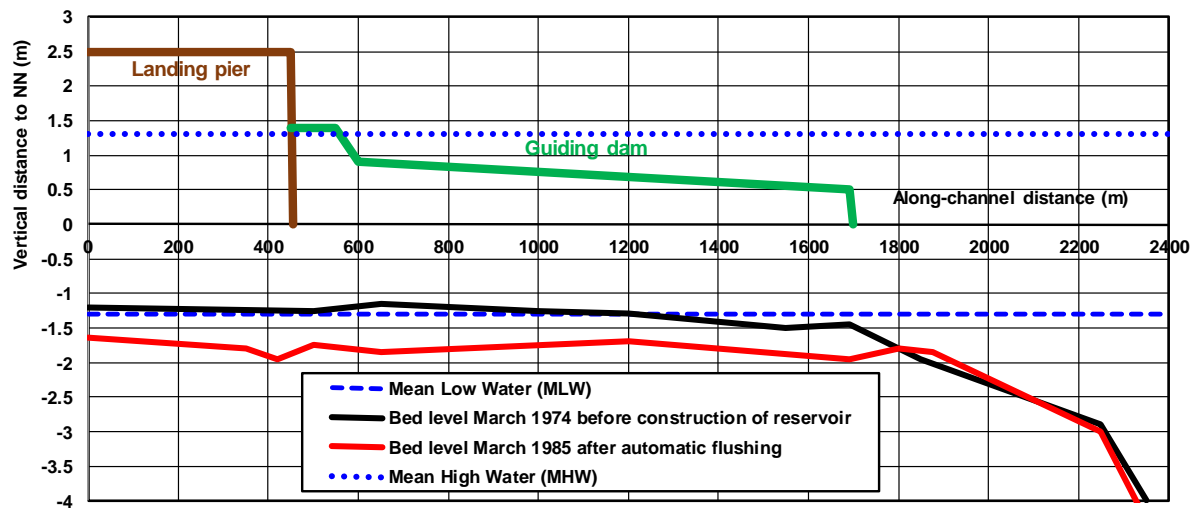


Figure D6.0.8: Longitudinal section of channel

## D.7 SEDIMENT TRAPPING IN RESERVOIR

The reservoir has an area of about 13 hectares ( $13 \cdot 10^4 \text{ m}^2$ ). The storage volume of the reservoir between +1 m above NN to -0.6 m below NN is of the order of  $210,000 \text{ m}^3$ . The total volume of the reservoir is of the order of  $300,000 \text{ m}^3$ .

Although the reservoir is filled during short flood periods with relatively low mud concentrations, some sediment is trapped by the reservoir. The flood velocities in the channel section just seaward of the gate (inlet) remain smaller than about 0.2 m/s during filling conditions. Measurements of mud concentrations during flood inflow show values less than 10 mg/l.

Analysis of sediment samples shows the presence of very fine sediments ( $5$  to  $10 \mu\text{m}$ ) in the deeper parts of the reservoir and fine sandy materials ( $75 \mu\text{m}$ ) in the shallow parts near the edges of the reservoir.

Based on analysis of detailed bed level soundings, the annual deposition of mud was found to be about 2500 m<sup>3</sup> per year.

The total annual volume of water stored in the reservoir is estimated to be about 36 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> per year. Assuming that most sediment is trapped, the mud concentration of the flood water can be computed as:

$$C_{\text{mud}} = \rho_{\text{dry,mud}} V_{\text{deposition}} / V_{\text{water}} = 400 \times 2500 / (36 \cdot 10^6) = 0.028 \text{ kg/m}^3 \cong 30 \text{ mg/l.}$$



# BIJLAGE E: FIGUREN

Overzicht van de instellingen die zijn meegenomen in de verschillende situaties:

| 1. Geul dieptes      |             | 2. Spoelmeer oppervlakken |            |
|----------------------|-------------|---------------------------|------------|
|                      | Runnaam     |                           | Runnaam    |
| ▪ Bestaande situatie | [Runhuidig] | ▪ Geen spoelmeer          |            |
| ▪ -0.85 m NAP        | [Run085]    | ▪ 10 ha                   | [spm_10ha] |
| ▪ -1.50 m NAP        | [Run150]    | ▪ 15 ha                   | [spm_15ha] |
|                      |             | ▪ 20 ha                   | [spm_20ha] |
| 3. Spui regimes      |             | 4. Klep breedtes          |            |
| ▪ Geen spui regime   | [spm]       | ▪ 5 m                     |            |
| ▪ 3 uur na HW        | [spm3]      | ▪ 10 m                    | [klep10]   |
| ▪ 5 uur na HW        | [spm5]      |                           |            |
| ▪ 8.5 uur na HW      | [spm85]     |                           |            |

## E1: STROMINGSFIGUREN LANGS DE GEUL

| Figuur nr. | Runnaam            | Onderwerp  |
|------------|--------------------|--|
| E1.01      | Runhuidig          | Dwarsdoorsneden                                  |
| E1.02      | Runhuidig          | Stroming langs geul                              |
| E1.03      | Run085             | Stroming langs geul                              |
| E1.04      | Run085             | Vershil stroming langs geul met Runhuidig        |
| E1.05      | Run150             | Stroming langs geul                              |
| E1.06      | Run150             | Vershil stroming langs geul met Runhuidig        |
| E1.07      | Runhuidig_spm_10ha | Stroming langs geul                              |
| E1.08      | Runhuidig_spm_10ha | Vershil stroming langs geul met Runhuidig        |
| E1.09      | Run085_spm_10ha    | stroming langs geul                              |
| E1.10      | Run085_spm_10ha    | Vershil stroming langs geul met Runhuidig        |
| E1.11      | Run150_spm_10ha    | Stroming langs geul                              |
| E1.12      | Run150_spm_10ha    | Vershil stroming langs geul met Runhuidig        |
| E1.13      | Run085_spm3_10ha   | Stroming langs geul                              |
| E1.14      | Run085_spm3_10ha   | Vershil stroming langs geul met Run085_sp_10ha   |
| E1.15      | Run085_spm5_10ha   | Stroming langs geul                              |
| E1.16      | Run085_spm5_10ha   | Vershil stroming langs geul met Run085_sp_10ha   |
| E1.17      | Run085_spm85_10ha  | Stroming langs geul                              |
| E1.18      | Run085_spm85_10ha  | Vershil stroming langs geul met Run085_sp_10ha   |
| E1.19      | Run085_spm5_15ha   | Stroming langs geul                              |
| E1.20      | Run085_spm5_15ha   | Vershil stroming langs geul met Run085_spm5_10ha |
| E1.21      | Run085_spm5_20ha   | Stroming langs geul                              |
| E1.22      | Run085_spm5_20ha   | Vershil stroming langs geul met Run085_spm5_10ha |

## E2: TIJDSERIES VAN STROMINGEN EN DEBIETEN

| Figuur nr. | Onderwerp                       | Vergelijking tussen Runnamen:   |
|------------|---------------------------------|---|
| E2.01      | Dieptegemiddelde stroomsnelheid | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Runhuidig,</li> <li>▪ Run085,</li> <li>▪ Run150</li> </ul>   |
| E2.02      | Dieptegemiddelde stroomsnelheid | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Runhuidig,</li> <li>▪ Runhuidig_spm_10ha,</li> <li>▪ Run085_spm_10ha,</li> <li>▪ Run150_spm_10ha</li> </ul>        |
| E2.03      | Dieptegemiddelde stroomsnelheid | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Run085,</li> <li>▪ Run085_spm_10ha,</li> <li>▪ Run085_spm5_10ha</li> </ul>   |
| E2.04      | Dieptegemiddelde stroomsnelheid | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Run085_spm_10ha,</li> <li>▪ Run085_spm3_10ha,</li> <li>▪ Run085_spm5_10ha,</li> <li>▪ Run085_sp85_10ha</li> </ul>  |
| E2.05      | Dieptegemiddelde stroomsnelheid | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Run085_spm5_10ha,</li> <li>▪ Run085_spm5_15ha,</li> <li>▪ Run085_spm5_20ha</li> </ul>                              |
| E2.06      | Debiet                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Runhuidig,</li> <li>▪ Run085,</li> <li>▪ run150</li> </ul>   |
| E2.07      | Debiet                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Runhuidig,</li> <li>▪ huidig_spm_10ha,</li> <li>▪ Run085_spm_10ha,</li> <li>▪ run150_spm_10ha</li> </ul>           |
| E2.08      | Debiet                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Run085,</li> <li>▪ Run085_spm_10ha,</li> <li>▪ Run085_spm5_10ha</li> </ul>   |
| E2.09      | Debiet                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Run085_spm_10ha,</li> <li>▪ Run085_spm3_10ha,</li> <li>▪ Run085_spm5_10ha,</li> <li>▪ Run085_spm85_10ha</li> </ul> |
| E2.10      | Debiet                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Run085_spm5_10ha,</li> <li>▪ Run085_spm5_15ha,</li> <li>▪ Run085_spm5_20ha</li> </ul>                              |

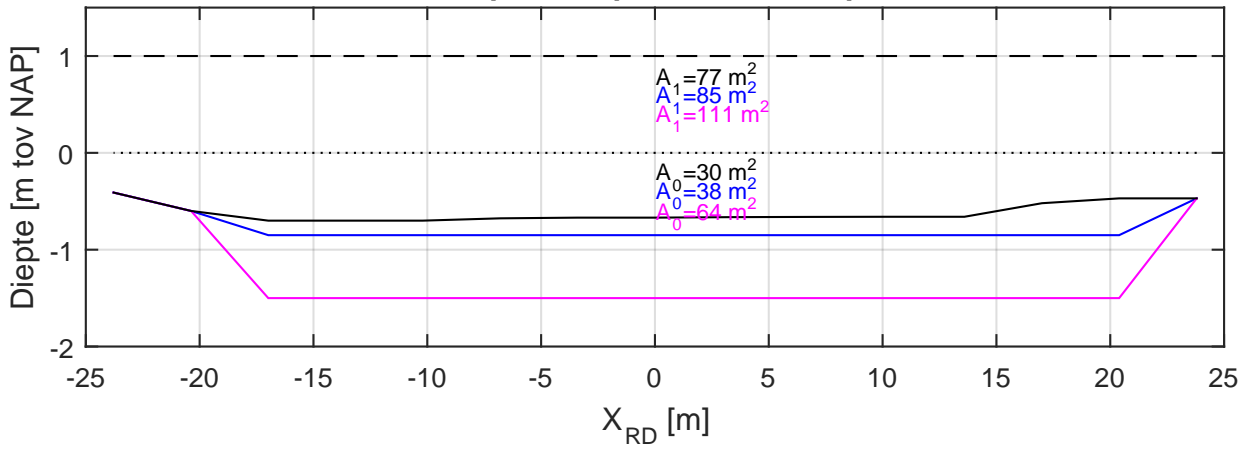
## E3: 12-UURS OVERZICHTEN

| Figuur nr. | Runnaam       | Onderwerp                  |
|------------|---------------|----------------------------|
| E3.01      | Runhuidig     | Bovenaanzicht t=0 u        |
| E3.02      | Runhuidig     | Bovenaanzicht t=1 u        |
| E3.03      | Runhuidig     | Bovenaanzicht t=2 u        |
| E3.04      | Runhuidig     | Bovenaanzicht t=3 u        |
| E3.05      | Runhuidig     | Bovenaanzicht t=4 u        |
| E3.06      | Runhuidig     | Bovenaanzicht t=5 u        |
| E3.07      | Runhuidig     | Bovenaanzicht t=6 u        |
| E3.08      | Runhuidig     | Bovenaanzicht t=7 u        |
| E3.09      | Runhuidig     | Bovenaanzicht t=8 u        |
| E3.10      | Runhuidig     | Bovenaanzicht t=9 u        |
| E3.11      | Runhuidig     | Bovenaanzicht t=10 u       |
| E3.12      | Runhuidig     | Bovenaanzicht t=11 u       |
| E3.13      | Runhuidig     | Bovenaanzicht t=12 u       |
| E3.14      | Run085_sp5_10 | Bovenaanzicht t=0 u        |
| E3.15      | Run085_sp5_10 | Bovenaanzicht t=1 u        |
| E3.16      | Run085_sp5_10 | Bovenaanzicht t=2 u        |
| E3.17      | Run085_sp5_10 | Bovenaanzicht t=3 u        |
| E3.18      | Run085_sp5_10 | Bovenaanzicht t=4 u        |
| E3.19      | Run085_sp5_10 | Bovenaanzicht t=5 u        |
| E3.20      | Run085_sp5_10 | Bovenaanzicht t=5 u 10 min |
| E3.21      | Run085_sp5_10 | Bovenaanzicht t=6 u        |
| E3.22      | Run085_sp5_10 | Bovenaanzicht t=7 u        |
| E3.23      | Run085_sp5_10 | Bovenaanzicht t=8 u        |
| E3.24      | Run085_sp5_10 | Bovenaanzicht t=9 u        |
| E3.25      | Run085_sp5_10 | Bovenaanzicht t=10 u       |
| E3.26      | Run085_sp5_10 | Bovenaanzicht t=11 u       |
| E3.27      | Run085_sp5_10 | Bovenaanzicht t=12 u       |

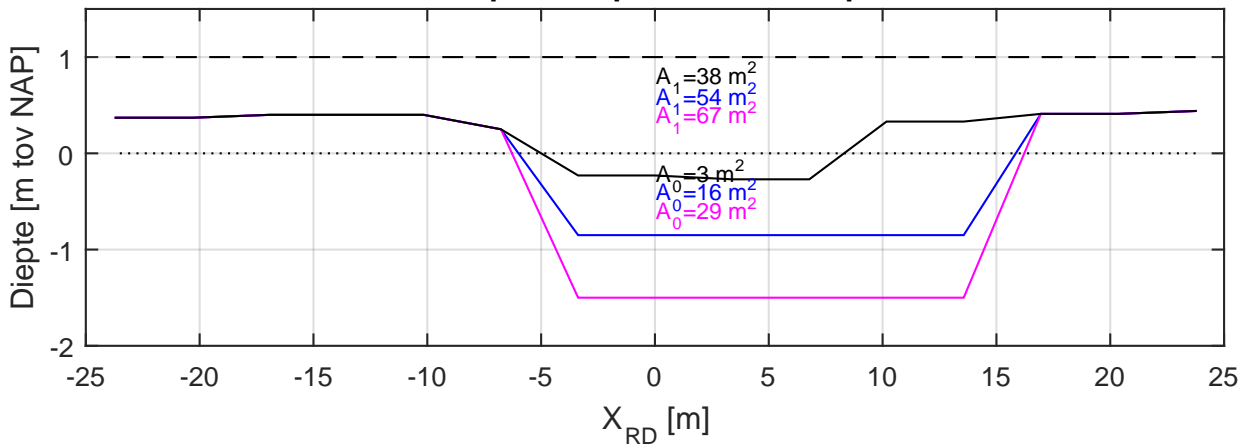




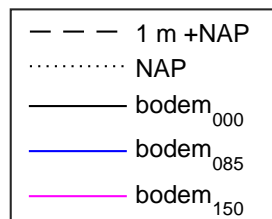
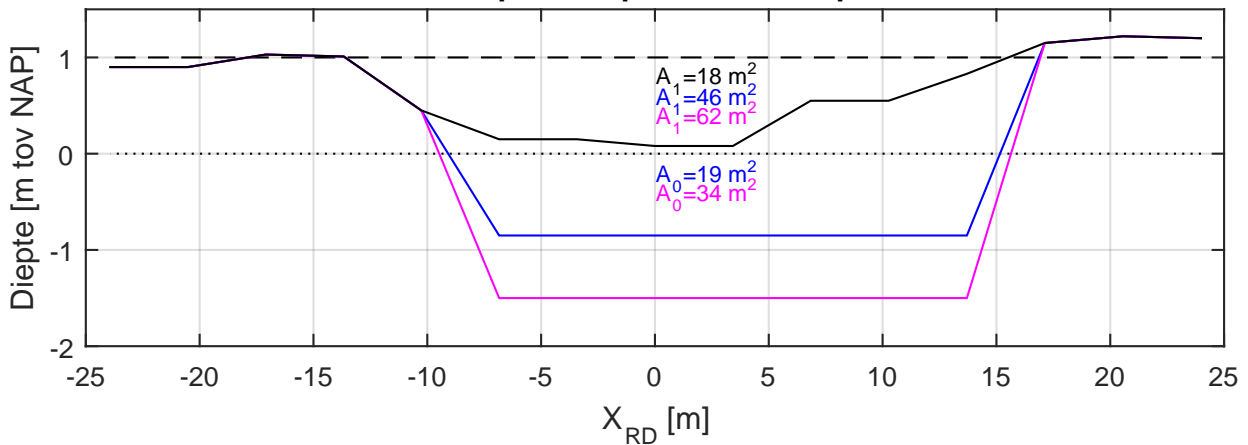
Dwarsprofiel op 2500 m van 0-punt



Dwarsprofiel op 1500 m van 0-punt



Dwarsprofiel op 500 m van 0-punt



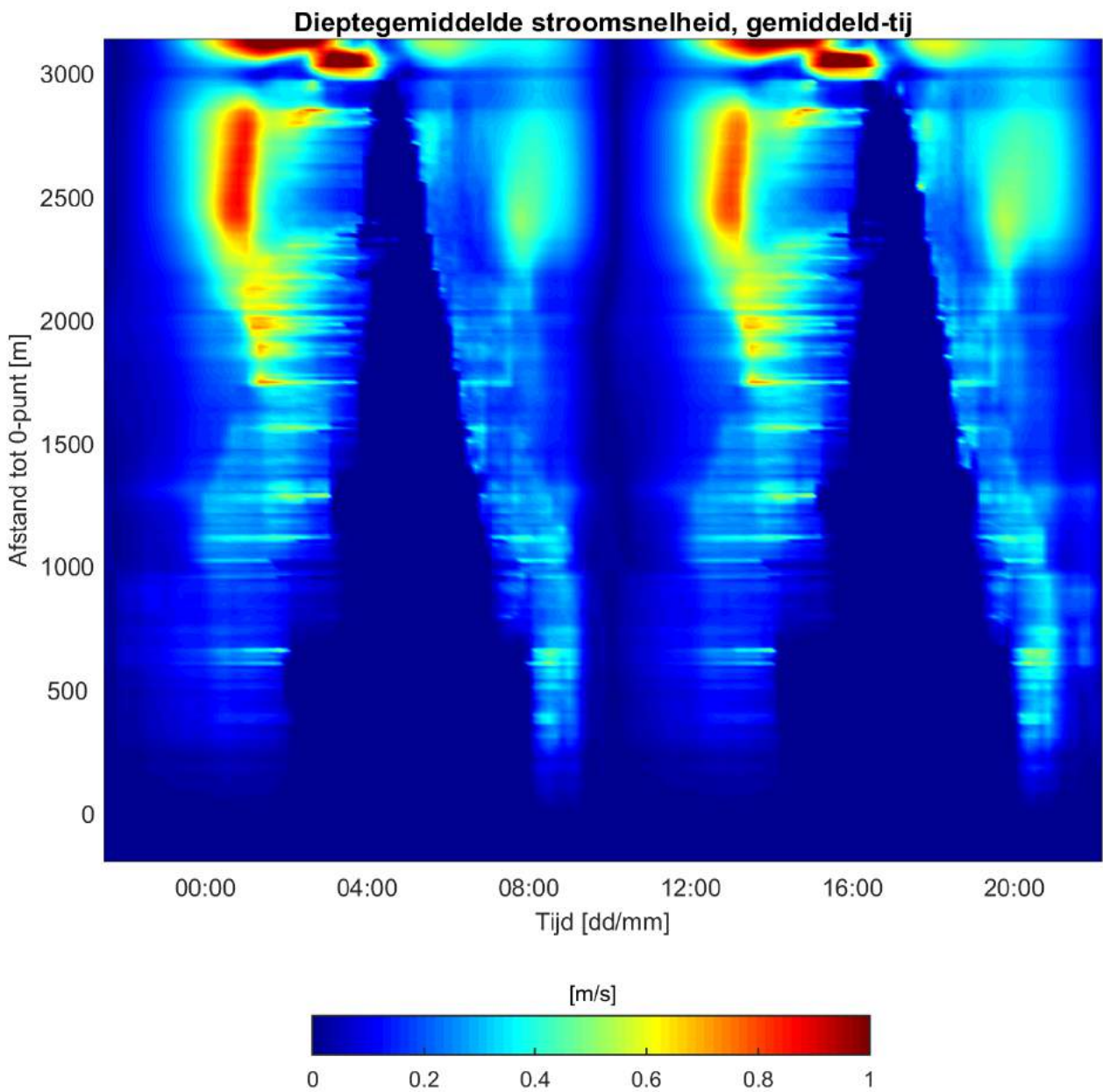
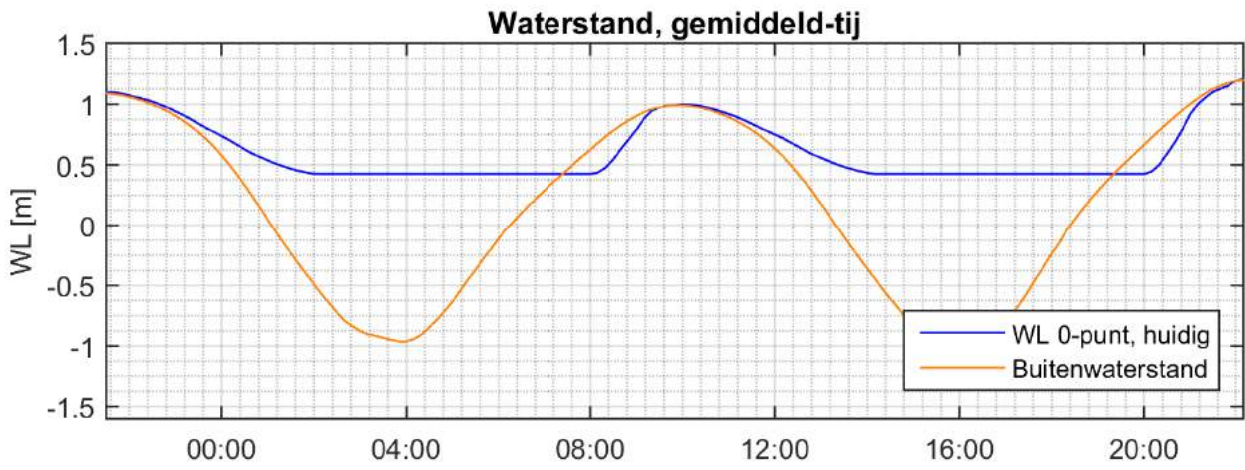
Doorstroomoppervlakten

Delft3D

WP2016.1032

Noordpolderzijl

Figuur E1.01



Situatie huidig, gemiddeld-tij  
25 - 26 Januari 2017

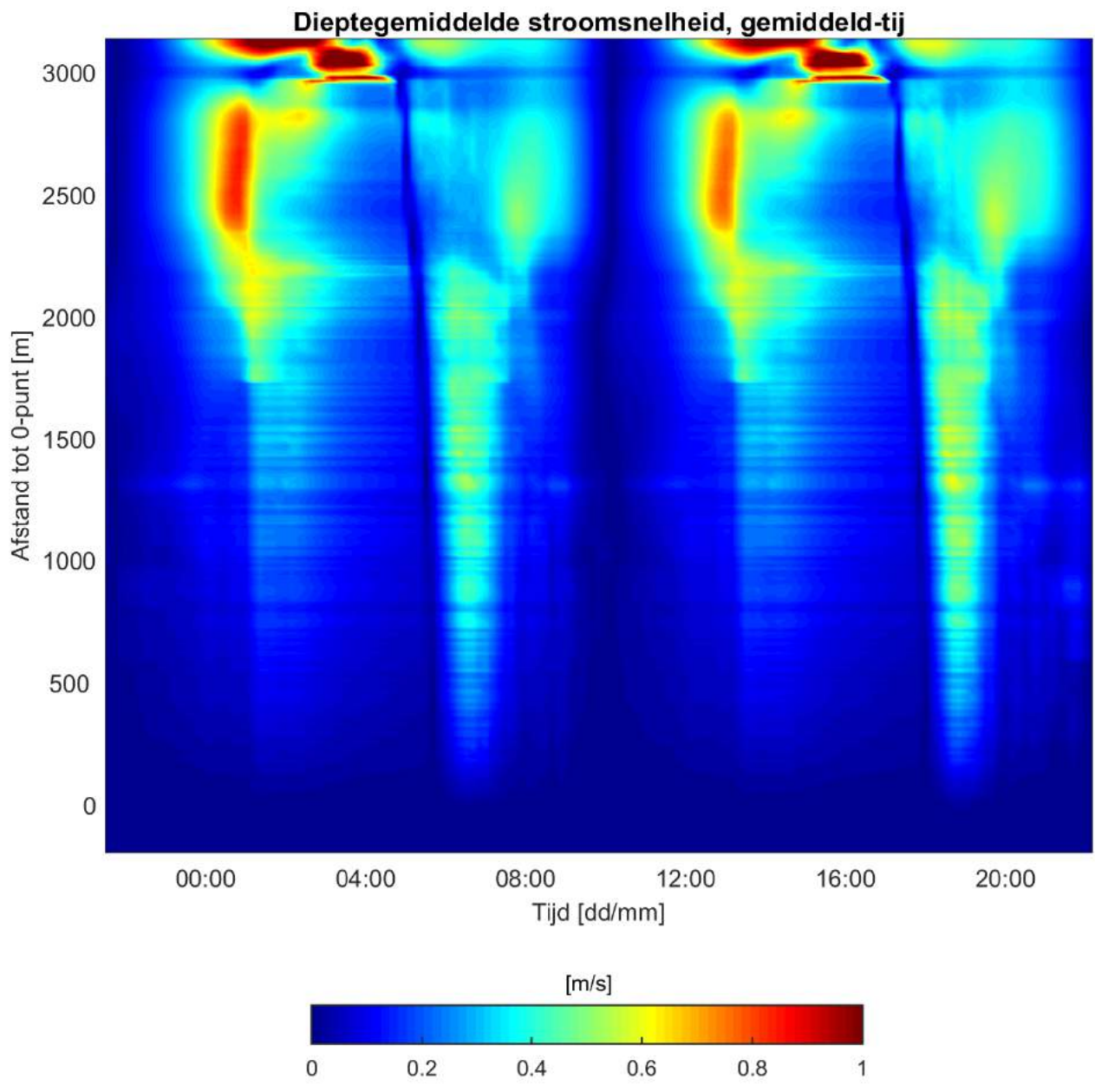
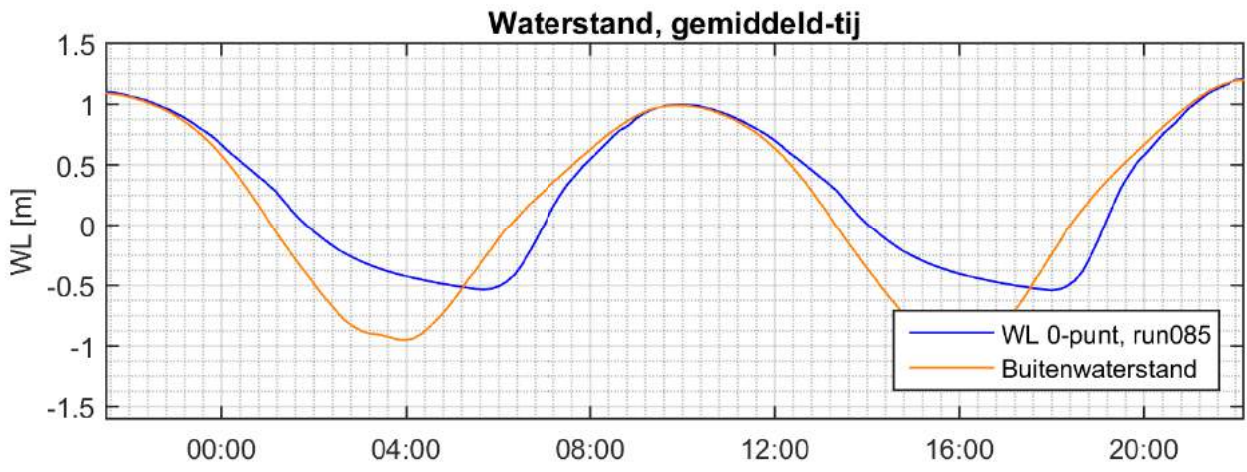
Delft3D

huidig

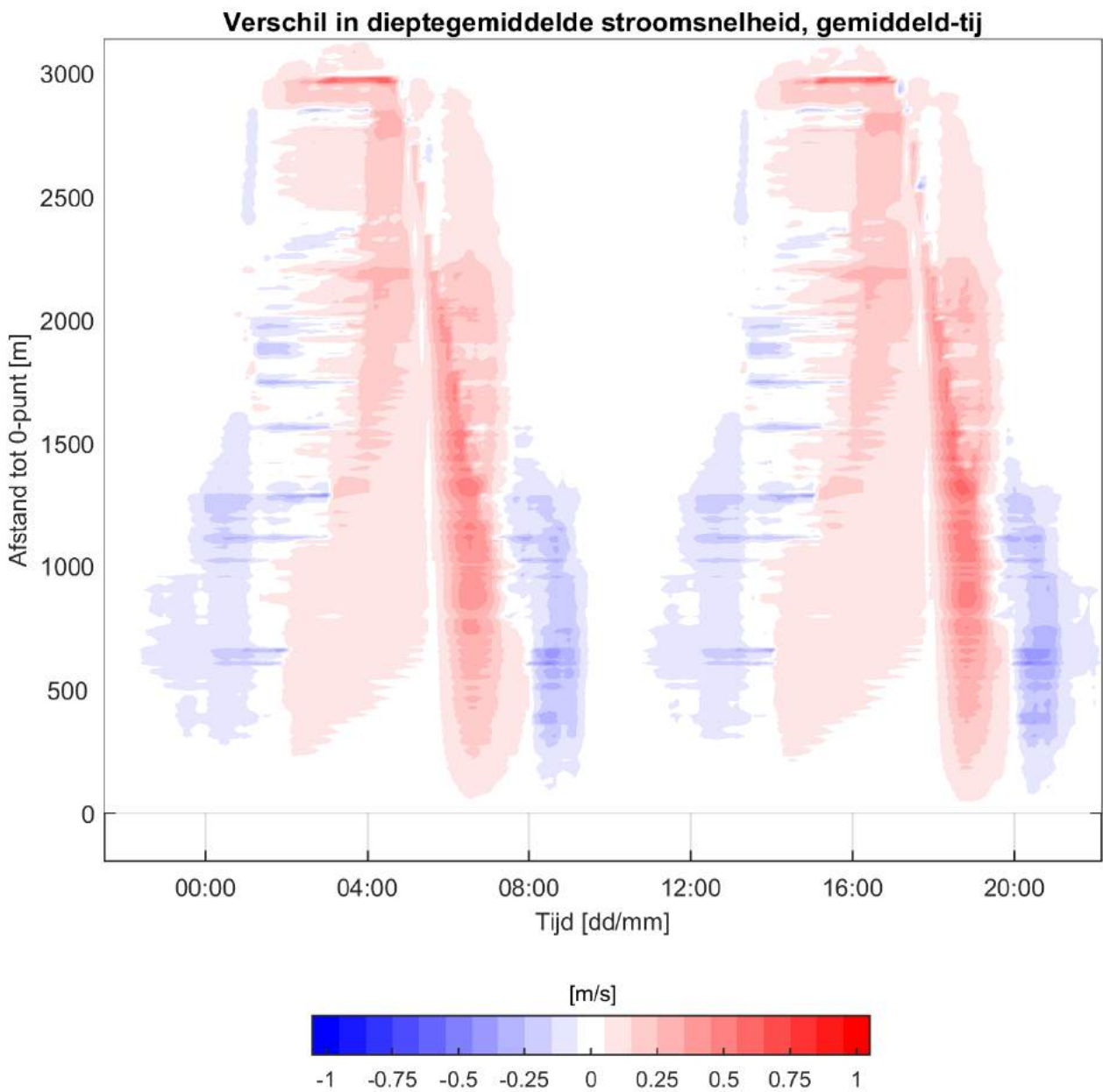
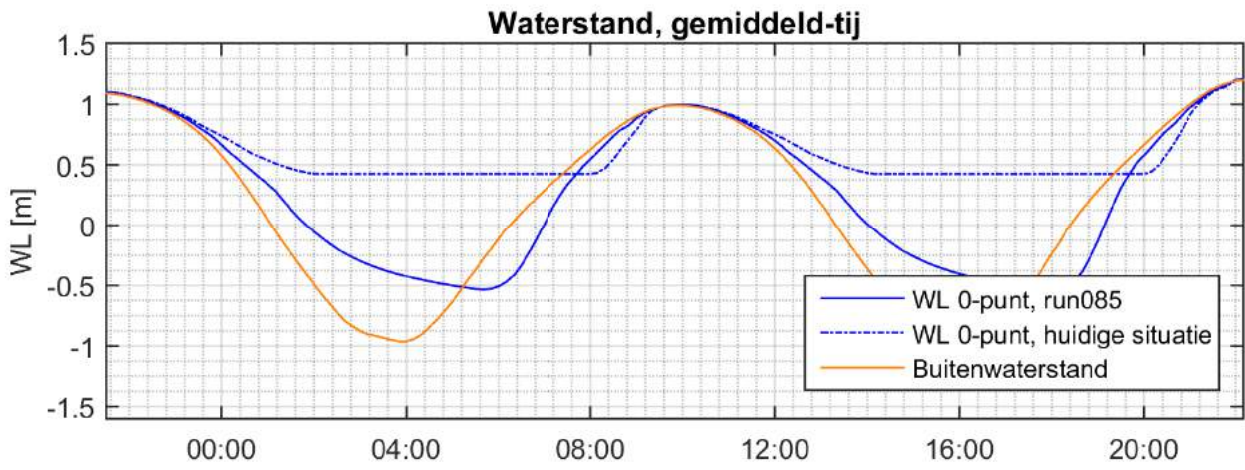
WP2016.1032

Noordpolderzijl

Figuur E1.02



|  |             |              |
|--|-------------|--------------|
| Situatie run085, gemiddeld-tij<br>25 - 26 Januari 2017 | Delft3D     | run085       |
|  | WP2016.1032 |              |
| Noordpolderzijl  |             | Figuur E1.03 |



Vershil situatie run085 met huidige situatie, gemiddeld-tij  
25 - 26 Januari 2017

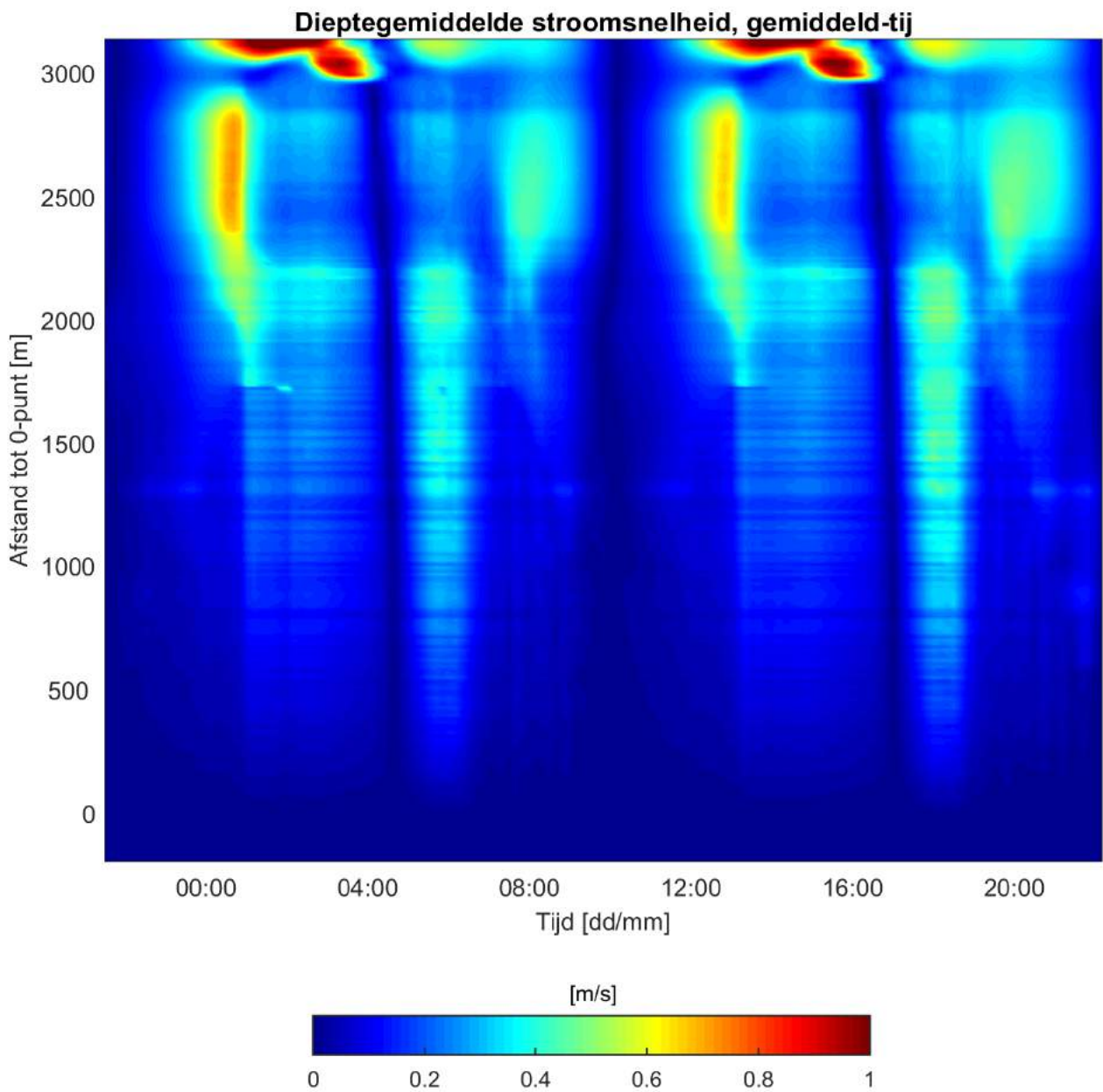
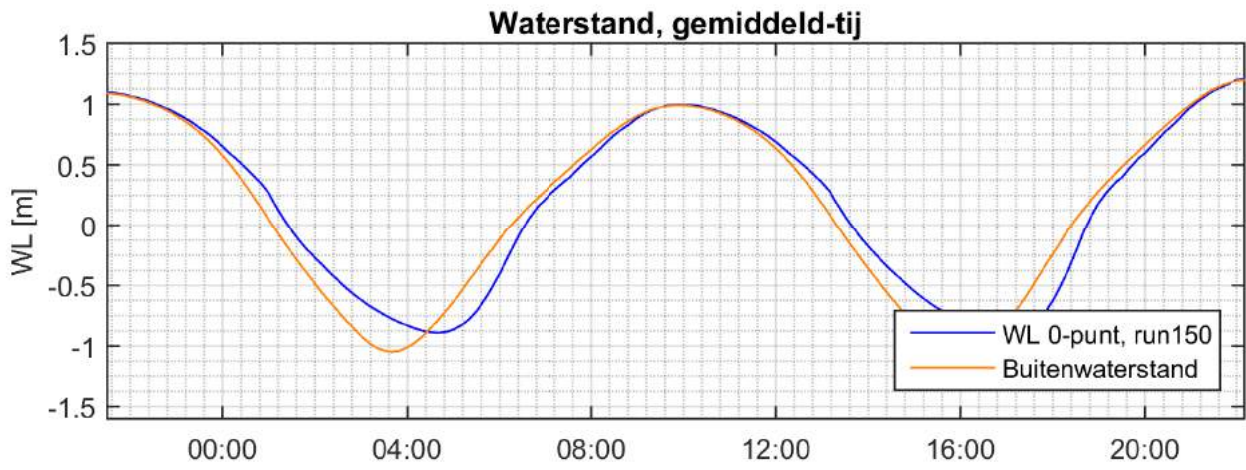
Delft3D

run085

WP2016.1032

Noordpolderzijl

Figuur E1.04



Situatie run150, gemiddeld-tij  
25 - 26 Januari 2017

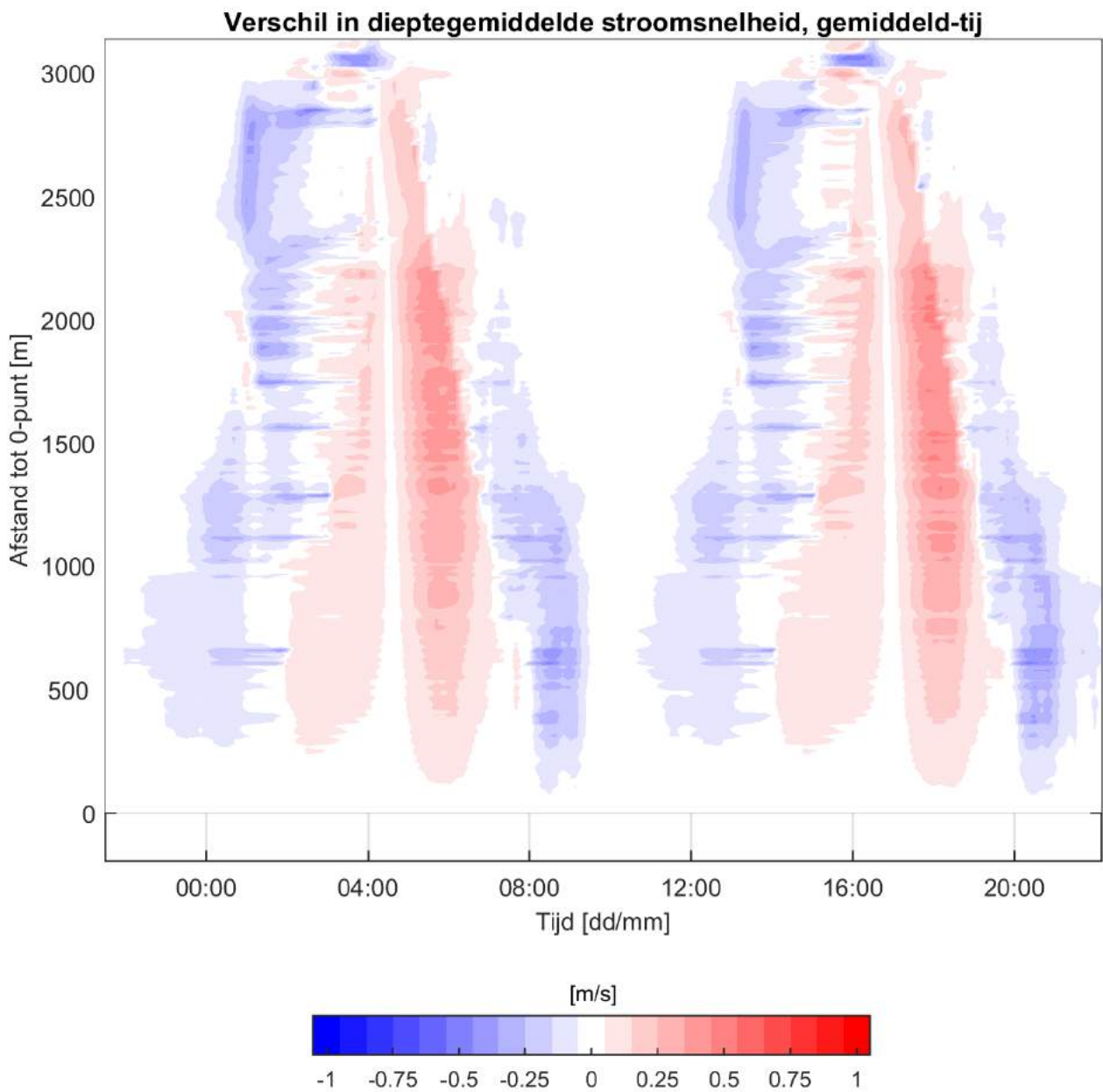
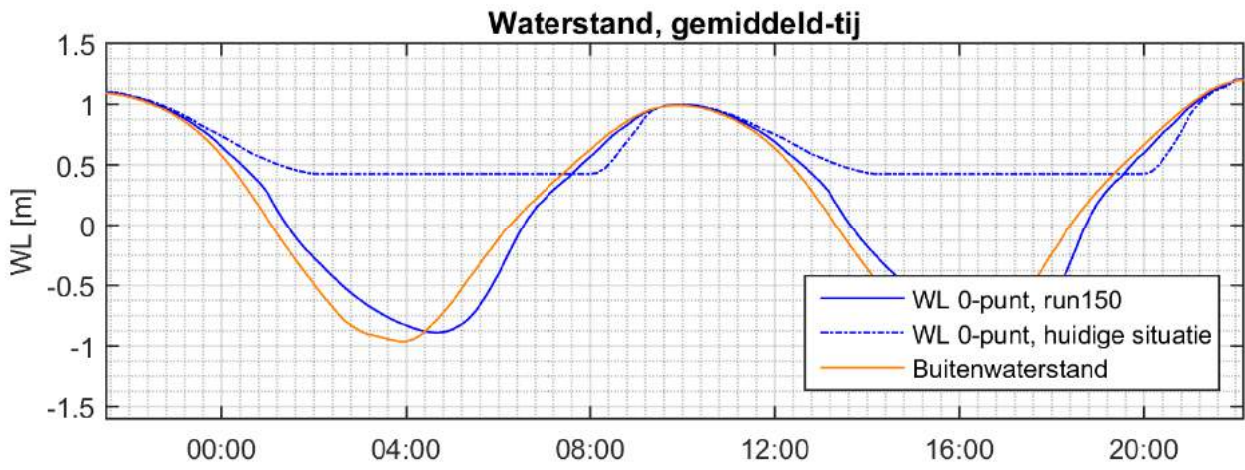
Delft3D

run150

WP2016.1032

Noordpolderzijl

Figuur E1.05



Vershil situatie run150 met huidige situatie, gemiddeld-tij  
25 - 26 Januari 2017

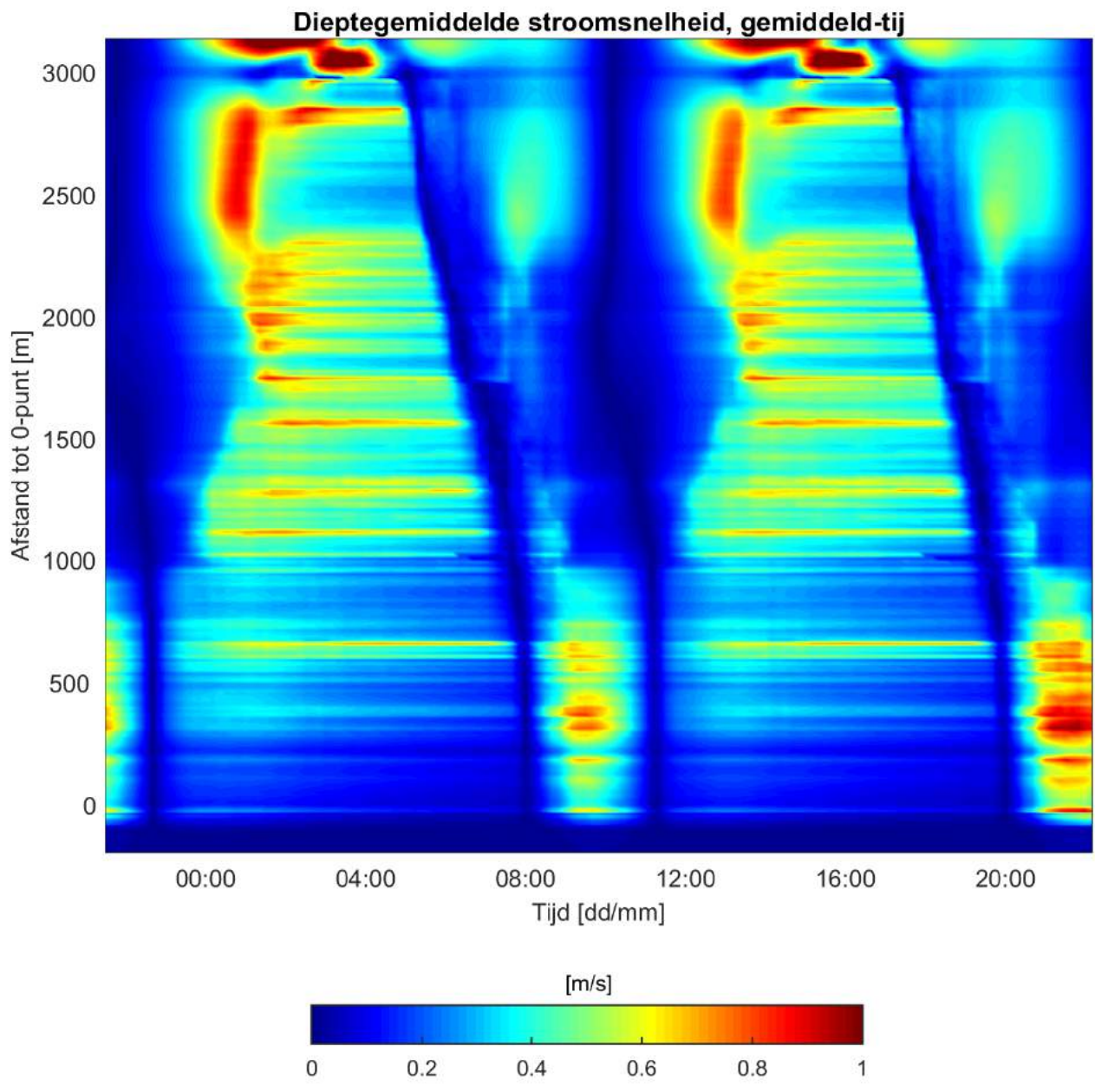
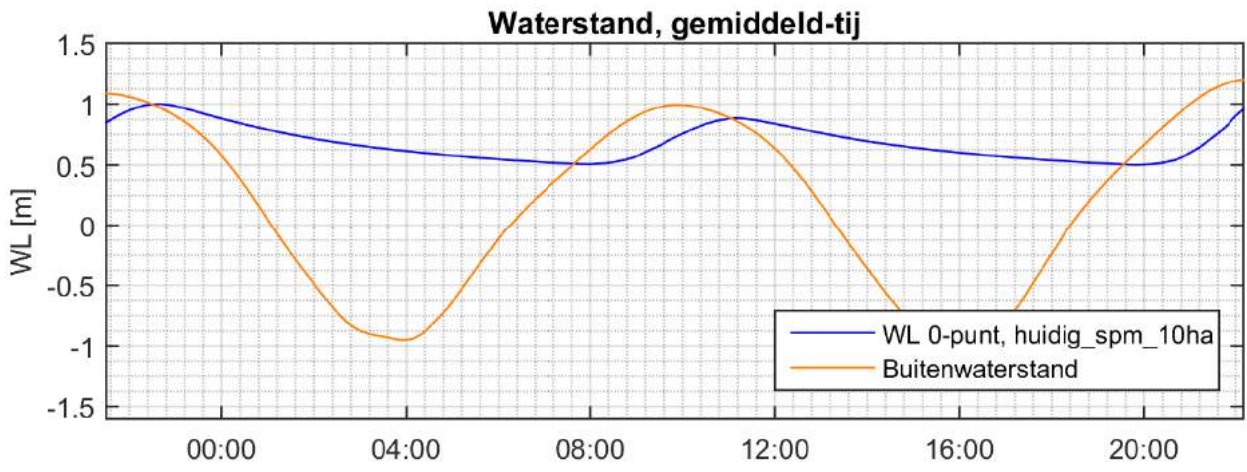
Delft3D

run150

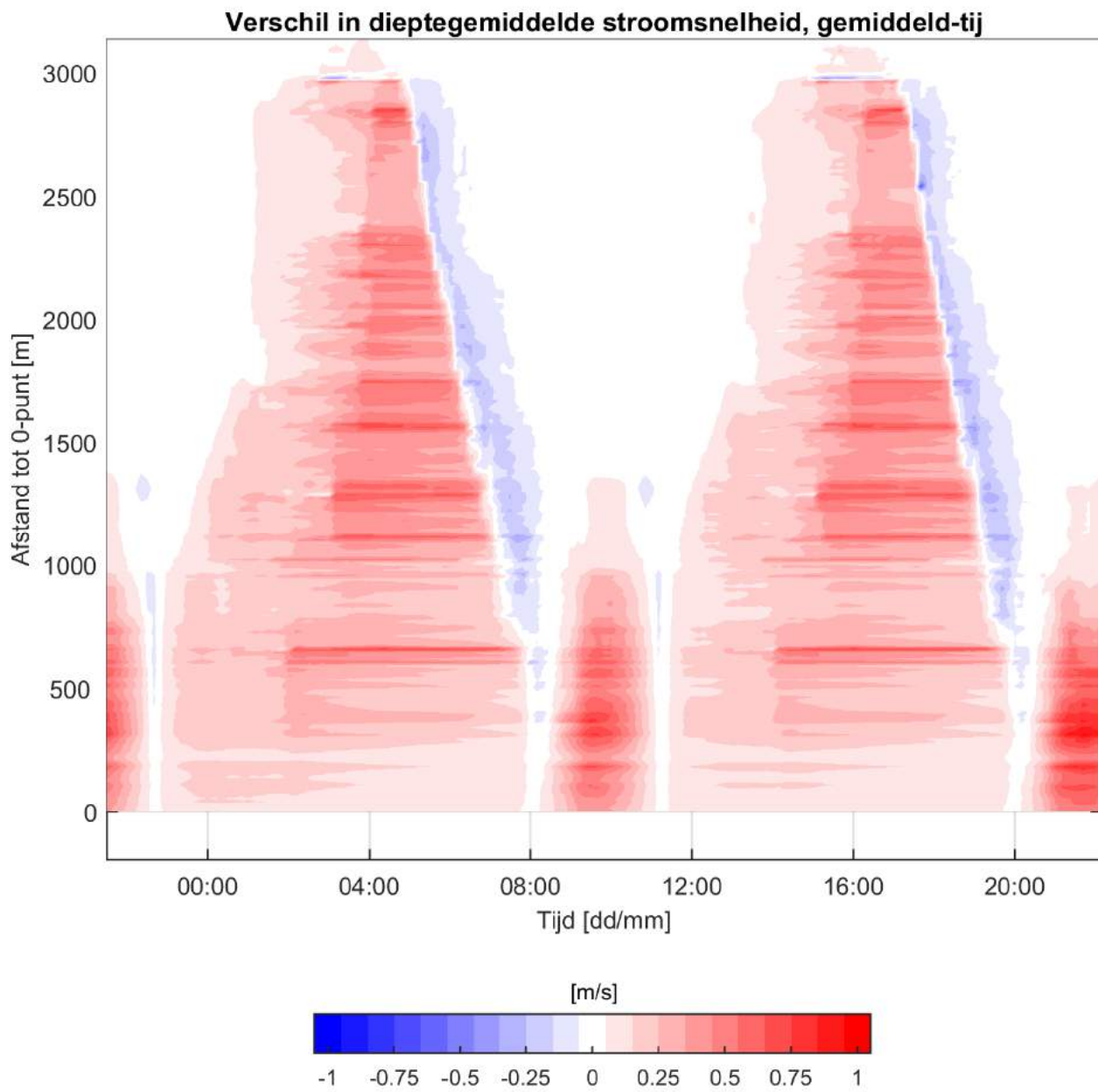
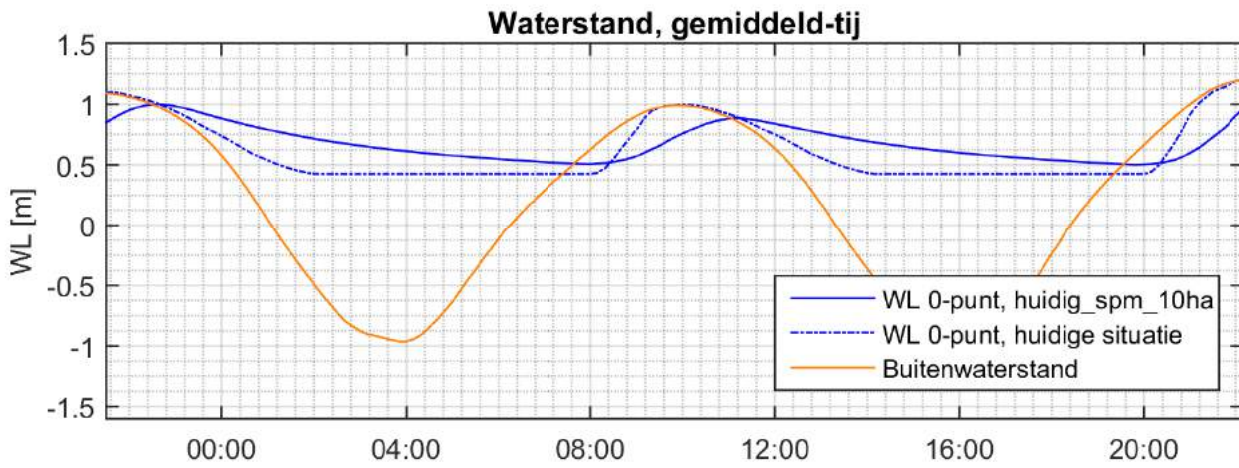
WP2016.1032

Noordpolderzijl

Figuur E1.06

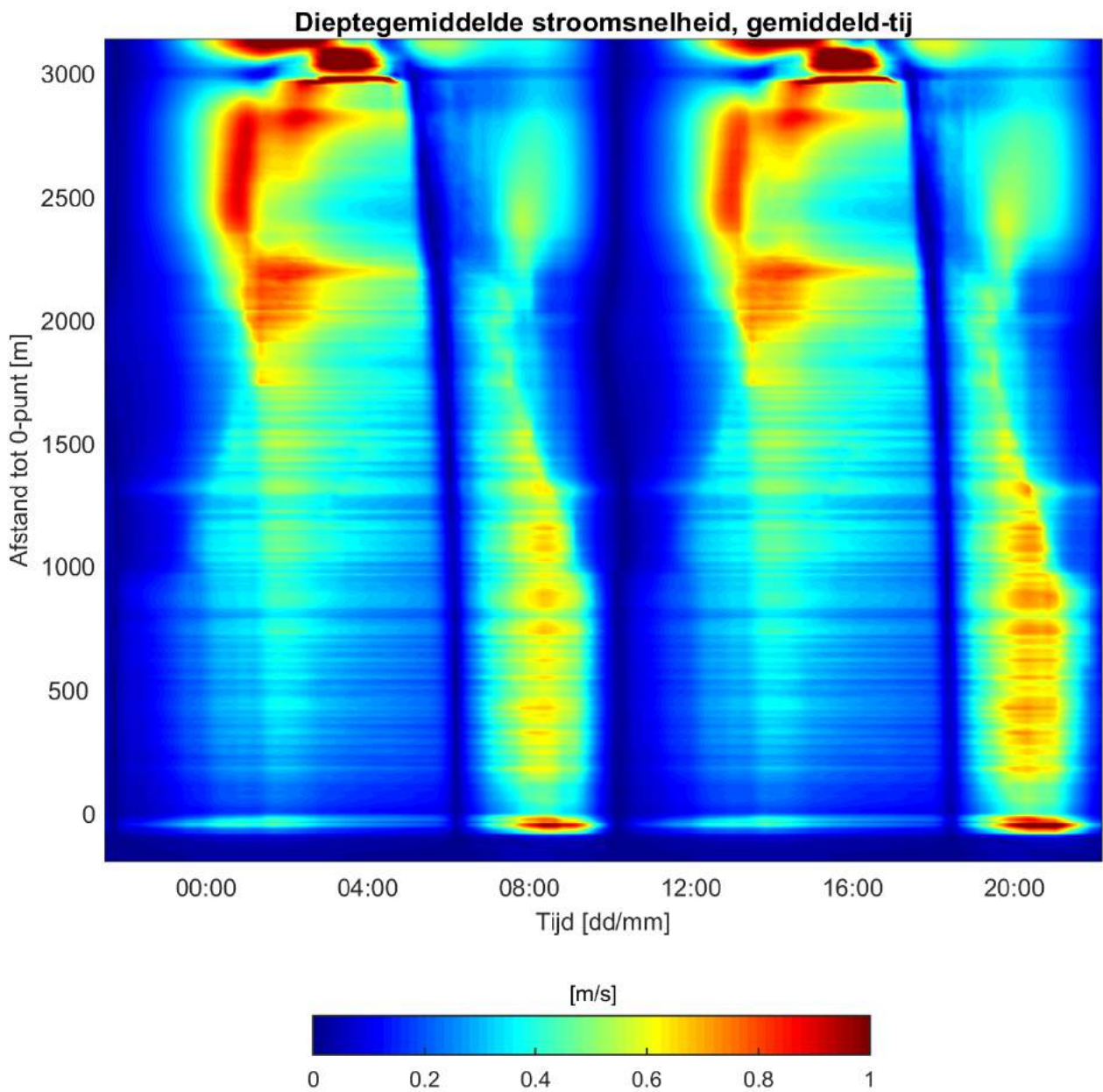
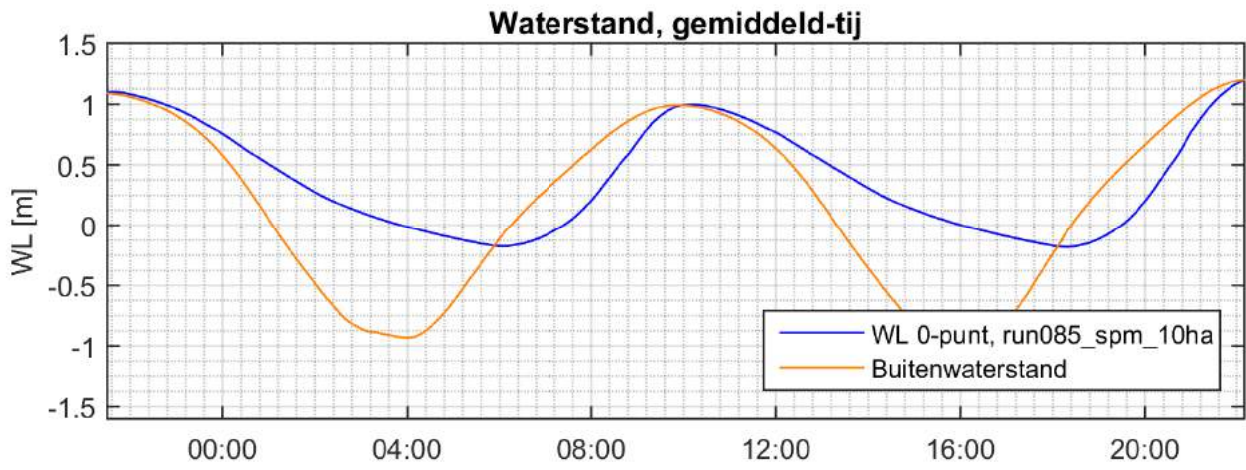


|   |             |                 |
|---|-------------|-----------------|
| Situatie huidig_spm_10ha, gemiddeld-tij<br>25 - 26 Januari 2017 | Delft3D     | huidig_spm_10ha |
|   | WP2016.1032 |                 |
| Noordpolderzijl   |             | Figuur E1.07    |



|   |             |                 |
|---|-------------|-----------------|
| Verschil situatie huidig_spm_10ha met huidige situatie, gemiddeld-tij<br>25 - 26 Januari 2017 | Delft3D     | huidig_spm_10ha |
|   | WP2016.1032 |                 |
| Noordpolderzijl   |             | Figuur E1.08    |





Situatie run085\_spm\_10ha, gemiddeld-tij  
25 - 26 Januari 2017

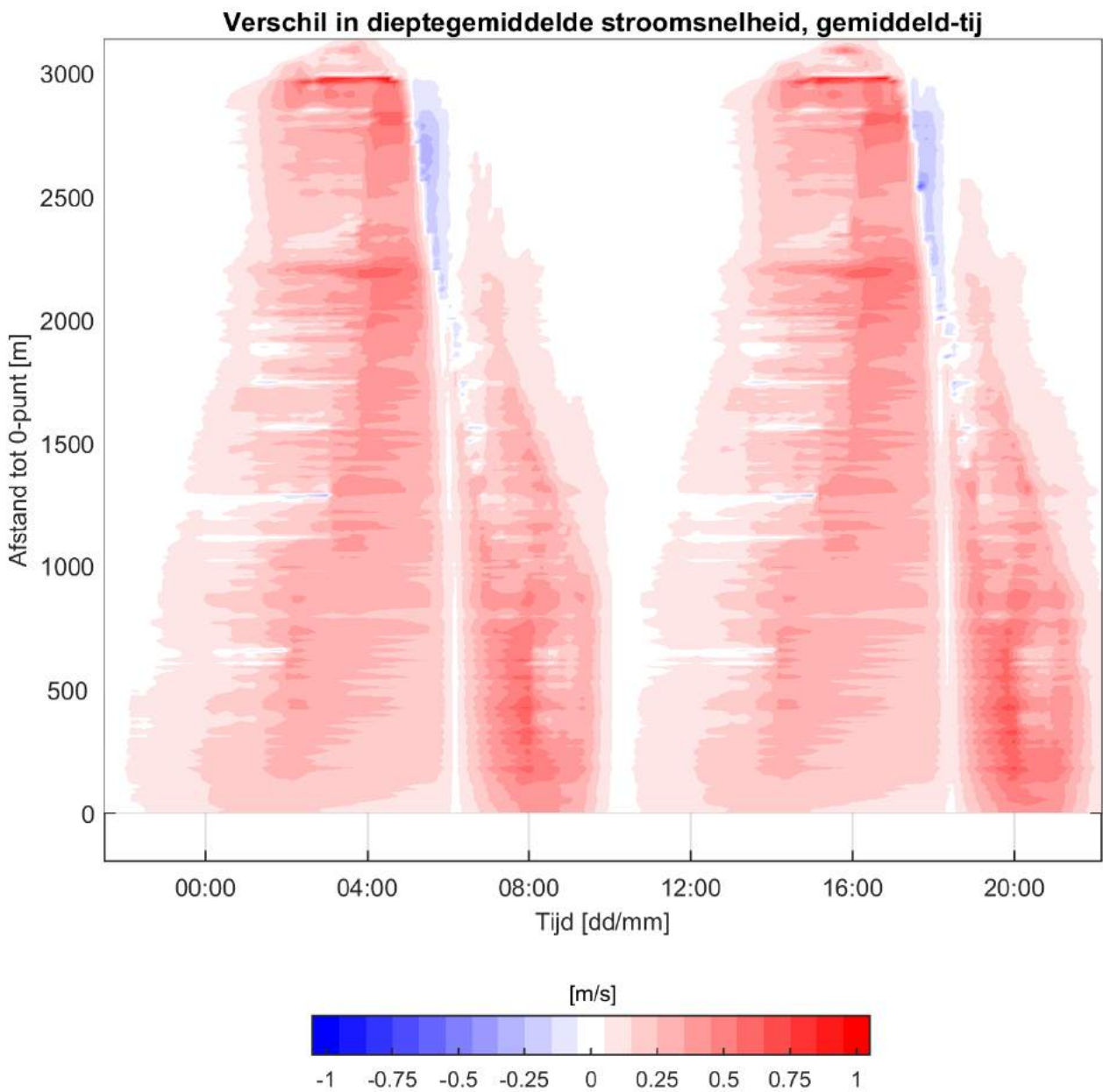
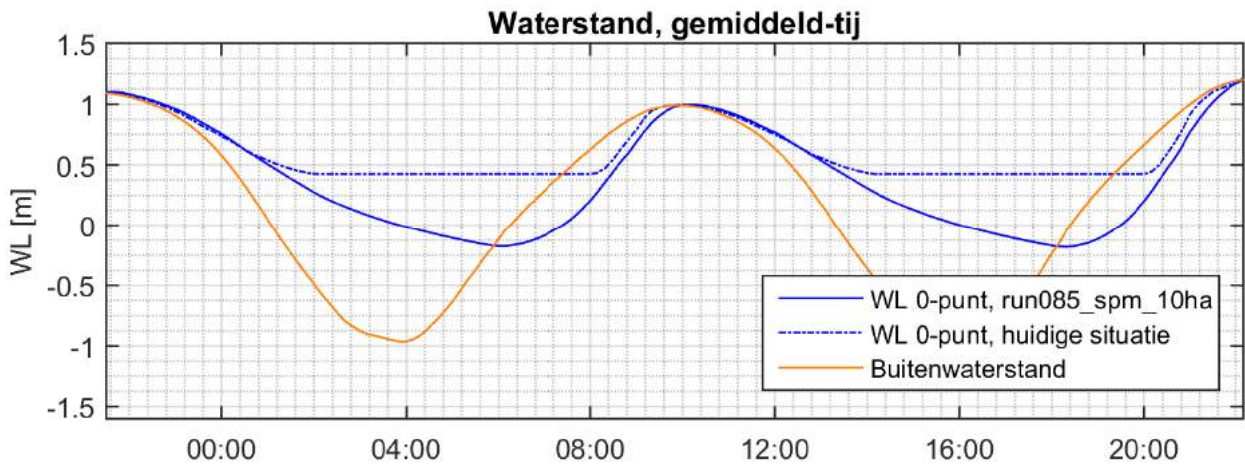
Delft3D

run085\_spm\_10ha

WP2016.1032

Noordpolderzijl

Figuur E1.09



Verschil situatie run085\_spm\_10ha met huidige situatie, gemiddeld-tij  
25 - 26 Januari 2017

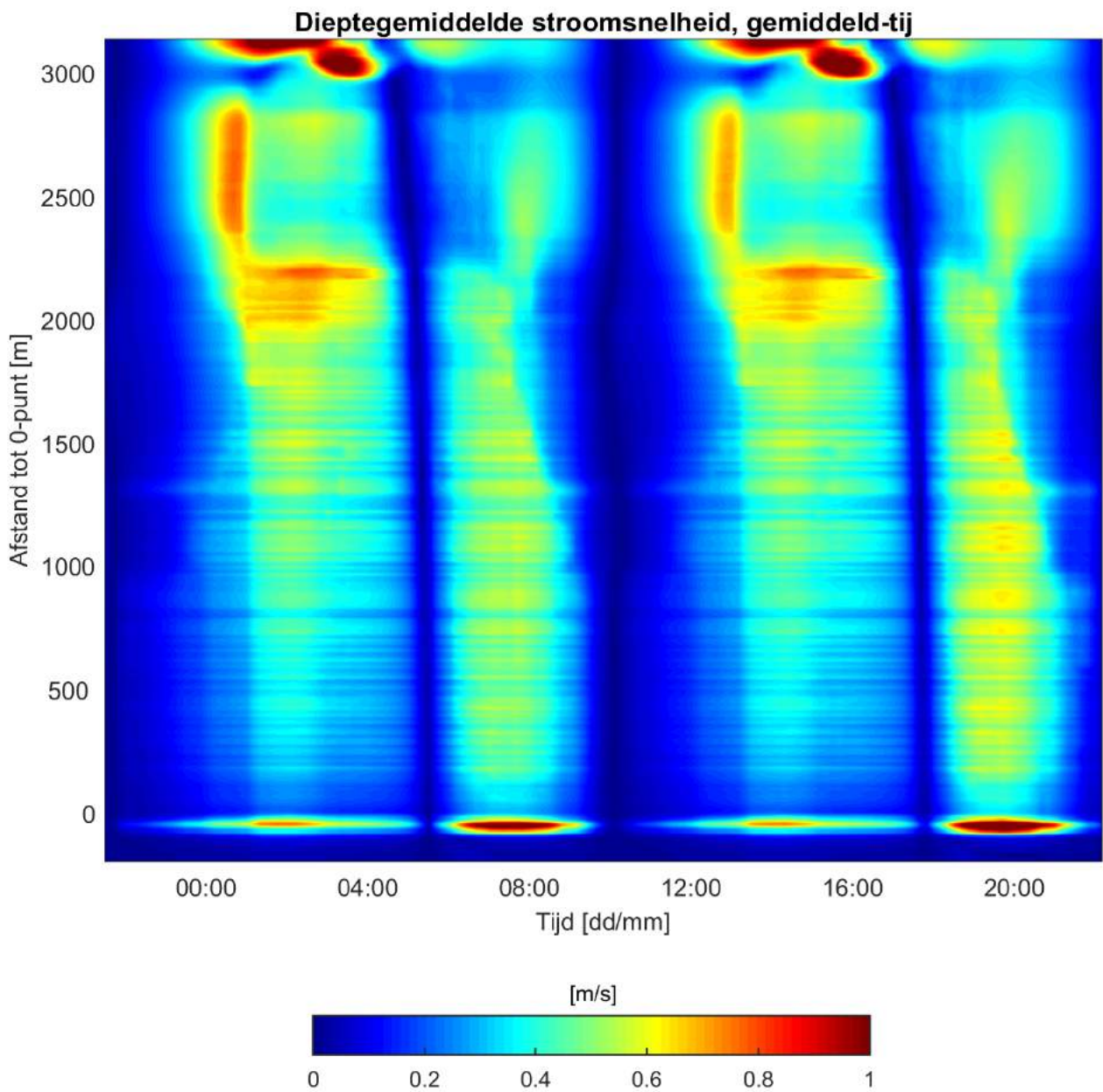
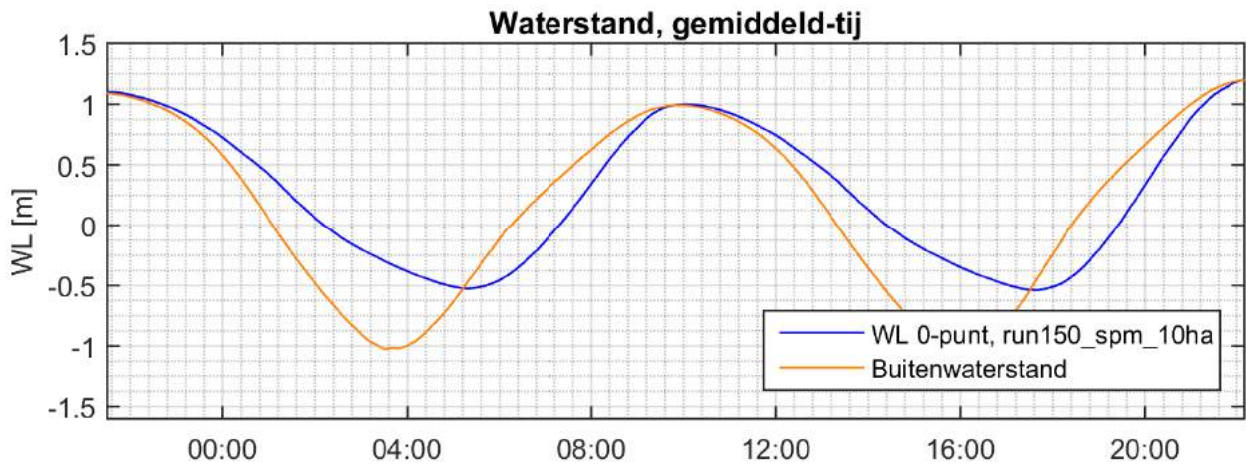
Delft3D

run085\_spm\_10ha

WP2016.1032

Noordpolderzijl

Figuur E1.10



Situatie run150\_spm\_10ha, gemiddeld-tij  
25 - 26 Januari 2017

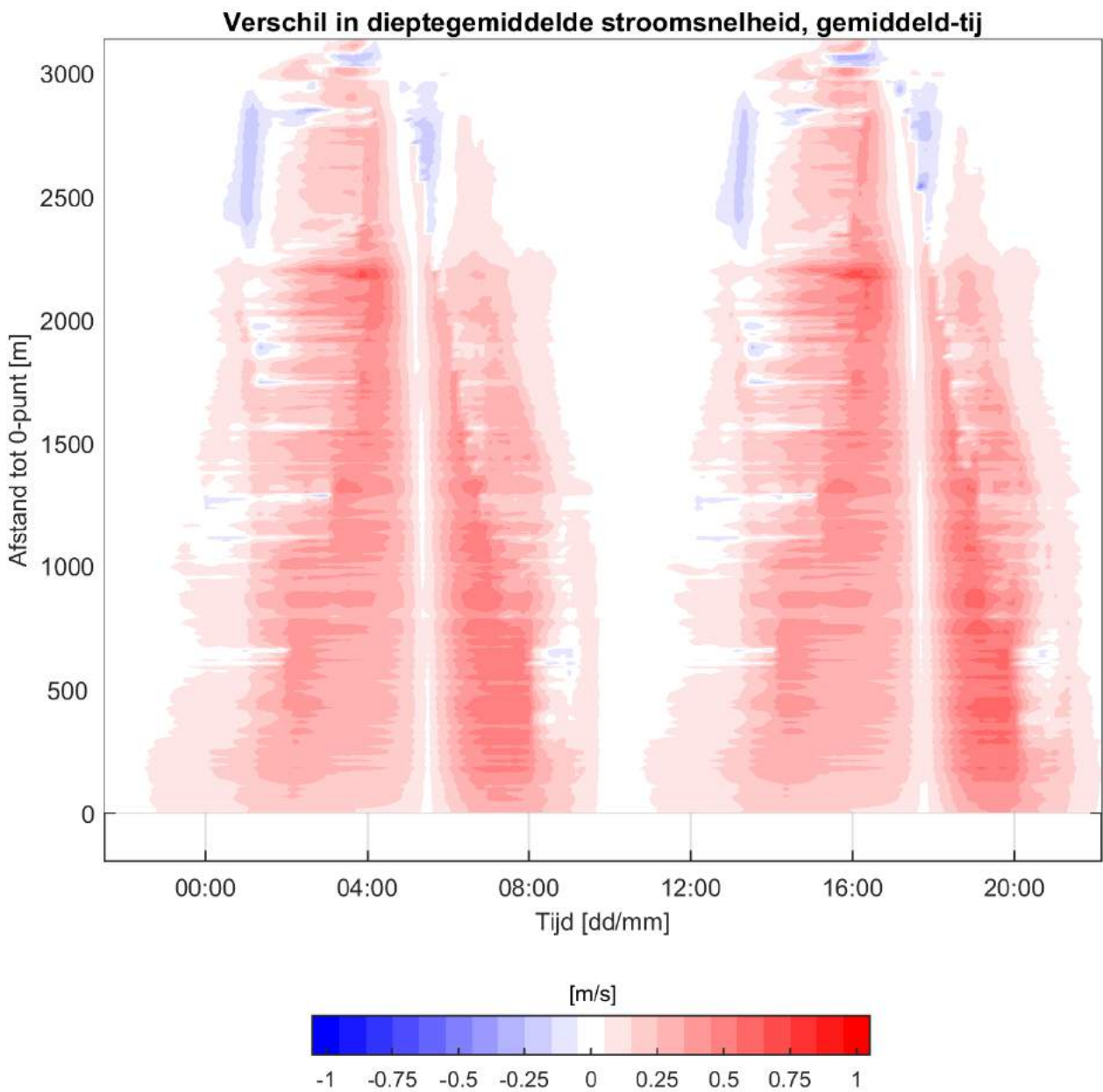
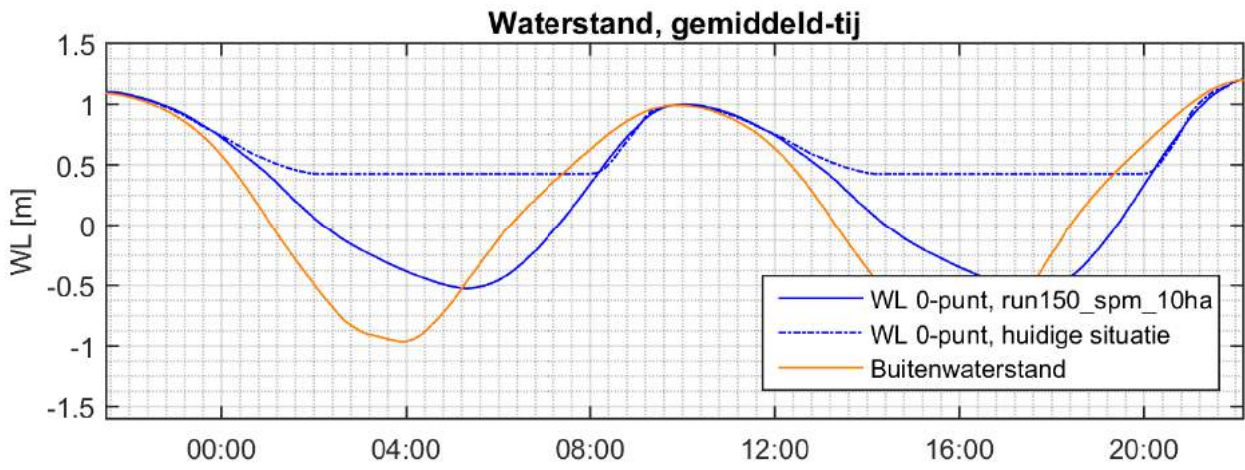
Delft3D

run150\_spm\_10ha

WP2016.1032

Noordpolderzijl

Figuur E1.11



Verschil situatie run150\_spm\_10ha met huidige situatie, gemiddeld-tij  
25 - 26 Januari 2017

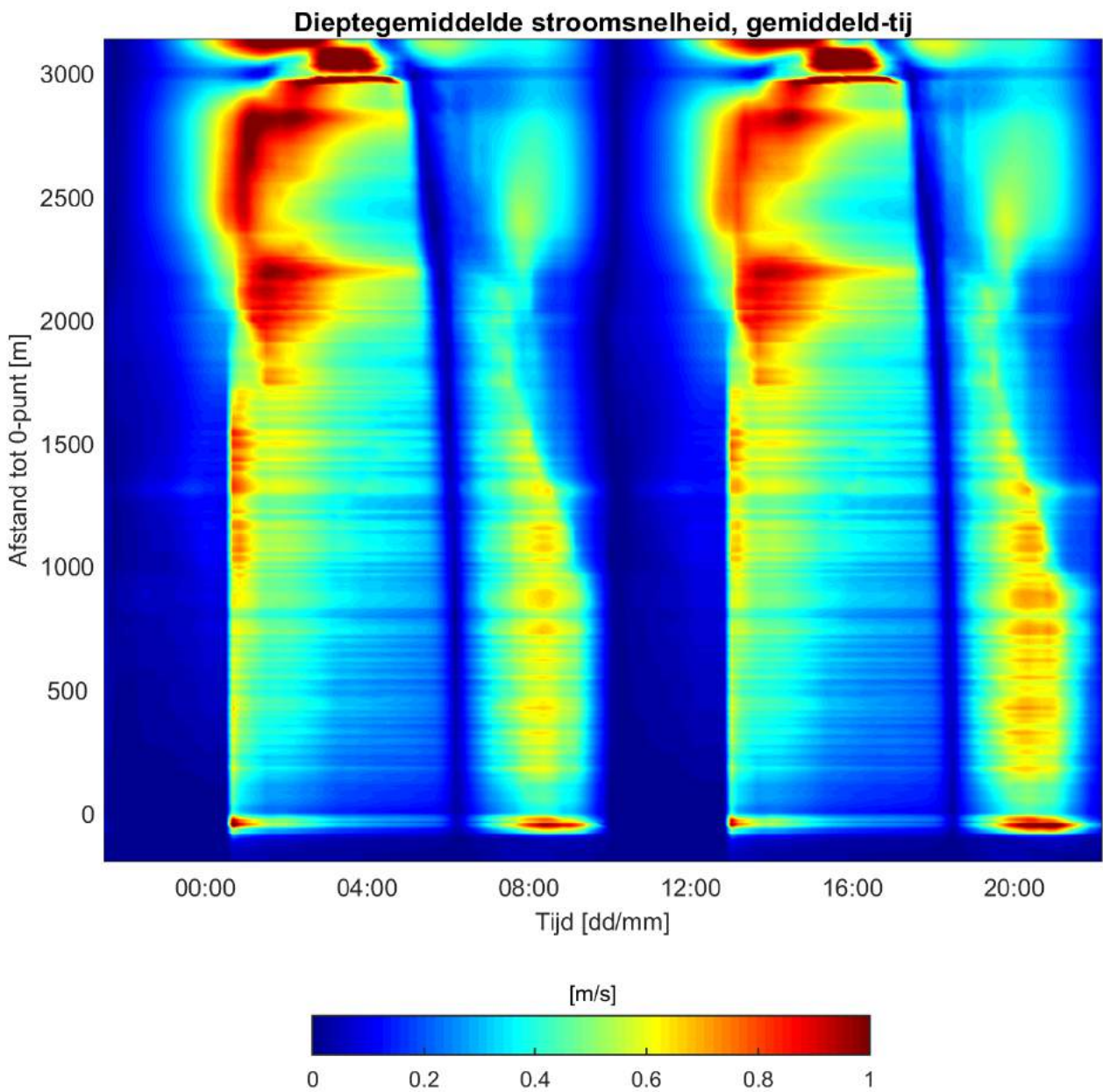
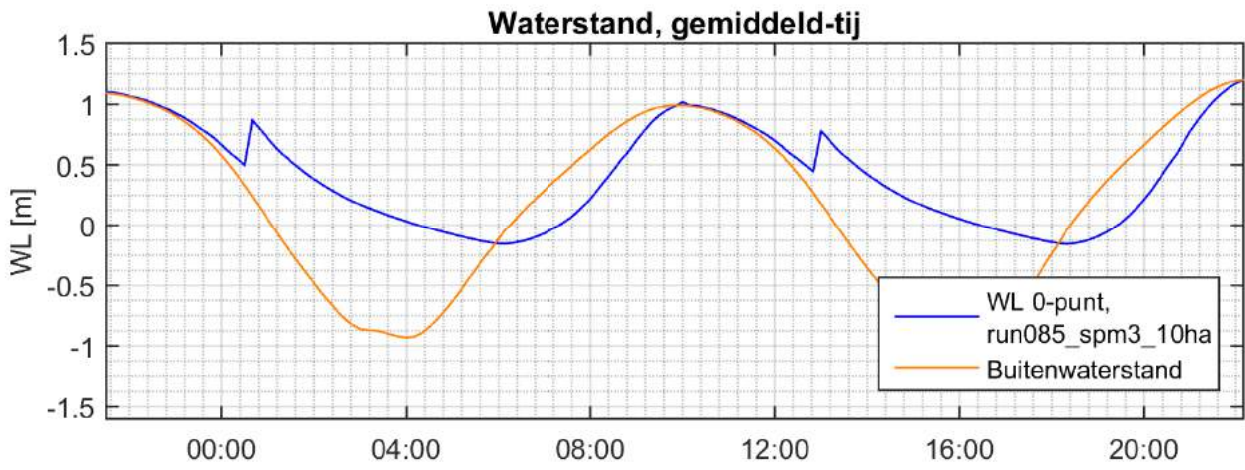
Delft3D

run150\_spm\_10ha

WP2016.1032

Noordpolderzijl

Figuur E1.12



Situatie run085\_spm3\_10ha, gemiddeld-tij  
25 - 26 Januari 2017

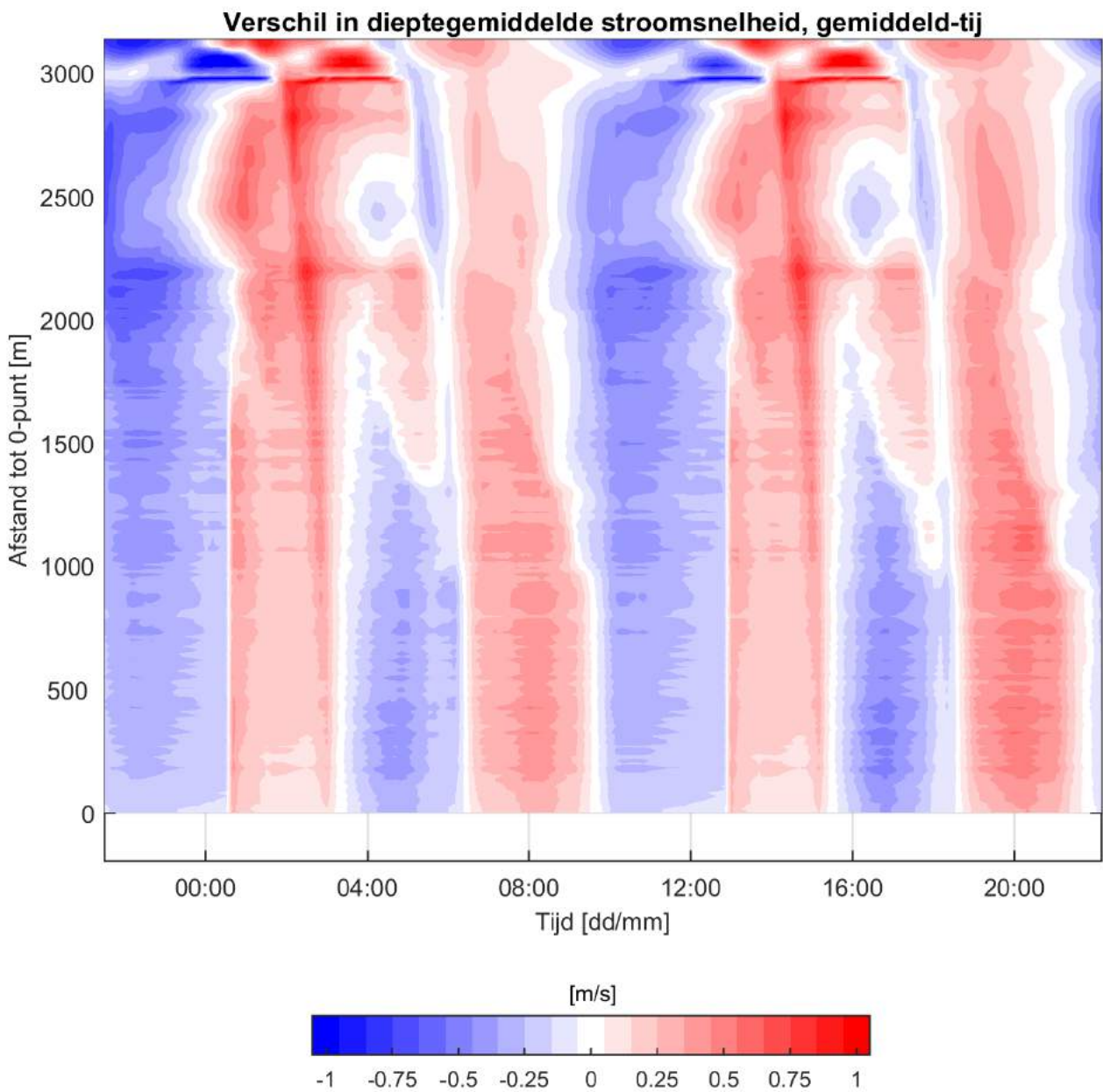
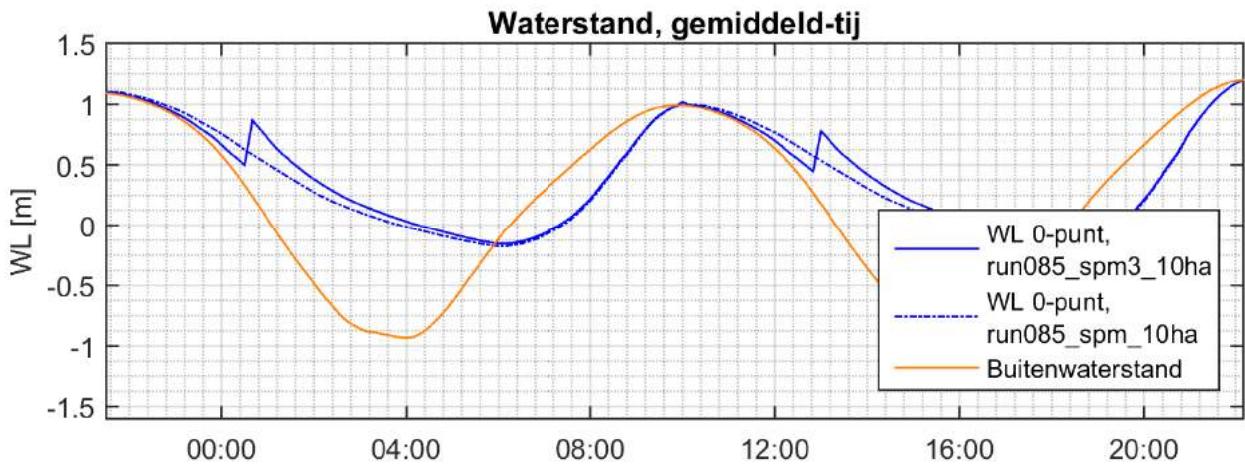
Delft3D

run085\_spm3  
10ha

WP2016.1032

Noordpolderzijl

Figuur E1.13



Verschil situatie run085\_spm3\_10ha met situatie run085\_spm\_10ha,  
gemiddeld-tij, 25 - 26 Januari 2017

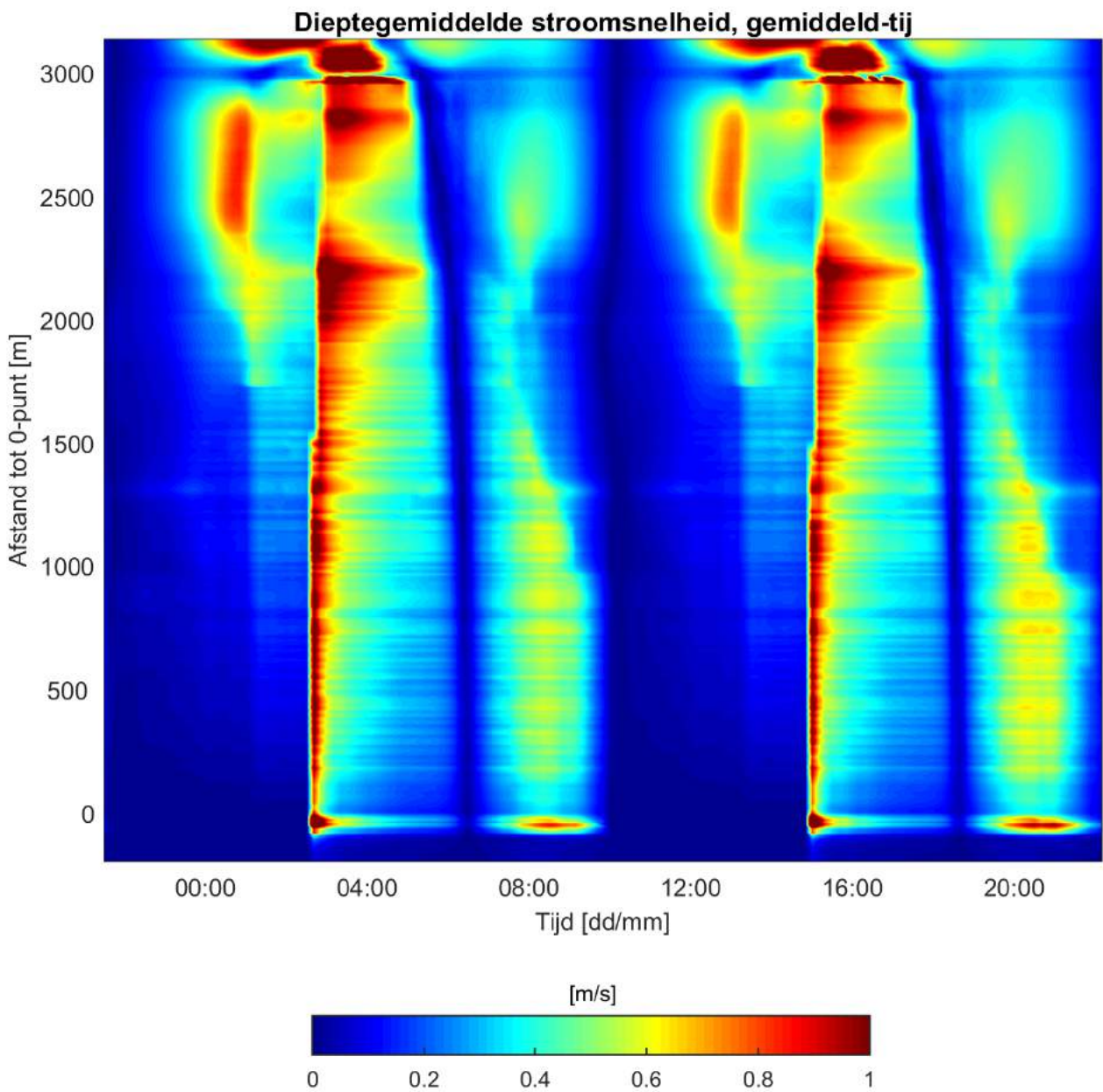
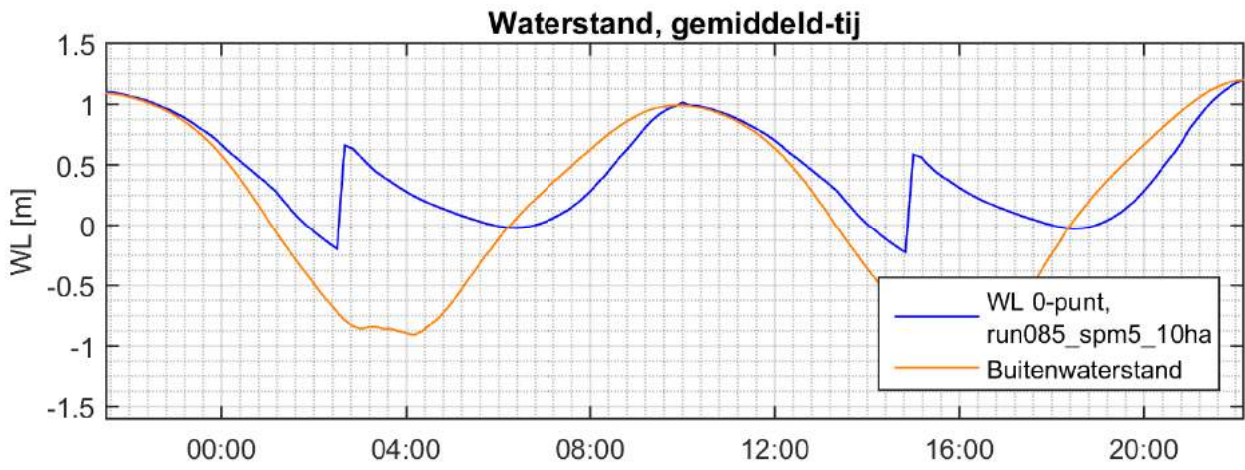
Delft3D

run085\_spm3  
10ha

WP2016.1032

Noordpolderzijl

Figuur E1.14



Situatie run085\_spm5\_10ha, gemiddeld-tij  
25 - 26 Januari 2017

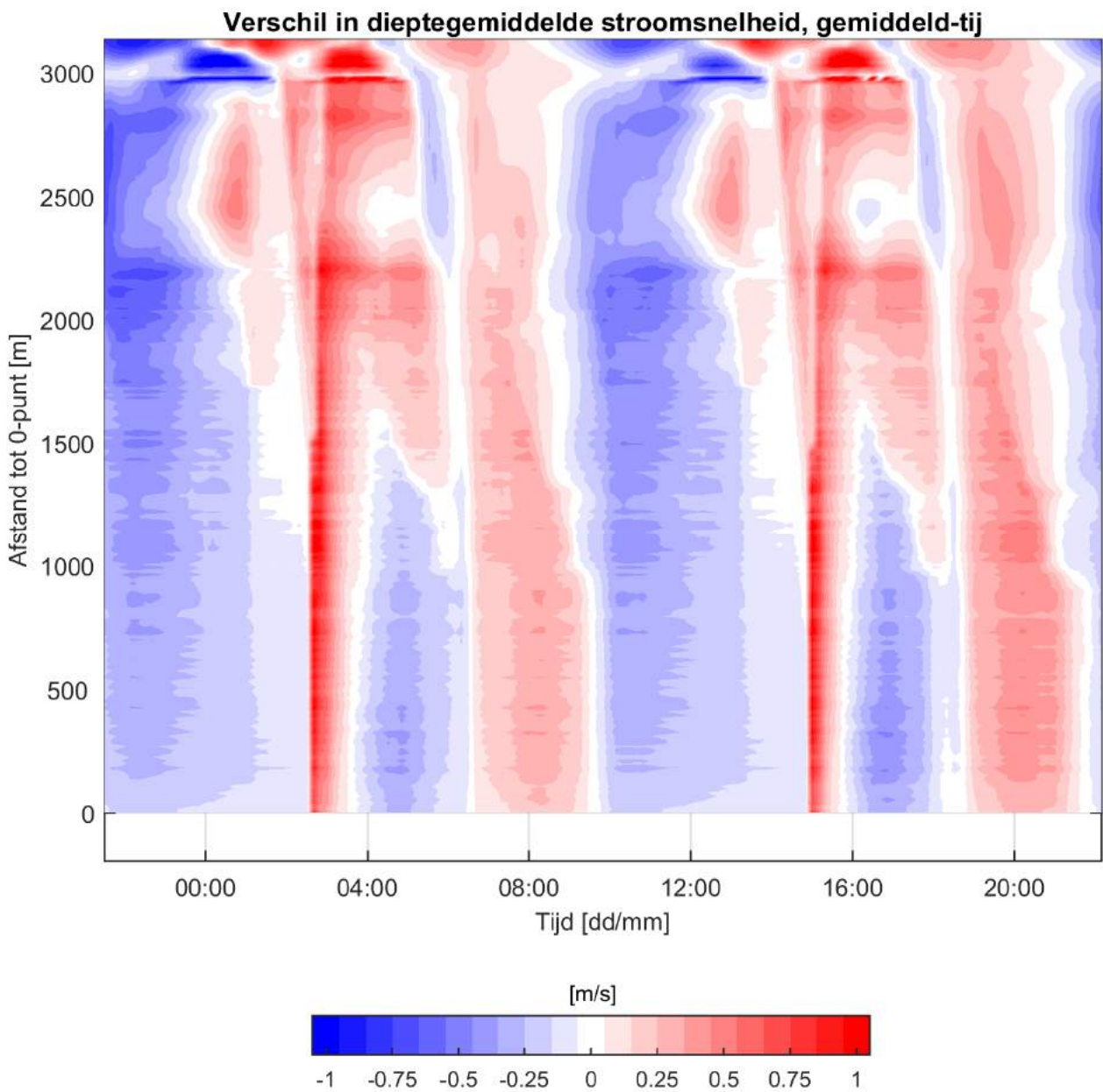
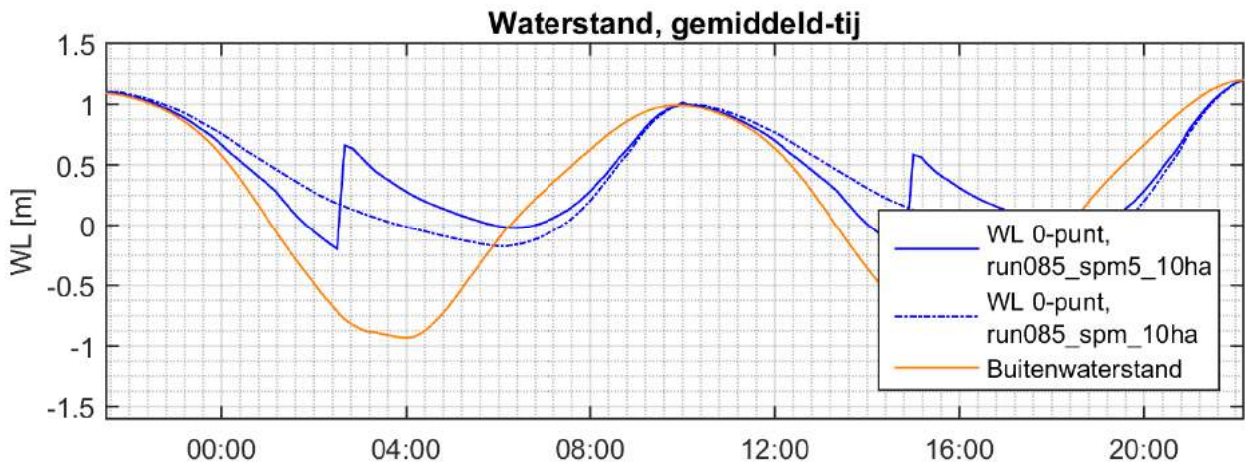
Delft3D

run085\_spm5  
10ha

WP2016.1032

Noordpolderzijl

Figuur E1.15



Verschil situatie run085\_spm5\_10ha met situatie run085\_spm\_10ha,  
gemiddeld-tij, 25 - 26 Januari 2017

Delft3D

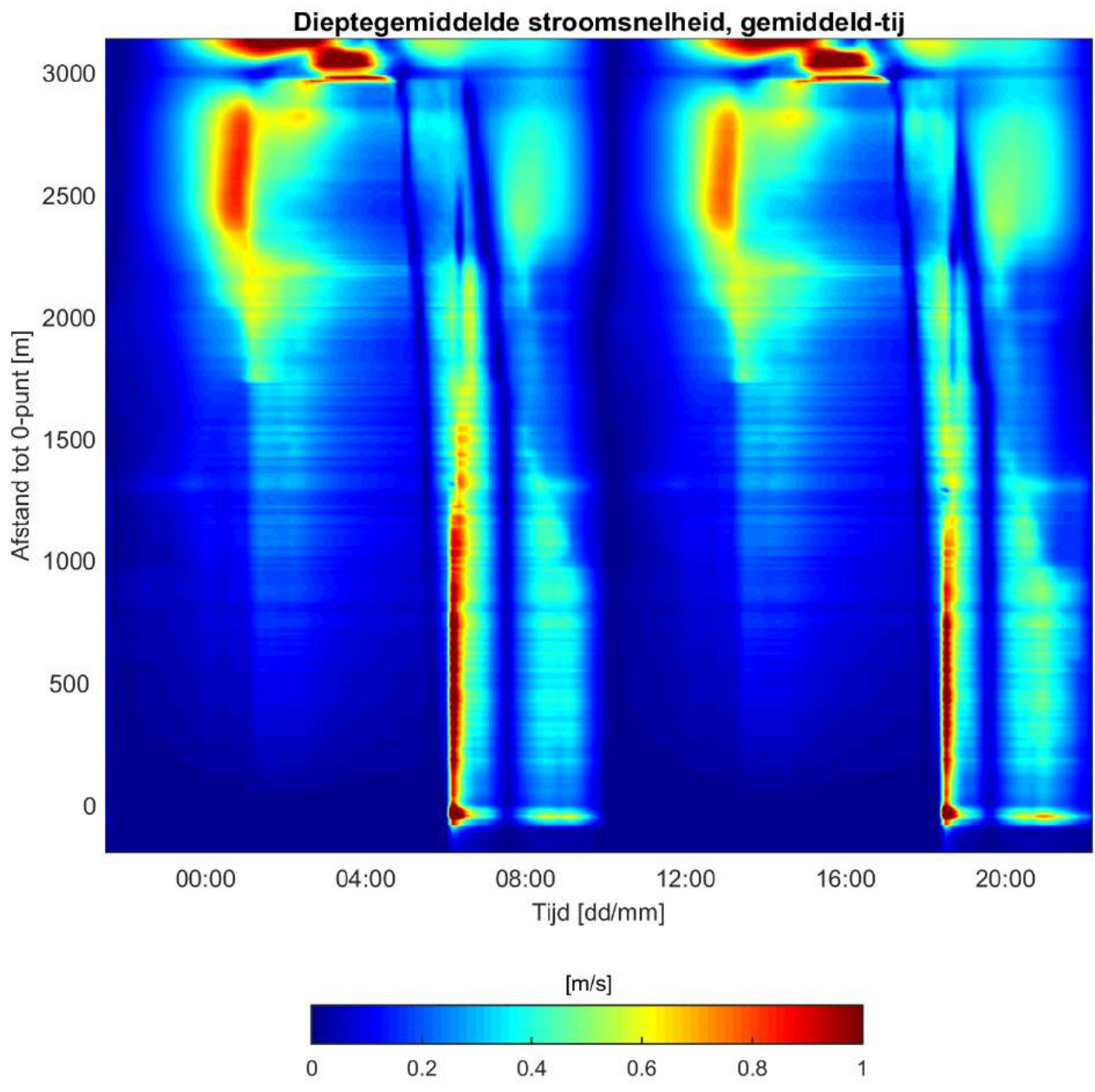
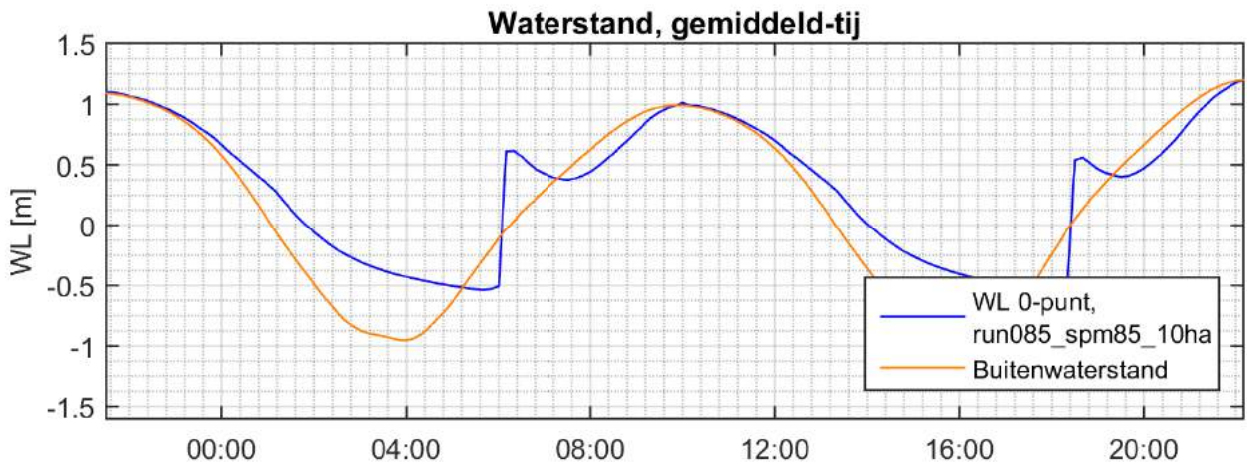
run085\_spm5  
10ha

WP2016.1032

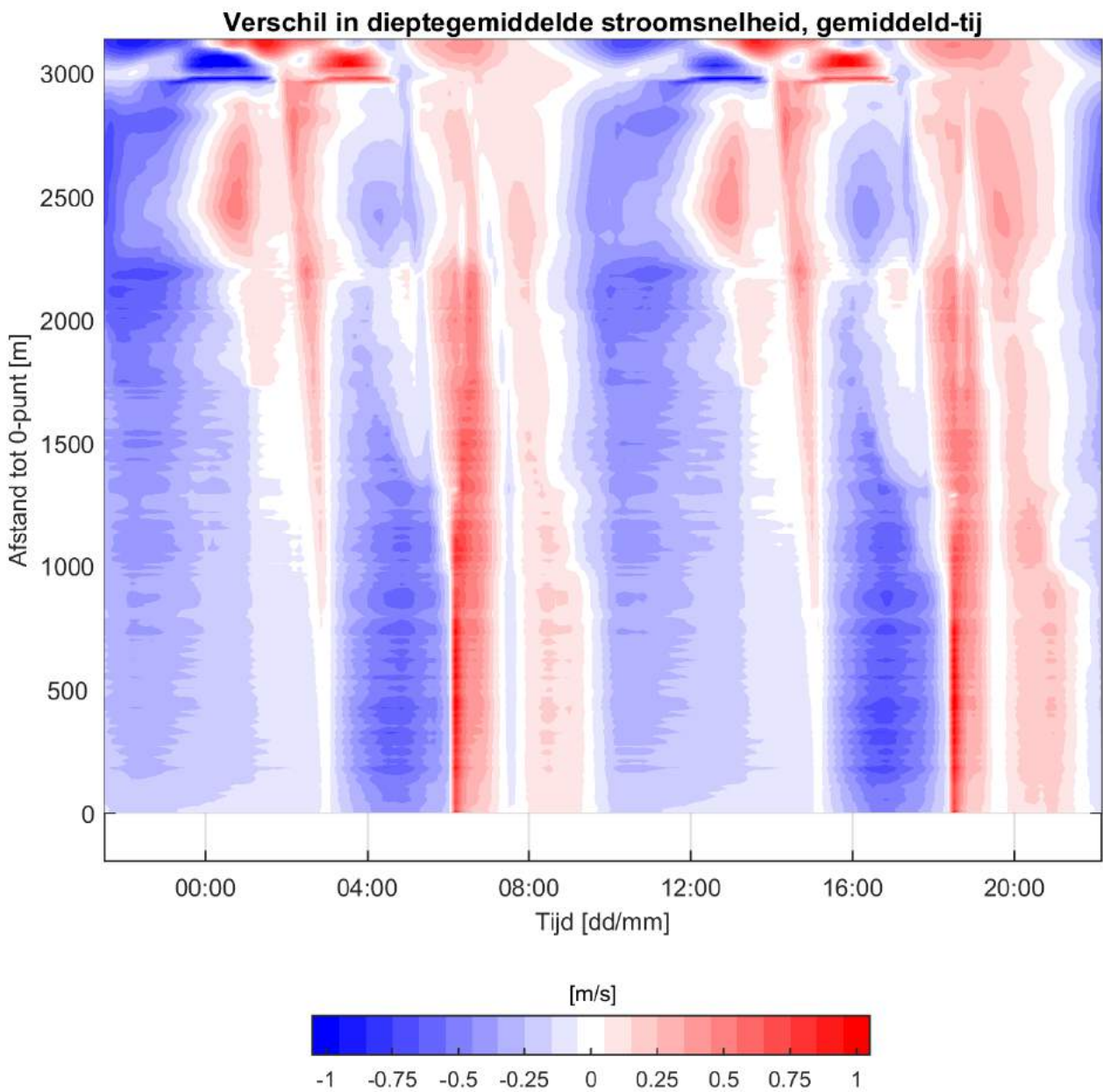
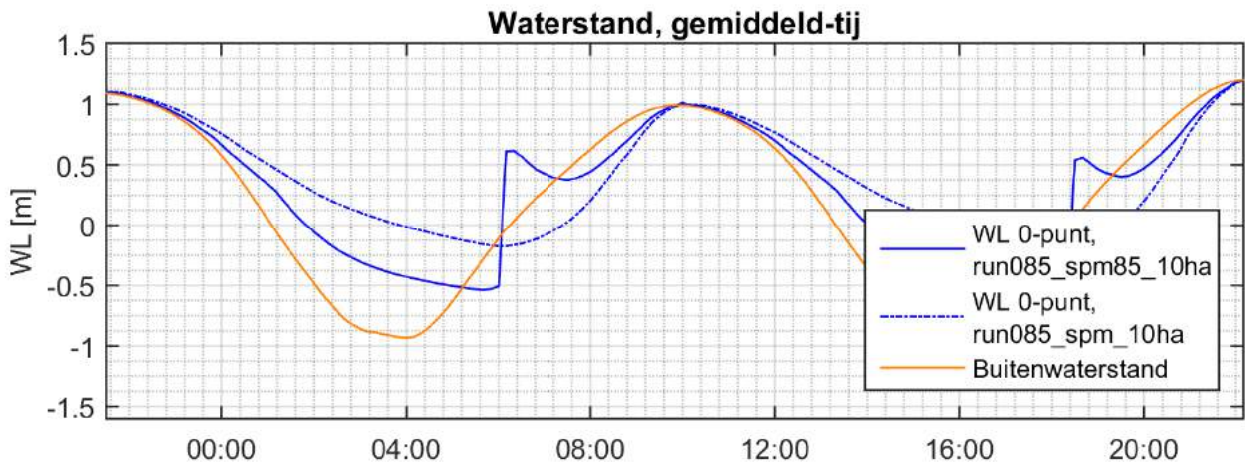
Noordpolderzijl

Figuur E1.16





|   |             |                      |
|---|-------------|----------------------|
| Situatie run085_spm85_10ha, gemiddeld-tij<br>25 - 26 Januari 2017 | Delft3D     | run085_spm85<br>10ha |
|   | WP2016.1032 |                      |
| Noordpolderzijl   |             | Figuur E1.17         |



Verschil situatie run085\_spm85\_10ha met situatie run085\_spm\_10ha,  
gemiddeld-tij, 25 - 26 Januari 2017

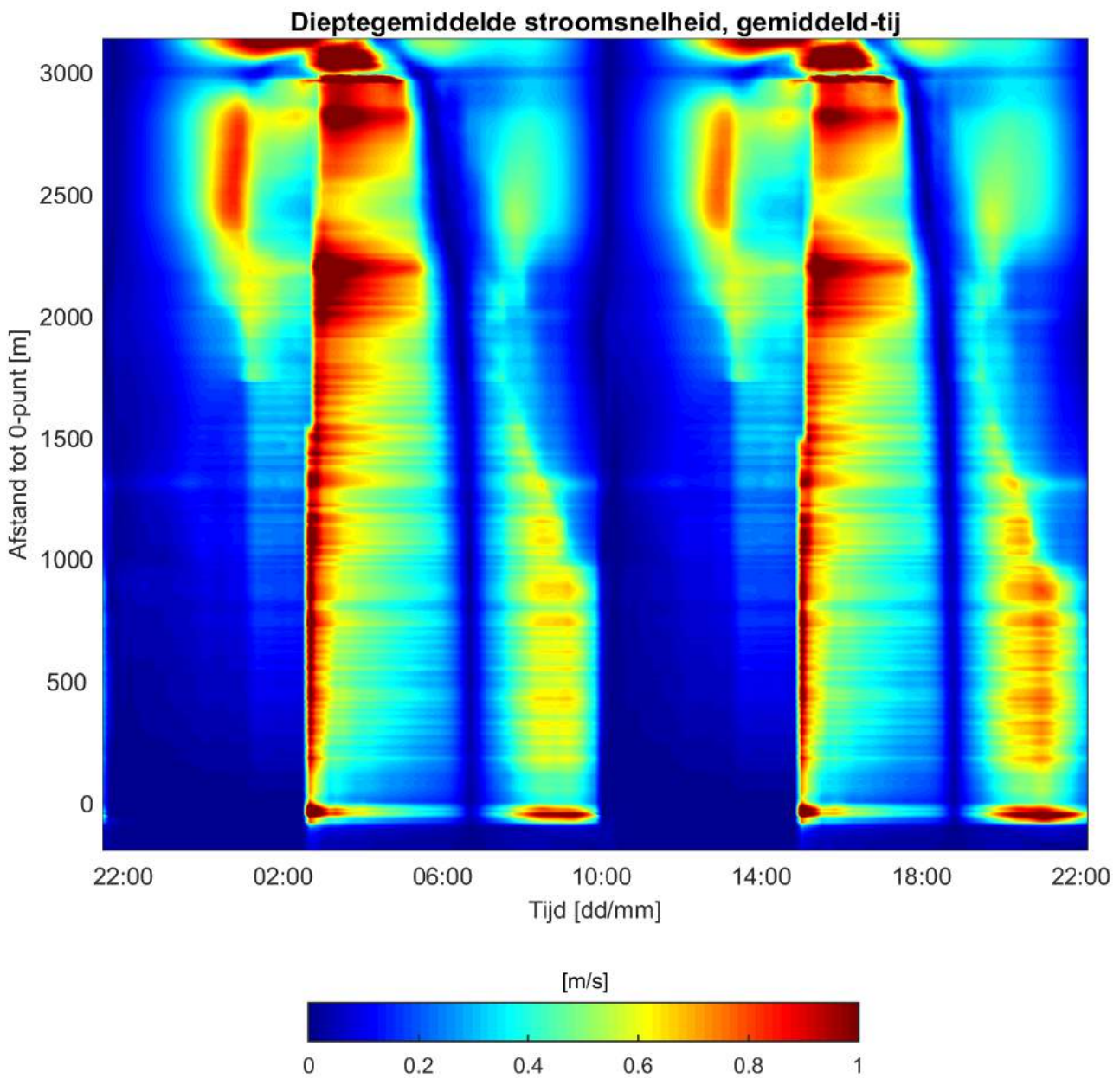
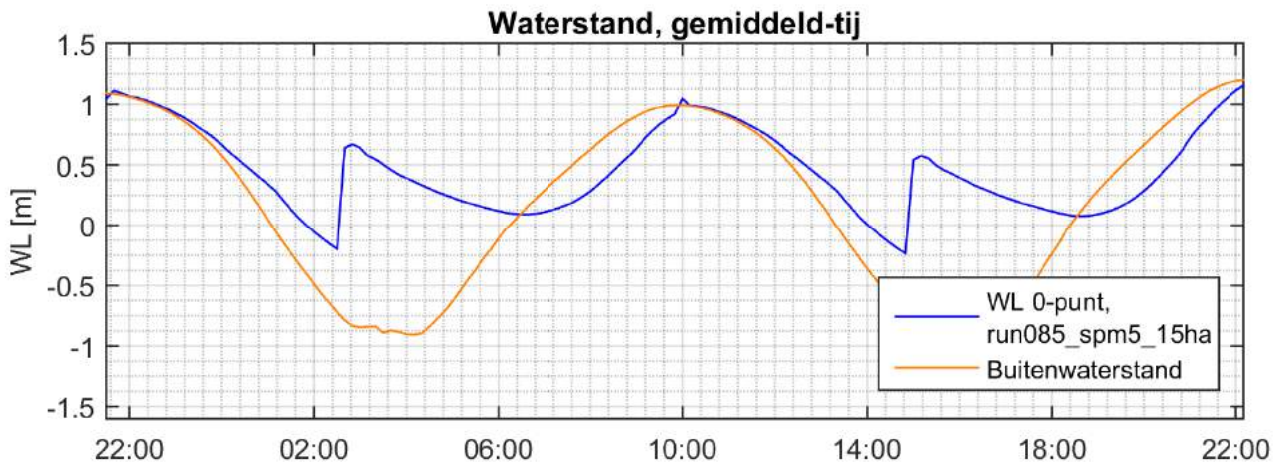
Delft3D

run085\_spm85\_10ha

WP2016.1032

Noordpolderzijl

Figuur E1.18



Situatie run085\_spm5\_15ha, gemiddeld-tij  
25 - 26 Januari 2017

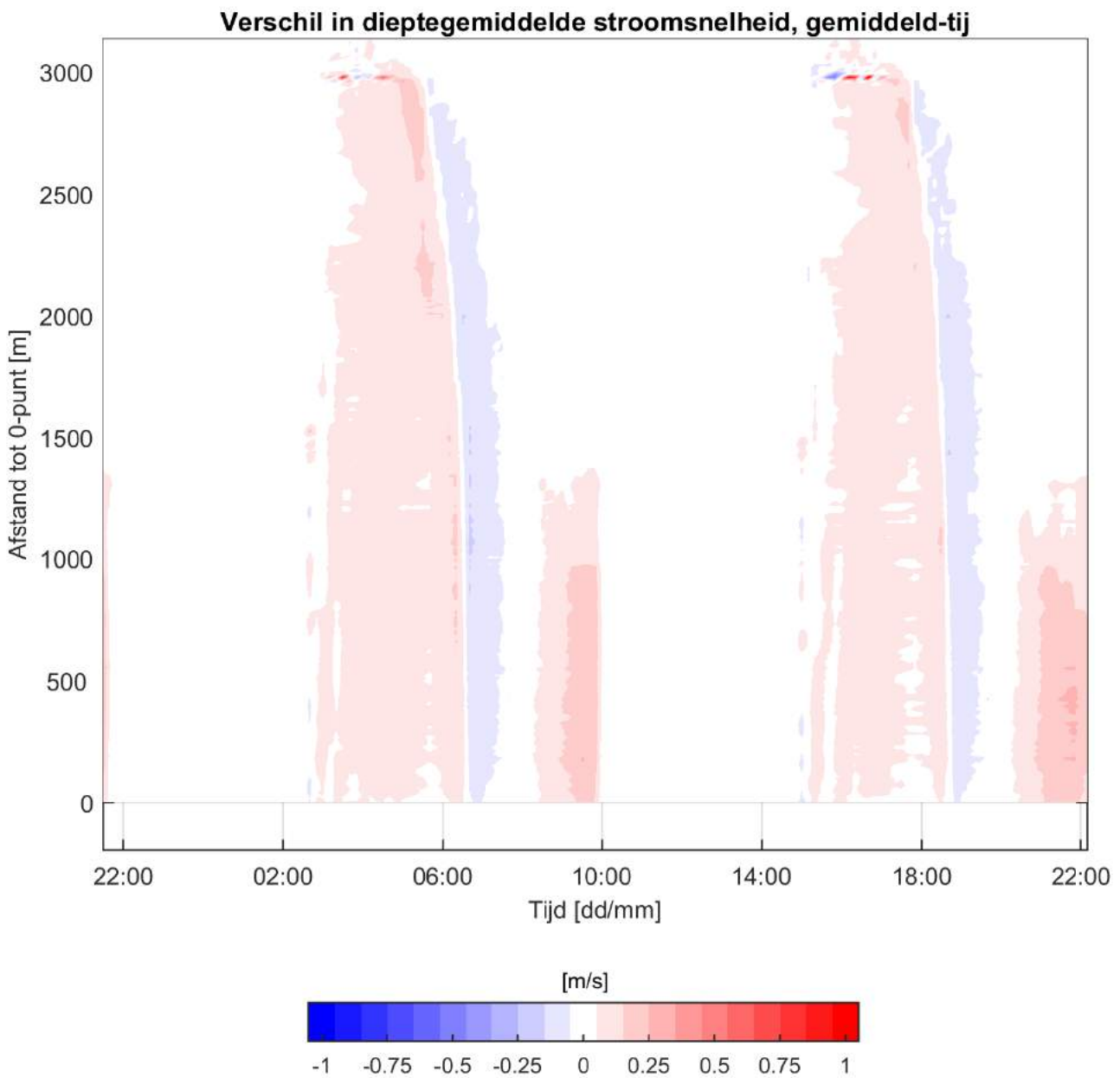
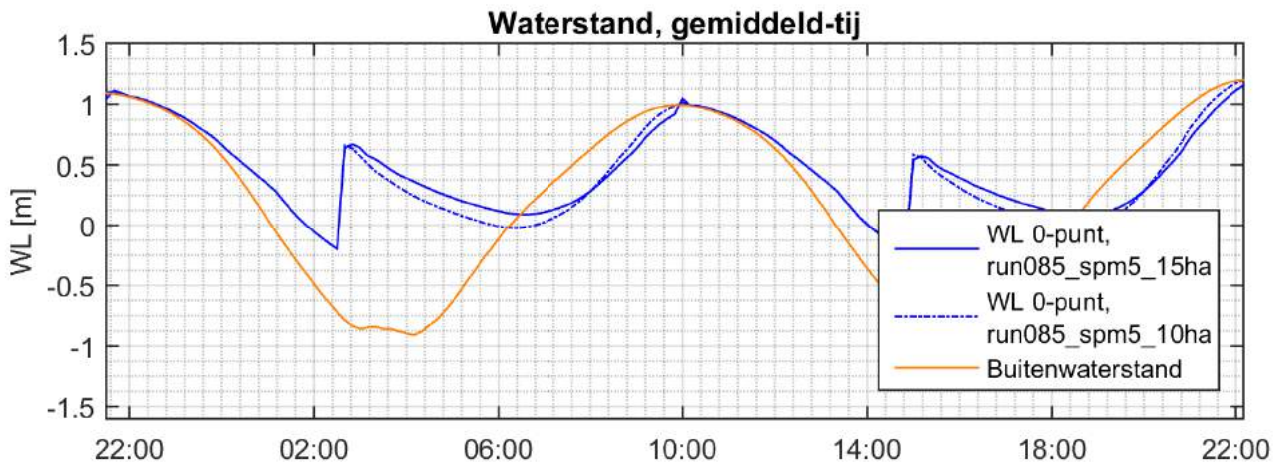
Delft3D

run085\_spm5  
15ha

WP2016.1032

Noordpolderzijl

Figuur E1.19



Verschil situatie run085\_spm5\_15ha met situatie run085\_spm5\_10ha,  
gemiddeld-tij, 25 - 26 Januari 2017

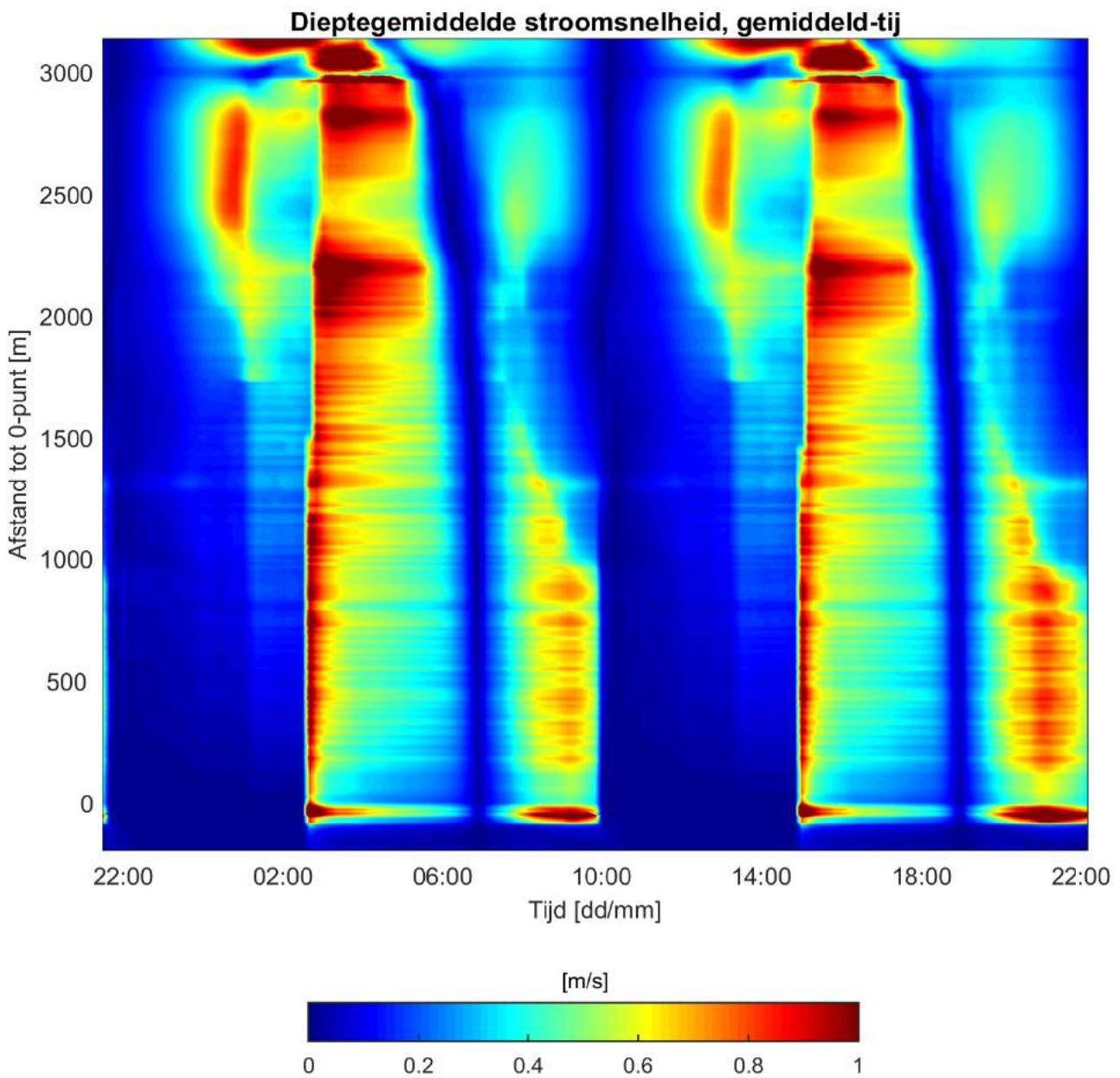
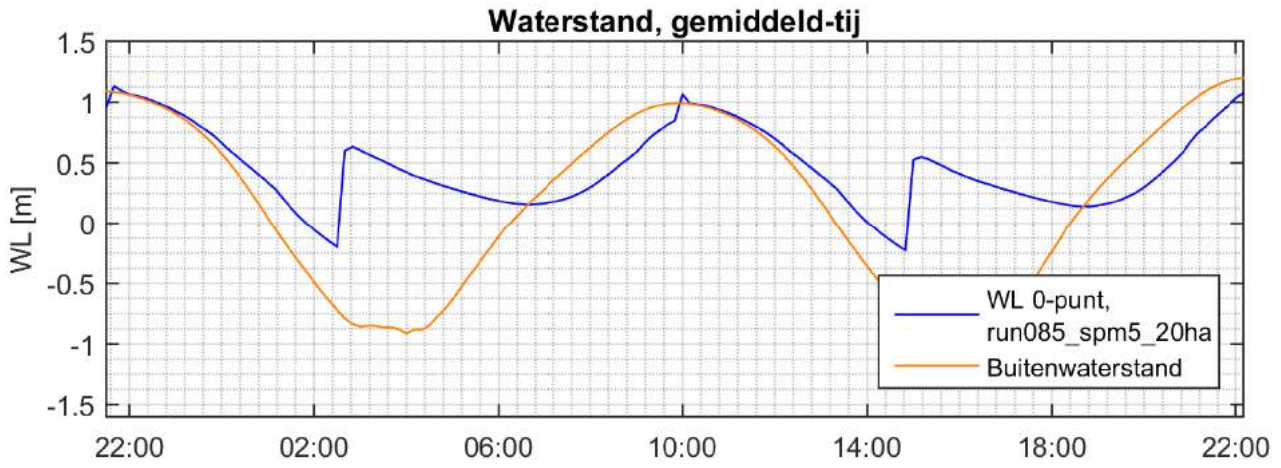
Delft3D

run085\_spm5  
15ha

WP2016.1032

Noordpolderzijl

Figuur E1.20



Situatie run085\_spm5\_20ha, gemiddeld-tij  
25 - 26 Januari 2017

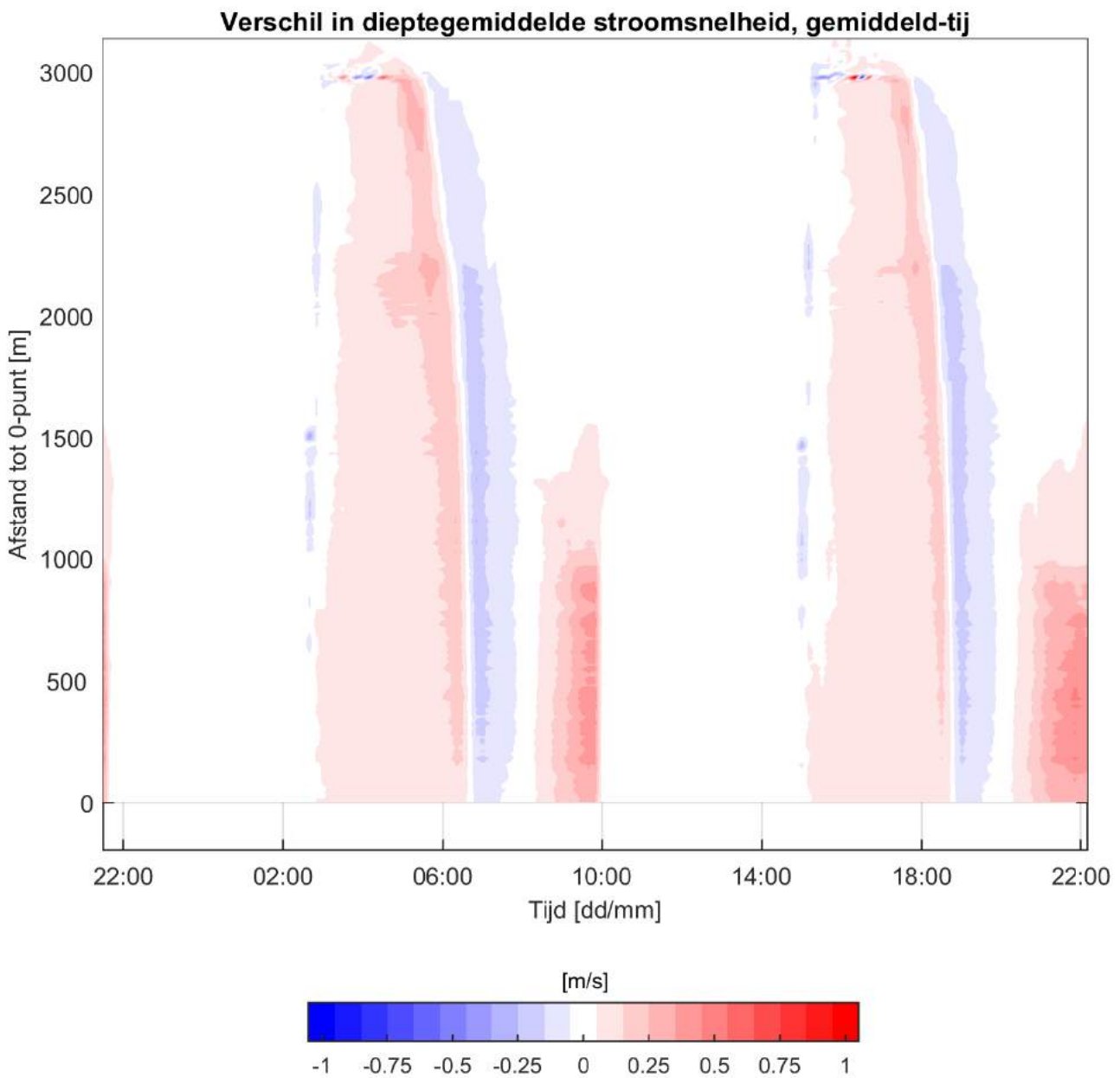
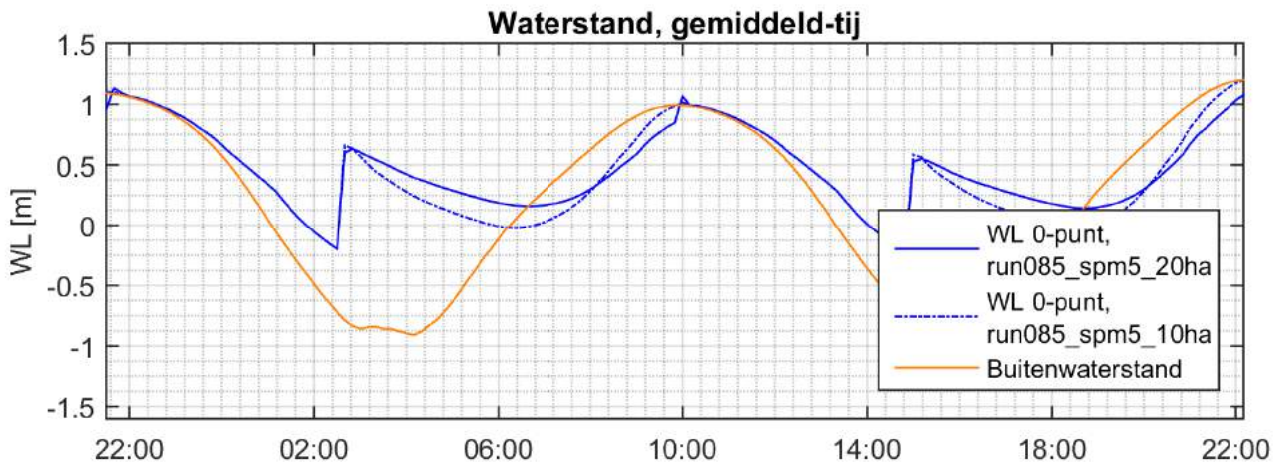
Delft3D

run085\_spm5  
20ha

WP2016.1032

Noordpolderzijl

Figuur E1.21



Verschil situatie run085\_spm5\_20ha met situatie run085\_spm5\_10ha,  
gemiddeld-tij, 25 - 26 Januari 2017

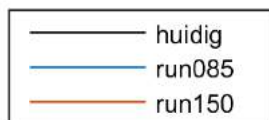
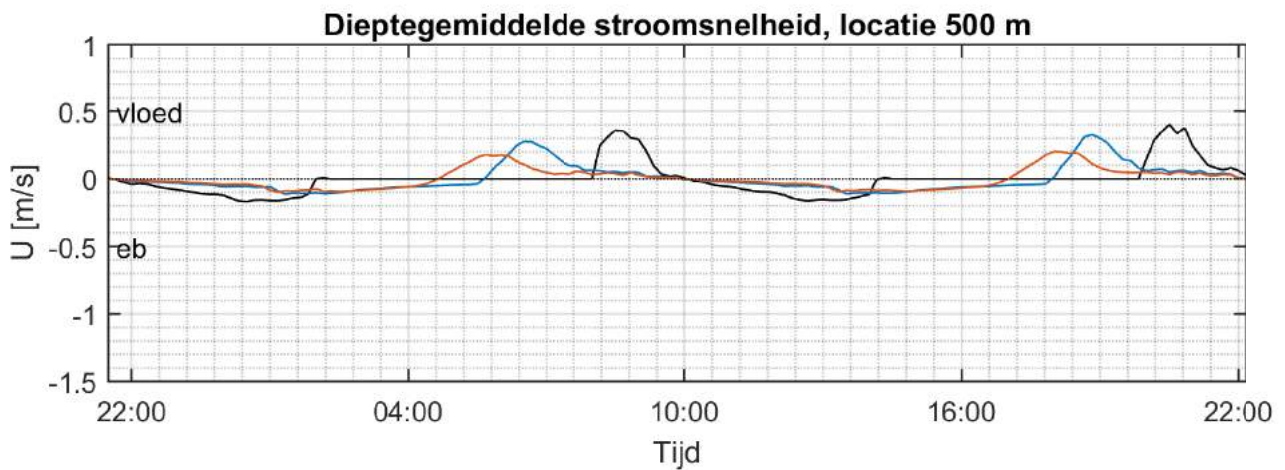
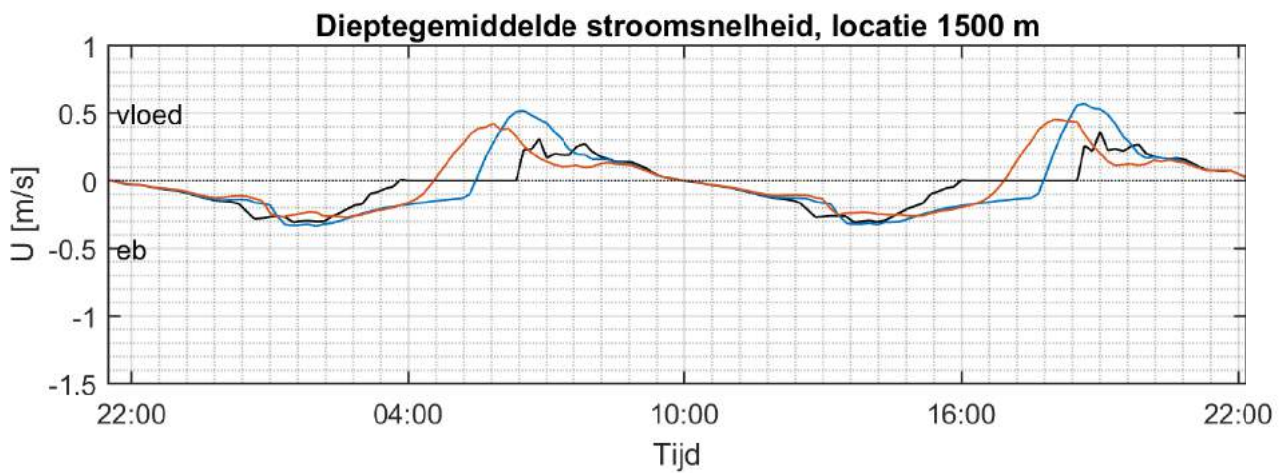
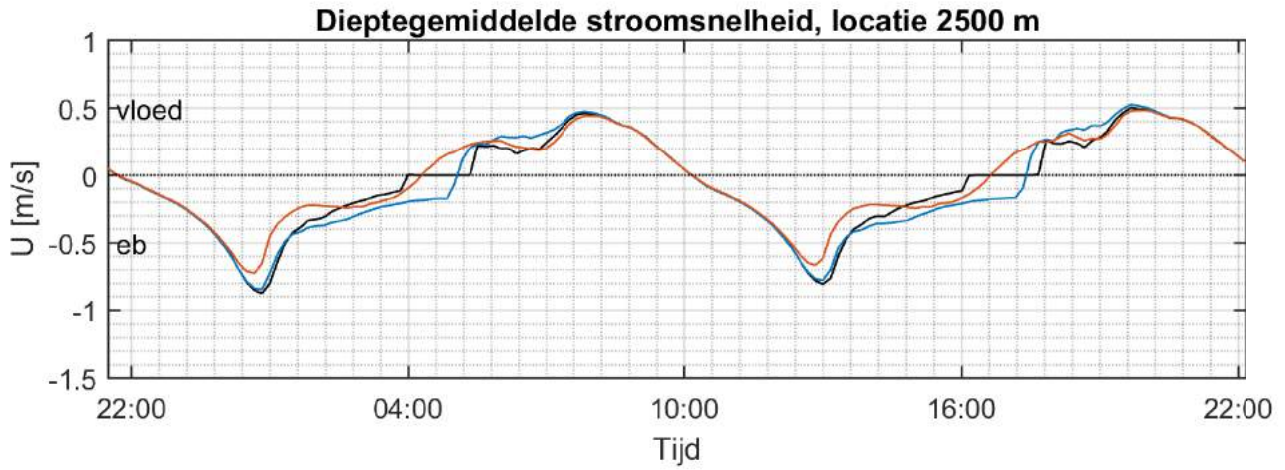
Delft3D

run085\_spm5  
20ha

WP2016.1032

Noordpolderzijl

Figuur E1.22



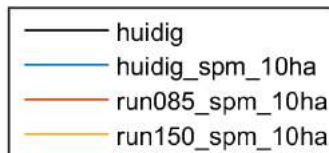
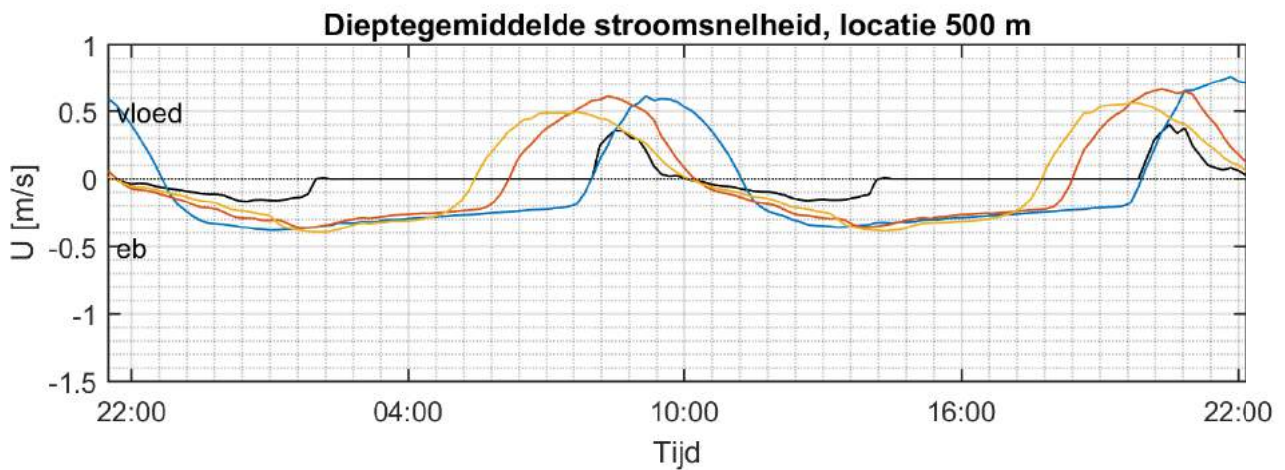
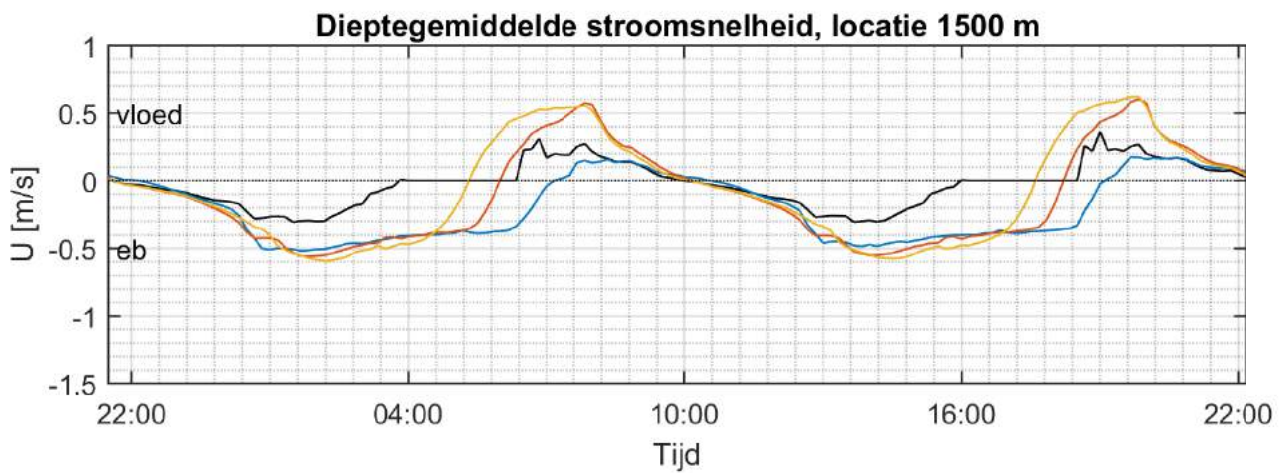
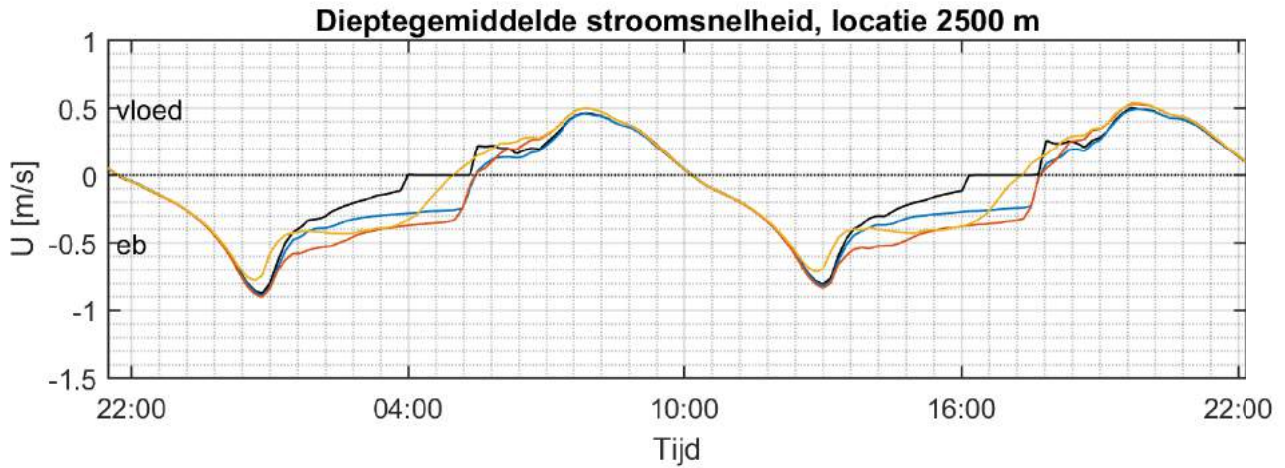
Dieptegemiddelde stroomsnelheid vergelijking 1, gemiddeld-tij  
25 January 2017 - 26 January 2017

Delft3D

WP2016.1032

Noordpolderzijl

Figuur E2.01



Dieptegemiddelde stroomsnelheid vergelijking 2, gemiddeld-tij  
25 January 2017 - 26 January 2017

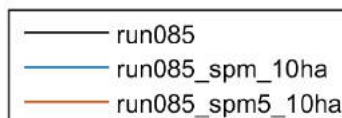
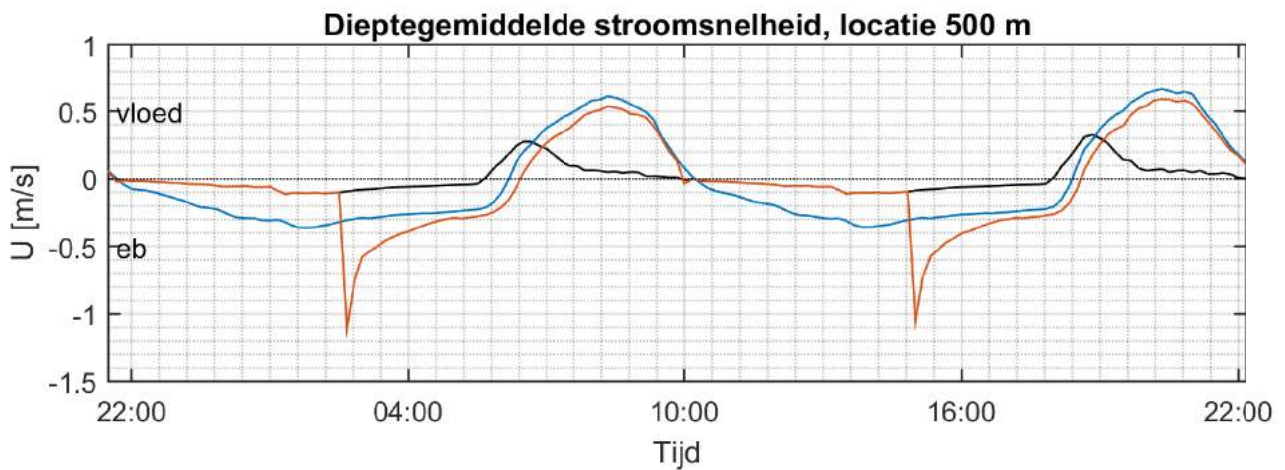
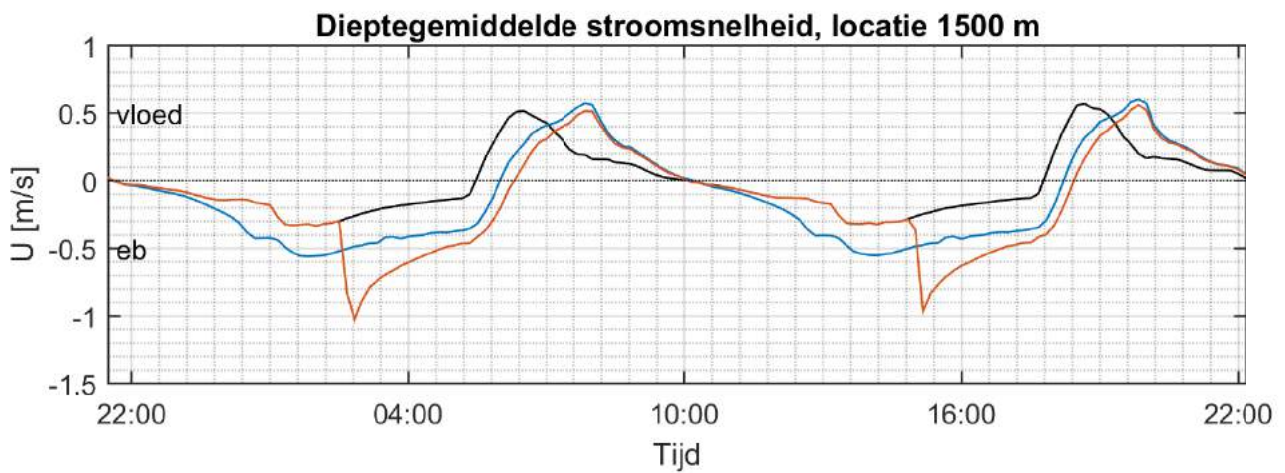
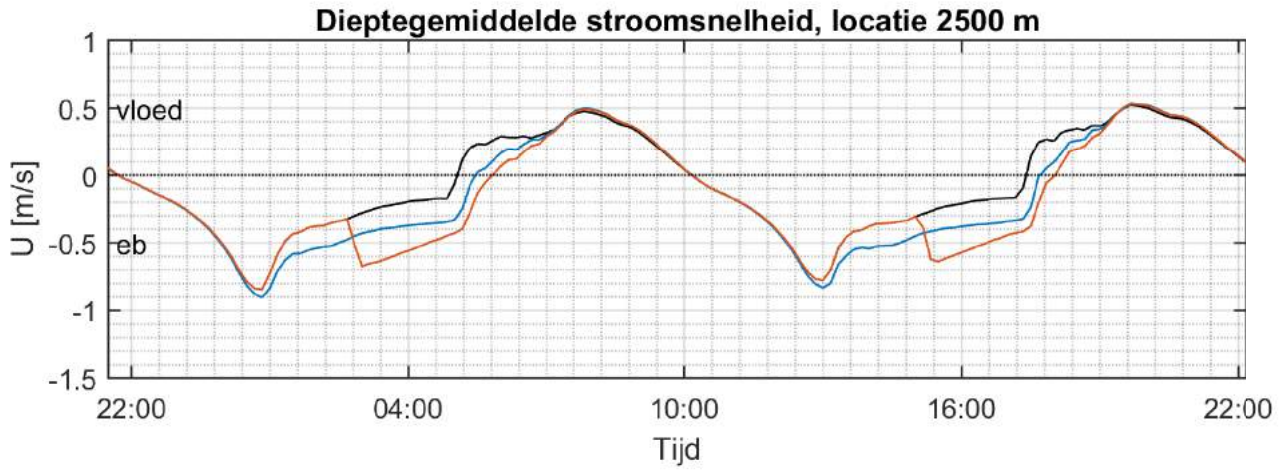
Delft3D

WP2016.1032

Noordpolderzijl

Figuur E2.02





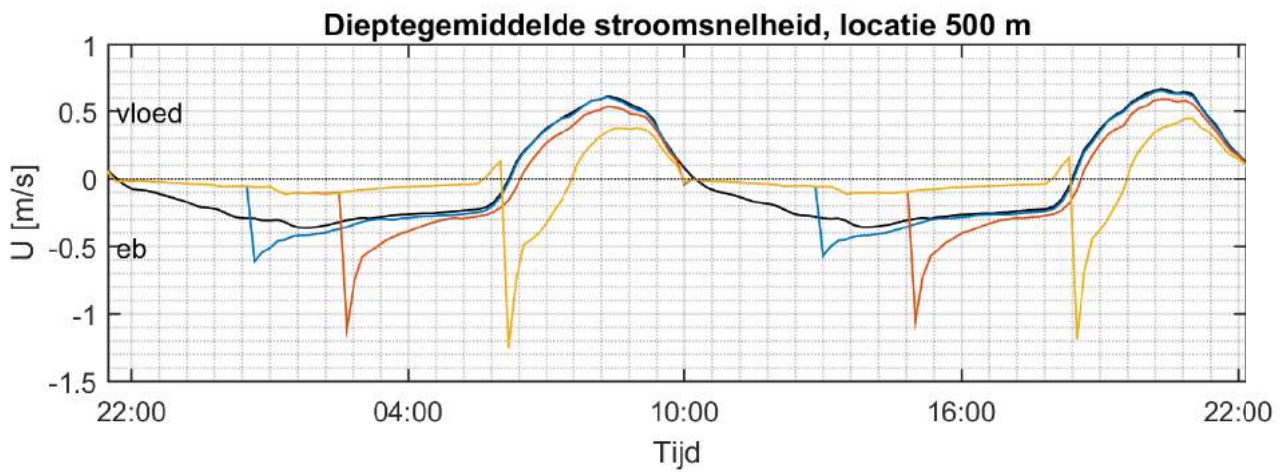
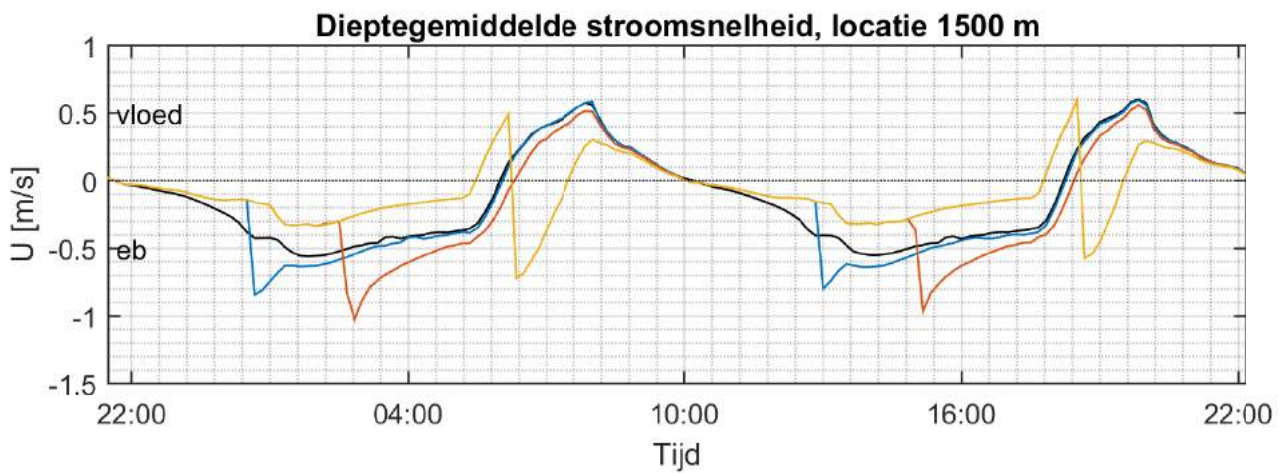
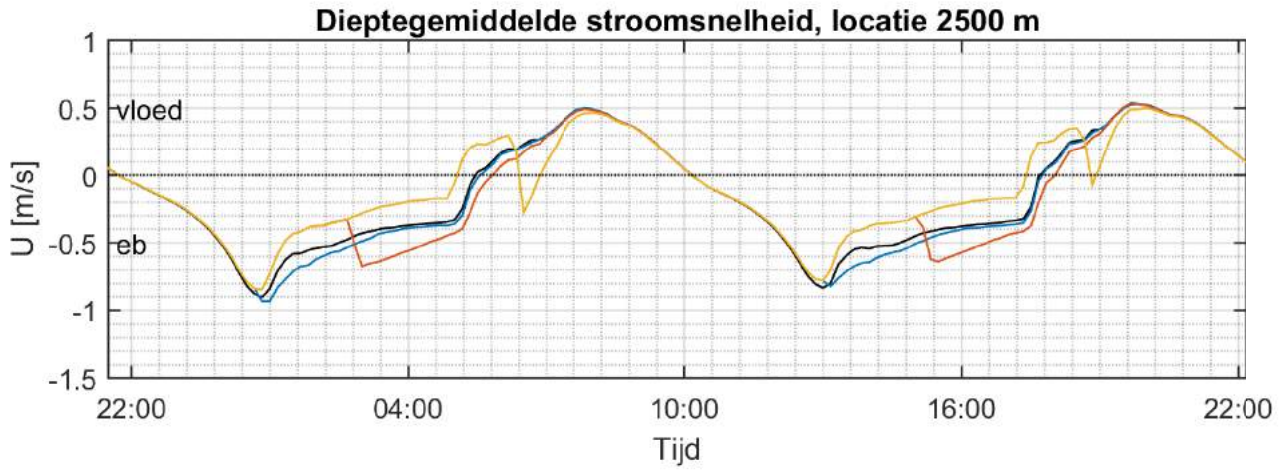
Dieptegemiddelde stroomsnelheid vergelijking 3, gemiddeld-tij  
25 January 2017 - 26 January 2017

Delft3D

WP2016.1032

Noordpolderzijl

Figuur E2.03



- run085\_spm\_10ha
- run085\_spm3\_10ha
- run085\_spm5\_10ha
- run085\_spm85\_10ha

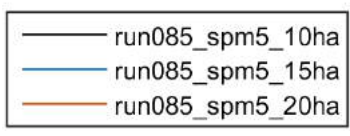
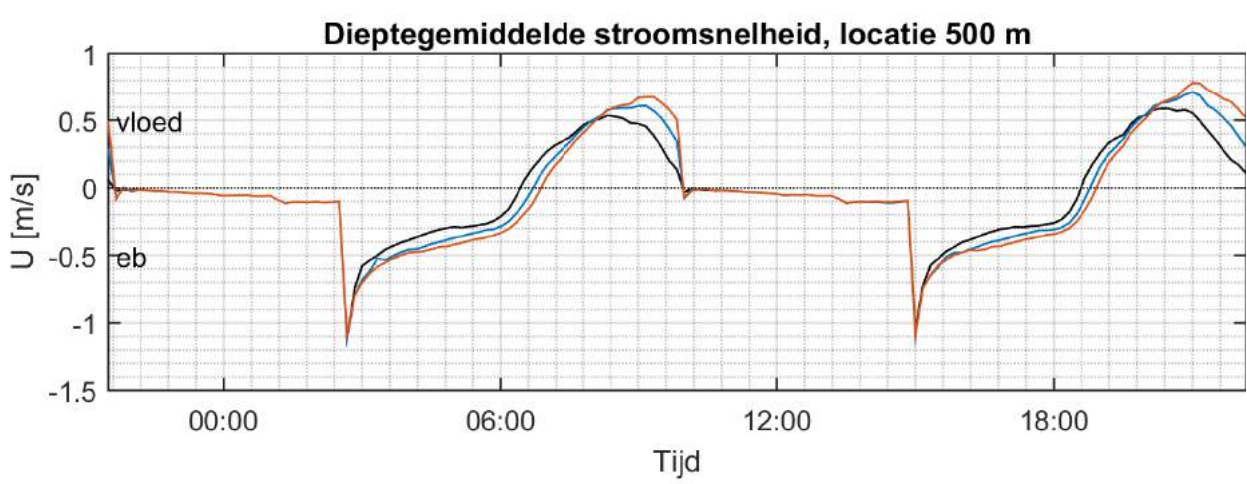
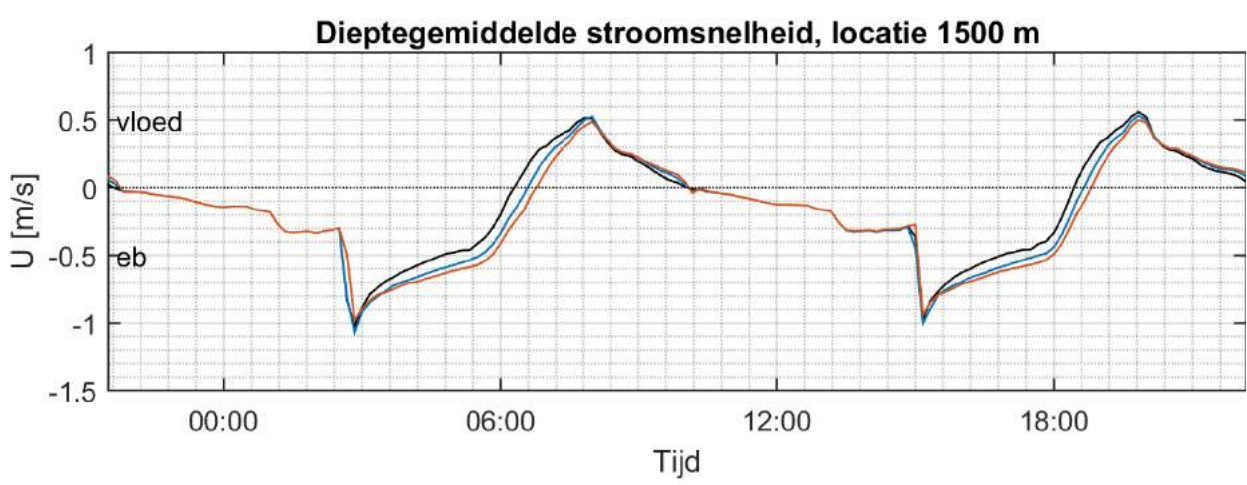
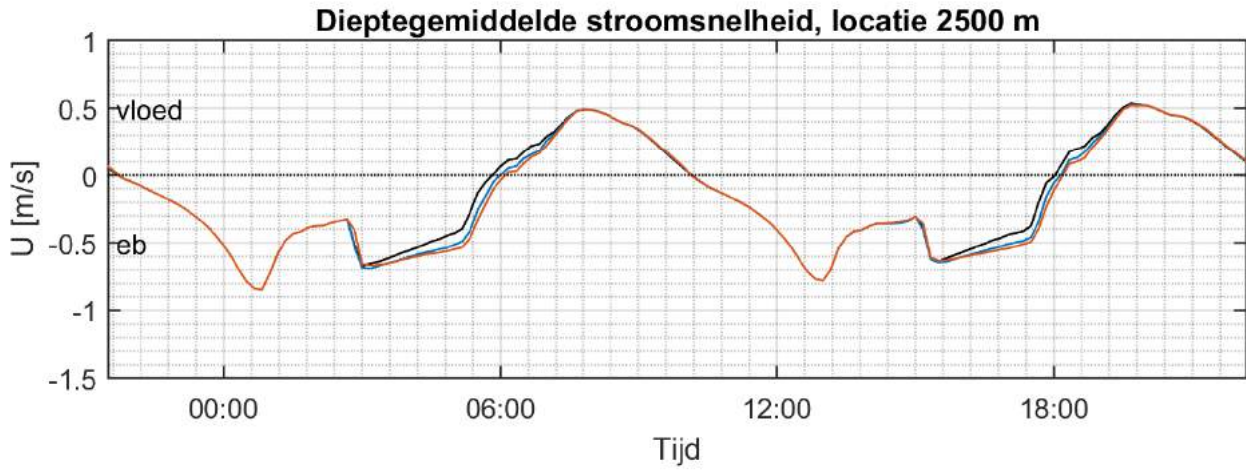
Dieptegemiddelde stroomsnelheid vergelijking 4, gemiddeld-tij  
25 January 2017 - 26 January 2017

Delft3D

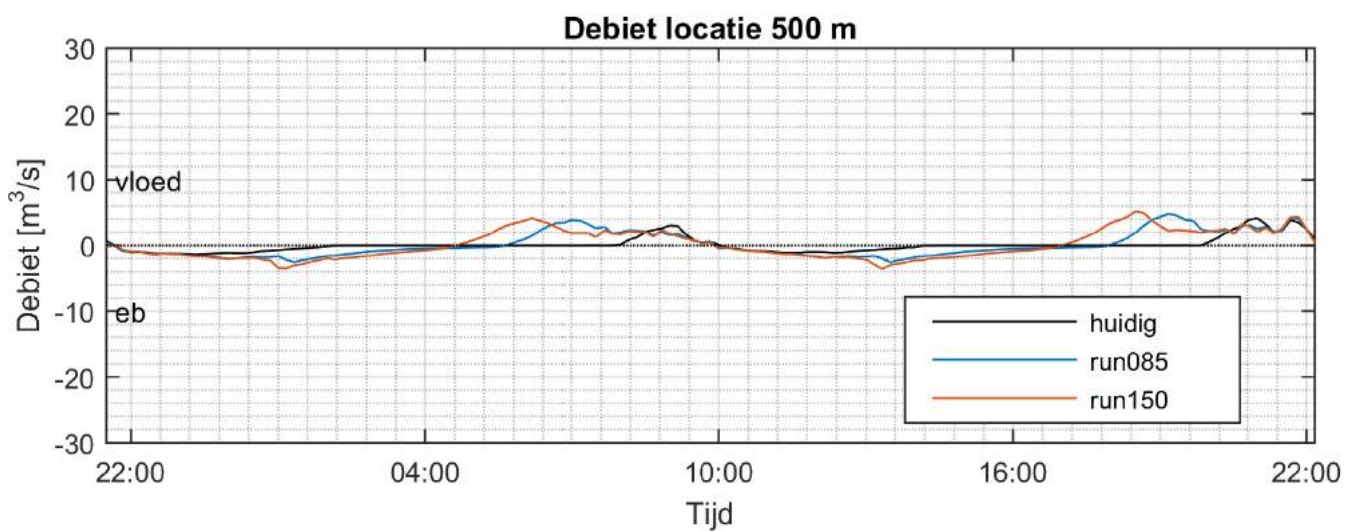
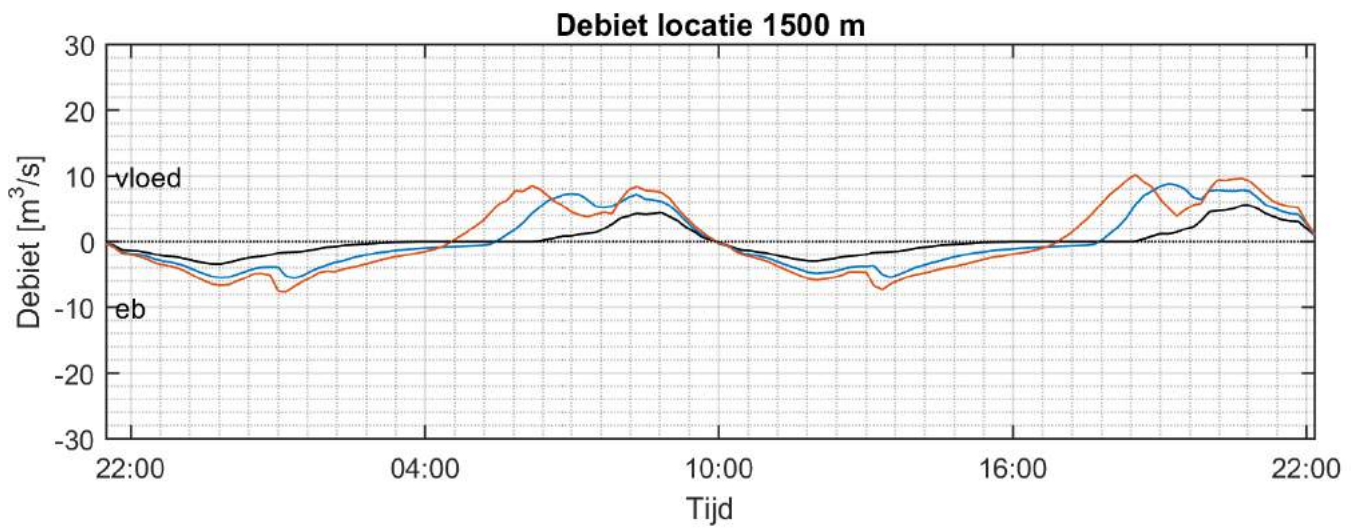
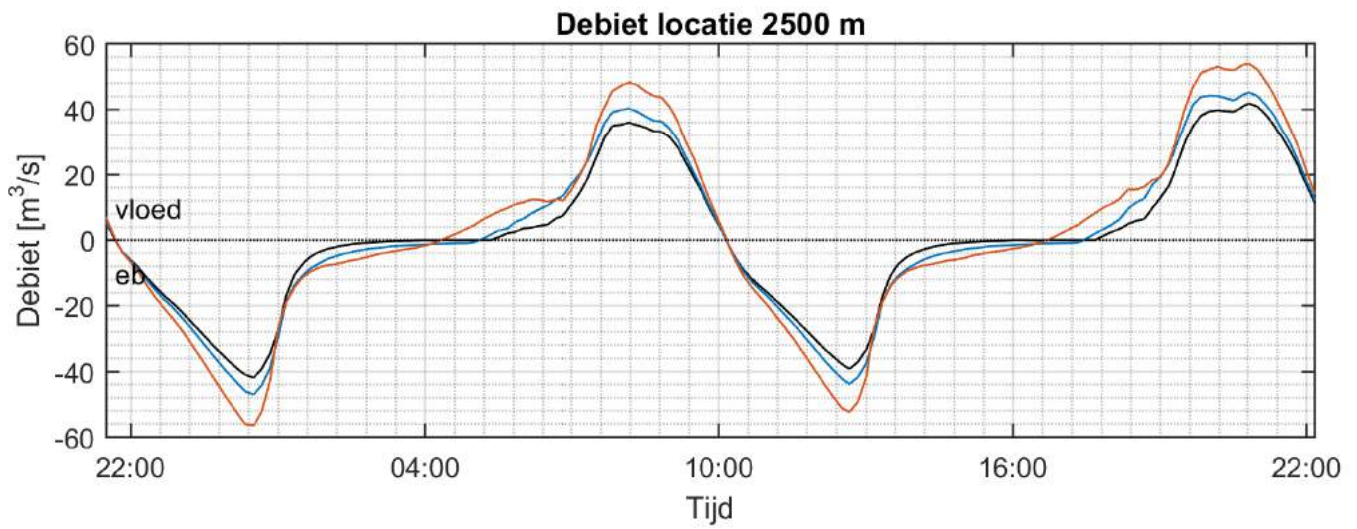
WP2016.1032

Noordpolderzijl

Figuur E2.04



|  |             |              |
|--|-------------|--------------|
| Dieptegemiddelde stroomsnelheid vergelijking 5, gemiddeld-tij<br>25 January 2017 - 26 January 2017 | Delft3D     |              |
|  | WP2016.1032 |              |
| Noordpolderzijl  |             | Figuur E2.05 |



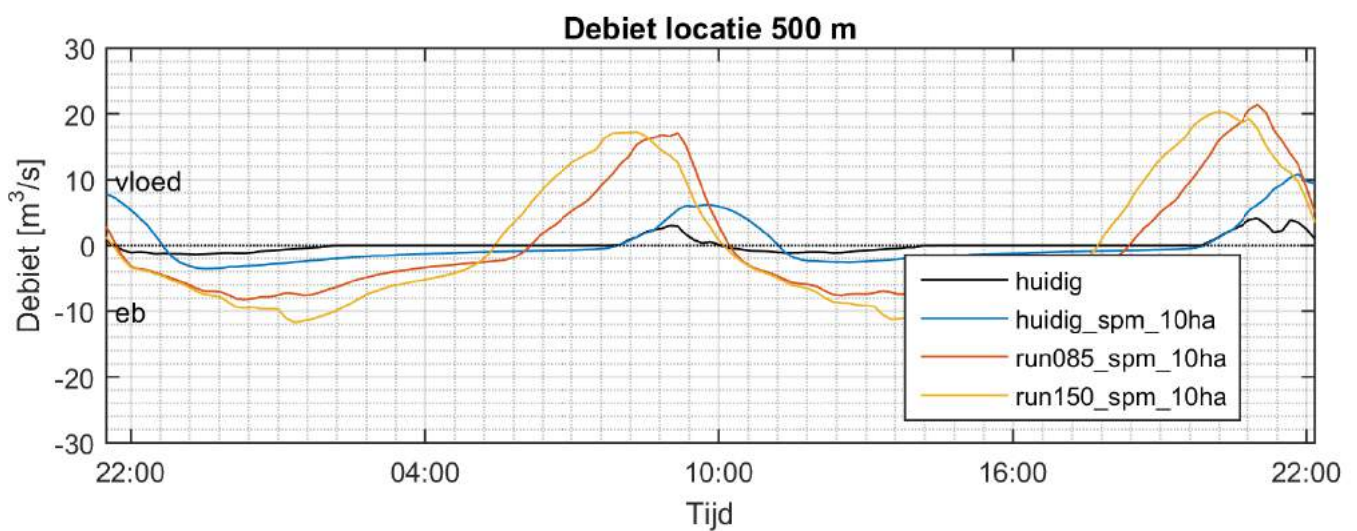
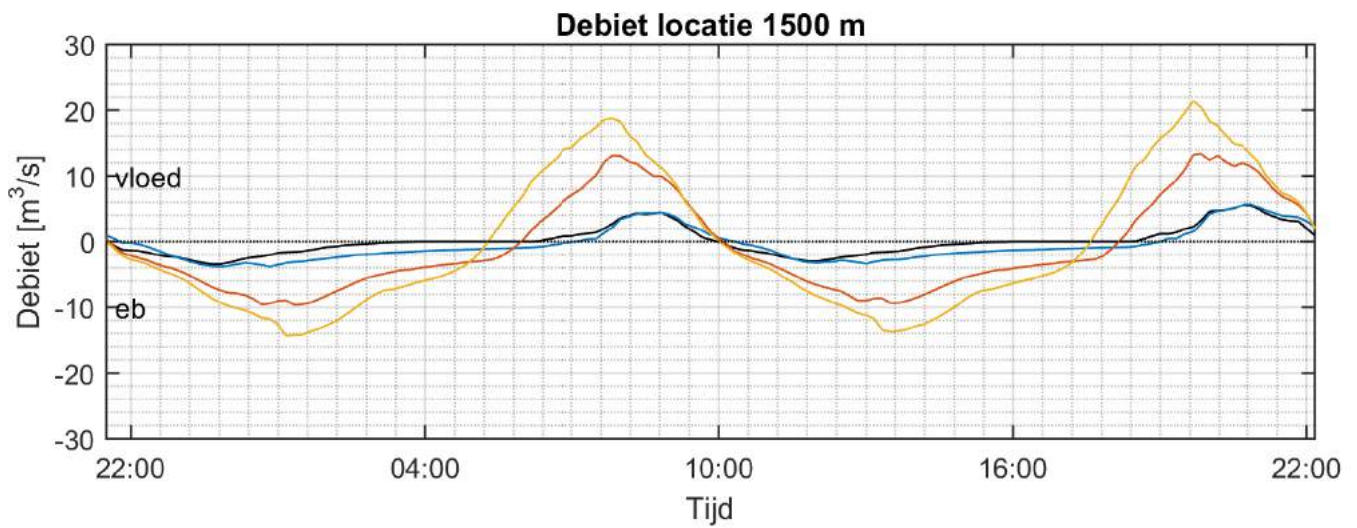
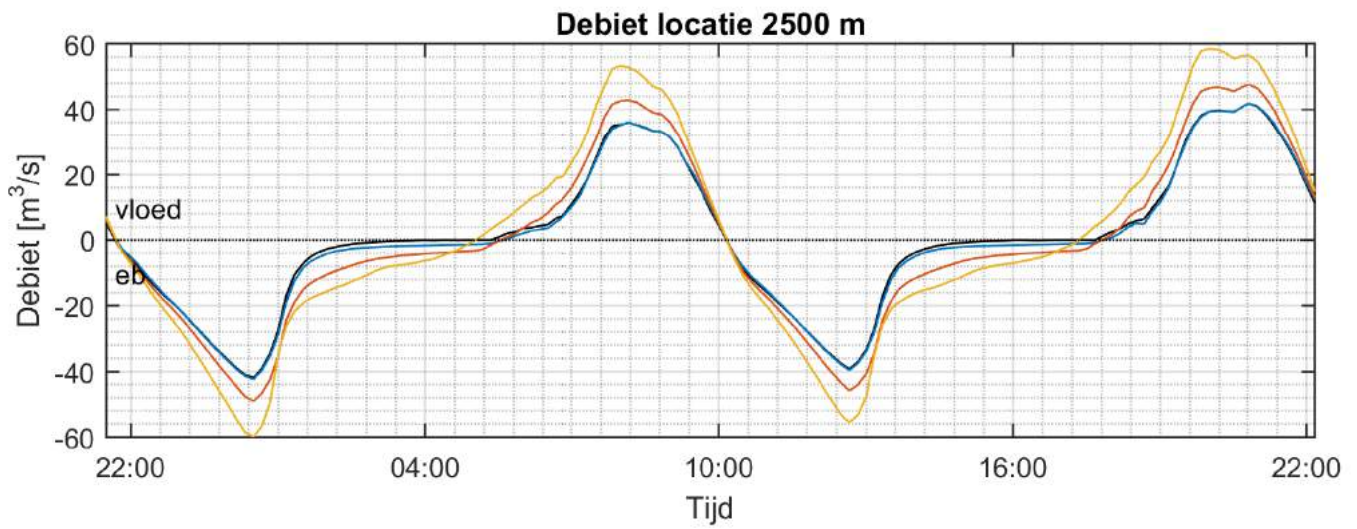
Debiet vergelijking 1, gemiddeld-tij  
25 January 2017 - 26 January 2017

Delft3D

WP2016.1032

Noordpolderzijl

Figuur E2.06



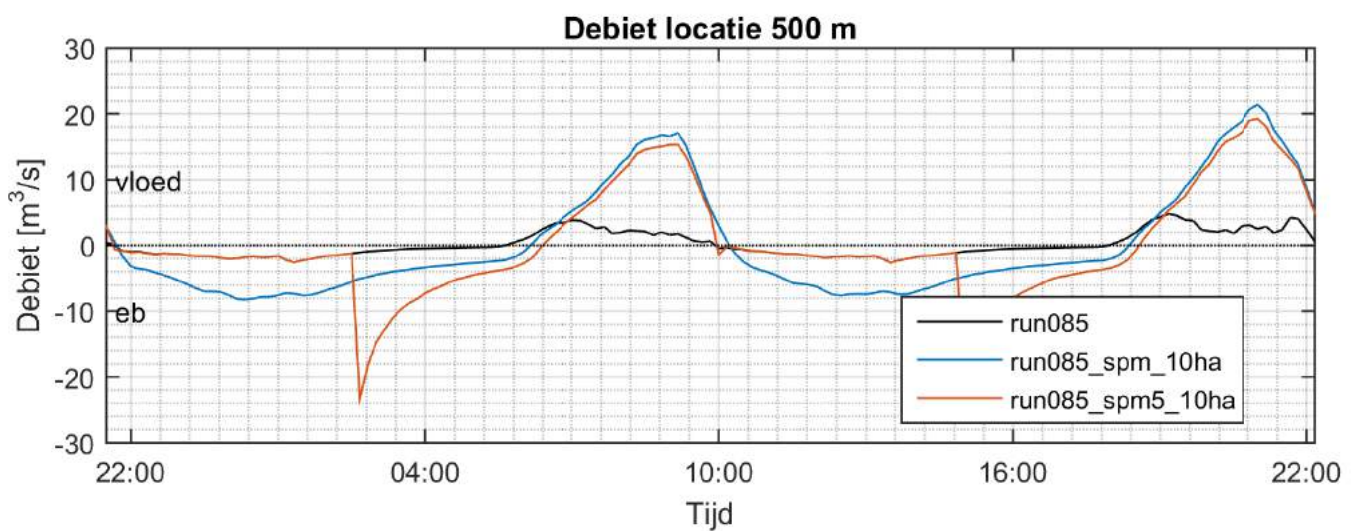
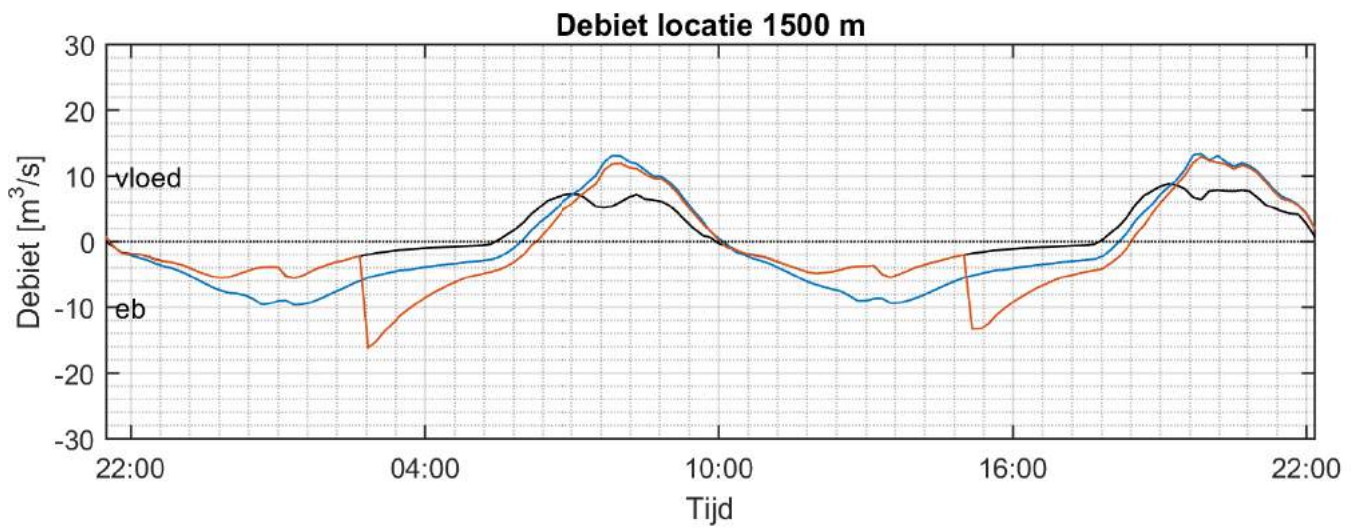
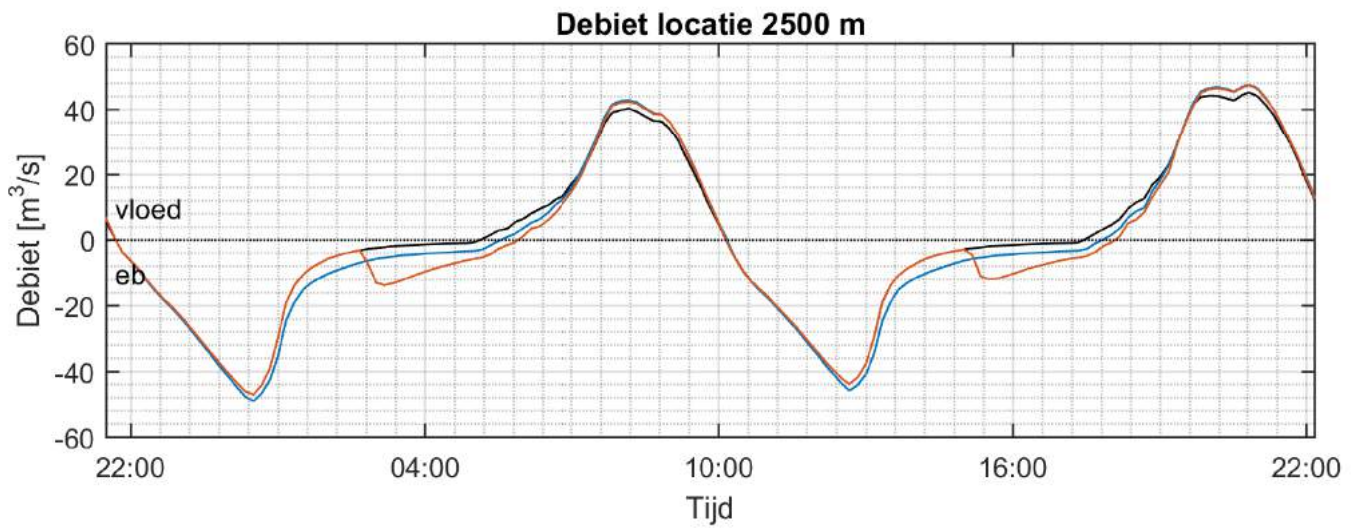
Debiet vergelijking 2, gemiddeld-tijd  
25 January 2017 - 26 January 2017

Delft3D

WP2016.1032

Noordpolderzijl

Figuur E2.07



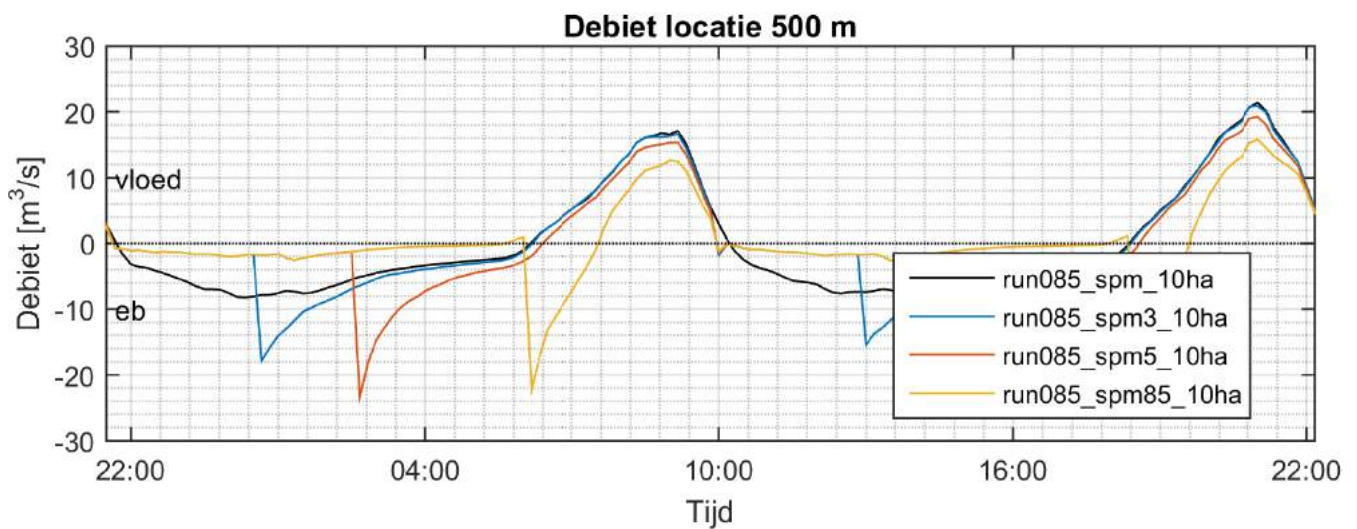
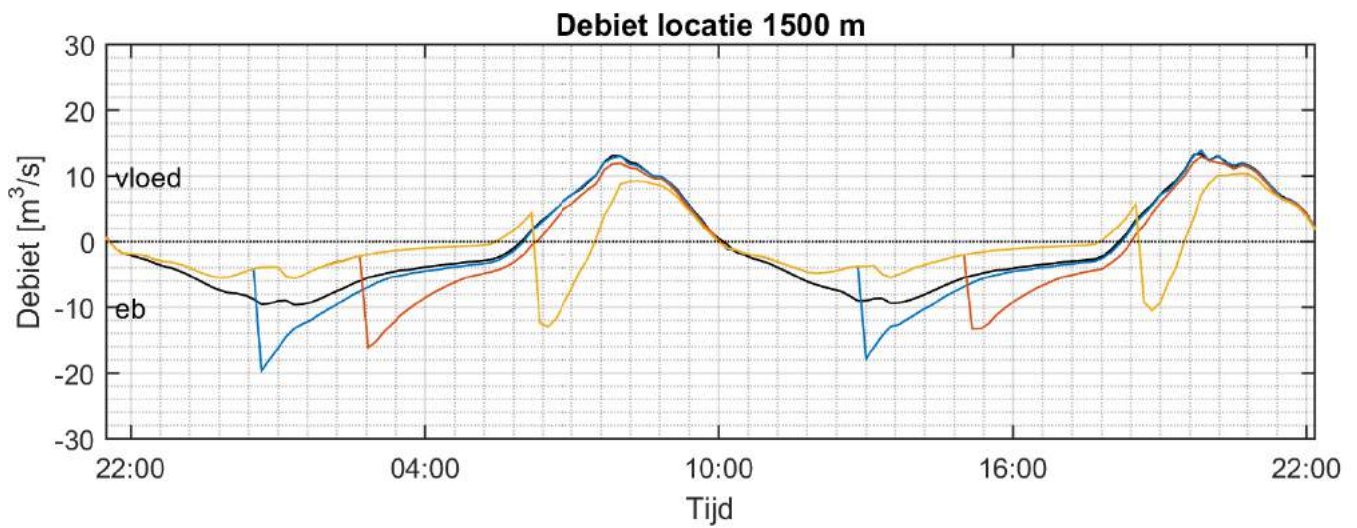
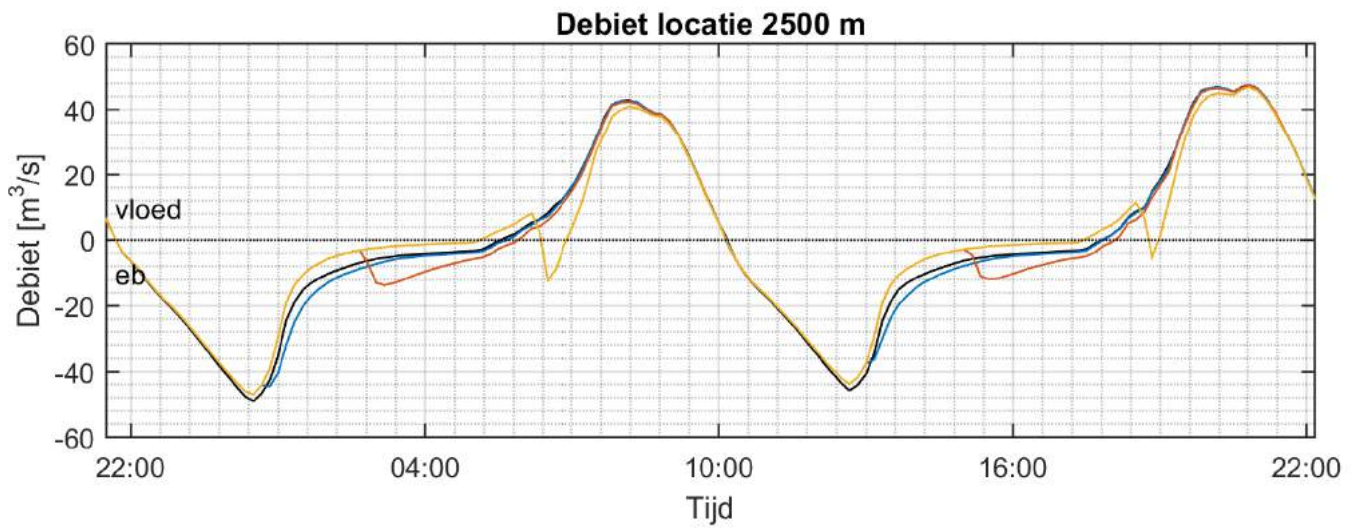
Debiet vergelijking 3, gemiddeld-tijd  
25 January 2017 - 26 January 2017

Delft3D

WP2016.1032

Noordpolderzijl

Figuur E2.08



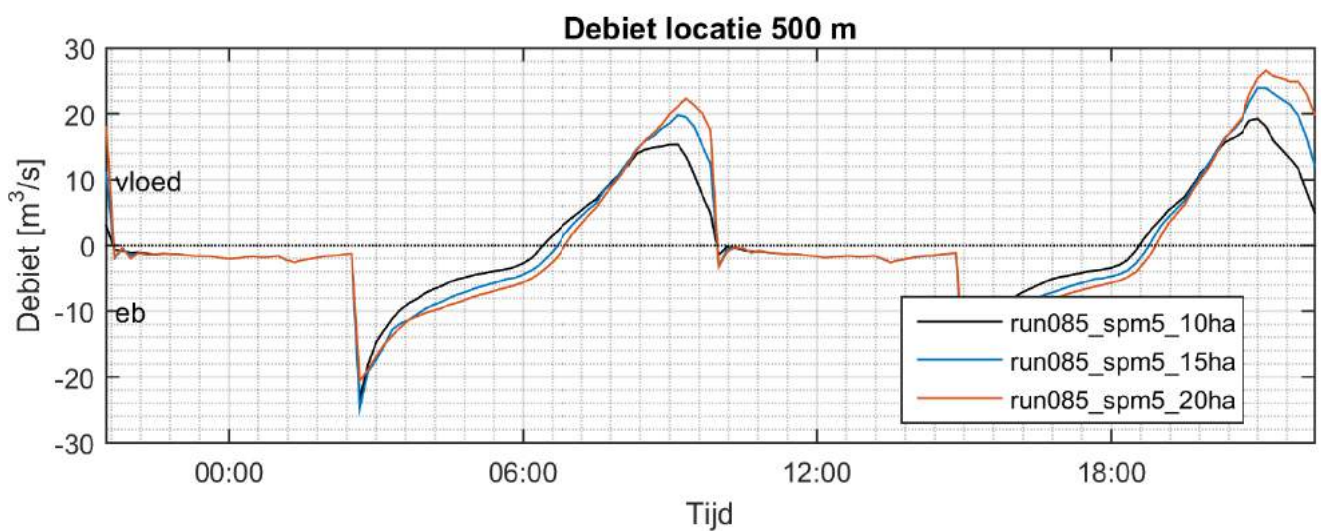
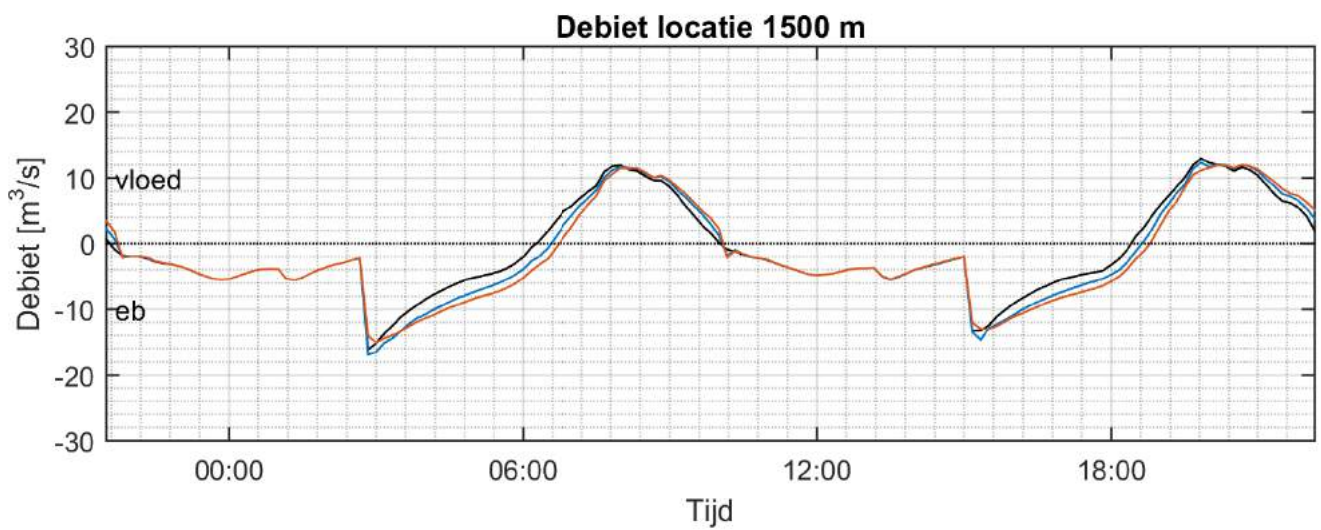
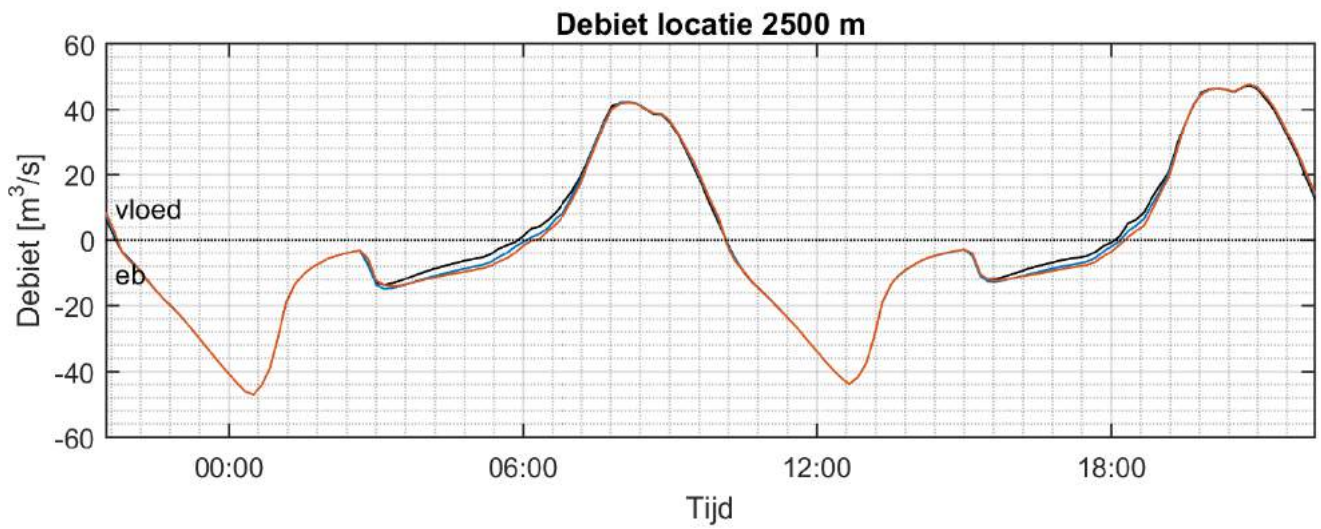
Debiet vergelijking 4, gemiddeld-tijd  
25 January 2017 - 26 January 2017

Delft3D

WP2016.1032

Noordpolderzijl

Figuur E2.09



Debiet vergelijking 5, gemiddeld-tij  
25 January 2017 - 26 January 2017

Delft3D

WP2016.1032

Noordpolderzijl

Figuur E2.10



Stroomsnelheid Noordpolderzijl

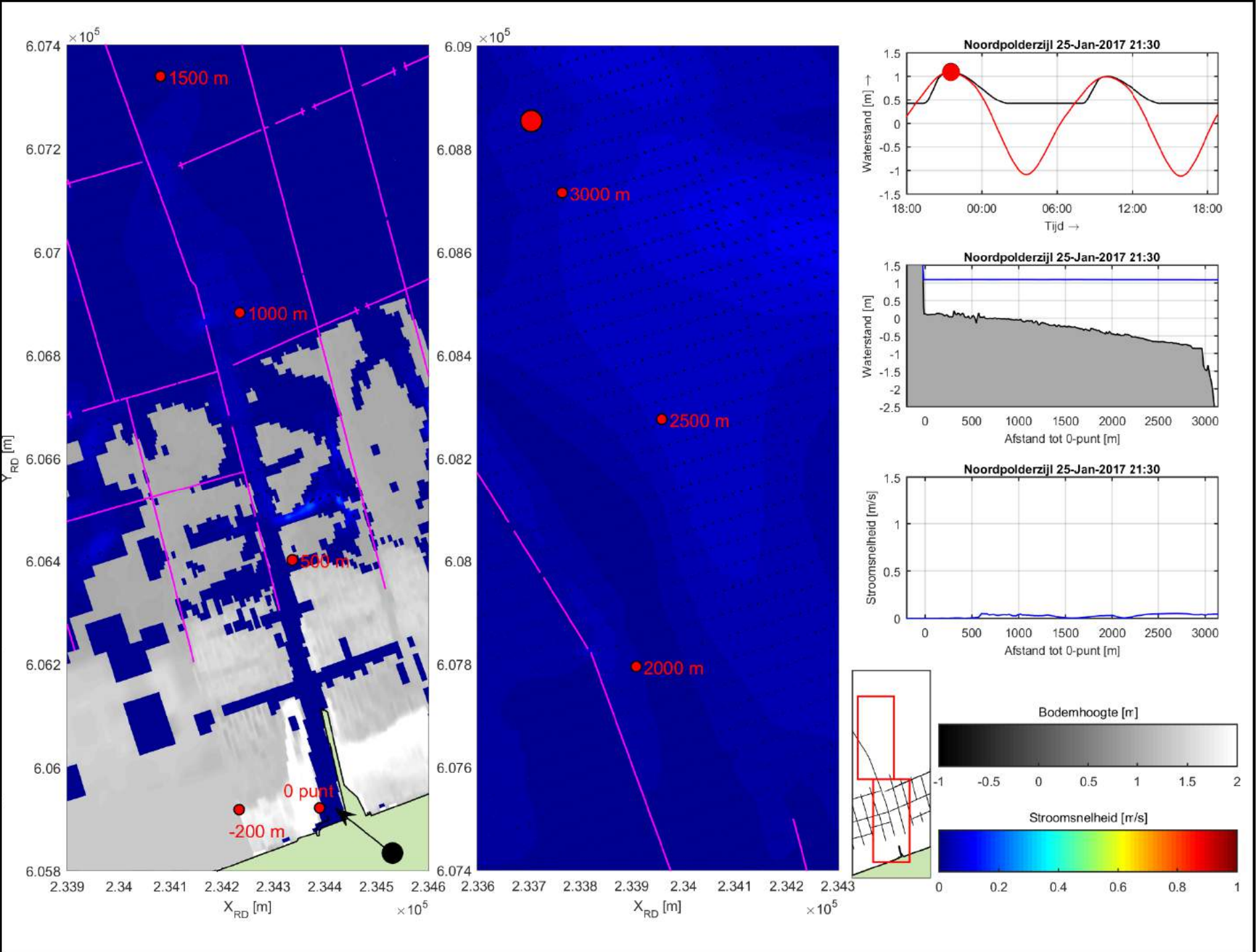
Dieptegemiddelde stroomsnelheid op:  
25-Jan-2017 21:30, met speelmeer

Delft3D

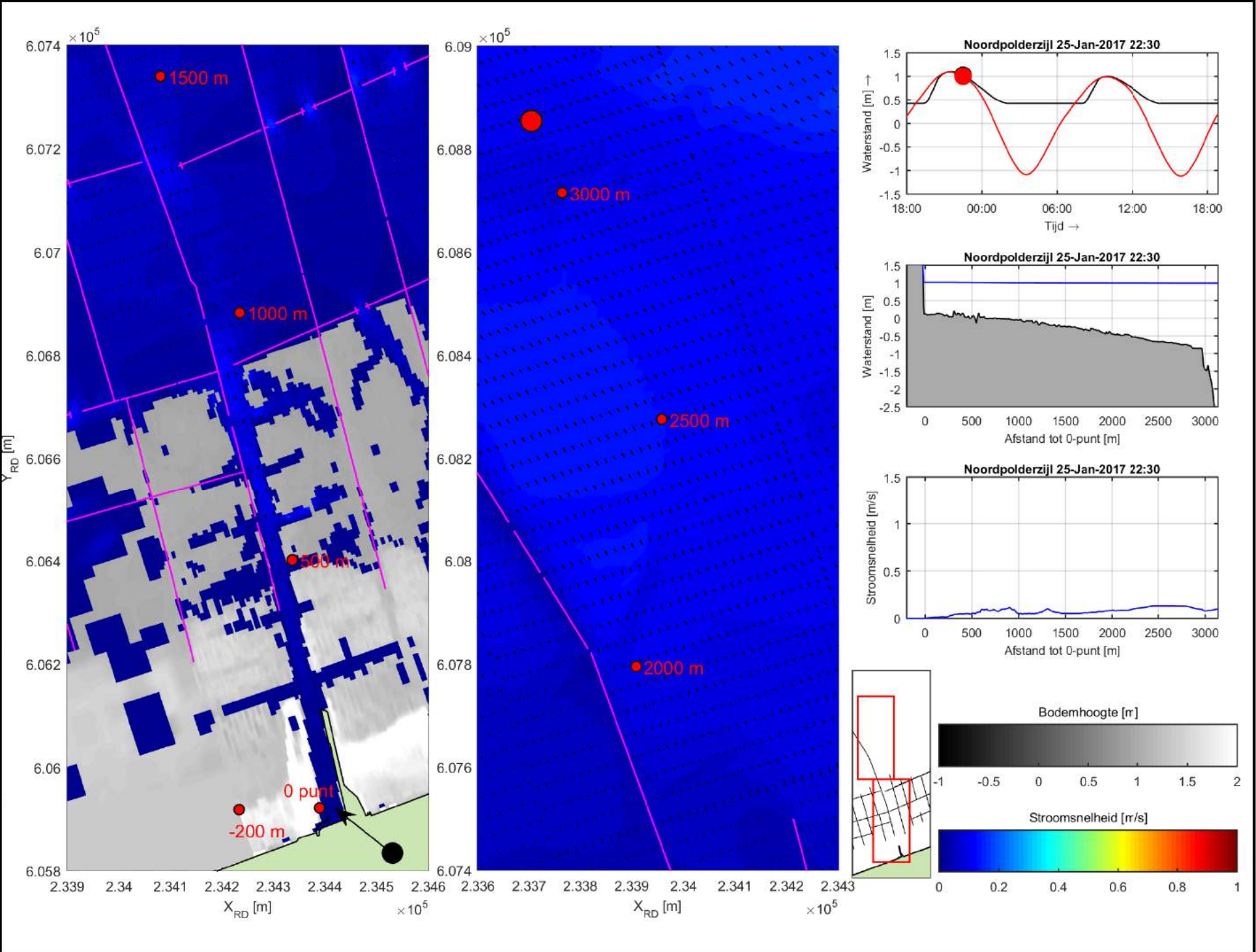
WP2016.1032

huidig

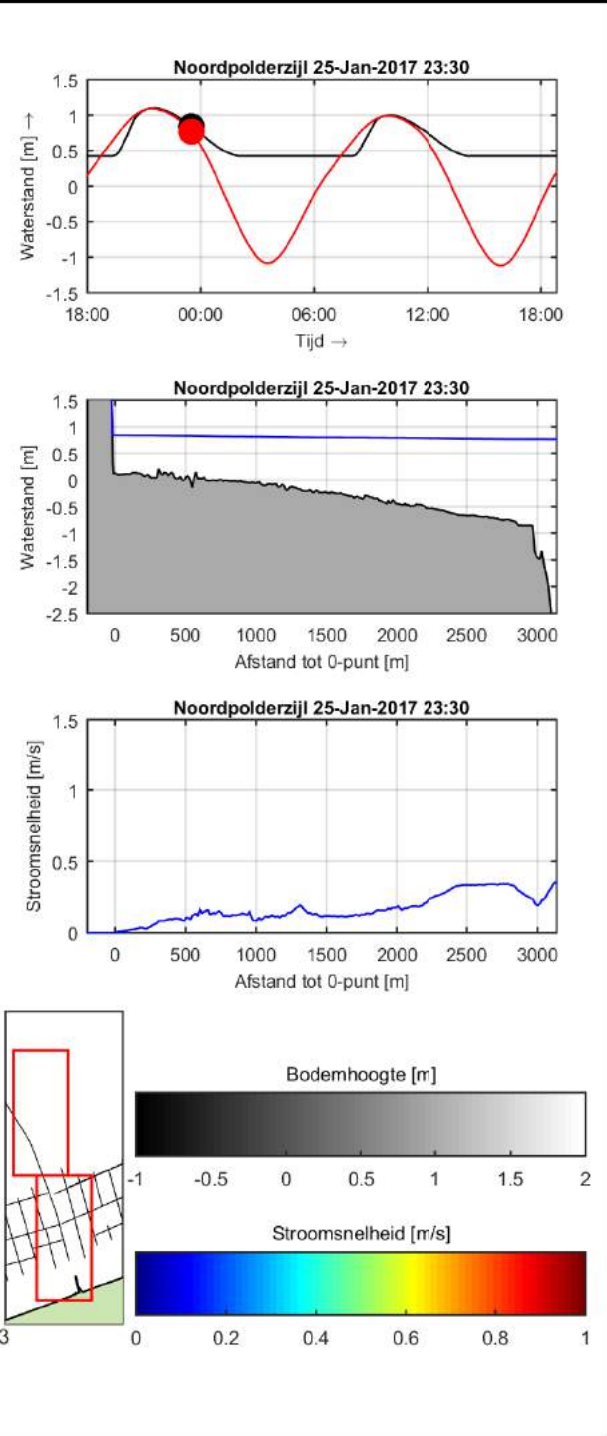
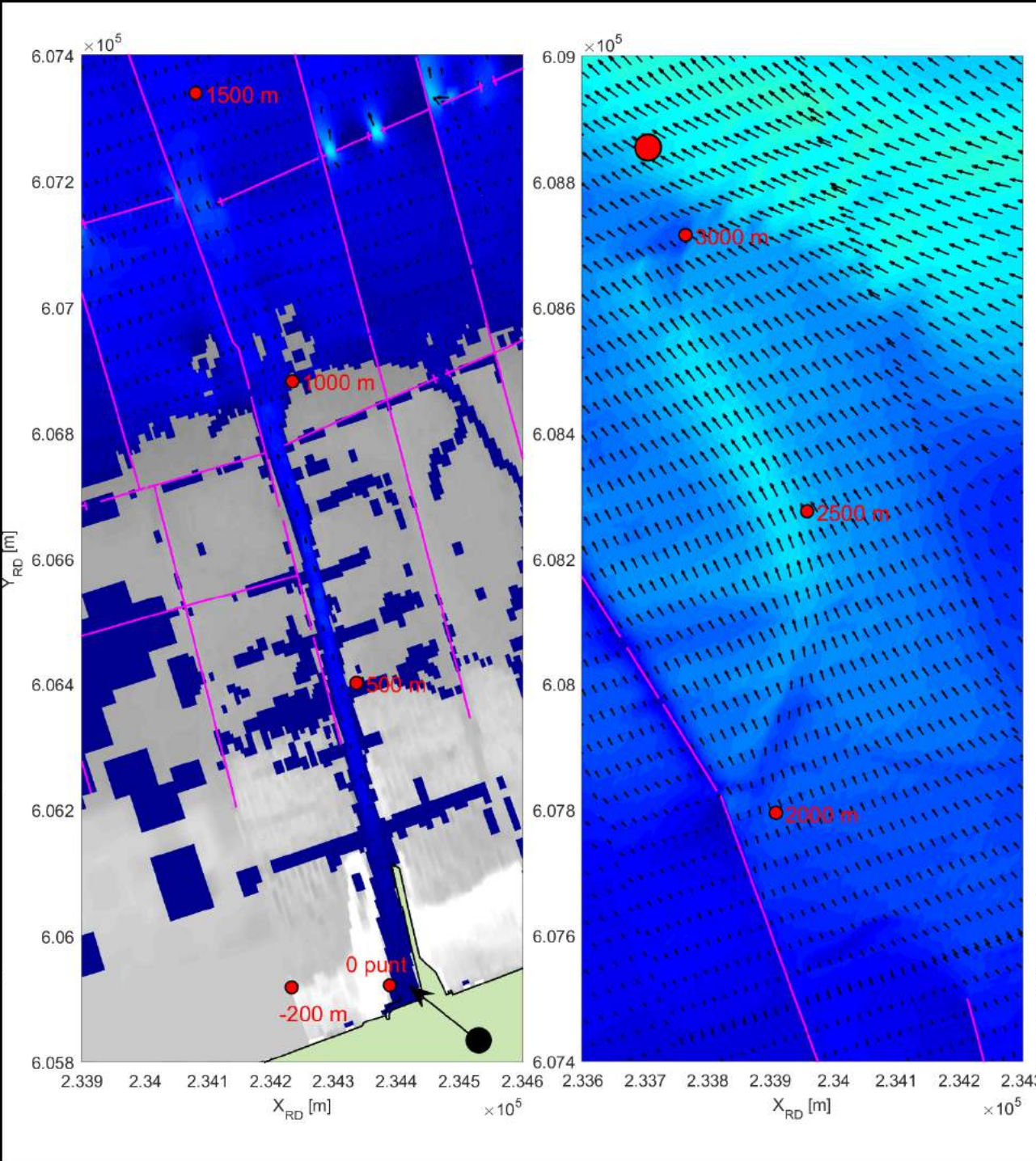
Figur E3.01



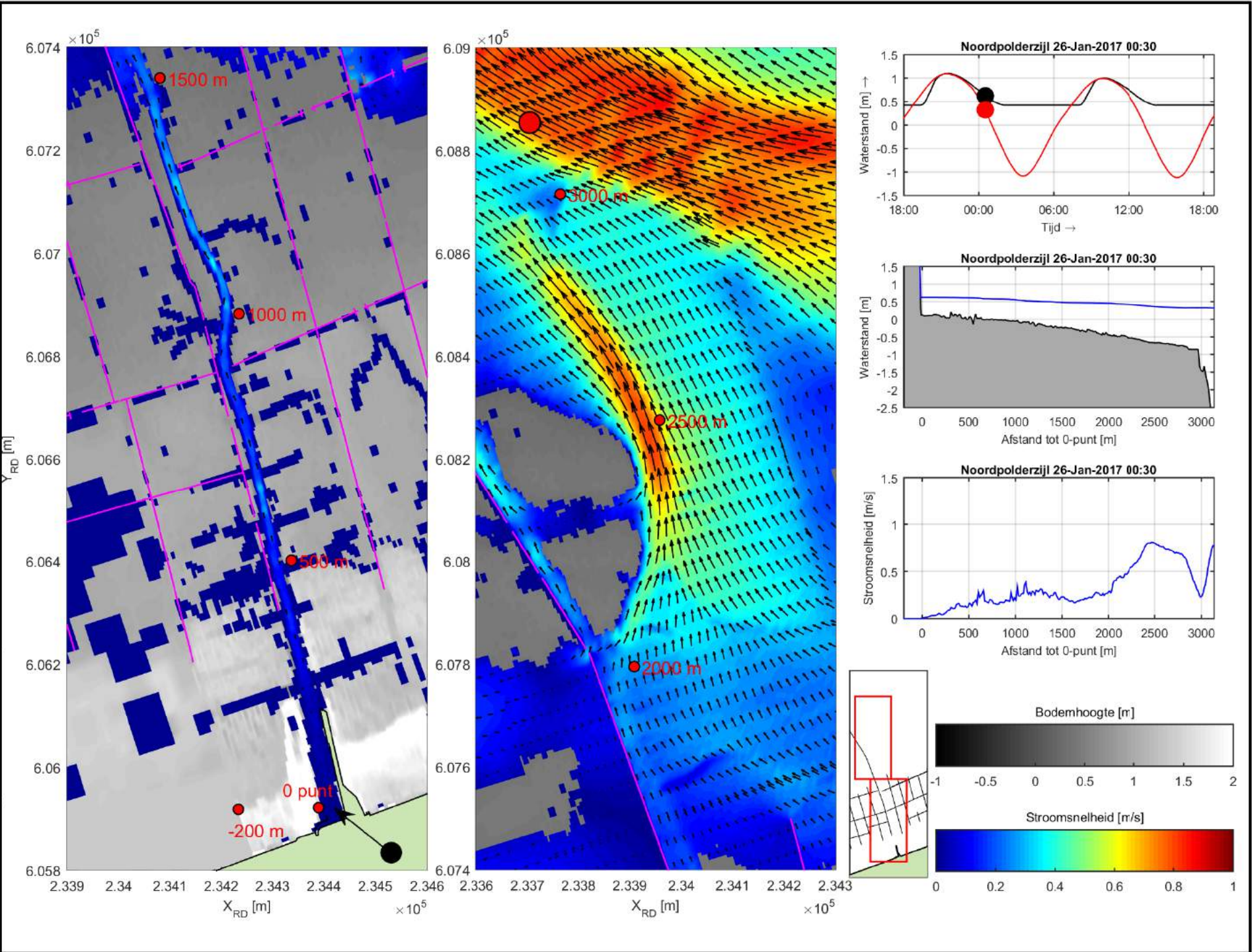
|                                |   |        |
|--------------------------------|---|--------|
| Stroomsnelheid Noordpolderzijl | Dieptegemiddelde stroomsnelheid op:<br>25-Jan-2017 22:30, met speelmeer |        |
|                                | Delft3D   | huidig |
|                                | WP2016.1032   |        |
| Figur E3.02                    |   |        |



|                                |   |        |
|--------------------------------|---|--------|
| Stroomsnelheid Noordpolderzijl | Dieptegemiddelde stroomsnelheid op:<br>25-Jan-2017 23:30, met speelmeer |        |
|                                | Delft3D   | huidig |
|                                | WP2016.1032   |        |
| Figur E3.03                    |   |        |



|                                |   |        |
|--------------------------------|---|--------|
| Stroomsnelheid Noordpolderzijl | Dieptegemiddelde stroomsnelheid op:<br>26-Jan-2017 00:30, met speelmeer |        |
|                                | Delft3D   | huidig |
|                                | WP2016.1032   |        |
| Figuur E3.04                   |   |        |



Stroomsnelheid Noordpolderzijl

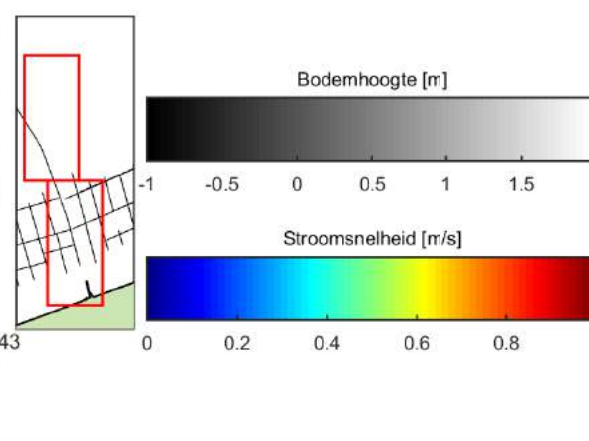
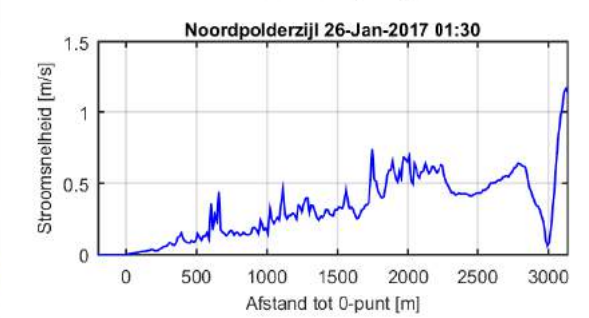
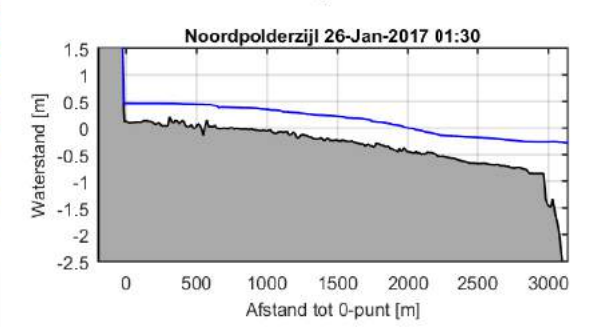
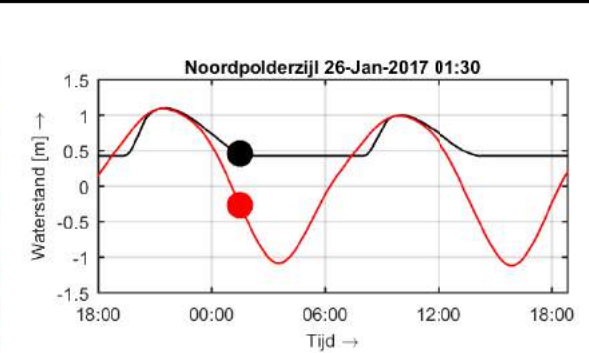
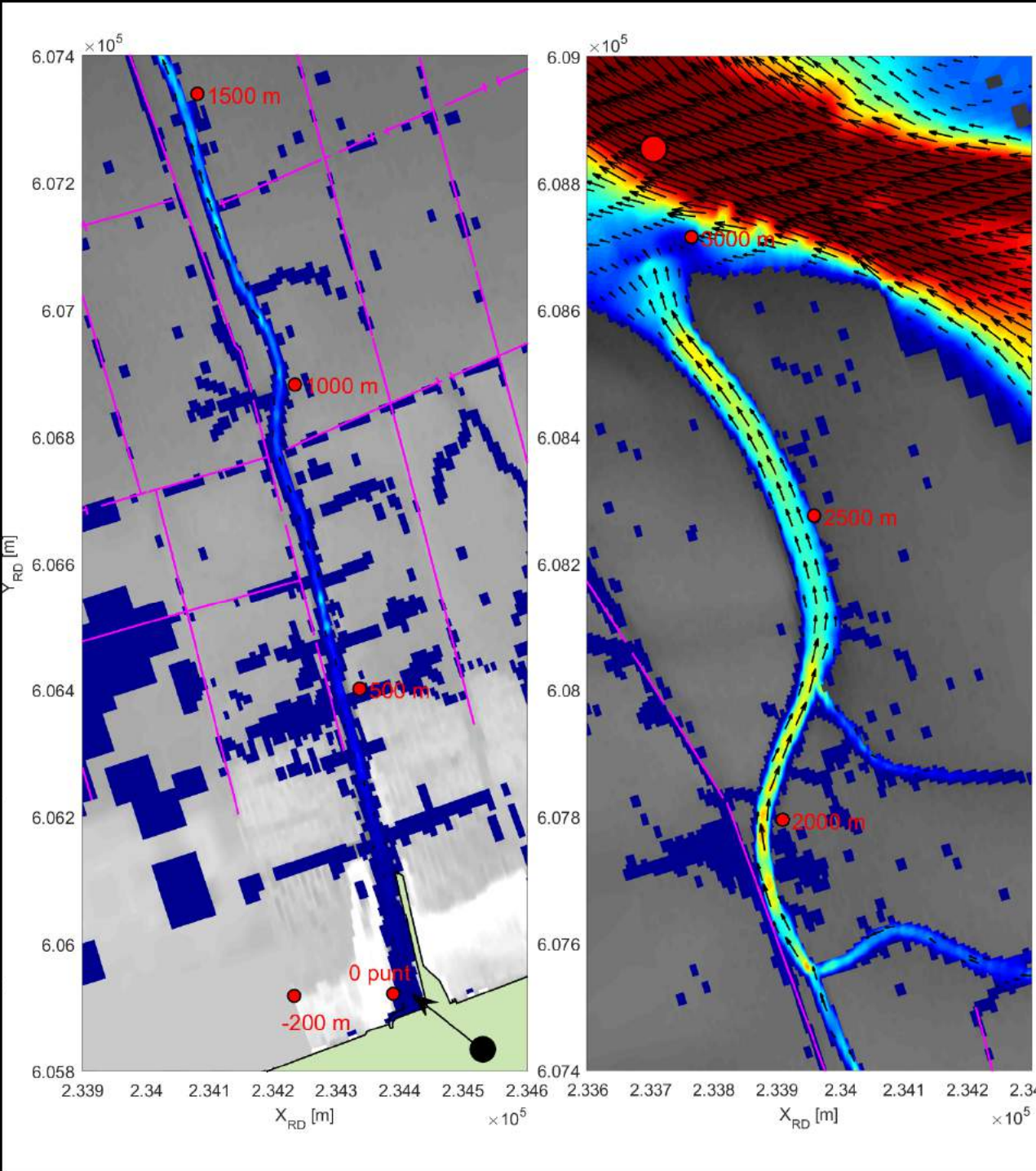
Dieptegemiddelde stroomsnelheid op:  
26-Jan-2017 01:30, met speelmeer

Delft3D

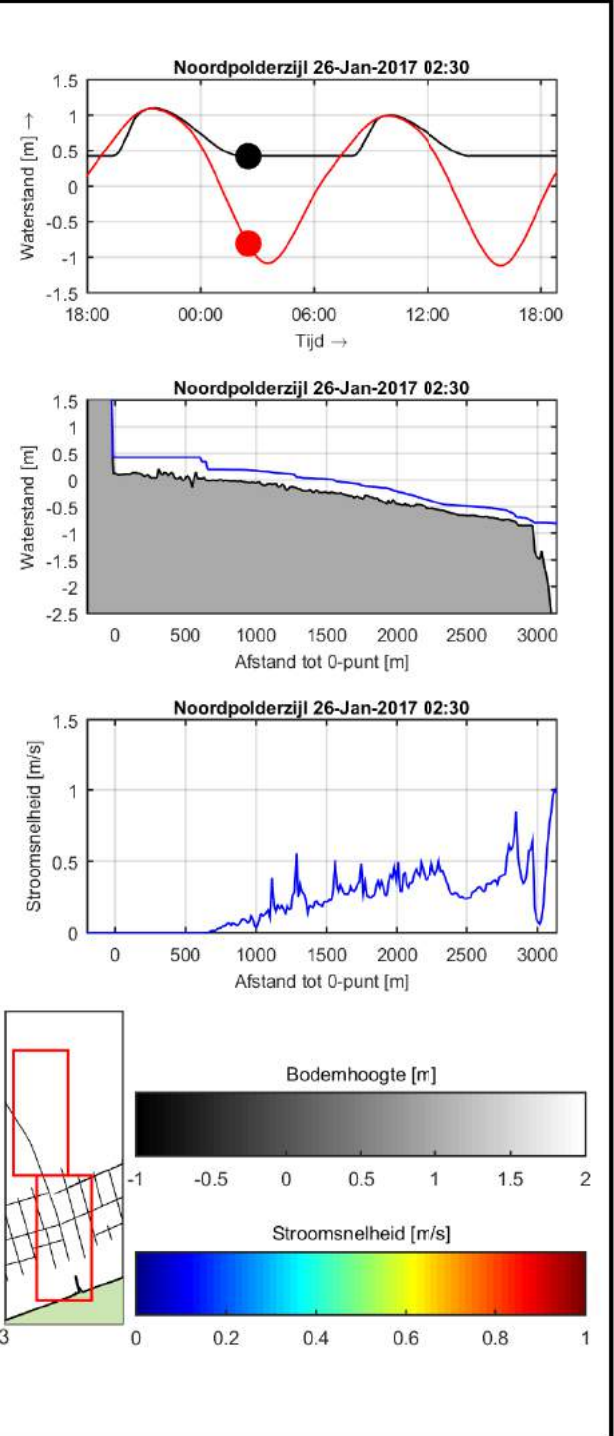
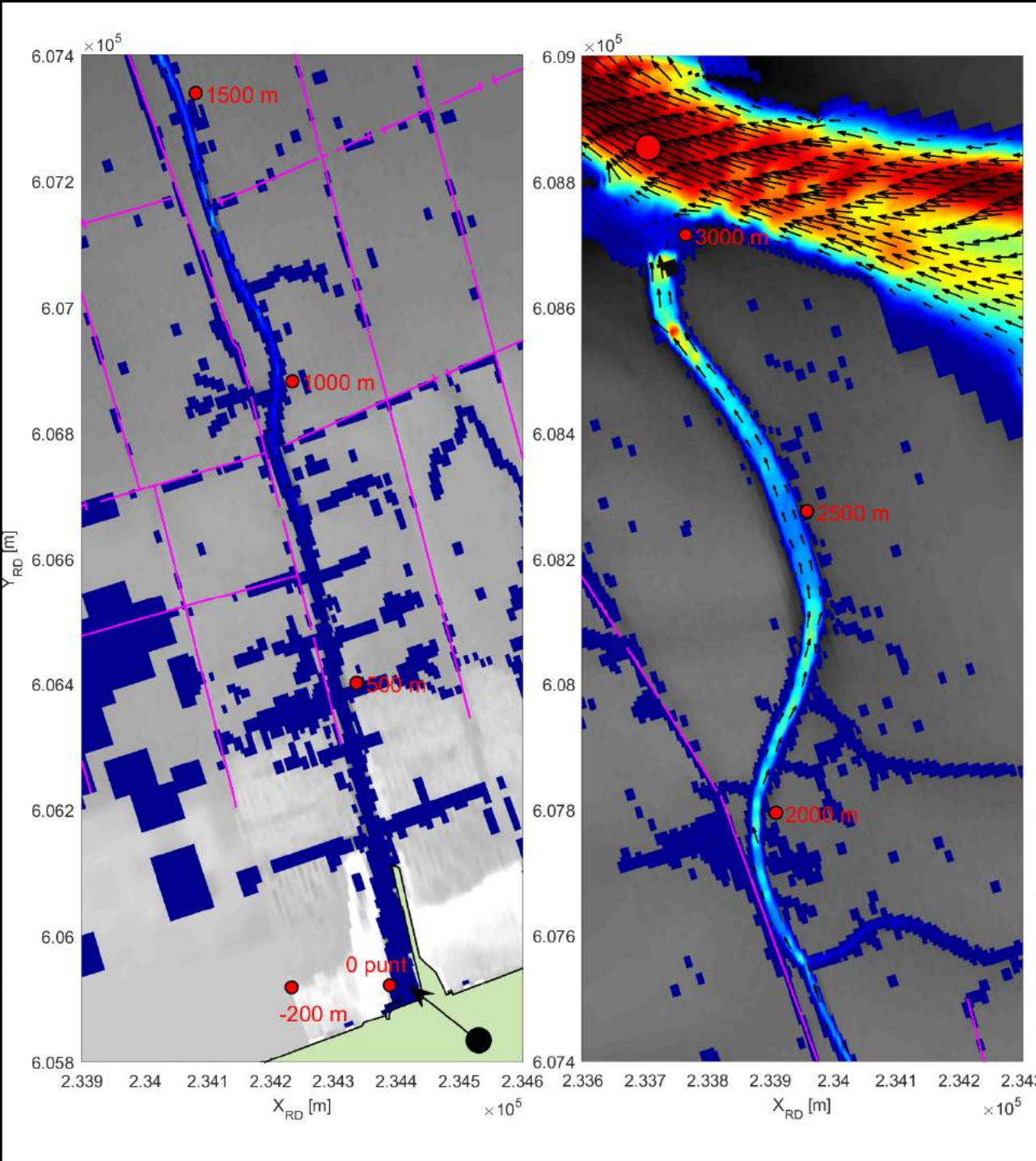
WP2016.1032

huidig

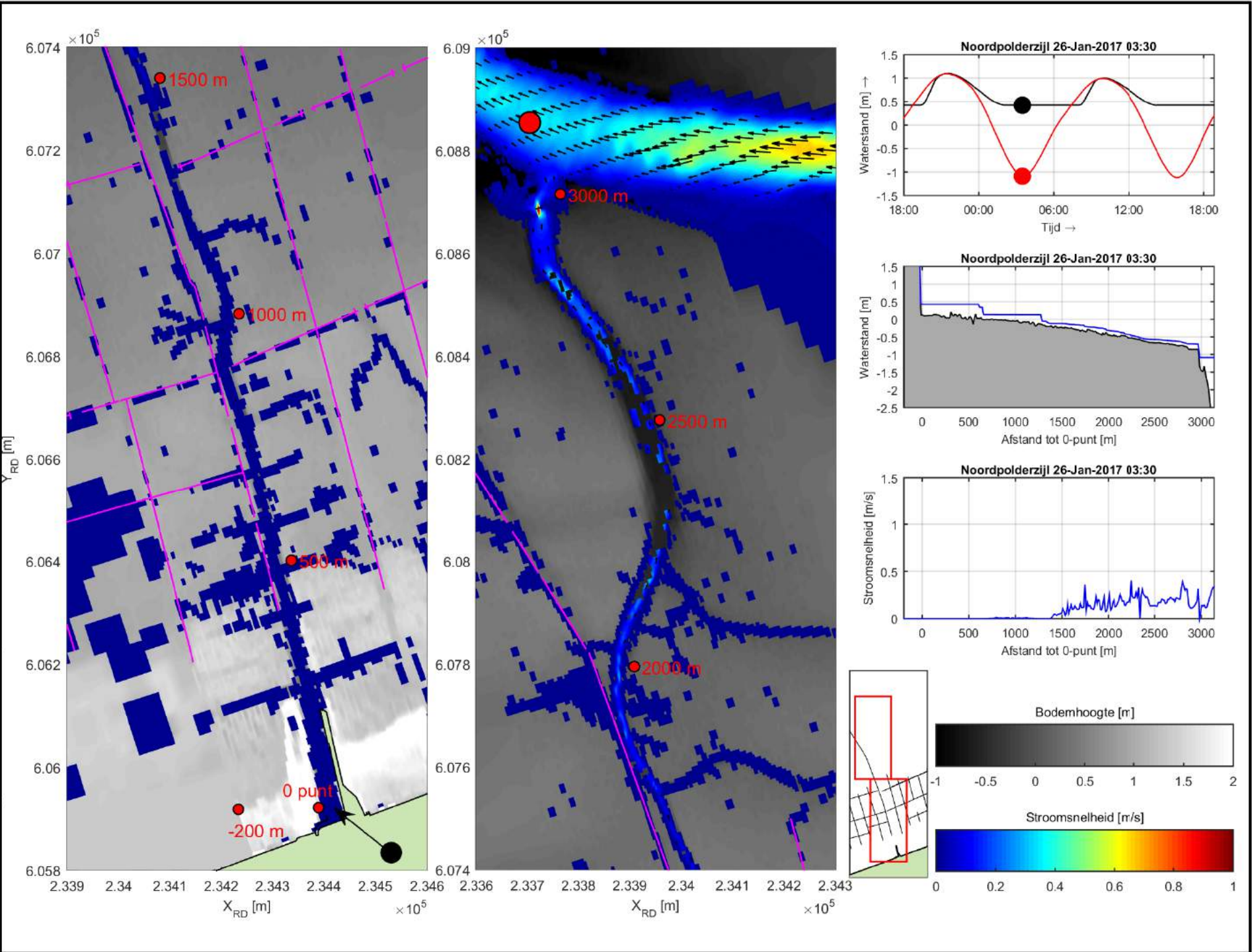
Figur E3.05



|                                |   |        |
|--------------------------------|---|--------|
| Stroomsnelheid Noordpolderzijl | Dieptegemiddelde stroomsnelheid op:<br>26-Jan-2017 02:30, met speelmeer |        |
|                                | Delft3D   | huidig |
|                                | WP2016.1032   |        |
| Figur E3.06                    |   |        |



|                                |   |        |
|--------------------------------|---|--------|
| Stroomsnelheid Noordpolderzijl | Dieptegemiddelde stroomsnelheid op:<br>26-Jan-2017 03:30, met speelmeer |        |
|                                | Delft3D   | huidig |
|                                | WP2016.1032   |        |
| Figur E3.07                    |   |        |



Stroomsnelheid Noordpolderzijl

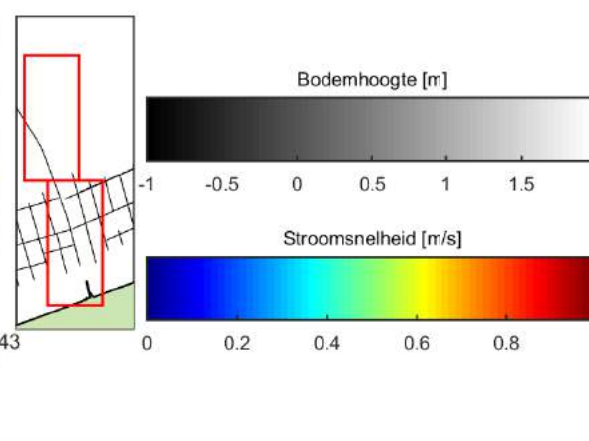
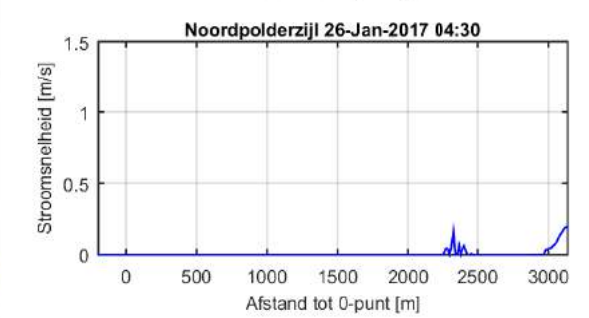
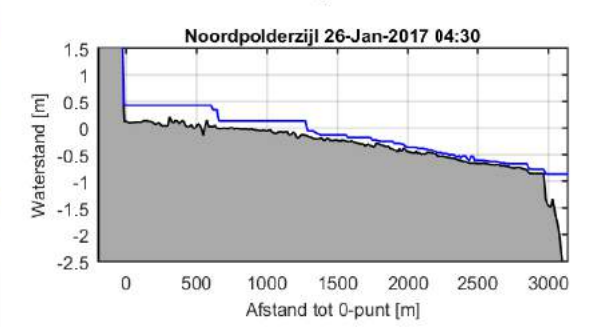
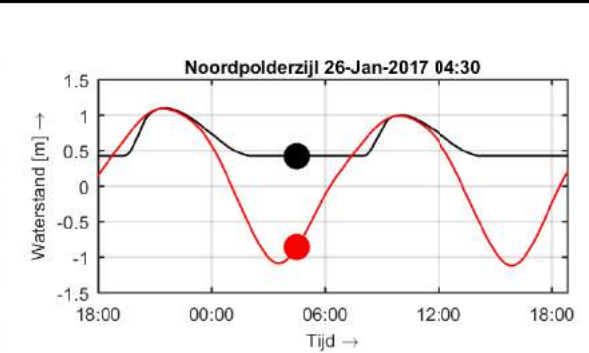
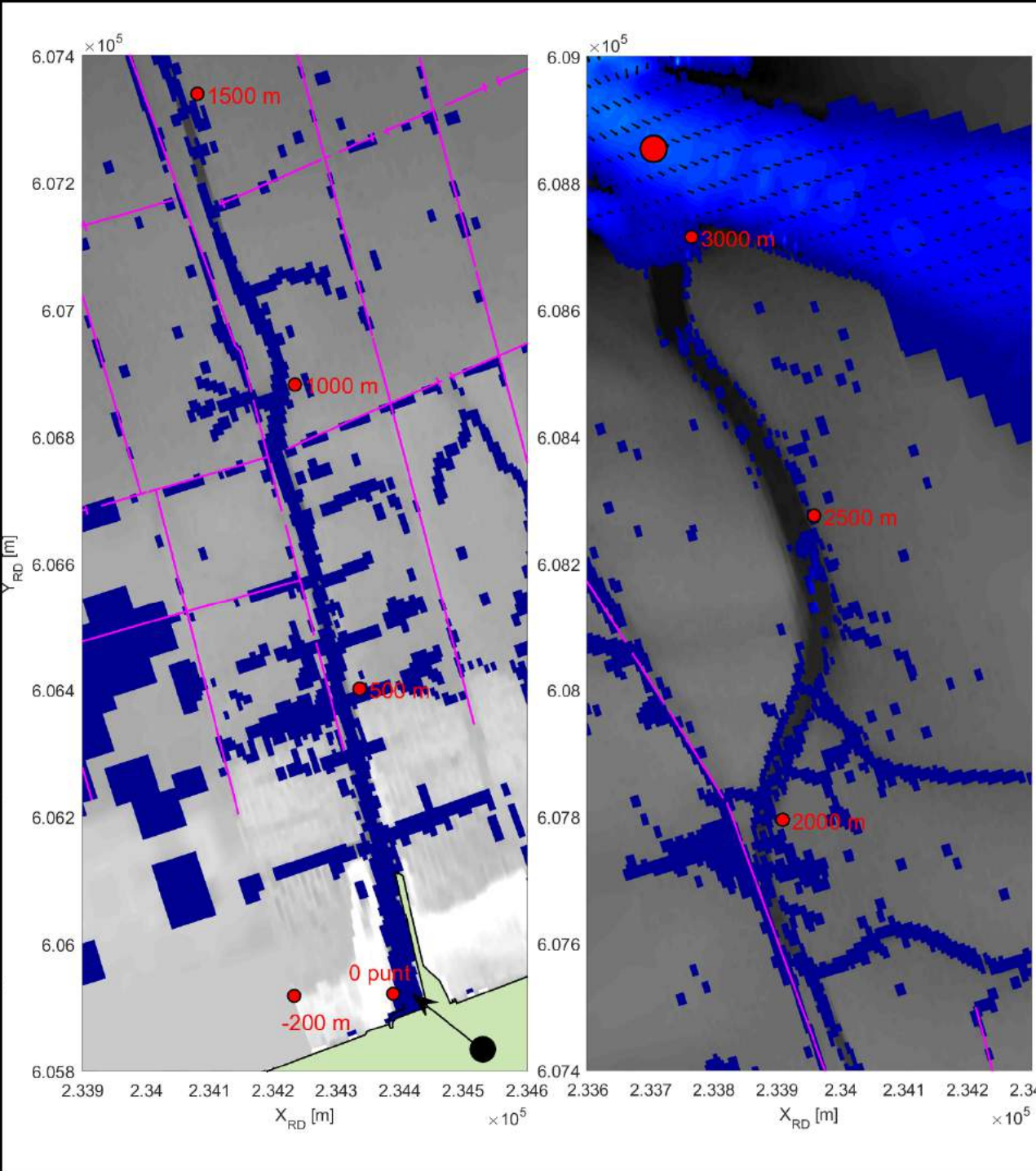
Dieptegemiddelde stroomsnelheid op:  
26-Jan-2017 04:30, met spoelmeer

Delft3D

WP2016.1032

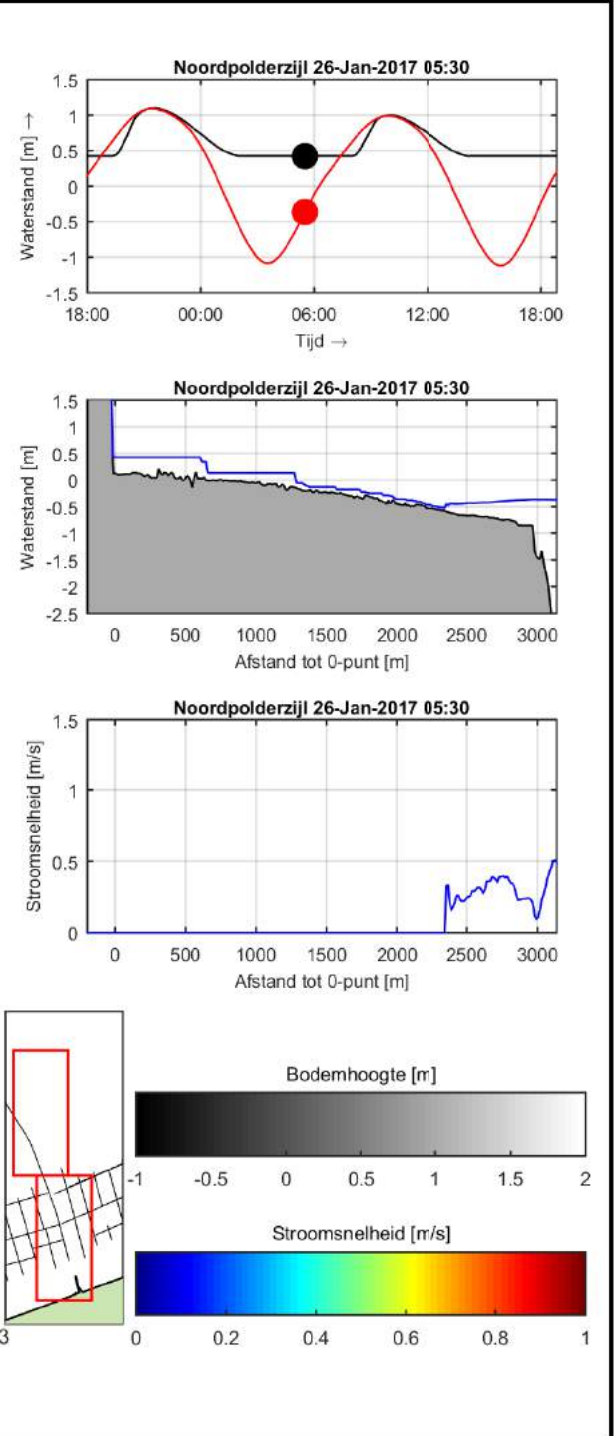
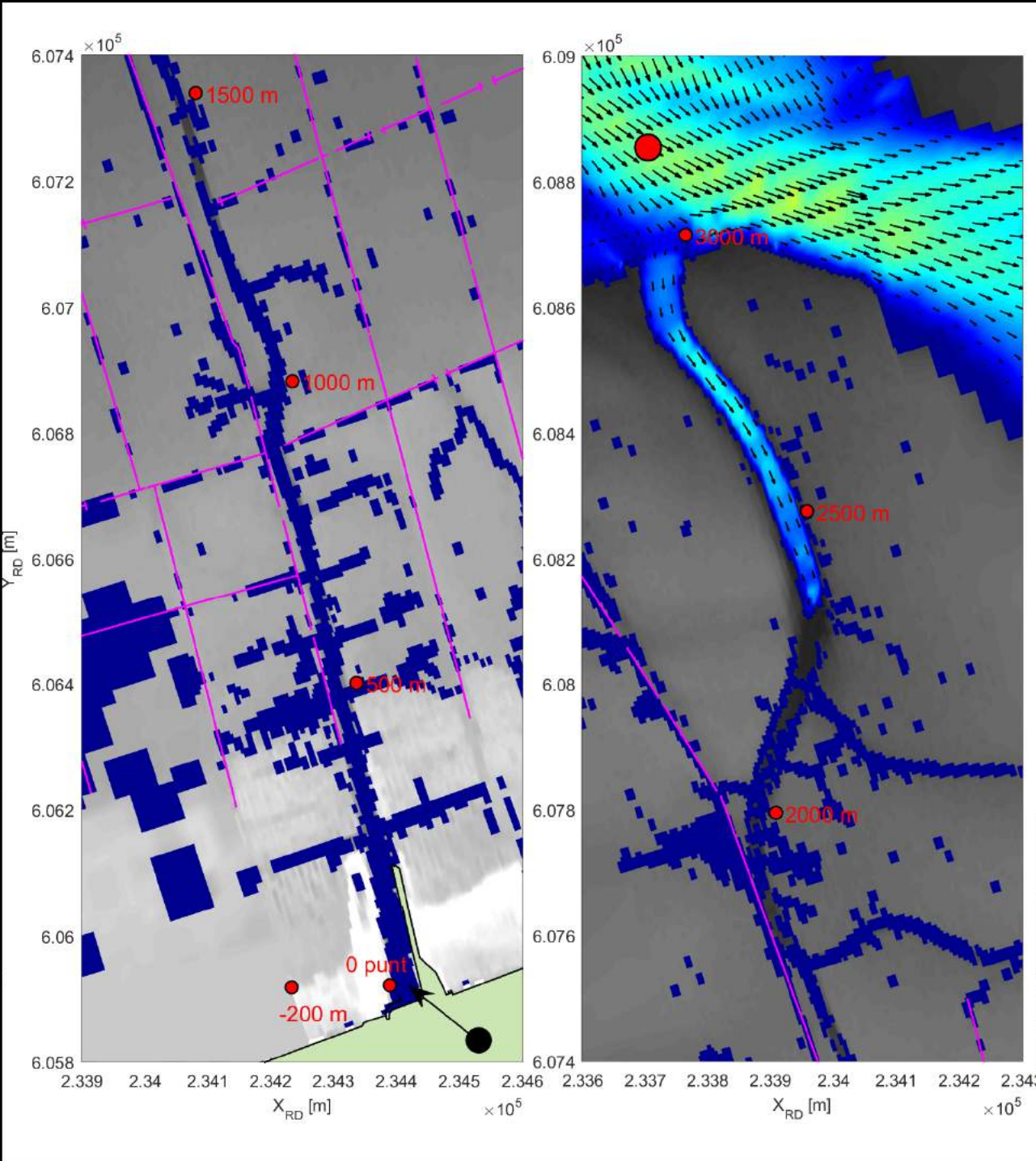
huidig

Figuur E3.08

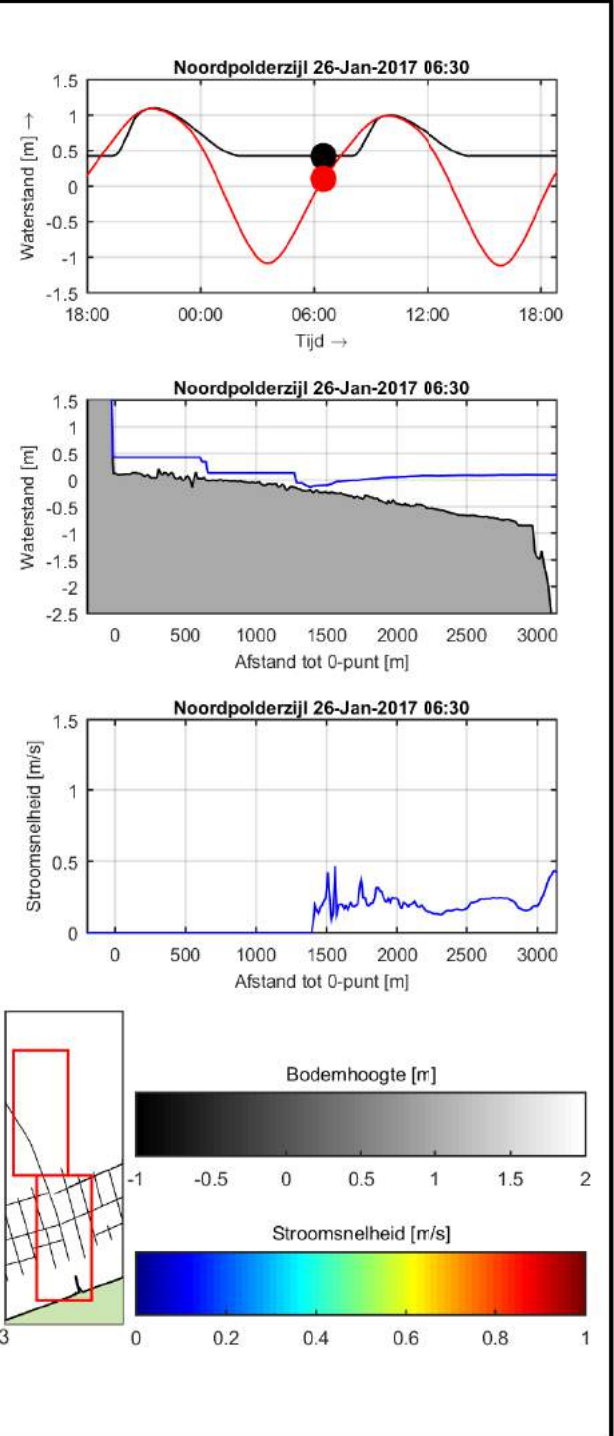
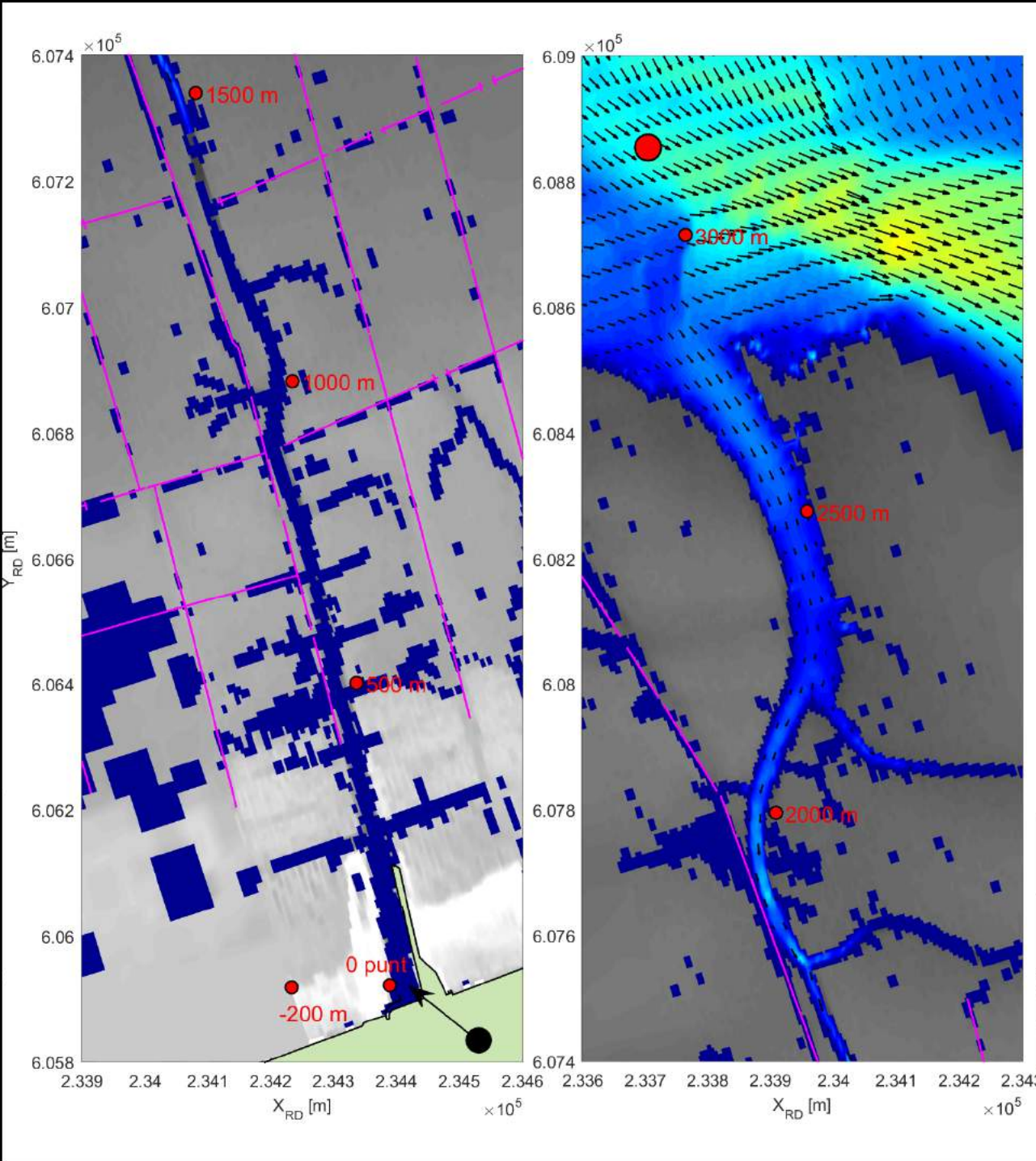




|                                |   |        |
|--------------------------------|---|--------|
| Stroomsnelheid Noordpolderzijl | Dieptegemiddelde stroomsnelheid op:<br>26-Jan-2017 05:30, met speelmeer |        |
|                                | Delft3D   | huidig |
|                                | WP2016.1032   |        |
| Figur E3.09                    |   |        |



|                                |   |        |
|--------------------------------|---|--------|
| Stroomsnelheid Noordpolderzijl | Dieptegemiddelde stroomsnelheid op:<br>26-Jan-2017 06:30, met spoelmeer |        |
|                                | Delft3D   | huidig |
|                                | WP2016.1032   |        |
| Figur E3.10                    |   |        |



Stroomsnelheid Noordpolderzijl

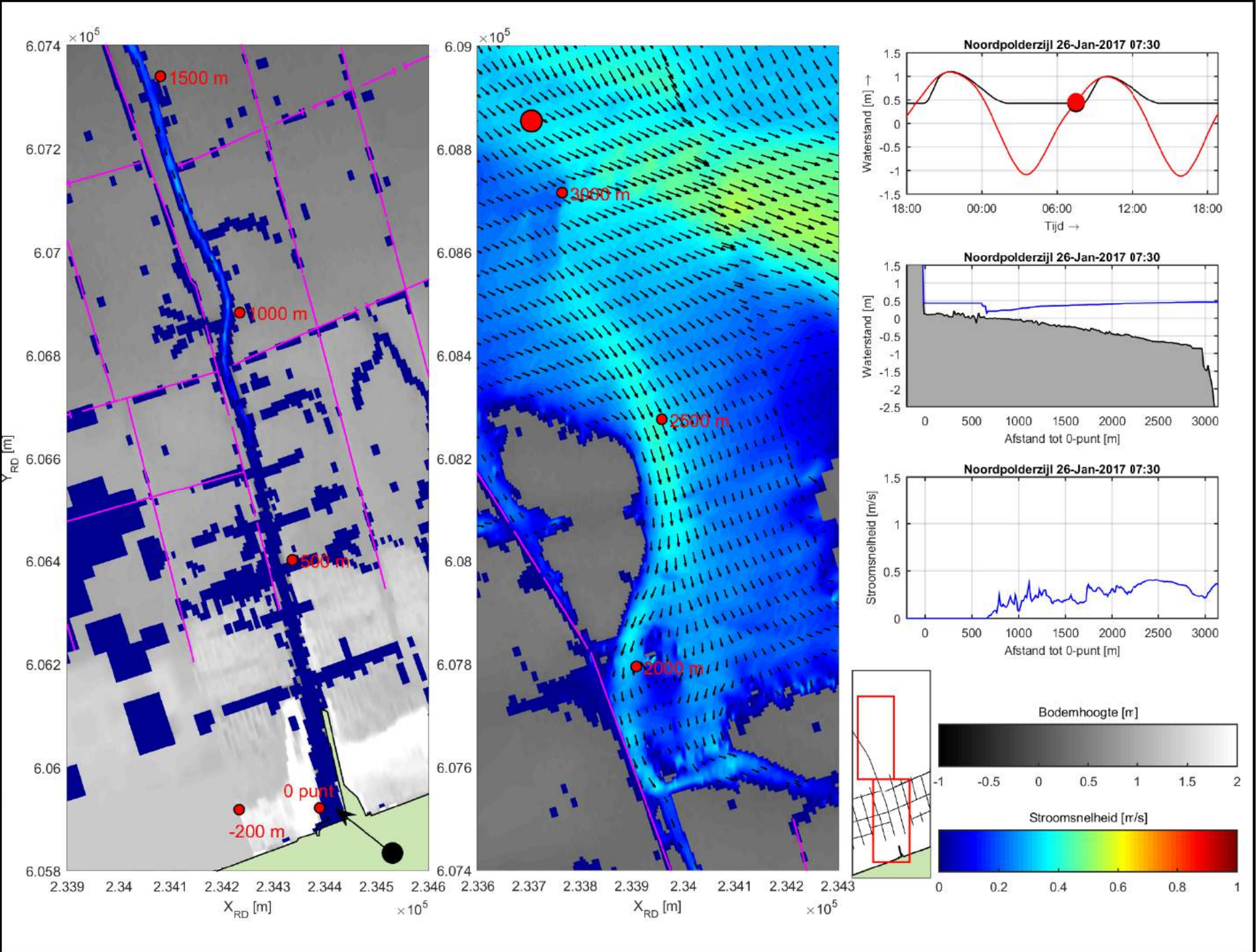
Dieptegemiddelde stroomsnelheid op:  
26-Jan-2017 07:30, met speelmeer

Delft3D

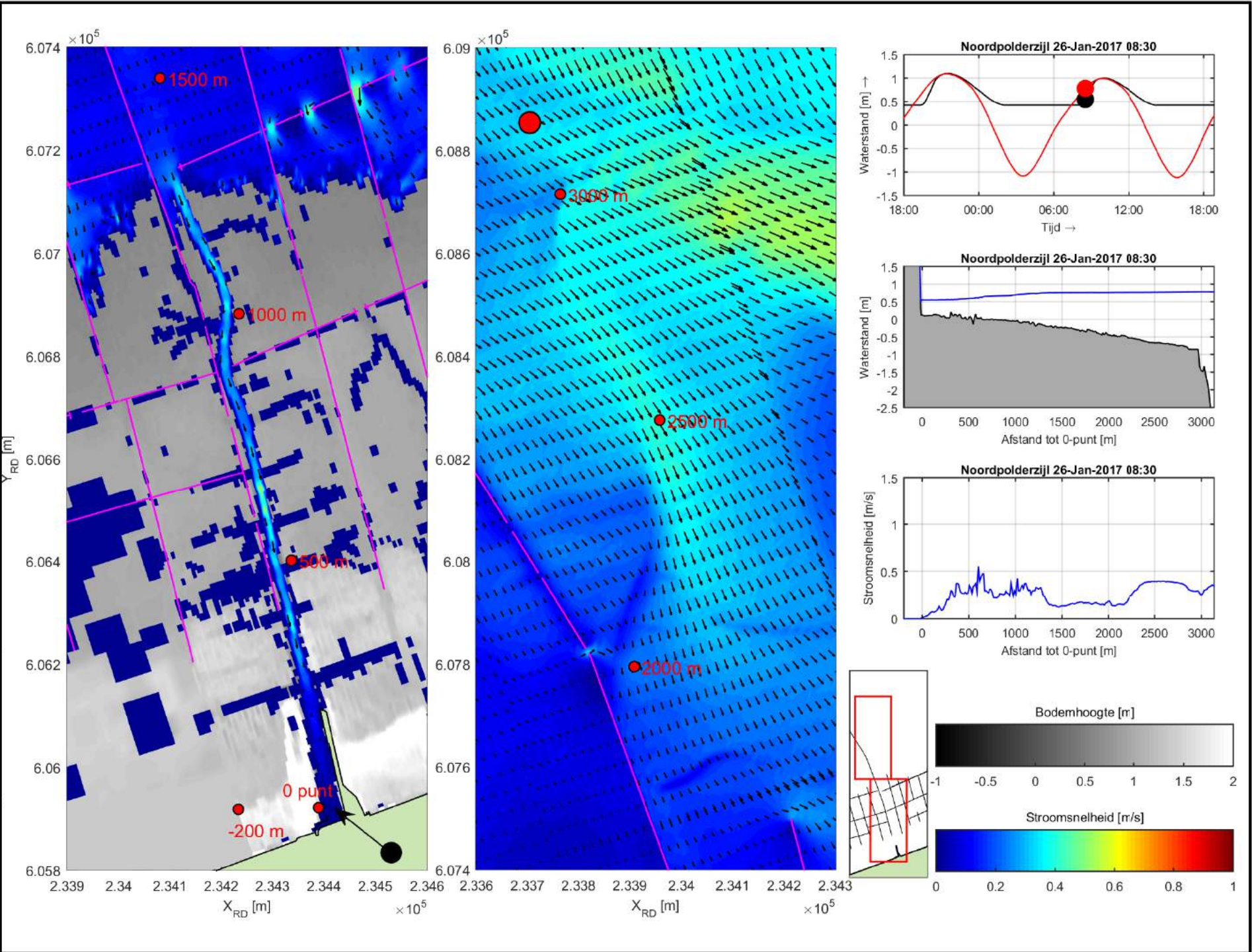
WP2016.1032

huidig

Figuur E3.11



|                                |   |        |
|--------------------------------|---|--------|
| Stroomsnelheid Noordpolderzijl | Dieptegemiddelde stroomsnelheid op:<br>26-Jan-2017 08:30, met speelmeer |        |
|                                | Delft3D   | huidig |
|                                | WP2016.1032   |        |
| Figur E3.12                    |   |        |



Stroomsnelheid Noordpolderzijl

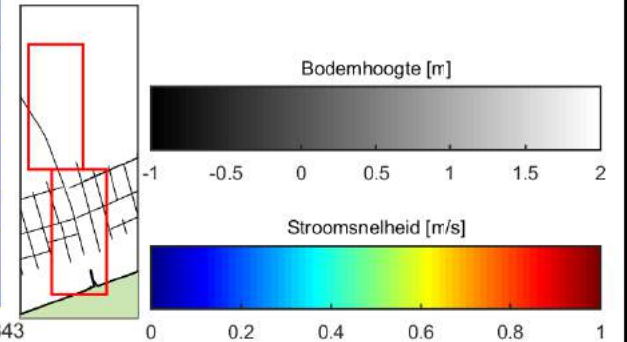
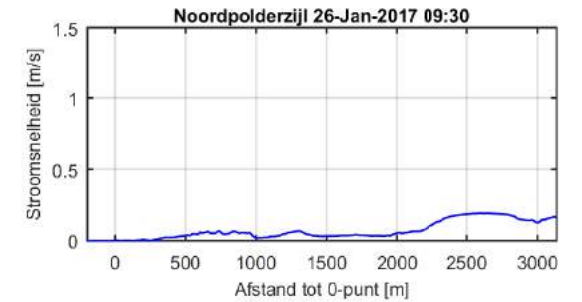
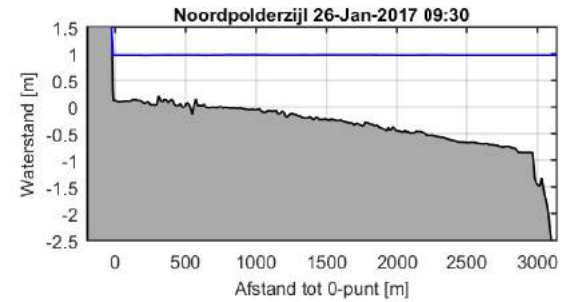
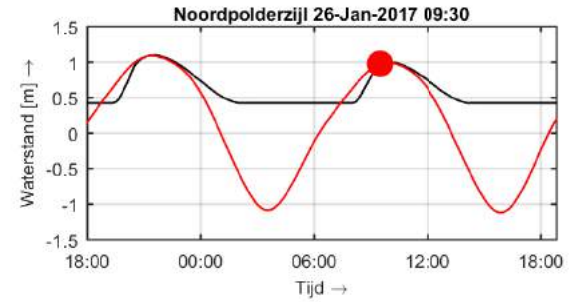
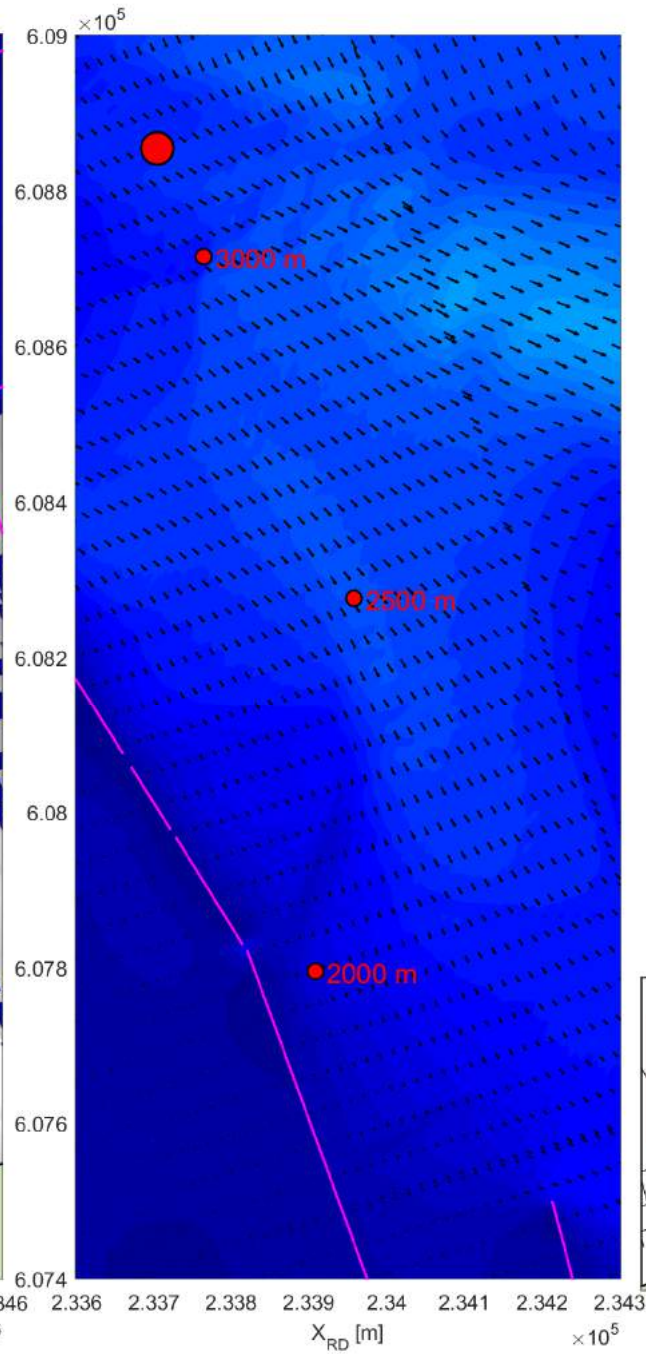
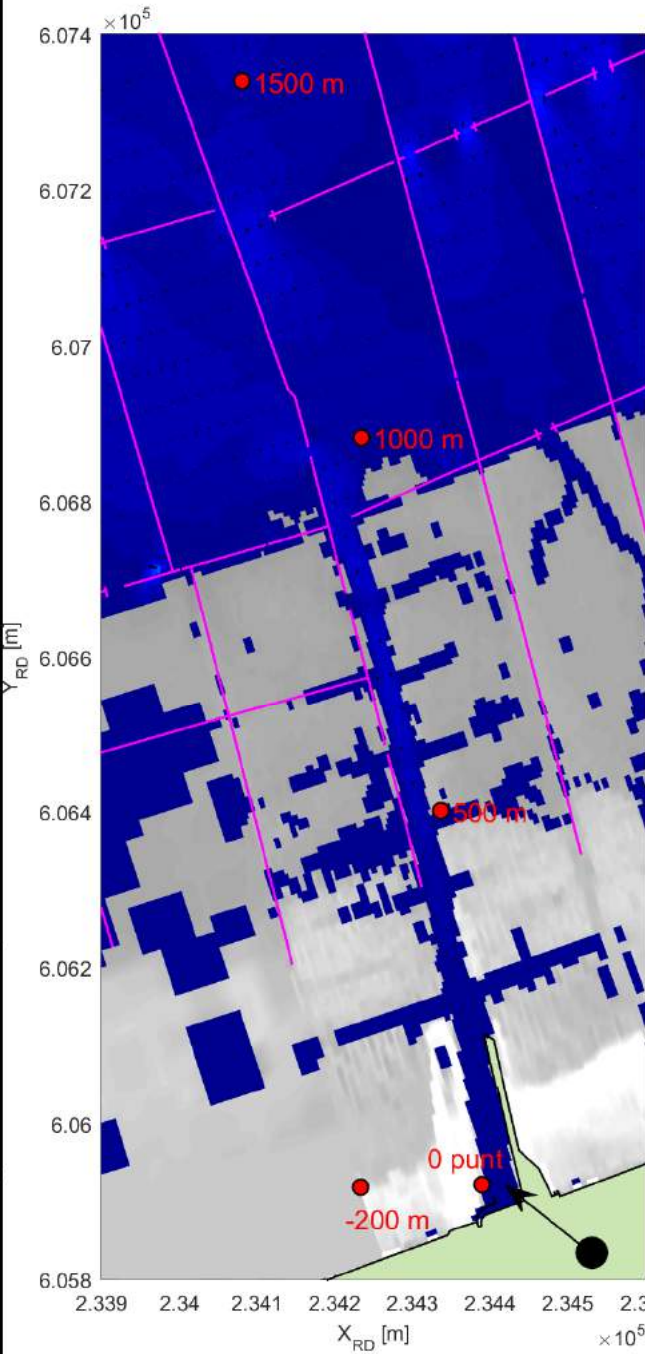
Dieptegemiddelde stroomsnelheid op:  
26-Jan-2017 09:30, met speelmeer

Delft3D

WP2016.1032

huidig

Figuur E3.13



Stroomsnelheid Noordpolderzijl

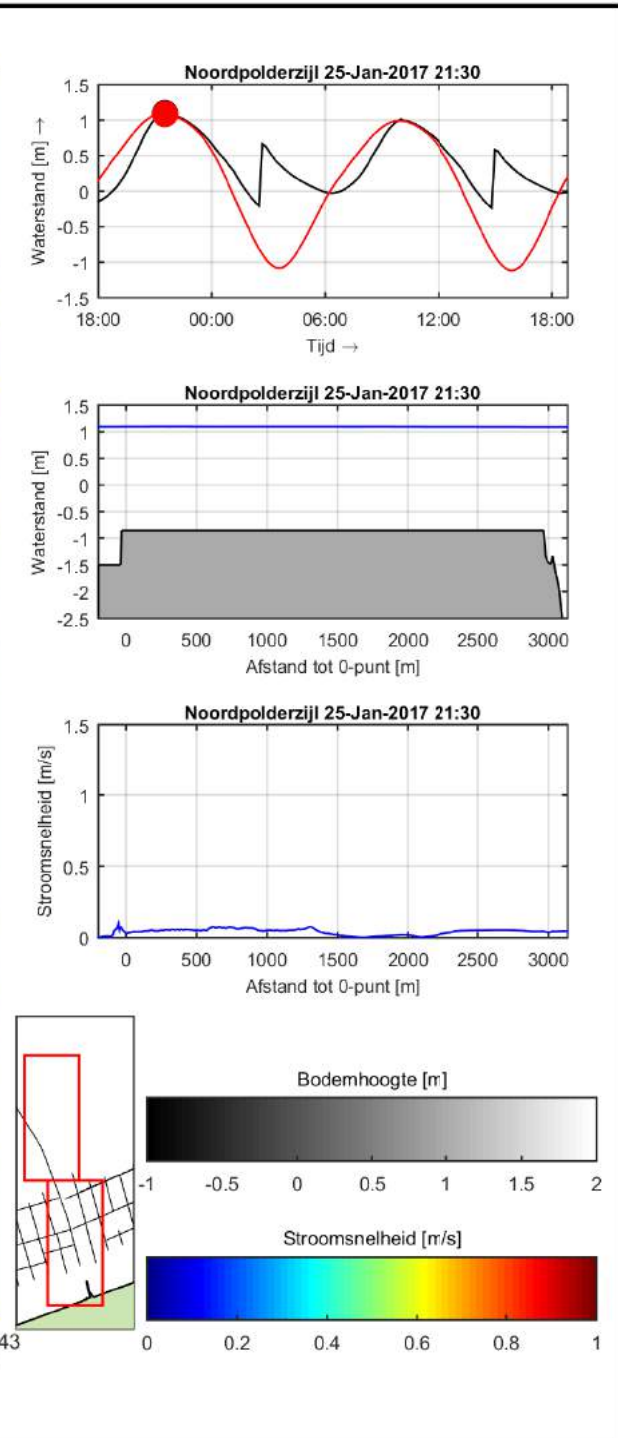
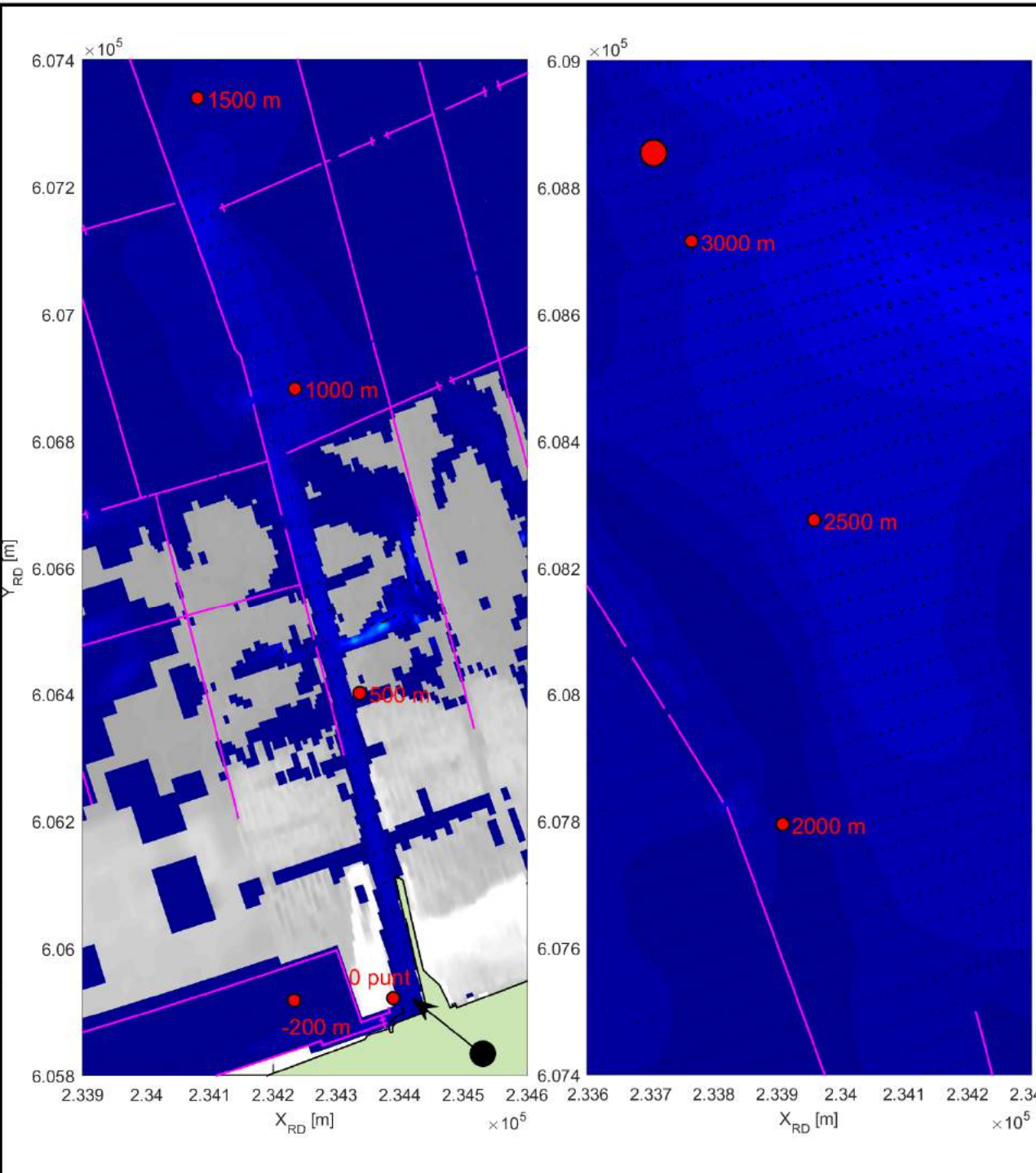
Dieptegemiddelde stroomsnelheid op:  
25-Jan-2017 21:30, met speelmeer

Delft3D

WP2016.1032

run085\_spm5  
10ha

Figuur E3.14



Stroomsnelheid Noordpolderzijl

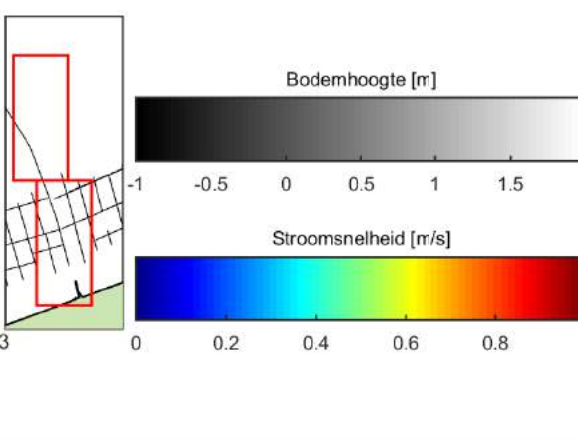
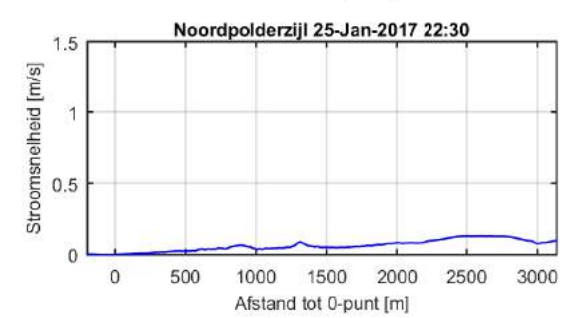
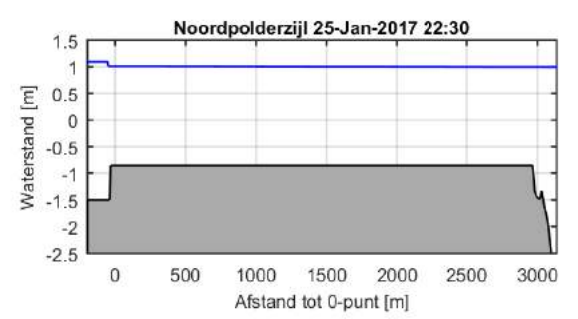
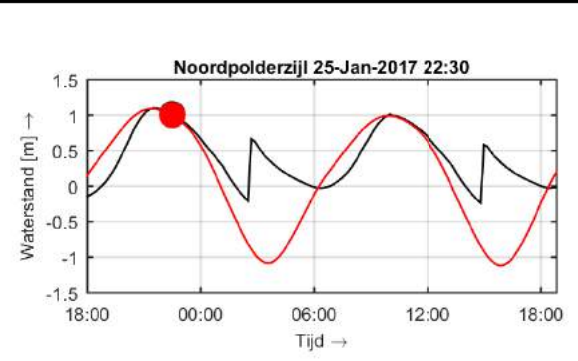
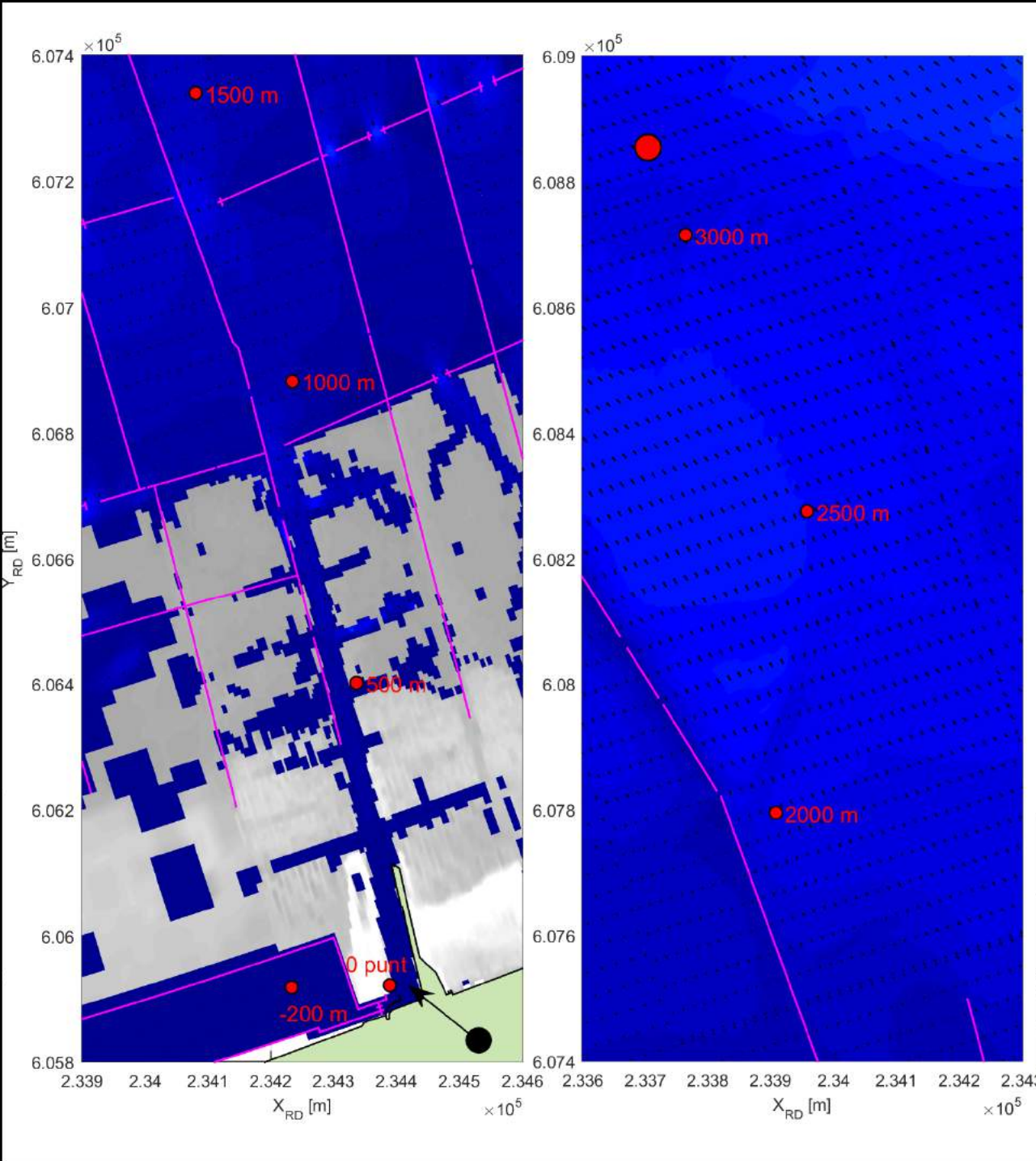
Dieptegemiddelde stroomsnelheid op:  
25-Jan-2017 22:30, met speelmeer

Delft3D

WP2016.1032

run085\_spm5  
10ha

Figuur E3.15



Stroomsnelheid Noordpolderzijl

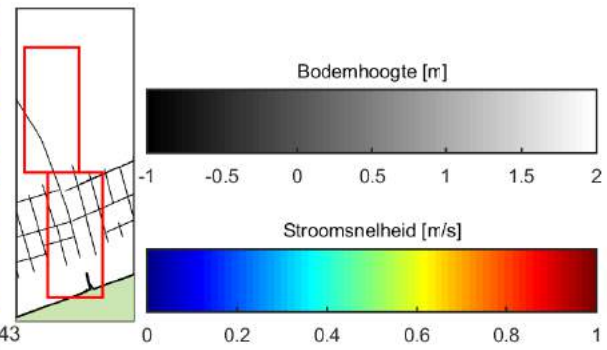
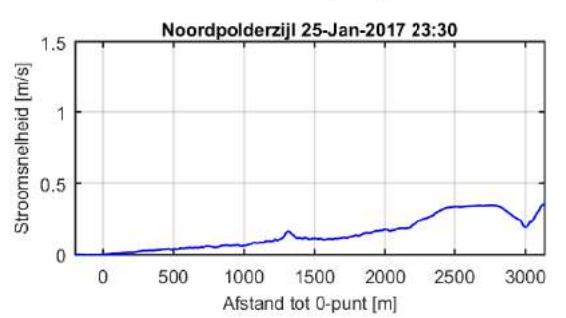
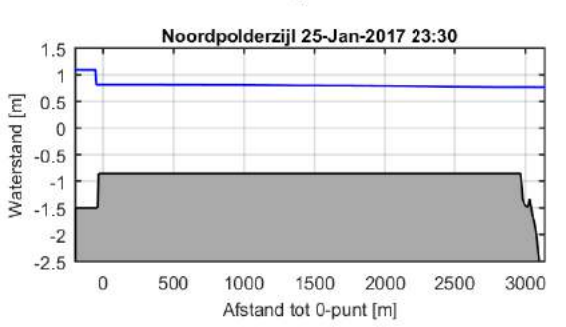
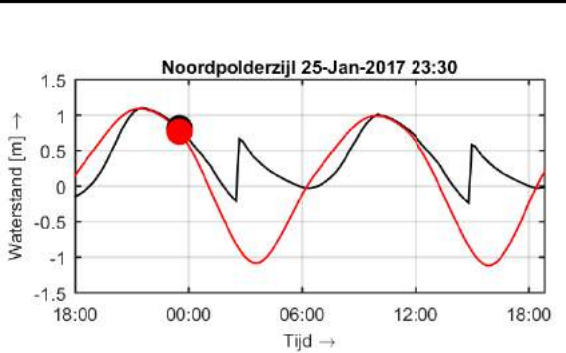
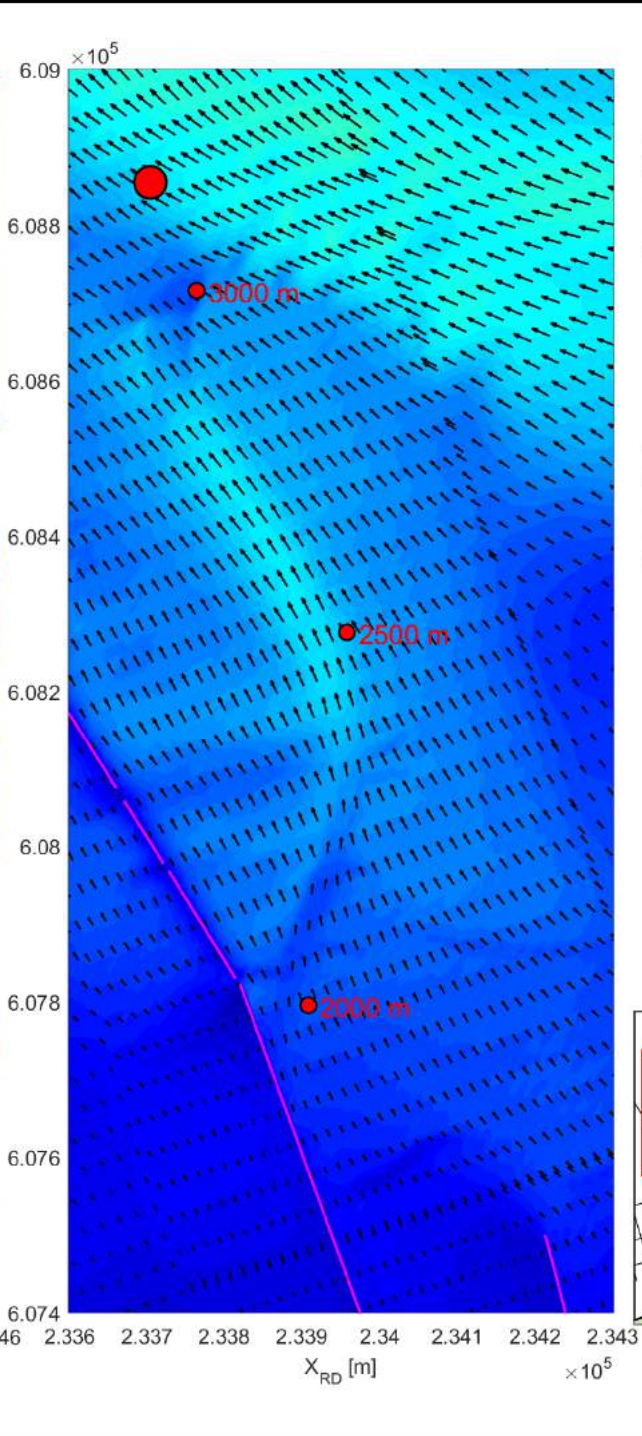
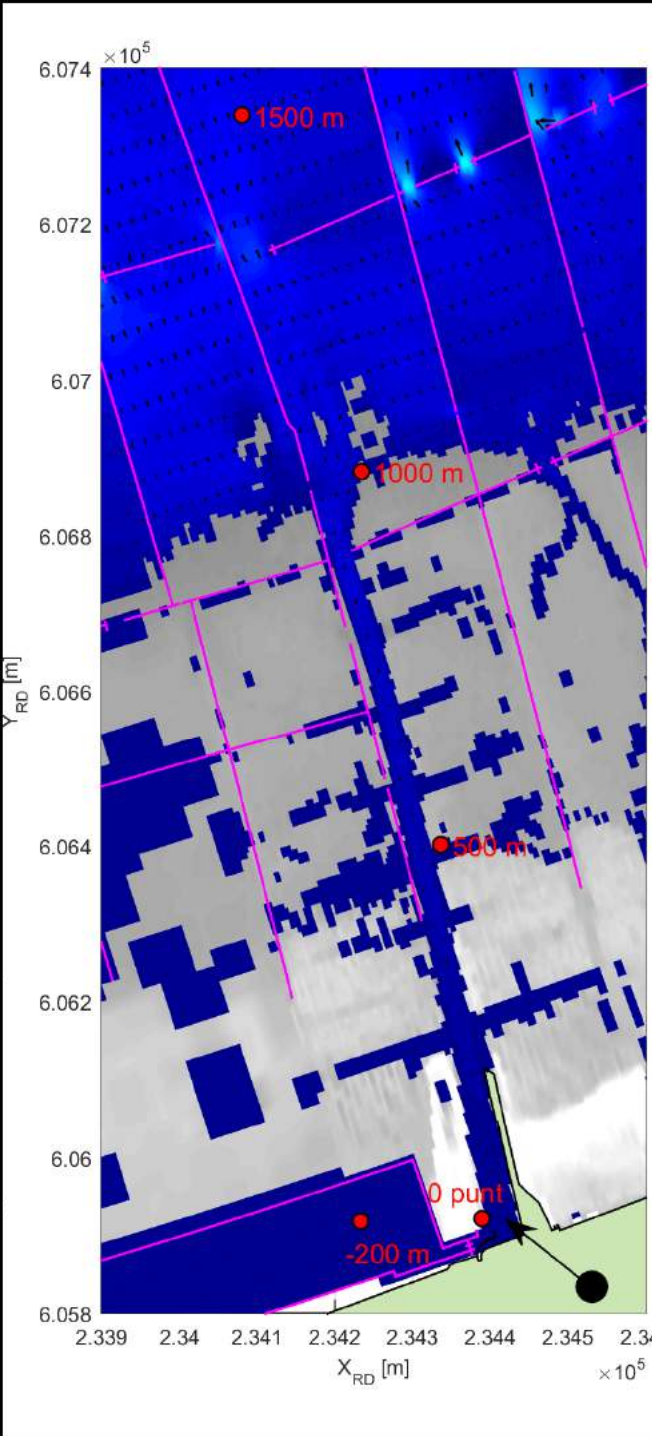
Dieptegemiddelde stroomsnelheid op:  
25-Jan-2017 23:30, met speelmeer

Delft3D

run085\_spm5  
10ha

WP2016.1032

Figur E3.16





Stroomsnelheid Noordpolderzijl

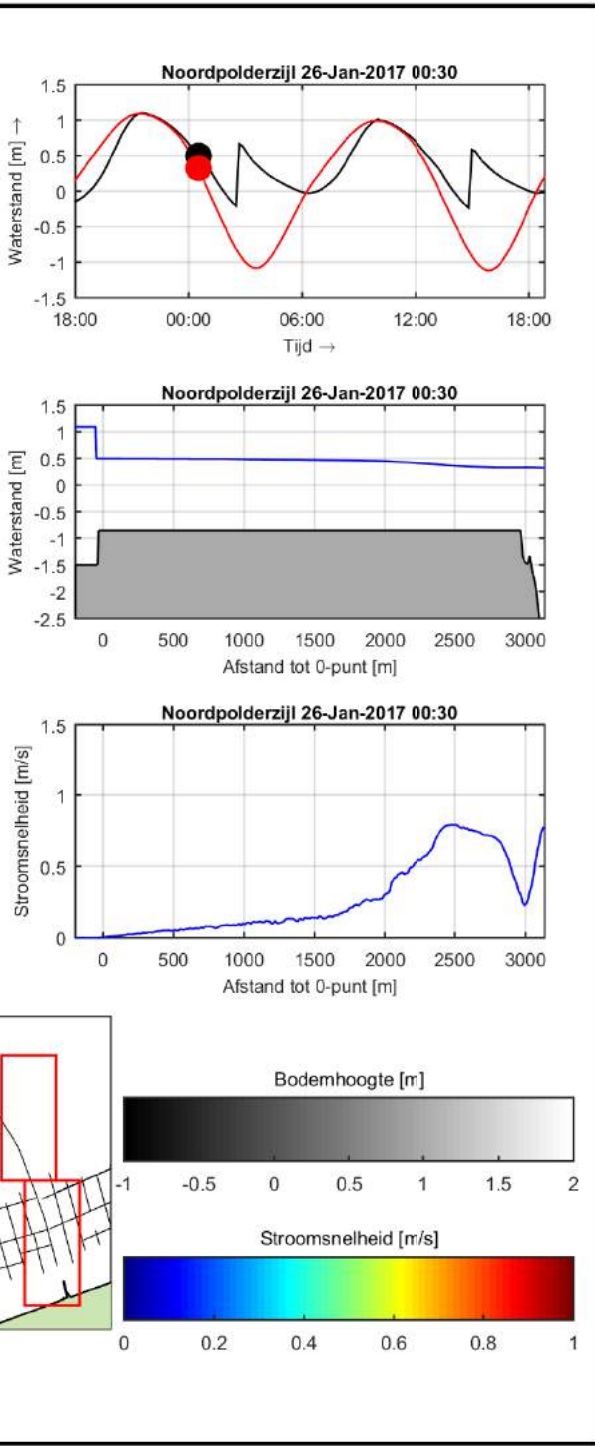
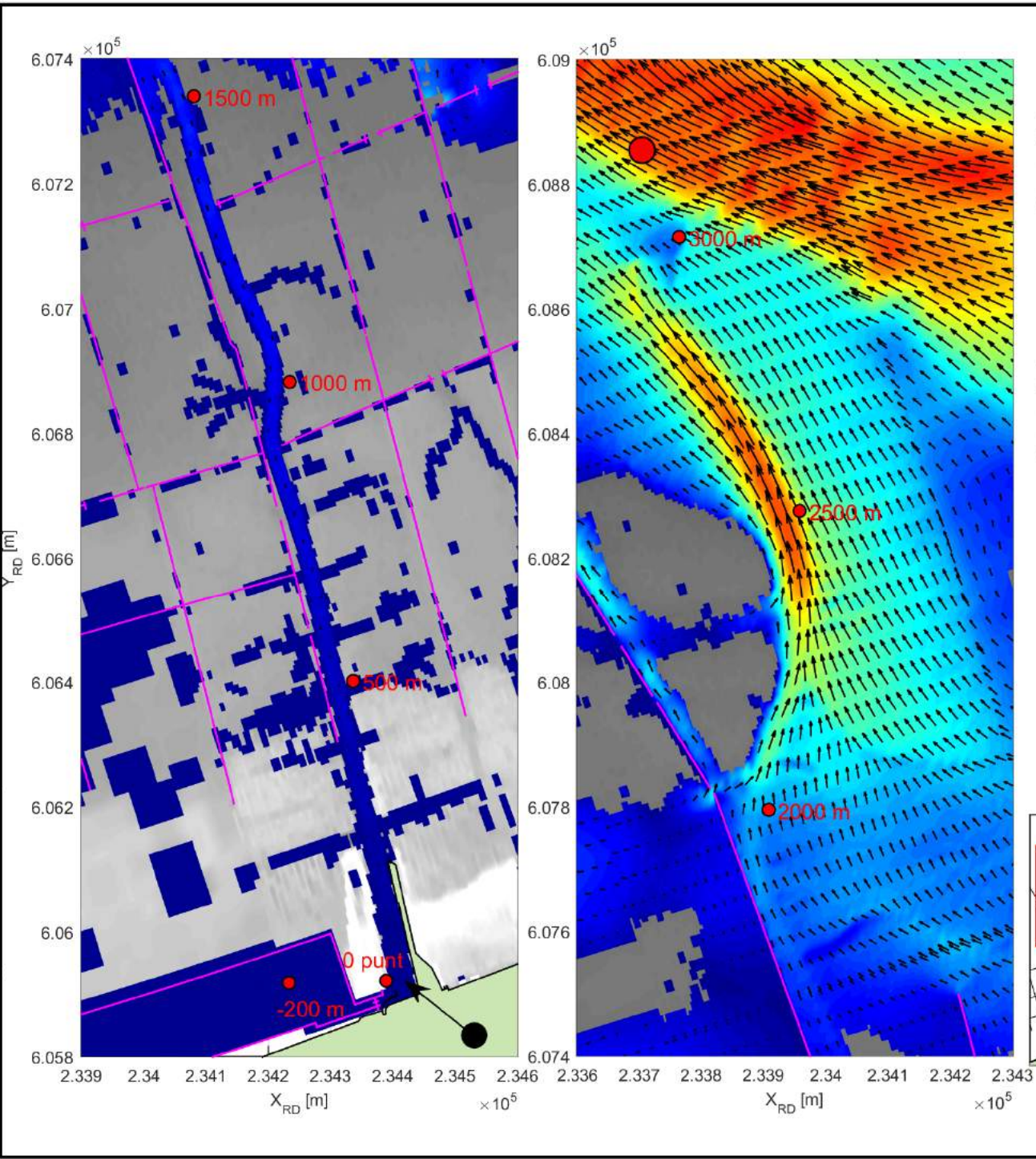
Dieptegemiddelde stroomsnelheid op:  
26-Jan-2017 00:30, met speelmeer

Delft3D

run085\_spm5  
10ha

WP2016.1032

Figur E3.17



Stroomsnelheid Noordpolderzijl

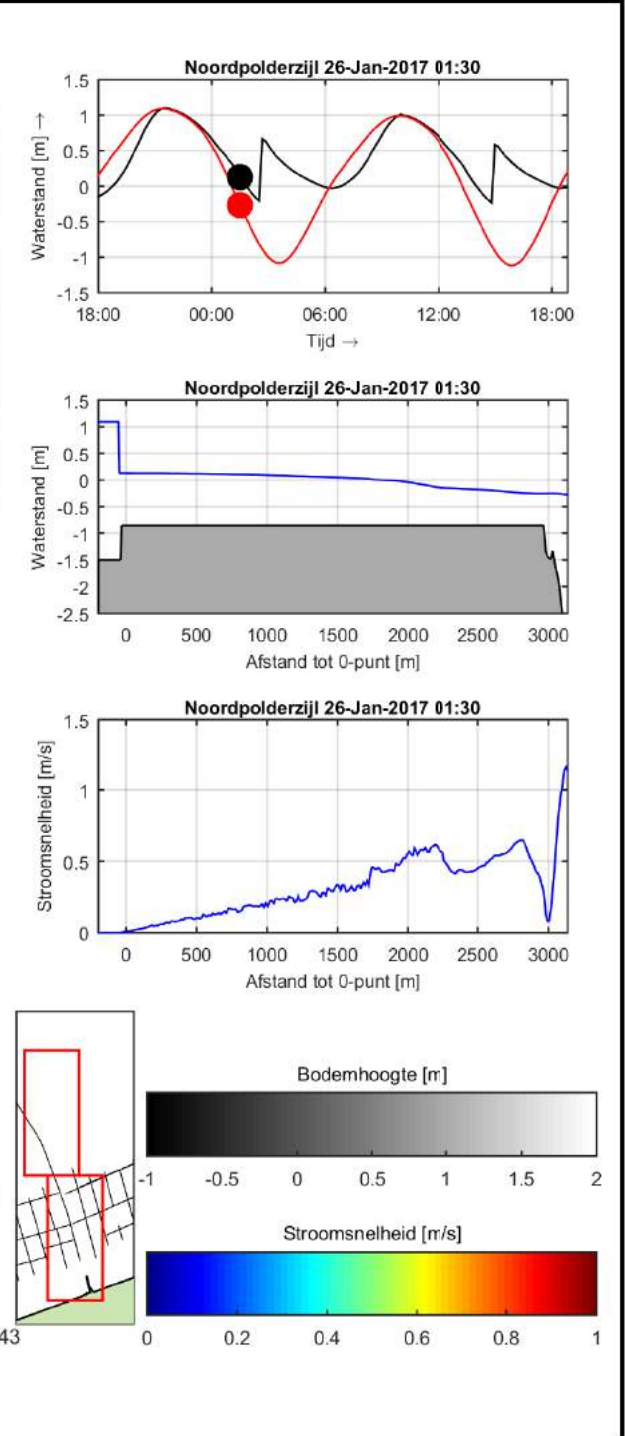
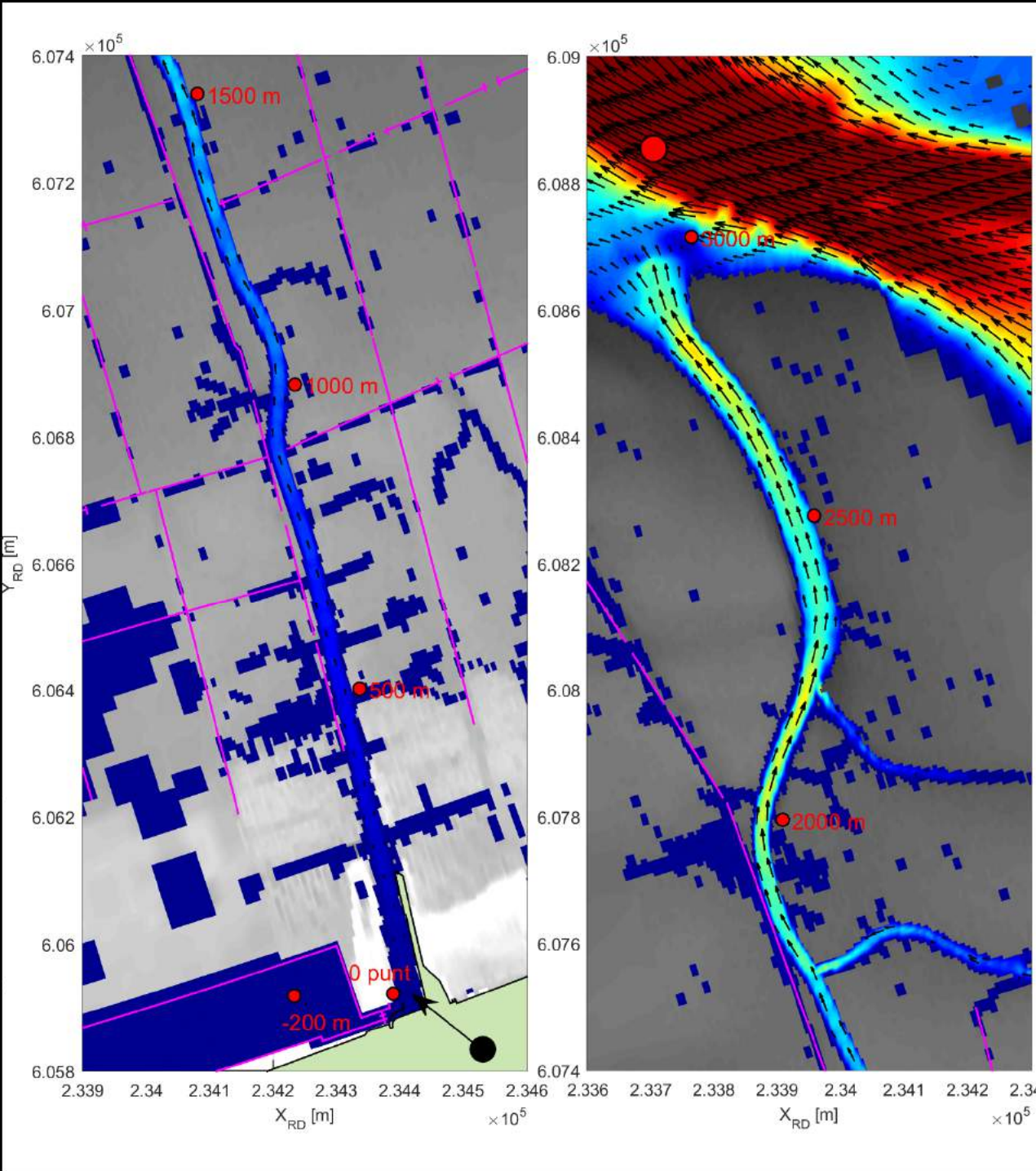
Dieptegemiddelde stroomsnelheid op:  
26-Jan-2017 01:30, met speelmeer

Delft3D

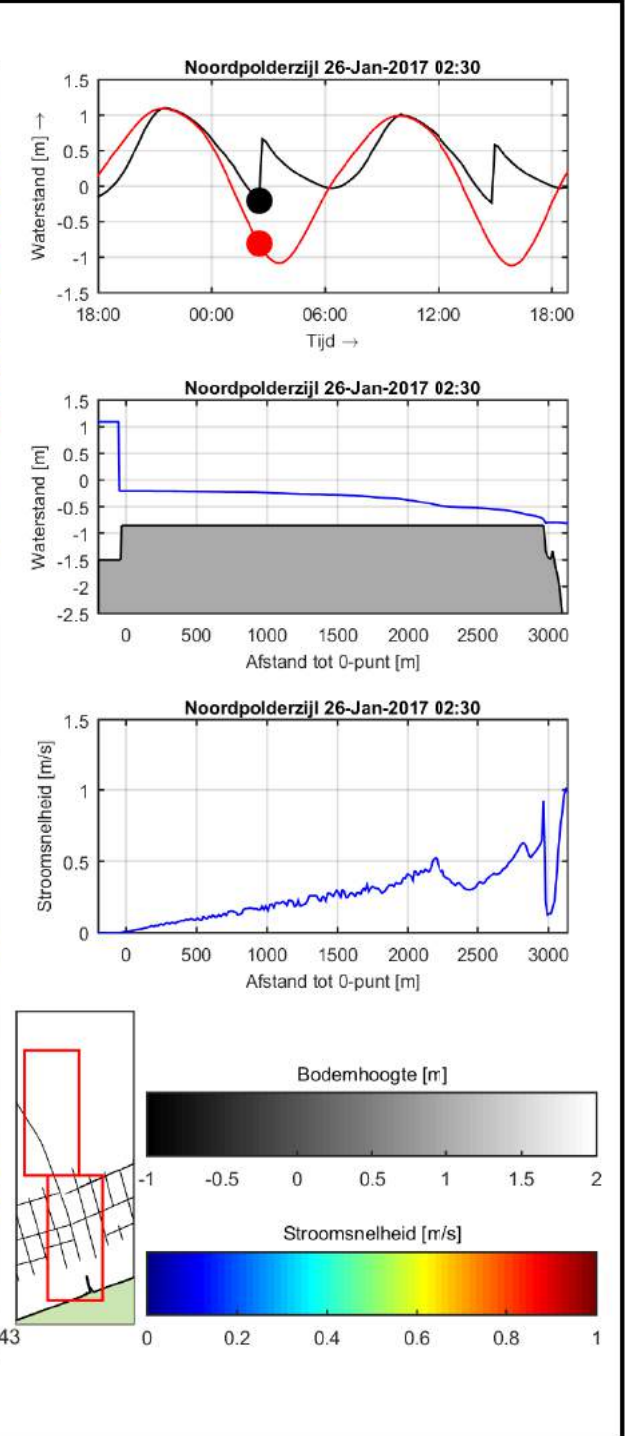
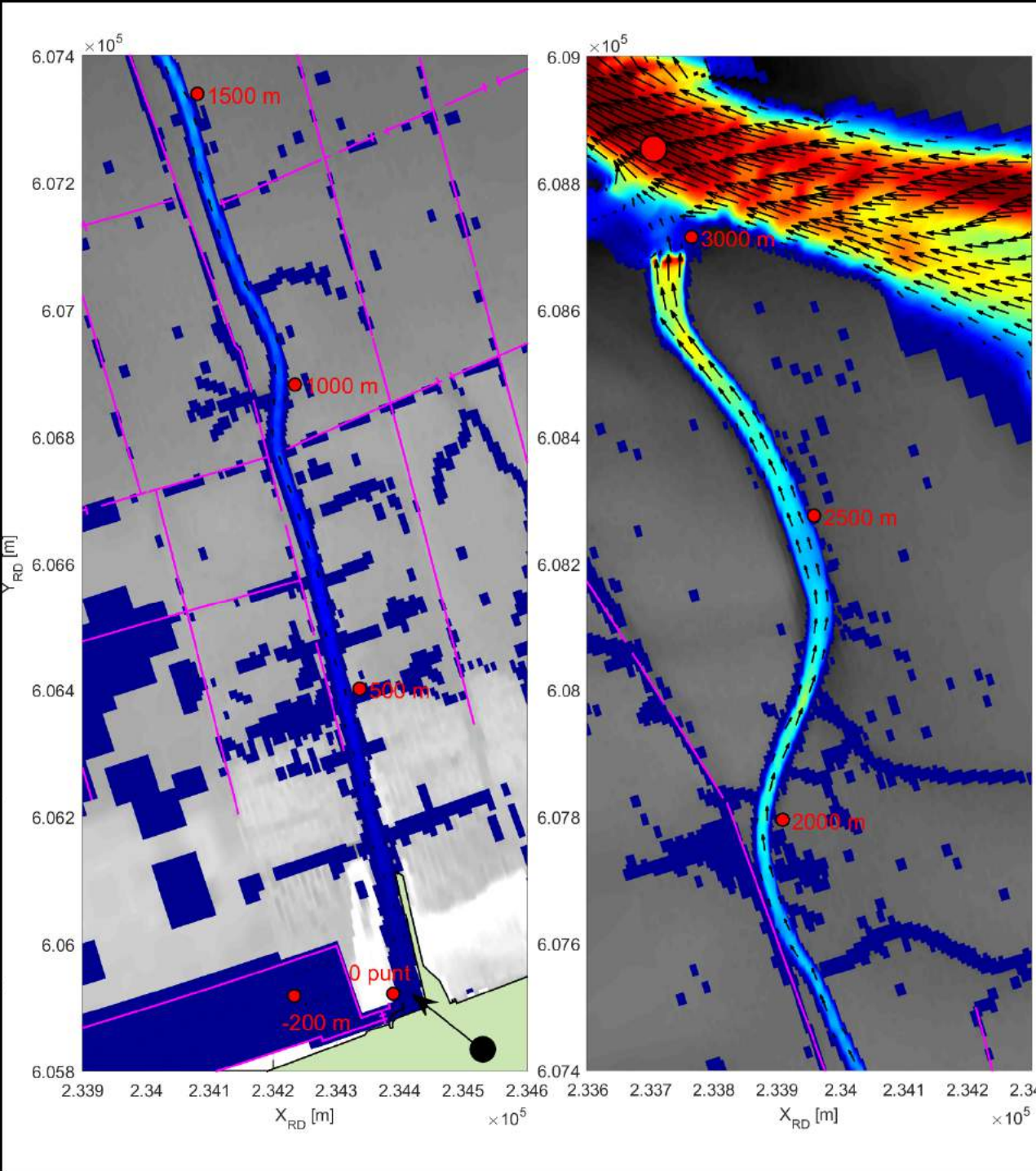
WP2016.1032

run085\_spm5  
10ha

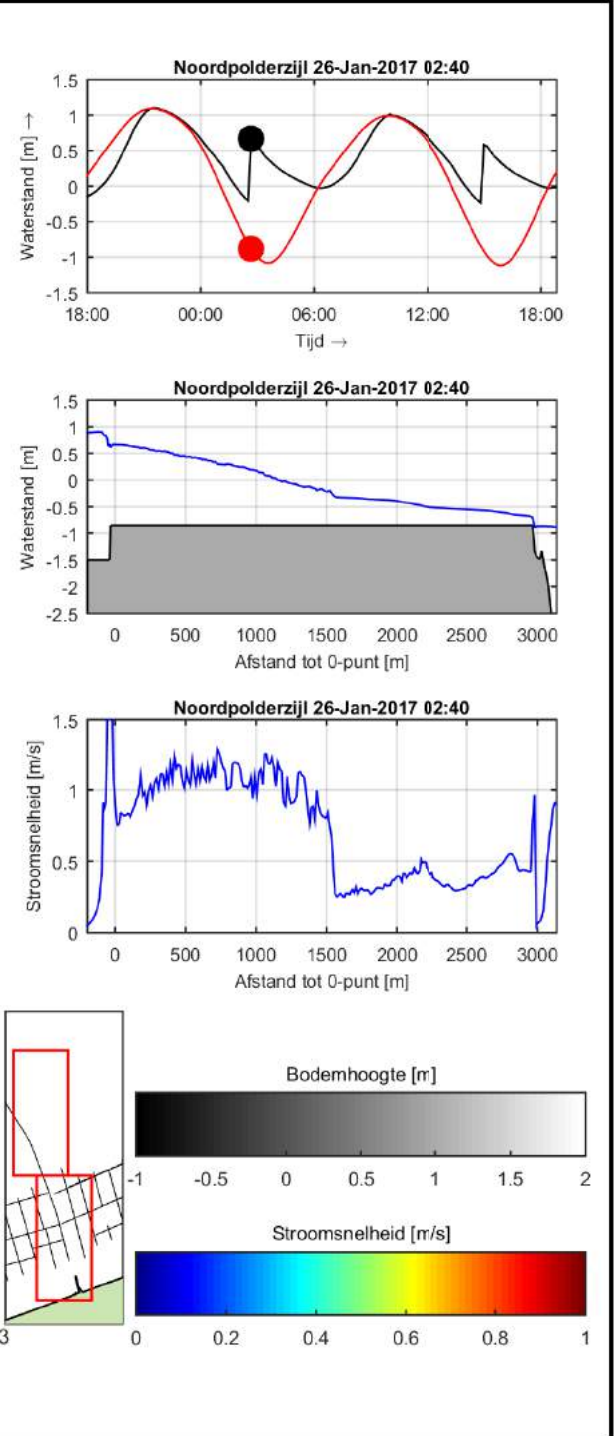
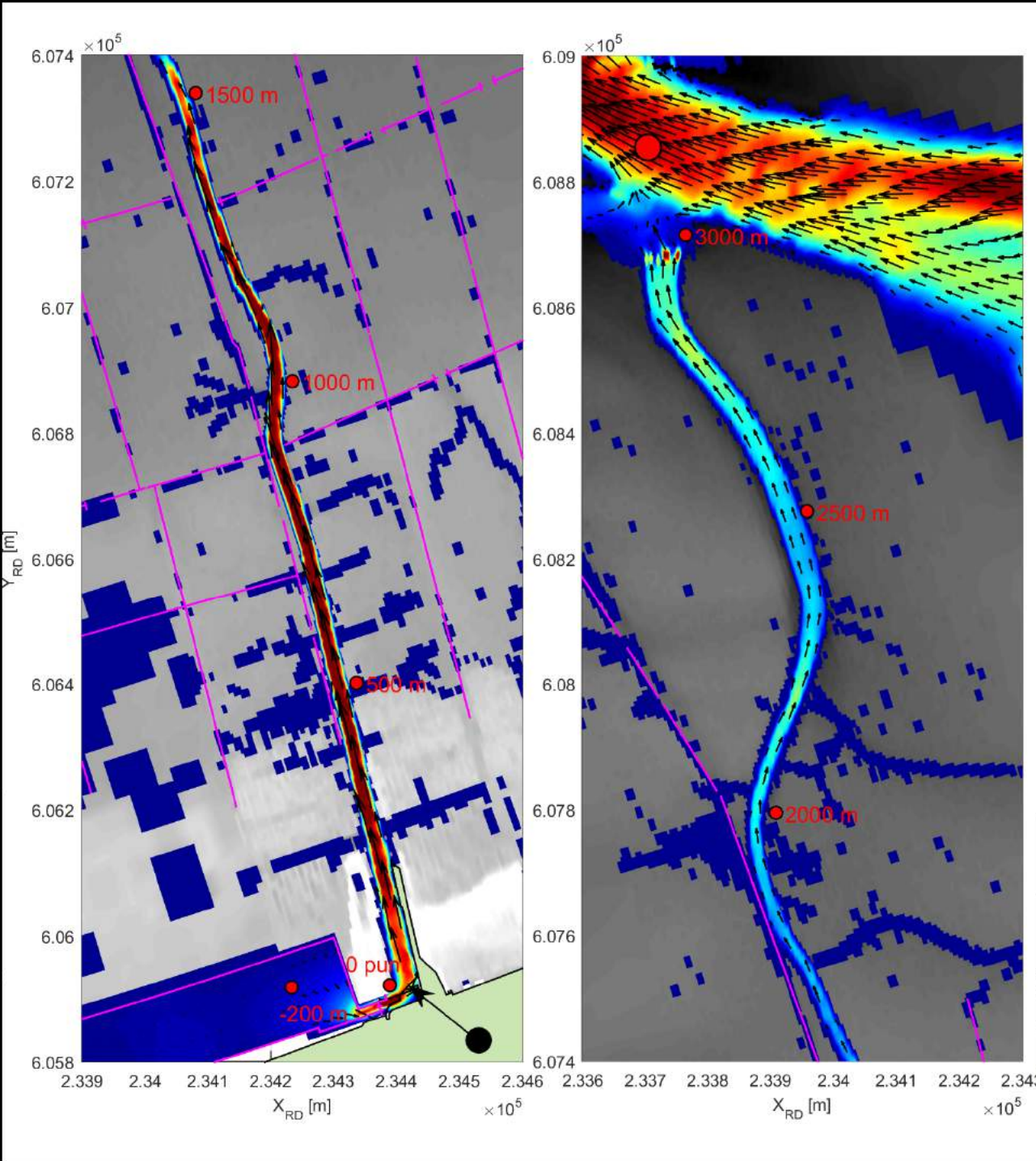
Figuur E3.18



|                                |   |                     |
|--------------------------------|---|---------------------|
| Stroomsnelheid Noordpolderzijl | Dieptegemiddelde stroomsnelheid op:<br>26-Jan-2017 02:30, met speelmeer |                     |
|                                | Delft3D   | run085_spm5<br>10ha |
|                                | WP2016.1032   |                     |
| Figuur E3.19                   |   |                     |



|                                |   |                     |
|--------------------------------|---|---------------------|
| Stroomsnelheid Noordpolderzijl | Dieptegemiddelde stroomsnelheid op:<br>26-Jan-2017 02:40, met spoelmeer |                     |
|                                | Delft3D   | run085_spm5<br>10ha |
|                                | WP2016.1032   |                     |
| Figur E3.20                    |   |                     |



Stroomsnelheid Noordpolderzijl

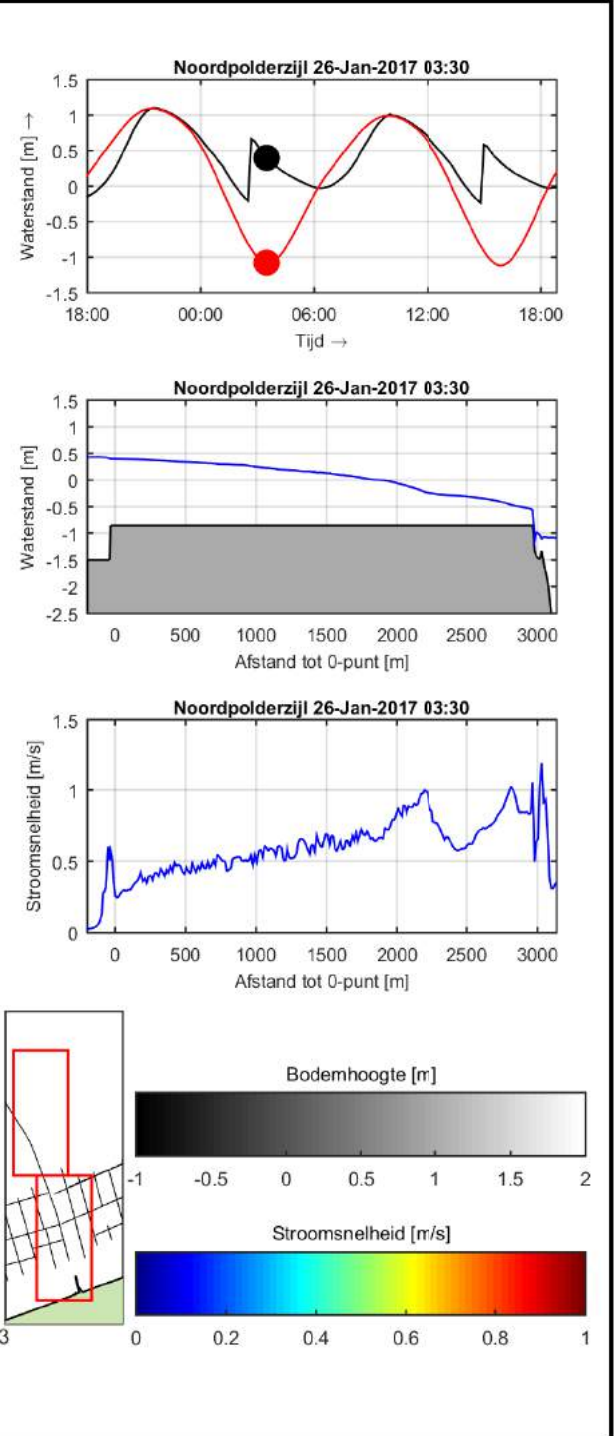
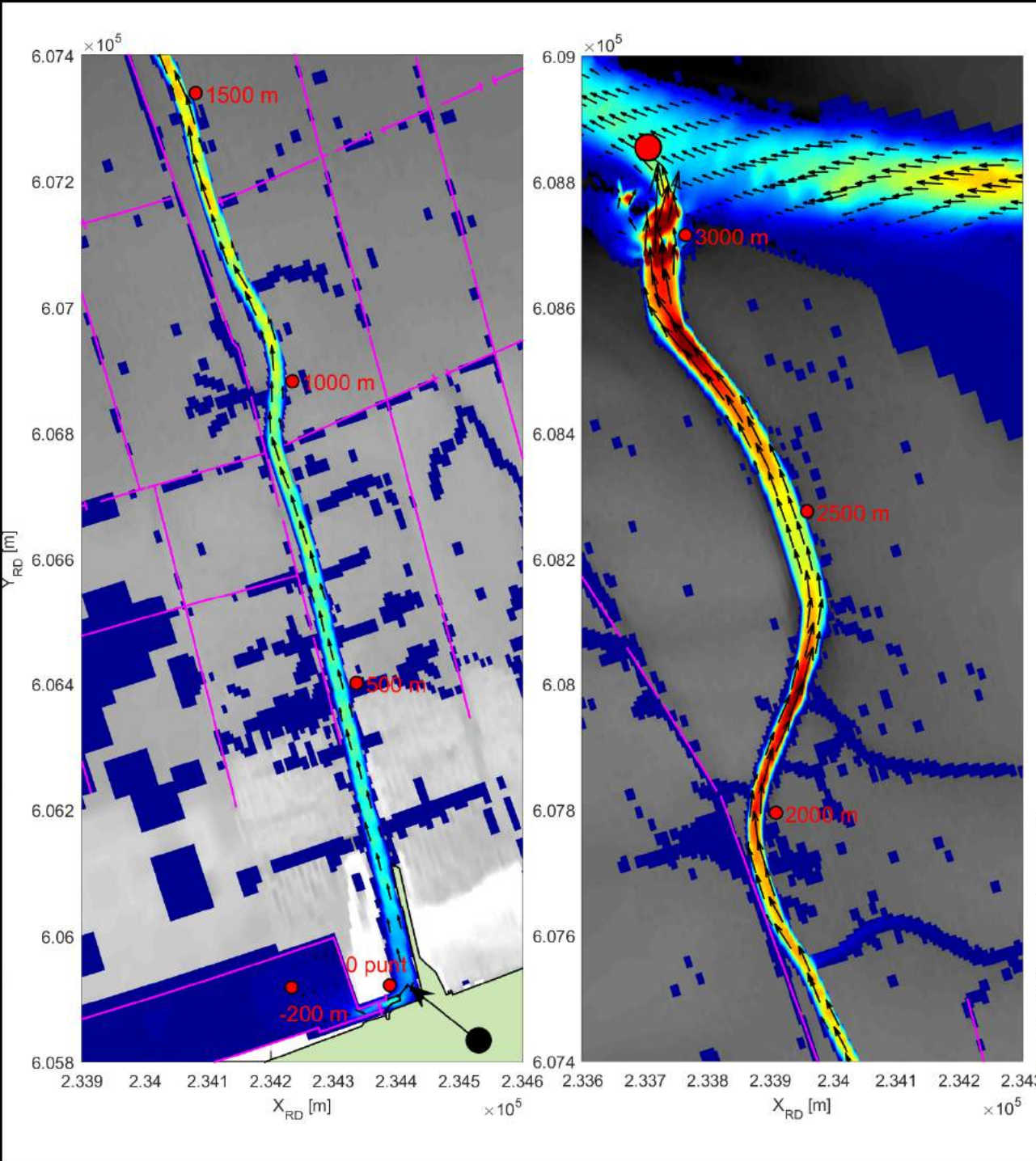
Dieptegemiddelde stroomsnelheid op:  
26-Jan-2017 03:30, met speelmeer

Delft3D

run085\_spm5  
10ha

WP2016.1032

Figuur E3.21



Stroomsnelheid Noordpolderzijl

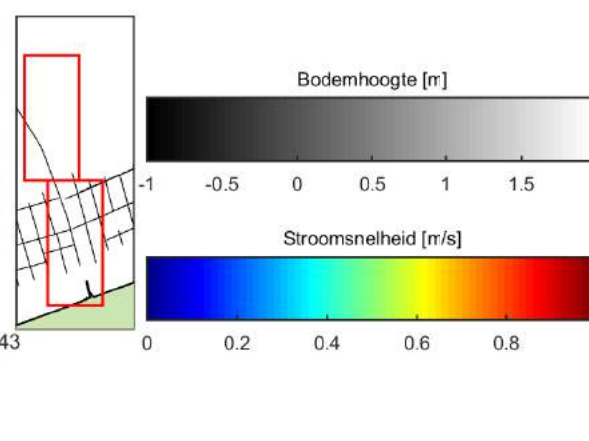
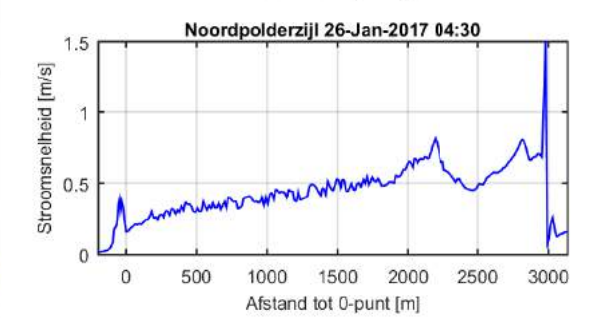
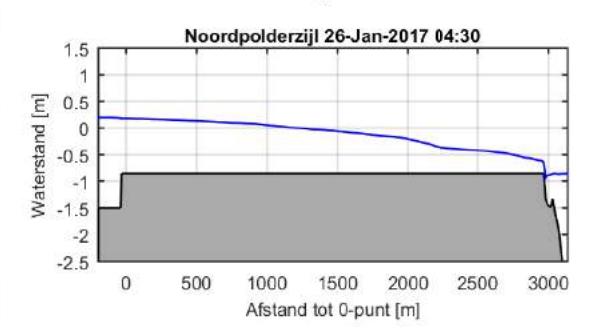
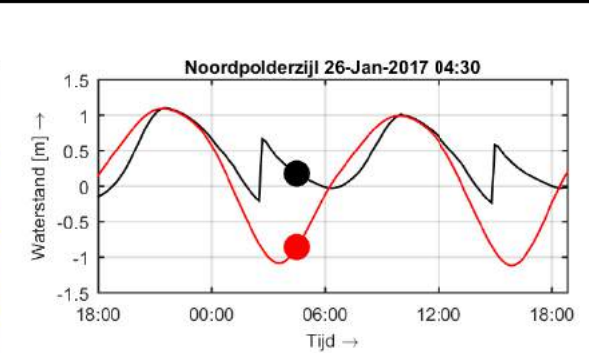
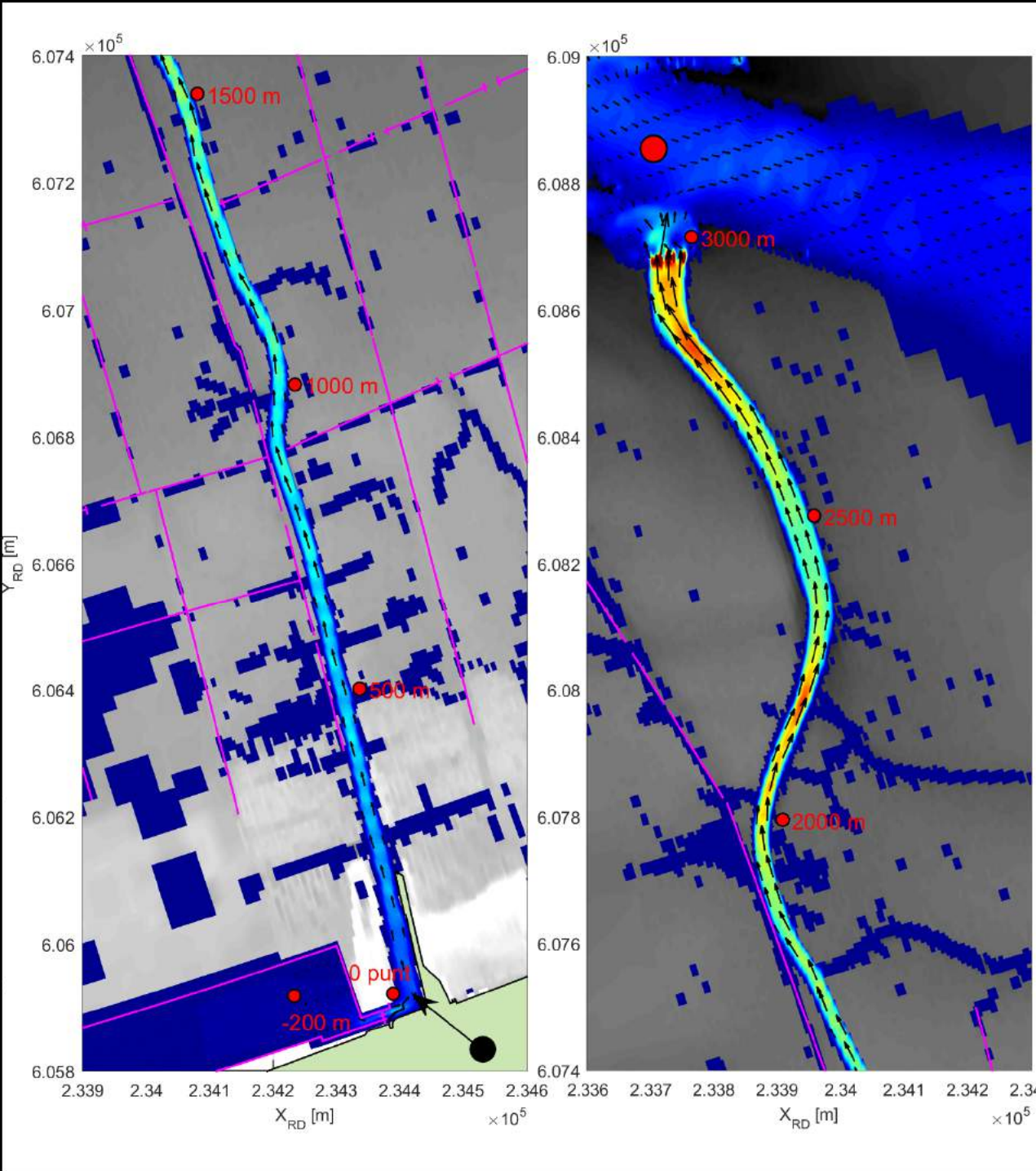
Dieptegemiddelde stroomsnelheid op:  
26-Jan-2017 04:30, met speelmeer

Delft3D

WP2016.1032

run085\_spm5  
10ha

Figur E3.22



Stroomsnelheid Noordpolderzijl

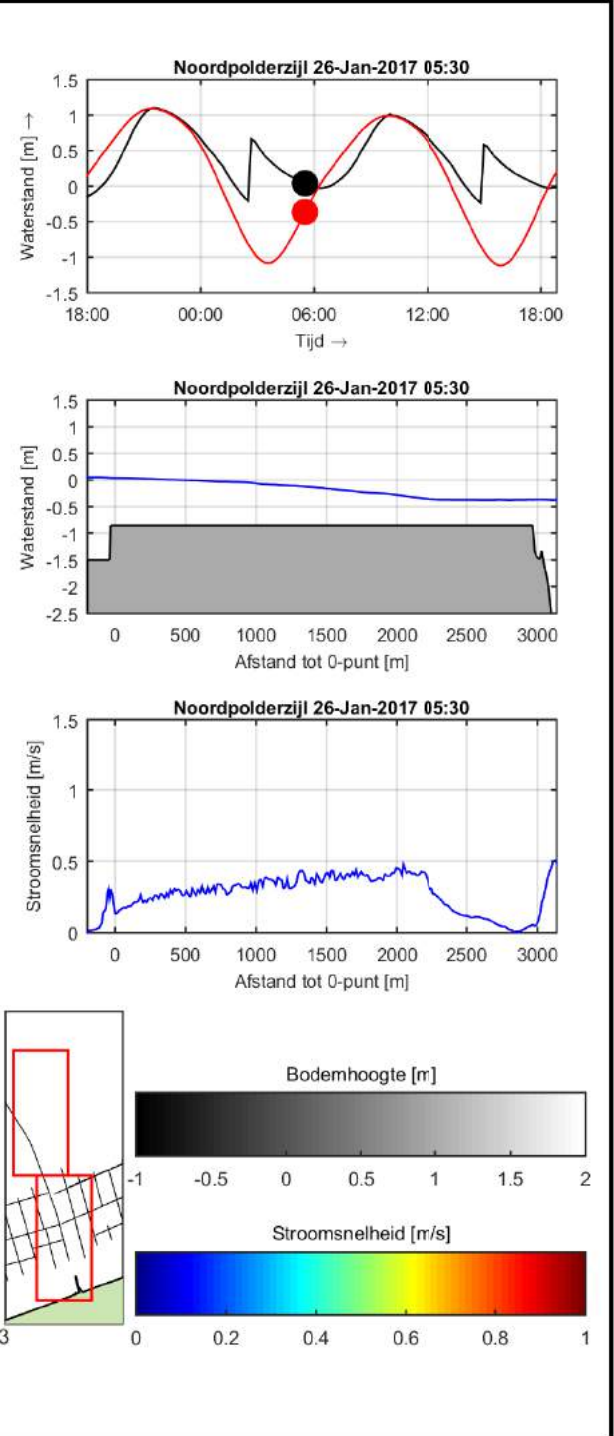
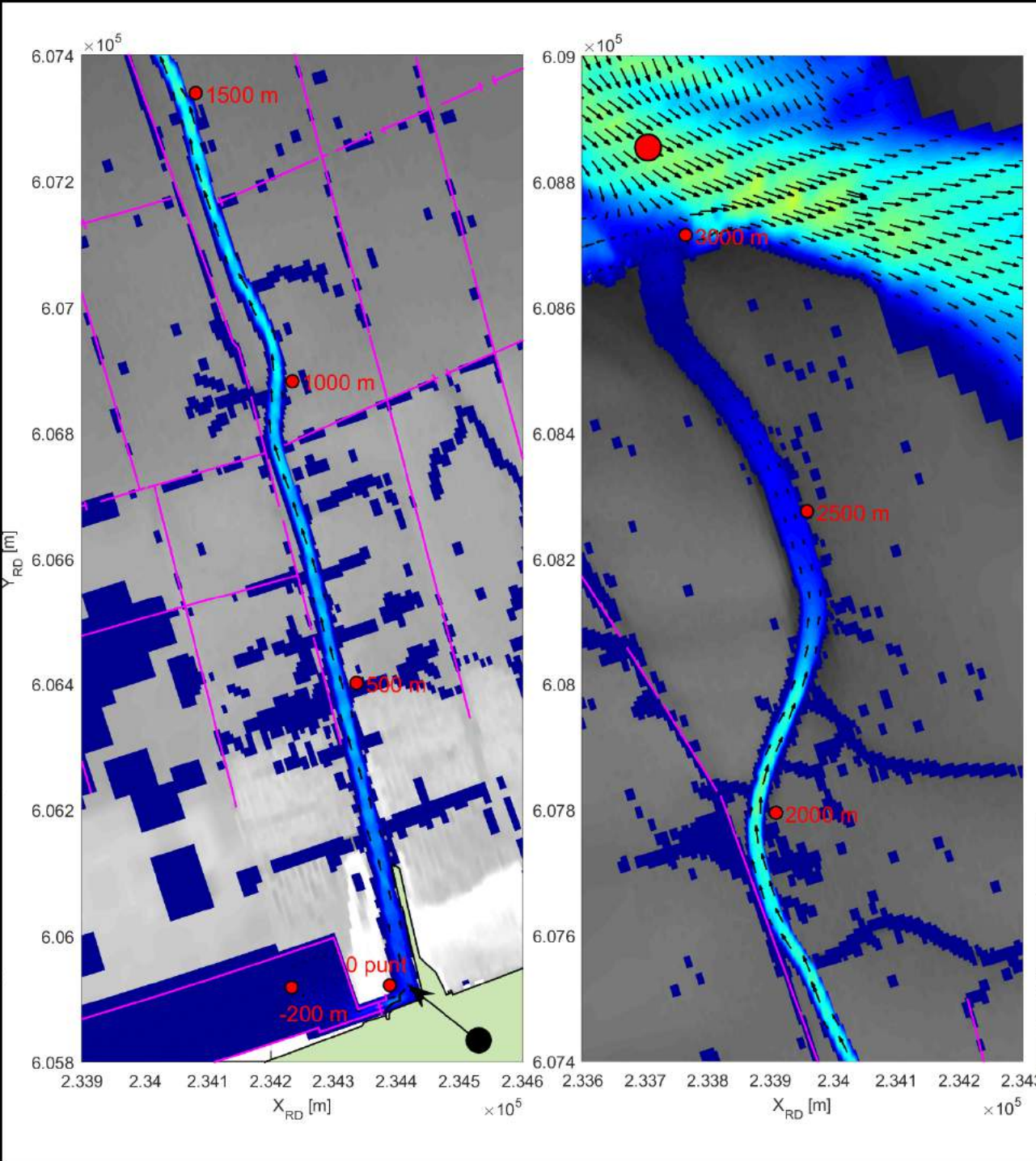
Dieptegemiddelde stroomsnelheid op:  
26-Jan-2017 05:30, met speelmeer

Delft3D

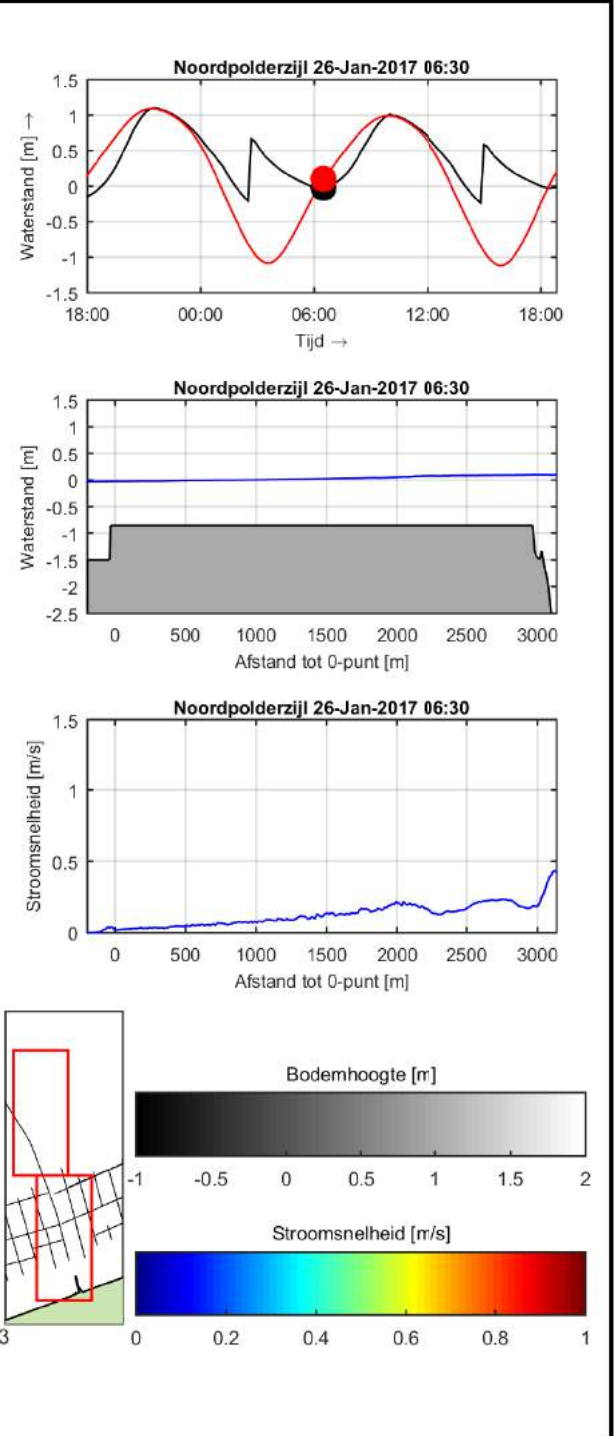
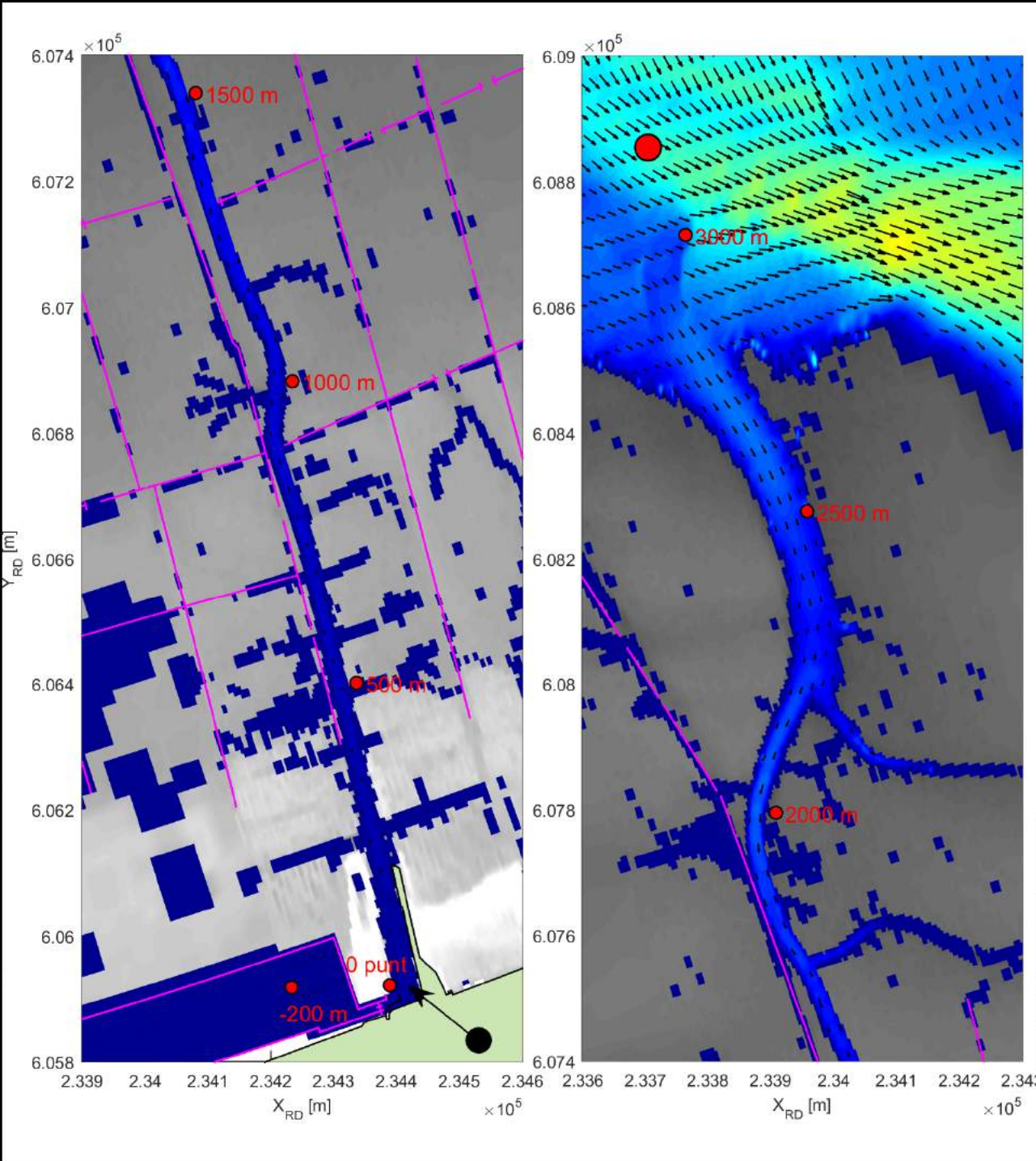
WP2016.1032

run085\_spm5  
10ha

Figur E3.23



|                                |   |                     |
|--------------------------------|---|---------------------|
| Stroomsnelheid Noordpolderzijl | Dieptegemiddelde stroomsnelheid op:<br>26-Jan-2017 06:30, met spoelmeer |                     |
|                                | Delft3D   | run085_spm5<br>10ha |
|                                | WP2016.1032   |                     |
| Figuur E3.24                   |   |                     |





Stroomsnelheid Noordpolderzijl

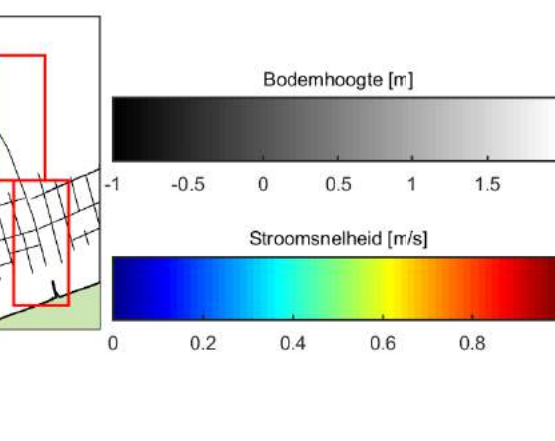
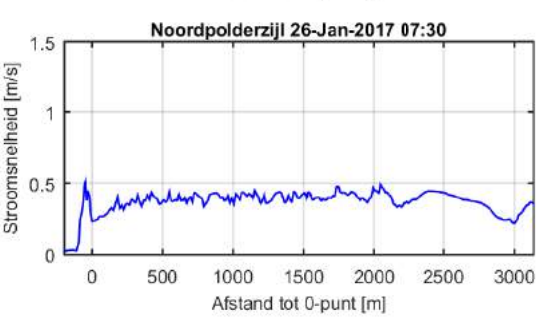
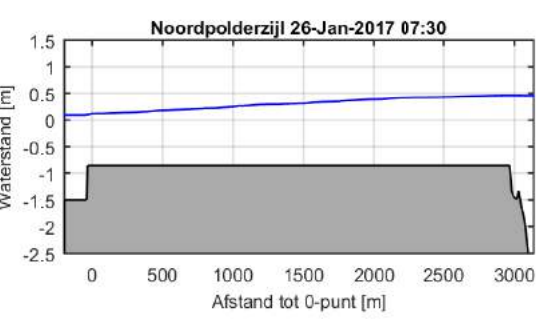
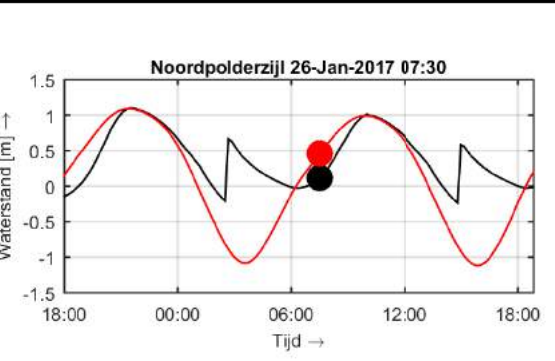
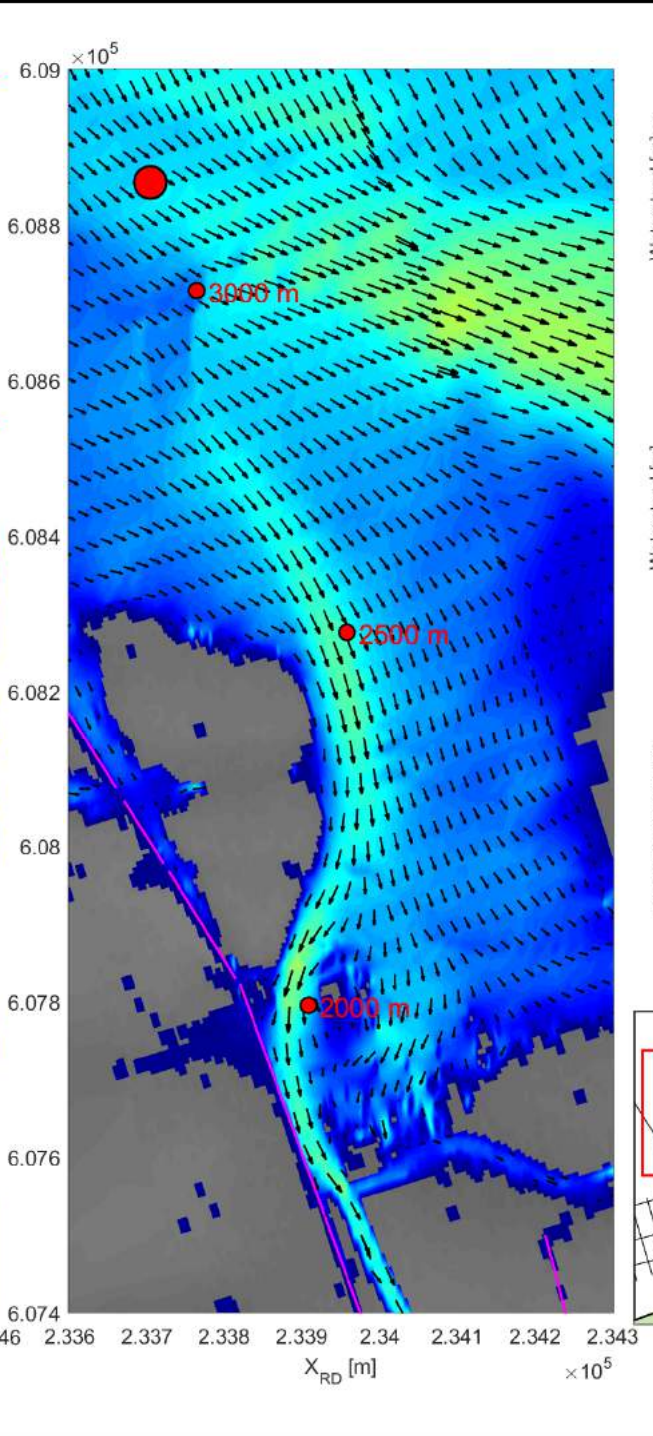
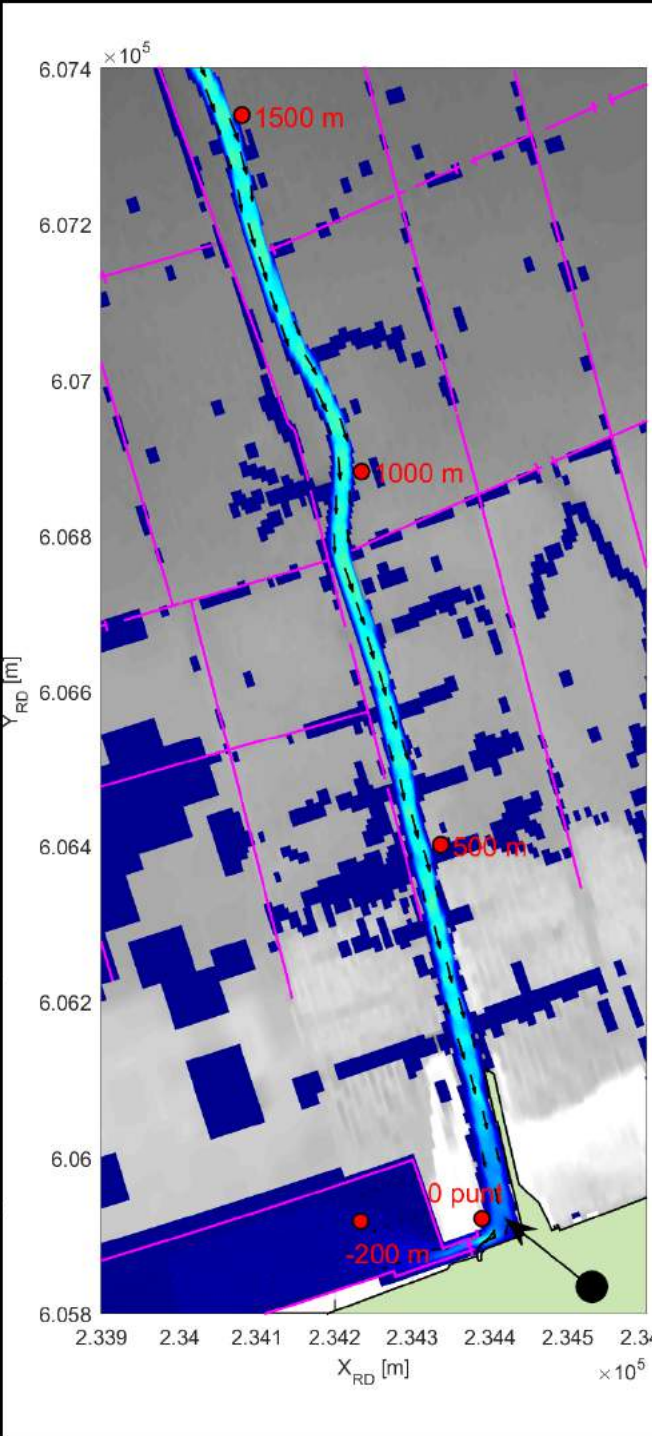
Dieptegemiddelde stroomsnelheid op:  
26-Jan-2017 07:30, met speelmeer

Delft3D

WP2016.1032

run085\_spm5  
10ha

Figuur E3.25



Stroomsnelheid Noordpolderzijl

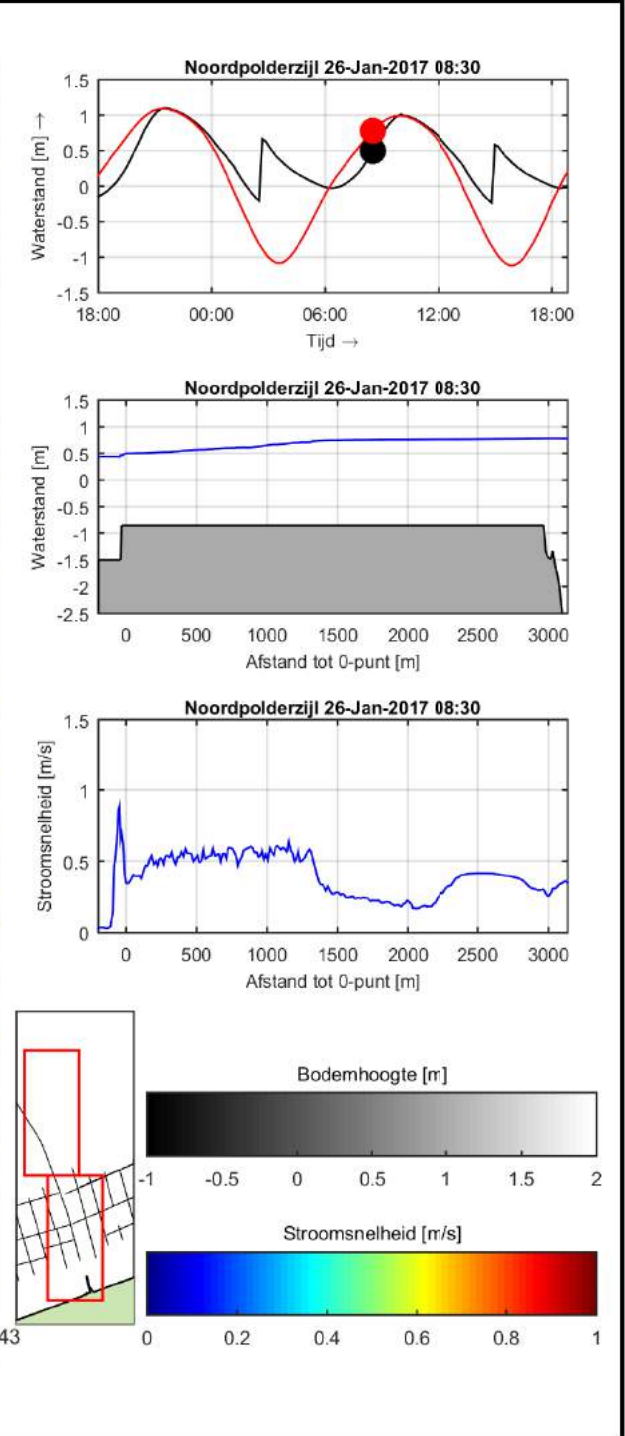
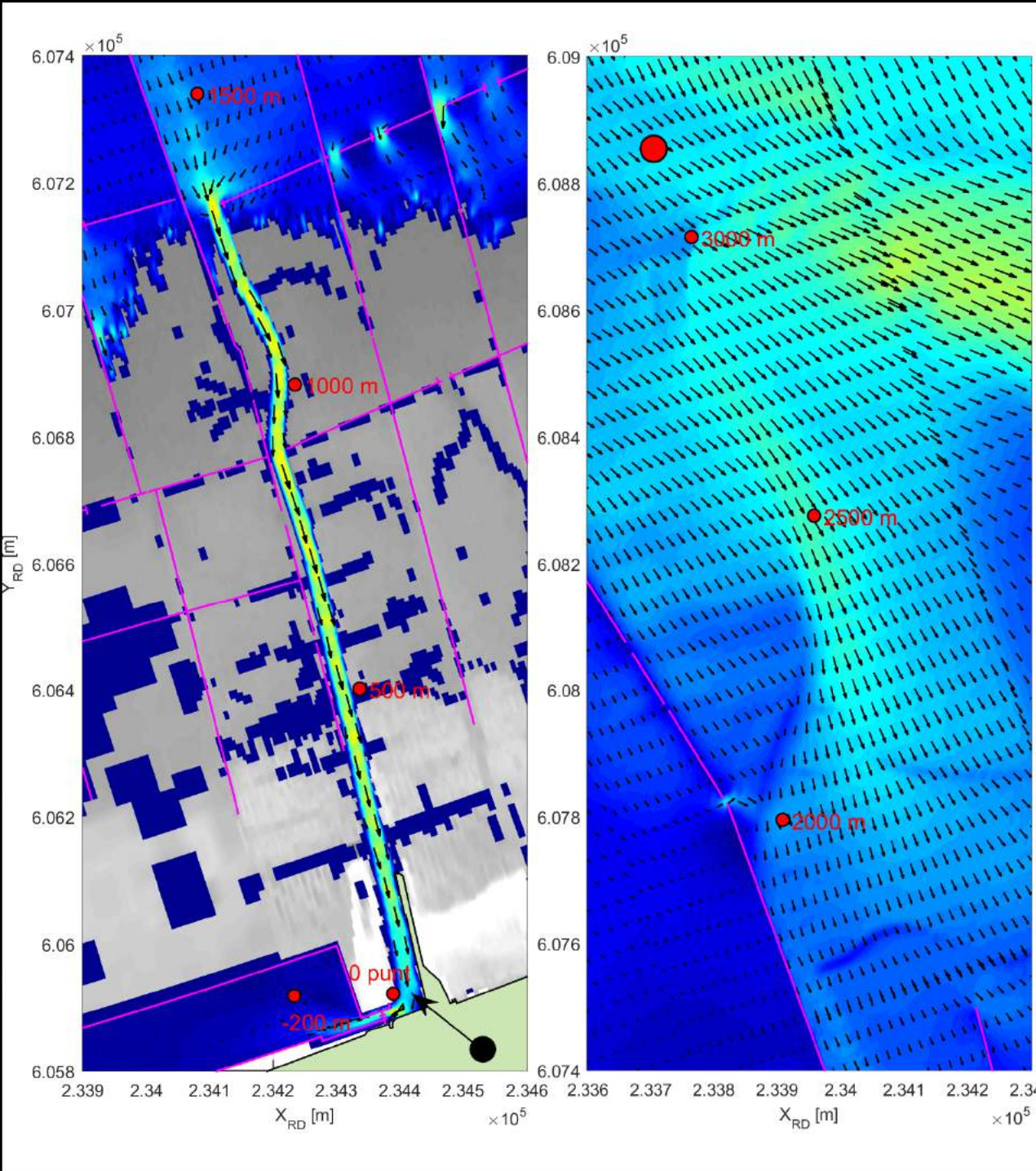
Dieptegemiddelde stroomsnelheid op:  
26-Jan-2017 08:30, met speelmeer

Delft3D

run085\_spm5  
10ha

WP2016.1032

Figur E3.26



Stroomsnelheid Noordpolderzijl

Dieptegemiddelde stroomsnelheid op:  
26-Jan-2017 09:30, met speelmeer

Delft3D

run085\_spm5  
10ha

WP2016.1032

Figuur E3.27

