

Haven van Zeebrugge Optimalisatie maritieme toegankelijkheid

ONDERZOEK NAAR DE WATER- EN SEDIMENTUITWISSELING
TER HOOGTE VAN DE HAVENMOND



843_01 WL Rapporten

Haven van Zeebrugge

Optimalisatie maritieme toegankelijkheid

Onderzoek naar de water- en sedimentuitwisseling ter hoogte van de
havenmond

Dujardin, A.; Ides, S.; Schramkowski, G.; De Mulder, T.; Mostaert, F.

Mei 2009

WL2009R843_01_rev3_0

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Dujardin, A.; Ides, S.; Schramkowski, G.; De Mulder, T.; Mostaert, F. (2009). Haven van Zeebrugge – Optimalisatie maritieme toegankelijkheid: Onderzoek naar de water- en sedimentuitwisseling ter hoogte van de havenmond. Versie 3_0. WL Rapporten, 843_01. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België



Waterbouwkundig Laboratorium

Flanders Hydraulics Research

Berchemlei 115
B-2140 Antwerpen
Tel. +32 (0)3 224 60 35
Fax +32 (0)3 224 60 36
E-mail: waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be
www.watlab.be

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaandelijke schriftelijke toestemming van de uitgever.



Documentidentificatie

| | | | |
|-----------------|---|--|---|
| Titel: | Haven van Zeebrugge – Optimalisatie maritieme toegankelijkheid: Onderzoek naar de water- en sedimentuitwisseling ter hoogte van de havenmond | | |
| Opdrachtgever: | afdeling Maritieme Toegang | Ref.: | WL2009R843_01_rev3_0 |
| Keywords (3-5): | Zeebrugge, wateruitwisselingsprocessen havenmond, numeriek model | | |
| Tekst (p.): | 31 | Tabellen (p.): | / |
| Bijlagen (p.): | 165 | Figuren (p.): | / |
| Vertrouwelijk: | <input type="checkbox"/> Ja | Uitzondering: | <input type="checkbox"/> Opdrachtgever |
| | | | <input type="checkbox"/> Intern |
| | | | <input type="checkbox"/> Vlaamse overheid |
| | | Vrijgegeven vanaf | |
| | <input checked="" type="checkbox"/> Nee | <input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar | |

Goedkeuring

| | | | |
|--------------------------|------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| Auteur Arvid Dujardin | Revisor dr. George Schramkowski | Projectleider Stefaan Ides | Afdelingshoofd dr. Frank Mostaert |
|--------------------------|------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|

Revisies

| Nr. | Datum | Omschrijving | Auteur |
|-----|------------|-----------------------|------------------|
| 1_0 | 22/10/2008 | Conceptversie | Dujardin, A. |
| 1_1 | 24/10/2008 | Inhoudelijke revisie | Ides, S. |
| 1_2 | 03/12/2008 | Revisie opdrachtgever | Martens, C. |
| 1_3 | 08/12/2008 | Inhoudelijke revisie | Schramkowski, S. |
| 2_0 | 12/12/2008 | Conceptversie | Dujardin, A. |
| 2_1 | 17/12/2008 | Inhoudelijke revisie | Ides, S. |
| 2_2 | 10/04/2009 | Inhoudelijke revisie | Ides, S. |
| 2_3 | 16/04/2009 | Conceptversie | Dujardin, A. |
| 2_4 | 04/05/2009 | Revisie opdrachtgever | Martens, C. |
| 3_0 | 25/05/2009 | Definitieve versie | Dujardin, A. |

Abstract

Door de afdeling Maritieme Toegang wordt aan het Waterbouwkundig Laboratorium gevraagd om de nautische toegankelijkheid van de haven van Zeebrugge te bestuderen. Enerzijds is er het probleem van de grote dwarsstromingen ter hoogte van de vaargeul de Pas van het Zand die het invaren van grote zeeschepen gedurende de periode van maximale waterstand verhinderd, anderzijds is er het probleem van de aanslibbing in de haven en de daaraan gekoppelde hoge onderhoudsbaggerkosten. Door het Waterbouwkundig Laboratorium wordt een grootschalig onderzoeksplan opgesteld waarbij deze problematiek bestudeerd zal worden.

Alvorens over te gaan tot modelleren, wordt een analyse uitgevoerd van de processen in de natuur. In dit rapport wordt de water- en sedimentuitwisseling ter hoogte van de havenmond bestudeerd op basis van enerzijds natuurmetingen en anderzijds een numeriek model van de omgeving van Zeebrugge.

Inhoudsopgave

| | |
|--|-------------|
| <i>Inhoudsopgave</i> | <i>I</i> |
| <i>Lijst van de tabellen</i> | <i>II</i> |
| <i>Lijst van de figuren</i> | <i>III</i> |
| 1 Inleiding | 1 |
| 2 Beschikbare metingen | 2 |
| 3 Wateruitwisseling door de havenmond – Methodiek | 4 |
| 3.1 Inleiding..... | 4 |
| 3.2 Empirisch model | 4 |
| 3.3 Numeriek model..... | 5 |
| 3.3.1 Eerste berekeningsmethode | 6 |
| 3.3.2 Tweede berekeningsmethode | 7 |
| 3.3.3 Validatie aan de hand van metingen | 9 |
| 4 Wateruitwisseling door de havenmond – Resultaten | 11 |
| 4.1 Tijvulling..... | 12 |
| 4.2 Horizontale en verticale uitwisseling | 12 |
| 4.3 Validatie | 14 |
| 5 Sedimenttransport door de havenmond | 18 |
| 5.1 Validatie van de metingen..... | 18 |
| 5.2 Samenspel wateruitwisseling en sediment | 19 |
| 5.2.1 Springtij..... | 21 |
| 5.2.2 Doodtij..... | 22 |
| 6 Conclusies en aanbevelingen | 28 |
| 7 Referenties | 30 |
| <i>Bijlage A: Vergelijking van numerieke modelresultaten bij springtij</i> | <i>B1</i> |
| <i>Bijlage B: Vergelijking van numerieke modelresultaten bij springtij:</i> | <i>B40</i> |
| <i>Bijlage C: Numerieke modelresultaten bij doodtij</i> | <i>B79</i> |
| <i>Bijlage D: Validatie van numerieke modelresultaten bij springtij: 13-uurs ADCP metingen springtij t.o.v. 3D model met zout en bovendebiet</i> | <i>B105</i> |
| <i>Bijlage E: Validatie van numerieke modelresultaten bij doodtij: 13-uurs ADCP metingen doodtij t.o.v. 3D model met zout</i> | <i>B117</i> |
| <i>Bijlage F: Vergelijking van ADCP- en SiltProfiler metingen bij springtij</i> | <i>B130</i> |
| <i>Bijlage G: Vergelijking van ADCP- en SiltProfiler metingen bij doodtij</i> | <i>B139</i> |
| <i>Bijlage H: Sedimentflux bij springtij</i> | <i>B148</i> |
| <i>Bijlage I: Sedimentflux bij doodtij</i> | <i>B157</i> |

Lijst van de tabellen

| | |
|---|----|
| Tabel 1 – Vergelijking van het tijprisma | 13 |
| Tabel 2 – Vergelijking van de berekeningsmethoden | 13 |
| Tabel 3 – Overzicht van de gemeten sedimentatie | 20 |
| Tabel 4 – Sedimentflux door de havenmond | 21 |

Lijst van de figuren

| | |
|--|----|
| Figuur 1 – Meetlocaties ter hoogte van de havenmond | 2 |
| Figuur 2 – Weergave van het stromingspatroon bij springtij, HW+1u40 | 8 |
| Figuur 3 – Weergave van het stromingspatroon bij springtij, LW | 8 |
| Figuur 4 – Illustratie van de tweede berekeningsmethode..... | 9 |
| Figuur 5 – Vergelijking van de instantane in- en uitstroom in het numeriek model ten gevolge van de drie componenten. | 15 |
| Figuur 6 – Vergelijking van numerieke modelresultaten en adcp-metingen bij springtij. | 16 |
| Figuur 7 – Vergelijking van numerieke modelresultaten en adcp-metingen bij doottij. | 17 |
| Figuur 8 – Correlatie tussen SiltProfiler en ADCP-metingen | 20 |
| Figuur 9 – Gemeten sedimentconcentratie bij springtij | 23 |
| Figuur 10 – Gemeten sedimentflux bij springtij | 24 |
| Figuur 11 – Gemeten sedimentconcentratie bij doottij | 25 |
| Figuur 12 - Gemeten sedimentflux bij doottij..... | 26 |
| Figuur 13 – Gemeten sedimentconcentratie in de havenmond, 1 uur na laagwater bij doottij | 27 |

1 Inleiding

De voorbije jaren werd door het Vlaams Gewest fors geïnvesteerd in verdiepingsbaggerwerken in de maritieme toegang van de haven van Zeebrugge. Dit heeft geresulteerd in de huidige situatie waarbij schepen met een diepgang van 15,5 à 16,0 m de haven gedurende 8 à 10 uur per dag kunnen bereiken. Echter rond hoogwater treden er in de toegangsgeul de Pas van het Zand ter hoogte van de havendammen grote stromingen op. Hierdoor wordt het toegepaste stroomvenster voor hierboven vermelde schepen herleidt tot 4 à 6 uur, verspreid over verschillende ogenblikken van de dag.

Naast de verdiepingsbaggerwerken doet het Vlaams Gewest het nodige om op een zinvolle en kostenefficiënte manier met onderhoudsbaggerwerken om te gaan. Ten gevolge van de uitbouw van de haven van Zeebrugge is er de voorbije decennia een metersdikke sliblaag in de toegangsgeulen en binnen de havendammen ontstaan. Deze sliblaag maakt het quasi onmogelijk om de gegarandeerde diepte overal en te allen tijde te garanderen.

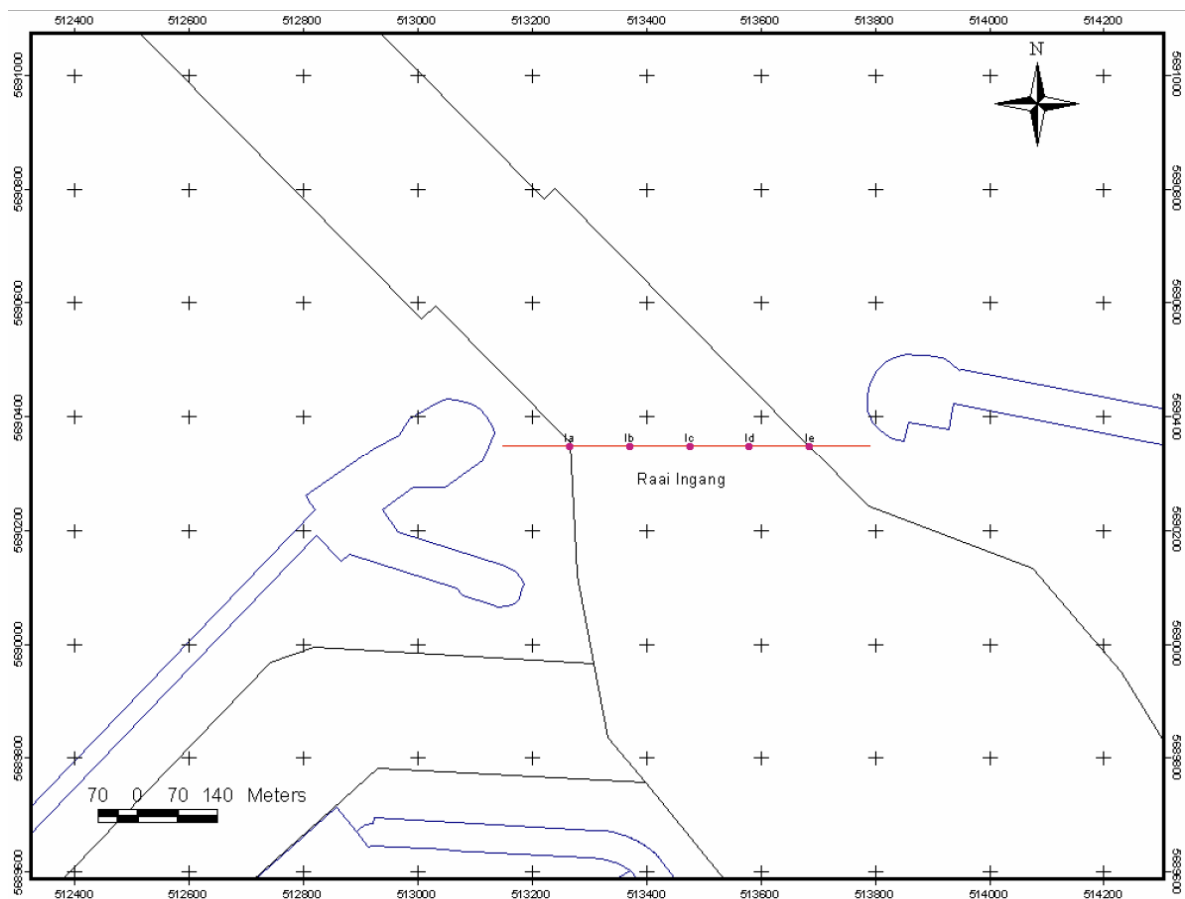
Door de afdeling Maritieme Toegang – verantwoordelijk voor de nautische toegankelijkheid van de haven van Zeebrugge – werd aan het Waterbouwkundig Laboratorium gevraagd om de hierboven geschetste problematiek te onderzoeken. Gezien de aard van de onderzoeksvragen werd voorgesteld om voor deze studie beroep te doen op zowel bestaande numerieke modellen als op een nieuw te bouwen fysisch schaalmodel van Zeebrugge (Ides et al., 2008; Dujardin et al., 2008). Echter alvorens succesvol te kunnen modelleren is het nodig om voldoende inzicht te hebben in de situatie op het terrein. In dit rapport wordt de water- en sedimentuitwisseling ter hoogte van de haveningang onderzocht. Hiervoor wordt zowel gebruik gemaakt van natuurmetingen als van numerieke modellen.

In het volgende hoofdstuk worden de beschikbare metingen beschreven, daarna worden de gebruikte numerieke modellen en berekeningsmethoden voor het bepalen van de water- en sedimentuitwisseling ter hoogte van de havenmond voorgesteld.

2 Beschikbare metingen

In het kader van Bestek 16EB/05/10 werden in opdracht van het Waterbouwkundig Laboratorium over een periode van meer dan een jaar gegevens verzameld in de omgeving van Zeebrugge. Hierbij werd met behulp van een uitgebreide meetcampagne getracht de variatie in het zout- en sedimentgehalte in en rond de haven van Zeebrugge in kaart te brengen. Er werden zowel langdurige metingen uitgevoerd op enkele vaste locaties om het verloop van zout- en sedimentgehalte in de tijd in beeld te brengen, alsook een aantal 13-uurs metingen om een volledig ruimtelijk inzicht te krijgen in het stromingspatroon en de zout- en sedimentconcentraties in de haven en de vaargeulen (Pas van het Zand, Scheur Oost, Scheur West). In het kader van voorliggende studie zijn twee 13-uurs meetcampagnes die werden uitgevoerd ter hoogte van de havenmond interessant.

De eerste van deze twee meetcampagnes, beschrijft het verloop van stromingscondities en sedimentconcentraties over de havenmond gedurende één springtij (IMDC, 2008a). Bij deze meetcampagne, uitgevoerd op 31/07/2007, werden er continu raaien gevaren over de havenmond van 4u09 tot 16u45. De tweede meetcampagne beschrijft dezelfde parameters bij doodtij; metingen werden uitgevoerd op 07/08/2007 van 3u15 tot 14u58 (IMDC, 2008b). *Figuur 1* toont de raai over de havenmond dat het meetschip (bij benadering) vaarde.



Figuur 1 – Meetlocaties ter hoogte van de havenmond

De rode lijn geeft de voorgestelde dwarsraai weer die gevaren werd tijdens beide 13-uursmeetcampagnes over de havenmond; de punten geven aan waar met de SiltProfiler verticalen werden opgenomen.
Coördinaten in UTM31 ED50 (IMDC, 2008a)

Tijdens deze meetcampagnes werden twee meetmethodes afwisselend gebruikt: "SiltProfiler" en "Sediview" (IMDC, 2008a & 2008b). Eén cyclus van SiltProfiler en Sediview metingen duurde typisch 40 minuten.

Wanneer met de heersende stroming mee werd gevaren, werden per dwarsraai telkens vijf verticale profielen opgemeten met de SiltProfiler. Dit toestel, samengesteld uit drie turbiditeitsensoren met elk een specifiek meetbereik, laat toe verticale profielen van conductiviteit, temperatuur en turbiditeit snel op te meten. De drie turbiditeitsensoren zijn een Seapoint sensor met meetbereik 0 tot 1000mg/l en twee FOSLIM sensoren met een bereik van respectievelijk 400 tot 3000mg/l en 2000 tot 41000mg/l. Aan het begin of einde van elk gevaren dwarsraai werden twee waterstalen van een liter genomen; één in de bovenste helft van de waterkolom, tussen vier en zeven meter onder het wateroppervlak, en een tweede op vier meter boven de bodem. Het sedimentgehalte in deze stalen werd bepaald door de stalen te filteren en te drogen. De bekomen sedimentconcentraties werden dan gebruikt om de turbiditeitsensoren te calibreren.

In de andere vaarrichting (tegen de heersende stroomrichting in) werd de "Sediview" techniek gebruikt. Met een 600kHz Workhorse ADCP van RD instruments werd de stroomsnelheid gemeten. Uit de acoustische backscatter van dit instrument werd dan de sedimentconcentratie berekend. Ook deze metingen werden telkens gecalibreerd aan de hand van het sedimentgehalte uit de eerder beschreven waterstalen. Bepaalde zones worden echter nooit bemeaten door deze techniek:

- **Blinde zones**

Inherent aan het gebruik van een ADCP-toestel zijn de blinde zones nabij het wateroppervlak en de bodem. IMDC (2008a) stelt dat in de bovenste blinde zone, tussen het wateroppervlak en ca. 1,5m onder het wateroppervlak, het debiet en de sedimentconcentratie dezelfde zijn als in de bovenste, meetbare bin. De sedimentconcentratie in de onderste blinde zone, van ca. 1,5m boven de bodem tot de bodem zelf, wordt bij wijze van eenvoudige extrapolatie gelijkgesteld aan 225% van de sedimentconcentratie in de onderste meetbare bin. Het debiet in deze zone wordt bepaald met volgende formule uit de handleiding van het ADCP-toestel:

$$\frac{u}{u^*} = 9.5 * \sqrt[6]{\frac{z}{z_0}} \text{ met:}$$

z = hoogte boven de bodem

u = snelheid op hoogte z

u* = snelheidsschering

z₀ = ruwheidslengte

- **Zones nabij de havendammen**

Omdat het voor het schip te gevaarlijk is dicht tegen de havendammen te varen, ontbreekt telkens de eerste en laatste 50 à 100 meter van elke dwarsraai. Voor deze zones nabij de koppen wordt door IMDC volgende schatting van het debiet voorgesteld:

$$Q_{shore} = 0.91 * V_m * L * d_m \text{ met:}$$

V_m = gemiddelde stroomsnelheid in de laatste vijf opgemeten meetensembles

L = afstand tot de havendam

d_m = diepte in het laatste door het ADCP-toestel opgemeten meetensemble

Uit eerdere meetcampagnes (Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, 1998; Aqua Vision BV, 2004a&b) bleek dat een belangrijk deel van de vloedstroom binnenkomt in de zone nabij de oostelijke havendam. Het is dus zeer belangrijk een goede afschatting te maken van de debieten en sedimentconcentraties in deze zone.

3 Wateruitwisseling door de havenmond – Methodiek

3.1 Inleiding

De wateruitwisseling ter hoogte van de havenmond van Zeebrugge is belangrijk. Deze uitwisseling bepaalt grotendeels de hydrodynamica in de haven. Daarnaast is de uitwisseling van slibrijk water eveneens een maat voor de hoeveelheid slib die in (en uit) de haven getransporteerd zal worden. Vandaar dat de nodige aandacht aan dit proces zal besteed worden.

Over het algemeen worden er bij de studie van de uitwisseling ter hoogte van een haveningang drie processen onderscheiden:

1. **Tijvulling:** het volume water dat de haven in- en uitstroomt zuiver ten gevolge van het verschil in hoog- en laagwaterstand.
2. **Horizontale uitwisseling:** het volume water dat door de havenmond wordt uitgewisseld ten gevolge van de snelheidsgradiënt die optreedt tussen het gebied binnen en buiten de haven (cfr. menglaag of horizontale neervorming). De instroom van deze component is in theorie gelijk aan de uitstroom, waardoor deze geen netto effect heeft op de wateruitwisseling.
3. **Verticale uitwisseling:** het volume water dat door de havenmond wordt uitgewisseld ten gevolge van de dichtheitsgradiënt die optreedt tussen het gebied binnen en buiten de haven (cfr. dichtheitsstroming). De instroom van deze component is in theorie gelijk aan de uitstroom, waardoor deze geen netto effect heeft op de wateruitwisseling.

Aan de grootte van de eerste component kan niets veranderd worden: het niveau van het laag- en het hoogwater wordt immers bepaald door de lokale getijcondities. Voor de andere twee componenten kan men maatregelen bedenken om hun bijdrage te wijzigen. Indien zou blijken dat bijvoorbeeld zoutgradiënten een belangrijke rol spelen op het stromingspatroon rond en in de haven, zal het onderzoeksplan gefocust op het verminderen van de aanslibbing van de haven voor een groot deel hierop gericht zijn (cfr. ontwerp en bouw van het fysische model dient hierop te worden afgestemd).

3.2 Empirisch model

Eysinck (1988) ontwikkelde het empirische model SILTHAR dat aanslibbing van havens voorspelt op basis van de drie vullingscomponenten hierboven beschreven. Deze methode heeft echter enkele beperkingen. Ten eerste is de formule die de horizontale uitwisseling beschrijft enkel geldig voor permanente stroming voorlangs de havenmond. Volgens Eysinck betekent dit dat de formulering in getijdegebieden in principe enkel toepasbaar is wanneer de ebstroom veel zwakker is dan de vloedstroom en nauwelijks uitwisseling induceert. Met andere woorden, het hele getij moet gekarakteriseerd kunnen worden aan de hand van één typische (vloed)snelheid. Een andere manier om met deze beperking om te gaan, is het getij op te delen in twee periodes van permanente stroming: één die vloed en één die eb voorstelt. Natuurlijk is in realiteit de stroming niet constant gedurende de hele periode van eb of vloed. De tweede beperking zit in het gebruik van verscheidene empirische coëfficiënten die afhankelijk zijn van de havengeometrie en de fasering van de verschillende vullingscomponenten. Deze coëfficiënten hebben echter een breed bereik en dienen voor elke nieuwe situatie nader bepaald te worden.

Uit een gevoeligheidsanalyse met SILTHAR voor de haven van Zeebrugge volgde dat zowel de horizontale als de verticale uitwisseling een verwaarloosbare bijdrage leveren tot de wateruitwisseling door de havenmond. Deze uitkomst is weinig waarschijnlijk aangezien eerdere meetcampagnes

belangrijke neren ter hoogte van de haveningang hebben aangetoond (Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, 1998; Aqua Vision BV, 2004a&b; IMDC, 2008c). De verklaring voor deze tekortkoming van het empirische SILTHAR model ligt in de formulering van de horizontale en verticale uitwisseling: beiden zijn afhankelijk van het tijprisma van de haven. Hoe groter de oppervlakte van de haven (en dus hoe groter haar tijprisma) hoe kleiner beide componenten zullen zijn. Dit model is dus niet toepasbaar voor een volledige haven zoals Zeebrugge, maar wel voor kleinere havendokken.

3.3 Numeriek model

Aan de hand van modelberekeningen met een 3D numeriek model zal – naar analogie met vroege studies betreffende aanslibbing in het Deurganckdok (IMDC, 1998) – getracht worden de relatieve invloed van de drie vullingscomponenten (tijvulling, horizontale uitwisseling/neervorming en verticale uitwisseling/densiteitstroming) in te schatten.

Met het gevalideerde numerieke model voor Zeebrugge (Bijlsma, 2006), aangepast aan de situatie zoals deze begin 2008 was (Waterbouwkundig Laboratorium, M753_08, onderzoek lopende), werd zowel het springtij van 03/08/2007 10u30 (laagwater) tot 03/08/2007 23u00 (laagwater) als het doottij van 07/08/2007 7u50 (hoogwater) tot 07/08/2007 20u20 (hoogwater) nagerekend, rekening houdend met een voldoende lange inspeelperiode. Vier verschillende modelconfiguraties werden bestudeerd:

- Scenario 1. 3D waterbeweging bij springtij met een constant, uniform zoutveld (zoutwater met densiteit 1023 kg/m³); op deze manier wordt er geen rekening gehouden met mogelijke densiteitsgradiënt effecten.
- Scenario 2. 3D waterbeweging bij springtij met variabel zoutveld, conform realiteit. Het initiële zoutveld en de zout randvoorwaarden voor het numerieke detailmodel werden hierbij uitgerekend met het grootschalige NEVLA model (Van Kessel et al., 2007).
- Scenario 3. 3D waterbeweging bij springtij met variabel zoutveld, inclusief zoetwaterlozingen in de haven (cfr. Schipdonkkanaal en Leopoldkanaal) tijdens het laagwater van 03/08/2007 10u30.
- Scenario 4. 3D waterbeweging bij doottij met variabel zoutveld, conform realiteit. Het initiële zoutveld en de zout randvoorwaarden voor het numerieke detailmodel werden hierbij uitgerekend met het grootschalige NEVLA model (Van Kessel et al., 2007).

De zoetwaterlozing in scenario 3 werd als volgt gesimuleerd: vanaf anderhalf uur voor laagwater tot twee en een half uur na laagwater werd op één welbepaald punt in het model (cfr. het lozingspunt van het Schipdonkkanaal en het Leopoldkanaal) 40m³/s zoetwater toegevoegd; dit komt overeen met een totale geloosde hoeveelheid van 576 000m³ water of één procent van de tijvulling voor het gesimuleerde springtij. Het opgelegde bovendebiet en de timing ervan zijn gebaseerd op langdurige debietsreeksen te Zomergem en schuifstanden in de uitwateringsconstructie te Heist (Dujardin et al., 2006). Deze zoetwater input zal naar verwachting een verhoging van de zoutgradiënt induceren en zodoende de densiteit gerelateerde processen versterken. Tijdens doottij blijft het waterniveau in de haven altijd hoger dan op beide uitwateringskanalen; hierdoor is een vijfde scenario met zoetwaterlozingen bij doottij (cfr. scenario 3) overbodig.

Omwille van de onbeschikbaarheid van randvoorwaarden voor het numerieke model komen, zowel bij springtij als bij doottij, de gesimuleerde en gemeten periodes niet precies overeen. Dit hoeft geen probleem te zijn aangezien de berekende en bemeeten periodes qua hydrodynamiek goed vergelijkbaar zijn met elkaar. De tijslag (verschil tussen hoog- en laagwater) bedroeg voor springtij 4,13m bij de metingen en 3,95m in het numerieke model, of een afwijking van 5%. Voor doottij is dit respectievelijk 2,90m en 2,97m, of een afwijking van 2%.

In theorie kan scenario 1 een idee geven over de wateruitwisseling veroorzaakt door horizontale processen (menglaag, neervorming). Deze horizontale wateruitwisseling wordt berekend als het verschil tussen de totale bruto wateruitwisseling¹ tijdens één getij en de wateruitwisseling louter te wijten aan tijvulling² (IMDC, 1998). Het verschil tussen de totale bruto wateruitwisseling tijdens één getij in scenario 1 en scenario 2 geeft een idee van het volume water dat wordt uitgewisseld door verticale processen (densiteitstroming). Echter in de praktijk zijn de horizontale en verticale processen niet onafhankelijk van elkaar, waardoor bovengaande redenering niet kan worden toegepast. In onderstaande paragrafen worden alternatieve berekeningsmethodes voorgesteld om toch het onderscheid tussen de verschillende processen verantwoordelijk voor wateruitwisseling te kunnen maken.

3.3.1 Eerste berekeningsmethode

Voor zowel de natuurmetingen als de modelresultaten kan uitwisseling louter door tijvulling en -lediging worden bepaald door het instantane snelheidsveld loodrecht op de haveningang te integreren over het oppervlak van de havenmond. Integratie van deze debieten over één getijcyclus geeft dan het totaal volume water dat onder invloed van het getij de haven in- en uitstroomt. Deze waarde kan getoetst worden aan de theoretische waarde van het tijprisma van de haven.

De verhouding van de instantane wateruitwisseling te wijten aan tijvulling² tot de instantane bruto wateruitwisseling¹ geeft het aandeel van het getij weer op de totale wateruitwisseling. Het resterende deel van de totale wateruitwisseling moet dan toegeschreven worden aan de horizontale en verticale uitwisselingsprocessen. Zoals hierboven reeds aangehaald, kunnen horizontale en verticale uitwisseling slechts onderling gescheiden worden indien beide processen onafhankelijk van elkaar werken, wat in realiteit niet zo is. Dit blijkt eveneens uit de eerste resultaten (*Tabel 1*): de gecumuleerde bruto wateruitwisseling in scenario 2, waarbij de zoutgradiënten in rekening worden gebracht, heeft een iets lagere waarde (-0.4%) dan in scenario 1. Dit zou betekenen dat – aangezien hetzelfde getij werd gebruikt – verticale uitwisseling geen effect heeft op de gecumuleerde bruto wateruitwisseling. Echter wanneer de resultaten van het model in detail worden bestudeerd (cfr. *Figuur 2* en *Figuur 3*) blijkt dat het opleggen van een zoutveld wel degelijk een invloed heeft op het instantane stromingspatroon tussen de koppen van de strekdammen en dus ook op de onderlinge verhouding van horizontale en verticale uitwisselingsprocessen. Een volledig overzicht van de gedetailleerde stromingspatronen voor de verschillende scenario's is terug te vinden in *Bijlage A* (scenario 1 vs. scenario 2), *Bijlage B* (scenario 2 vs. scenario 3) en *Bijlage C* (scenario 4).

Om de onderlinge verhouding tussen horizontale en verticale uitwisselingsprocessen te kwantificeren werd gebruik gemaakt van de gradiënten in instromend en uitstromend debiet. Hierbij is de basisveronderstelling dat in- en uitstroom te wijten aan tijvulling gebeurt met uniform over de haveningang verdeeld debiet. Wateruitwisseling te wijten aan neervorming zorgt voor een debietsgradiënt in de horizontale richting. Analoog zal wateruitwisseling te wijten aan dichtheitsverschillen een debietsgradiënt in de verticale richting veroorzaken. Om deze theorie te kunnen toepassen, werd de haveningang verdeeld in verschillende rekencellen: 21 cellen verdeeld over de horizontale en 5 cellen over de verticale richting; conform het numerieke modelrooster. Vervolgens werd voor elke rekencel de debietsgradiënt bepaald, zowel in de horizontale als de verticale richting.

¹ Totale bruto wateruitwisseling wordt bekomen door integratie van de absolute waarde van de stroomsnelheden loodrecht op de haveningang over het oppervlak van de havenmond en de tijd.

² Totale wateruitwisseling ten gevolge van tijvulling wordt bekomen door integratie van de stroomsnelheden loodrecht op de haveningang over het oppervlak van de havenmond en de tijd.

Per horizontale laag werd het gemiddelde van de absolute waarden van de horizontale debietsgradiënten bepaald en vermenigvuldigd met de breedte van de haveningang (de typische lengteschaal waarover de horizontale uitwisseling werkt). De zo bekomen waarden per horizontale laag werden vervolgens gesommeerd om een maat voor de totale horizontale uitwisseling te bekomen. Per kolom werd het gemiddelde van de absolute waarden van de verticale debietsgradiënten bepaald en vermenigvuldigd met de gewaarborgde diepte in de haveningang (de typische lengteschaal waarover de verticale uitwisseling werkt). De zo bekomen waarden per kolom werden gesommeerd om een maat te bekomen voor de verticale gelaagdheid en uitwisseling. Het vermenigvuldigen van het gemiddelde van de gradiënten met de typische lengteschaal waarover ze werken zorgt ervoor dat de waardes voor horizontale en verticale uitwisseling onderling vergelijkbaar zijn. Tot slot werd het niet tijgebonden deel van de bruto wateruitwisseling per tijdstap verdeeld tussen horizontale en verticale uitwisseling naar rato van de uitwisselingsgetallen zoals berekend op basis van de debietsgradiënten.

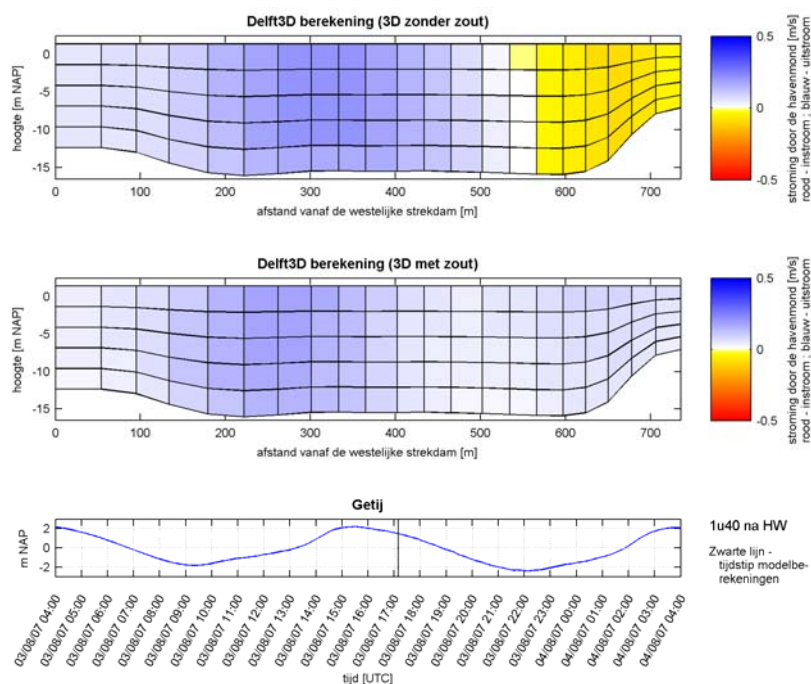
3.3.2 Tweede berekeningsmethode

Bovenstaande methode om horizontale en verticale uitwisselingscomponenten te scheiden werd gevalideerd op basis van een techniek die reeds eerder door WL|Delft Hydraulics werd gebruikt in het kader van onderzoek naar de te verwachten aanslibbing in Deurganckdok (Bijlsma en van Vossen, 2004). Deze methode is gebaseerd op de stroomsnelheid in plaats van de debietsgradiënten. Hierbij wordt er verondersteld dat de stroomsnelheid ten gevolge van tijvulling – die wordt berekend als de gemiddelde stroomsnelheid – uniform is over de haveningang. Afwijkingen van deze gemiddelde stroomsnelheid worden vervolgens onderverdeeld in een component te wijten aan horizontale uitwisseling en één te wijten aan verticale uitwisseling, zoals hieronder uitgewerkt en geïllustreerd in *Figuur 4*.

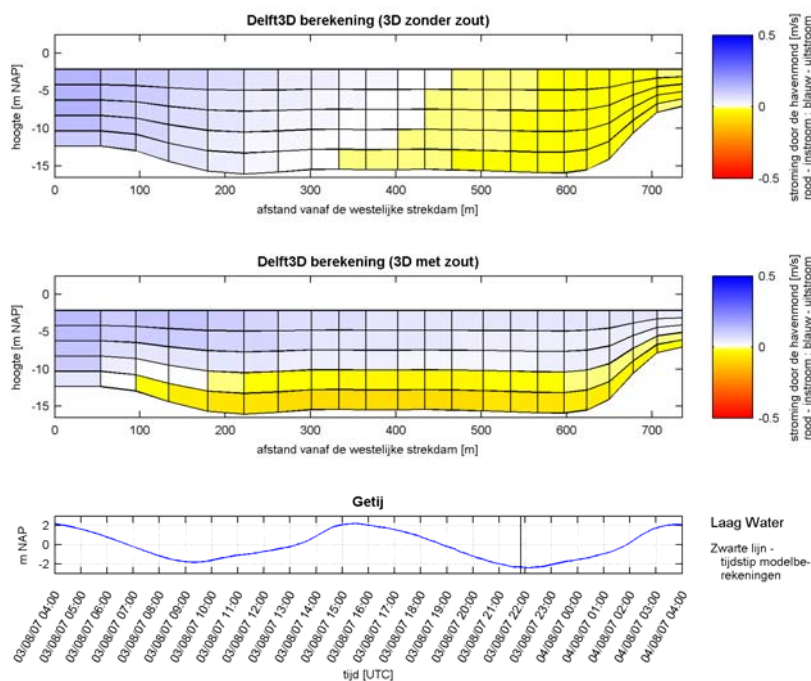
Net zoals in de eerste berekeningsmethode wordt de havenmond opgedeeld in een rooster van 21 horizontale bij 5 verticale cellen. De tijvulling wordt ook hier bepaald door integratie van het instantane snelheidsveld loodrecht op de haveningang over het oppervlak van de havenmond. Men kan dan het niet tijgebonden deel van het snelheidsveld loodrecht op de haveningang bepalen door van het oorspronkelijke snelheidsveld de gemiddelde getijstroom af te trekken (= instantaan tijvolume gedeeld door het oppervlak van de havenmond).

De horizontale wateruitwisseling wordt bepaald door van het niet tijgebonden snelheidsveld per horizontale laag de gemiddelde snelheid in die laag af te trekken. Op deze manier wordt het niet tijgebonden snelheidsveld getransformeerd naar een verticaal vlak dat het vlak van de havenmond snijdt. Het volume water dat in- en uitstroomt ten gevolge van horizontale processen wordt bekomen door het positieve en negatieve deel van het bekomen snelheidsveld afzonderlijk te integreren over het oppervlak van de havenmond.

De verticale wateruitwisseling wordt bepaald door van het niet tijgebonden snelheidsveld per kolom de dieptegemiddelde snelheid in die kolom af te trekken. Op deze manier wordt het niet tijgebonden snelheidsveld getransformeerd naar een hellend vlak evenwijdig met de lijn tussen de koppen van de haveningang. Het volume water dat in- en uitstroomt ten gevolge van verticale processen wordt bekomen door het positieve en negatieve deel van het bekomen snelheidsveld afzonderlijk te integreren over het oppervlak van de havenmond.



Figuur 2 – Weergave van het stromingspatroon bij springtij, HW+1u40
 Weergave van het stromingspatroon bij springtij tussen de koppen van de havendammen 1u40 na hoogwater.
 Boven – numerieke model, scenario 1; Onder – numerieke model, scenario 2.
 Er is een duidelijk verschil in stromingspatroon zichtbaar tussen beide modelresultaten: in scenario 1 houdt het binnenschieten van de vloedstroom ter hoogte van de oostelijke strekdam ca. 1u30 langer aan.



Figuur 3 – Weergave van het stromingspatroon bij springtij, LW
 Weergave van het stromingspatroon bij springtij tussen de koppen van de havendammen omstreeks laagwater. Boven – numerieke model, scenario 1; Onder – numerieke model, scenario 2.
 Er is een duidelijk verschil in stromingspatroon zichtbaar tussen beide modelresultaten.

Op de hierboven beschreven manier bekomt men dus in- en uitstroomvolumes voor tijvulling, horizontale en verticale uitwisselingsprocessen. De som van de absolute waarden van al deze volumes is echter groter dan de berekende bruto wateruitwisseling. Dit is natuurlijk niet mogelijk, en was ook te verwachten aangezien er twee maal – onafhankelijk van elkaar – een gemiddelde wordt afgetrokken van het niet tijgebonden snelheidsveld, waarbij deze gemiddelden bepaald worden aan de hand van hetzelfde snelheidsveld. Omdat de totale bruto wateruitwisseling en de wateruitwisseling te wijten aan tijvulling zeker correct werden berekend, werd besloten het aandeel van de in- en uitstroom volumes ten gevolge van horizontale en verticale uitwisselingsprocessen te herschalen en te verdelen over het niet tijgebonden deel van de bruto wateruitwisseling conform hun onderlinge verhouding. Dit in tegenstelling tot wat Bijlsma en van Vossen (2004) deden.

3.3.3 Validatie aan de hand van metingen

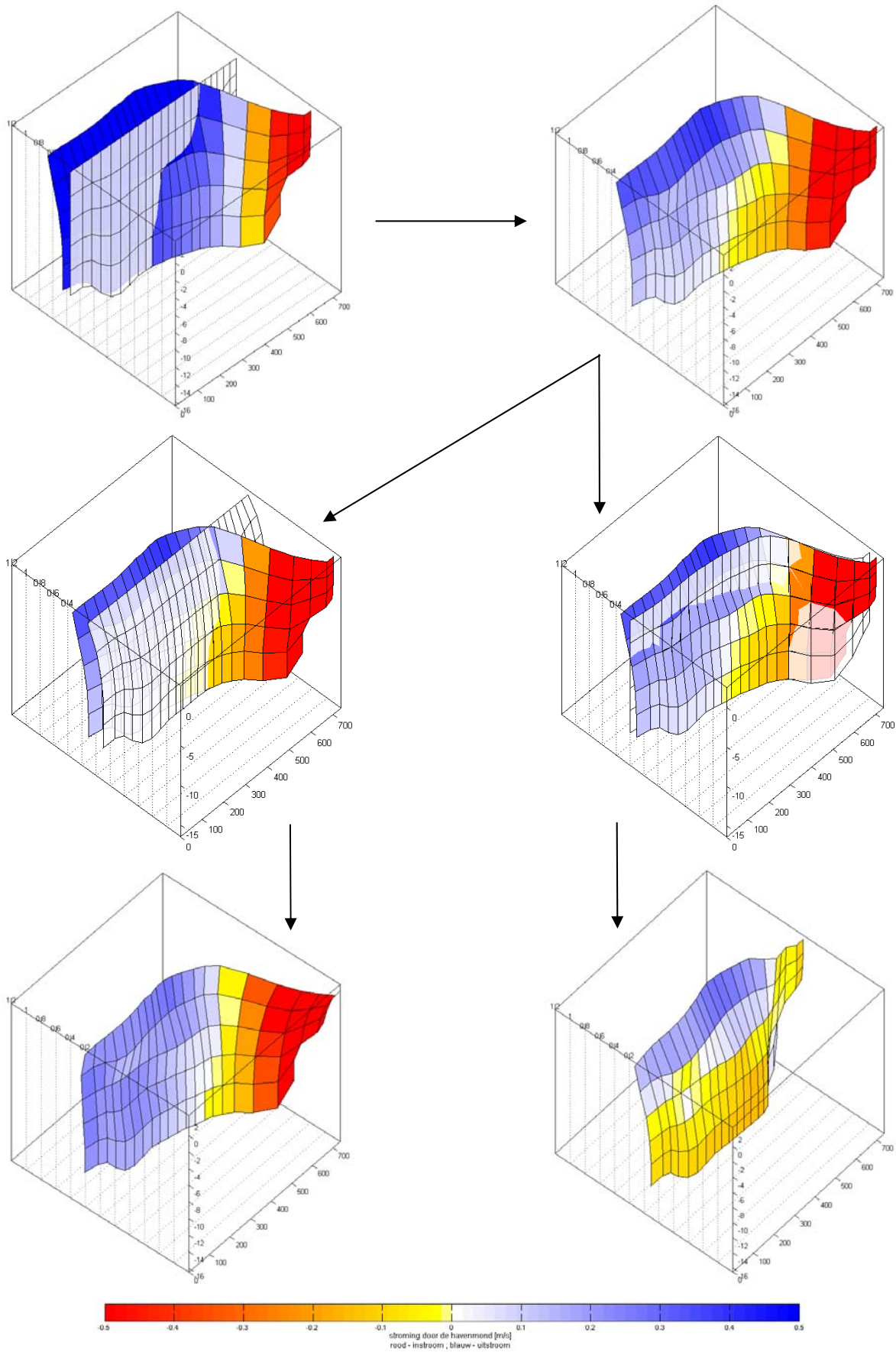
Zowel de 13-uurs natuurmetingen als de numerieke modelresultaten kunnen verwerkt worden zoals beschreven in paragrafen 3.3.1 en 3.3.2. Hiervoor dienen de ADCP-metingen te worden uitgemiddeld op een rekenrooster met dezelfde onderverdeling als het numerieke model (21 horizontale bij 5 verticale cellen). Lichte verschillen zijn te verwachten aangezien de modelresultaten en de metingen niet precies hetzelfde getij beschrijven. De grootste verschillen zijn natuurlijk te verwachten in de zones die door het ADCP-toestel niet kunnen opgemeten worden (zie hoofdstuk 2). Ook kunnen de meetresultaten verstoringen door scheepsvaart vertonen, wat in het numeriek model natuurlijk niet kan worden meegenomen.

Bijlage D toont de vergelijking van het gemeten en het gemodelleerde snelheidsveld bij springtij; *Bijlage E* bij doodtij. Analyse van deze figuren toont dat het stroompatroon tussen de koppen uitgerekend door het numeriek model een redelijke overeenkomst vertoont met de metingen.

Figuur 4 – Illustratie van de tweede berekeningsmethode

Links boven – weergave van het stromingsveld tussen de koppen (gekleurde oppervlak) en de sectiegemiddelde stroomsnelheid van dit stromingsveld (wit doorschijnend oppervlak). Deze gemiddelde stroomsnelheid is tevens een maat voor de tijvulling. Rechts boven – het verschil tussen het stromingsveld en haar gemiddelde geeft de stroming niet te wijten aan tijvulling weer. Links midden – weergave van het stromingsveld niet te wijten aan tijvulling (gekleurd oppervlak) en het gemiddelde van elke horizontale laag van dit niet tijgebonden stromingsveld (wit doorschijnend oppervlak). Links onder – het verschil tussen het stromingsveld niet te wijten aan tijvulling en haar horizontaal gemiddelde per laag geeft een maat voor de horizontale wateruitwisseling (menglaag, neervorming, binnen schieten vloedstroom). Rechts midden – weergave van het stromingsveld niet te wijten aan tijvulling (gekleurd oppervlak) en het gemiddelde van elke verticale kolom van dit niet tijgebonden stromingsveld (wit doorschijnend oppervlak). Rechts onder – het verschil tussen het stromingsveld niet te wijten aan tijvulling en haar verticaal gemiddelde per kolom geeft een maat voor de horizontale wateruitwisseling (densiteitstroming). Voor een volledige uitleg bij de figuren zie paragraaf 3.3.2.

Orthografische weergave van het stroompatroon tussen de koppen en haar afgeleiden. X-as: breedte tussen de koppen [0 – 735m]; Y-as en kleurschaal: stroomsnelheid [m/s]; Z-as: hoogte [-16.5 – 2.5m NAP]. N.b. Ook de bathymetrie wordt weergegeven in de figuur. De kromming links onderaan in het sectiegemiddelde stromingsveld (links boven) en het horizontaal gemiddelde van elke laag van het niet tijgebonden stromingsveld (links midden) is zuiver te wijten aan de weergave van de bathymetrie en niet aan een lokale afwijking van de gemiddelde snelheid.



4 Wateruitwisseling door de havenmond – Resultaten

Zoals hierboven reeds besproken, werd zowel voor de 13-uursmetingen als voor de numerieke modelresultaten de tijvvulling bepaald door integratie van de debieten doorheen de havenmond over de duur van één getijcyclus. Ter controle werd met behulp van de functie “Volumes and Areas” van de Delft3D Quick-In module het tijprisma bepaald voor zowel de metingen als de modelresultaten bij springtij en bij doottij. Het tijprisma werd hier gedefinieerd als het volume water dat de haven van Zeebrugge instroomt en terug verlaat tussen twee opeenvolgende hoog- of laagwaters. *Tabel 1* toont de waarden voor zowel de modelscenario's als de 13-uursmetingen. Dat bij springtij de uitstroom steeds hoger is dan de instroom is te wijten aan de keuze van het bestudeerde getij en de getij-asymmetrie. In de scenario's 1, 2 en 3 is het eerste laagwater hoger dan het tweede, waardoor er dus relatief minder instroom en meer uitstroom is. Dit geldt ook voor de 13-uursmetingen bij spring- en doottij.

In hoofdstuk 2 werd reeds besproken dat het met het ADCP-toestel onmogelijk is bepaalde zones te bemeten. Omdat uit eerdere meetcampagnes bleek dat een belangrijk deel van de vloedstroom binnenkomt langs de niet bemeten zone nabij de kop van de oostelijke havendam, drong zich een aanname voor deze zones op. In hoofdstuk 2 werd ook al besproken welke aannames IMDC bij de verwerking van de meetcampagnes gebruikte. In *Tabel 1* valt te zien dat zelfs met deze aannames zowel in- als uitstroom bij springtij onderschat worden ten opzichte van het berekende tijprisma. Bij doottij wordt enkel de instroom onderschat; de uitstroom wordt iets overschat.

Om de numerieke modelresultaten en de 13-uursmetingen op precies dezelfde manier te verwerken, werd over de havenmond een rekenrooster van 21 horizontale bij 5 verticale cellen aangelegd. Op dit rooster werden de ruwe ADCP-data per rekencel uitgemiddeld. Hierdoor was er wel opnieuw nood aan extrapolatie in de zones die niet door het ADCP-toestel werden bemeten. Voor de blinde zones nabij het wateroppervlak en de bodem werd aangenomen dat er steeds genoeg betrouwbare ADCP-metingen in de onderste en bovenste rekencellen aanwezig waren om toch een representatieve gemiddelde snelheid in deze cellen te bekomen. De rekencellen zijn immers steeds tussen de 2 en 3,5 meter hoog, terwijl de blinde zones ongeveer 1,5 meter hoog zijn. Wanneer er wordt uitgegaan van een parabolisch snelheidsverloop, geldt deze aanname zeker voor de bovenste blinde zone. In de onderste blinde zone is deze aanname wat ruwer. Theoretisch zou het beter zijn om de metingen te extrapoleren tot in de logaritmische grenslaag aan de bodem en daarna te middelen per rekencel, maar dit is in praktijk niet mogelijk omdat alle metingen werden opgenomen in het parabolische deel van het snelheidsverloop en de extrapolatie te veel onzekerheden introduceert. Voor de niet bemeten zones nabij de koppen van de havendammen werd aangenomen dat de laatste, naastliggende verticale kolom met data representatief is voor geheel deze zone. De lege cellen in deze zones werden dan opgevuld met de waarden uit de laatste verticale kolom met data (nearest neighbour extrapolatie).

Hoewel de hierboven beschreven aannames weinig verschillen van de aannames gemaakt door IMDC, toont *Tabel 1* duidelijke verschillen: nu wordt zowel voor springtij als voor doottij de instroom nog steeds onderschat, maar de uitstroom overschat ten opzichte van het berekende tijprisma. Deze onderschatting van de instroom toont nog maar eens aan dat het binnenschieten van de vloedstroom nabij de oostelijke strekdam een belangrijk fenomeen is, waar maar moeilijk vat op wordt verkregen doordat deze zone niet bemeten werd. Deze methode zorgt wel voor een betere benadering van het totale tijvolume ten opzichte van het berekende tijprisma.

4.1 Tijvulling

In *Tabel 1* is te zien hoe voor elk modelscenario de gecumuleerde bruto wateruitwisseling en het tijvolume overschat worden ten opzichte van het berekende tijprisma. Waarschijnlijk is deze overschatting het gevolg van de manier waarop de dwarsraai over de haveningang werd gedefinieerd in het numerieke model: de output wordt namelijk gegenereerd op een aantal punten die de meetpunten van de ADCP-meetcampagne zo dicht mogelijk benaderen. Deze punten liggen echter niet op een mooie rechte tussen de koppen, maar vormen een licht golvende kromme, waardoor de breedte van de havenmond licht overschat wordt.

Dat de tijvulling in de metingen onderschat wordt wanneer er enkel gebruik wordt gemaakt van de ruwe data, is logisch aangezien er geen ADCP-meetgegevens zijn in de directe nabijheid van de havendammen alsook in de onderste en bovenste blinde zone van het toestel (ca. 1,5 meter onder het wateroppervlak en 1,5 meter boven de bodem). Het ontbreken van deze meetdata maakt dat de totale in- en uitstromende volumes onderschat worden. Hierboven werden reeds twee methodes besproken om de datasets afkomstig van de 13-uursmetingen te extrapoleren naar deze niet bemeten zones. Beide methodes geven nog steeds een onderschatting van de instroom. De door IMDC voorgestelde methode geeft ook een onderschatting van de uitstroom, terwijl de tweede methode een overschatting geeft van de uitstroom. Deze laatste methode geeft wel een betere benadering van het totale tijvolume, alsook een betere overeenkomst met de numerieke modelresultaten. Ook blijft het relatieve aandeel van de tijvulling op de totale bruto wateruitwisseling door de havenmond (ongeveer) hetzelfde voor deze tweede extrapolatie methode als voor de ruwe ADCP-data.

De redelijke overeenkomst van de numerieke modelresultaten en metingen, betreffende het instantaan stromingspatroon tussen de koppen (aangehaald in paragraaf 3.3.3) wordt door *Tabel 1* nog eens bevestigd. Hoewel er bepaalde verschillen zijn, komen de algemene (tijgemiddelde) trends toch overeen. Dit blijkt onder andere uit de figuren die de instantane uitwisselingscomponenten weergeven (*Figuur 5*, *Figuur 6* en *Figuur 7*, volgende paragraaf): voor elk modelscenario en voor de 13-uursmetingen blijkt dat tijlediging bij eb de enige belangrijke uitwisselingscomponent is. Bij kentering nemen horizontale en verticale processen terug aan belang toe. Dit beeld is ook terug te vinden in de figuren van het stromingspatroon tussen de koppen (zie *Bijlagen D en E*), waar bij eb een quasi uniforme uitstroom te zien is.

Tijvulling blijkt per tijcyclus 60 à 77% van de totale wateruitwisseling door de havenmond van Zeebrugge voor haar rekening te nemen. De overige 23 à 40% van de wateruitwisseling door de havenmond is dus te wijten aan horizontale en verticale uitwisselingsprocessen.

4.2 Horizontale en verticale uitwisseling

Tabel 2 toont de vergelijking van de resultaten bekomen met de twee berekeningsmethoden beschreven in paragrafen 3.3.1 en 3.3.2. Over het algemeen schat de eerste methode de horizontale uitwisseling lager, en de verticale uitwisseling hoger in dan de tweede methode. Maar beide methoden geven een vergelijkbaar resultaat: horizontale uitwisseling is, getijgemiddeld, belangrijker dan verticale uitwisseling. Enkel voor scenario 3 wijken de resultaten van beide berekeningsmethodes van elkaar af.

Door het gebruik van de absolute waarden van de gradiënten in horizontale en verticale richting kan de eerste berekeningsmethode geen onderscheid maken tussen een stromingsveld dat schommelt rond de nul waarde, en een stromingsveld dat een grote links-rechts of onder-boven gradiënt heeft. Op sommige momenten van het getij zou het kunnen dat deze methode de verhouding tussen horizontale en verticale uitwisseling dus minder precies bepaalt. Omdat de tweede berekeningsmethode hiervoor minder vatbaar is, zal enkel deze gebruikt worden bij de verdere bespreking van de resultaten.

Tabel 1 – Vergelijking van het tijprisma

Vergelijking van de verschillende modelscenario's en 13-uurs ADCP-metingen, alsook het tijprisma bepaald met behulp van de Delft3D Quick-In functie "Volumes and Areas". Omdat de modelresultaten niet precies dezelfde tijdspanne beschrijven als de 13-uursmetingen is het in Quick-In bepaalde tijprisma voor zowel de modelscenario's als de metingen weergegeven. Voor de 13-uursmetingen zijn zowel de totalen van de ruwe data (geen extrapolatie voor zones nabij de koppen), als de door IMDC geëxtrapoleerde data (zoals beschreven in hoofdstuk 2) en de geëxtrapoleerde data zoals beschreven in paragraaf 4.1 gegeven. In- en uitstroom zijn niet gelijk door de asymmetrie van het getij. (*) IMDC, 2008b.

| | Totale bruto water- uitwisseling [10 ⁶ m ³] | Netto Instroom [10 ⁶ m ³] | Netto Uitstroom [10 ⁶ m ³] | Tijvulling [10 ⁶ m ³] | Tijvulling [%] |
|------------------------------------|--|--|---|---|-------------------|
| Springtij – numerieke model | | | | | |
| Berekening tijprisma | | 23.9 | 26.8 | 50.7 | |
| Scenario 1 | 72.5 | 25.5 | 30.2 | 55.8 | 77 |
| Scenario 2 | 72.2 | 25.6 | 30.5 | 56.0 | 78 |
| Scenario 3 | 81.2 | 24.7 | 30.6 | 55.3 | 68 |
| Springtij – 13-uursmeting | | | | | |
| Berekening tijprisma | | 25.5 | 27.7 | 53.2 | |
| ruwe data | 64.4 | 15.9 | 26.4 | 42.3 | 66 |
| extrapolatie IMDC (*) | | 20.5 | 26.2 | 46.7 | |
| extrapolatie | 78.1 | 21.9 | 31.2 | 53.0 | 68 |
| Doodtij – numerieke model | | | | | |
| Berekening tijprisma | | 19.0 | 19.0 | 38.0 | |
| Scenario 4 | 60.4 | 20.6 | 21.8 | 42.4 | 70 |
| Doodtij – 13-uursmeting | | | | | |
| Berekening tijprisma | | 17.7 | 19.7 | 37.3 | |
| ruwe data | 52.4 | 12.6 | 19.1 | 31.7 | 60 |
| extrapolatie IMDC (*) | | 16.6 | 22.3 | 38.9 | |
| extrapolatie | 61.9 | 14.1 | 22.9 | 37.0 | 60 |

Tabel 2 – Vergelijking van de berekeningsmethoden beschreven in paragrafen 3.3.1 (methode 1) en 3.3.2 (methode 2).

| | Tijvulling [%] | Horizontale uitwisseling (methode 1) [%] | Verticale uitwisseling (methode 1) [%] | Horizontale uitwisseling (methode 2) [%] | Verticale uitwisseling (methode 2) [%] |
|------------------|-------------------|---|---|---|---|
| Springtij | | | | | |
| Scenario 1 | 77 | 19 | 4 | 21 | 2 |
| Scenario 2 | 78 | 16 | 7 | 19 | 3 |
| Scenario 3 | 68 | 14 | 18 | 21 | 11 |
| 13-uursmeting | 66 | 20 | 15 | 22 | 13 |
| Doodtij | | | | | |
| Scenario 4 | 70 | 20 | 10 | 25 | 5 |
| 13-uursmeting | 60 | 25 | 15 | 29 | 10 |

Figuur 5, Figuur 6 en Figuur 7 tonen voor elk moment van het getij de gemeten tijvulling en de gemeten in- en uitstroom die niet te wijten is aan de tijvulling, alsook de in- en uitstroom te wijten aan de horizontale en verticale uitwisselingsprocessen, zoals bekomen met de tweede berekeningsmethode. De symmetrie van alle in- en uitstroom, niet te wijten aan tijvulling, is inherent aan de basisveronderstelling van de gebruikte berekeningsmethode. Deze stelt immers dat de tijvulling op een bepaald moment van het getij gelijk is aan de netto in- of uitstroom. Horizontale en verticale uitwisseling kunnen dus per definitie geen netto effect hebben op de in- of uitstroom; of met andere woorden, zowel voor horizontale als voor verticale uitwisseling geldt dat de instroom te wijten aan deze wateruitwisselingscomponent gelijk moet zijn aan de uitstroom.

Zoals verwacht werd, geeft elk opeenvolgend modelscenario bij springtij (scenario's 1 tot en met 3) een belangrijkere invloed weer van de verticale uitwisselingsprocessen. Dit is niet alleen zo getijgemiddeld (*Tabel 2*), maar ook voor elk moment van het getij (*Figuur 5*). Een zoetwaterlozing die 1% van het tijvolume bedraagt, zoals gesimuleerd in scenario 3, betekent een verhoging van 11% van de totale bruto wateruitwisseling (zie *Tabel 1*) en meer dan een verdubbeling van de verticale uitwisselingscomponent (*Tabel 2*). Instantaan – omstreeks kentering – kan de wateruitwisseling te wijten aan verticale processen dan tot 60% van de totale wateruitwisseling bedragen.

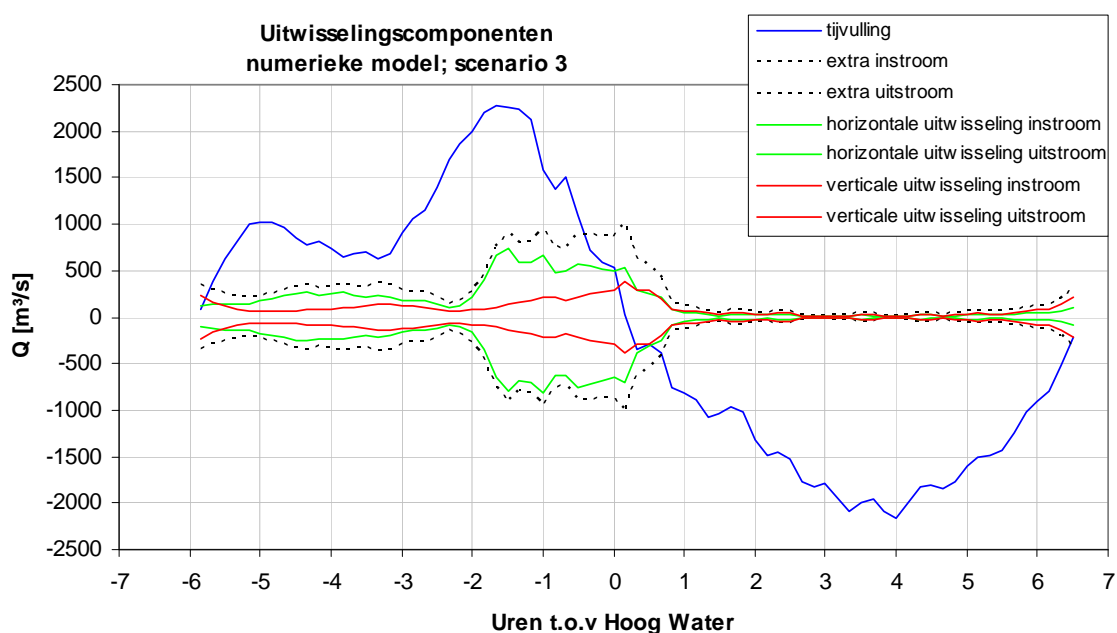
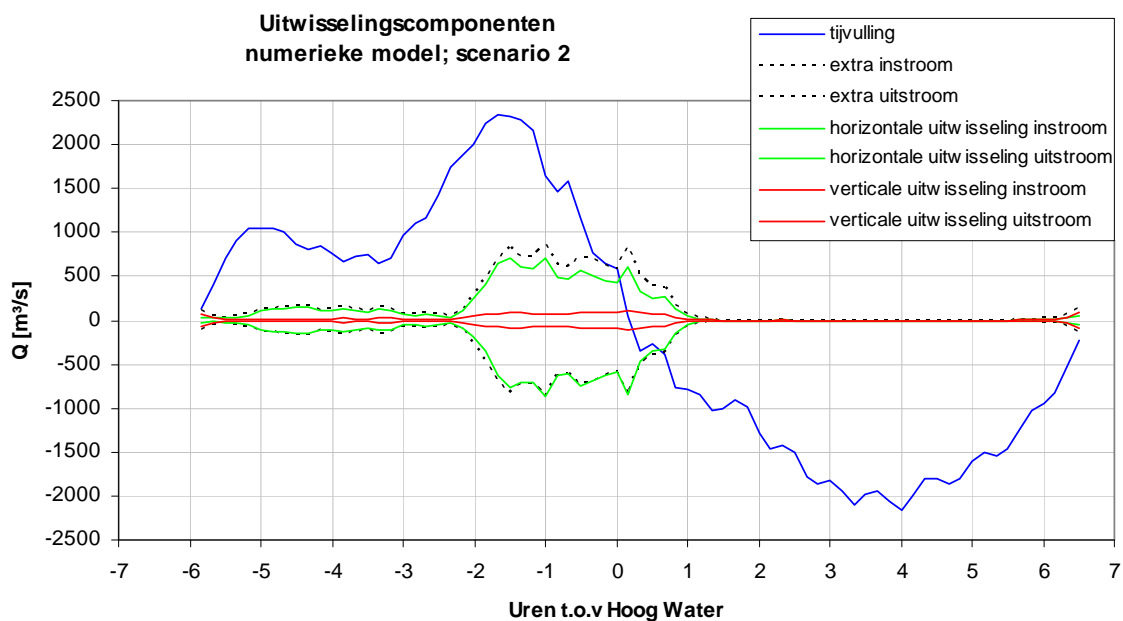
Eveneens volgens verwachting, veranderen de debieten te wijten aan horizontale wateruitwisseling weinig of niet (*Figuur 5, Figuur 7*). Dit is omdat deze uitwisseling wordt veroorzaakt door het snelheidsverschil tussen het water dat voorlangs de koppen stroomt en het water binnen in de haven (schering). De instantane horizontale uitwisseling behaalt dan ook zijn maximum (tot ca. 50% van de totale wateruitwisseling) op het moment van maximale vloedstroming, wanneer zowel de stroomsnelheid voorlangs de haven als de snelheid waarmee het water de haven binnenstroomt het grootst is (*Figuur 5*). Dit effect wordt nog eens versterkt doordat de vloedstroom “binnenschiet” langs de oostelijke strekdam (Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, 1998). Zolang er een gelijkaardig getij wordt beschreven zal dus ook de horizontale wateruitwisseling vergelijkbaar blijven.

Omdat de tijslag en de snelheden bij doortij lager liggen dan bij springtij zijn de waargenomen debieten door de havenmond natuurlijk lager. Toch blijkt de relatieve verhouding van de verschillende wateruitwisselingsprocessen qua grootte orde goed vergelijkbaar bij spring- en doortij (*Tabel 2*). Grof weg kan er gesteld worden dat tijvulling – getijgemiddeld – steeds verantwoordelijk is voor 60 à 70% van de totale wateruitwisseling; horizontale en verticale uitwisselingsprocessen respectievelijk 14 à 29% en 2 à 13%. Toch kunnen zowel horizontale als verticale uitwisseling instantaan veel belangrijker zijn.

4.3 Validatie

Zoals in bovenstaande paragrafen 3.3.3 en 4.1 reeds aangehaald blijkt het stromingspatroon tussen de koppen bekomen uit het numerieke model redelijk overeen komt met de ADCP-metingen. *Tabel 1* en *Tabel 2* bevestigen dit nog eens, aangezien ook de getijgemiddelde bijdragen van de verschillende componenten overeenkomen. Zij het dat de overeenkomst tussen modelresultaten en metingen beter lijkt te zijn voor springtij dan voor doortij. Wanneer men echter de instantane uitwisselingsvolumes bekijkt, lijken de numerieke resultaten beter overeen te komen met de metingen bij doortij (*Figuur 7*) dan bij springtij (*Figuur 6*). De sterke verstoring omstreeks één uur voor hoogwater in de springtij meetreeks kan het gevolg zijn van een foutieve meting of van een zeer korte meetraai, waardoor de tijvulling onderschat wordt.

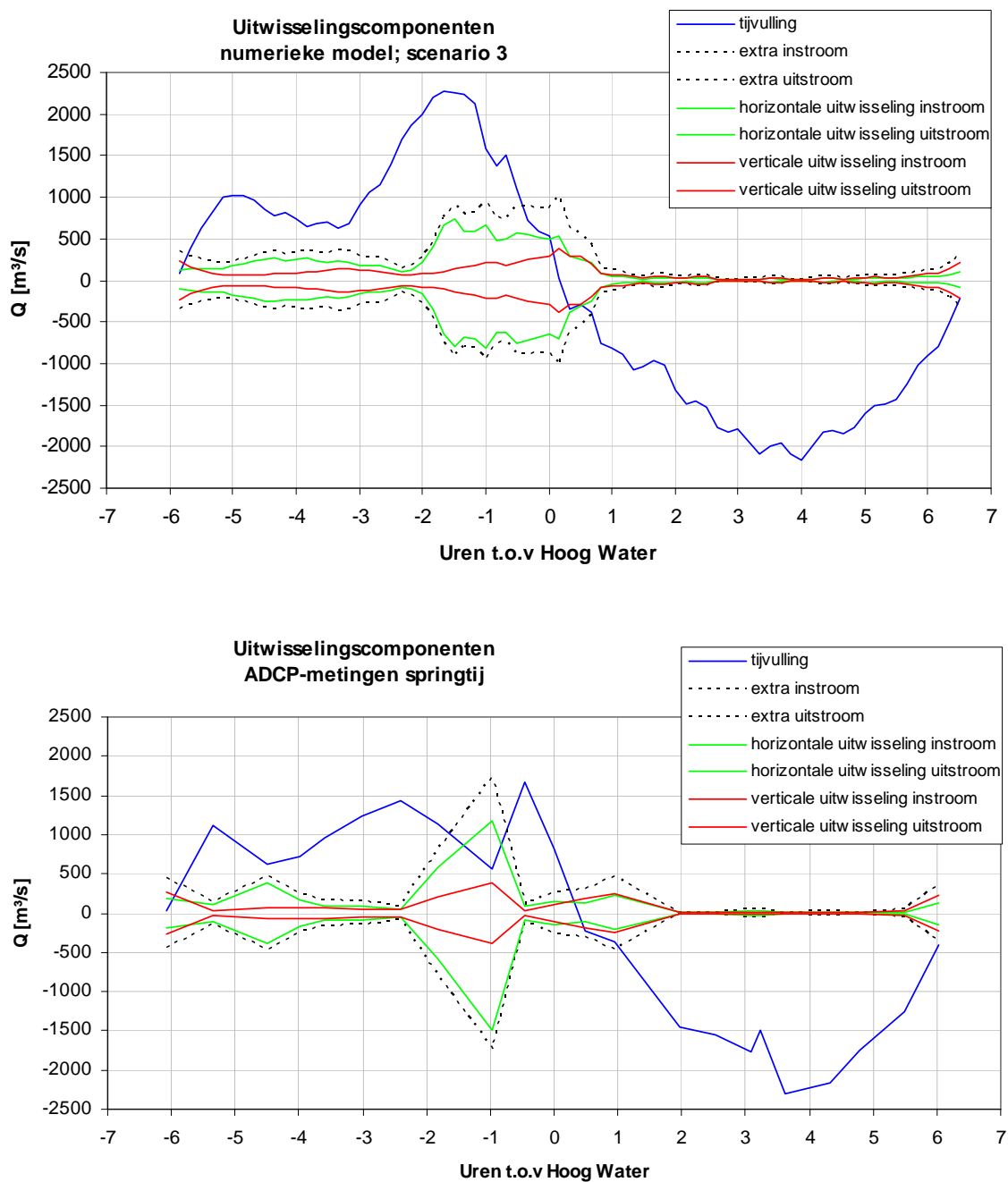
Men mag dus besluiten dat, ondanks kleine verschillen, het numerieke model en de 13-uursmetingen de wateruitwisseling door de havenmond op een gelijkaardige manier beschrijven en het dus mogelijk is kwalitatieve uitspraken te doen over de drie uitwisselingsprocessen.



Figuur 5 – Vergelijking van de instantane in- en uitstroom in het numeriek model ten gevolge van de drie componenten.

Blaue lijn – tijvulling; Zwarte stippellijn – waargenomen in- of uitstroom die niet kan worden toegeschreven aan de tijvulling; Groene lijn – wateruitwisseling ten gevolge van horizontale uitwisselingsprocessen; Rode lijn – wateruitwisseling ten gevolge van verticale uitwisselingsprocessen.

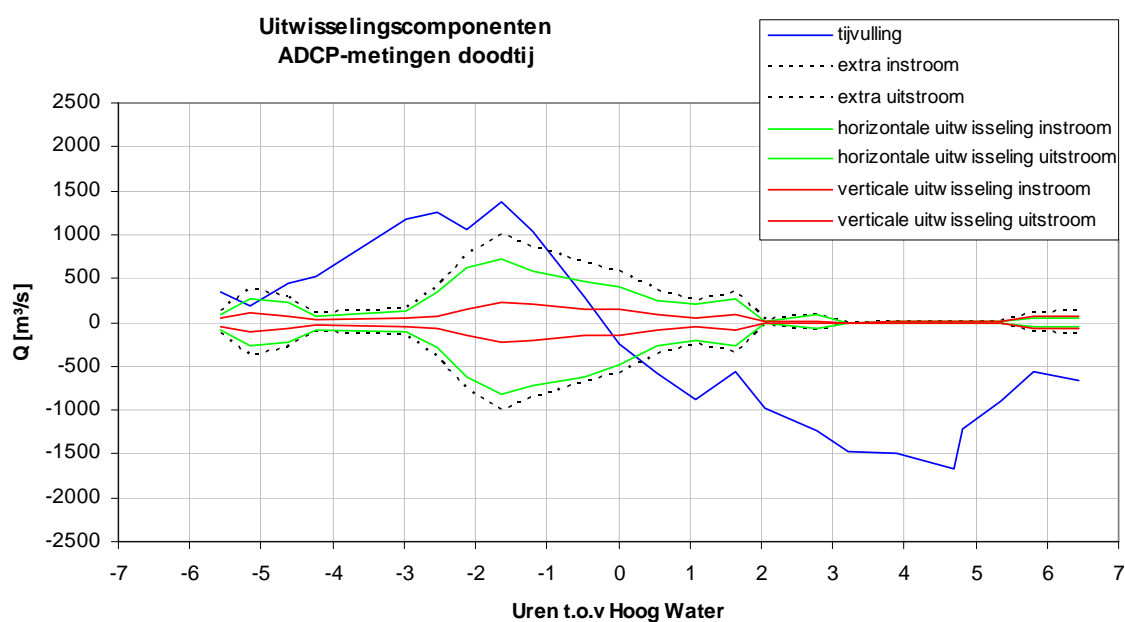
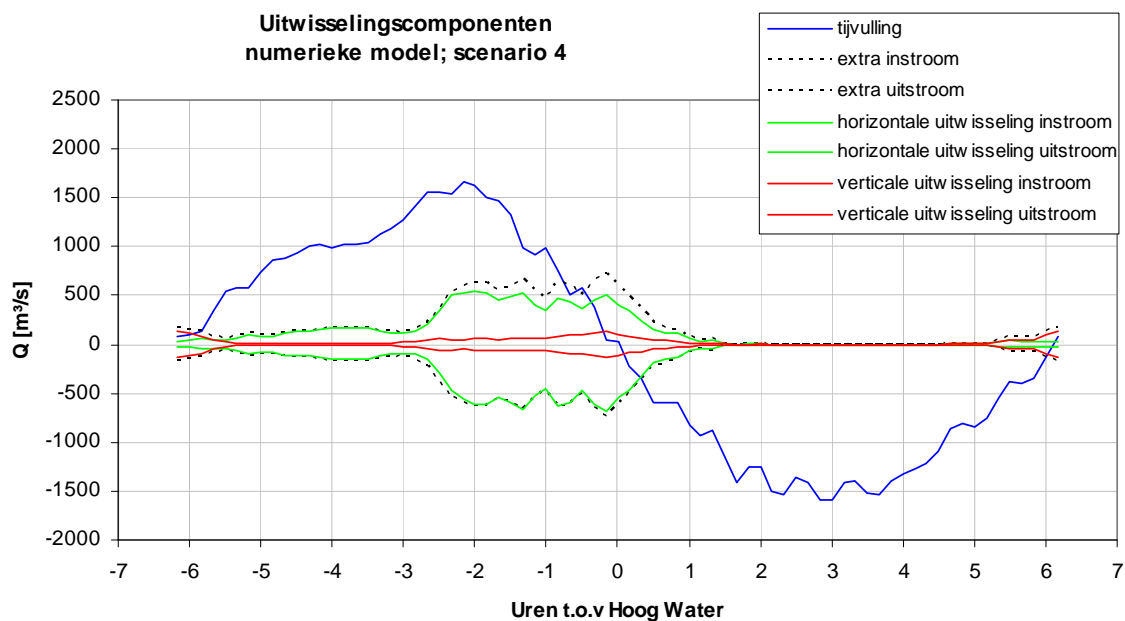
De bovenste figuur geeft scenario 2 weer, de onderste figuur scenario 3. Er is in beide modelconfiguraties te zien hoe de horizontale uitwisseling plots sterk toeneemt, dit moment valt samen met de maximale vloedstroom en is te wijten aan het binnenschieten van de vloedstroom net voor hoogwater. Ook is duidelijk te zien dat in scenario 3 de verticale uitwisseling op elk moment van het getij belangrijker is dan in scenario 2. Uitgezonderd van de momenten net na kentering van vloed- en ebstroom blijft de verticale uitwisseling steeds kleiner dan de horizontale uitwisseling.



Figuur 6 – Vergelijking van numerieke modelresultaten en adcp-metingen bij springtij.

Blauwe lijn – tijvulling; Zwarte stippellijn – waargenomen in- of uitstroom die niet kan worden toegeschreven aan de tijvulling; Groene lijn – wateruitwisseling ten gevolge van horizontale uitwisselingsprocessen; Rode lijn – wateruitwisseling ten gevolge van verticale uitwisselingsprocessen.

Hoewel niet precies hetzelfde moment in de springtij – doortij cyclus wordt weergegeven en de tijdsresolutie van de ADCP-metingen lager ligt, geven beide toch een vergelijkbaar beeld. De sterke afwijking in de metingen omstreeks één uur voor hoogwater is waarschijnlijk te wijten aan een foutieve meting of een zeer korte meetraai, waardoor de tijvulling onderschat wordt.



Figuur 7 – Vergelijking van numerieke modelresultaten en adcp-metingen bij doodtij.

Blauwe lijn – tijvulling; Zwarte stippellijn – waargenomen in- of uitstroom die niet kan worden toegeschreven aan de tijvulling; Groene lijn – wateruitwisseling ten gevolge van horizontale uitwisselingsprocessen; Rode lijn – wateruitwisseling ten gevolge van verticale uitwisselingsprocessen.

Hoewel niet precies hetzelfde moment in de springtij – doodtij cyclus wordt weergegeven en de tijdsresolutie van de ADCP-metingen lager ligt, geven beide toch een zeer gelijklopend beeld.

5 Sedimenttransport door de havenmond

De kustzone tussen Oostende en de Westerschelde monding, en dus ook de directe omgeving van Zeebrugge wordt gekenmerkt door het voorkomen van een turbiditeitsmaximum: de concentraties aan zwevend stof zijn hier merkbaar hoger dan in andere delen van de zuidelijke Noordzee en de Westerschelde. Meer dan 80% van de sedimentdeeltjes in suspensie zijn silt of kleipartikels. De gemiddelde korrelgrootte van de individuele sedimentdeeltjes bedraagt $1,1 \pm 3,7\mu\text{m}$ (Lauwart et al, 2008). Afhankelijk van de fase van het getij groeien deze deeltjes aaneen tot vlokken van 150 tot $838\mu\text{m}$ (IMDC, 2007). In de haven van Zeebrugge wordt sediment gebaggerd dat gemiddeld uit meer dan 60% slib (deeltjes $< 63\mu\text{m}$) bestaat. In het Centraal Deel van de Nieuwe Buitenhaven zijn de deeltjes gemiddeld fijner dan in de rest van de haven (63 à 70% t.o.v. 25 à 95% deeltjes fijner dan $63\mu\text{m}$) (anoniem, 1993).

5.1 Validatie van de metingen

Tijdens de twee 13-uursmeetcampagnes werd de concentratie aan zwevend stof opgemeten in een dwarsraai over de haveningang. Hiervoor werd gebruik gemaakt van twee meetmethodes: in de ene richting werd de concentratie opgemeten met de SiltProfiler, in de andere richting werd gebruik gemaakt van een ADCP-toestel. Beide methodes werden geïkt aan de hand van waterstalen genomen aan het begin of einde van elke gevaren dwarsraai (zie hoofdstuk 2). Omdat beide toestellen op een andere meetprincipe gebaseerd zijn (optische en akoestische backscatter), en omdat de metingen afwisselend gebeurden, is het moeilijk deze twee direct met elkaar te vergelijken. Toch is dit nodig omdat het ADCP-toestel een belangrijk deel van het sedimenttransport niet kan opmeten (blinde zone tegen de bodem), terwijl de SiltProfiler dit wel kan, maar geen ruimtelijk beeld geeft. *Bijlage F* en *Bijlage G* tonen voor elke ADCP-dwarsraai de – in de tijd – dichtstbijzijnde SiltProfiler verticalen. Er is duidelijk te zien hoe de sterkere dichtheitsgradiënt aan de bodem verloren gaat bij het uitmiddelen van de ADCP-meting in vijf dieptelagen. Maar belangrijker, deze figuren tonen ook hoe de ADCP-metingen hogere sedimentconcentraties stelselmatig onderschatten. Dit beeld wordt nog eens bevestigd door *Figuur 8*. De hoogste sedimentconcentratie gemeten met het ADCP-toestel is ongeveer 250mg/l. Bij concentraties tussen de 10 en de 100mg/l vertonen beide meetmethodes een goede overeenkomst (al lijkt het ADCP-toestel iets hogere concentraties te meten dan de SiltProfiler); bij hogere sedimentconcentraties gaat de ADCP-meter in saturatie.

Door IMDC werd al een correctie toegepast op de ADCP-metingen om een benadering van de sedimentconcentratie nabij de bodem te bekomen. Deze bleek echter onvoldoende om de gemaakte onderschatting van zowel wateruitwisseling als sediment import te compenseren (IMDC, 2008a & 2008b). Om dit probleem te verhelpen werden binnen dit onderzoek twee andere correctie methodes uitgeprobeerd.

1. **Opschaling** van de ADCP-data aan de hand van een best fit doorheen de correlatie tussen beide meetmethodes (zie *Figuur 8*) leverde net als de door IMDC toegepaste correctie methode niet het verwachte resultaat. Dit is waarschijnlijk te wijten aan het feit dat op deze manier alle ADCP-metingen met een hoge concentratie op dezelfde manier worden opgeschaald. Hierdoor worden op bepaalde momenten van het getij, wanneer de sedimentconcentraties slechts licht verhoogd zijn, deze concentraties sterk overschat.
2. **Substitutie**: hierbij werd er geopteerd om enkel die ADCP-metingen aan te passen waarvoor de overeenkomstige SiltProfiler data een waarde hoger dan een bepaalde drempelwaarde bedraagt. Voor springtij werd als drempelwaarde 100mg/l gekozen, voor doodtij 70mg/l (zie

Figuur 8). In tegenstelling tot de hierboven voorgestelde methode, werden de te corrigeren ADCP-data nu niet opgeschaald, maar vervangen (gesubstitueerd) door de overeenkomstige SiltProfiler data. Op deze manier wordt de betrouwbare, ruimtelijke verdeling van de ADCP-meetgegevens behouden terwijl de onbetrouwbare metingen, buiten het meetbereik van het ADCP-toestel alsook in de blinde zone aan de bodem, vervangen worden door deze uit de SiltProfiler verticalen.

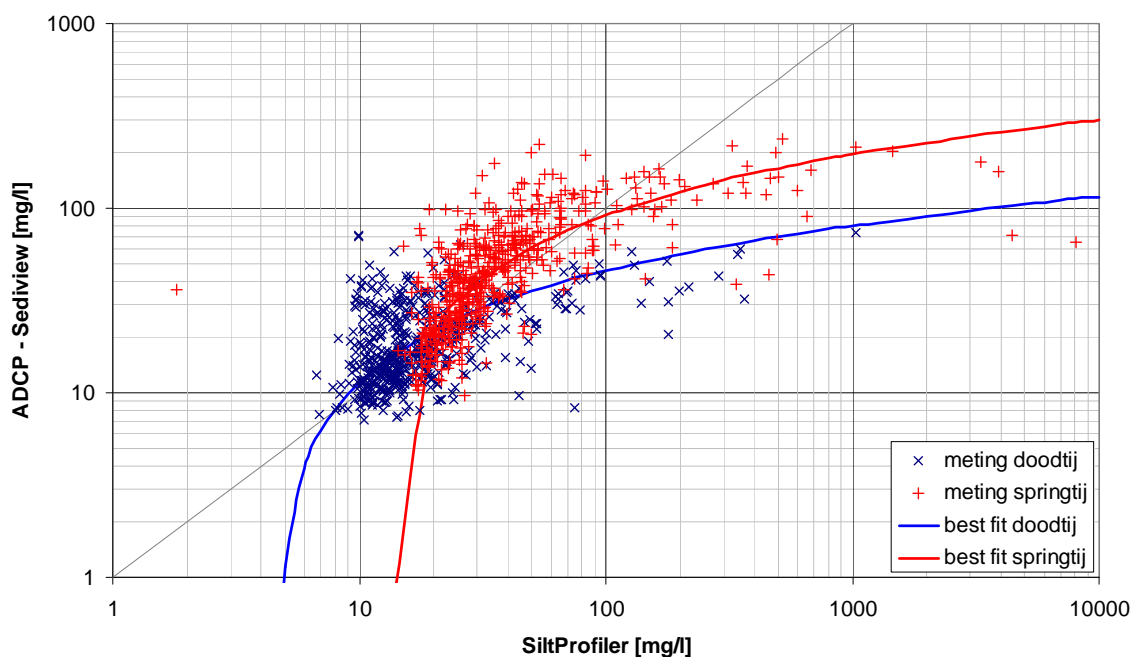
Om de metingen en de verschillende correctie methodes te valideren werd de residuele sedimentflux vergeleken met de gemiddelde jaarlijkse hoeveelheid aan onderhoudsbaggerwerk in zowel het Centraal Deel van de Nieuwe Buitenhaven als in de volledige haven voor de periode april 2003 – maart 2007 (Louweart et al., 2006 & 2008). De berekende sedimentfluxen bij spring- en dootij werden omgerekend naar een sedimentflux bij gemiddeld tij zoals hieronder uitgewerkt. Door IMDC werd aan elk getij een tijcoëfficiënt toegekend die de verhouding van het tijverschil van dat welbepaalde getij tot het tijverschil van het gemiddelde tij uit de periode 1991-2000 weergeeft (IMDC, 2008a & 2008b). Met behulp van deze coëfficiënten werd een gewogen gemiddelde van de sedimentflux bepaald. Vermenigvuldiging met de verhouding van een jaar tot de duur van het gemiddeld tij (12u19) geeft de jaarlijkse residuele sedimentflux. Hierbij mag niet vergeten worden dat met behulp van deze tijcoëfficiënt eigenlijk enkel tijslag en stroomsnelheden worden geschaald; de relatie tussen sedimentconcentratie en de springtij – dootij cyclus is immers minder eenduidig. IMDC (2008c) toonde al aan dat de hoogste concentraties aan zwevend stof voorkomen bij springtij en de laagste concentraties bij dootij. Een eenduidig verband tussen de concentratie aan zwevend stof en het tijverschil, of tussen de concentratie aan zwevend stof en het snelheidsverschil, kon echter niet worden aangetoond door de grote spreiding van de data. Deze spreiding is wellicht het gevolg van andere factoren die de concentratie aan zwevend stof beïnvloeden zoals seizoenale variaties, meteo- en windklimaat en sedimentaanvoer vanaf de Westerschelde en de Maas-Rijnmond en het Nauw van Calais. Een betere schatting van de jaarlijkse sedimentflux is dus voorlopig niet mogelijk en vereist een beter begrip van de hierboven vernoemde invloedsfactoren.

Uit *Tabel 3* blijkt dat de substitutie methode toch een redelijke benadering geeft van de jaarlijkse onderhoudsbaggerwerken en het dus mogelijk maakt om uitspraken te doen over de relatieve belangrijkheid van de verschillende wateruitwisselingscomponenten op de aanslibbing. Aangezien de water instroom wordt onderschat en de uitstroom overschat (zie paragraaf 4.1), is het niet verwonderlijk dat de residuele sedimentflux een onderschatting geeft ten opzichte van de jaarlijkse baggerhoeveelheden in de volledige haven. De hogere schatting van de residuele sedimentflux aan de hand van de SiltProfiler is minder betrouwbaar aangezien de interpolatie en extrapolatie van de metingen (op slechts vijf verticalen per dwarsraai over de havenmond) een veel grotere onzekerheid veroorzaken.

5.2 Samenspel wateruitwisseling en sediment

In een vorig hoofdstuk werd reeds aangetoond dat numerieke modelresultaten en 13-uurs meetcampagnes een vergelijkbaar stromingspatroon tussen de koppen van de havendammen vertonen. Ook bleken de metingen van concentratie aan zwevend stof tijdens deze 13-uurs campagnes – na correctie voor de blinde zones, de niet bemeten zones nabij de koppen van de strekdammen en het meetbereik van het ADCP-toestel – te leiden tot een redelijke voorspelling van de jaarlijkse aanslibbing in de haven van Zeebrugge. *Tabel 4* toont dat zowel bij springtij als bij dootij meer dan 70% van alle zwevend stof dat de haven binnenkomt ook daar sedimenteert.

Correlatie tussen SiltProfiler en ADCP-metingen



Figuur 8 – Correlatie tussen SiltProfiler en ADCP-metingen

Tabel 3 – Overzicht van de gemeten sedimentatie

De sedimentatie werd berekend aan de hand van de residuele sedimentflux. Omdat de gevaren transects niet de volledige havenmond overspannen werd er een extrapolatie toegepast naar de havenkoppen toe. De extrapolatie van het snelheidsveld werd besproken in paragraaf 4.1. Gemeten sedimentconcentraties werden op verschillende wijzen gecorrigeerd (zie paragraaf 5.1).

(*) Louwaert et al., 2006 & 2008.

| | TDS/tij (springtij) | TDS/tij (doodtij) | TDS/tij (gemiddeld tij) | TDS/jaar |
|---|------------------------|----------------------|----------------------------|-----------|
| onderhoudsbaggerwerk (enkel CDNB) (*) | | | 3186 | 2.270.000 |
| onderhoudsbaggerwerk (volledige haven) (*) | | | 5631 | 4.010.000 |
| SiltProfiler data | 7320 | 3674 | 5285 | 3.760.000 |
| ADCP-data | 814 | 291 | 520 | 370.000 |
| gecorrigeerde ADCP-data (IMDC, 2008b) | 734 | 417 | 558 | 397.000 |
| gecorrigeerde ADCP-data (opschaling) | 2786 | 2199 | 2470 | 1.760.000 |
| gecorrigeerde ADCP-data (substitutie) | 7229 | 1799 | 4173 | 2.970.000 |

Tabel 4 – Sedimentflux door de havenmond

| | instroom [TDS/tij] | uitstroom [TDS/tij] | netto aanslibbing [TDS/tij] | netto aanslibbing [% instroom] |
|--|-----------------------|------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| springtij | | | | |
| gecorrigeerde ADCP-data (substitutie) | 10.035 | 2.805 | 7.229 | 72 |
| doodtij | | | | |
| gecorrigeerde ADCP-data (substitutie) | 2.481 | 682 | 1.799 | 73 |

Hieronder wordt een kwalitatieve beschrijving gegeven van de verschillende processen die spelen bij springtij en doodtij. Eerst wordt de gemiddelde sedimentconcentratie en –flux besproken, daarna wordt er dieper ingegaan op de verdeling ervan over de havenmond. Om op een eenvoudige wijze een beeld te krijgen van de sedimentverdeling over de havenmond werd deze opgedeeld in vijf horizontale lagen en vijf verticale kolommen, gesitueerd rondom de SiltProfiler verticalen.

5.2.1 Springtij

In de eerste deelfiguur van *Figuur 9* is te zien hoe de (over de havenmond) gemiddelde sedimentconcentratie vanaf 3uur voor hoogwater begint toe te nemen; één uur na hoogwater zijn de concentraties terug gezakt naar de normale achtergrond waarden. Ongeveer 0,5uur voor hoogwater bereikt de sedimentconcentratie haar maximum. De duur van deze piek komt overeen met de periode tijdens dewelke horizontale uitwisselingsprocessen relatief belangrijk zijn. Het concentratie maximum treedt echter pas een uur na de maximale vloedstroom en piek in horizontale uitwisseling op. Een tweede, lichte verhoging van de concentratie komt voor van één uur voor laagwater tot laagwater. De eerste deelfiguur van *Figuur 10* toont de over de havenmond gemiddelde sedimentflux. Deze vertoont een zeer gelijkaardig verloop als de sedimentconcentratie: Gedurende de hele fase van stijgend water is er instroom van sediment, maar pas vanaf 3 uur voor hoogwater wordt deze belangrijk. De maximale sediment instroom treedt op een half uur voor hoogwater. Na hoogwater is er een korte periode waar er plots sediment uitstroom optreedt. Deze kleine piek neemt snel terug af, maar van één uur na hoogwater tot een half uur voor laagwater is er een continue – zij het beperkte – uitstroom van sediment.

De tweede deelfiguur van *Figuur 9* toont dat de sedimentverdeling over de diepte nagenoeg constant is over het hele tij. Geheel naar verwachting is de sedimentconcentratie hoger met de diepte. Het grootste deel van de sedimentimport gebeurt duidelijk langs de bodem in de oostelijke helft van de havenmond. Ongeveer 2,5uur voor hoogwater, samen met het aantrekken van de vloedstroom begint de sedimentconcentratie in de onderste laag sterk te stijgen. Vanaf 2 uur voor hoogwater begint ook de sedimentconcentratie in de andere lagen te stijgen, zij het minder sterk. Maximale concentraties worden behaald 1 à 0,5uur voor hoogwater, net na het optreden van de maximale vloedstroom; of omstreeks het binnenschieten ervan. Op de derde deelfiguur van *Figuur 9* is duidelijk te zien hoe de vloedstroom eerst in het oosten van de havenmond zorgt voor een verhoogde sedimentconcentratie (ca. 2,5uur voor hoogwater), maar dat de grootste piek enkel optreedt in het meest oostelijk deel omstreeks 0,5uur voor hoogwater. Dit verloop van de sedimentconcentratie wijst erop dat horizontale uitwisselingsprocessen (neervorming) op dit moment van het tij belangrijker zijn voor de sedimentuitwisseling dan de verticale uitwisselingsprocessen. De piek in sedimentconcentratie treedt immers op tegelijkertijd met een periode van verhoogde horizontale uitwisseling (ca. 2 uur voor hoogwater tot hoogwater). Tijdens deze periode is er ook een verhoogde verticale uitwisseling, deze is echter relatief minder belangrijk en behaalt haar

maximale waarde pas omstreeks hoogwater, wanneer de sedimentconcentratie al behoorlijk verminderd is.

De sedimentfluxen, weergegeven in *Figuur 10* tonen hetzelfde beeld. Bijkomend is er wel een licht verhoogde sedimentimport te zien nabij de bodem in het meest westelijk deel van de havenmond rond laagwater. Analyse van het stromingspatroon tussen de koppen (zie *Bijlage D*) toont dat deze waarschijnlijk het gevolg is van een episode met relatief belangrijke densiteitstroming die duurt van ca. 1 uur voor laagwater tot 0,5 uur na laagwater. Daarna nemen horizontale uitwisselingsprocessen en vooral tijvulling snel aan belang toe. Opvallend is een korte periode van relatief sterke sediment export aan de bodem in het meest oostelijk deel van de havenmond omstreeks hoogwater. Ook deze is mogelijks te wijten aan een verandering in het nerenpatroon over de havenmond. In de resultaten van het numerieke model wordt deze verandering echter pas ingezet vanaf 40 minuten na hoogwater.

De eerste verhoging van de sedimentflux in de oostelijke helft van de havenmond (van 2,5 tot 1 uur voor hoogwater) is verantwoordelijk voor 30% van alle sedimentimport; de piek in sedimentflux aan de bodem in het meest oostelijke deel van de havenmond zorgt voor nog eens 40% van alle sedimentimport. Deze periode van 2,5 uur is dus verantwoordelijk voor 70% van alle sedimentimport. De periode met sedimentimport rond laagwater draagt maar voor 2 tot 4% bij aan de totale sedimentimport.

Een volledig ruimtelijk beeld van de gemeten sedimentconcentraties en berekende sedimentfluxen is terug te vinden in *Bijlage F* en *Bijlage H*.

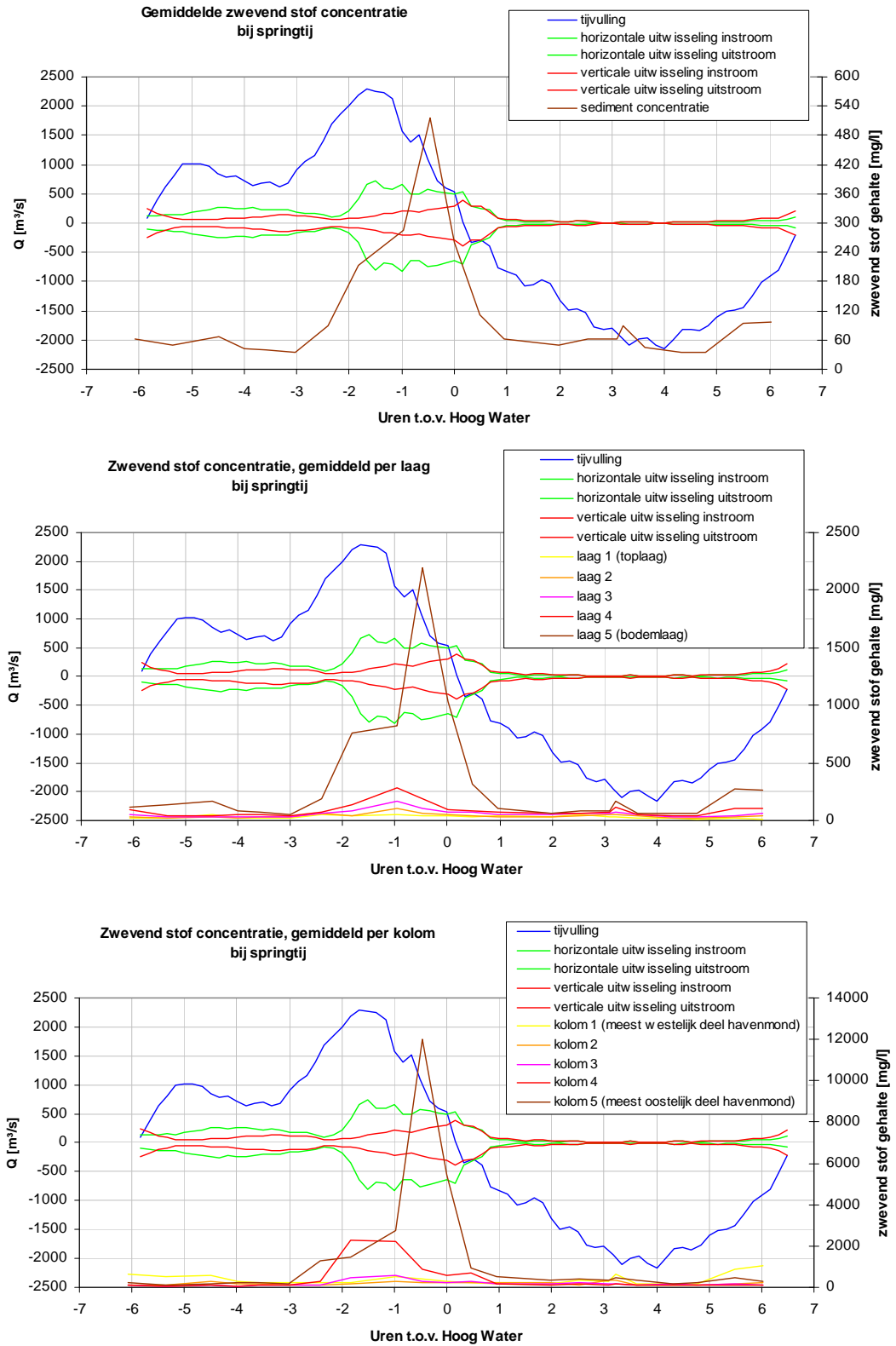
5.2.2 Doodtij

Hoewel bij doottij dezelfde processen spelen en de fasering zeer gelijklopend is als bij springtij, zijn zowel de debieten van de verschillende water uitwisselingscomponenten als de gemeten sedimentconcentraties duidelijk lager (*Figuur 11* en *Figuur 12*). Concentraties en fluxen liggen bij doottij bijna vijf maal lager dan bij springtij; dit was ook al te zien in *Tabel 3*. Opvallend is echter de uitgesproken piek in de gemeten sedimentconcentratie en sedimentimport aan de bodem in de westelijke helft van de havenmond ongeveer 1 uur na laagwater; bij springtij is hier enkel een lichte verhoging waar te nemen. Deze is waarschijnlijk het gevolg van een foutieve SiltProfiler meting die niet uit de dataset werd gefilterd (zie *Figuur 13*); geen van de drie wateruitwisselingscomponenten toont immers op dit moment een belangrijke verhoging.

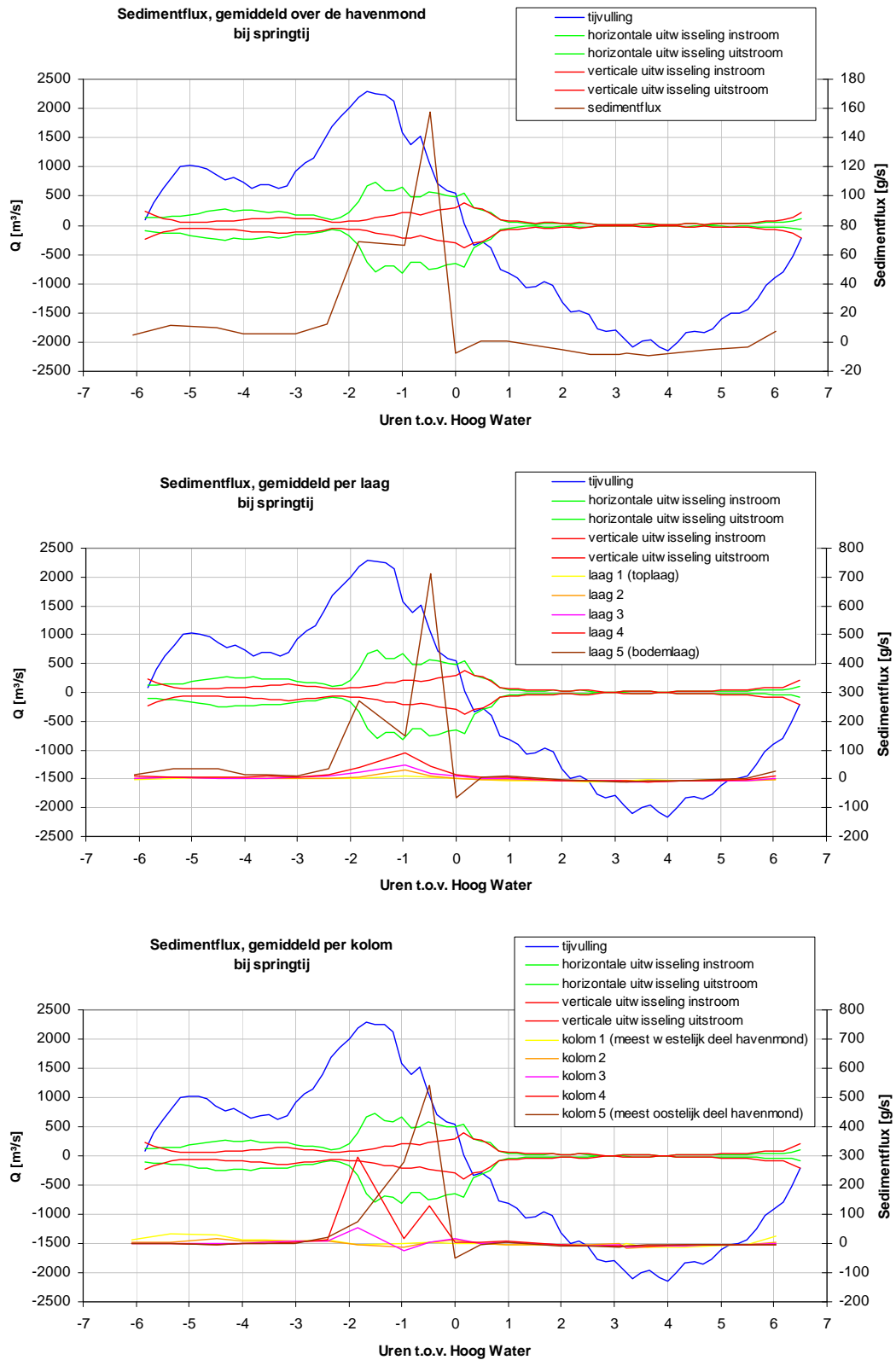
In vergelijking met springtij treedt de sedimentflux die verantwoordelijk is voor het overgrote deel (tot 85%) van de aanslibbing iets vroeger op. Dit is logisch aangezien ook de maximale vloedstroom en instroom in de haven bij doottij vroeger optreden ten opzichte van hoogwater dan bij springtij (maximale stroming doottij 2 uur voor hoogwater i.p.v. 1,5 uur en maximale sedimentflux ca. 1 uur voor hoogwater i.p.v. 0,5 uur). Ook de duur van de verhoogde sedimentflux is korter (1,5 uur i.p.v. 2,5 uur).

De graduele opbouw naar de maximale sedimentflux die wordt waargenomen bij springtij (eerst verhoging in de oostelijke helft van de havenmond, daarna piek enkel in het uiterste oosten), blijft bij doottij achterwege. Er wordt wel een lichte verhoging van de sedimentflux waargenomen in de oostelijke helft van de havenmond, maar deze is – in vergelijking tot de situatie bij springtij – veel minder belangrijk ten opzichte van de echte piek in het uiterste oosten van de havenmond.

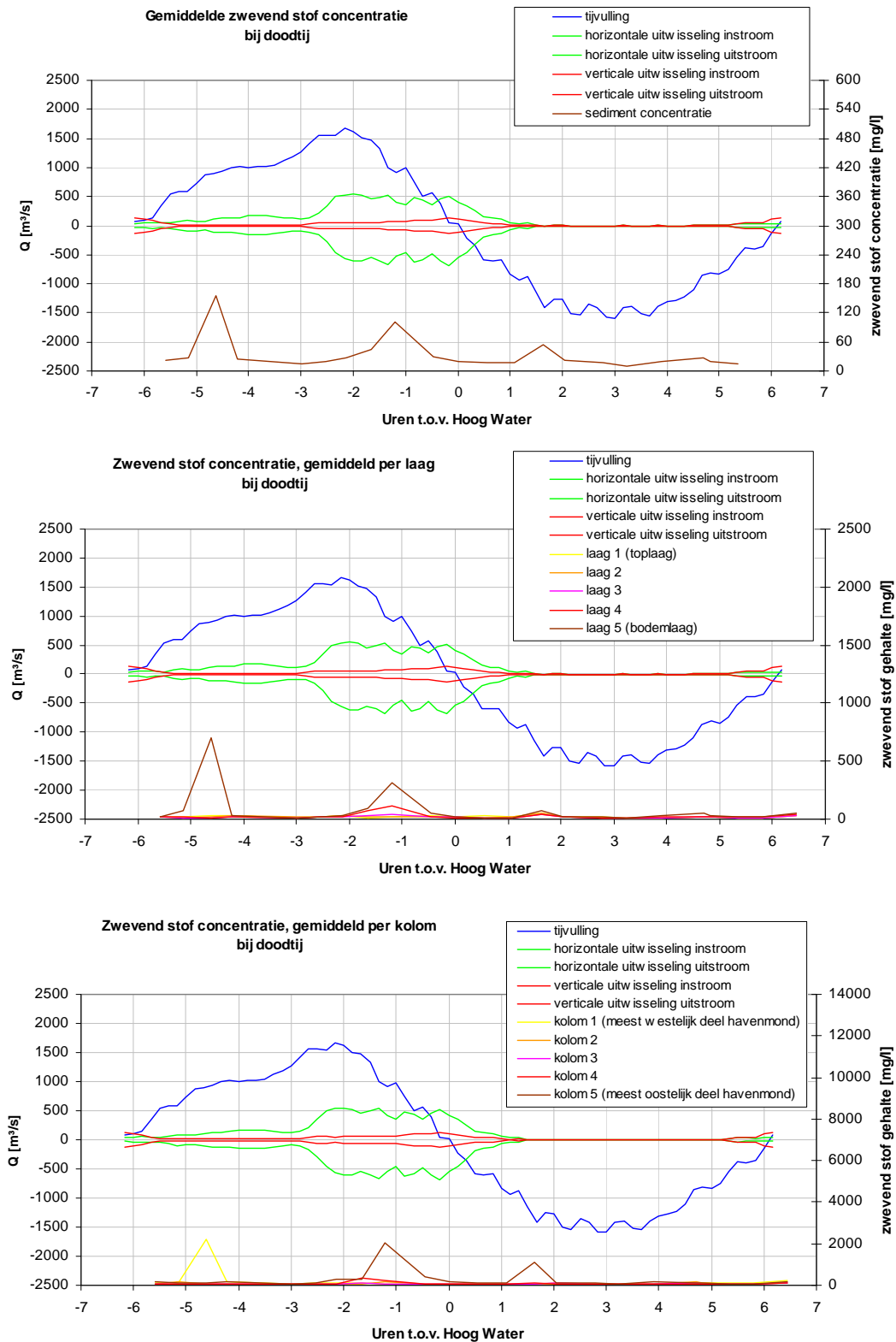
Een volledig ruimtelijk beeld van de gemeten sedimentconcentraties en berekende sedimentfluxen is terug te vinden in *Bijlage G* en *Bijlage I*.



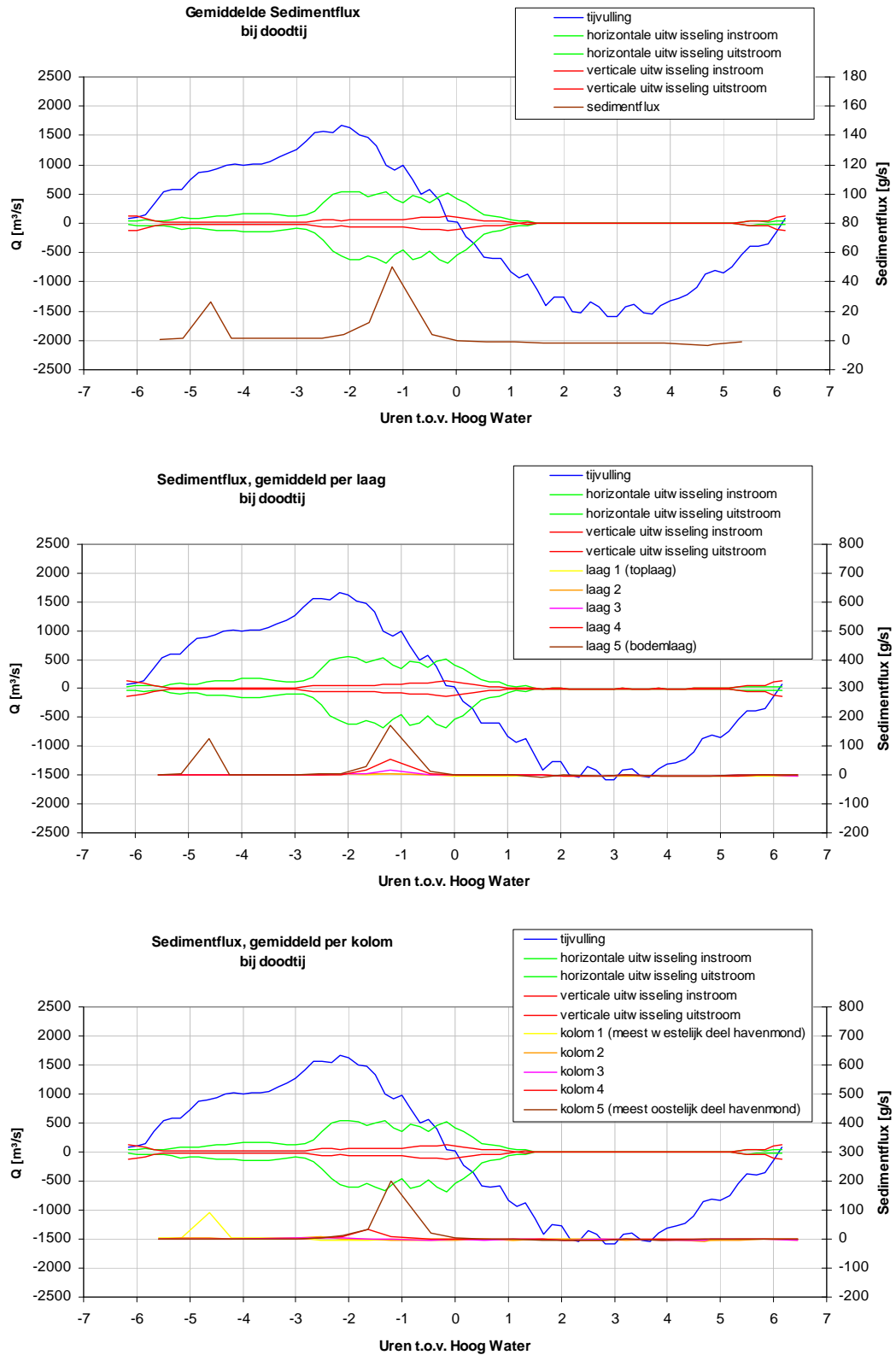
Figuur 9 – Gemeten sedimentconcentratie bij springtij
 Boven – verloop van de gemiddelde sedimentconcentratie over het getij; Midden – gemiddelde sedimentconcentratie per laag; Onder – gemiddelde sedimentconcentratie per kolom



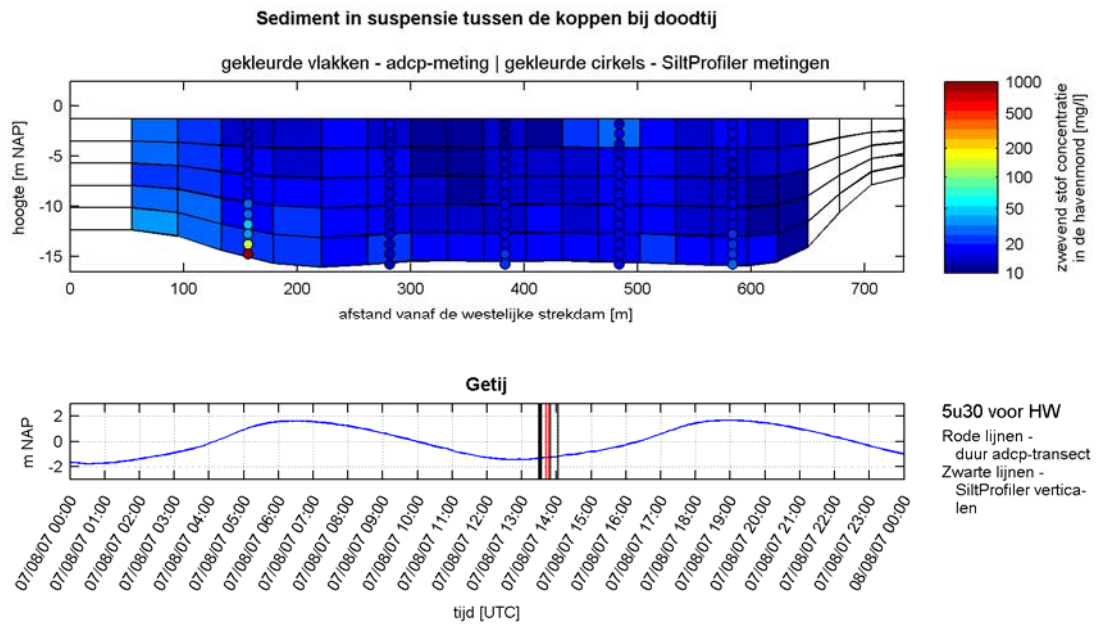
Figuur 10 – Gemeten sedimentflux bij springtij
 Boven – verloop van de gemiddelde sedimentflux over het getij; Midden – gemiddelde sedimentflux per laag;
 Onder – gemiddelde sedimentflux per kolom



Figuur 11 – Gemeten sedimentconcentratie bij doottij
 Boven – verloop van de gemiddelde sedimentconcentratie over het getij; Midden – gemiddelde sedimentconcentratie per laag; Onder – gemiddelde sedimentconcentratie per kolom



Figuur 12 - Gemeten sedimentflux bij doottij
 Boven – verloop van de gemiddelde sedimentflux over het getij; Midden – gemiddelde sedimentflux per laag;
 Onder – gemiddelde sedimentflux per kolom



Figuur 13 – Gemeten sedimentconcentratie in de havenmond, 1 uur na laagwater bij doottij
 Het onderste meetpunt in de meest westelijke SiltProfiler verticaal, met een waarde hoger dan 1000mg/l is waarschijnlijk verantwoordelijk voor de piek in sedimentconcentratie en –flux weergegeven in *Figuur 11* en *Figuur 12*.

6 Conclusies en aanbevelingen

De wateruitwisseling ter hoogte van de havenmond van Zeebrugge bepaalt grotendeels de hydrodynamica in de haven. Daarnaast bevat het uitgewisselde water een hoeveelheid slib in suspensie, waardoor de wateruitwisseling eveneens een maat is voor de hoeveelheid slib die in (en uit) de haven getransporteerd zal worden. Over het algemeen worden er bij de studie van de wateruitwisseling ter hoogte van een haveningang drie processen onderscheiden:

1. **Tijvulling:** het volume water dat de haven in- en uitstroomt zuiver ten gevolge van het verschil tussen hoog- en laagwaterstand.
2. **Horizontale uitwisseling:** het volume water dat door de havenmond wordt uitgewisseld ten gevolge van de snelheidsgradiënt die optreedt tussen het gebied binnen en buiten de haven (cfr. menglaag of horizontale neervorming). De instroom van deze component is in theorie steeds gelijk aan de uitstroom, waardoor deze geen netto effect heeft op de wateruitwisseling.
3. **Verticale uitwisseling:** het volume water dat door de havenmond wordt uitgewisseld ten gevolge van de dichtheidsgradiënt die optreedt tussen het gebied binnen en buiten de haven (cfr. dichtheidstroming). De instroom van deze component is in theorie steeds gelijk aan de uitstroom, waardoor deze geen netto effect heeft op de wateruitwisseling.

Aan de grootte van de eerste component kan niets veranderd worden: het niveau van het laag- en het hoogwater in de haven wordt immers bepaald door de lokale getijcondities. Voor de andere twee componenten kan men maatregelen bedenken om hun bijdrage te wijzigen, om op die manier de sedimentimport in de haven te reduceren. In dit rapport werd de water- en sedimentuitwisseling ter hoogte van de havenmond in detail bestudeerd, met als doel na te gaan hoe belangrijk de bijdrage is van elke van de drie hierboven beschreven componenten.

In hoofdstukken 3 en 4 werd de wateruitwisseling ter hoogte van de havenmond beschreven aan de hand van natuurmetingen en numerieke modelscenario's. Er werd gekozen voor een springtij en een doottij aangezien deze 2 hydrodynamische situaties als extrema beschouwd kunnen worden. Uit de resultaten blijkt dat:

- De numerieke modelresultaten en de 13-uurs natuurmetingen een redelijk goede overeenkomst vertonen. Dit komt zowel tot uiting in de instantane stromingspatronen als in de uitwisselingsvolumes per getij.
- Tijvulling de belangrijkste vullingscomponent is voor de haven van Zeebrugge en – afhankelijk van het moment in de springtij-doottij cyclus en het al dan niet voorkomen van zoetwaterlozingen – zo'n 60 à 70% van de totale wateruitwisseling voor zijn rekening neemt. Wanneer er bij springtij geen zoetwaterlozingen gebeuren, zou dit zelfs kunnen oplopen tot 78%.
- Tijlediging de enige belangrijke vorm van wateruitwisseling is tijdens eb. Bij kentering nemen horizontale en verticale processen aan belang toe.
- Horizontale wateruitwisseling in elk bestudeerd scenario 20 à 30% van de totale wateruitwisseling betekent, met een instantane piek rond maximale vloedstroom van ca. 50%.
- Bij relatief kleine zoutgradiënten tussen de haven en de open zee, zoals deze natuurlijk voorkomen, verticale uitwisseling relatief onbelangrijk is en minder dan 5% van de totale wateruitwisseling betekent.
- Wanneer een belangrijke zoutgradiënt wordt geïnduceerd, bijvoorbeeld door het lozen van zoetwater in de haven door de uitwateringsconstructie te Heist, er een aanzienlijke verhoging

van de totale wateruitwisseling zal optreden en verticale uitwisseling tijdens bepaalde fases in het getij bijna even belangrijk wordt als horizontale uitwisseling. Wanneer er een zoetwater lozing gebeurt die 1% van de tijvulling bedraagt (dit is een realistische lozing gedurende een karakteristiek springtij), zal de totale wateruitwisseling stijgen met 11%, en het aandeel van de verticale uitwisseling meer dan verdubbelen.

Gemiddeld over het getij blijft het aandeel van de verticale uitwisseling steeds kleiner dan 15%, met instantane maxima die kunnen oplopen tot 60% bij kentering.

De hierboven gegeven percentages gelden voor de wateruitwisseling en zijn niet één op één om te zetten naar aanslibbingshoeveelheden. Zo is bijvoorbeeld de vaststelling dat de verticale uitwisseling (densiteitstroming) gemiddeld over het getij beperkt blijft, nog geen garantie dat dit proces niet belangrijk is wat betreft aanslibbingsmechanisme.

In hoofdstuk 5 werd aan de hand van natuurmetingen dieper ingegaan op de sedimentfluxen doorheen de havenmond. Daaruit blijkt dat:

- Na combinatie van verschillende sedimentconcentratie metingen, de berekende residuele sedimentflux de gemiddelde aanslibbing (berekend uit de baggerhoeveelheden) redelijk benadert. De metingen kunnen dus gebruikt worden om kwalitatieve uitspraken te maken over de sediment uitwisseling doorheen de havenmond.
- Instroom van sediment bijna vijf maal hoger ligt bij springtij dan bij doottij. Bovendien blijkt meer dan 70% van al het zwevend stof dat de haven binnenkomt ook daar te sedimenteren.
- Bij springtij tot 70% van de totale sedimentimport gebeurt in de oostelijke helft van de havenmond nabij de bodem, van 2,5uur voor hoogwater tot hoogwater. Een gelijkaardige piek wordt waargenomen bij doottij, maar is dan, net zoals de stroomsnelheden, minder groot (in absolute waarde). Bij doottij treedt de piek iets eerder op en duurt ze wat minder lang, maar is ze verantwoordelijk voor 70 tot 85% van de totale sedimentimport. Zowel bij springtij als bij doottij treedt deze piek in sedimentflux op ca. één uur na de maximale vloedstroom en valt samen met een periode van verhoogde horizontale uitwisseling (neervorming).
- Er bij springtij rond laagwater een periode van sedimentimport is die kan gelinkt worden aan een periode met densiteit gedreven stroming (ca. 1uur voor laagwater tot 0,5uur na laagwater). De hoeveelheid sediment die op deze manier de haven binnen komt, bedraagt slechts 2% à 4% van de totale sedimentimport en is dus verwaarloosbaar ten opzichte van de import die optreedt van 2,5uur voor hoogwater tot hoogwater.

Net zoals voor de wateruitwisseling kan er dus besloten worden dat de sedimentflux doorheen de havenmond voornamelijk het gevolg is van de tijvulling en de horizontale uitwisselingsprocessen (neervorming). Uit de natuurmetingen blijkt dat de sedimentconcentraties aan de bodem altijd hoger zijn dan in de rest van de waterkolom en dat het gros van de sedimentuitwisseling nabij de bodem gebeurt. Hoewel dit lijkt te wijzen op een belangrijke invloed van densiteitstroming, is dit niet het geval. Uit de metingen blijkt immers dat er steeds een logaritmisch sedimentconcentratie profiel voorkomt en dat op het moment wanneer verticale (water)uitwisselingsprocessen relatief belangrijk zijn, de stroomsnelheden en concentraties aan zwevend stof niet groot genoeg om een belangrijke sedimentinstroom te veroorzaken. Er kan dus besloten worden dat verticale uitwisselingsprocessen (densiteitstroming) een verwaarloosbare invloed hebben op de totale aanslibbing.

Het lijkt aangewezen om het onderzoek naar aanslibbing van de haven van Zeebrugge toe te spitsen op maatregelen die de wateruitwisseling ten gevolge van neervorming verminderen. Hierbij dient vooral aandacht te worden besteed aan de onderste sedimentrijke waterlagen. Daarnaast kan er eveneens gedacht worden aan een constructie om de instromende suspensierijke watermassa uit de onderste waterlagen uit de haven te weren (cfr. Current Deflecting Wall).

7 Referenties

- Anoniem (1993). Ecologische impact van baggerspecielossingen voor de Belgische kust: eindrapport: volume 1: tekst. [Ecological impact of dredging output off the Belgian coast: final report: volume 1: text]. Ministerie van Volksgezondheid en Leefmilieu (BMM): Brussel, Belgium. VIII, [9], 101 pp.
- Aqua Vision BV (2004a). Verwerking van ADCP metingen in de voorhaven van Zeebrugge – Validatie en verwerking van meetgegevens. Waterbouwkundig Laboratorium: Borgerhout, België.
- Aqua Vision BV (2004b). Verwerking van ADCP metingen in de voorhaven van Zeebrugge – Presentatie van meetgegevens. Waterbouwkundig Laboratorium: Borgerhout, België.
- Bijlsma A., van Vossen B. (2004). Study of density currents in the framework of the LTV for the Scheldt estuary. WL|Delft Hydraulics: Delft, Nederland in opdracht van Waterbouwkundig Laboratorium: Borgerhout, België.
- Bijlsma A. (2006). Memo Haven van Oostende – Studie nieuwe haventoeegang. Onderzoek van de HLES methodiek van Delft3D-FLOW voor de haven van Zeebrugge. WL|Delft Hydraulics: Delft, Nederland in opdracht van Waterbouwkundig Laboratorium: Borgerhout, België.
- Dujardin A., Vanlede J., Schramkowski G. (2006). Nota Zoetwater aanvoer in de voorhaven van Zeebrugge. WL Technische Nota's, 643-04. Waterbouwkundig Laboratorium: Borgerhout, België.
- Dujardin A., Ides S., De Mulder T., Mostaert F. (2008). Fysisch Zeebruggemodel WL – Ontwerpnota deel 2. WL Technische Nota's, 780-03. Waterbouwkundig Laboratorium: Borgerhout, België.
- Eysinck, W. D. (1988). Sedimentation in harbour basins; small density differences may cause serious effects. K.V.I.V., 9th Int. Harbour Congress, June 1988.
- Ides S., Dujardin A., De Mulder T., Mostaert F. (2008). Fysisch Zeebruggemodel WL – Ontwerpnota. WL Adviezen, 780-03. Waterbouwkundig Laboratorium: Borgerhout, België.
- IMDC (1998). Containerdok West – Hydraulisch – Sedimentologisch onderzoek. IMDC: Antwerpen, België.
- IMDC (2007). Langdurige monitoring van zout/zoet-verdeling in de haven van Zeebrugge en monitoring van zoutconcentratie, slibconcentratie en hooggeconcentreerde slib suspensies in de Belgische kustzone: deelrapport 4. Valsnelheid slib – INSSEV – herfst 2006. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.
- IMDC (2008a). Langdurige monitoring van zout/zoet-verdeling in de haven van Zeebrugge en monitoring van zoutconcentratie, slibconcentratie en hooggeconcentreerde slib suspensies in de Belgische kustzone: deelrapport 7.1. 13-uursmeetcampagne SiltProfiler en Sediview 31/07/2007 Haveningang tijdens springtij. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.
- IMDC (2008b). Langdurige monitoring van zout/zoet-verdeling in de haven van Zeebrugge en monitoring van zoutconcentratie, slibconcentratie en hooggeconcentreerde slib suspensies in de Belgische kustzone: deelrapport 7.1. 13-uursmeetcampagne SiltProfiler en Sediview 07/08/2007 Haveningang tijdens doottij. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.
- IMDC (2008c). Langdurige monitoring van zout/zoet-verdeling in de haven van Zeebrugge en monitoring van zoutconcentratie, slibconcentratie en hooggeconcentreerde slib suspensies in de Belgische kustzone: deelrapport 2.3. Analyse omgevingscondities juli 2006 – augustus 2007. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.

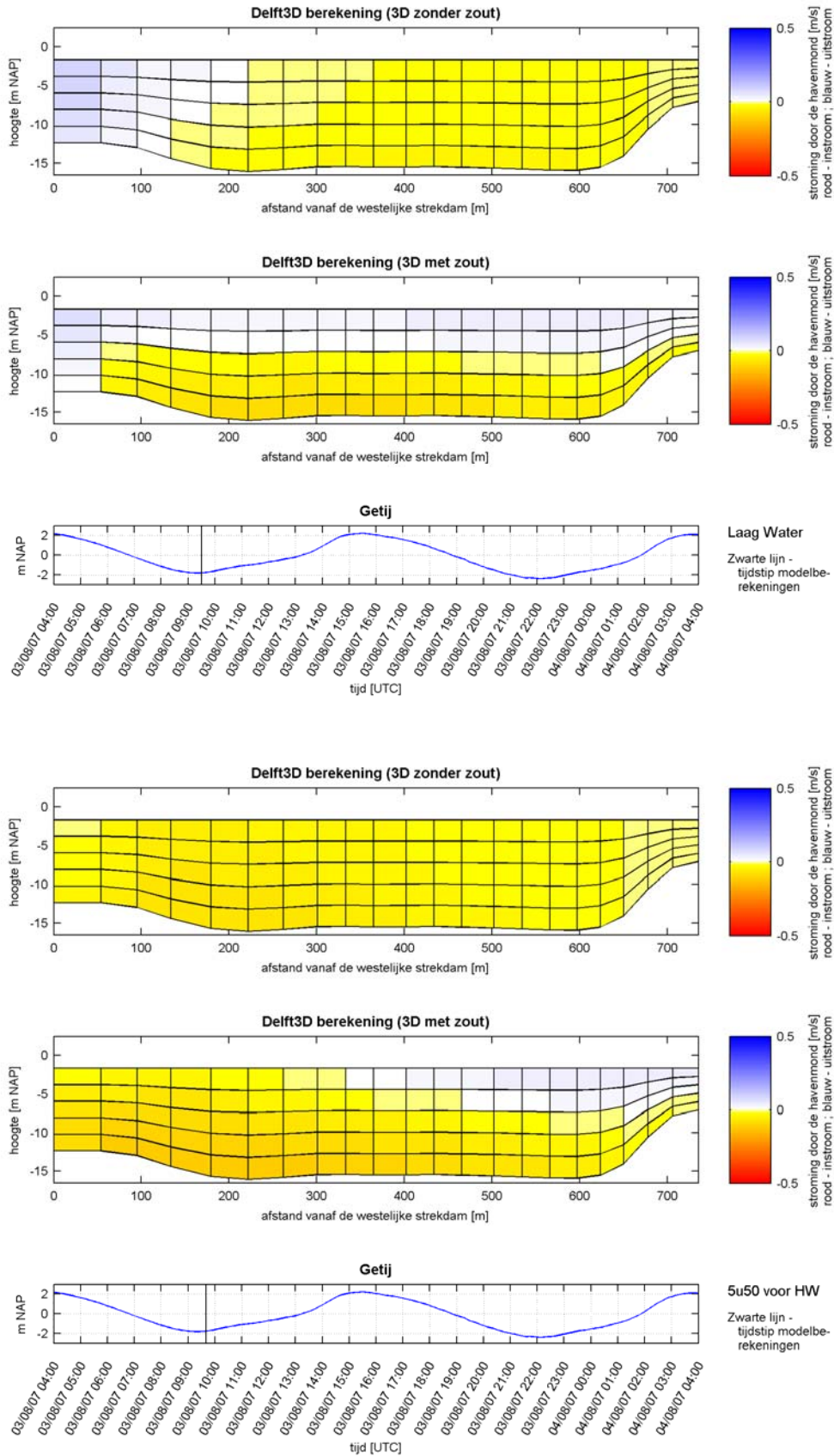
Lauwaert B., Bekaert K., De Brauwer D., Fettweis M., Hillewaert H., Hoffman S., Hostens K., Mergaert K., Moulaert I., Parmentier K., Verstraeten J. (2006). Syntheserapport over de effecten op het mariene milieu van baggerspeciéstortingen (vergunningsperiode 2004-'06). Beheerseenheid van het Mathematisch Model van de Noordzee, ILVO – Kenniseenheid Dier – Visserij – Afdeling Monitoring, Administratie Water- en Zeewezen – afdeling Maritieme Toegang & Afdeling Kust – Vlaamse Hydrografische Dienst.

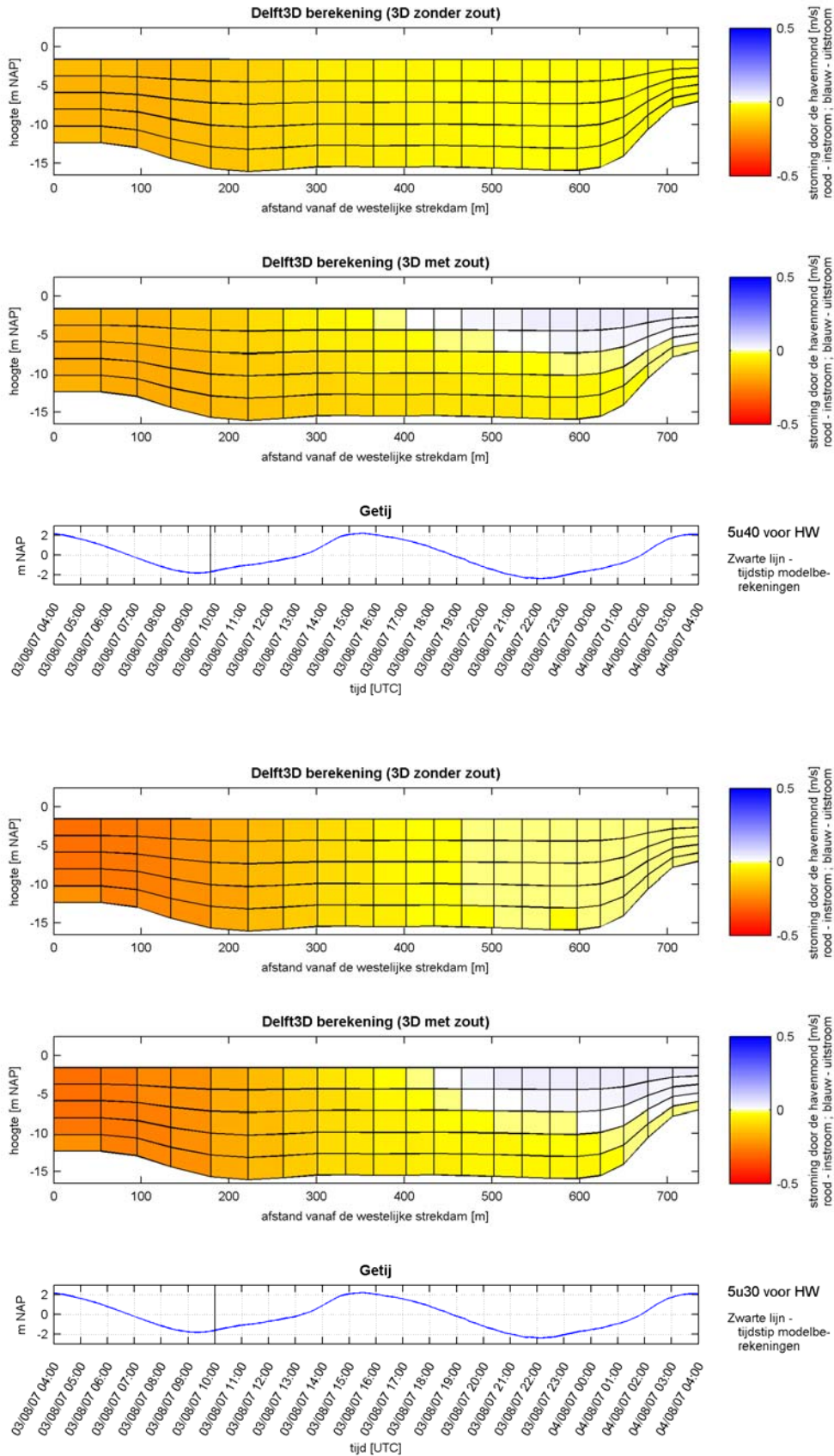
Lauwaert B., Bekaert K., Berteloot M., De Brauwer D., Fettweis M., Hillewaert H., Hoffman S., Hostens K., Mergaert K., Moulaert I., Parmentier K., Vanhoey G., Verstraeten J. (2008). Syntheserapport over de effecten op het mariene milieu van baggerspeciéstortingen (vergunningsperiode 2006-'08). Beheerseenheid van het Mathematisch Model van de Noordzee, ILVO – Kenniseenheid Dier – Visserij – Afdeling Monitoring, Agentschap voor Maritieme Dienstverlening en Kust – Afdeling Kust & Departement Mobiliteit en Openbare Werken – afdeling Maritieme Toegang.

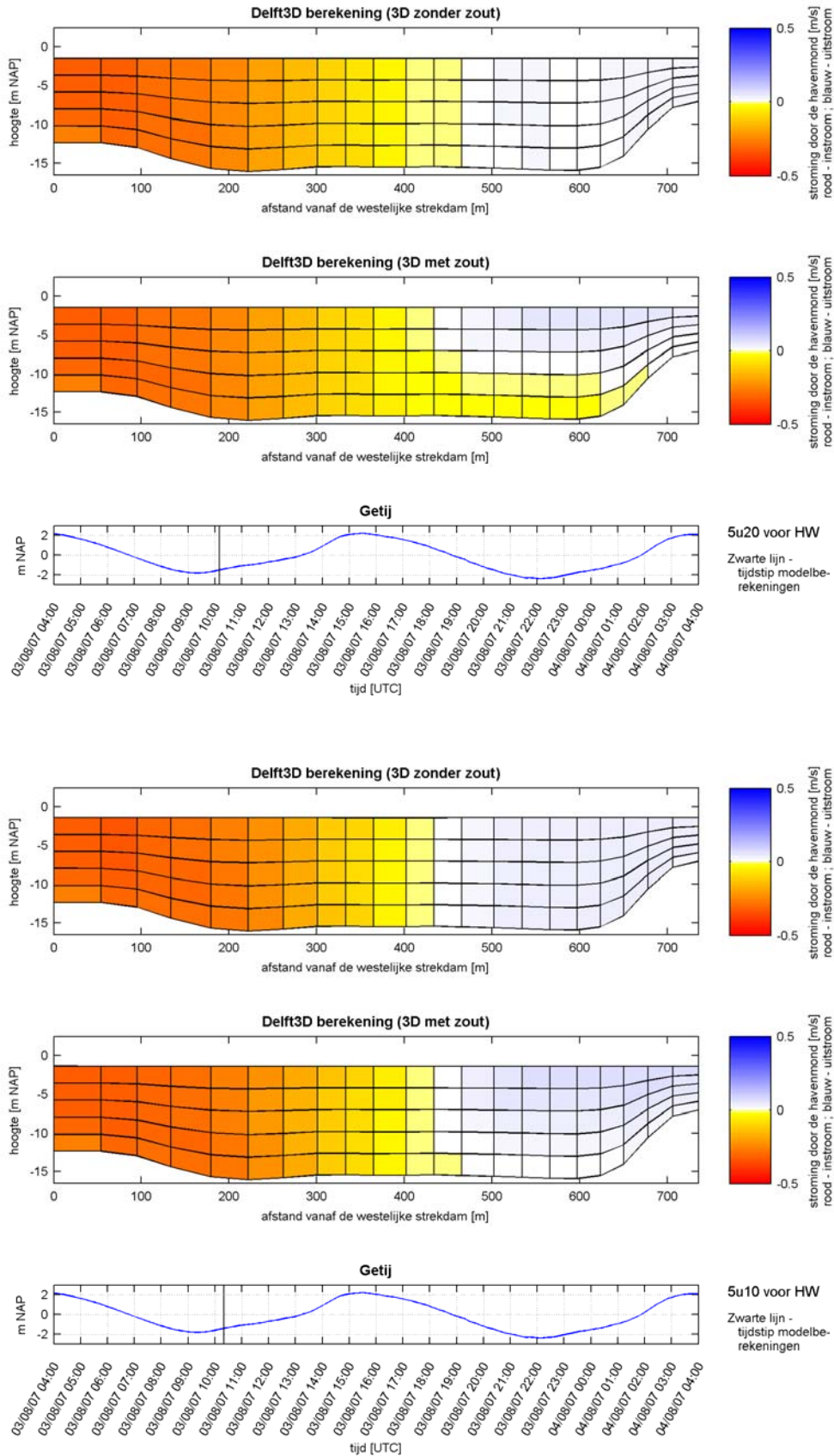
Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Departement Leefmilieu en Infrastructuur, Administratie Waterwegen en Zeewezen, Afdeling Waterwegen Kust, Hydrografie (1998). Stroomatlas – Haven van Zeebrugge. Stroommetingen in de Pas van het Zand en het Centraal Deel van de Nieuwe Buitenhaven.

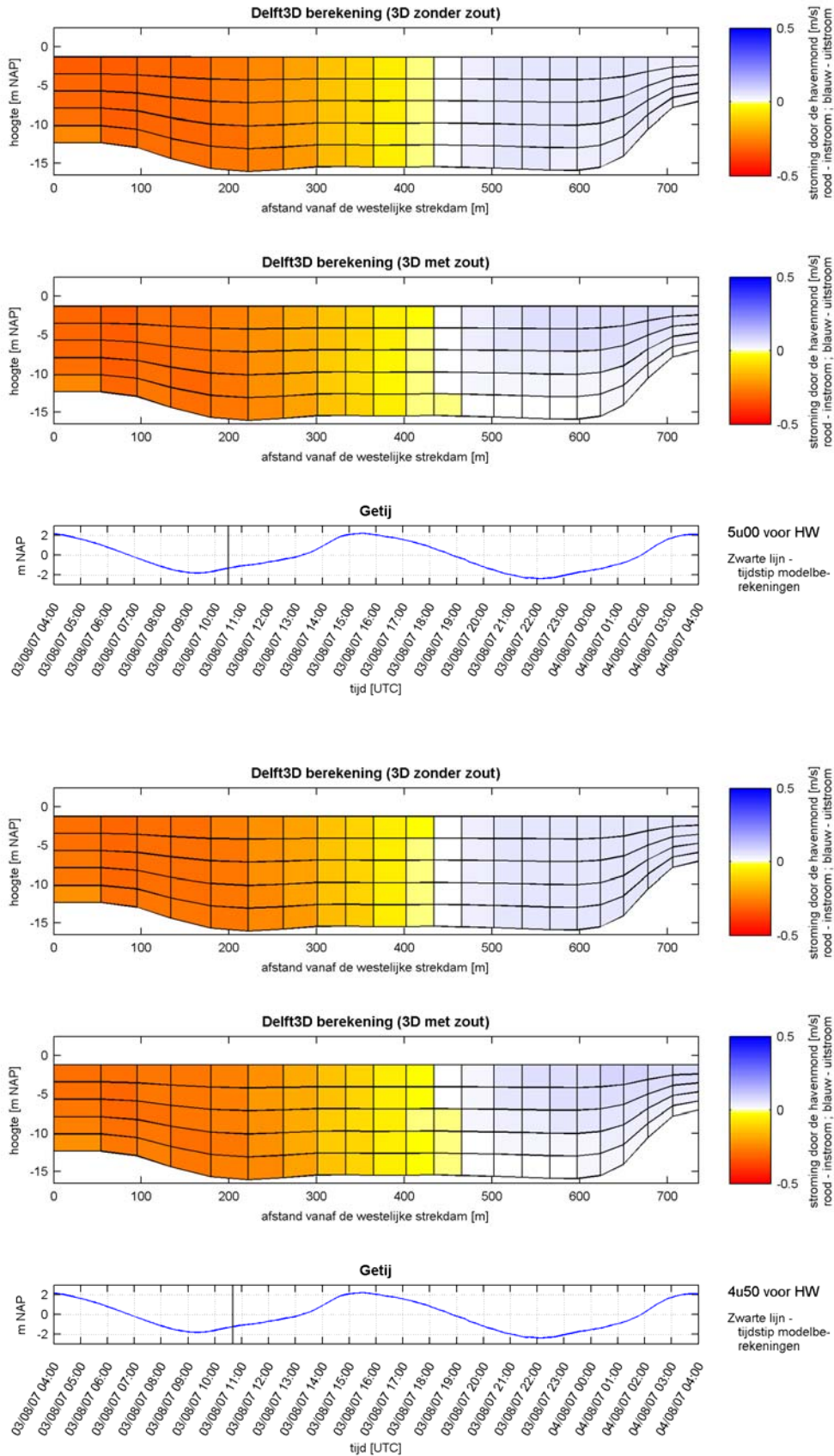
Van Kessel T., Vanlede J., Bruens A. (2006). Development of a mud transport model for the Scheldt estuary in the framework of LTV. WL|Delft Hydraulics & WL Borgerhout.

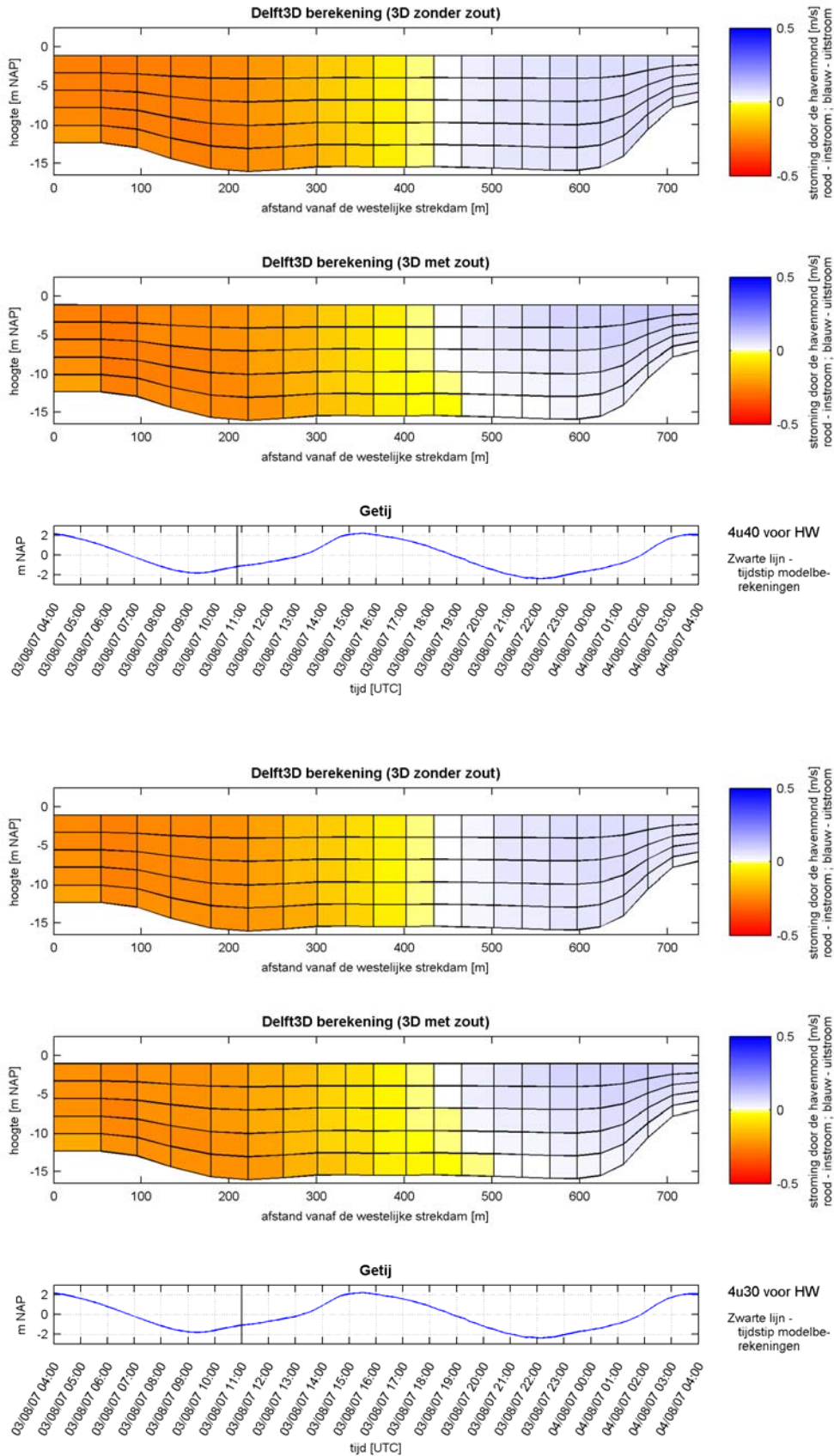
Bijlage A:
Vergelijking van numerieke modelresultaten bij springtij
Scenario 1 (3D model met zout) t.o.v. scenario 2 (3D model zonder zout)

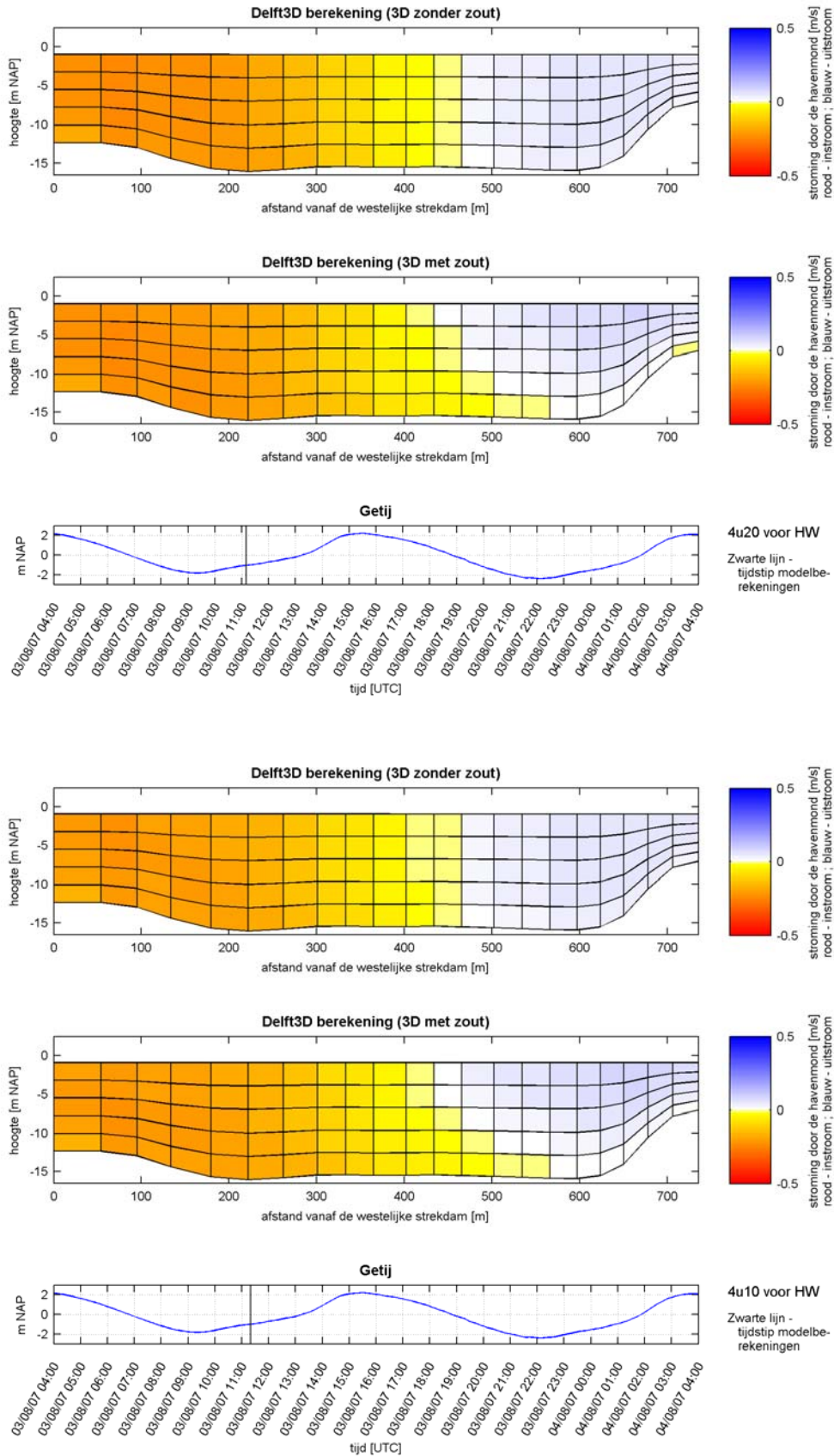


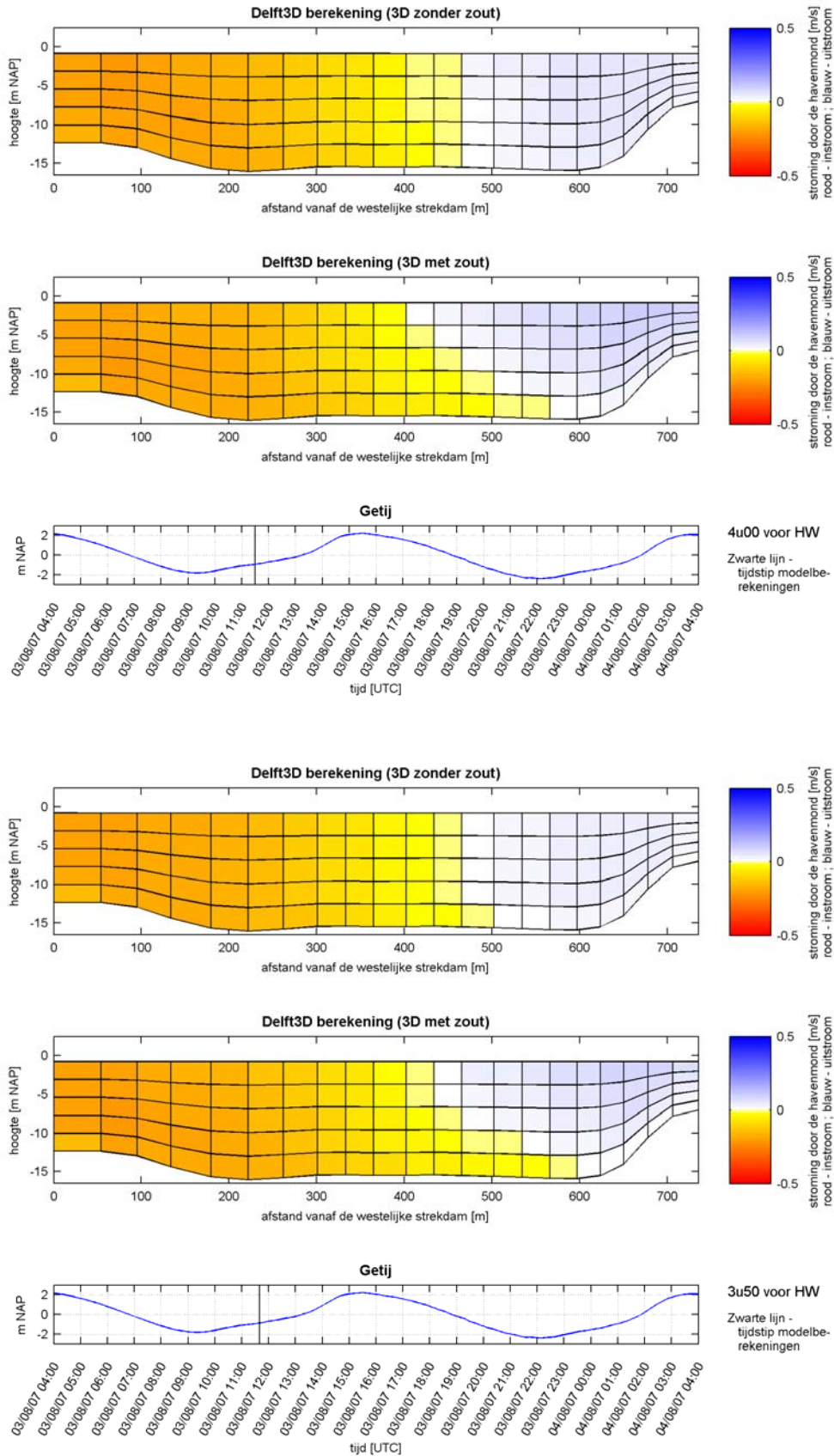


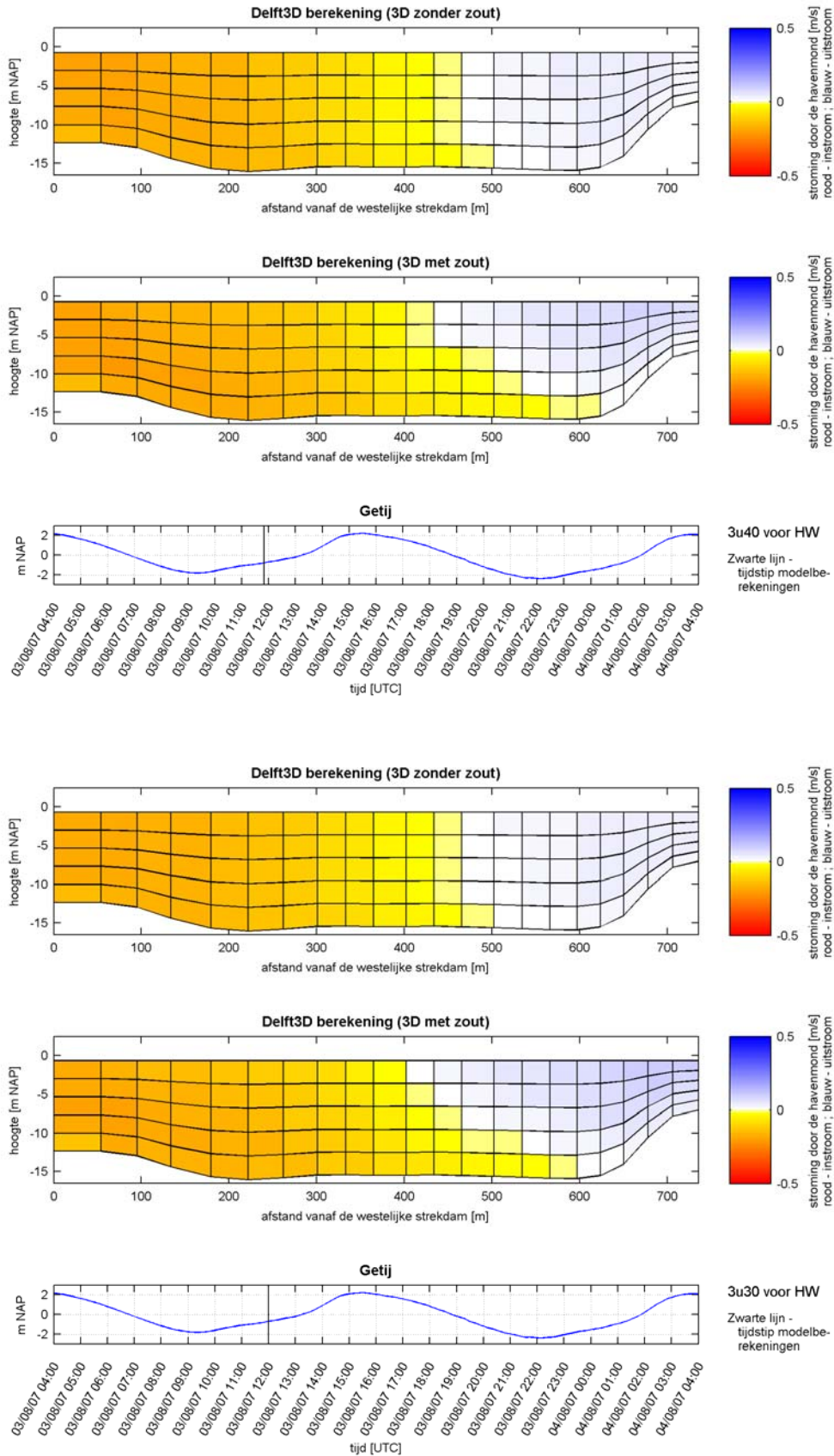


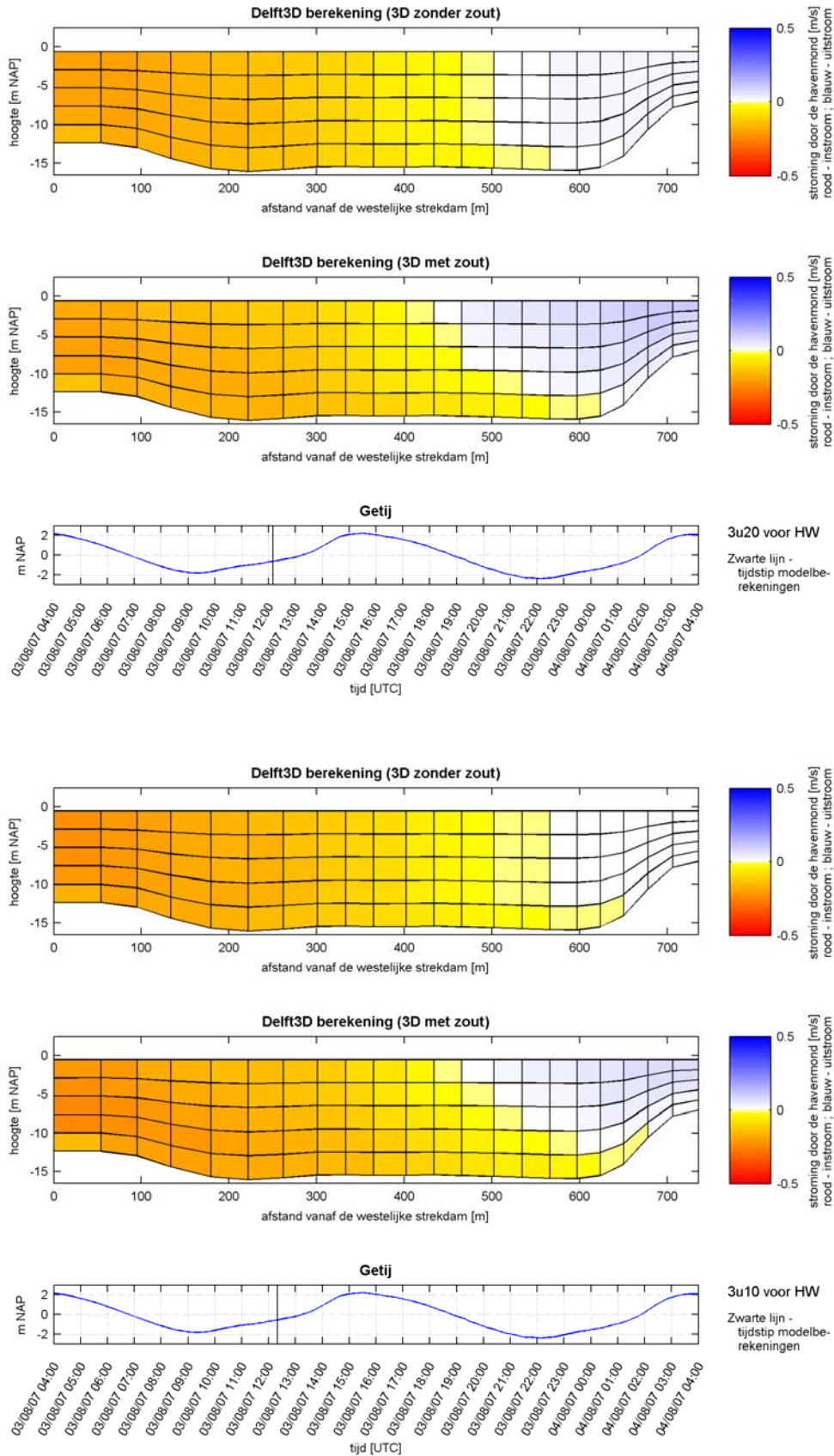


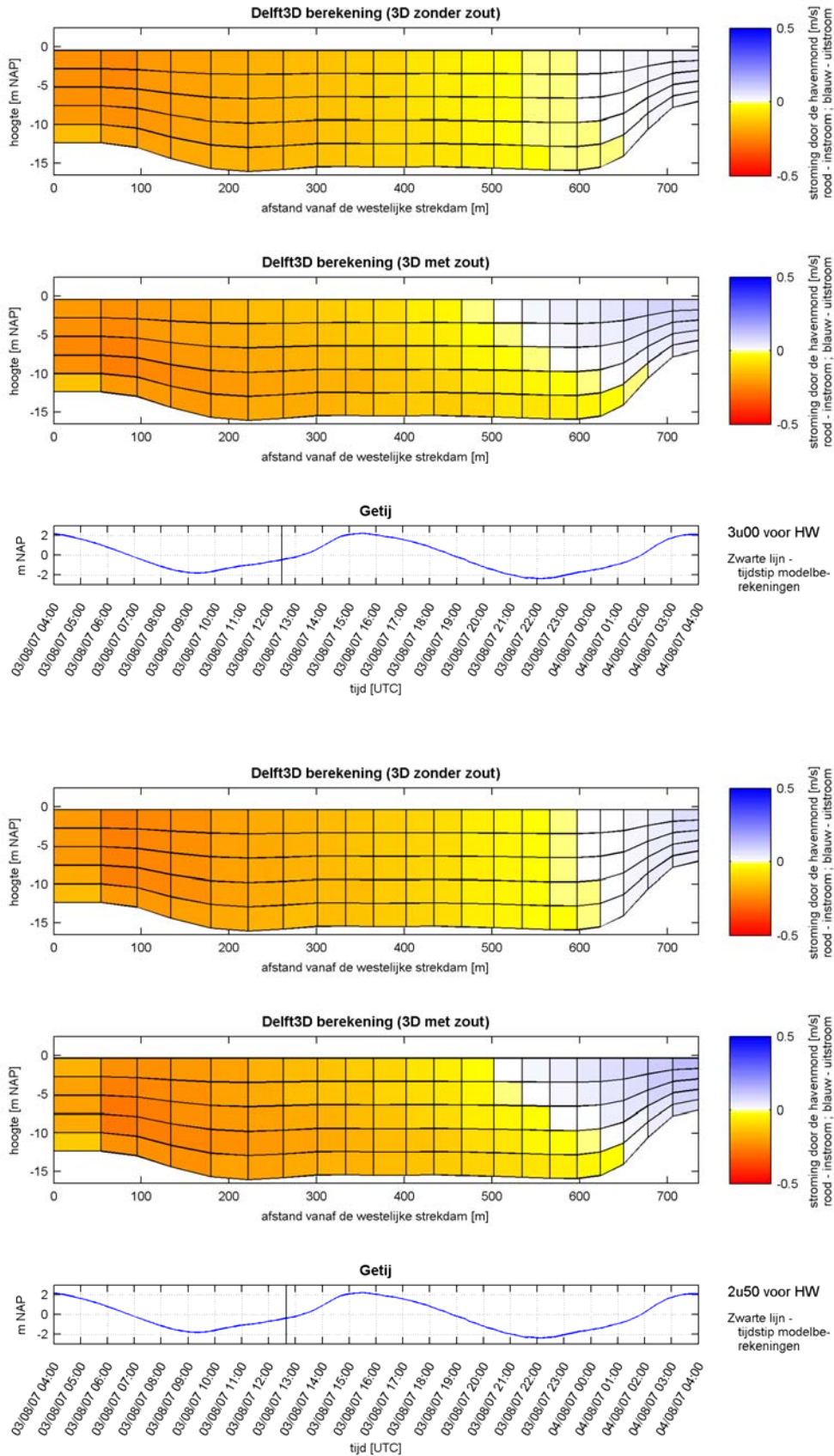


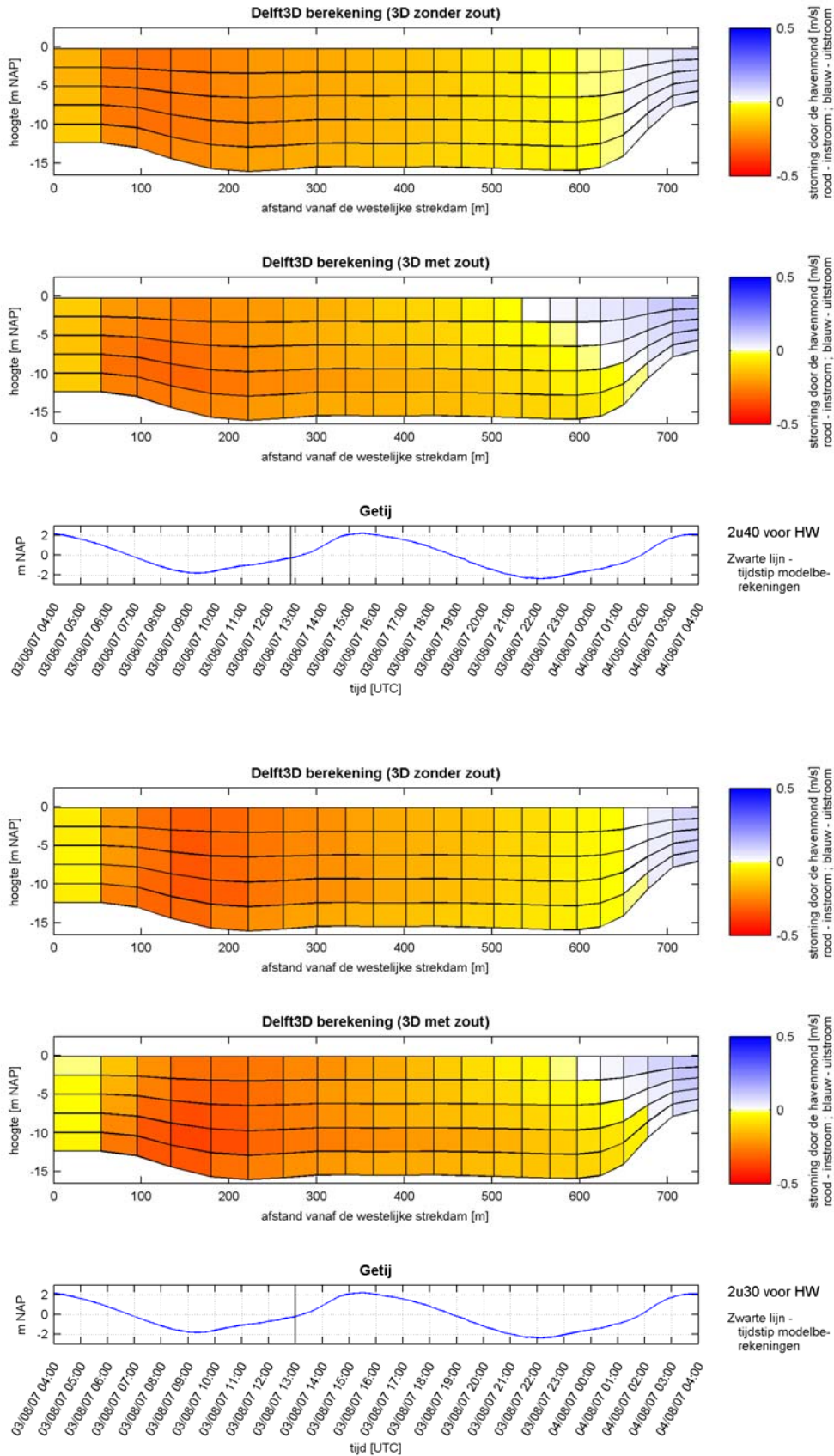


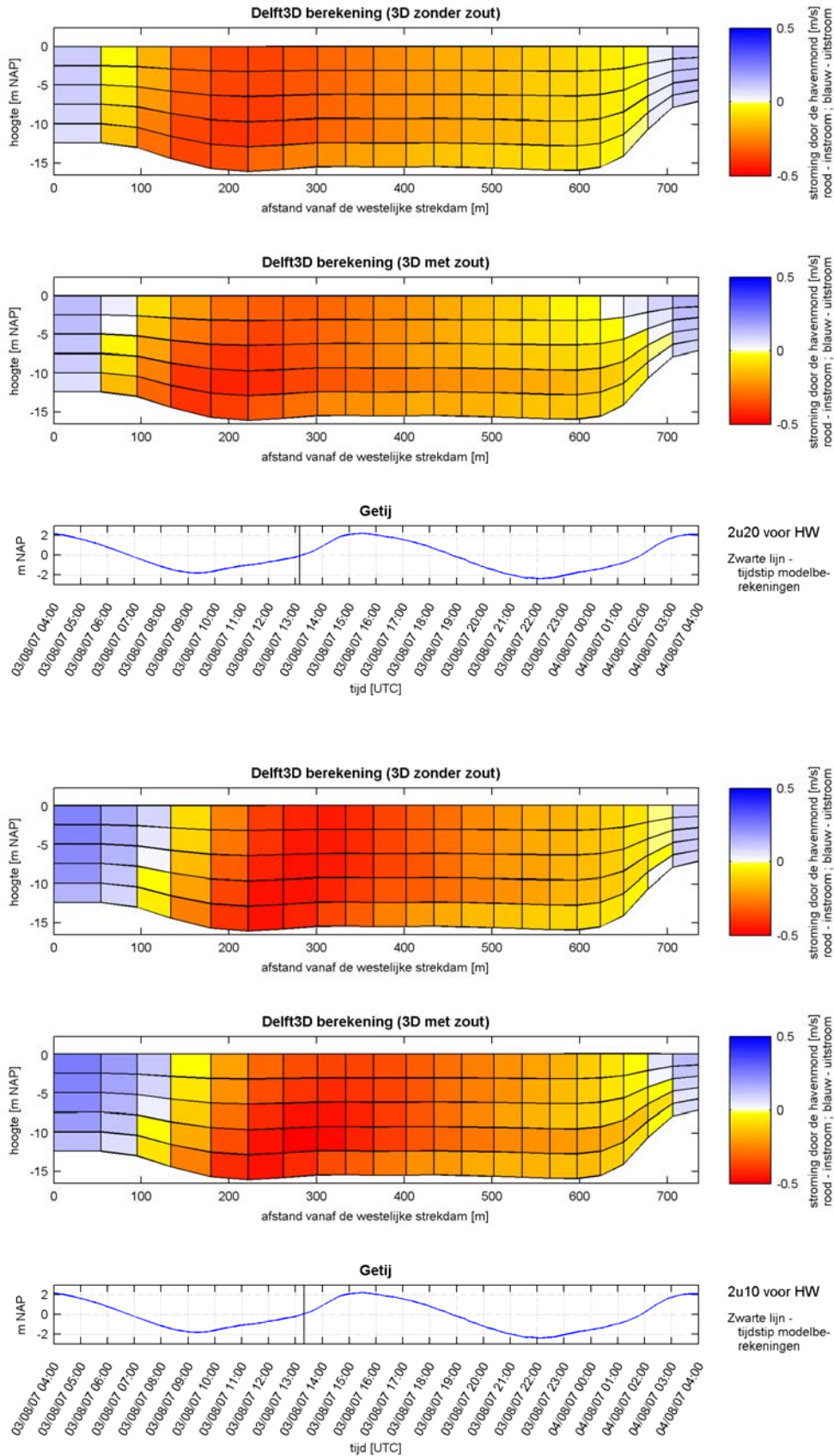


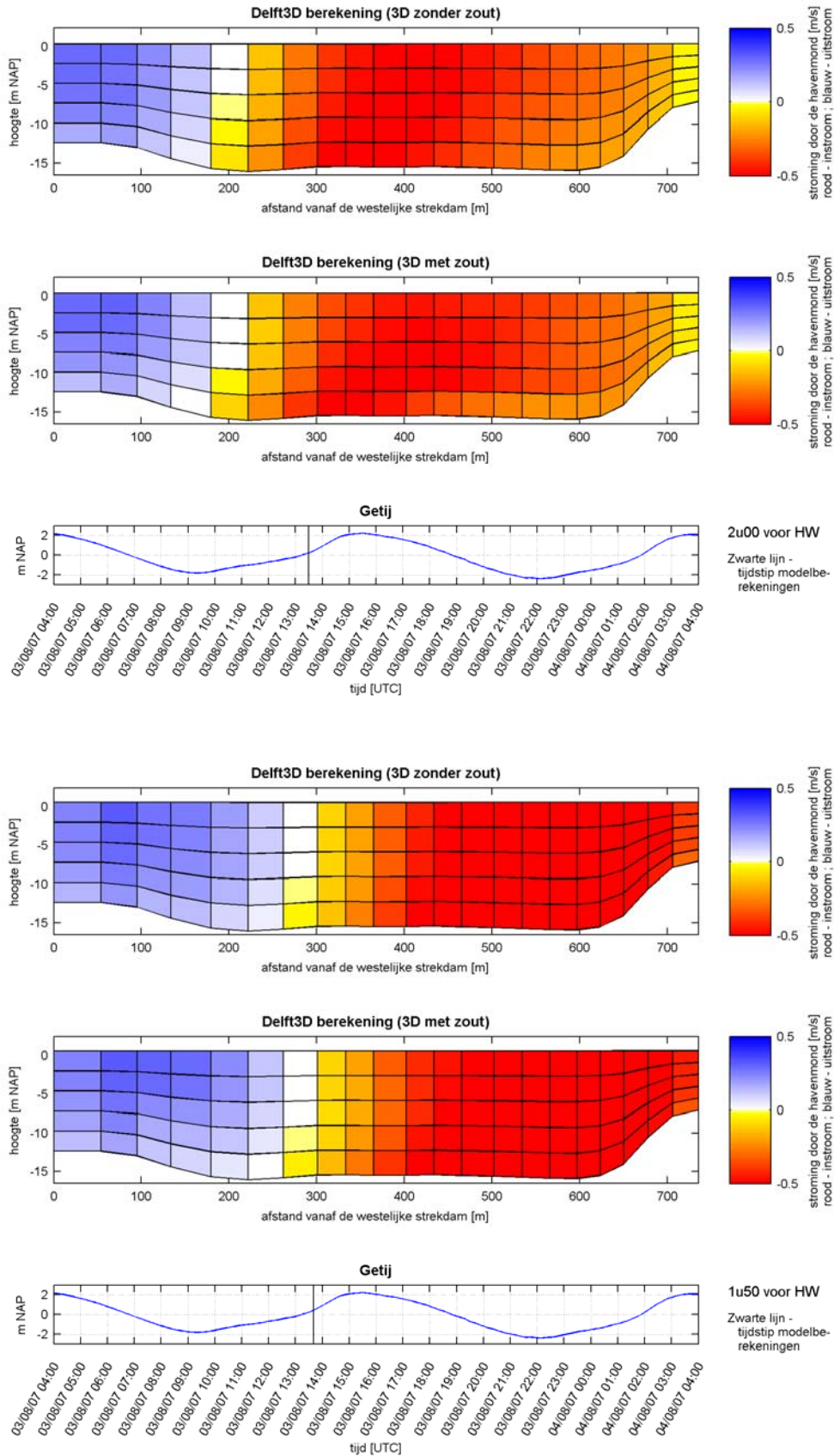


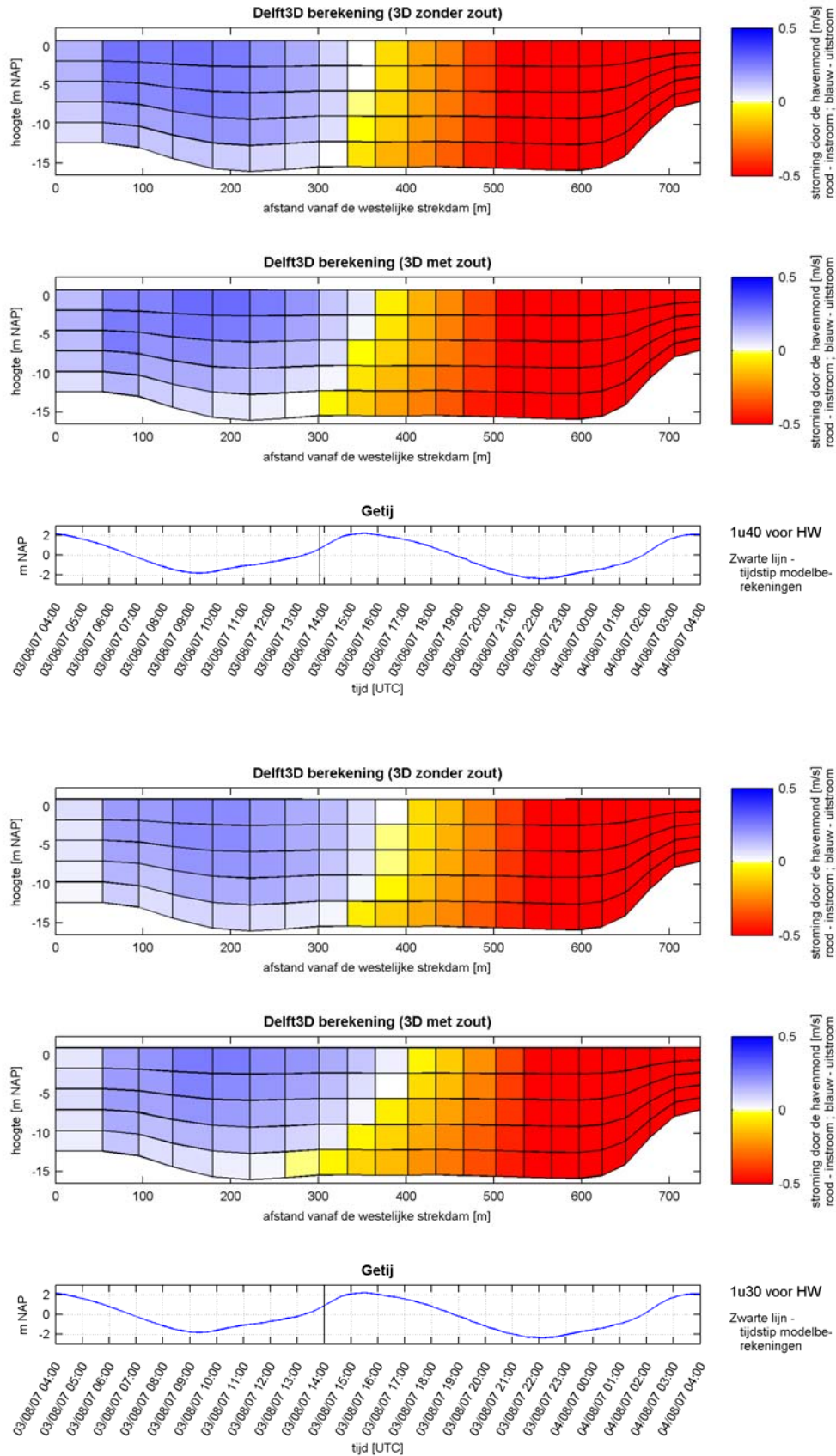


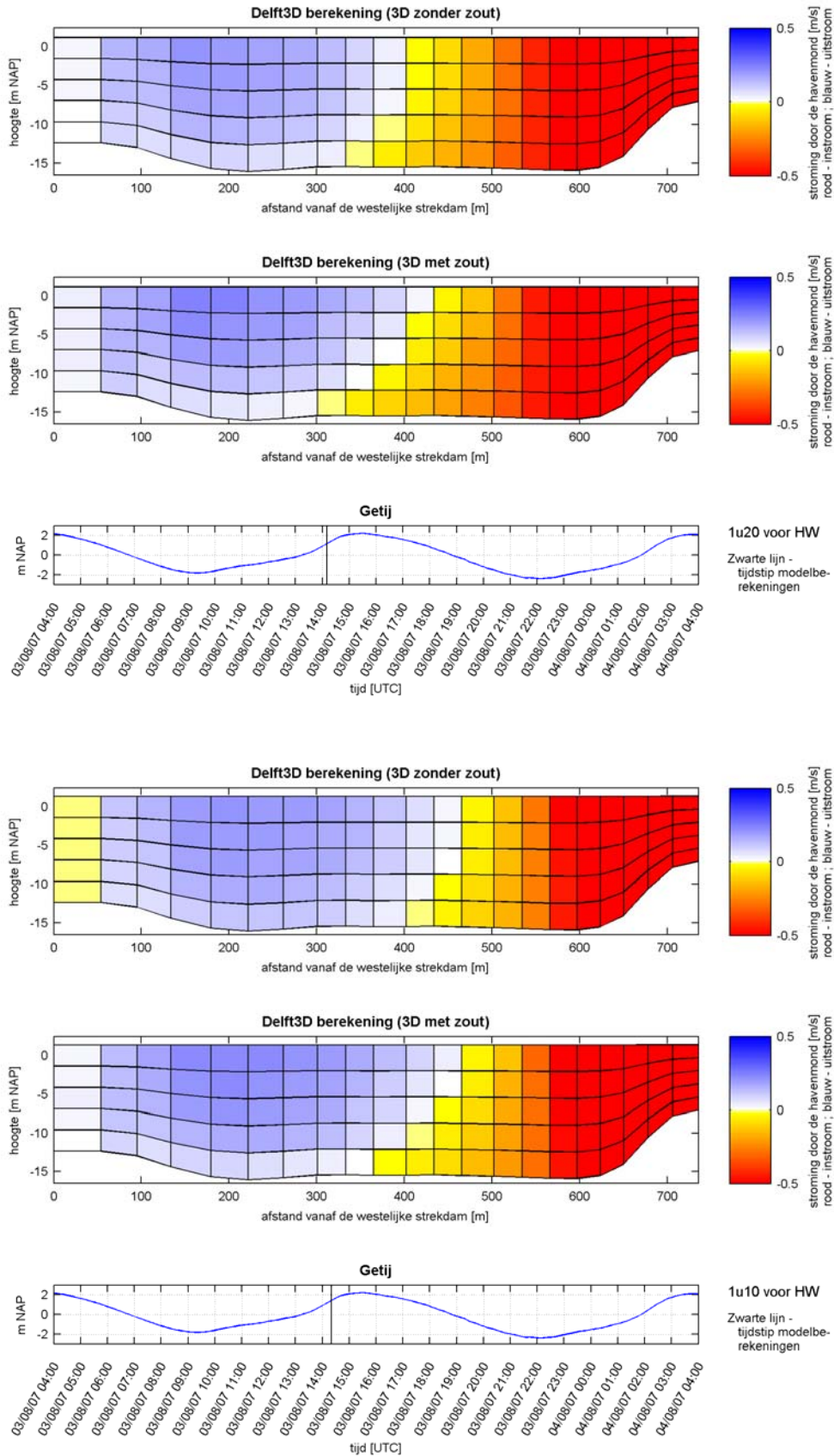


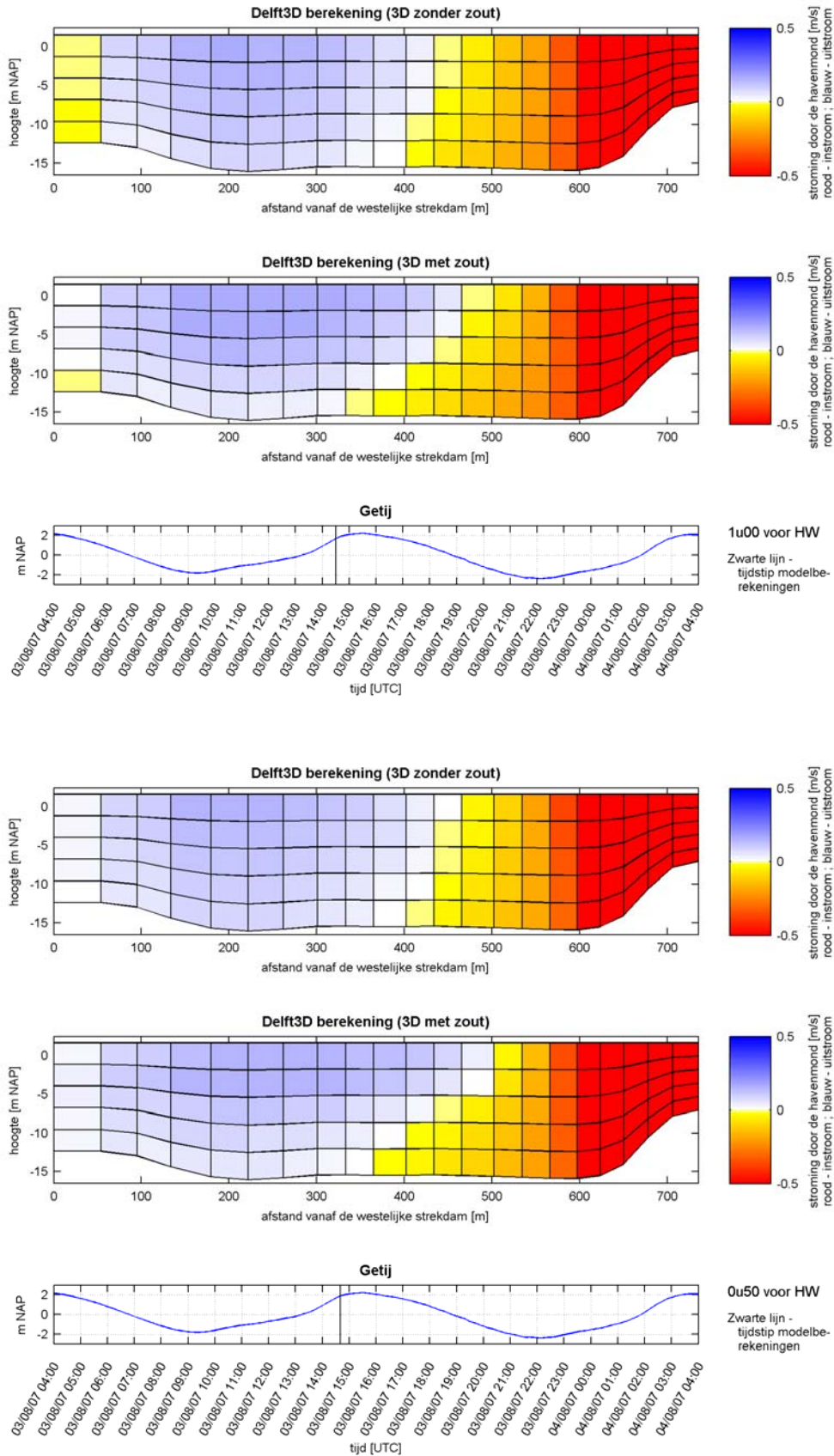


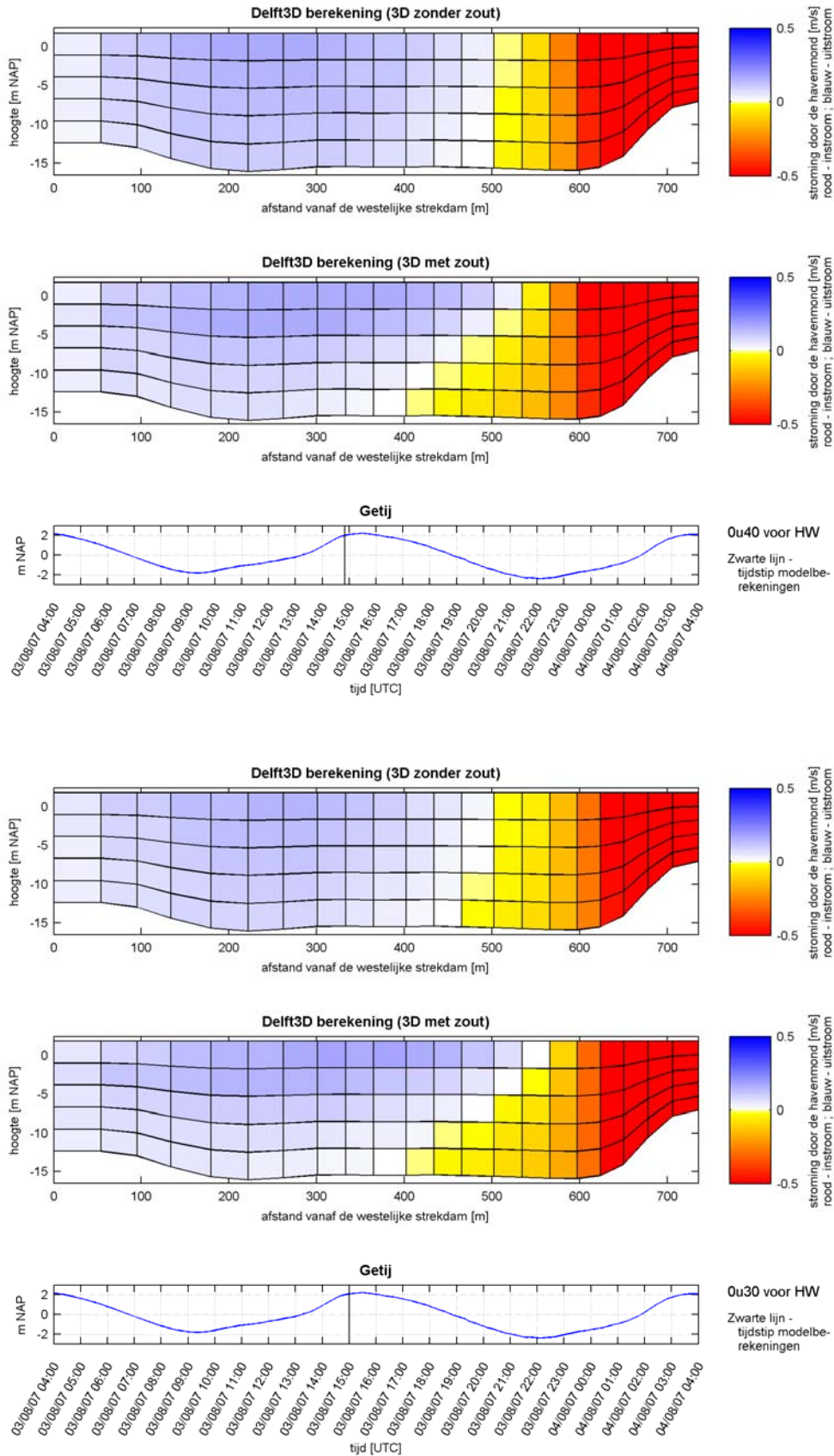


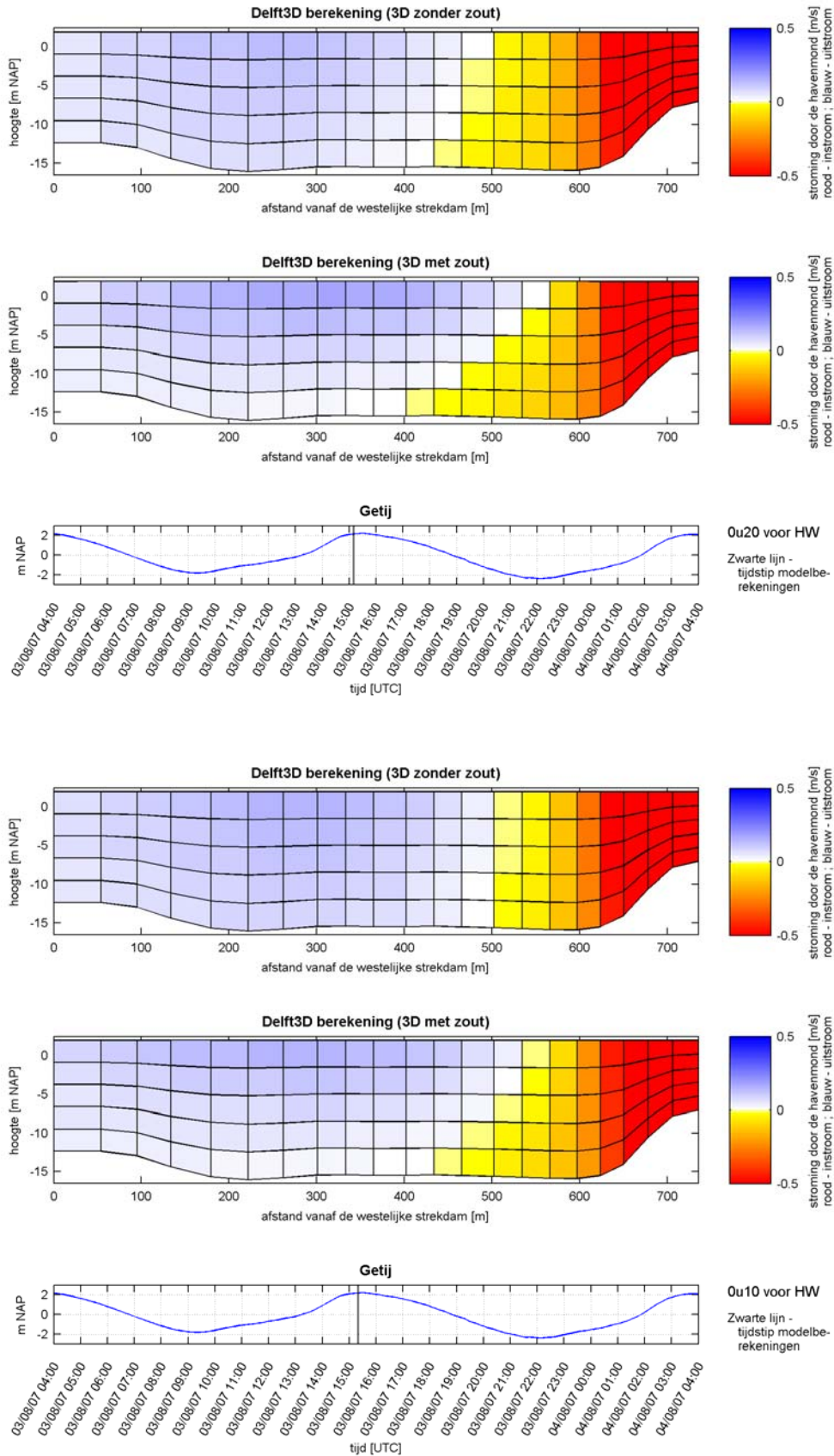


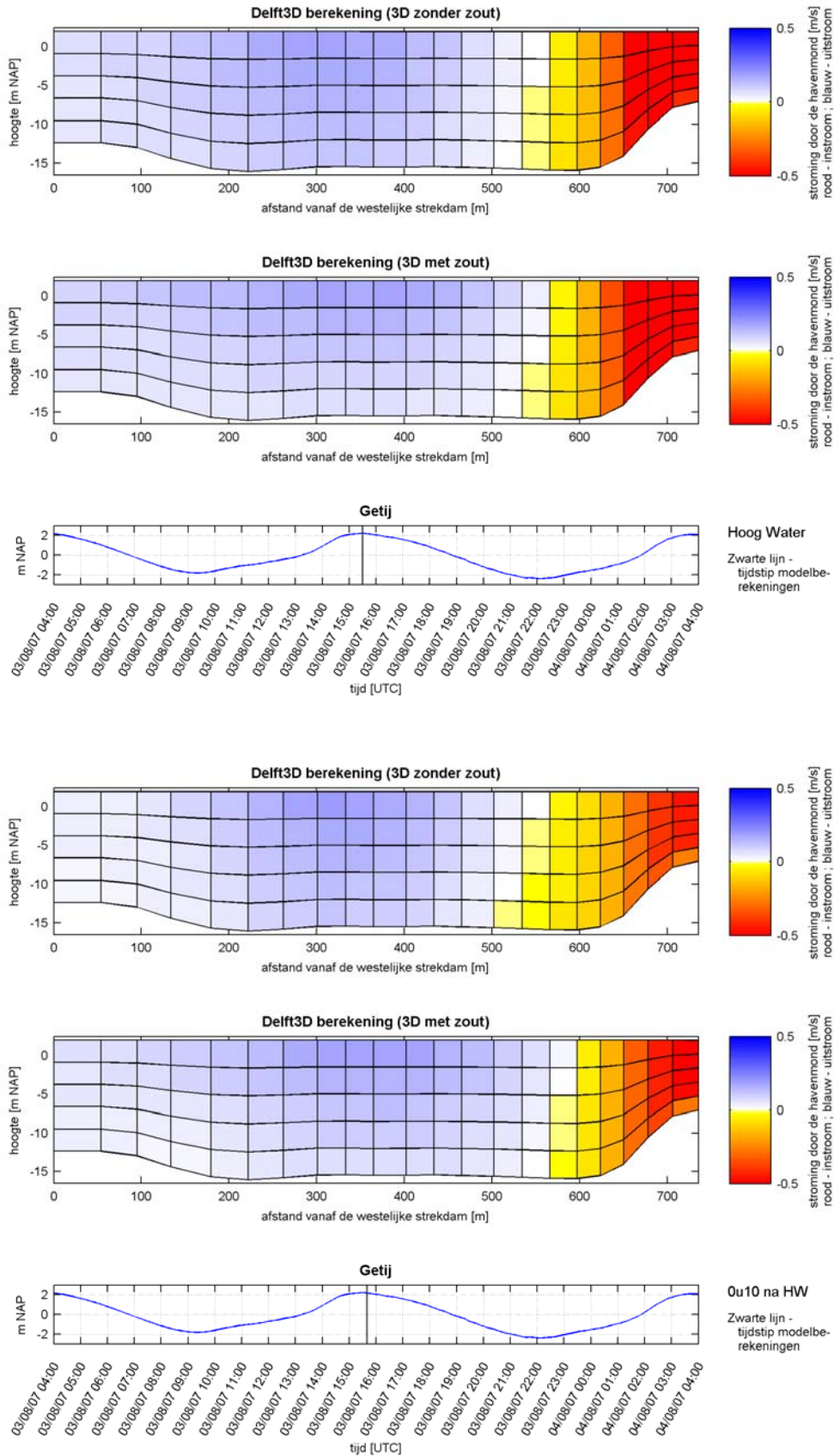


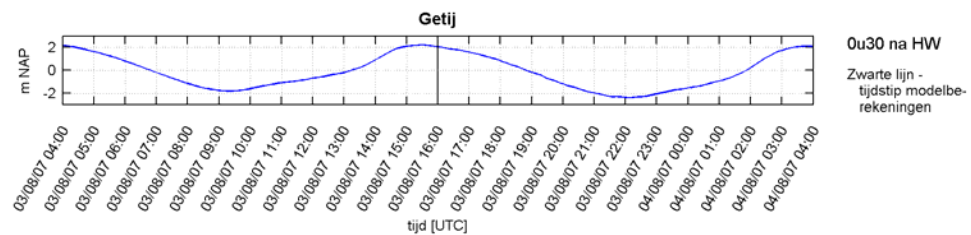
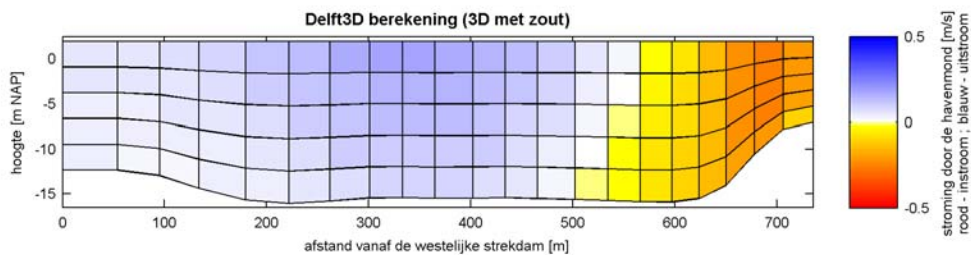
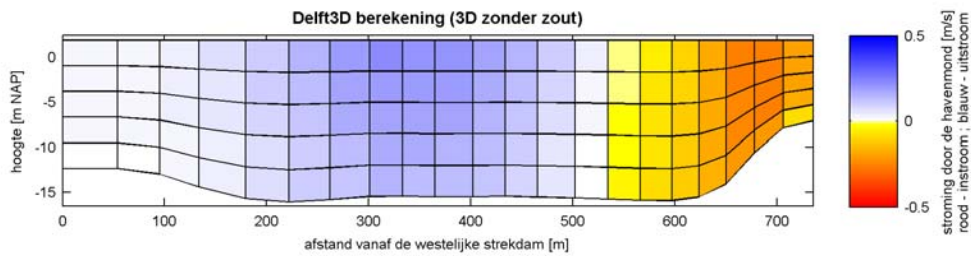
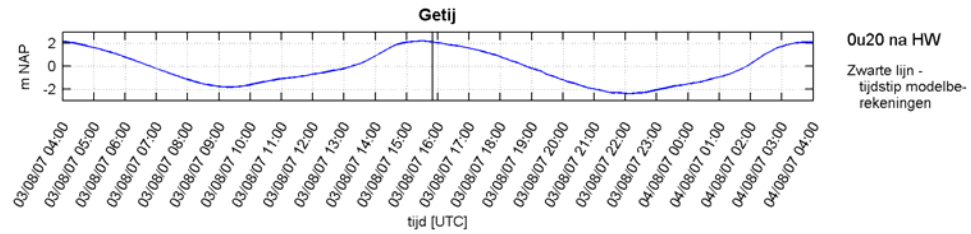
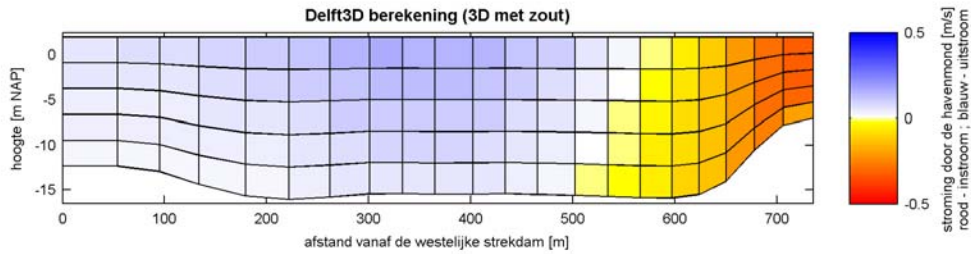
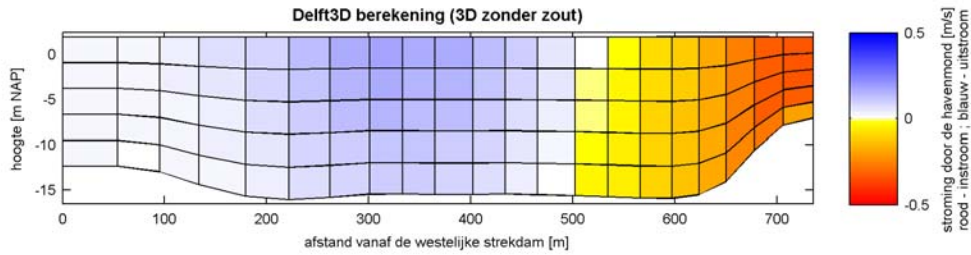


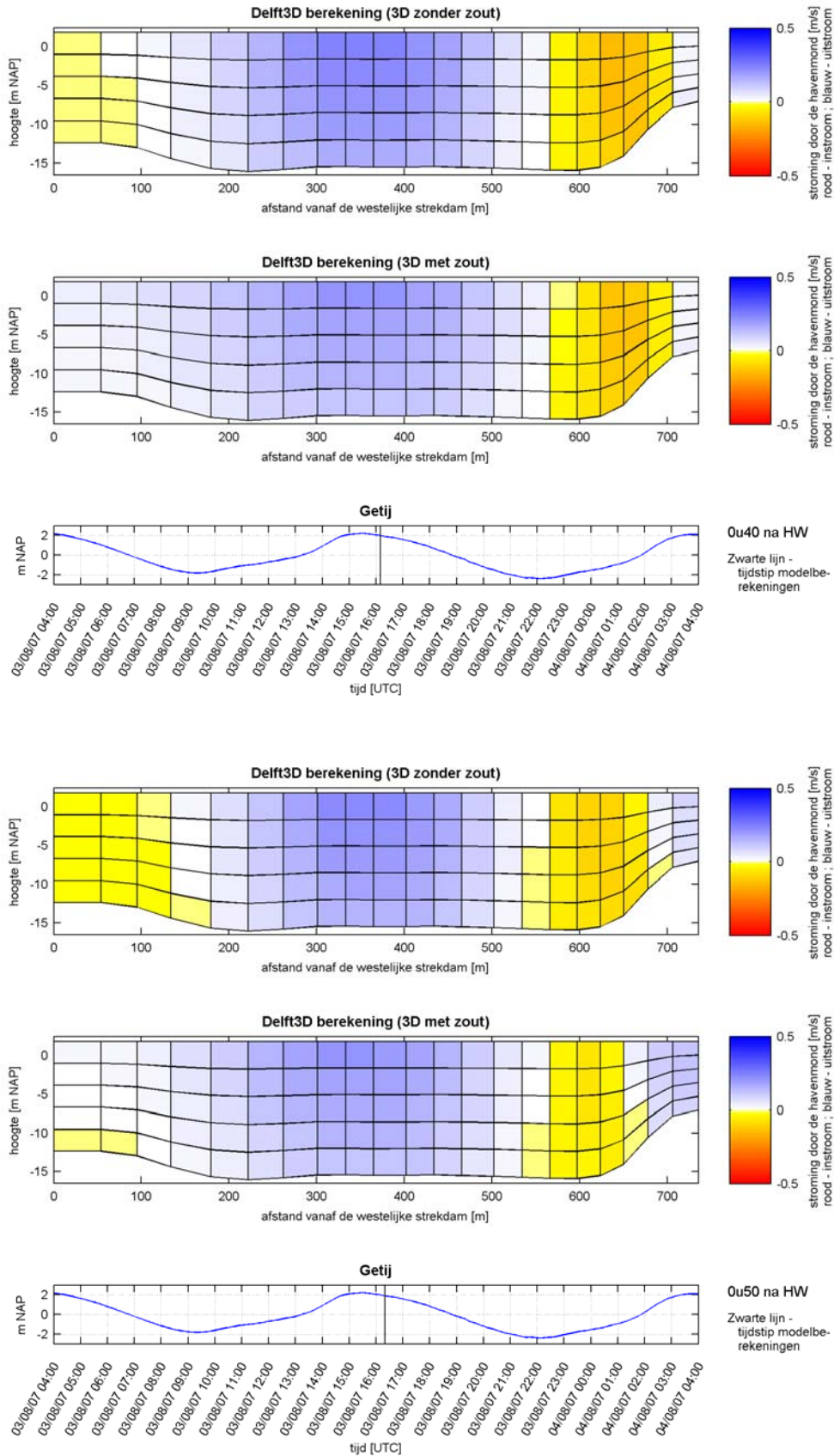


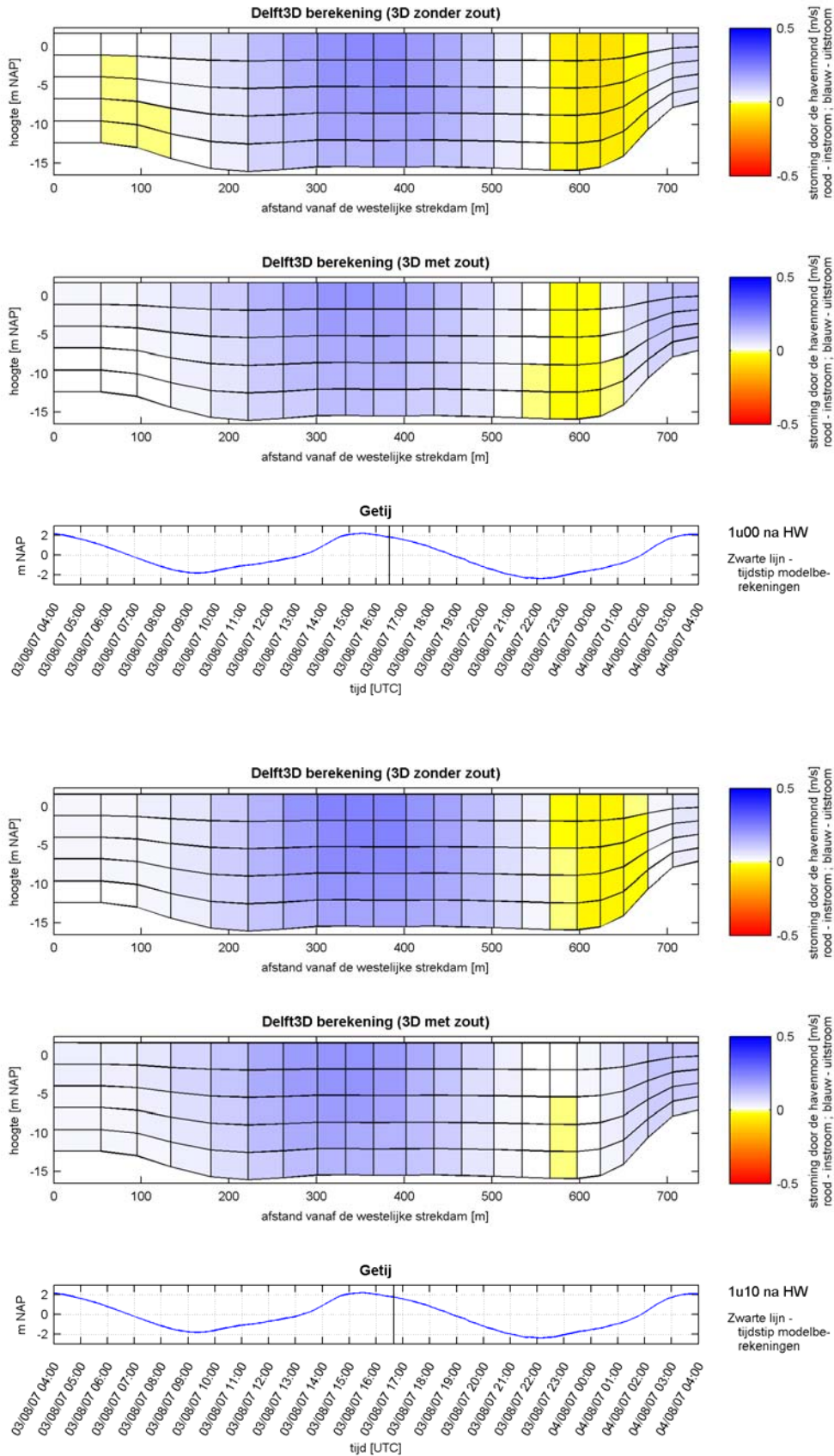


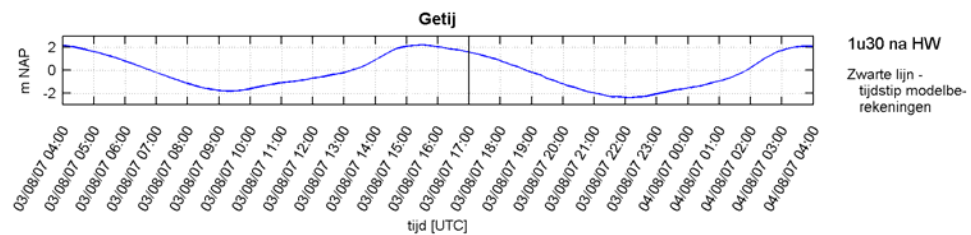
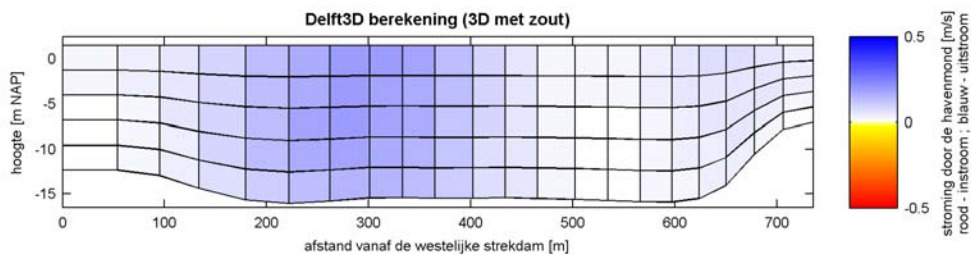
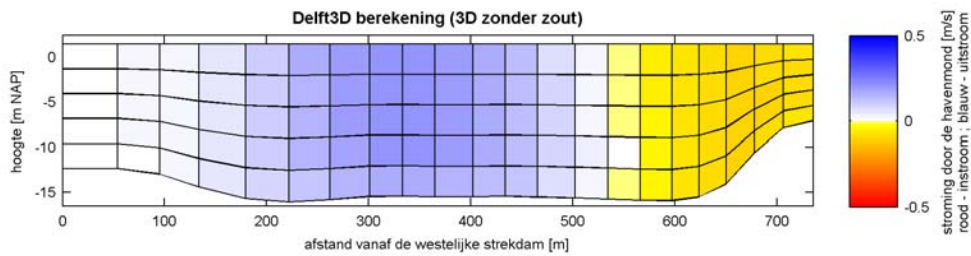
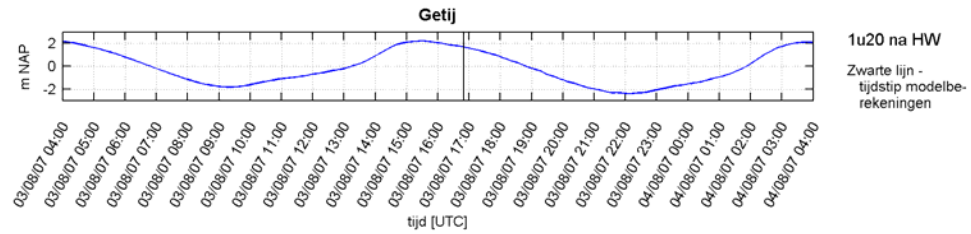
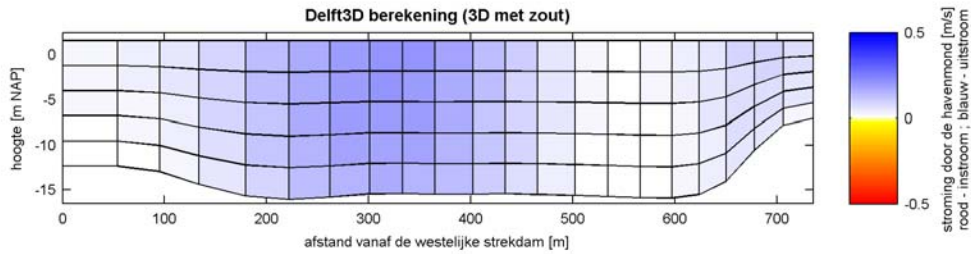
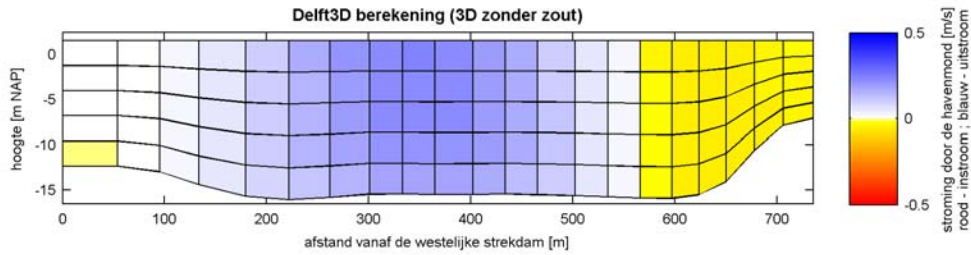


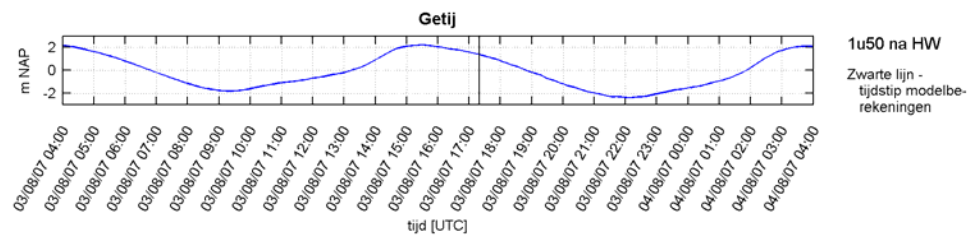
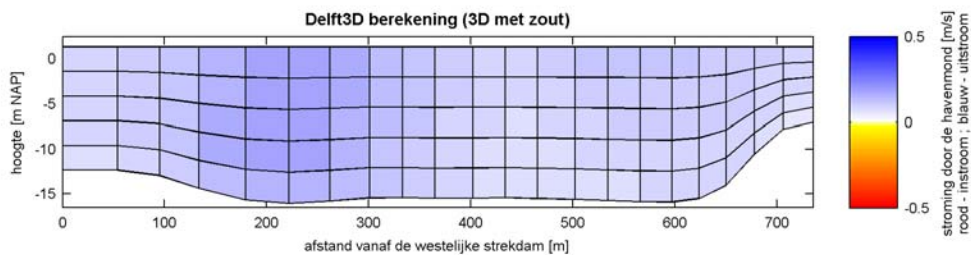
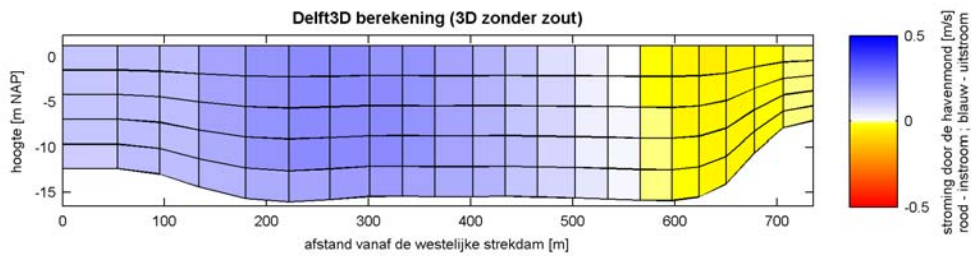
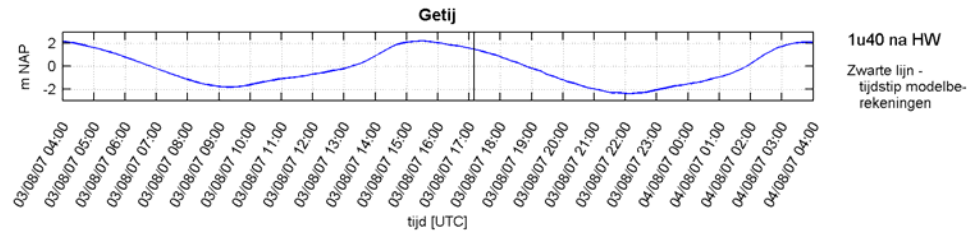
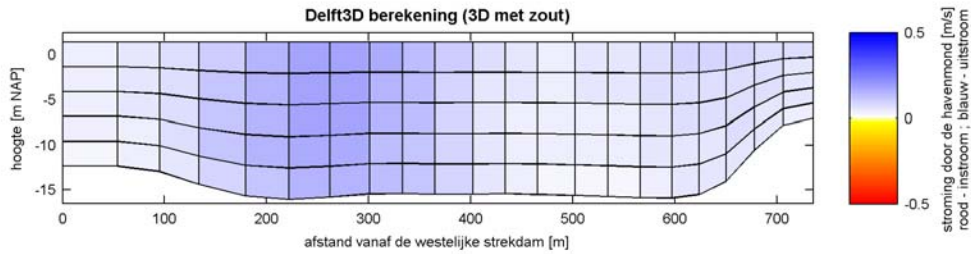
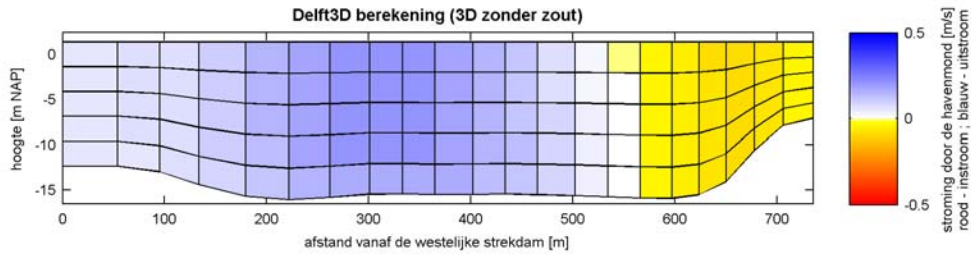


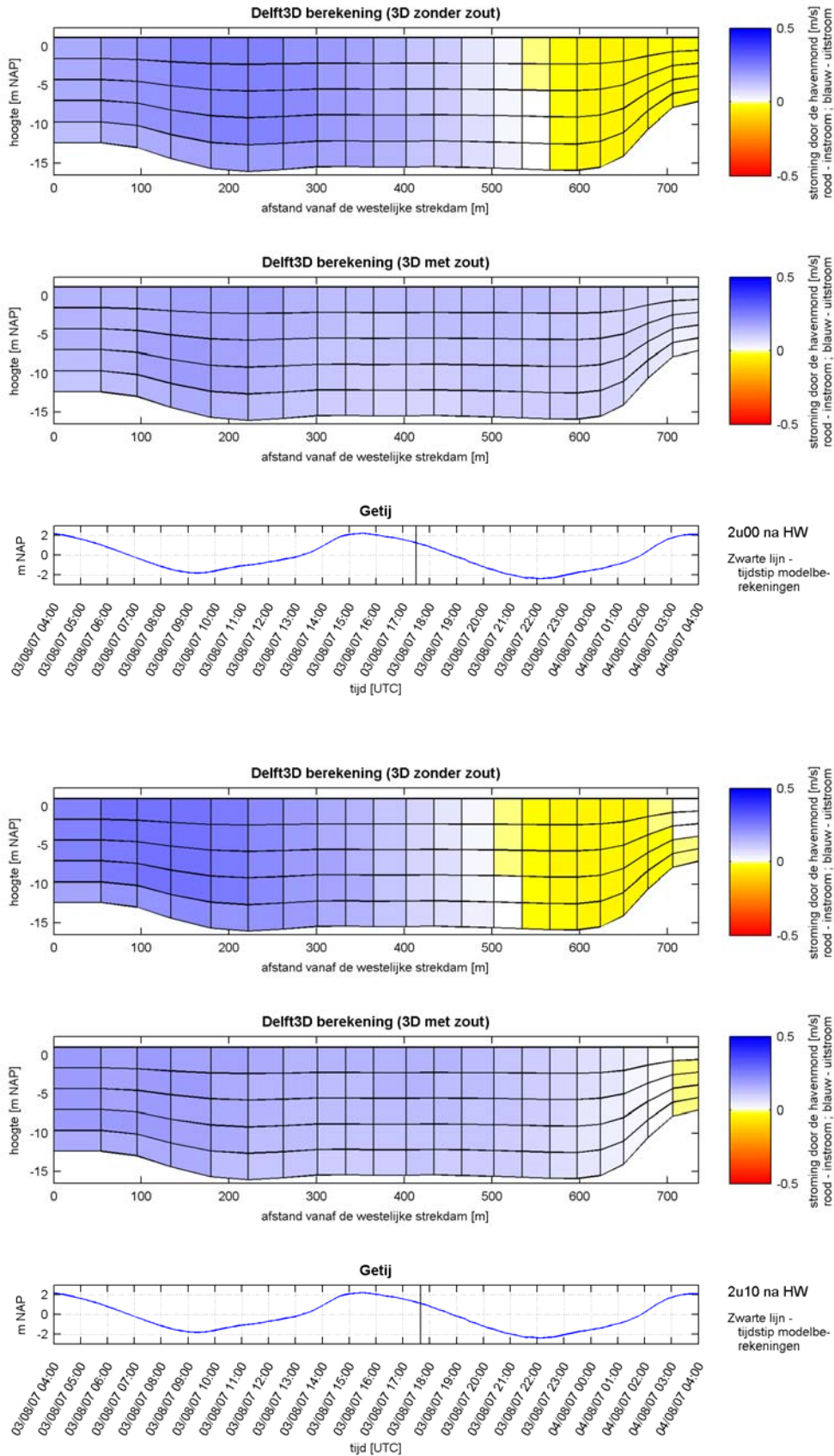


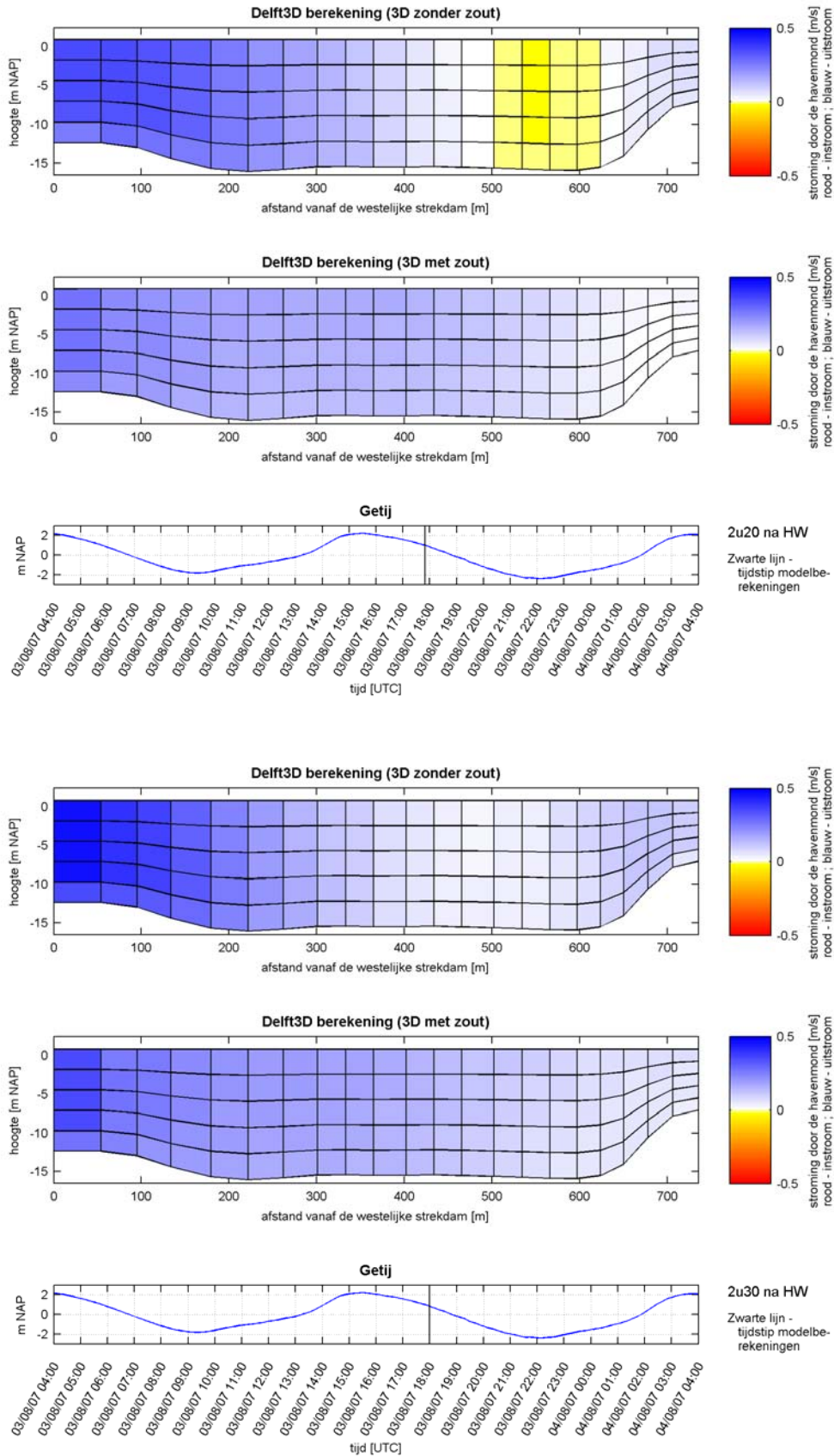


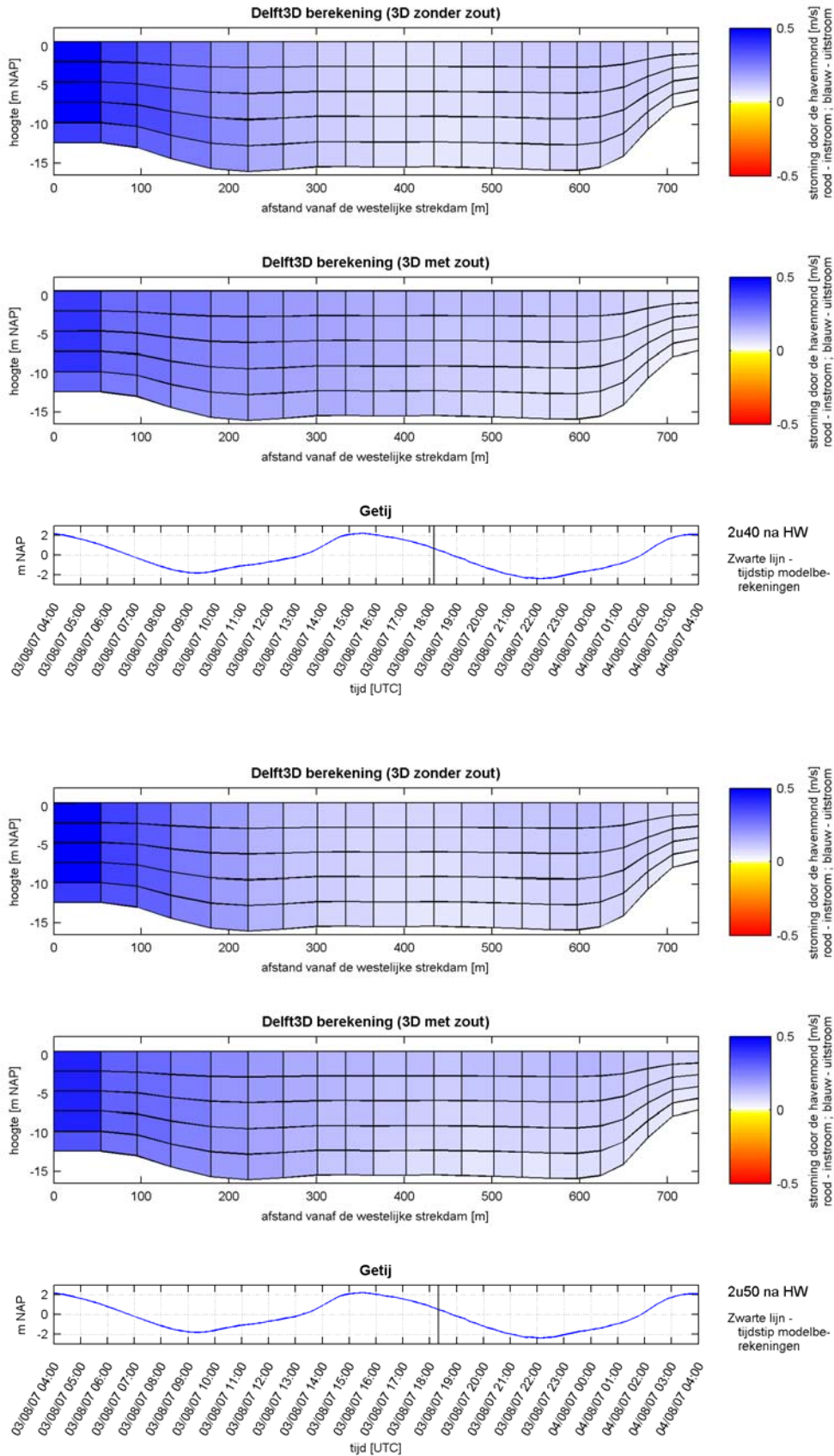


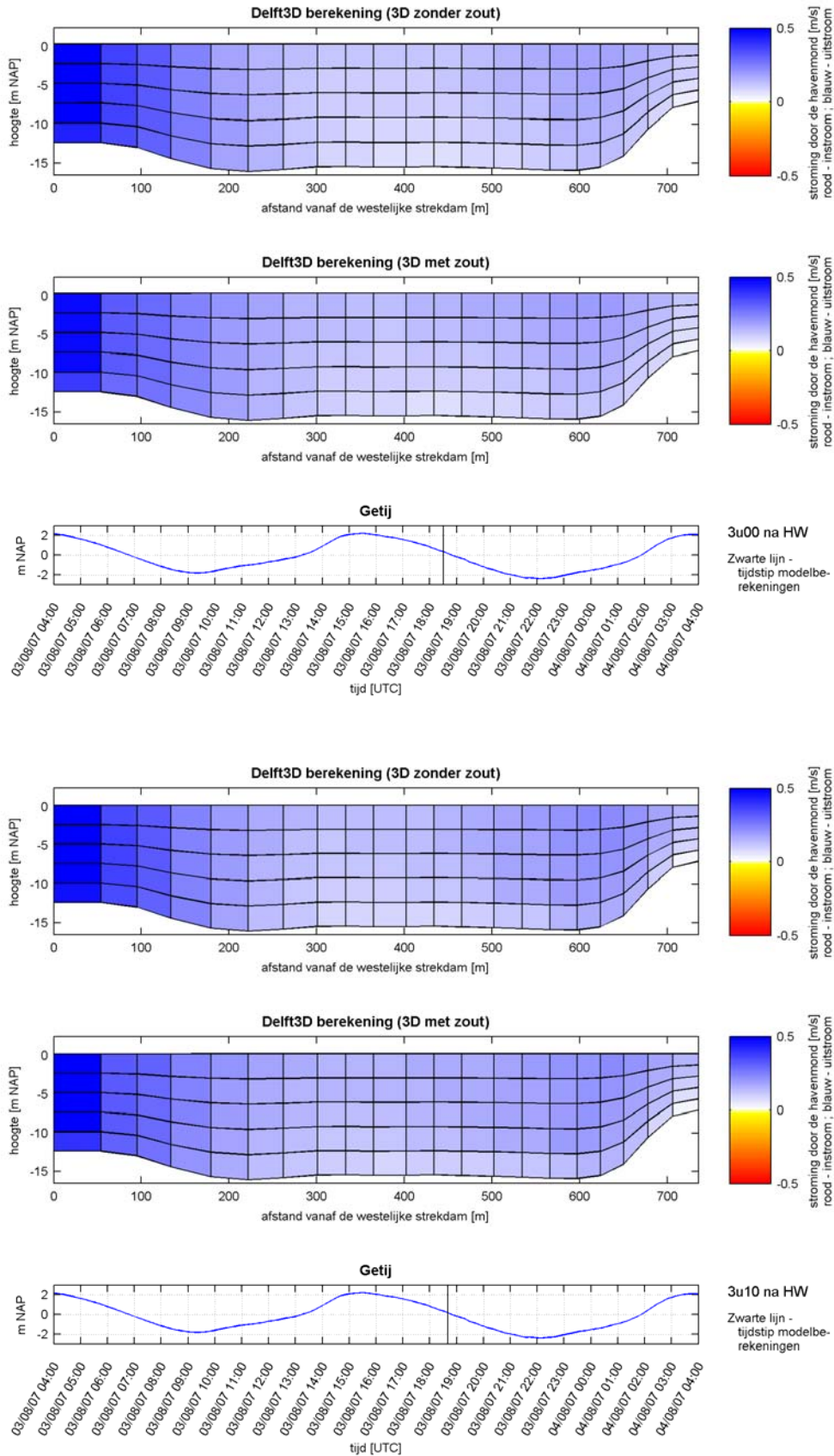


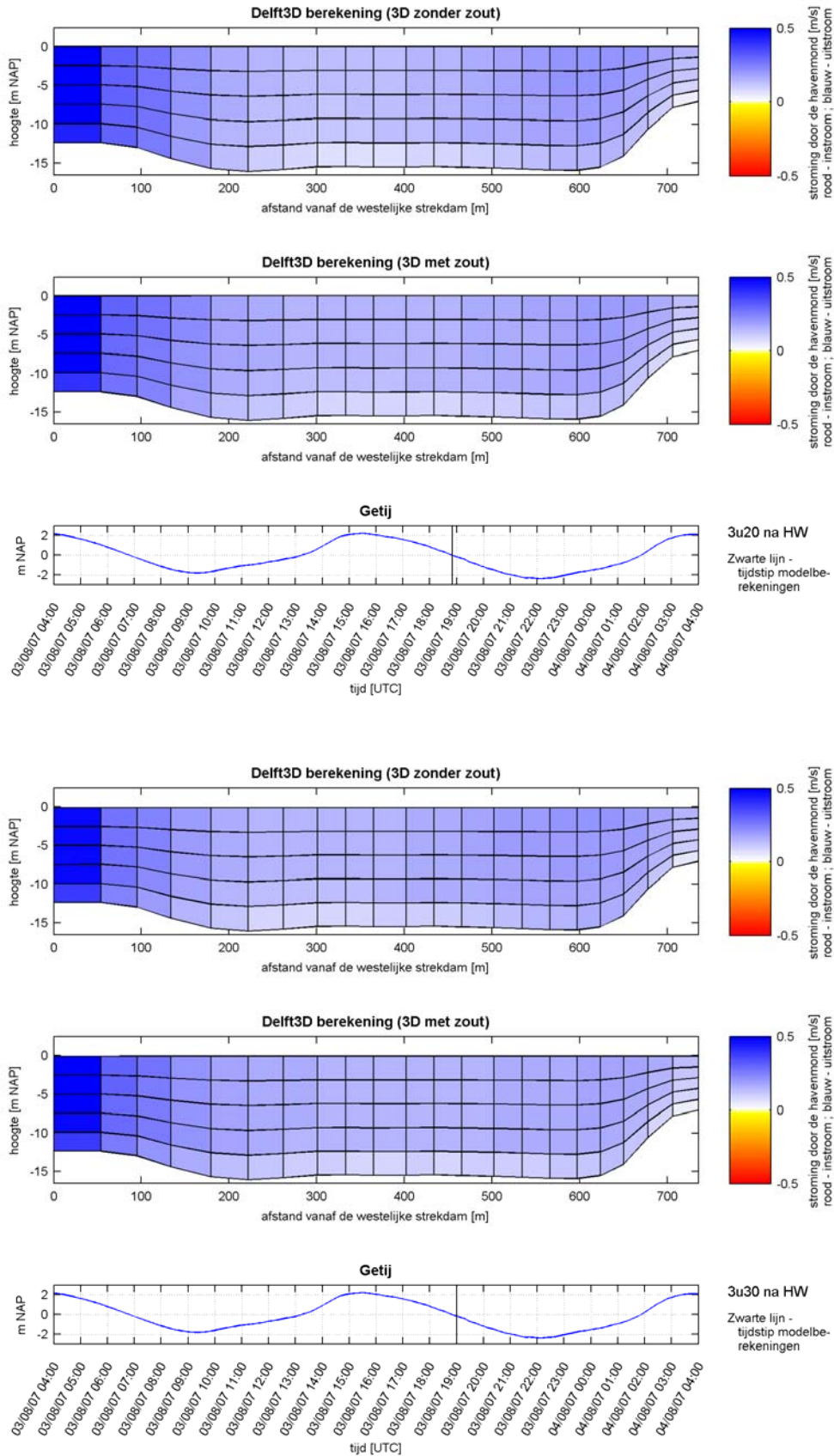


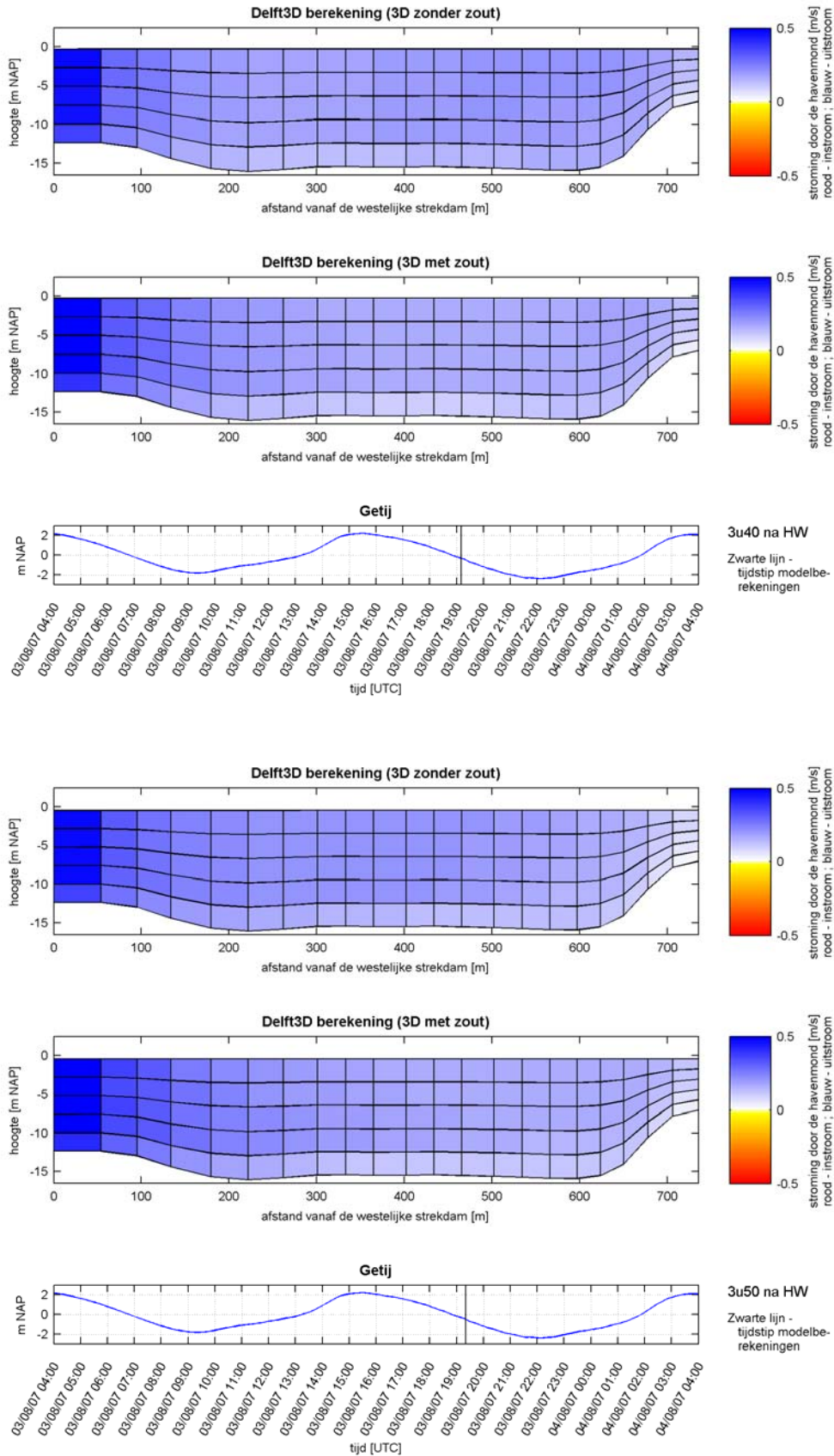


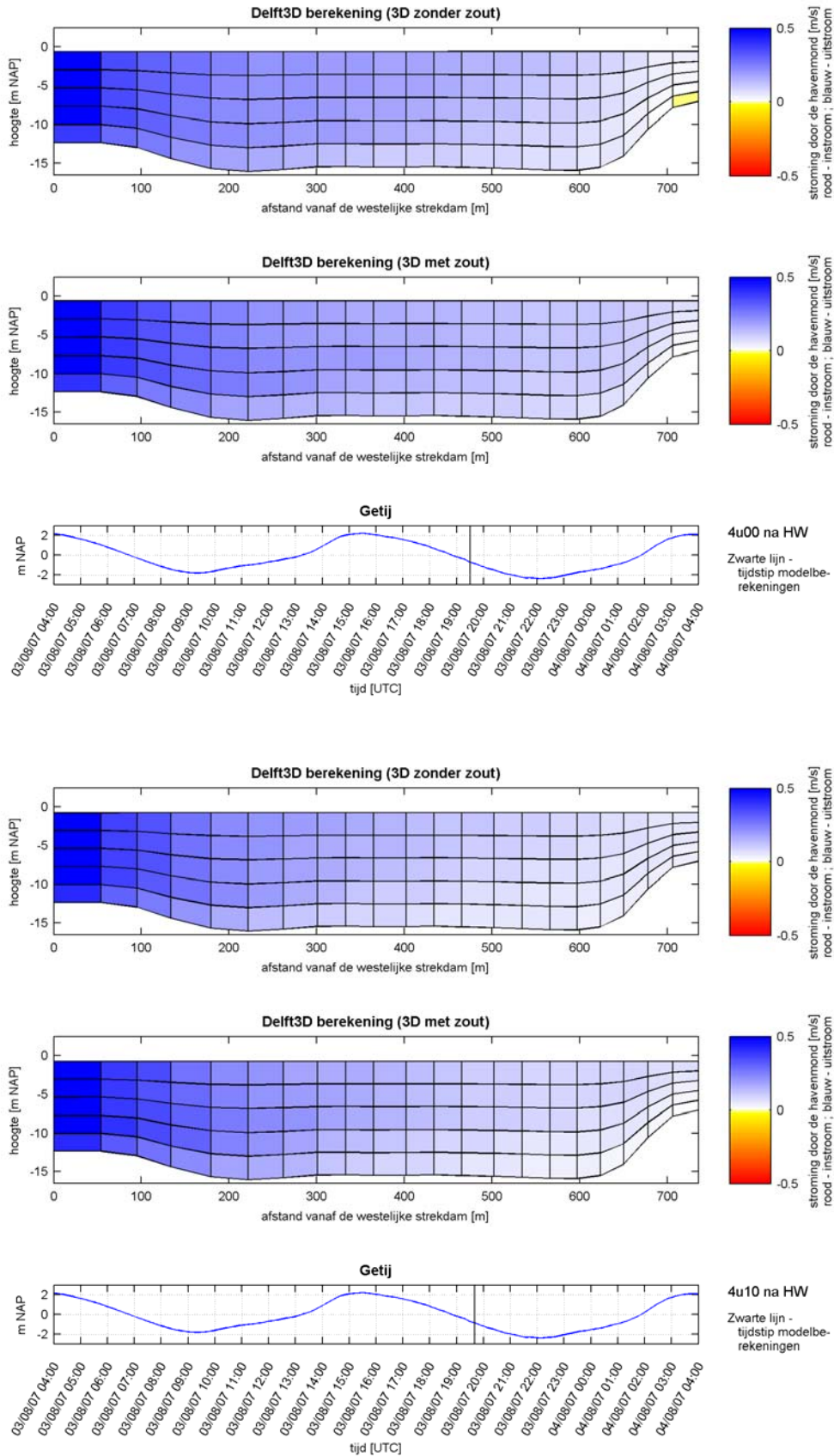


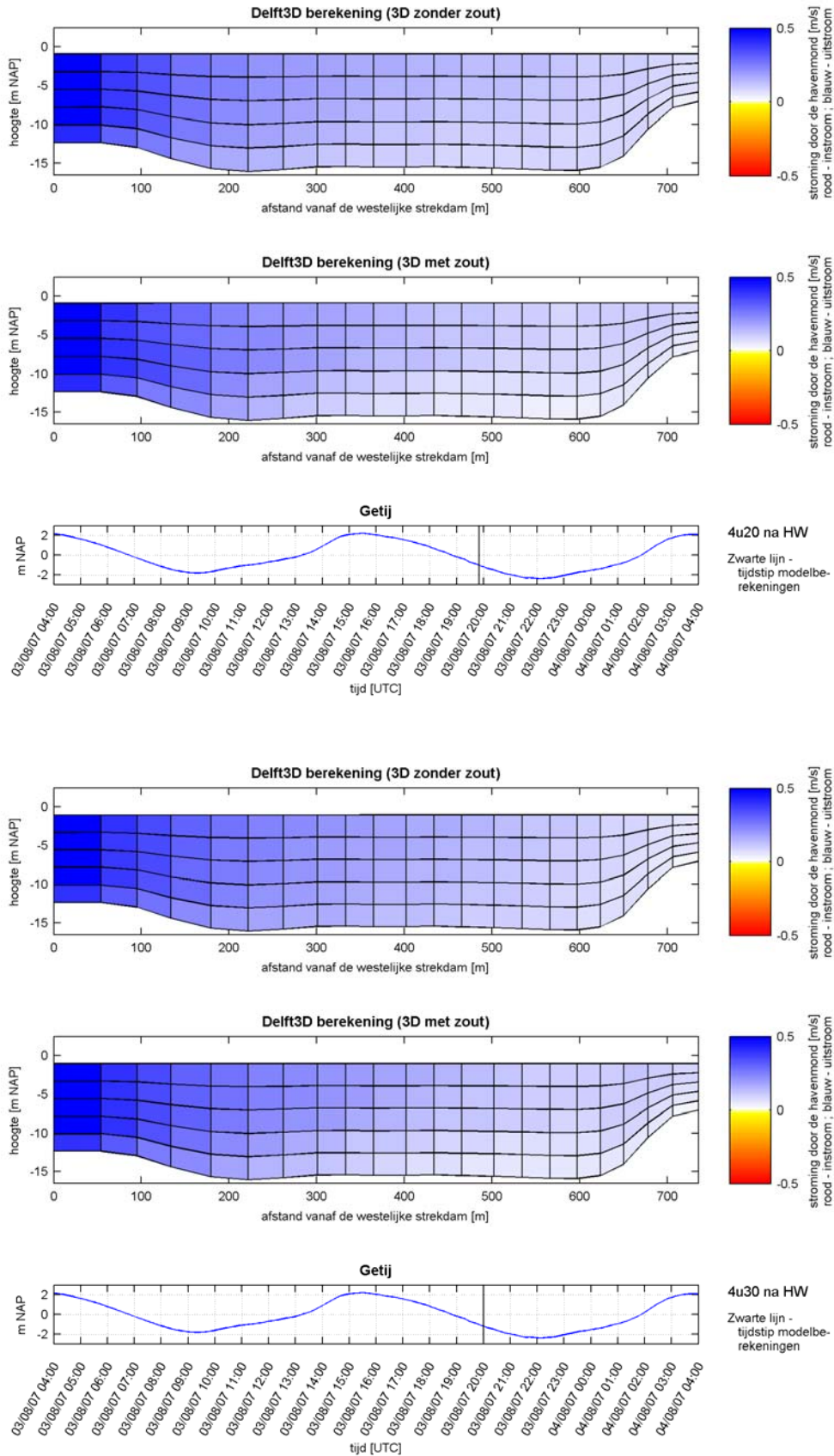


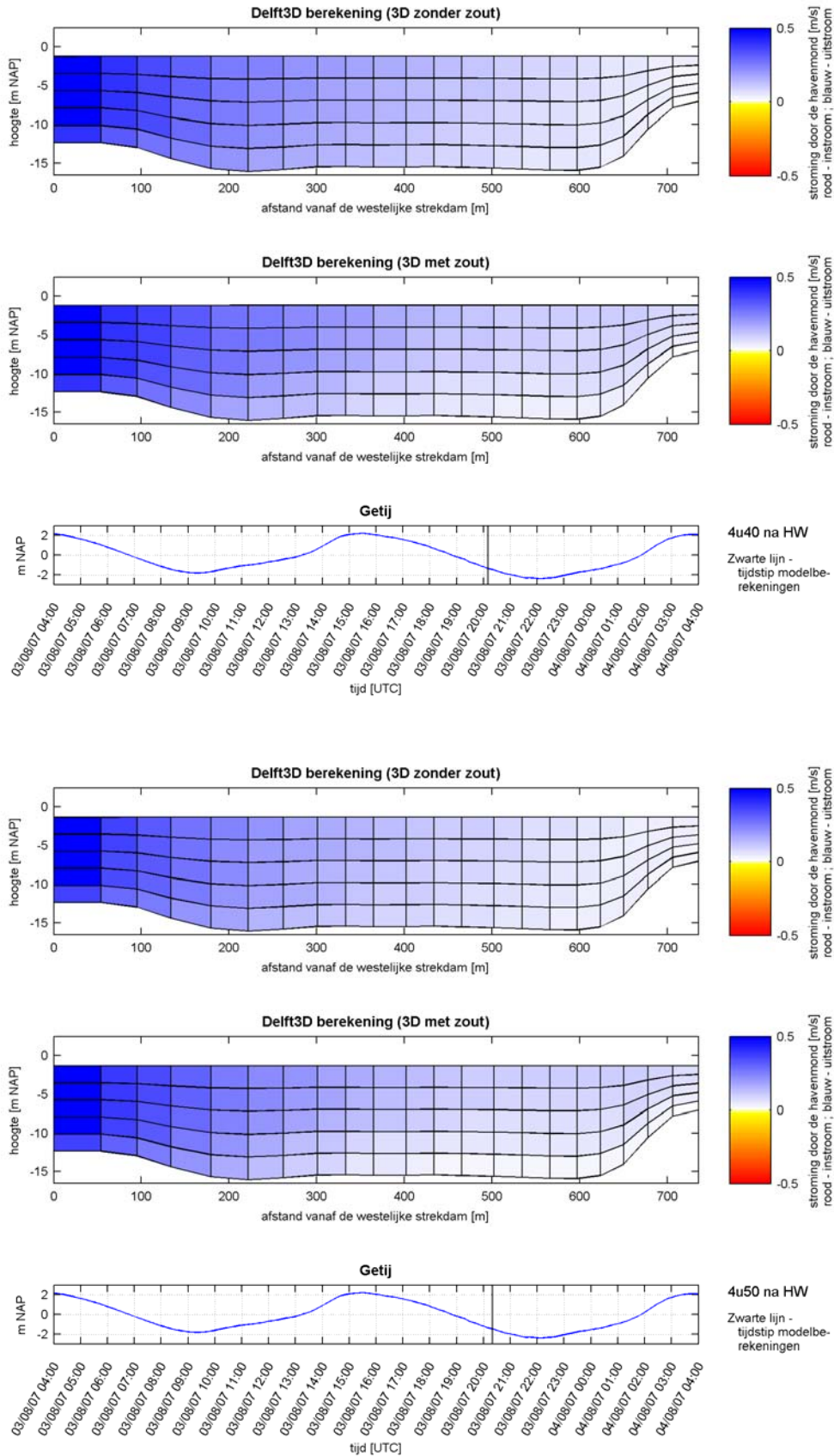


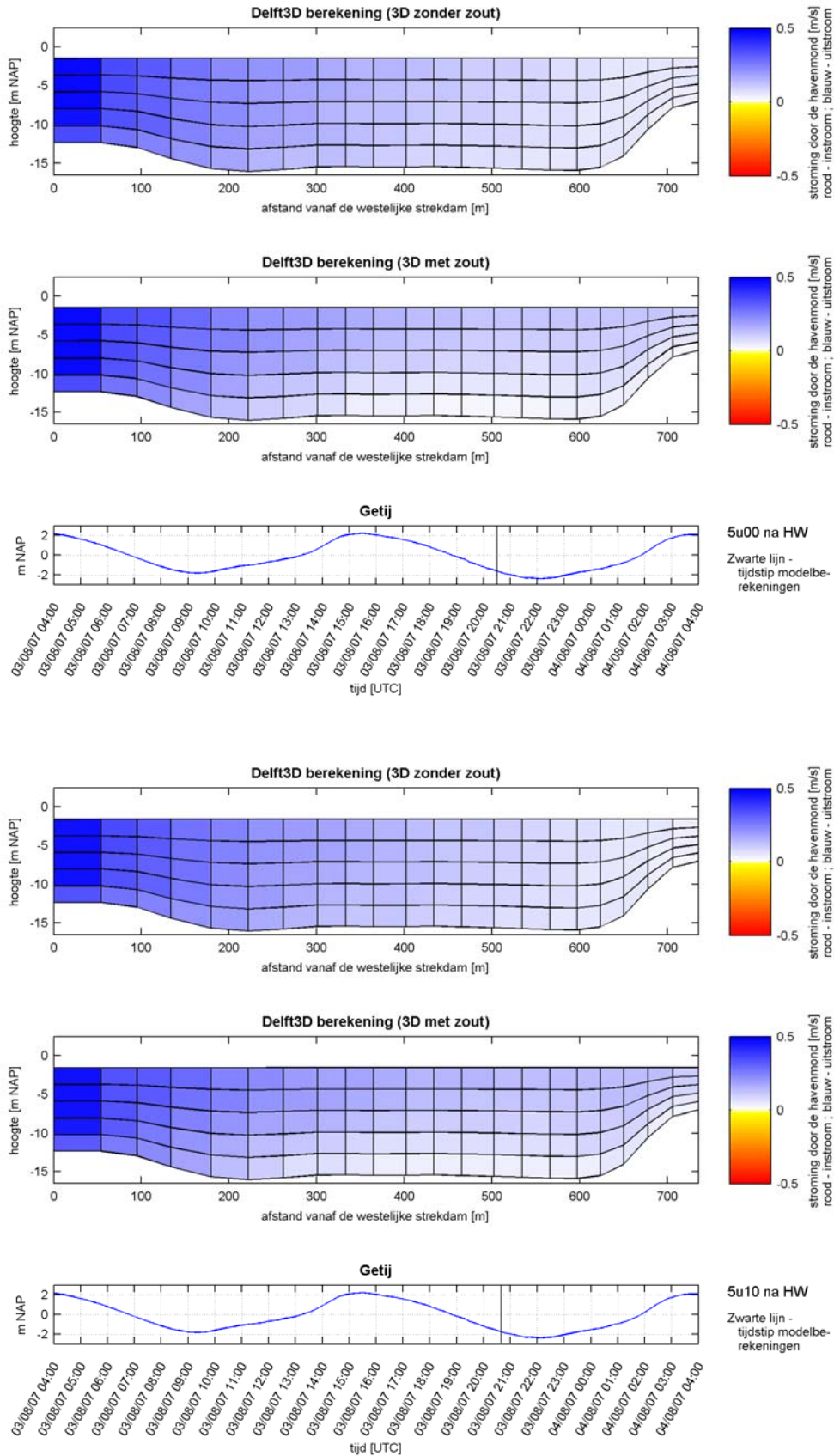


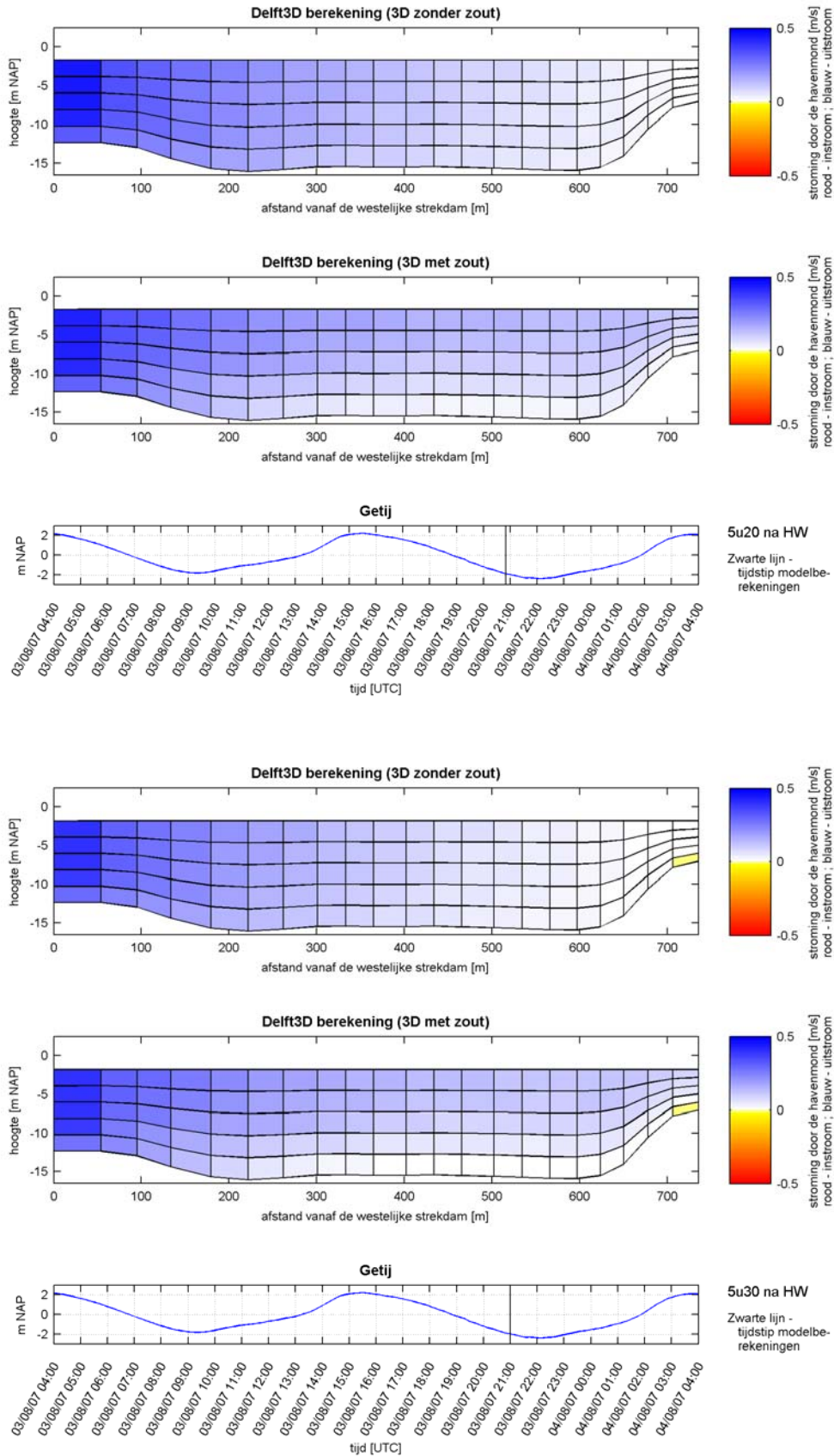


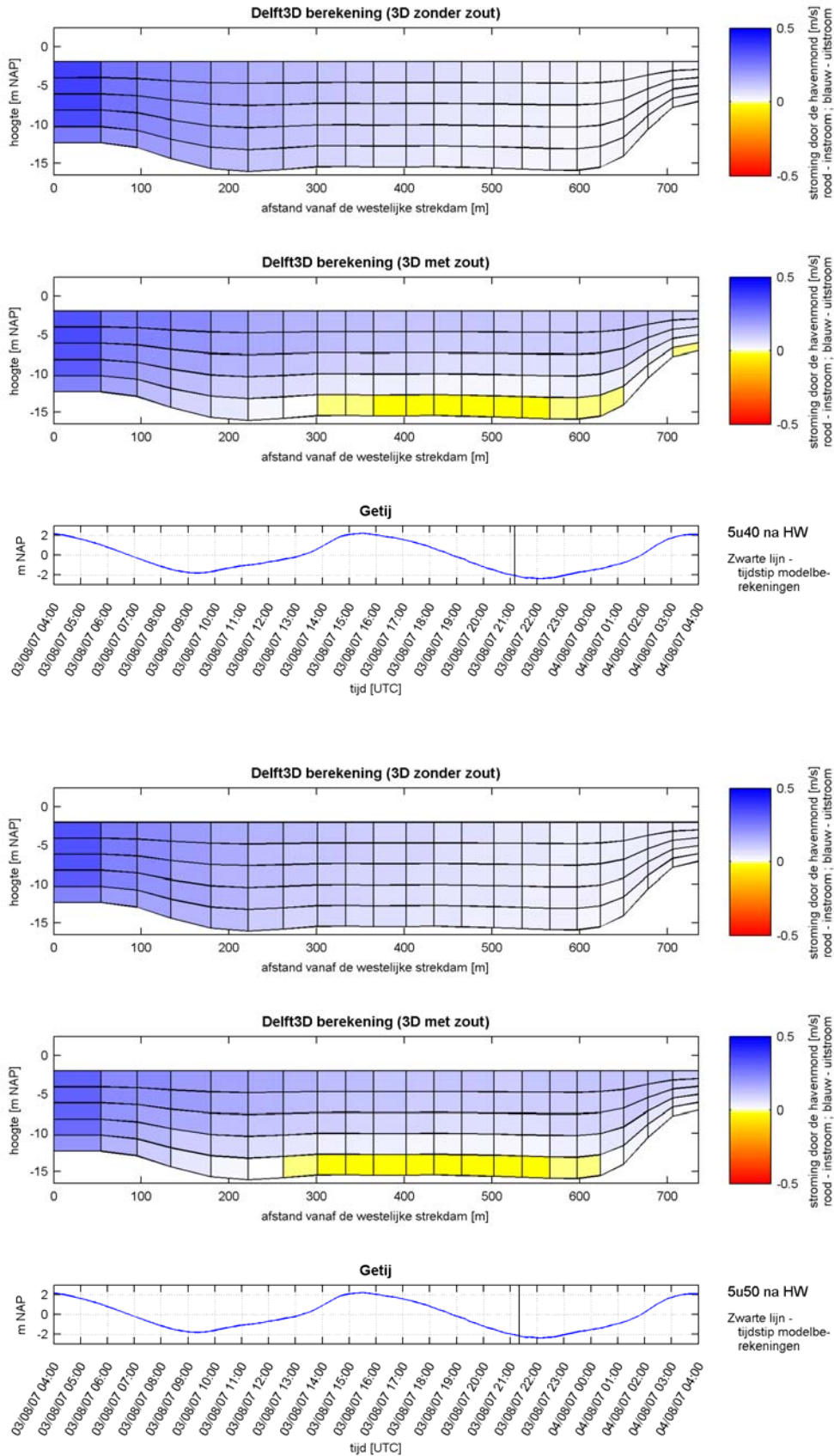


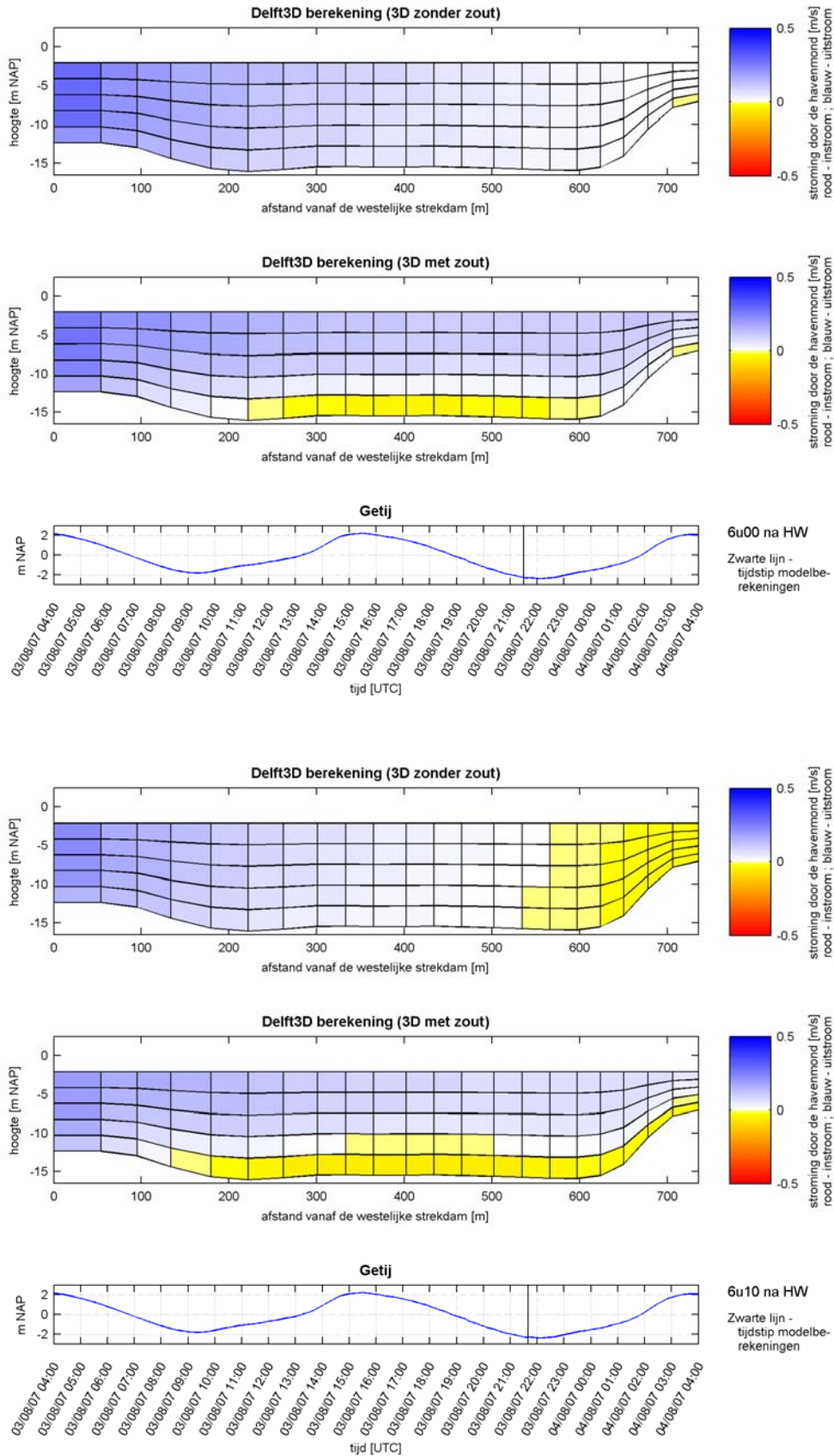


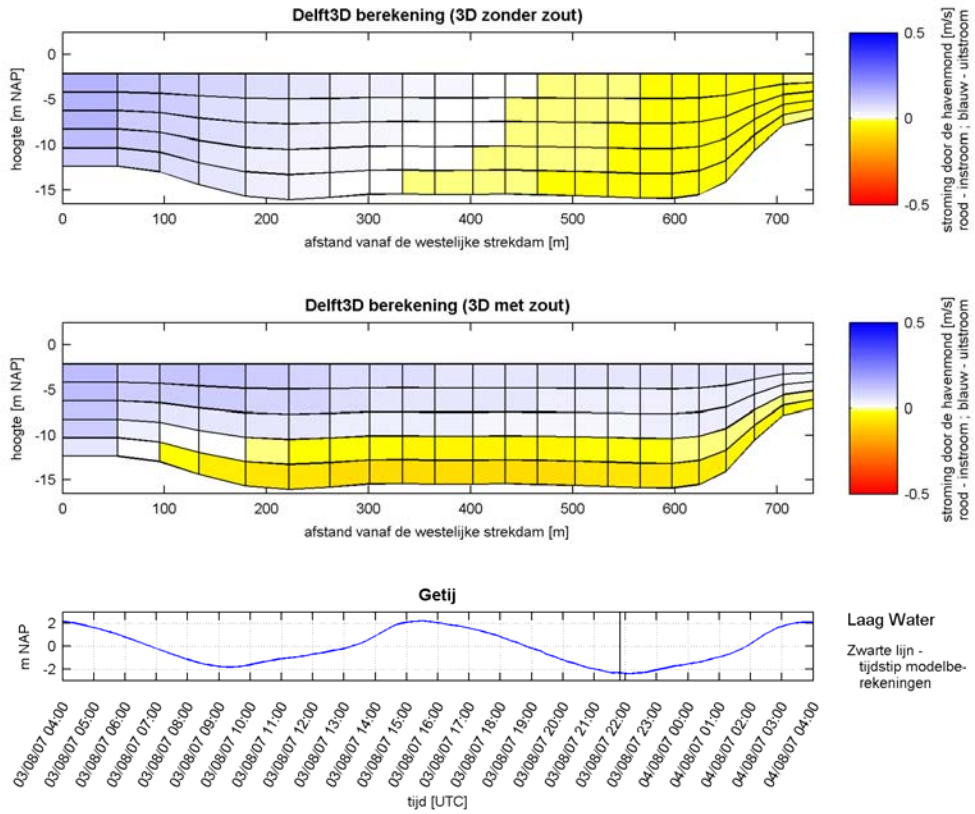




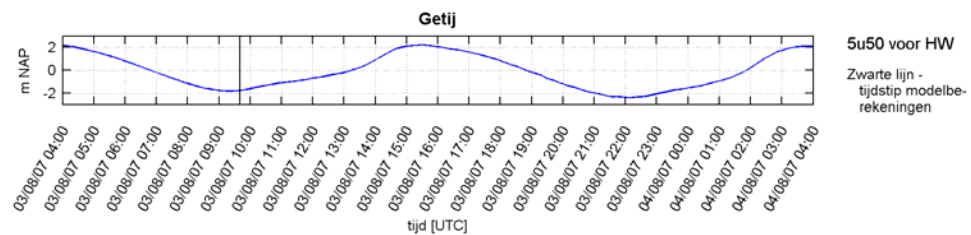
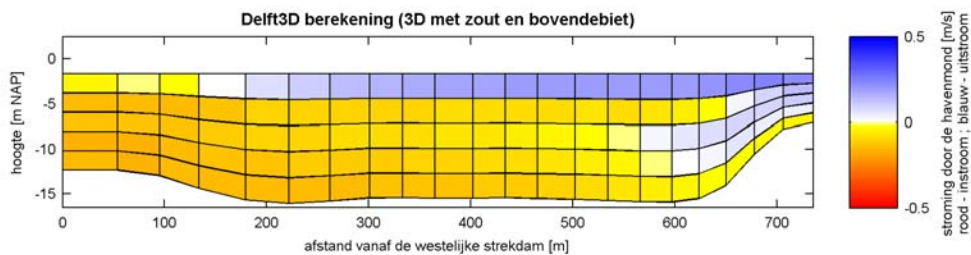
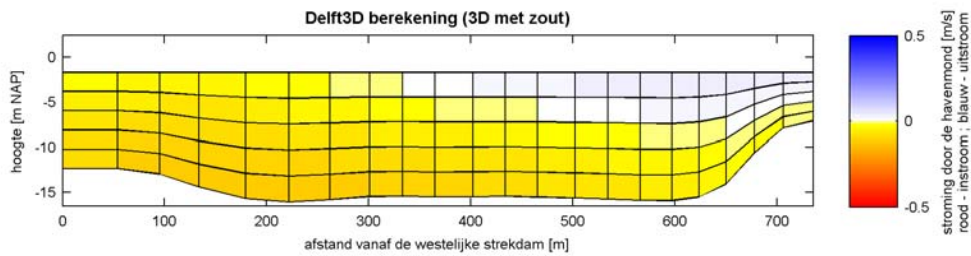
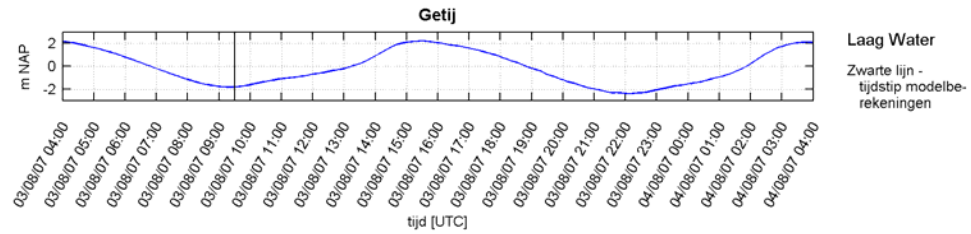
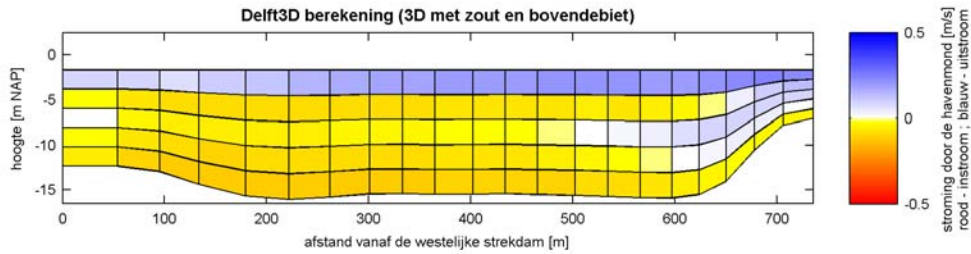
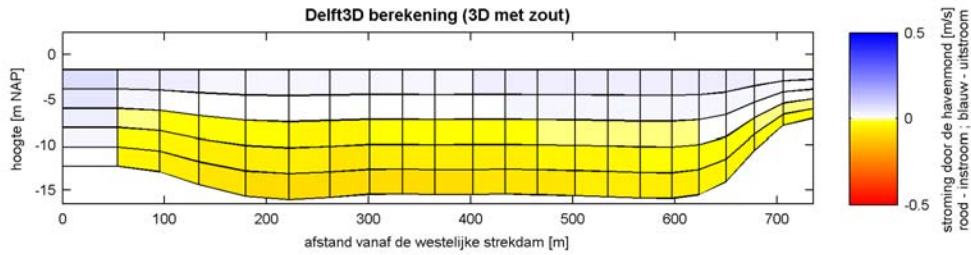


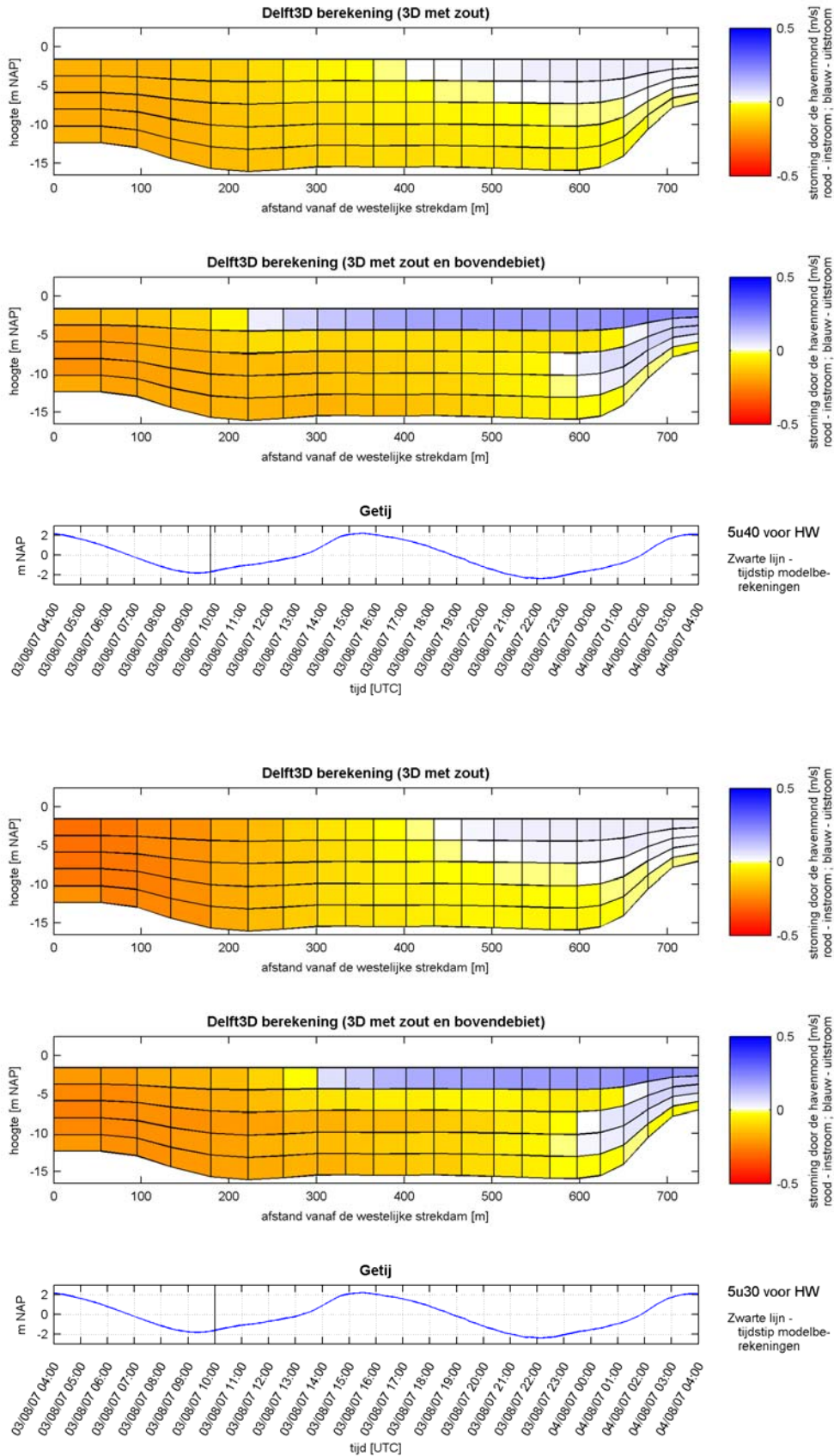


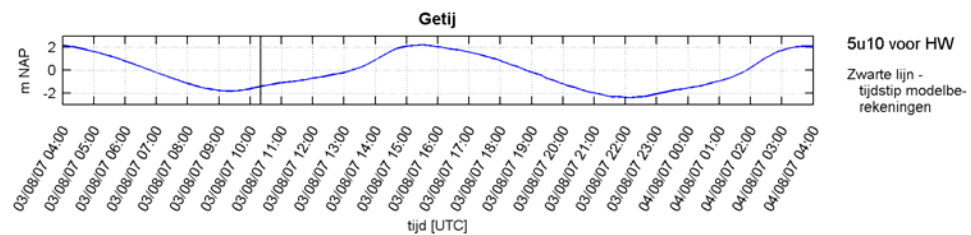
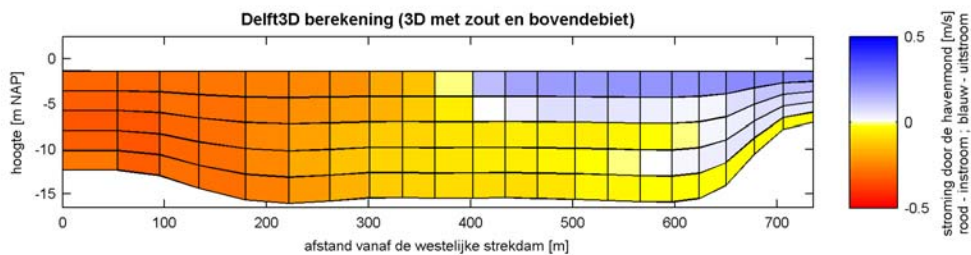
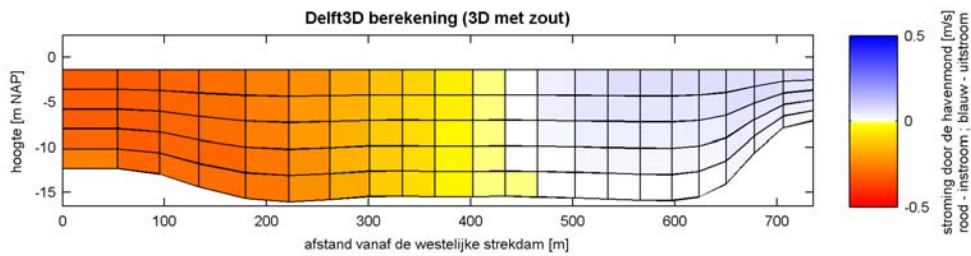
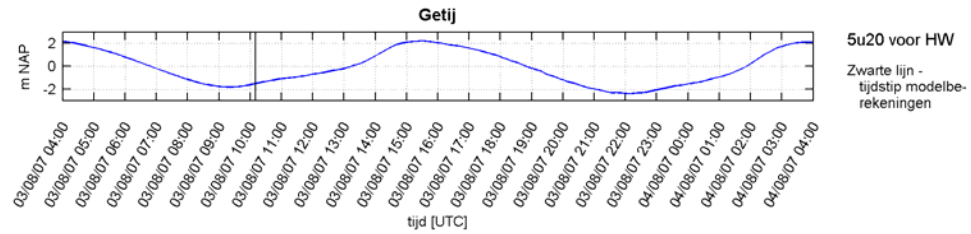
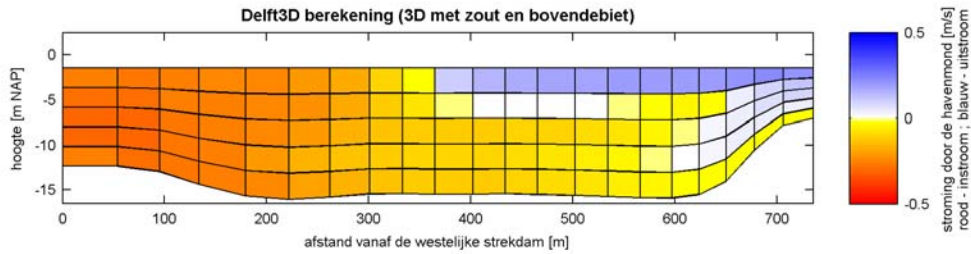
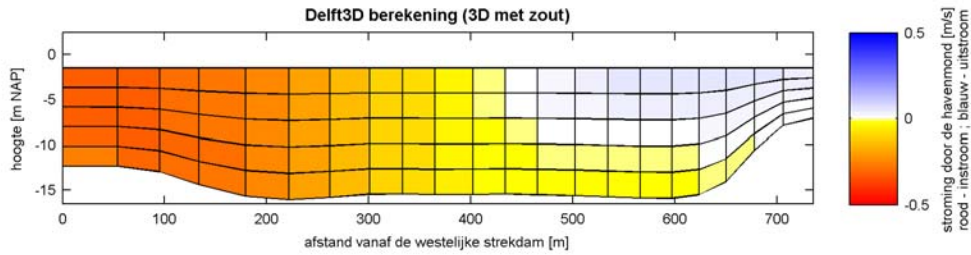


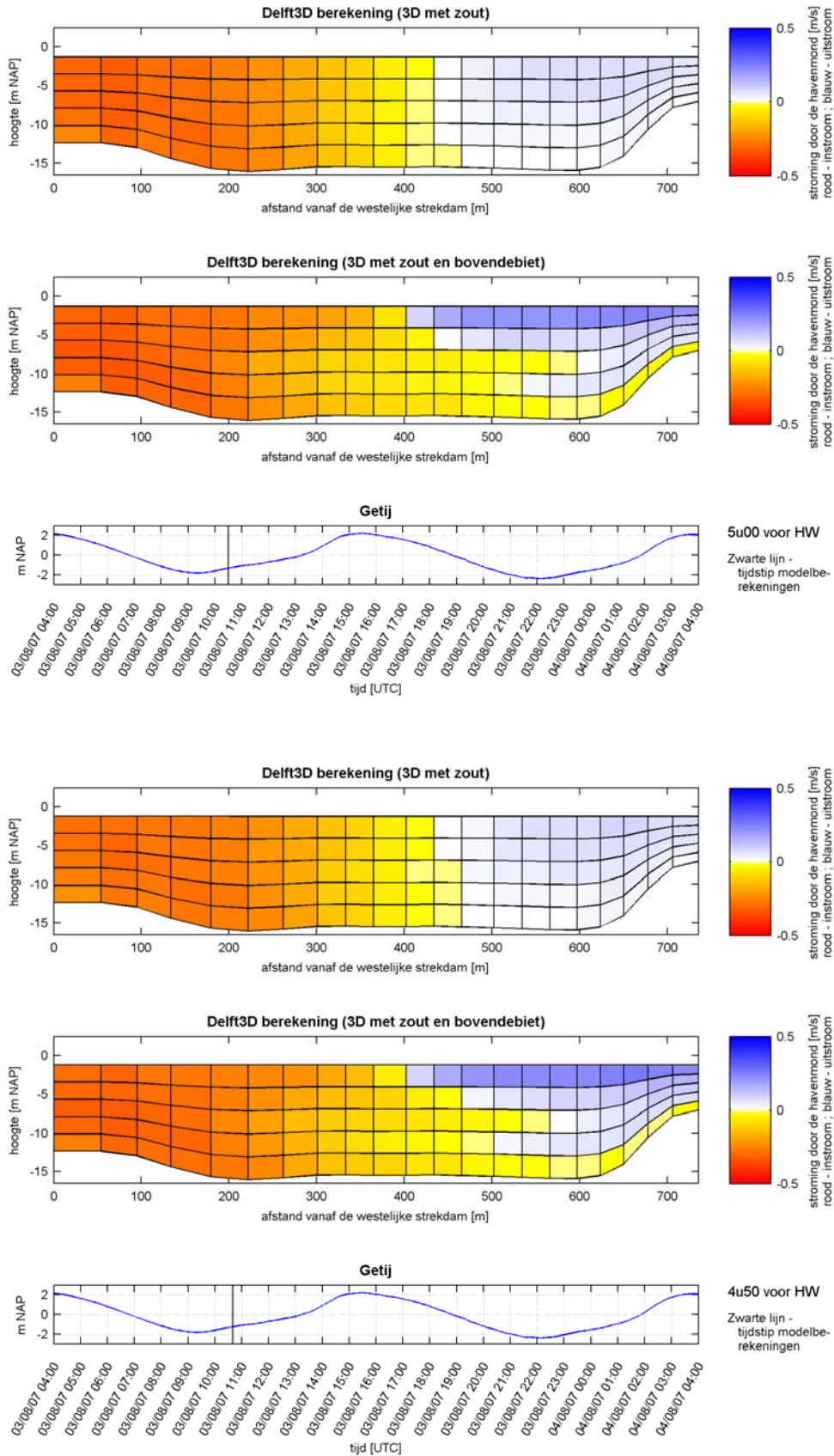


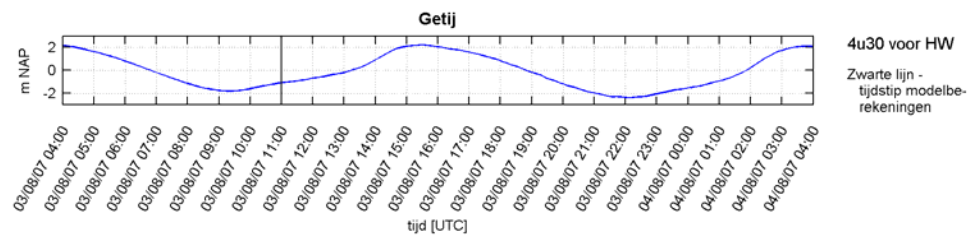
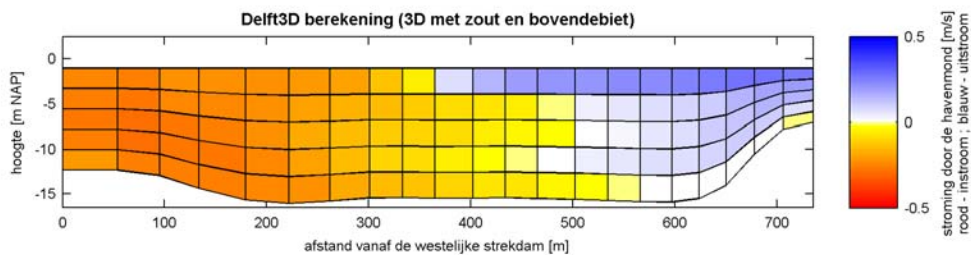
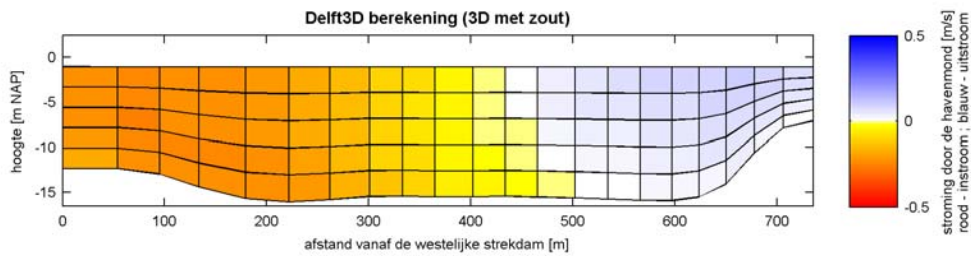
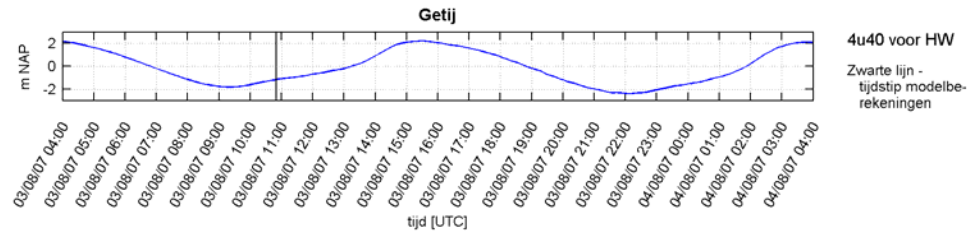
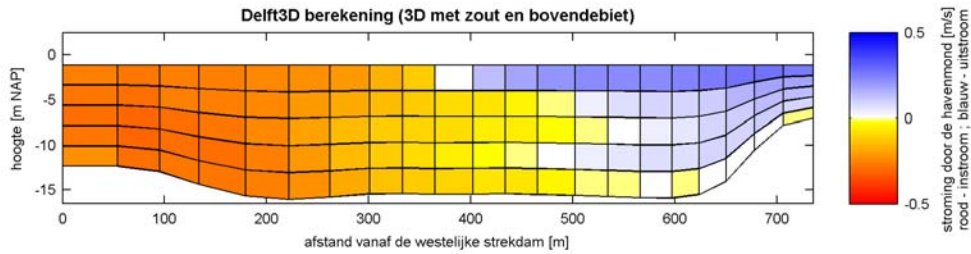
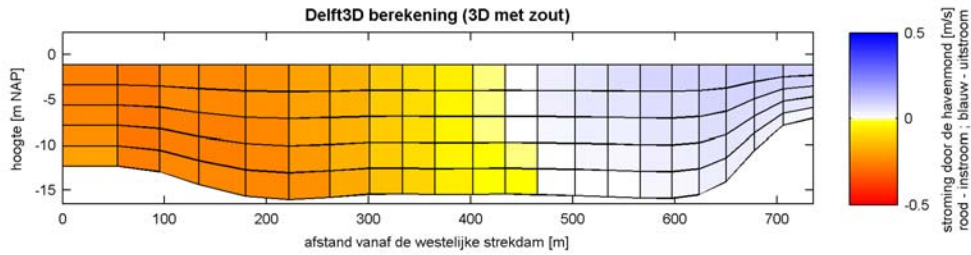
Bijlage B:
Vergelijking van numerieke modelresultaten bij springtij:
Scenario 2 (3D model met zout) t.o.v. scenario 3 (3D model met zout en bovendebiet)

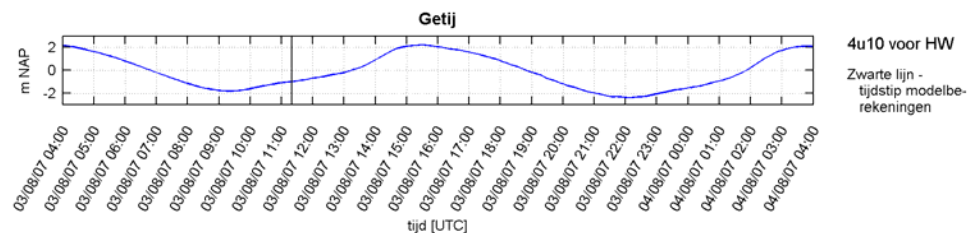
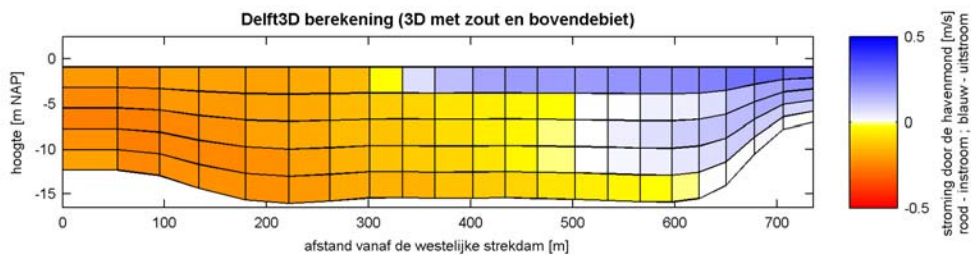
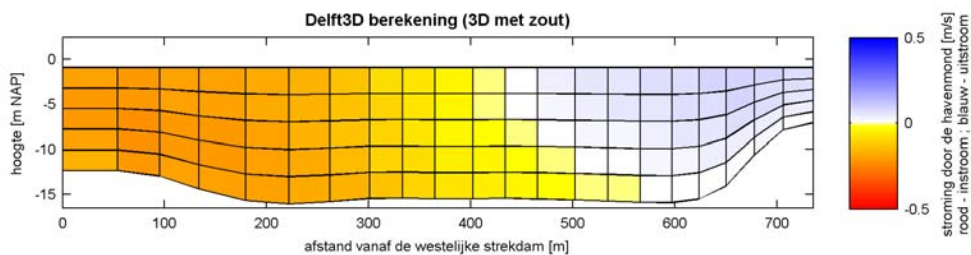
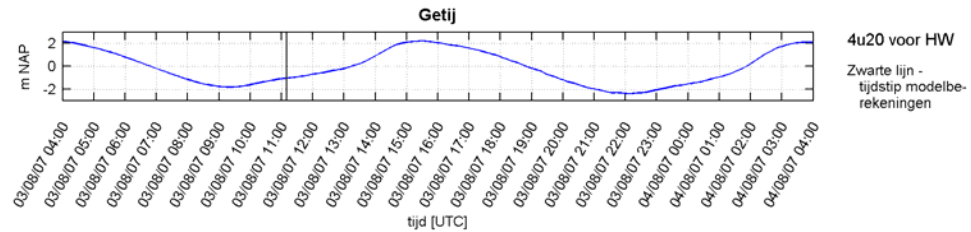
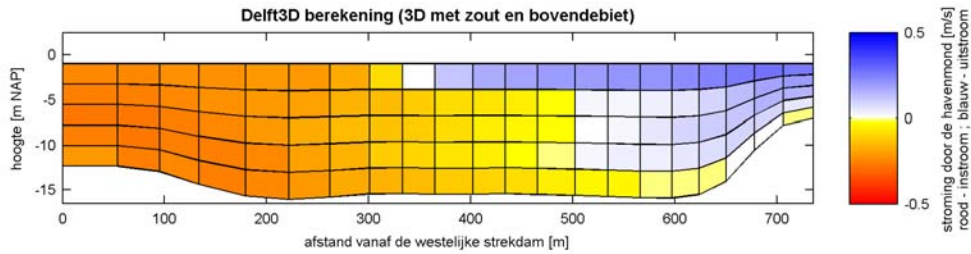
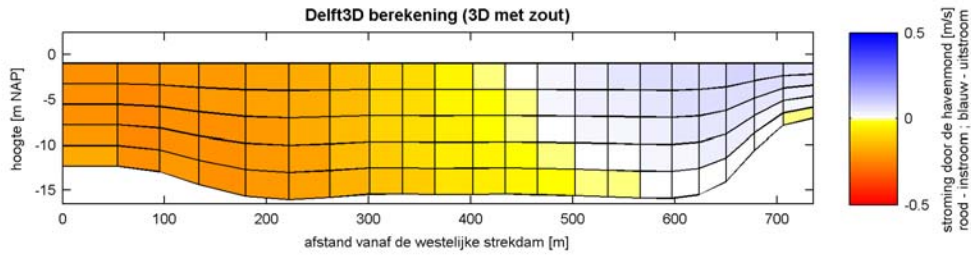


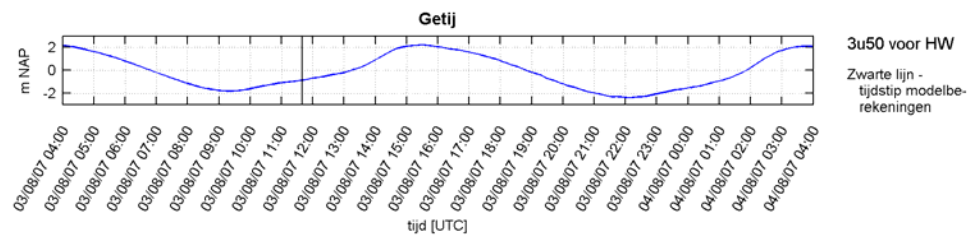
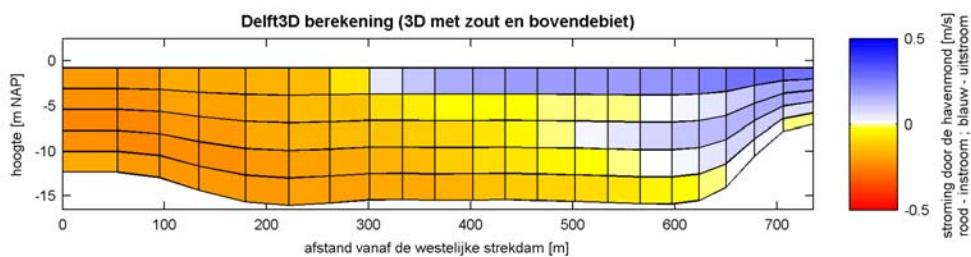
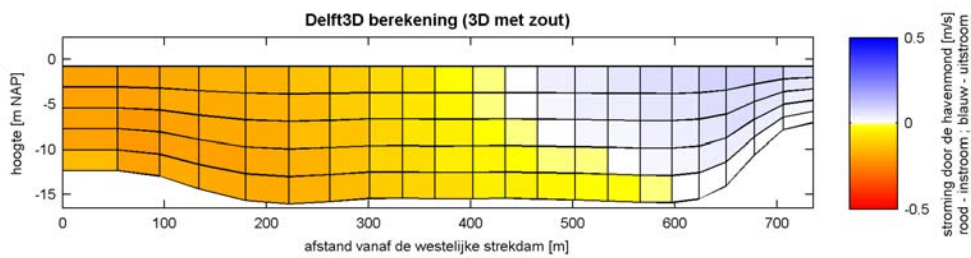
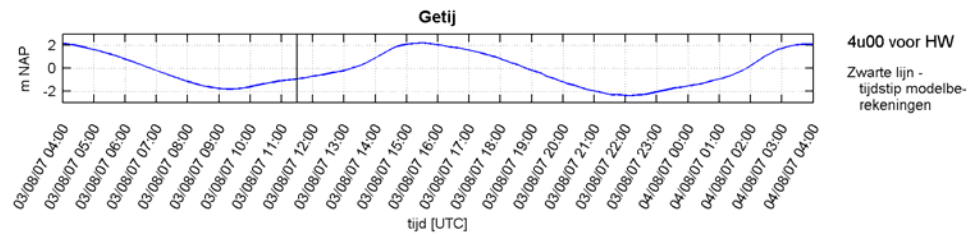
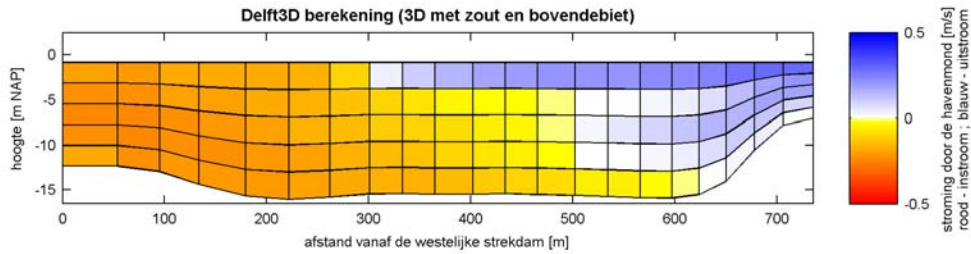
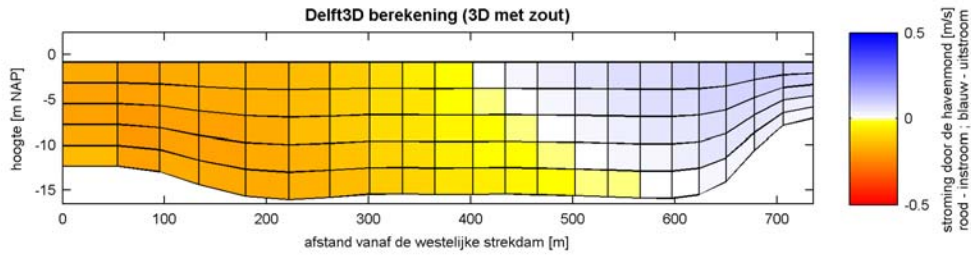


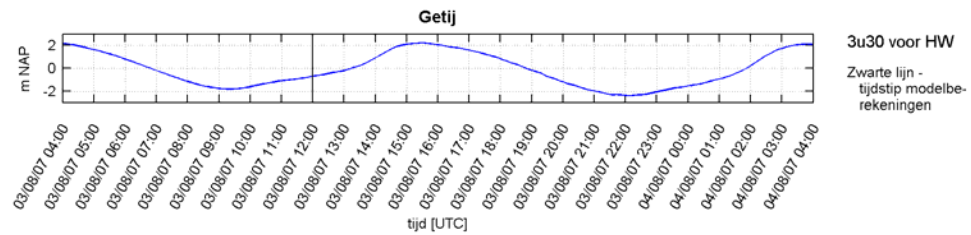
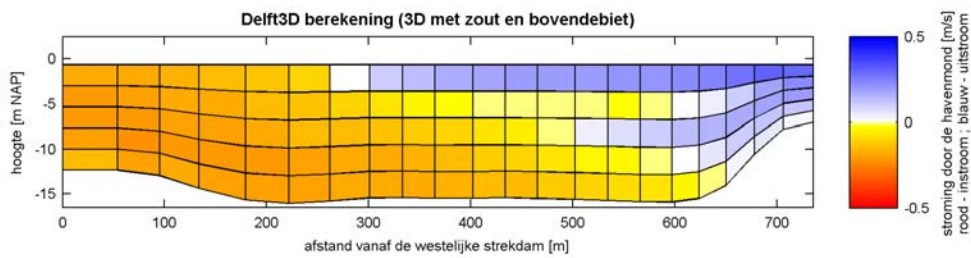
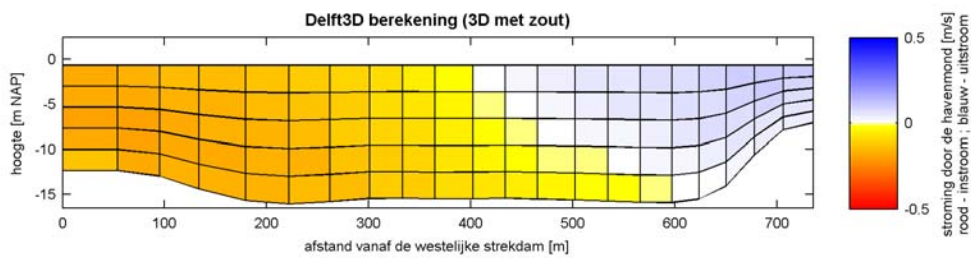
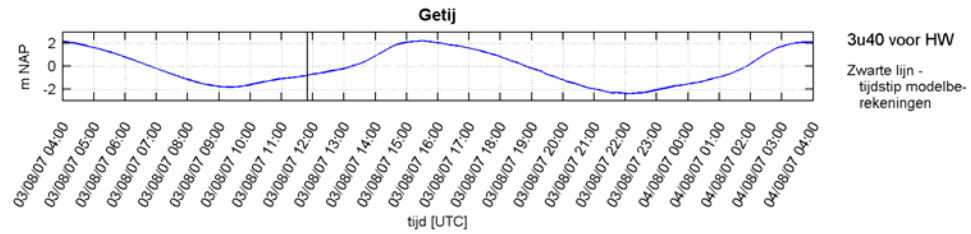
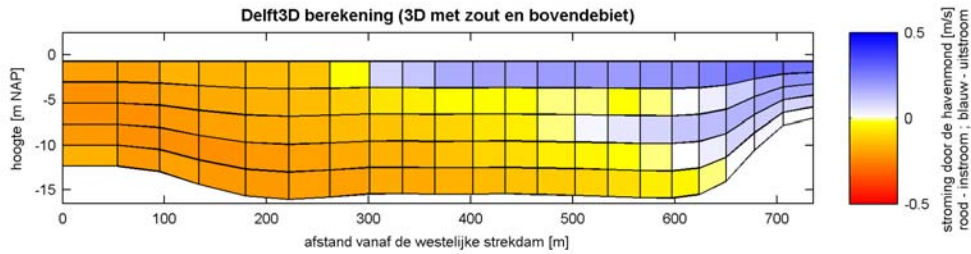
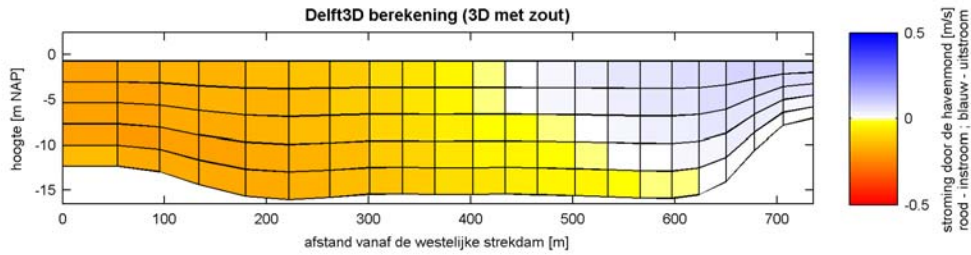


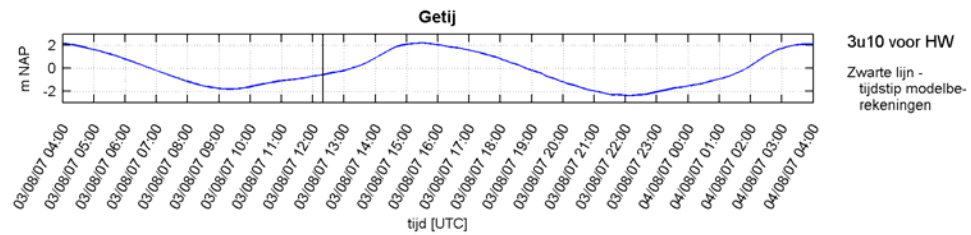
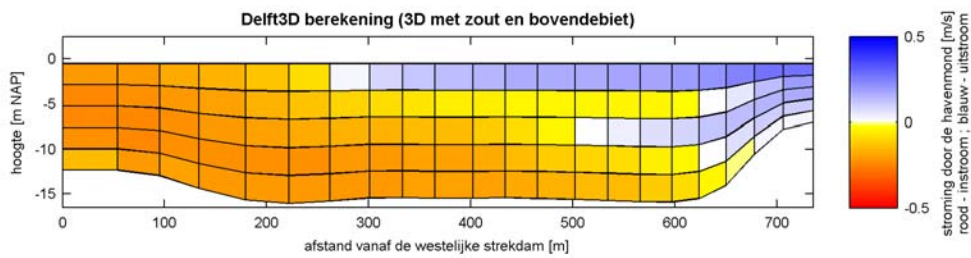
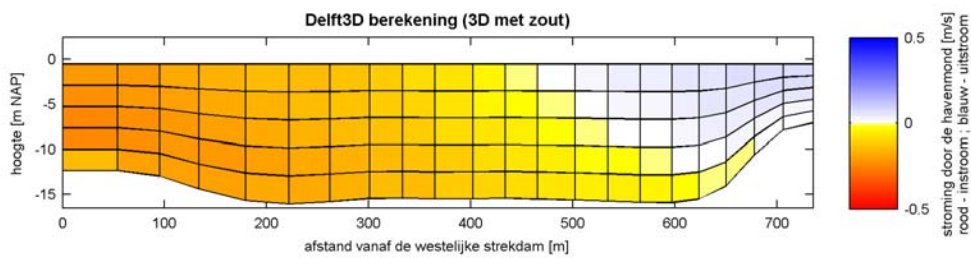
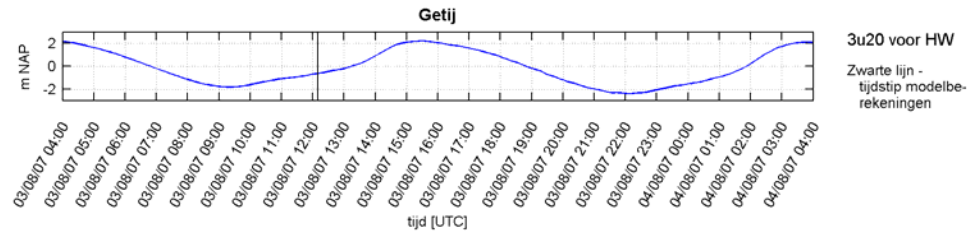
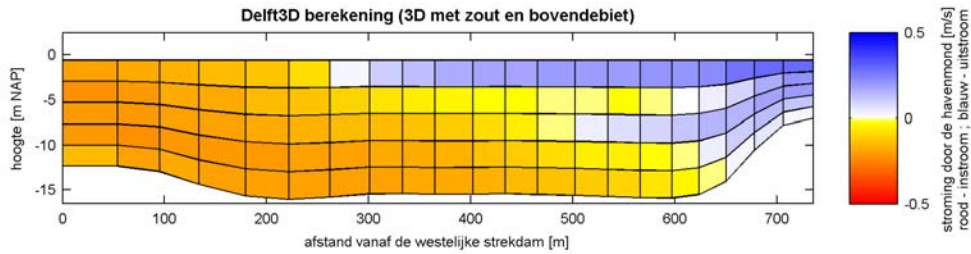
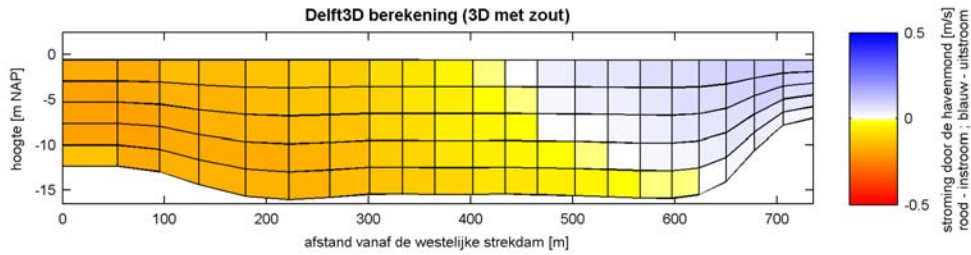


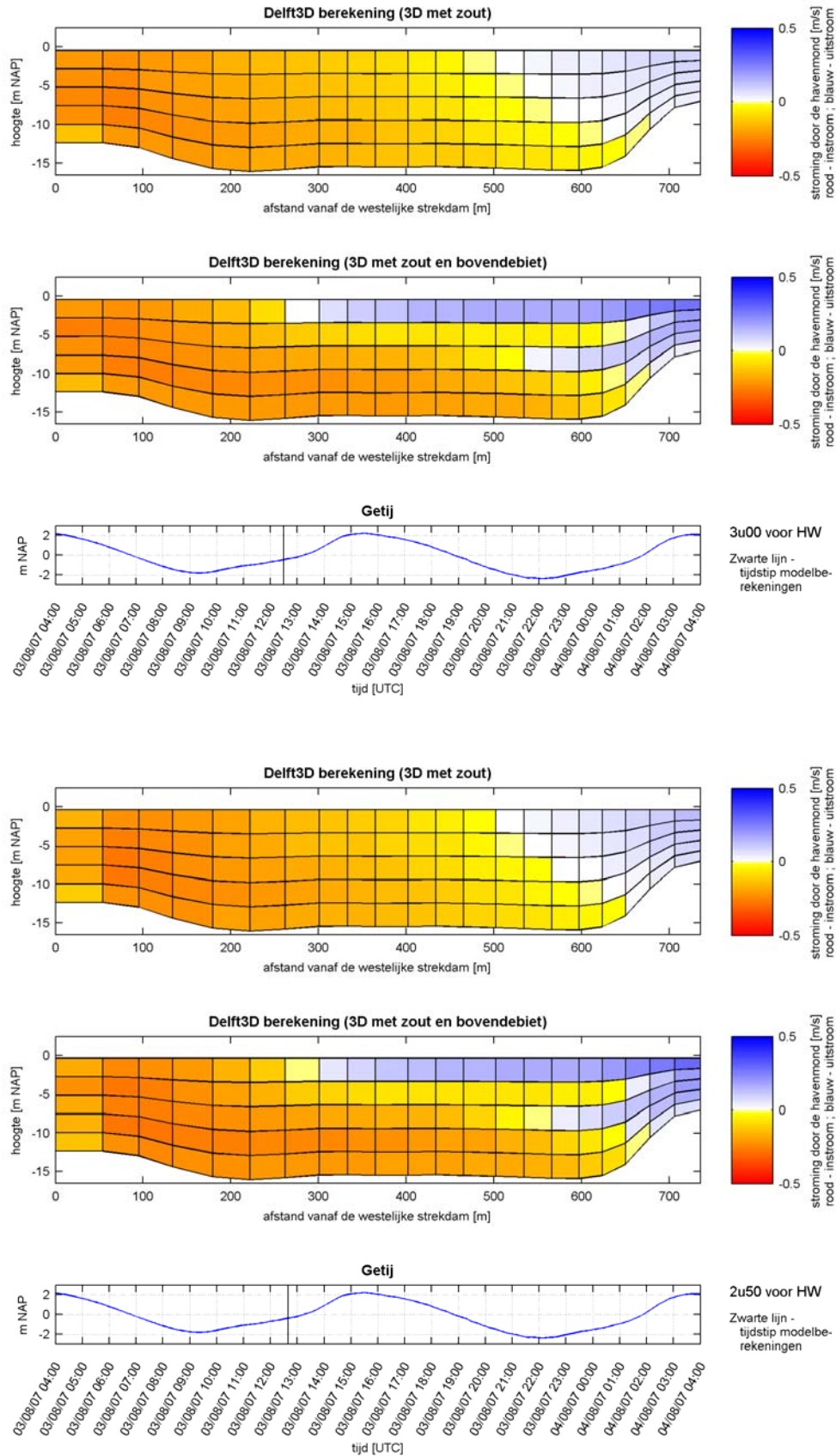


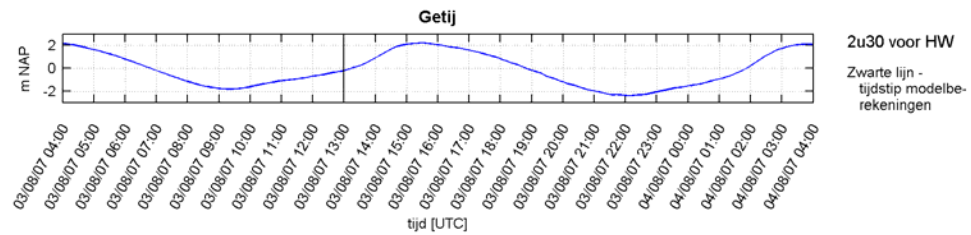
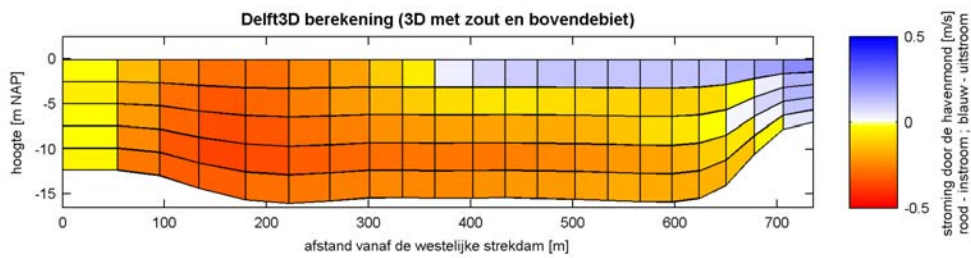
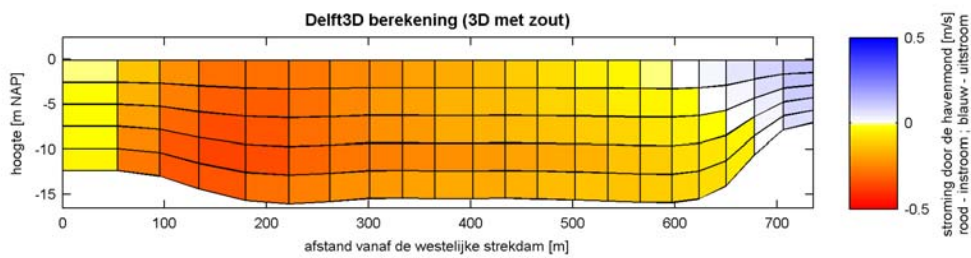
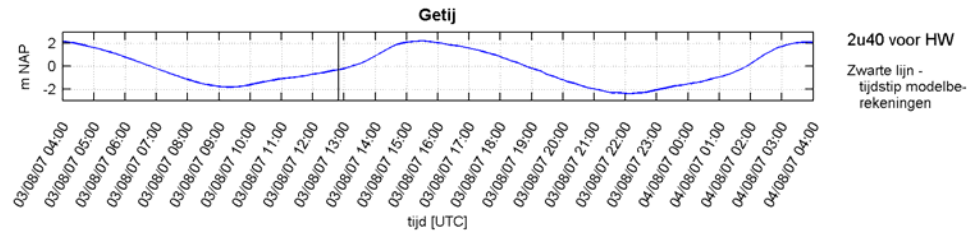
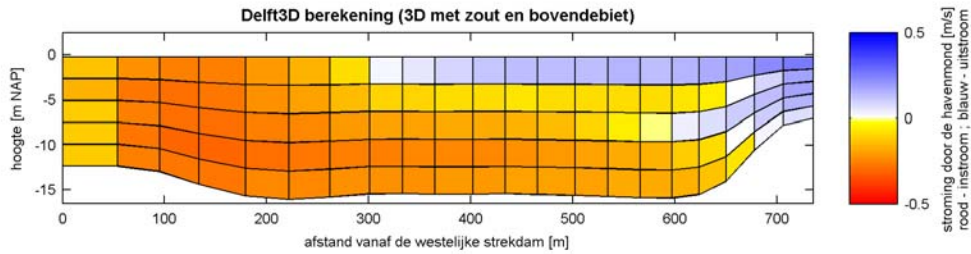
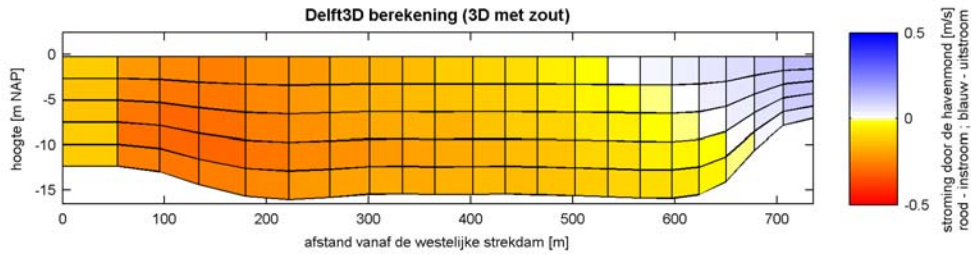


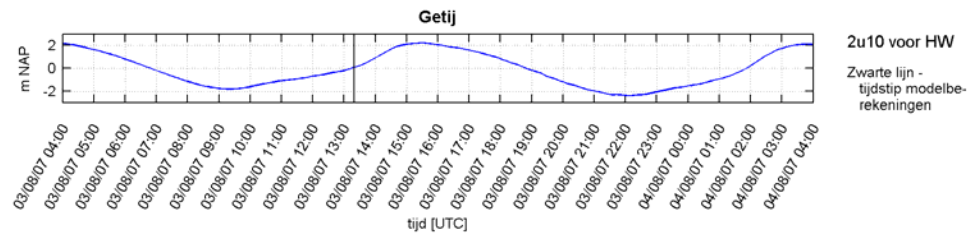
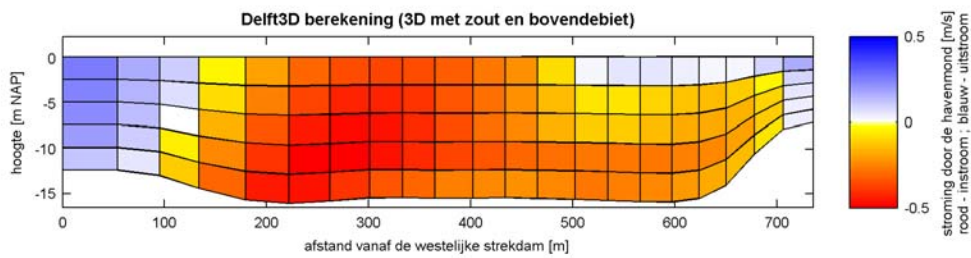
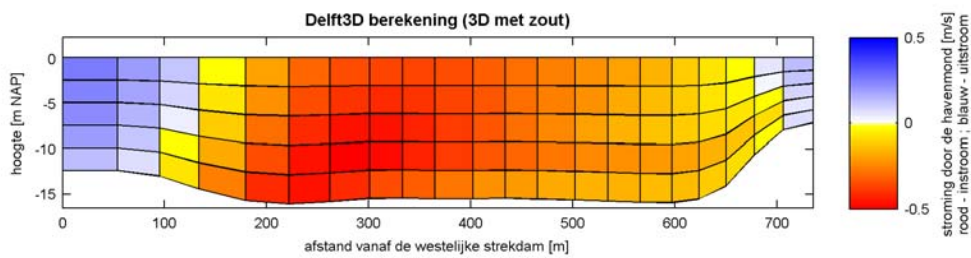
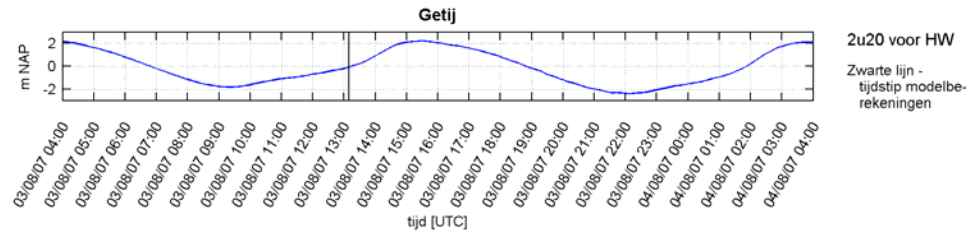
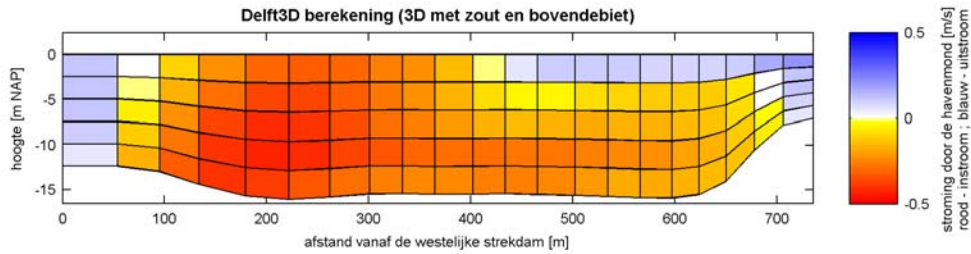
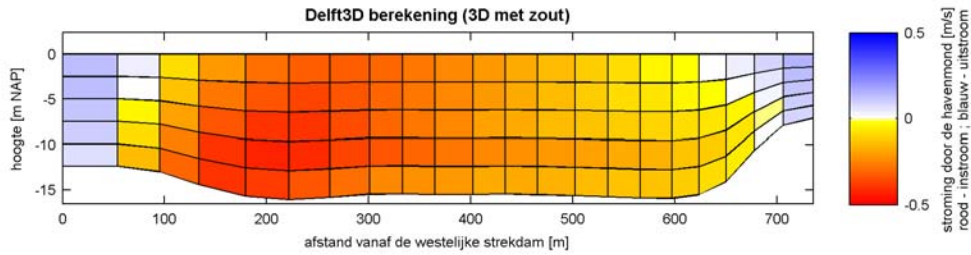


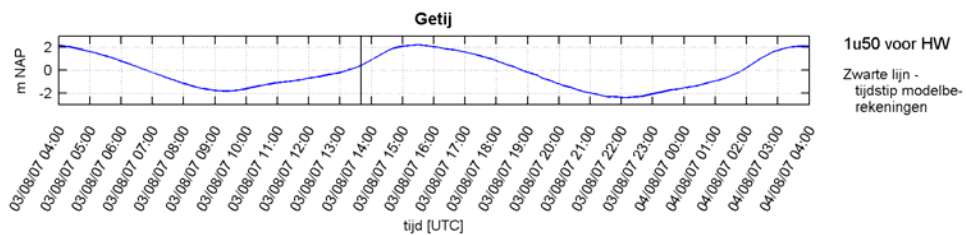
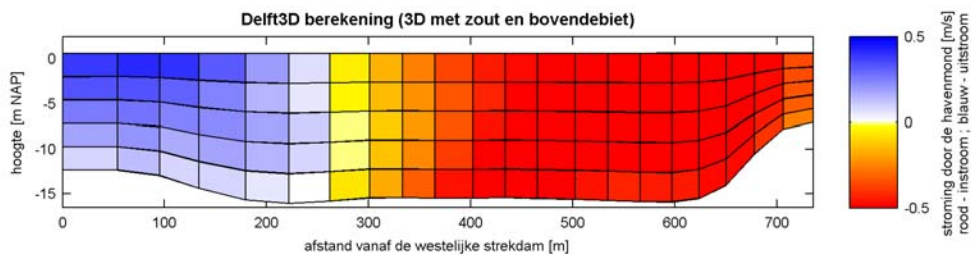
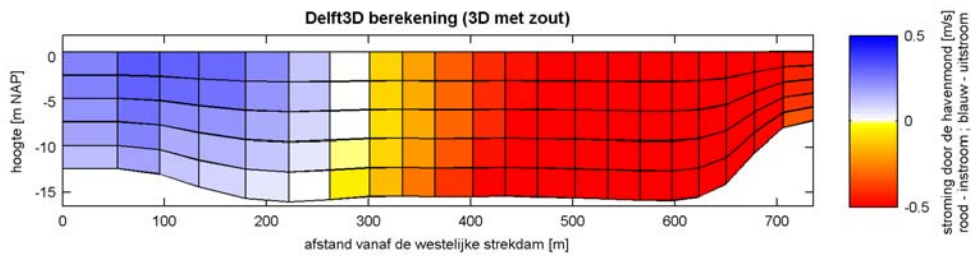
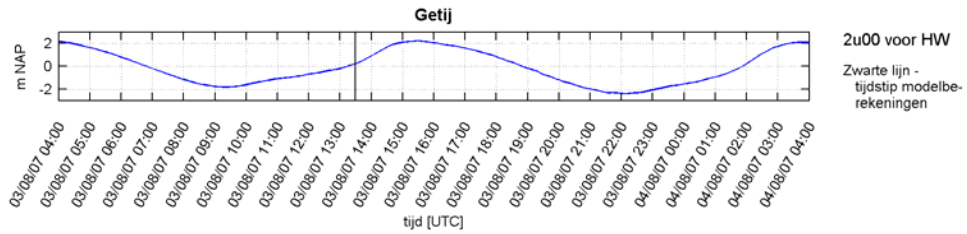
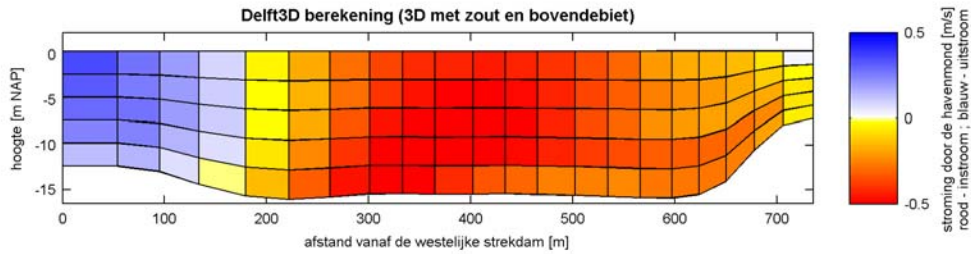
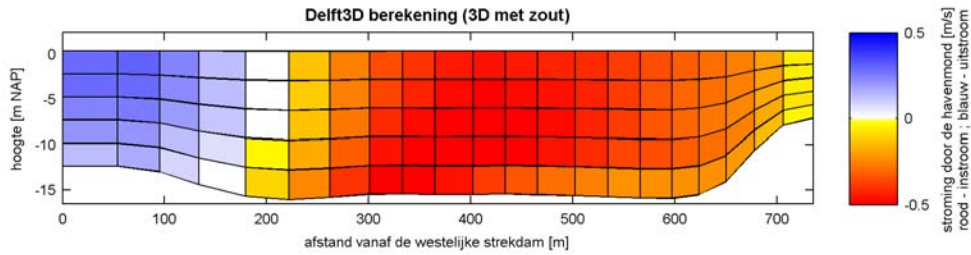


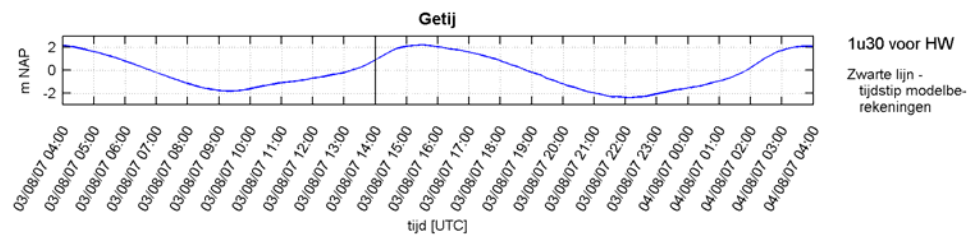
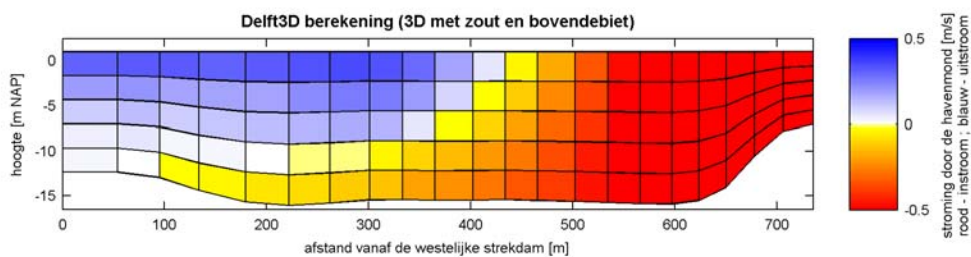
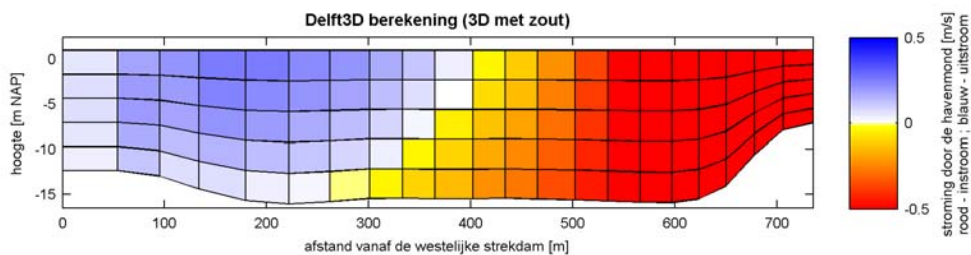
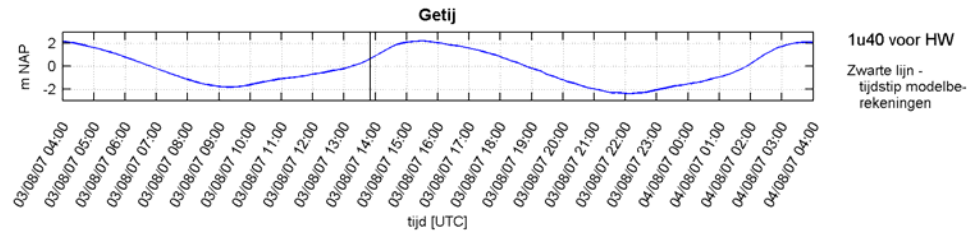
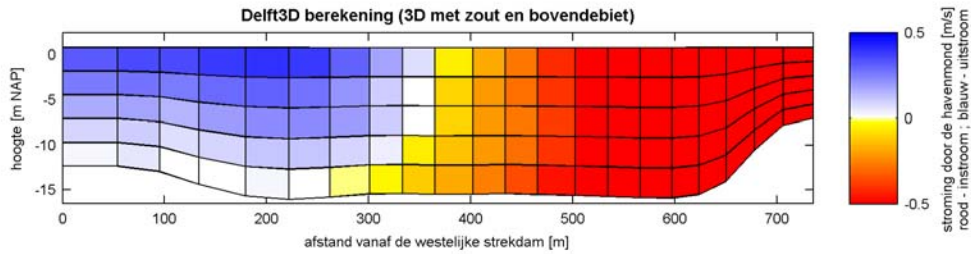
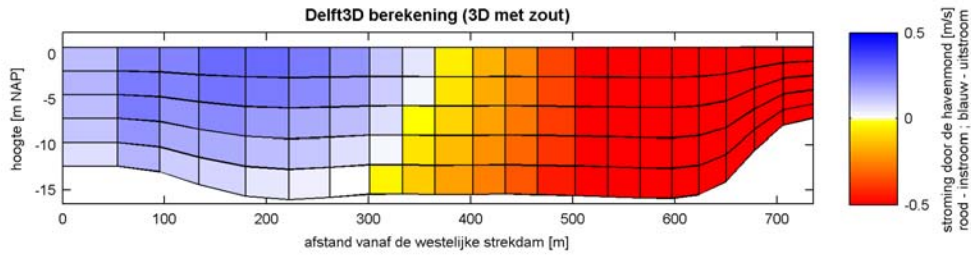


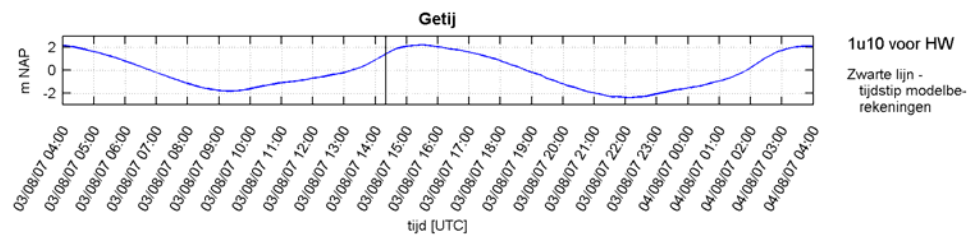
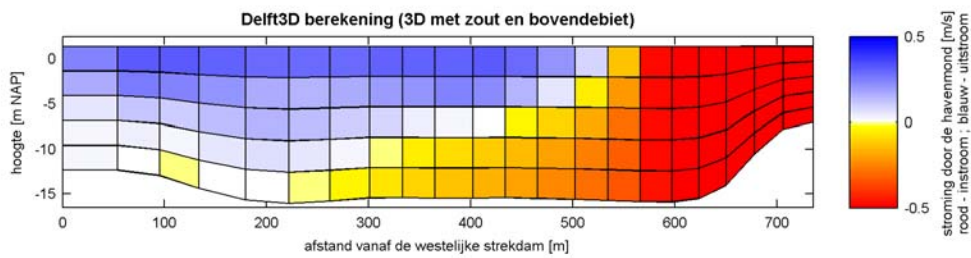
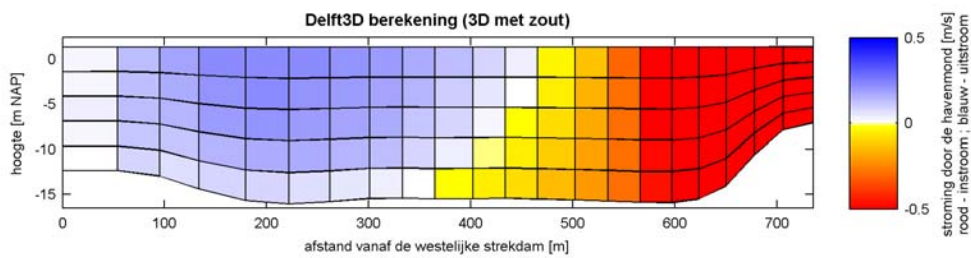
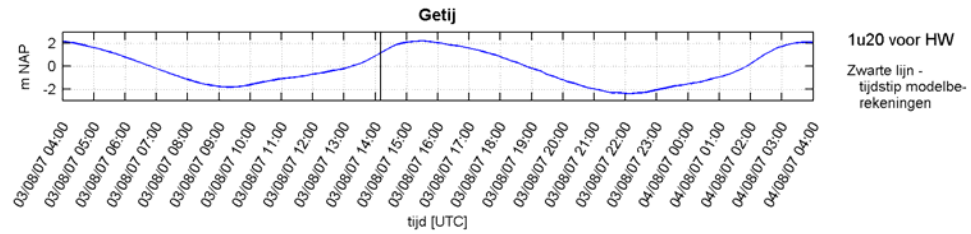
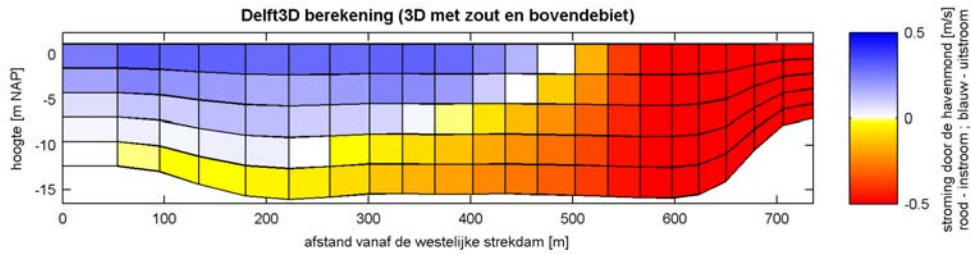
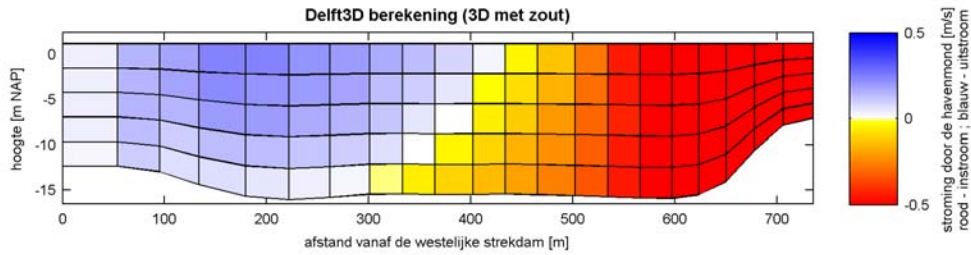


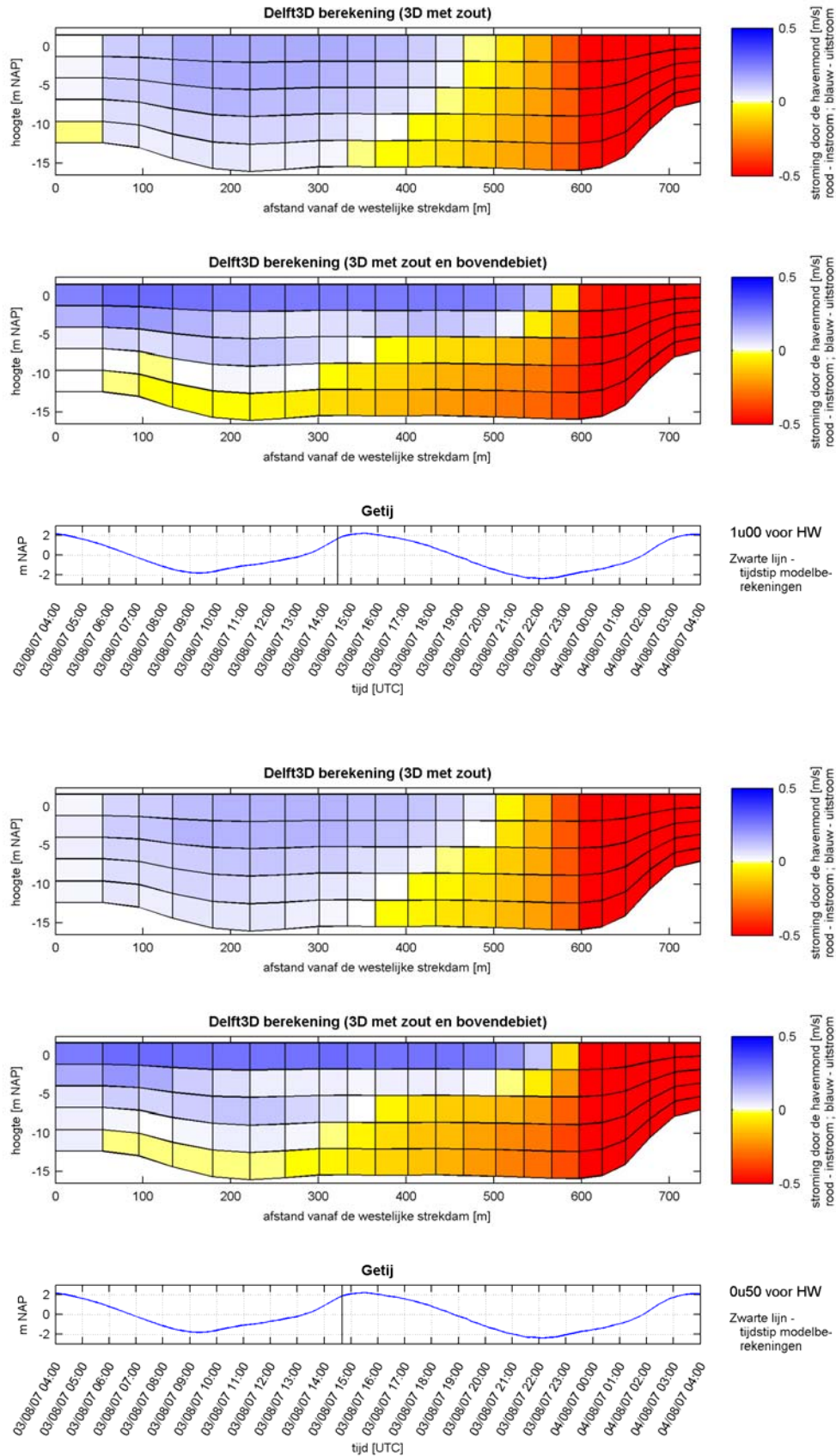


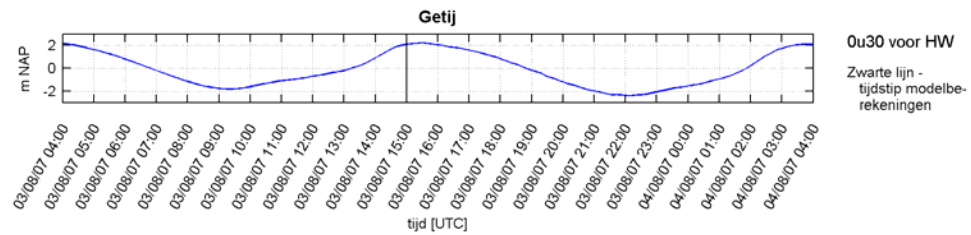
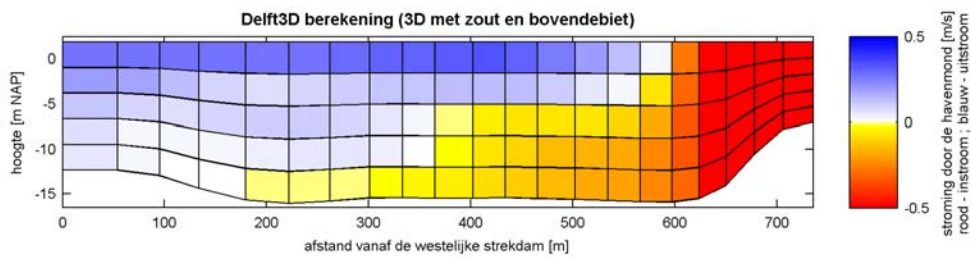
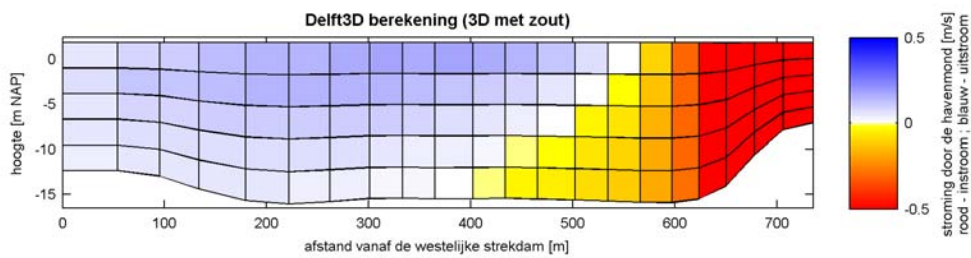
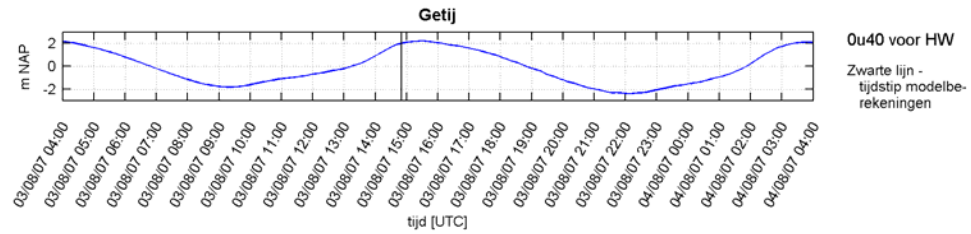
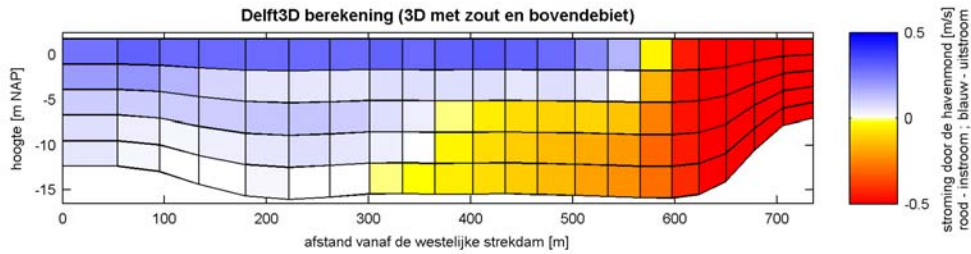
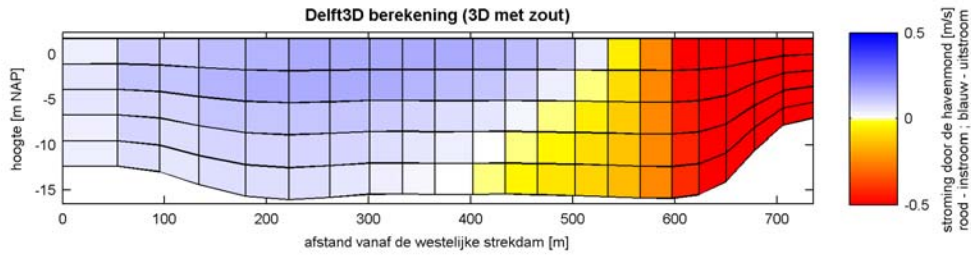


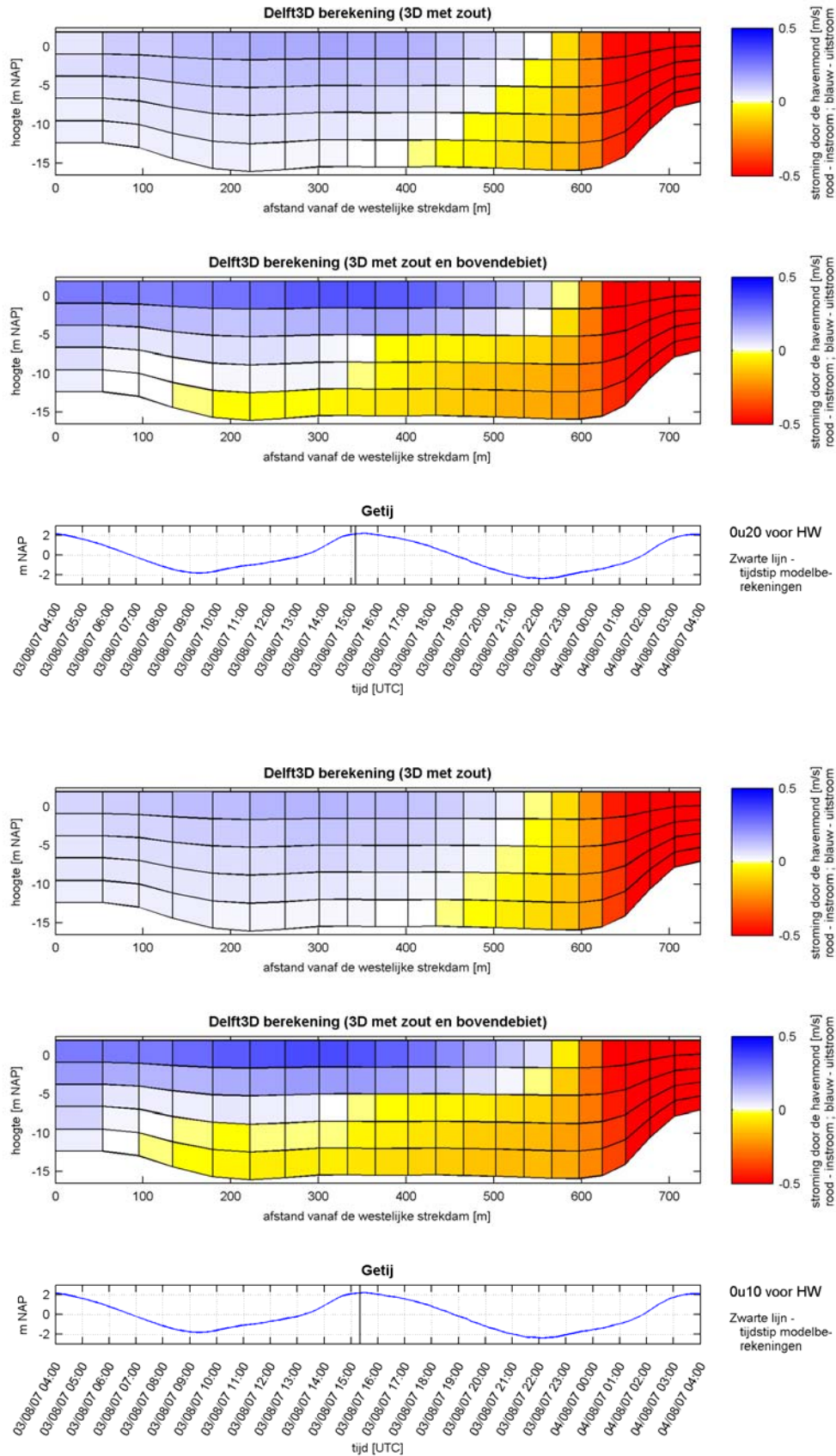


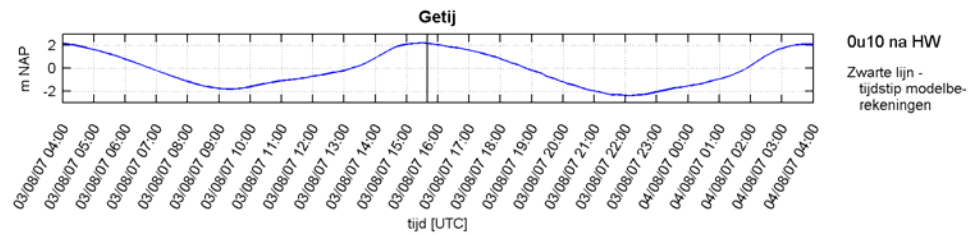
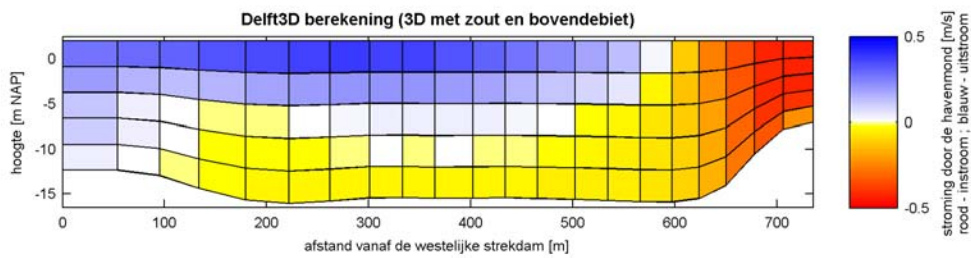
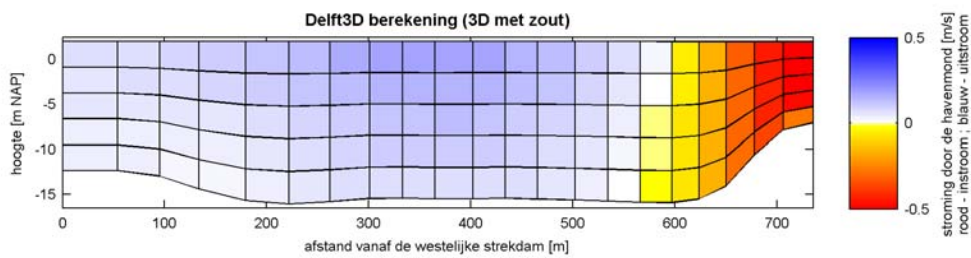
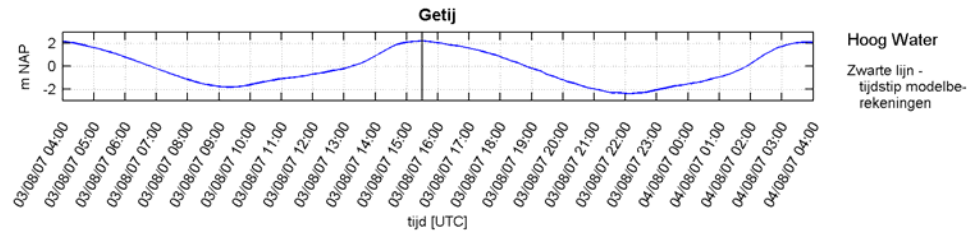
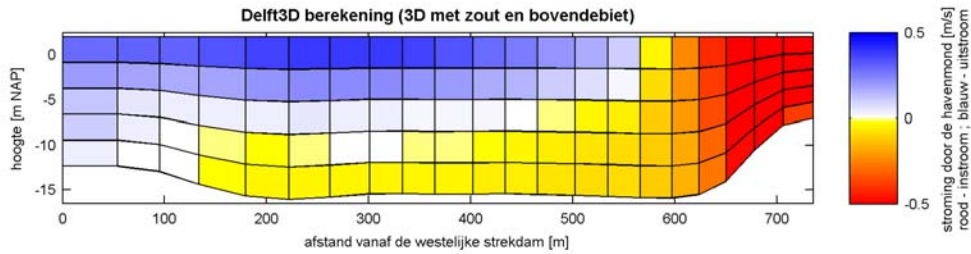
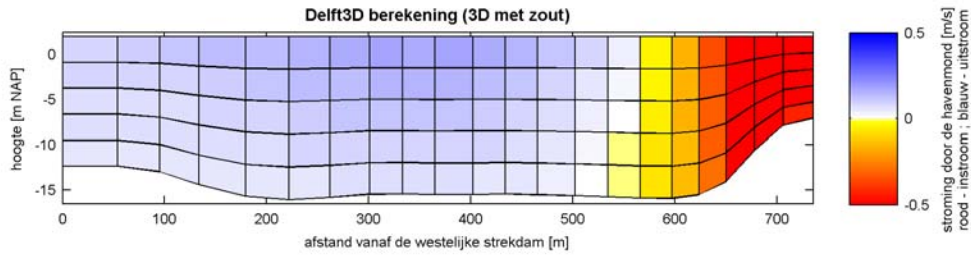


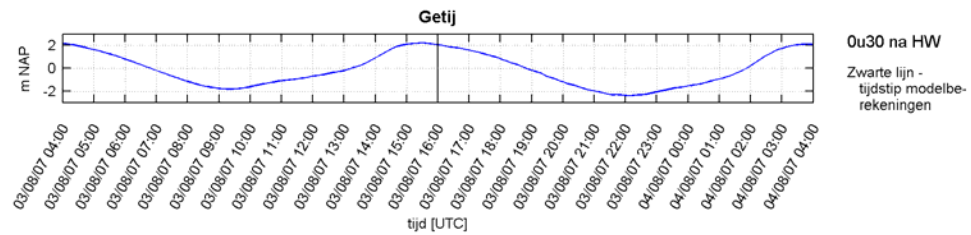
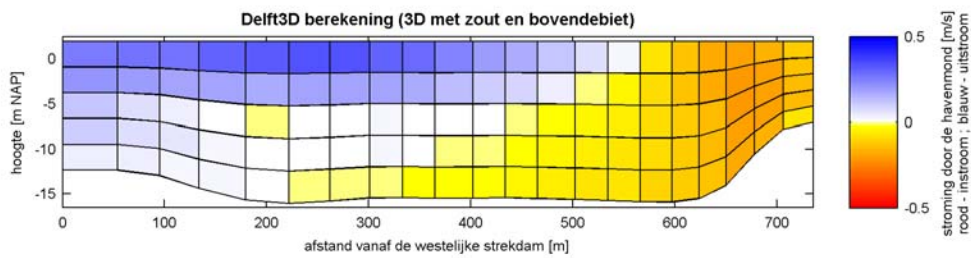
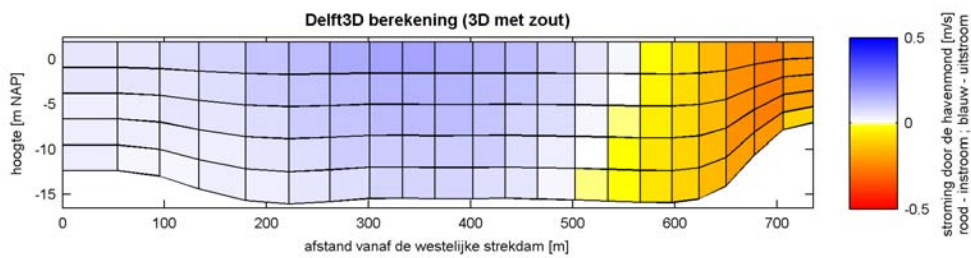
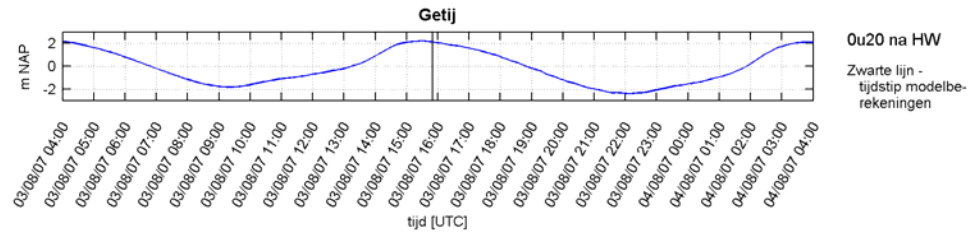
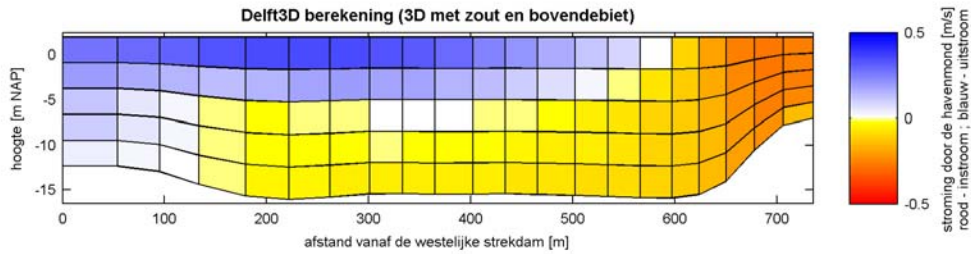
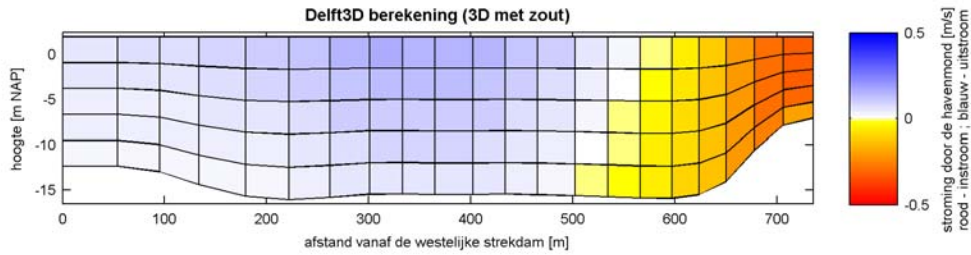


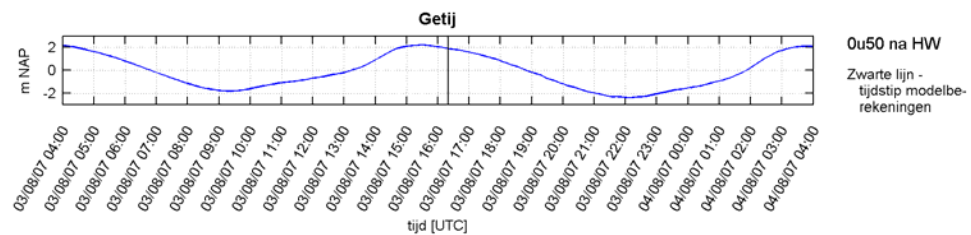
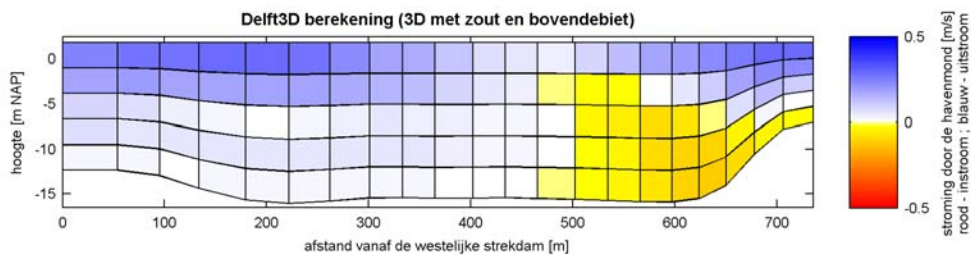
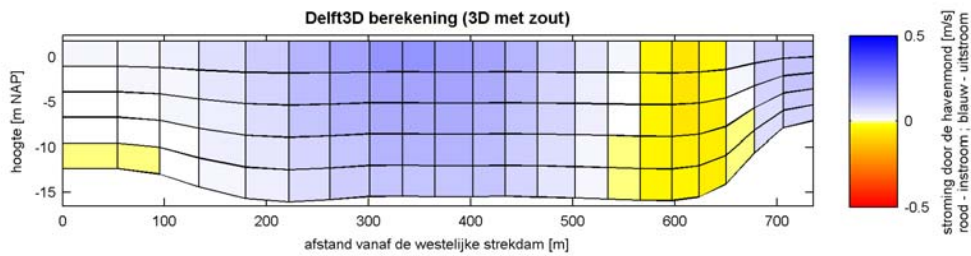
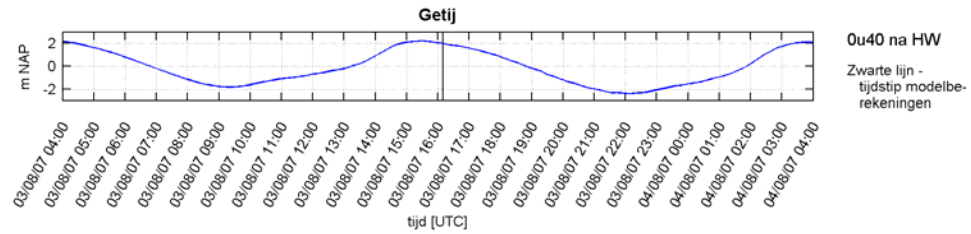
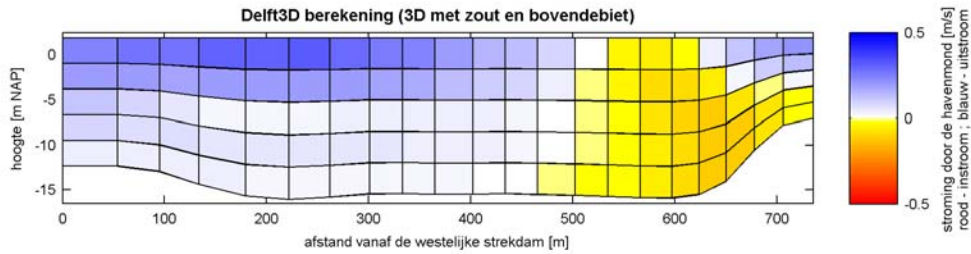
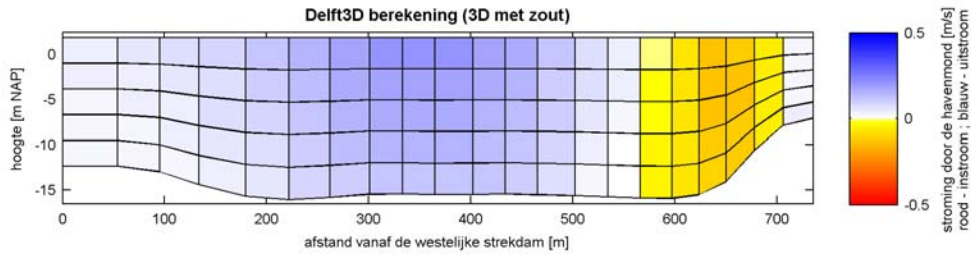


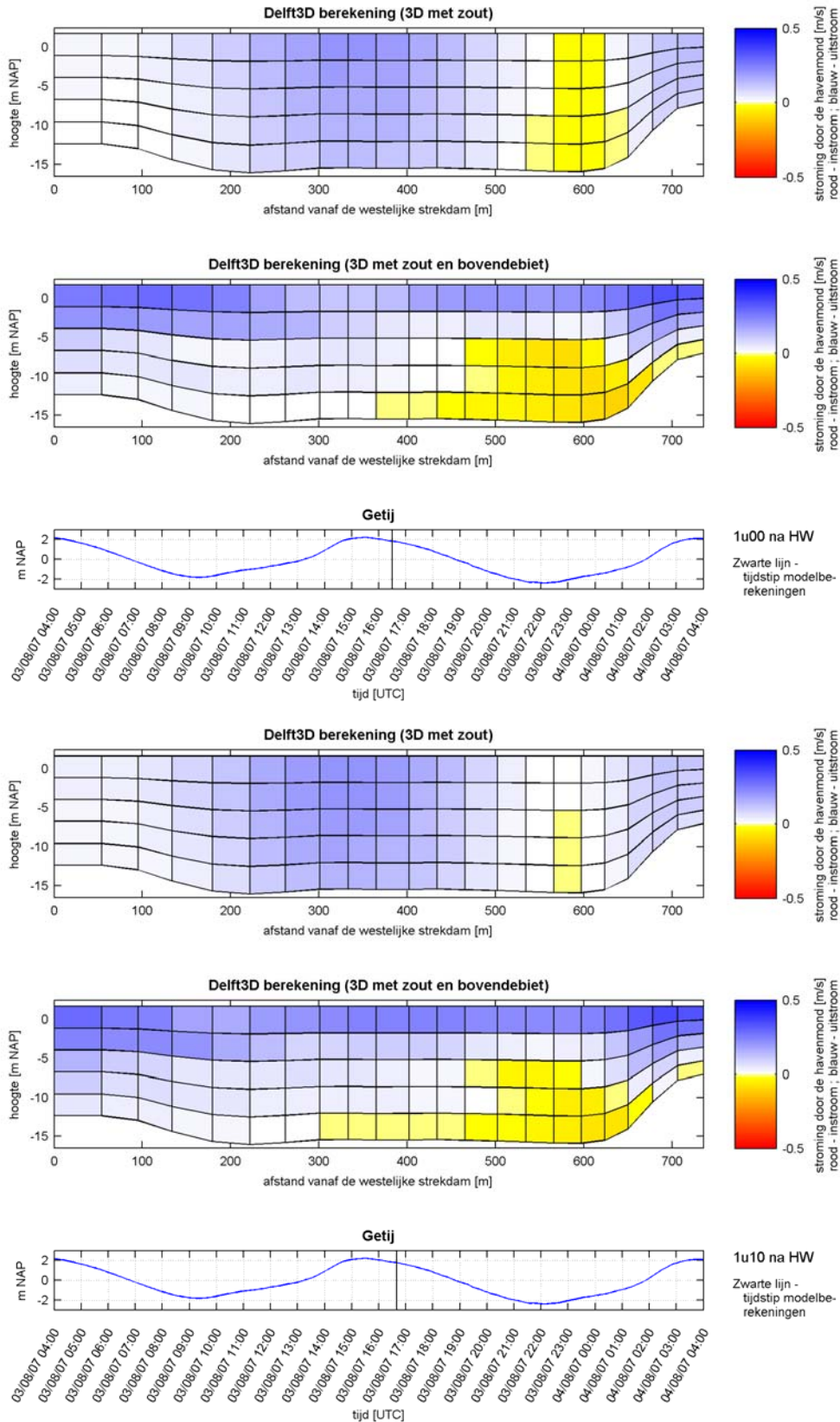


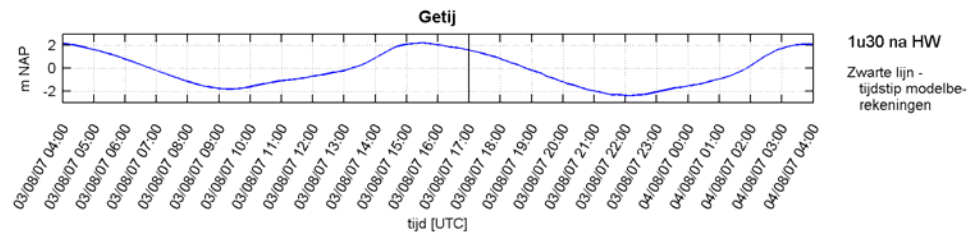
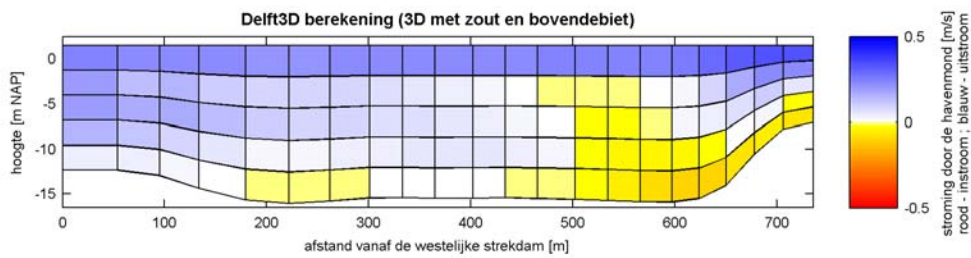
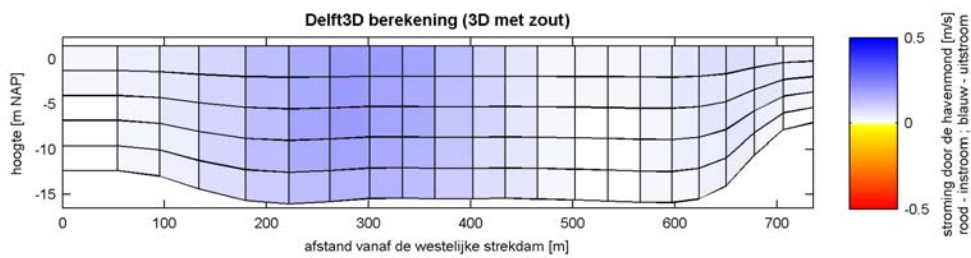
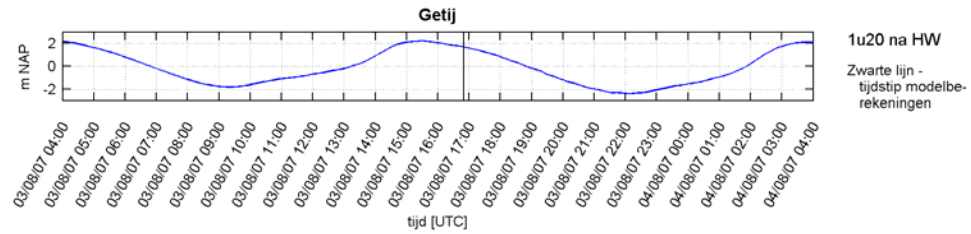
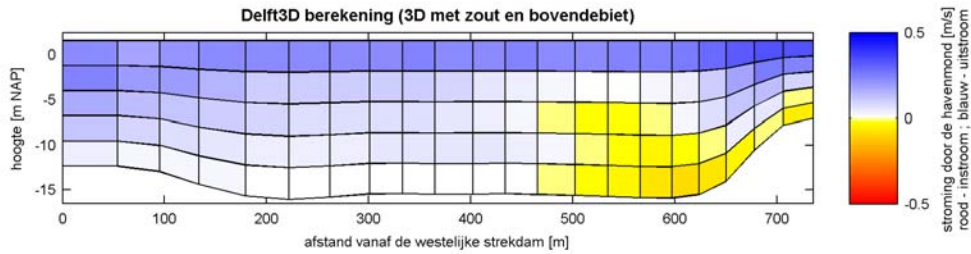
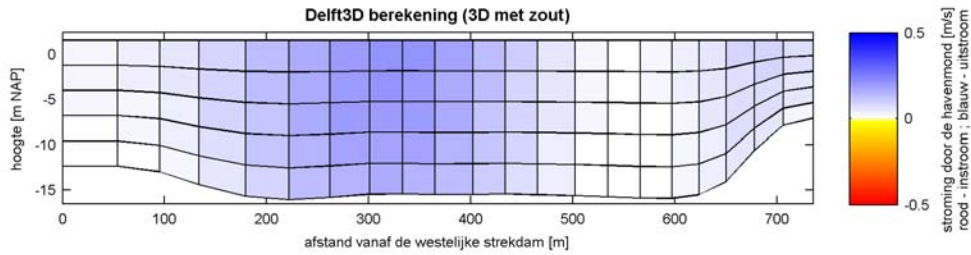


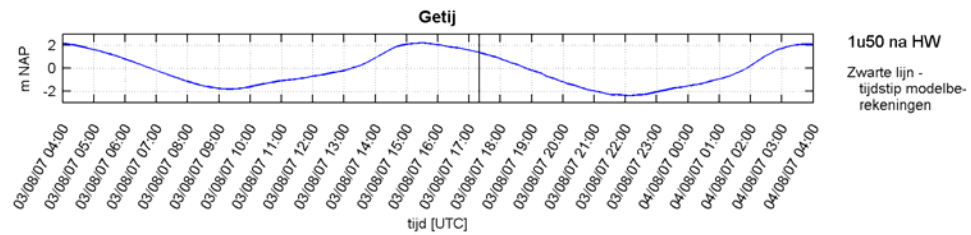
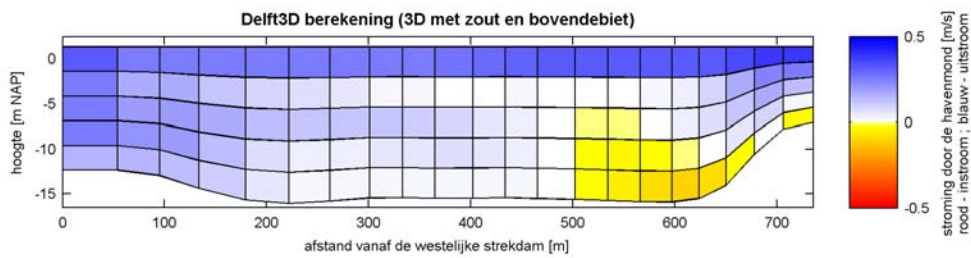
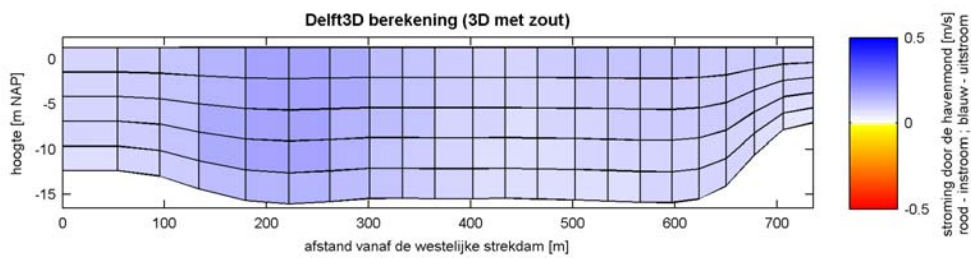
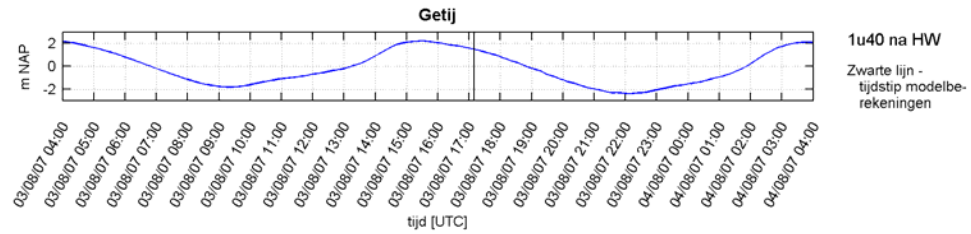
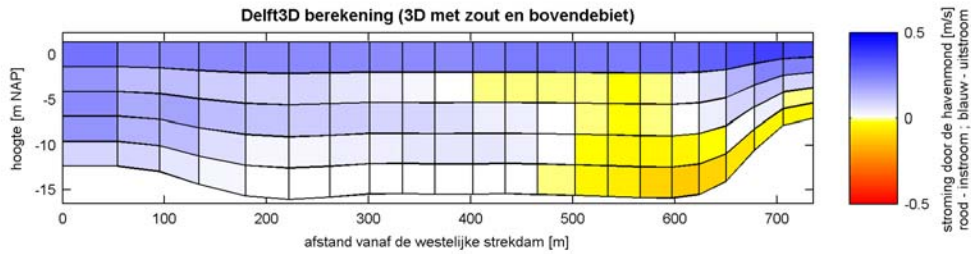
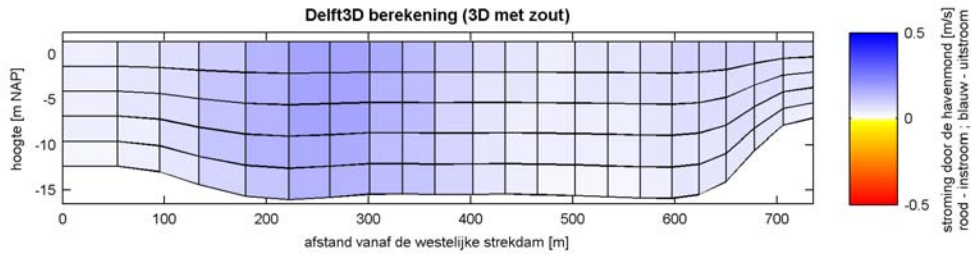


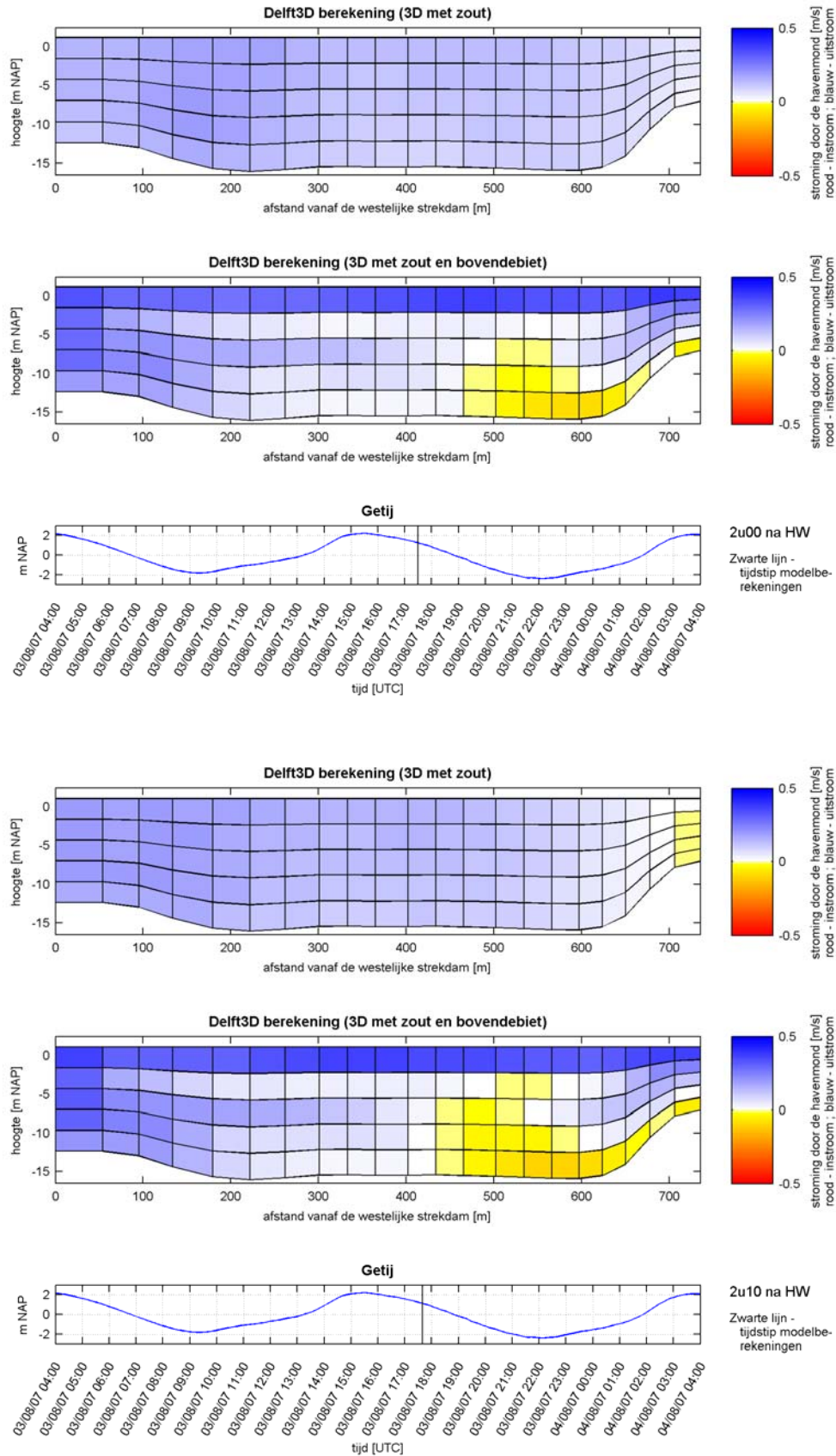


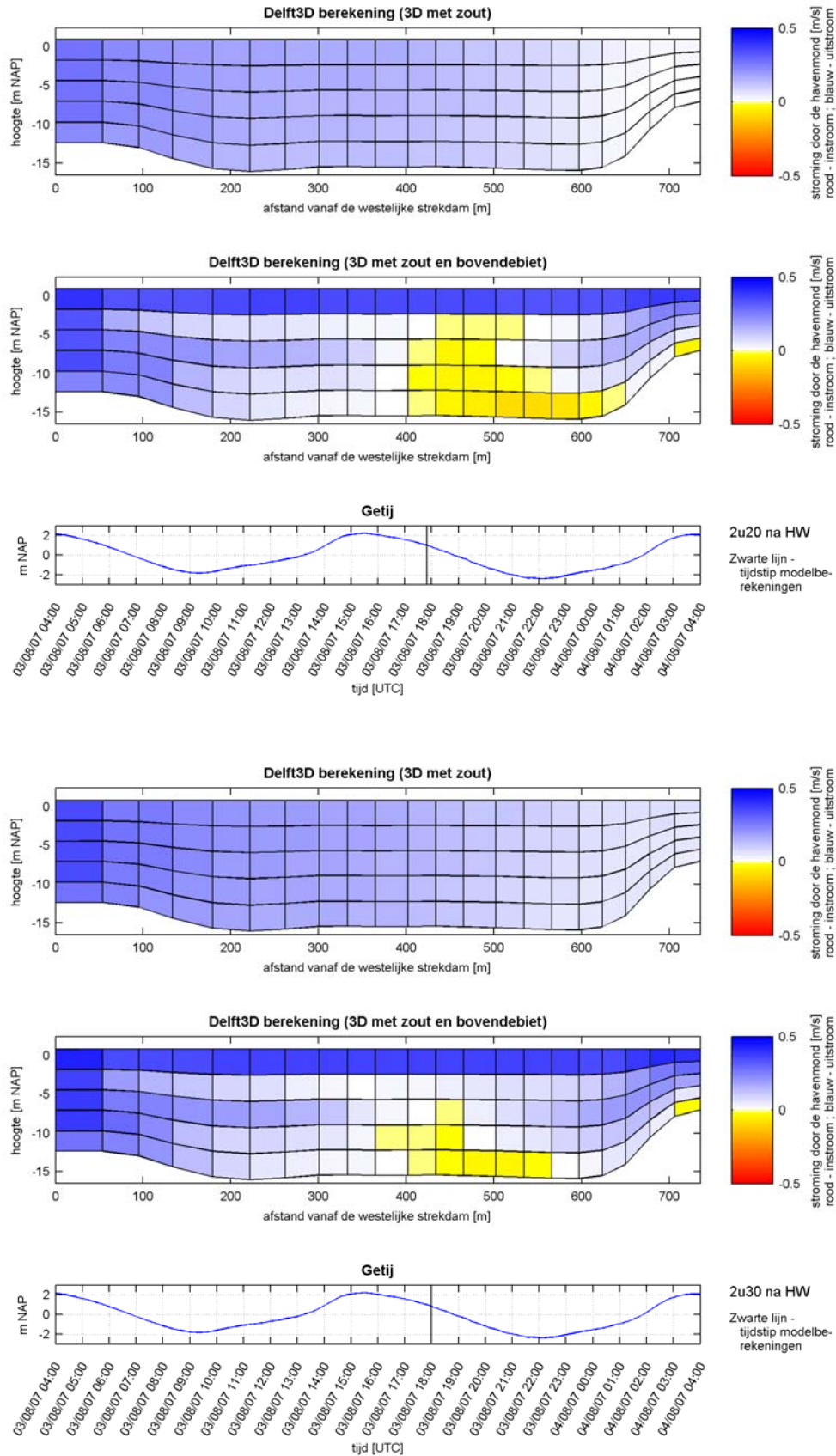


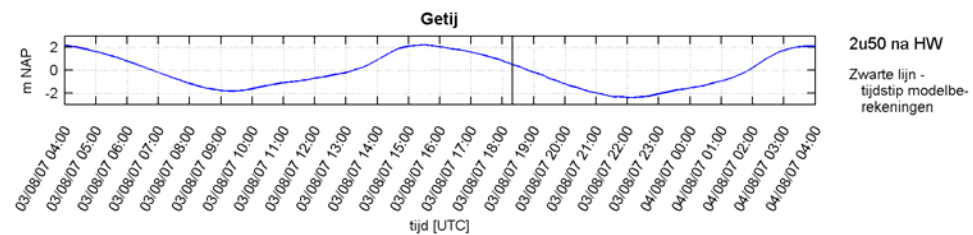
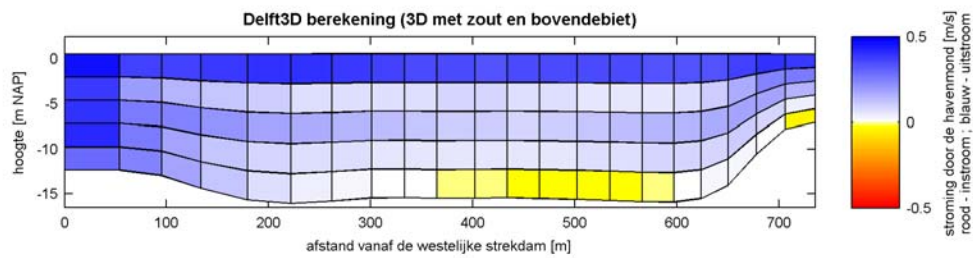
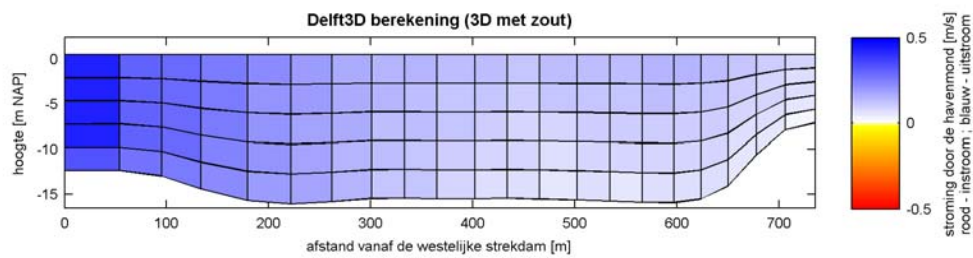
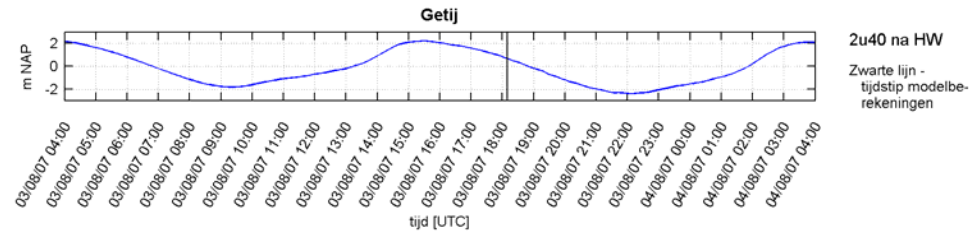
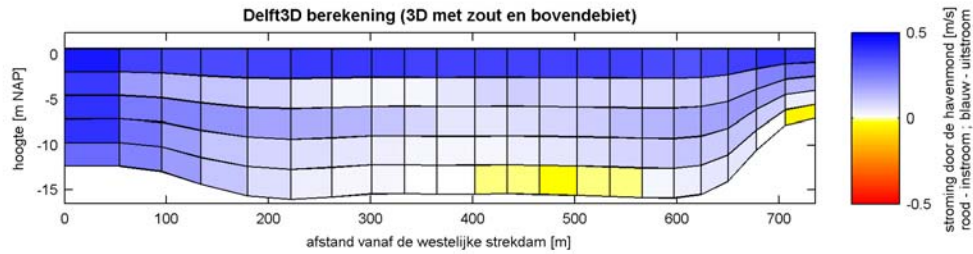
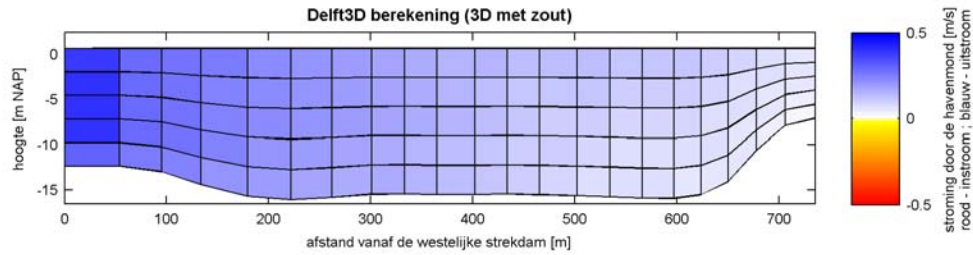


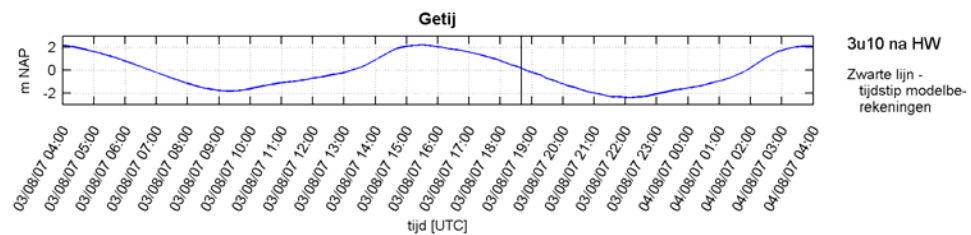
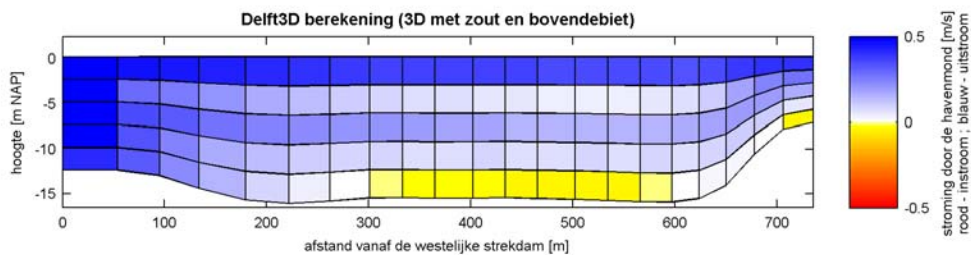
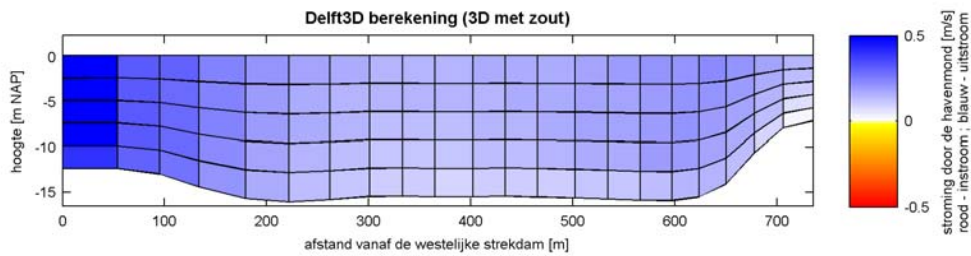
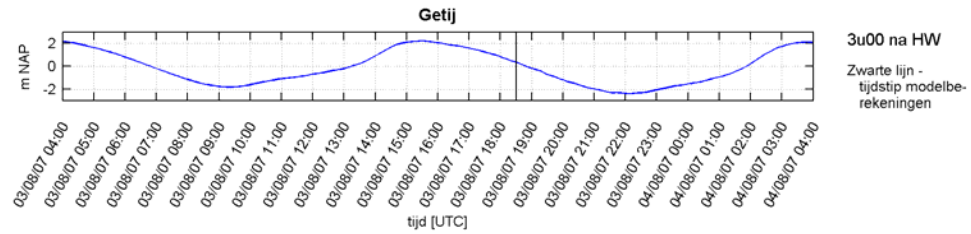
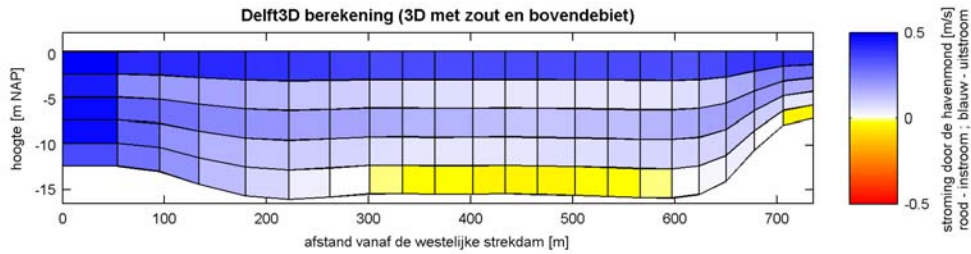
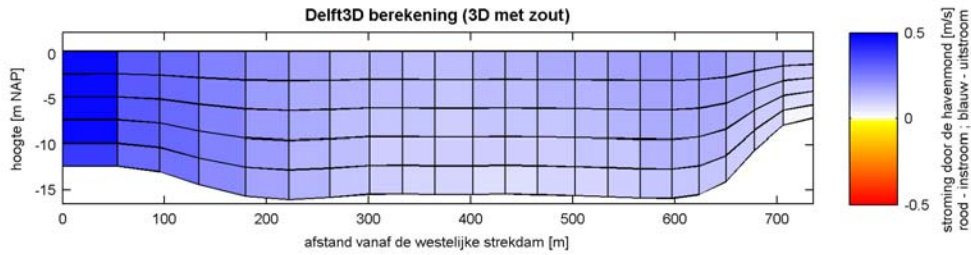


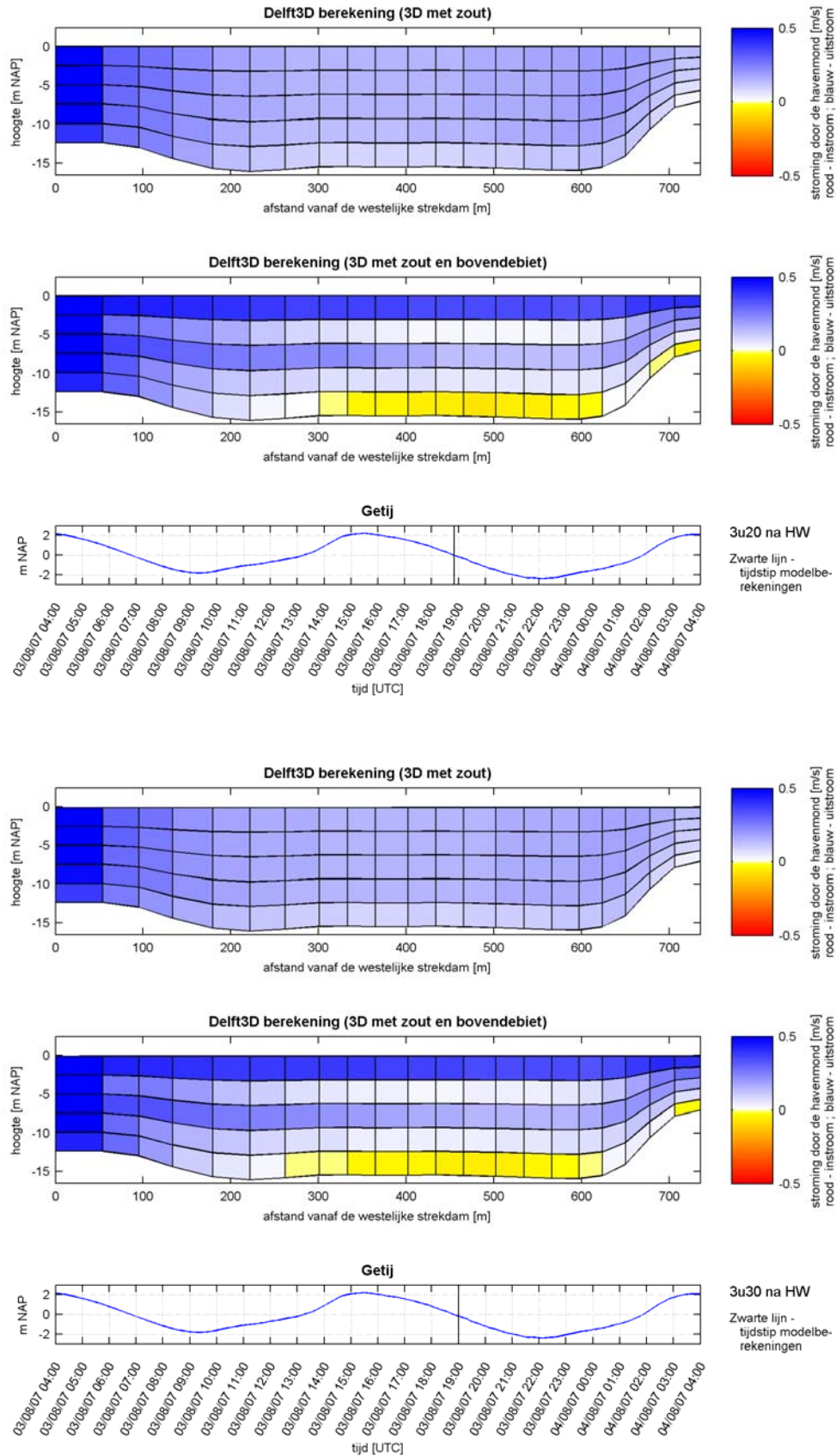




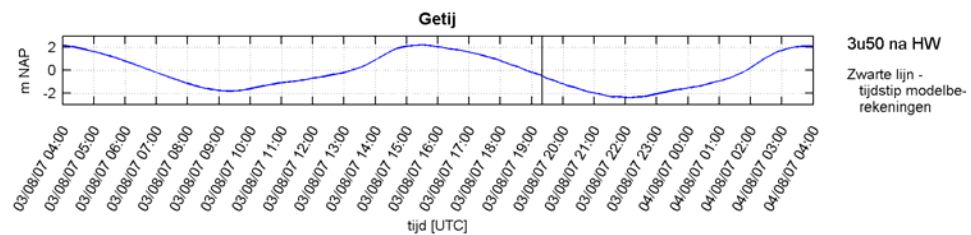
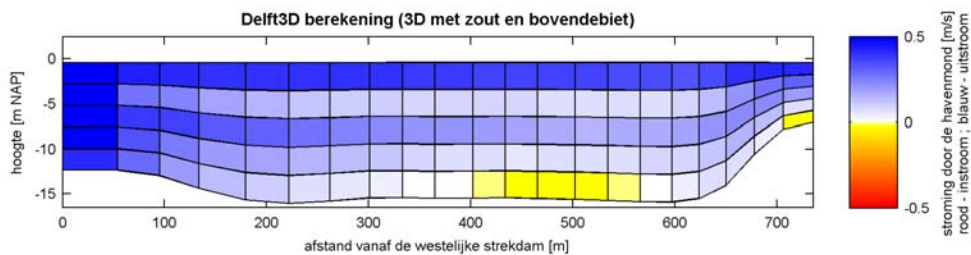
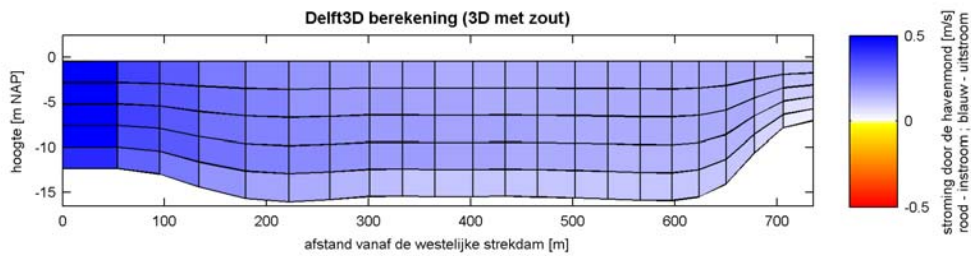
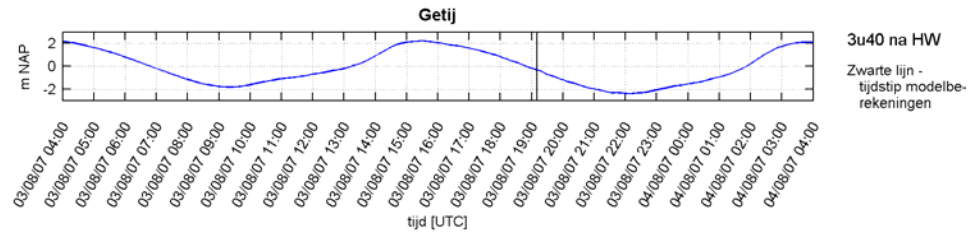
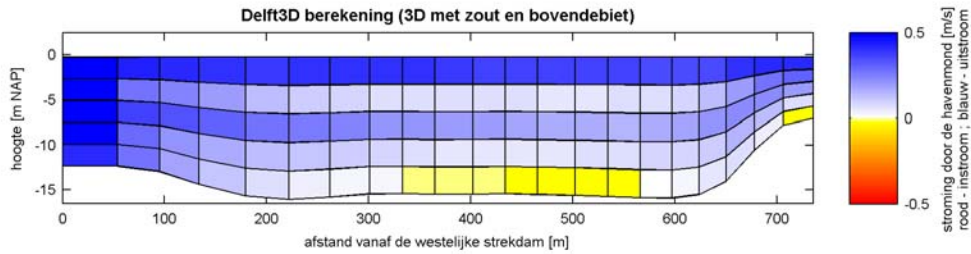
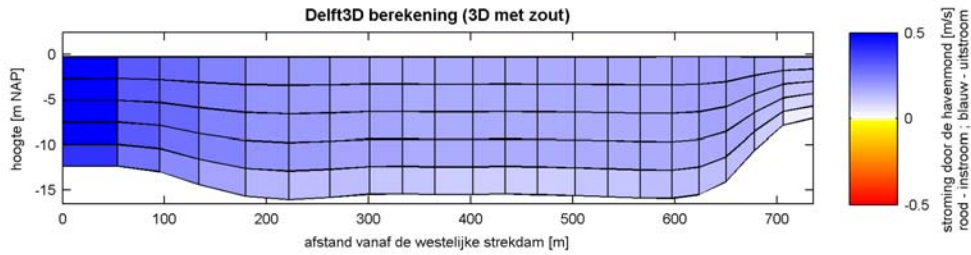


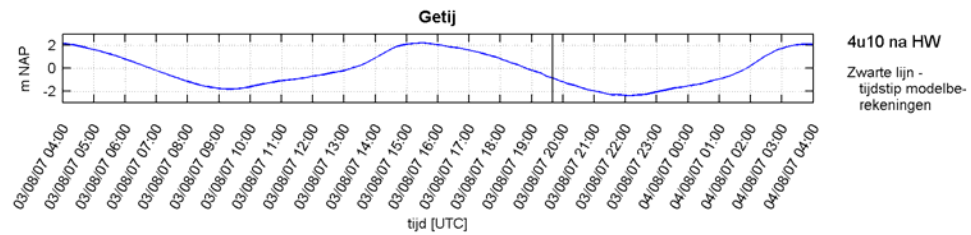
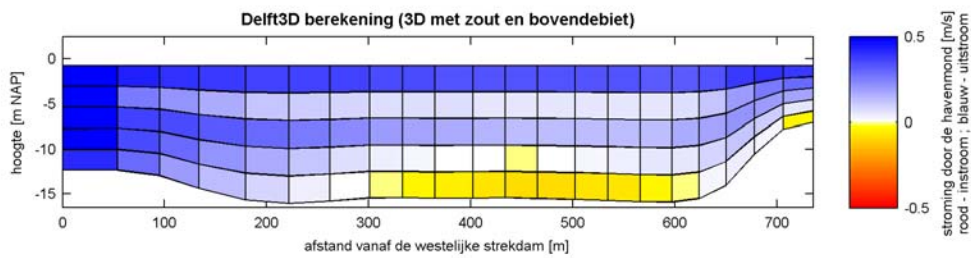
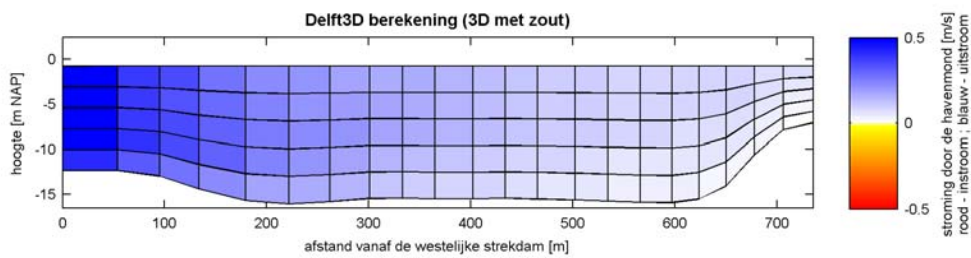
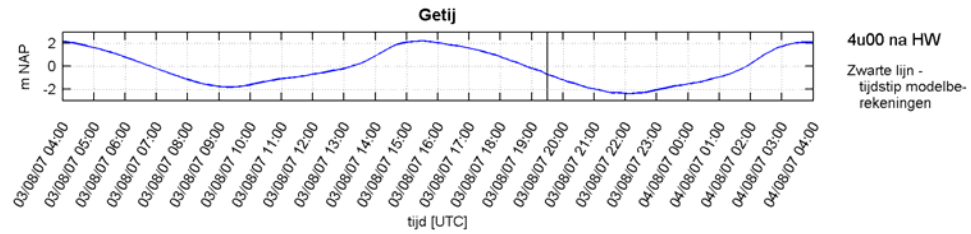
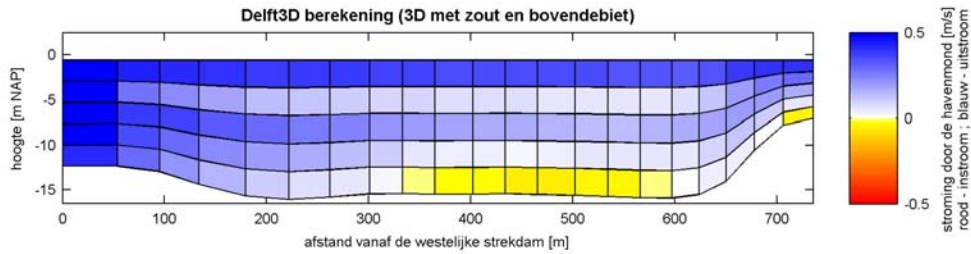
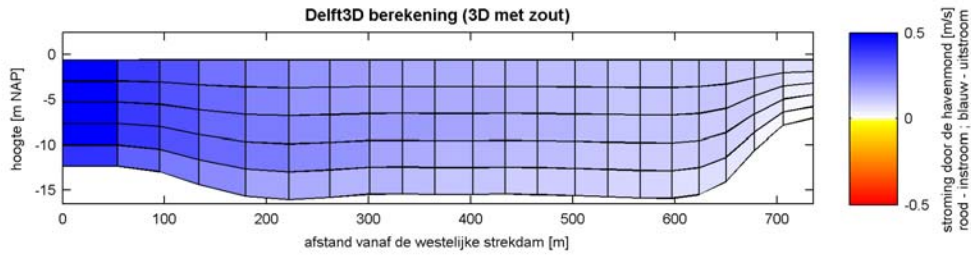


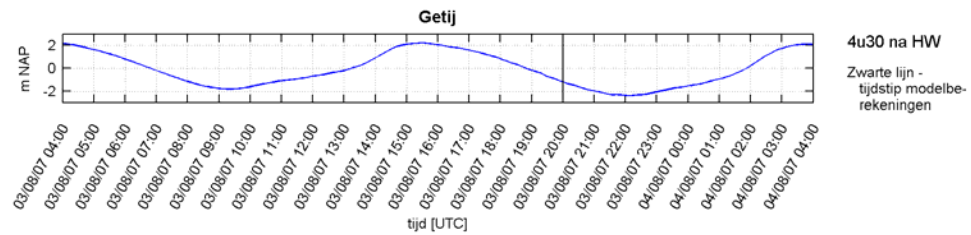
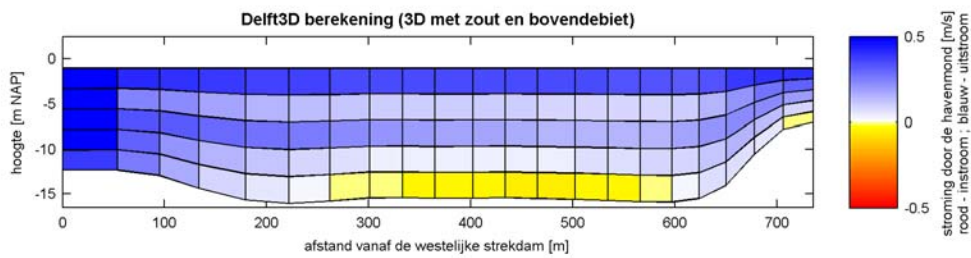
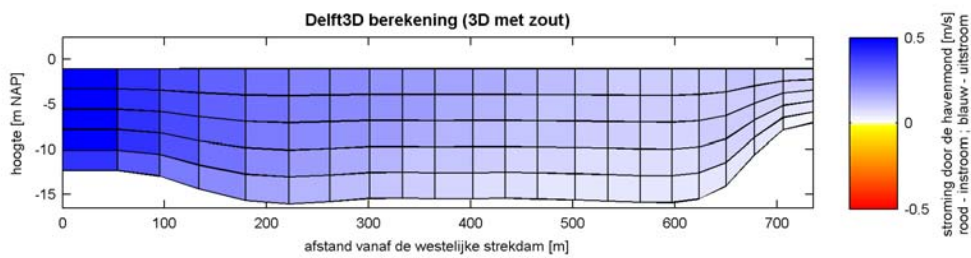
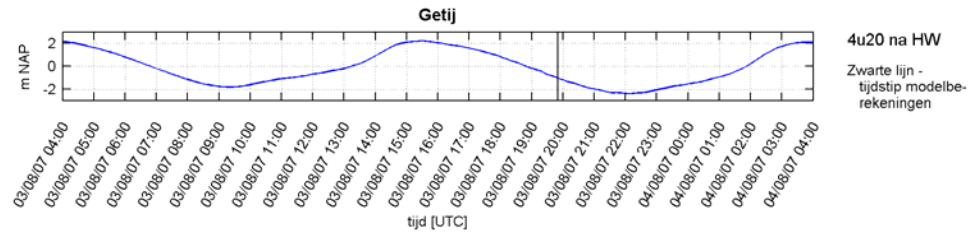
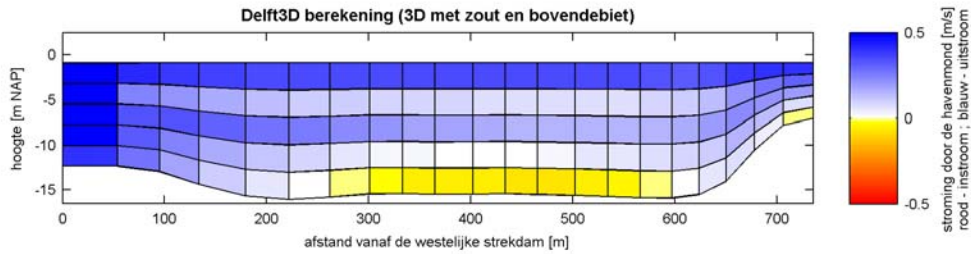
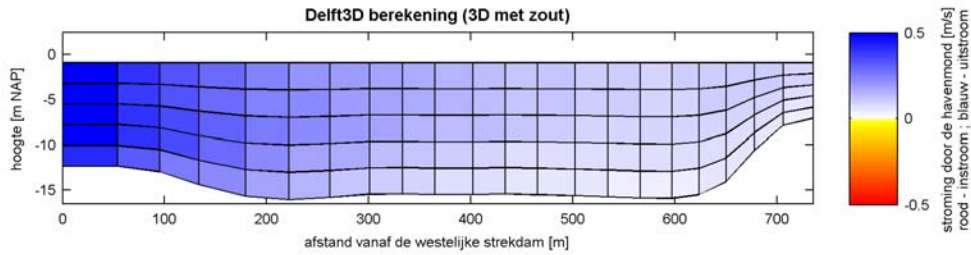


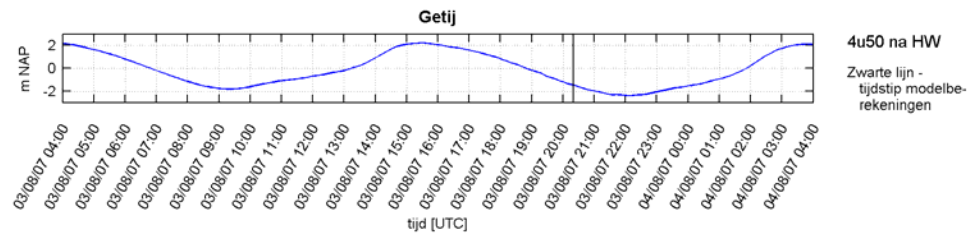
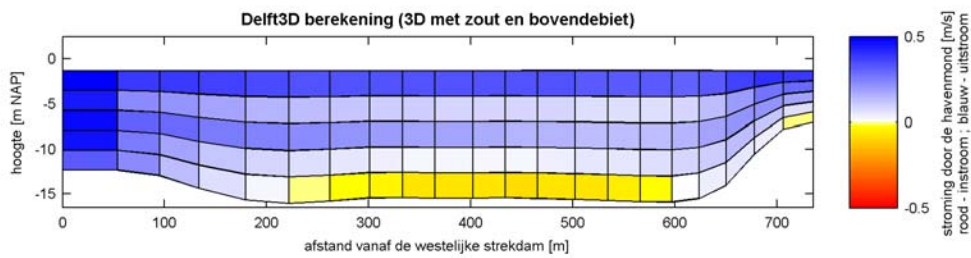
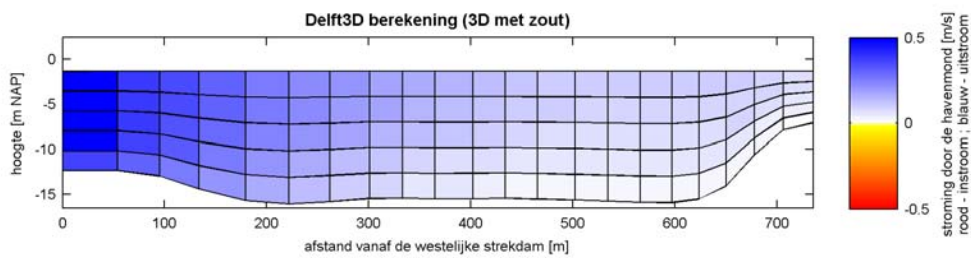
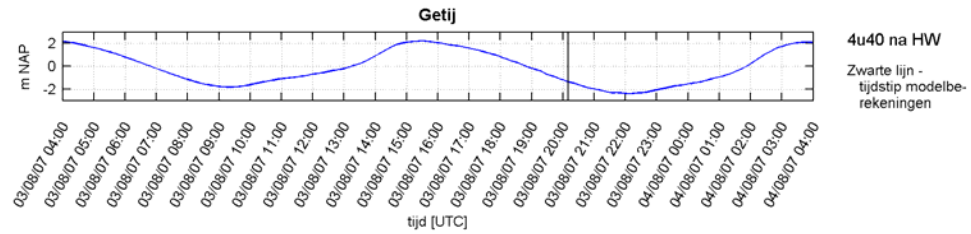
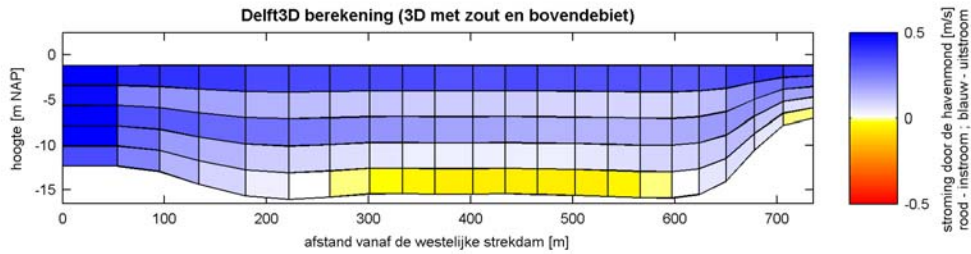
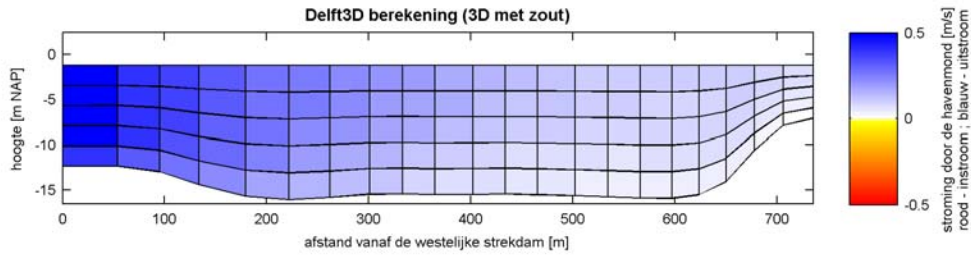


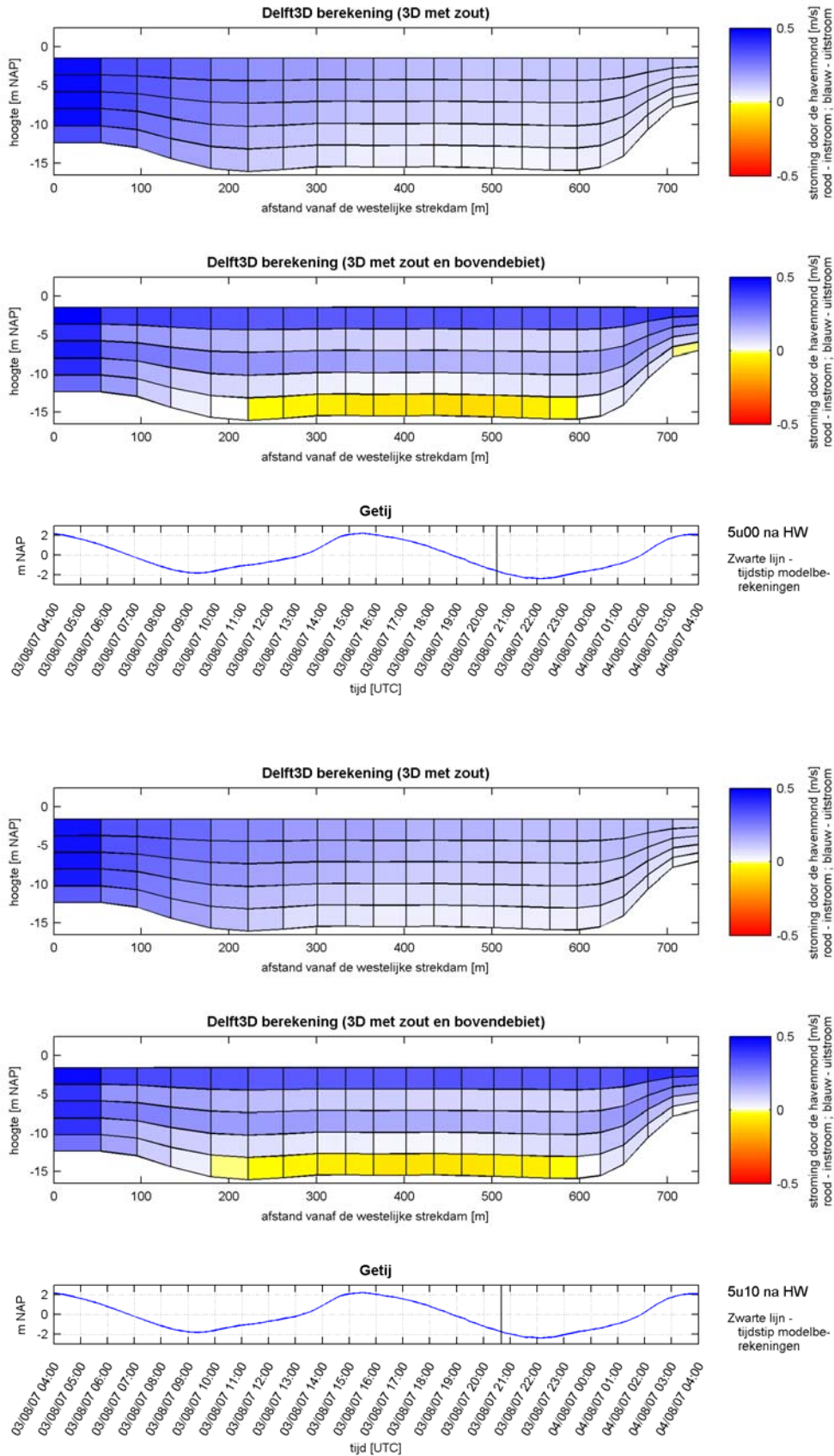
Haven van Zeebrugge – Optimalisatie maritieme toegankelijkheid:
 Onderzoek naar de water- en sedimentuitwisseling ter hoogte van de havenmond

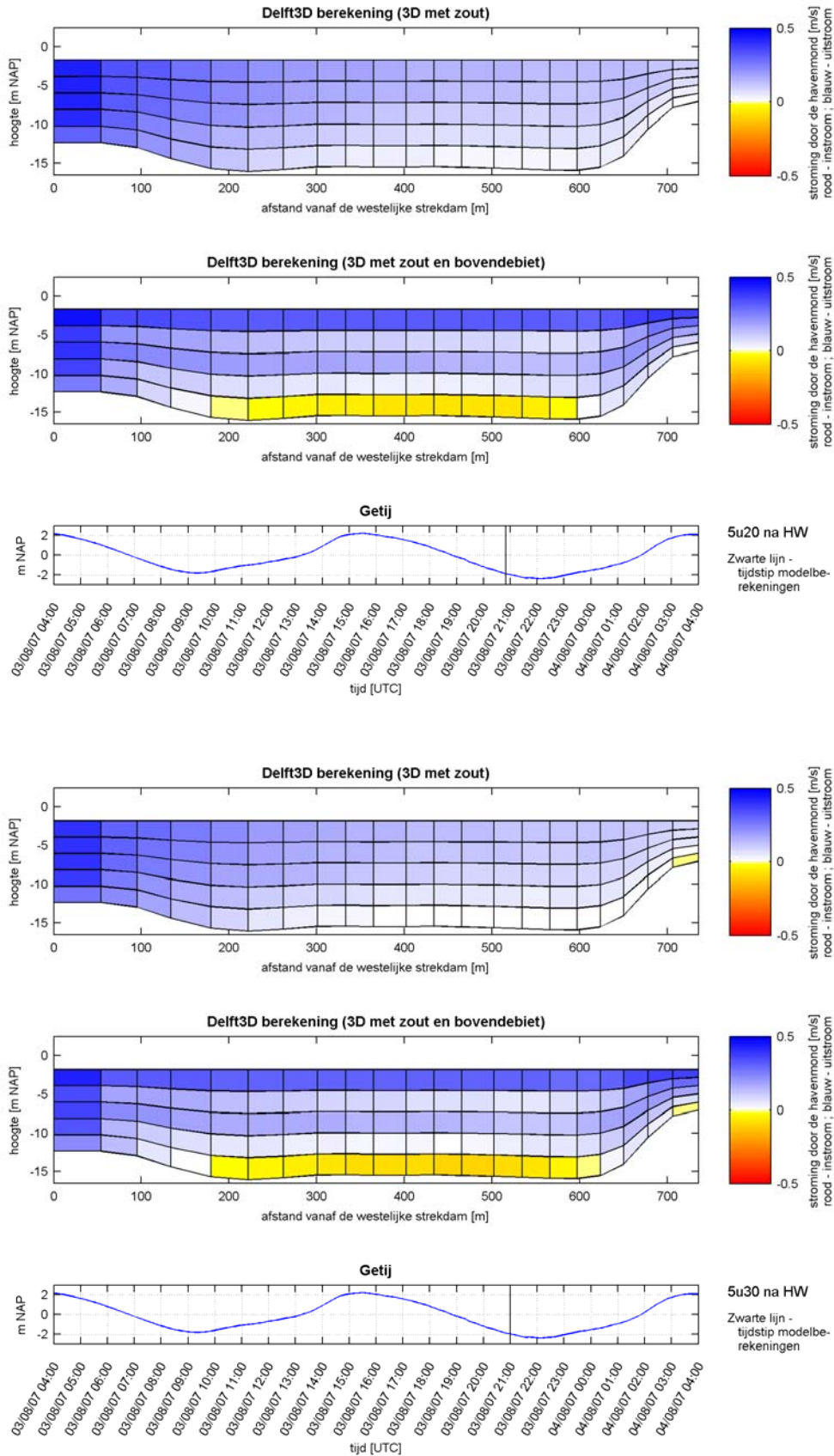


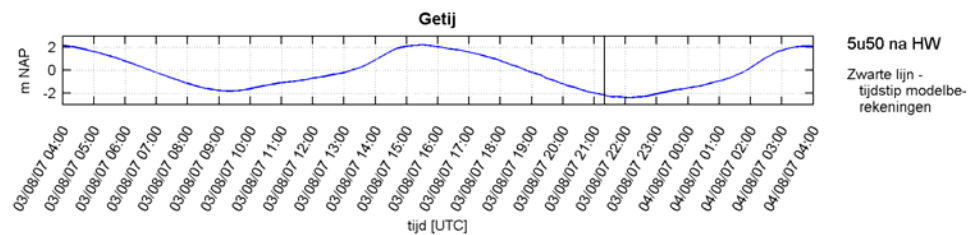
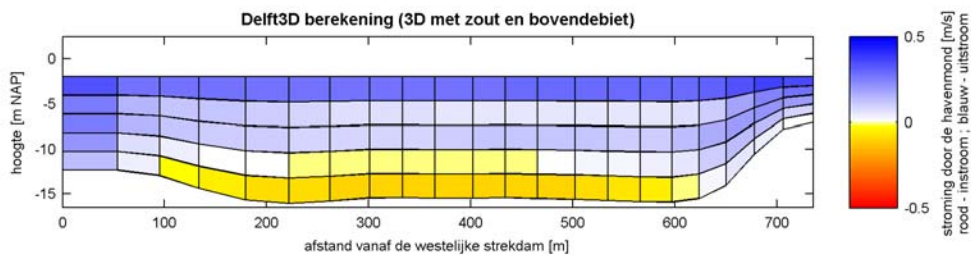
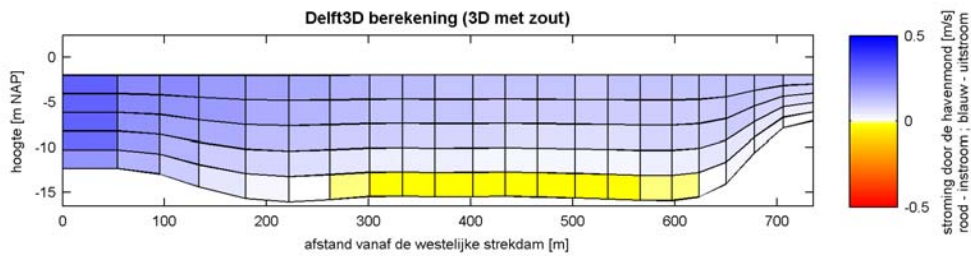
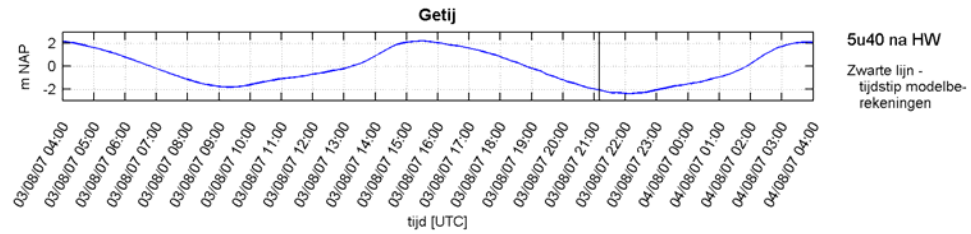
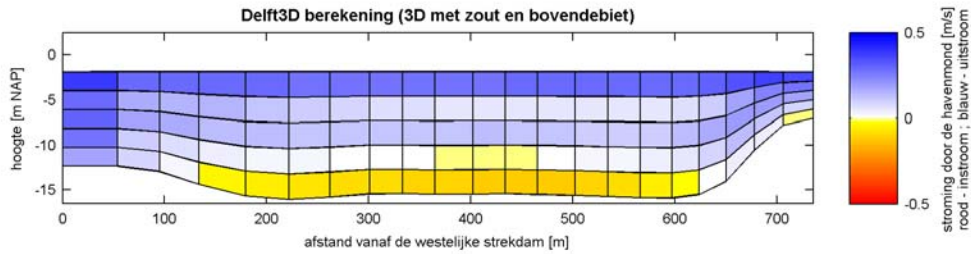
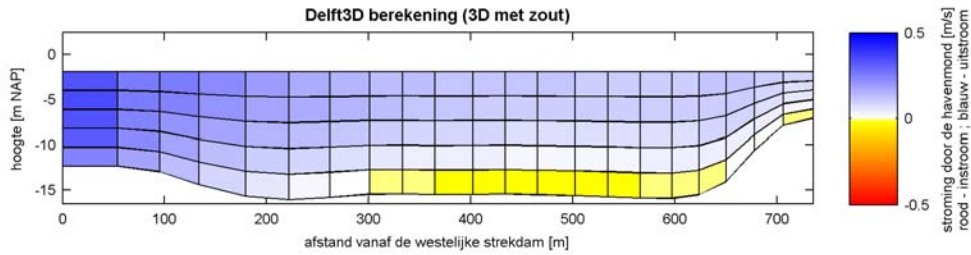


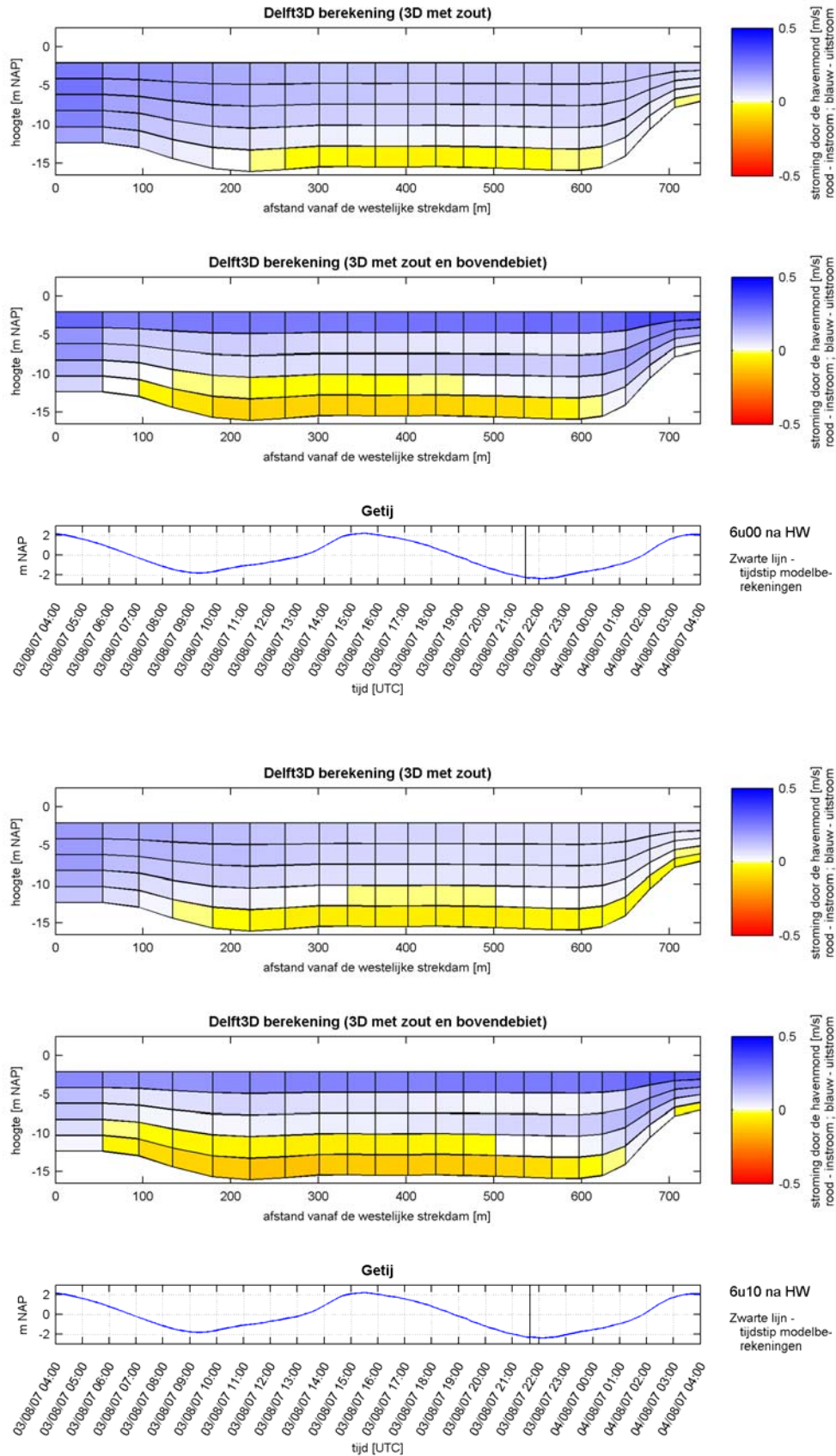


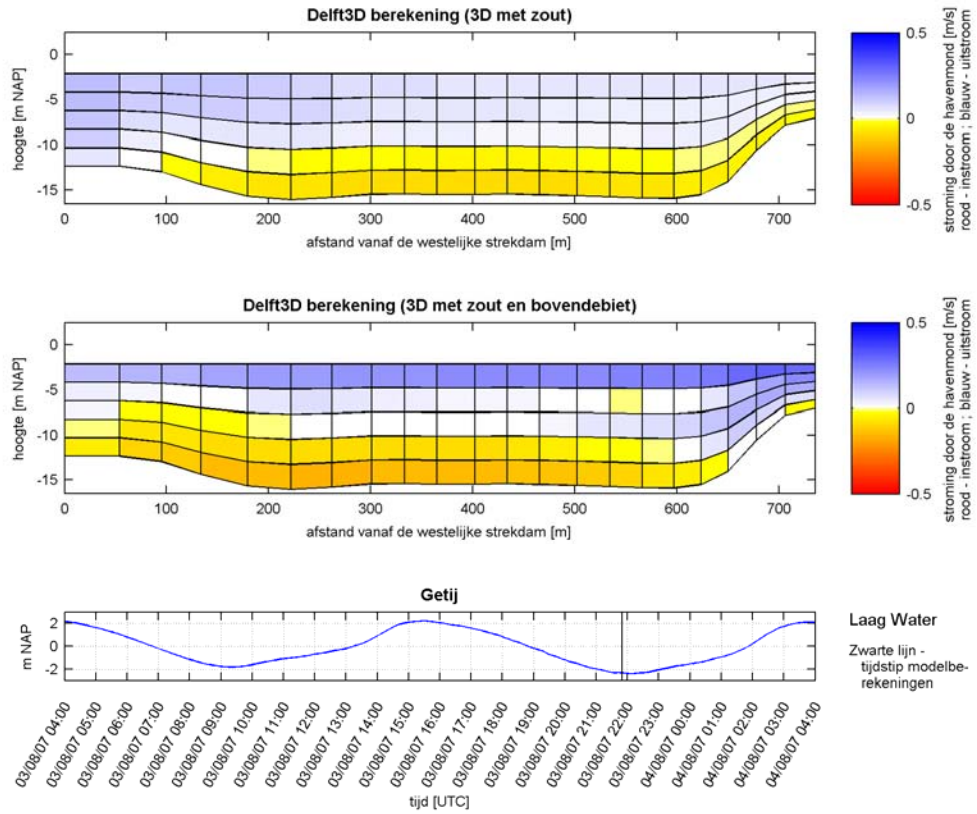








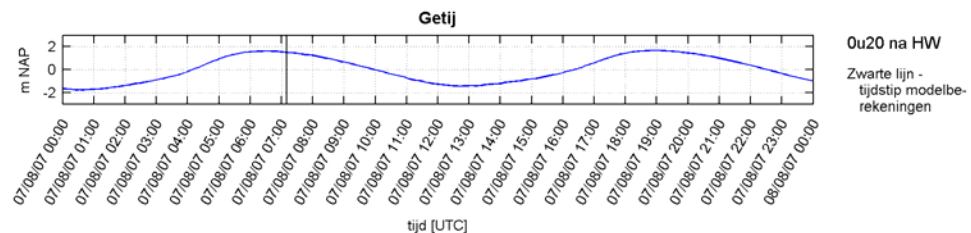
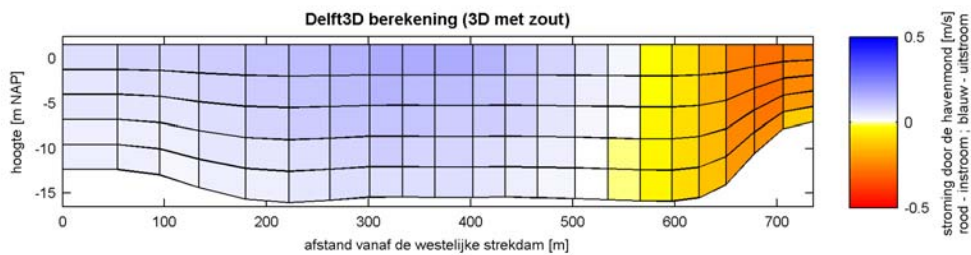
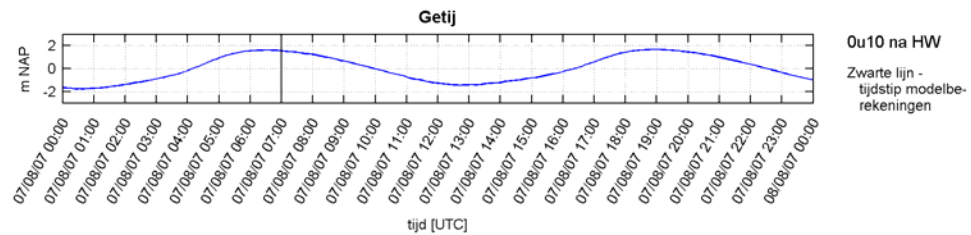
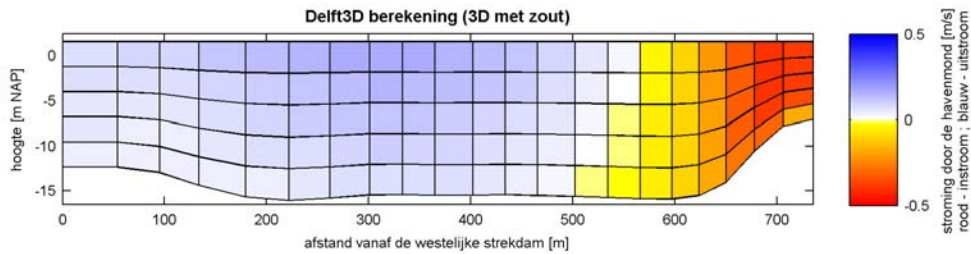
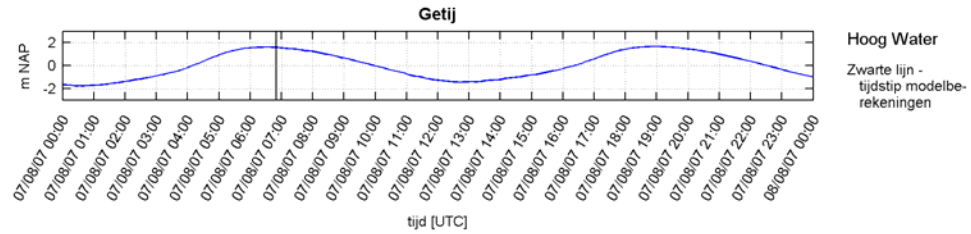
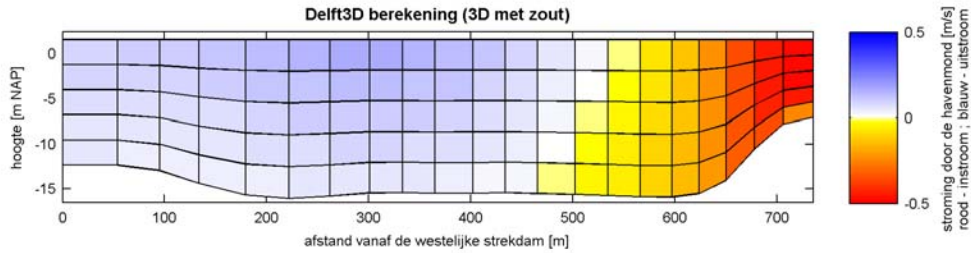


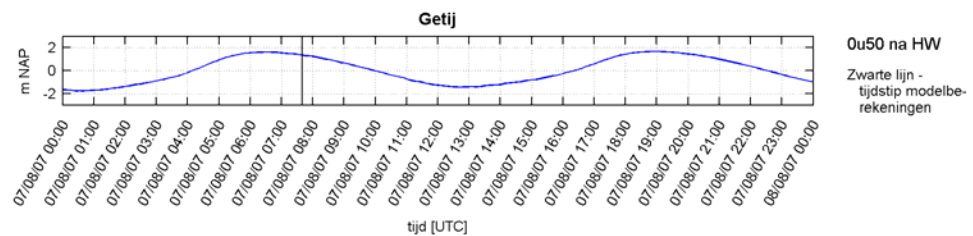
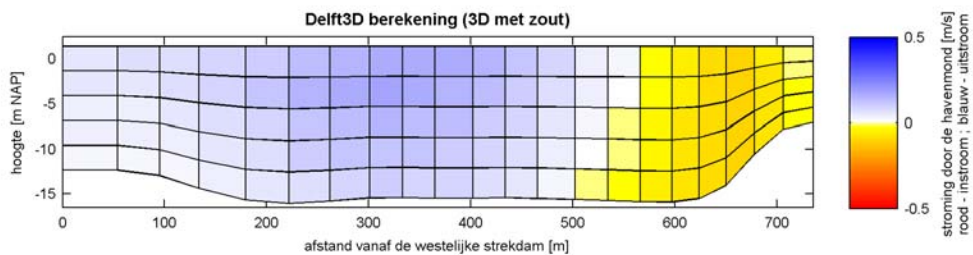
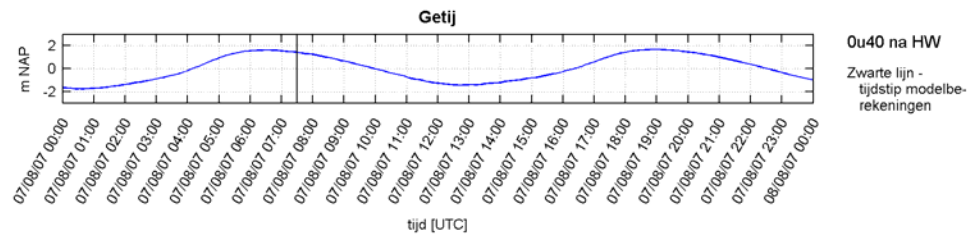
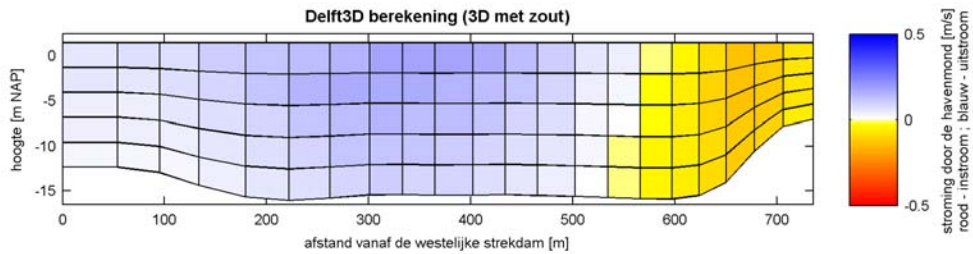
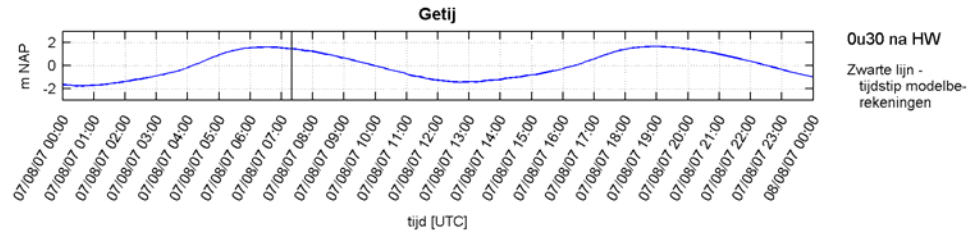
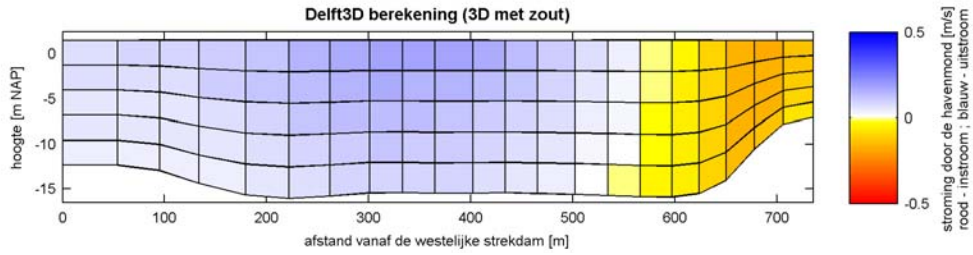


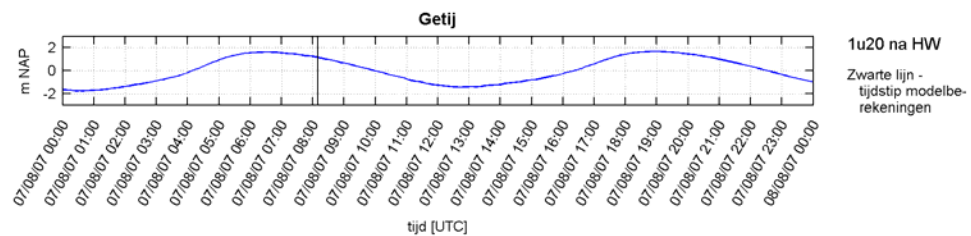
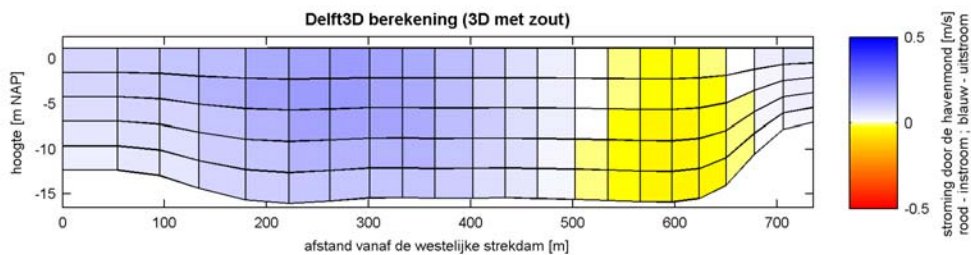
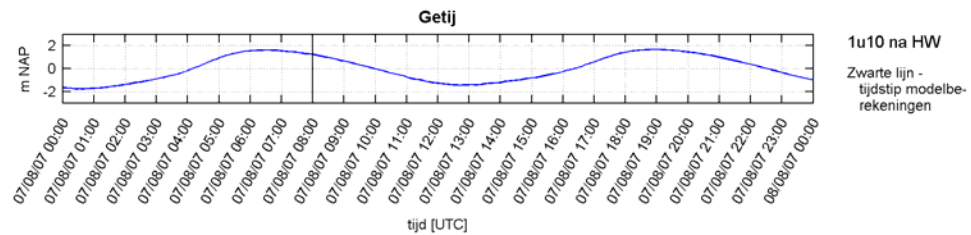
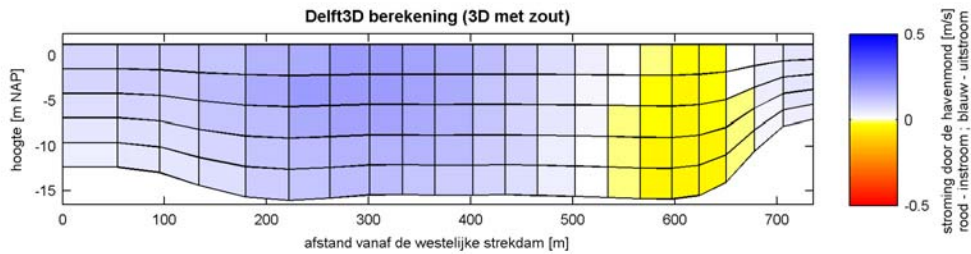
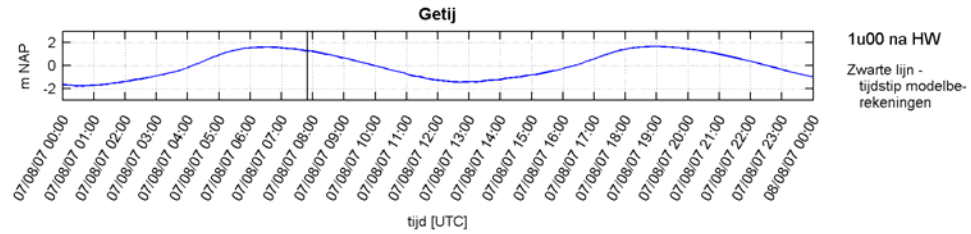
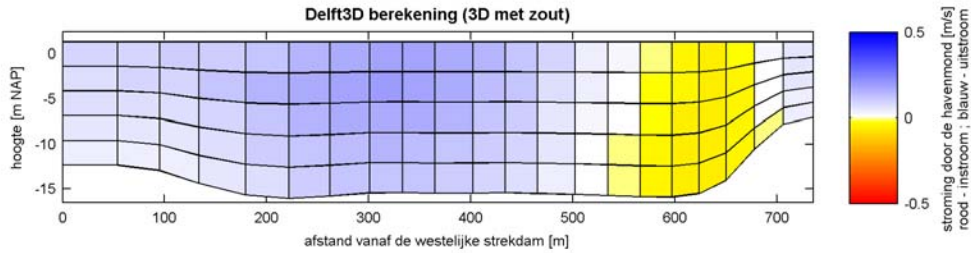
Bijlage C:

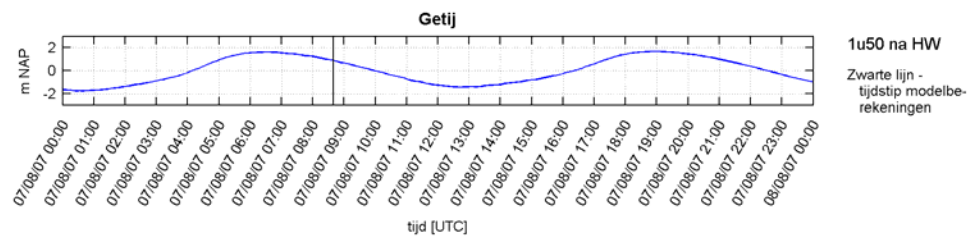
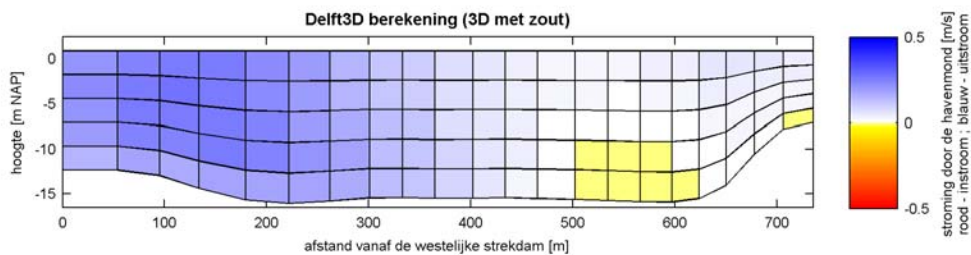
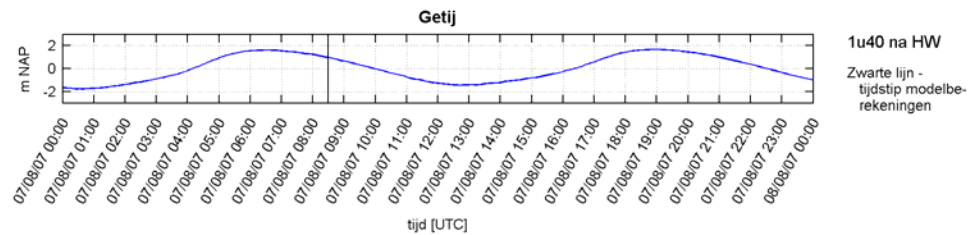
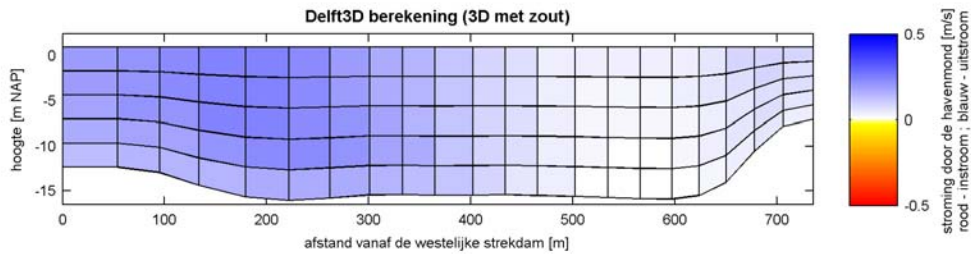
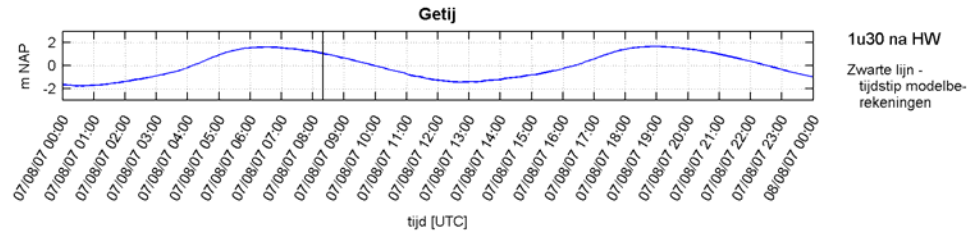
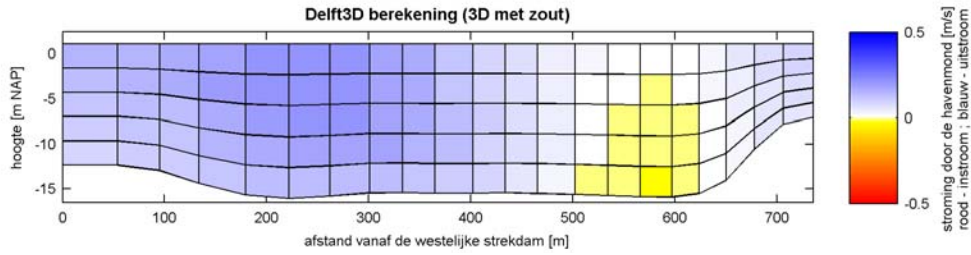
Numerieke modelresultaten bij doortij

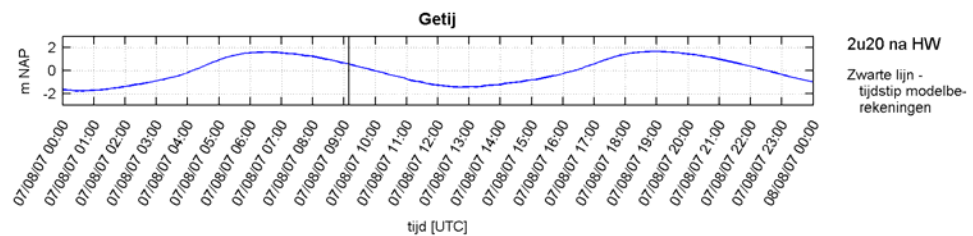
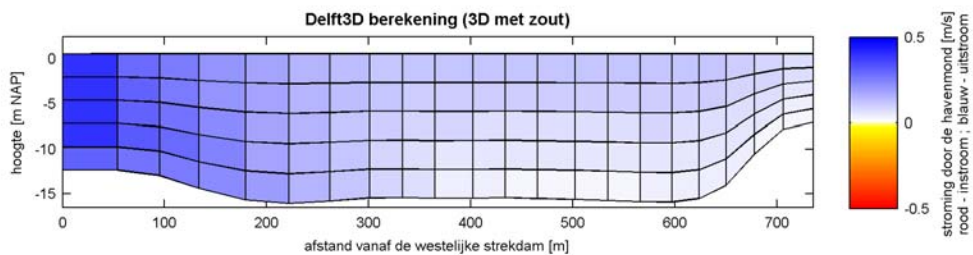
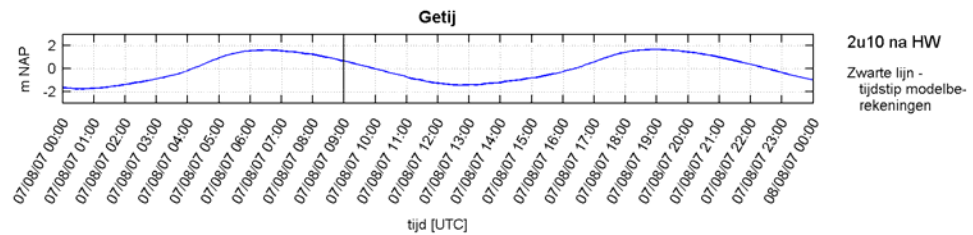
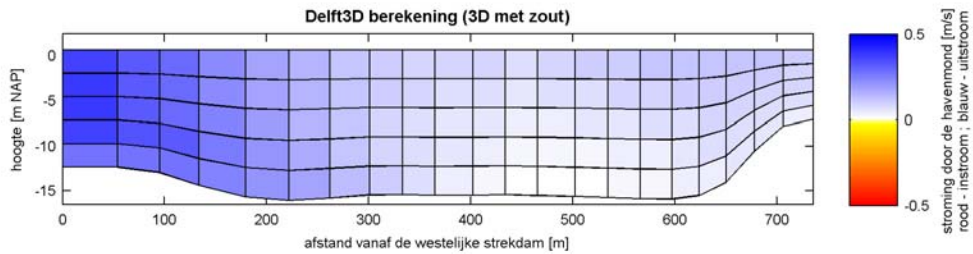
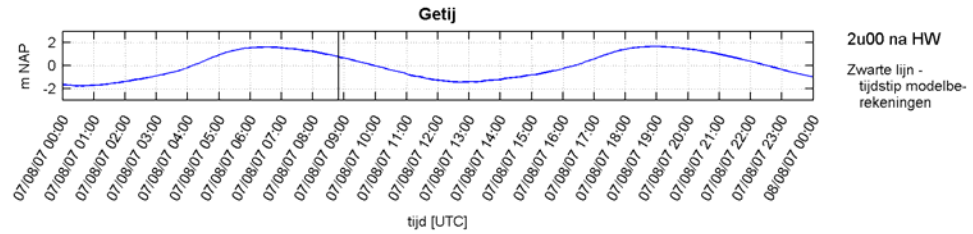
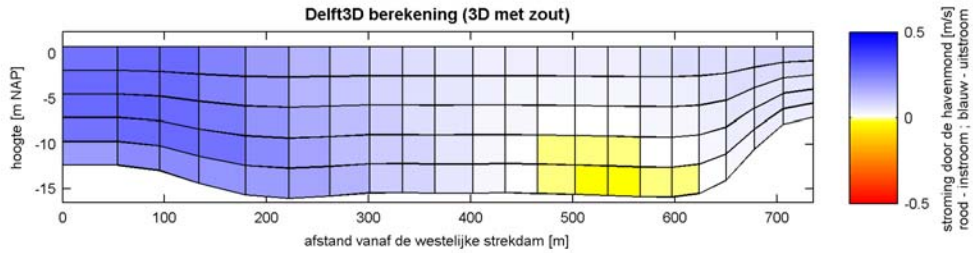
Scenario 4 (3D model met zout)

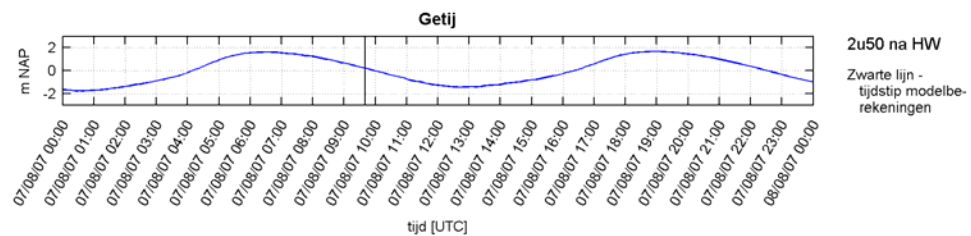
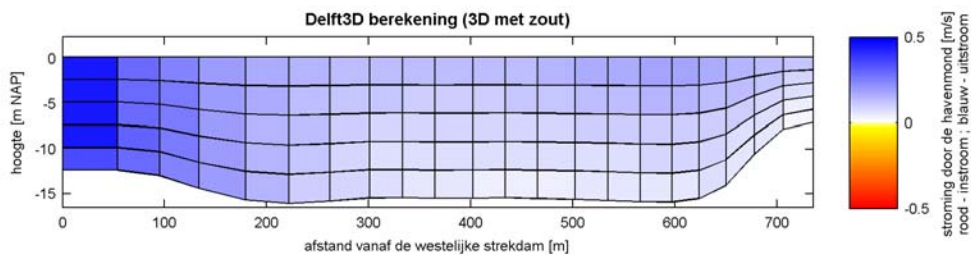
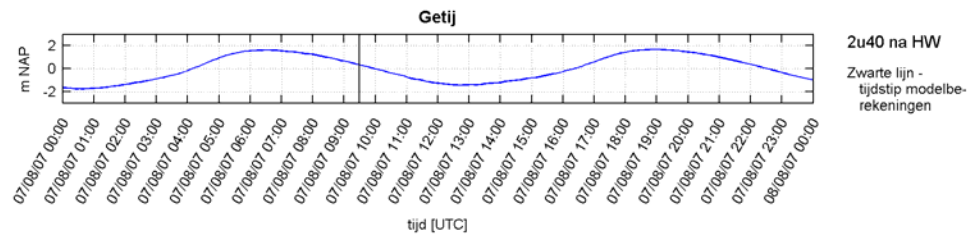
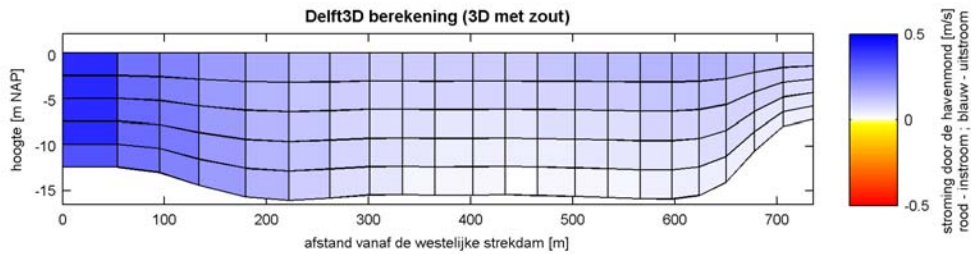
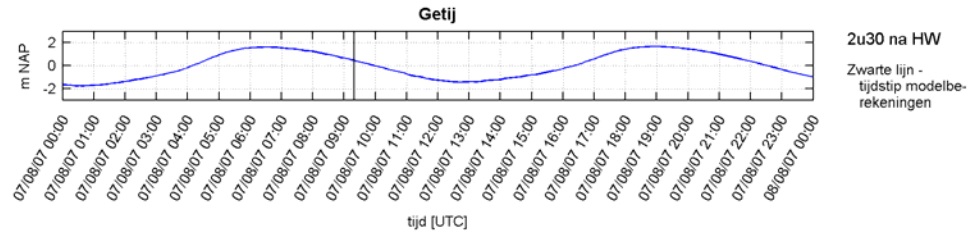
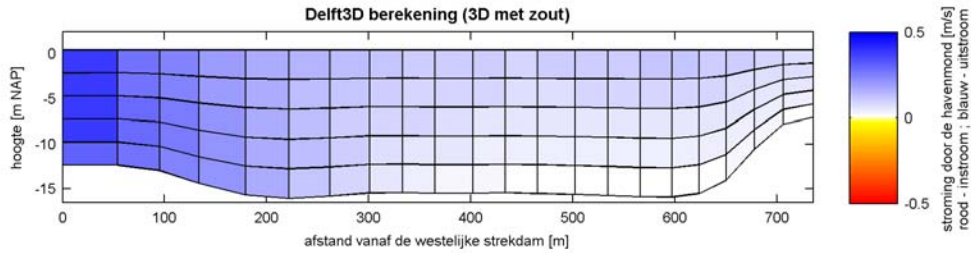


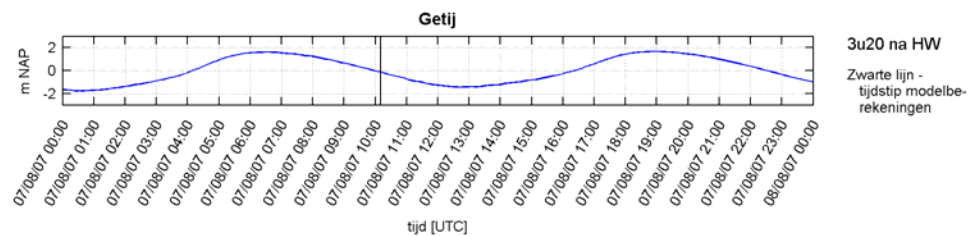
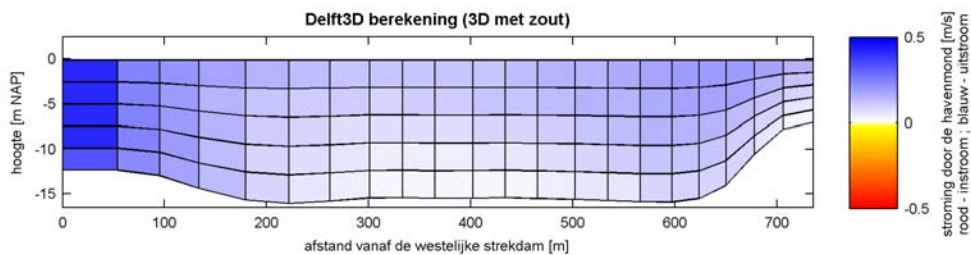
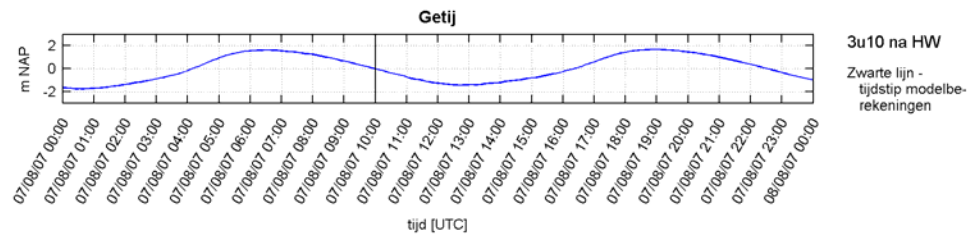
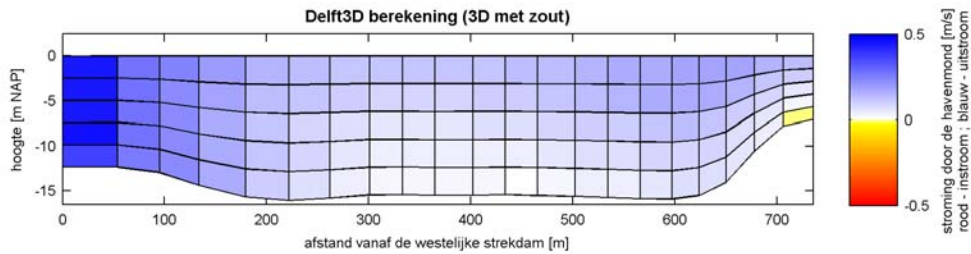
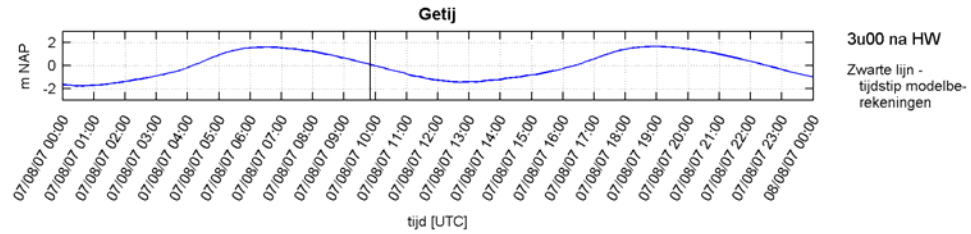
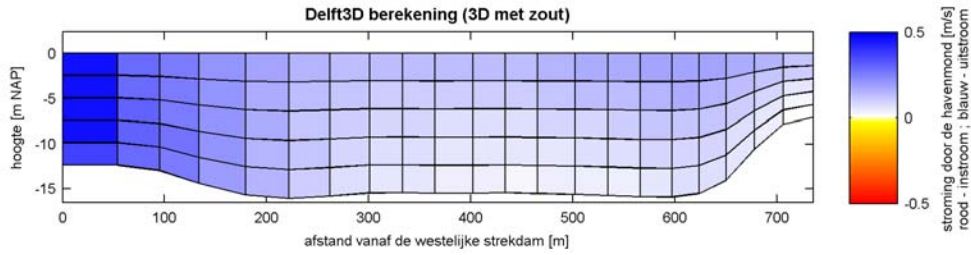


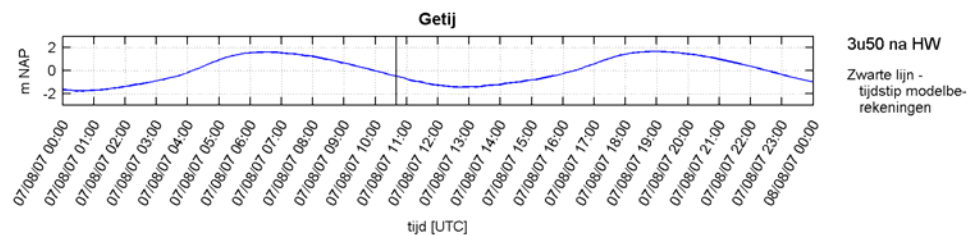
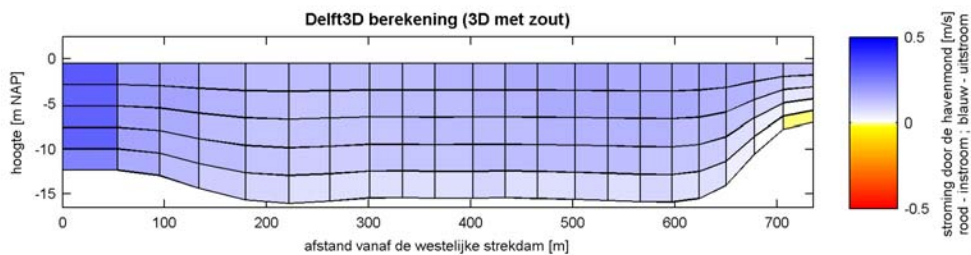
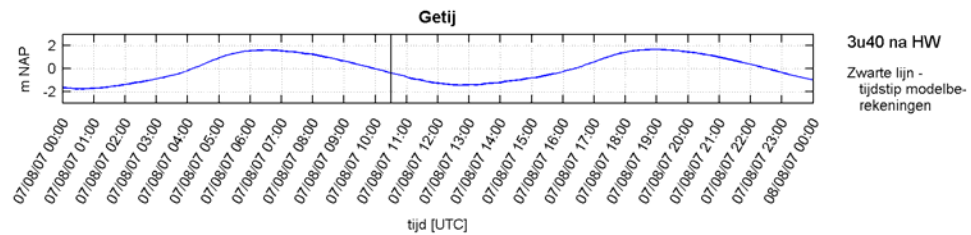
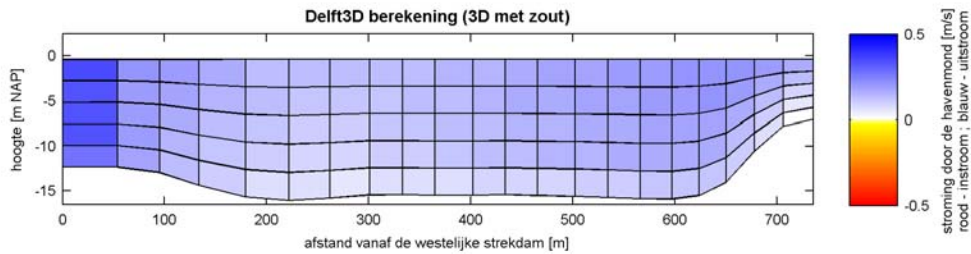
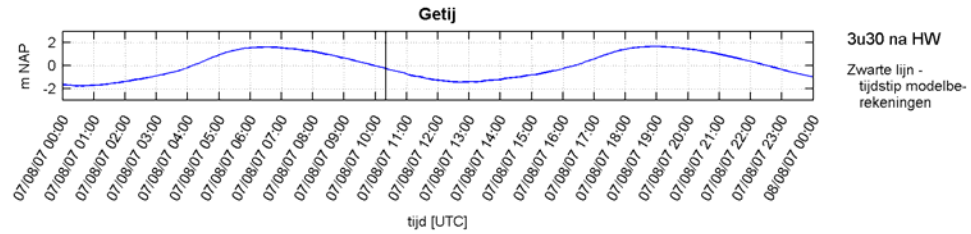
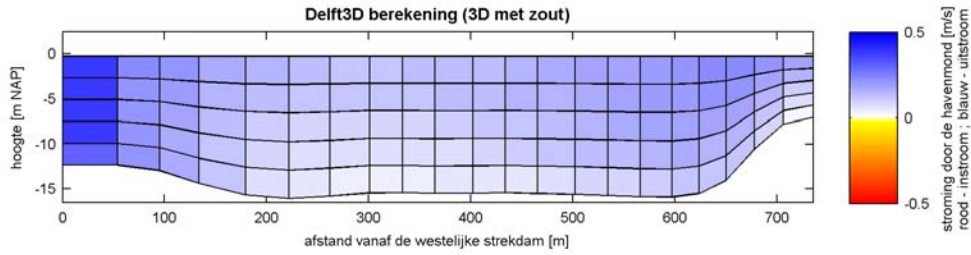


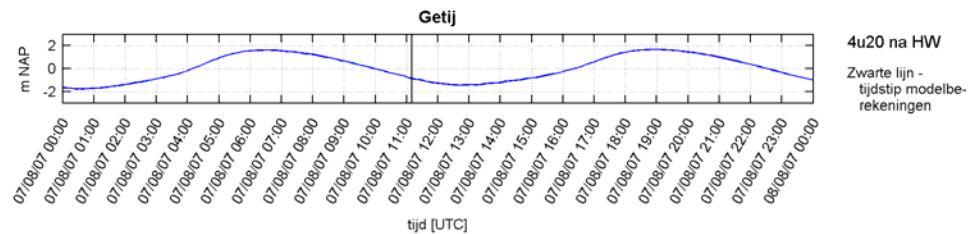
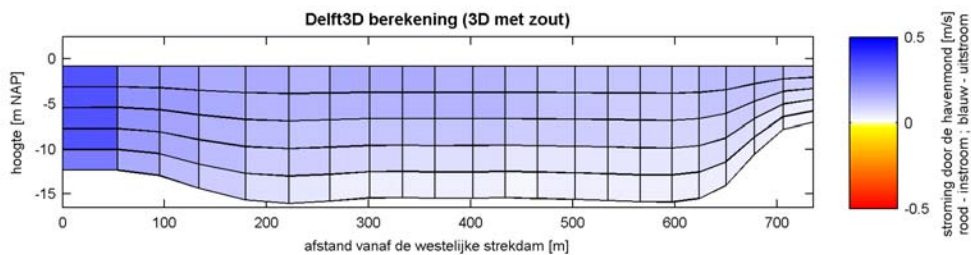
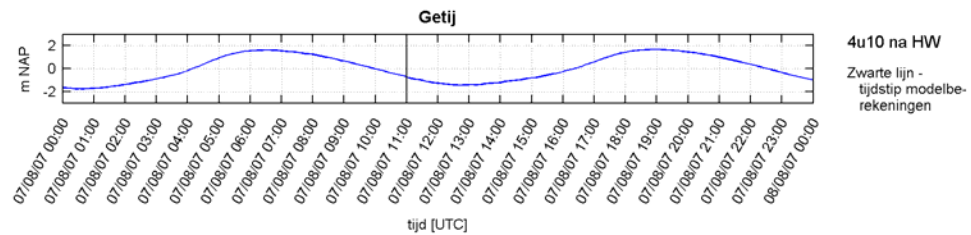
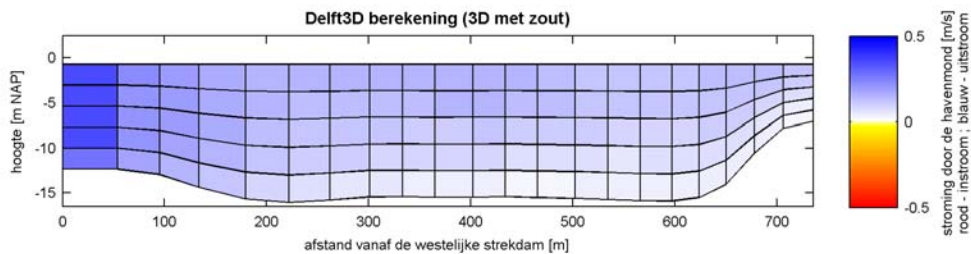
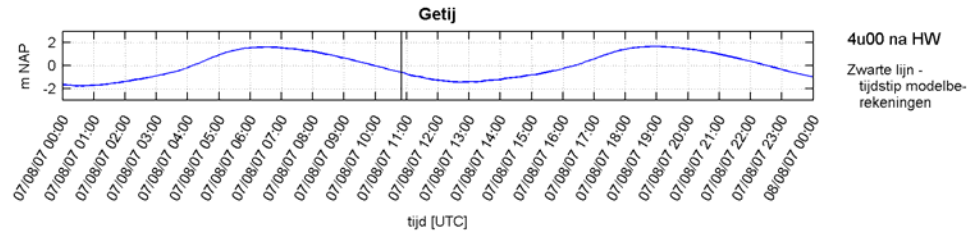
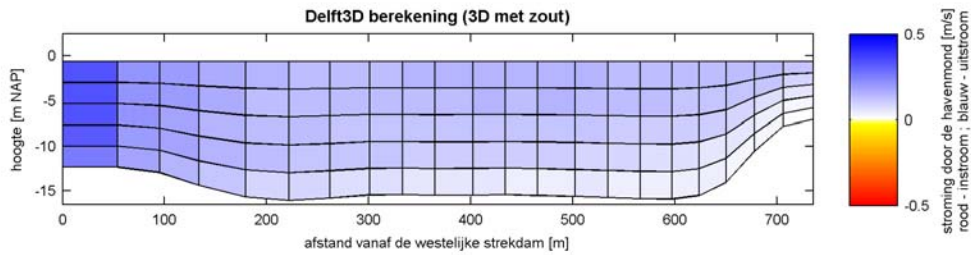


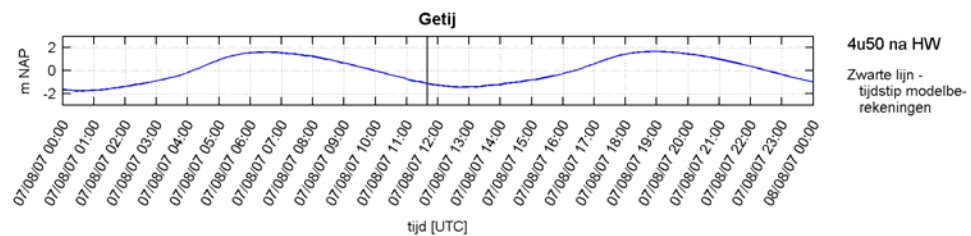
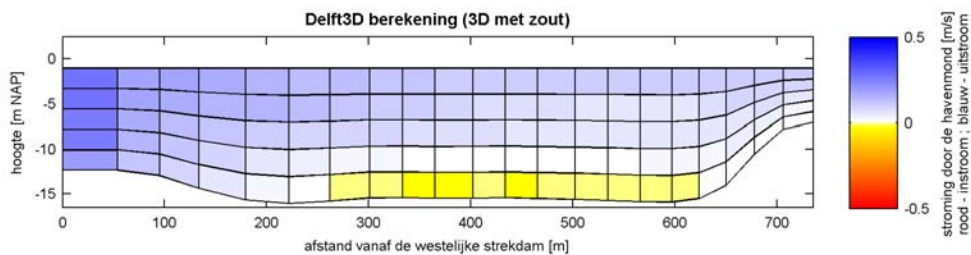
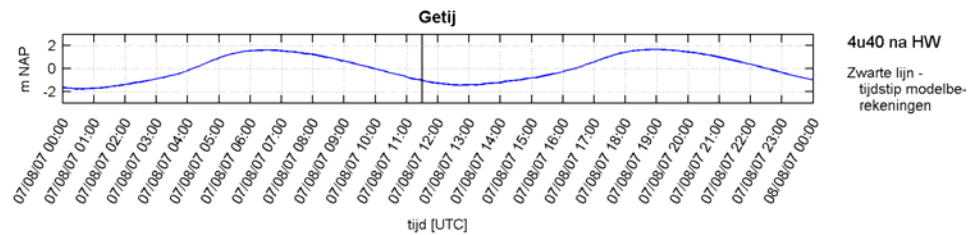
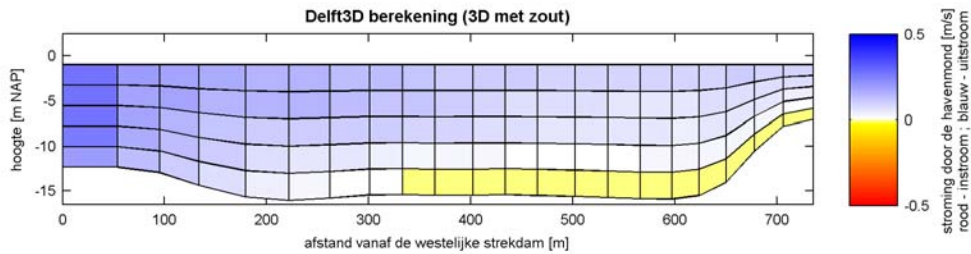
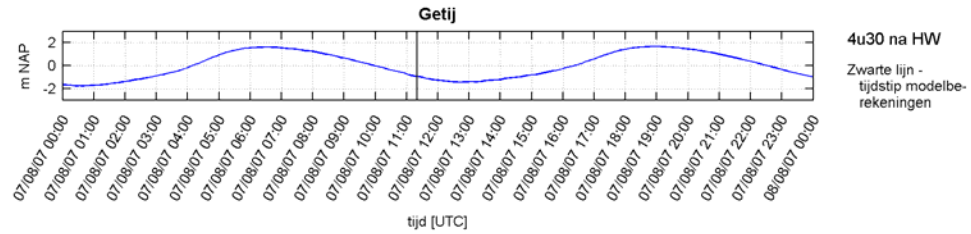
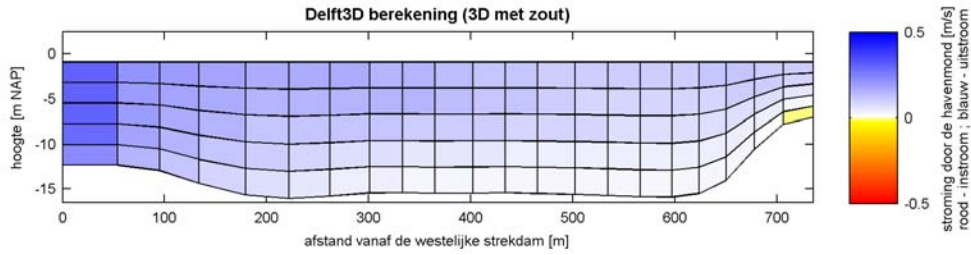


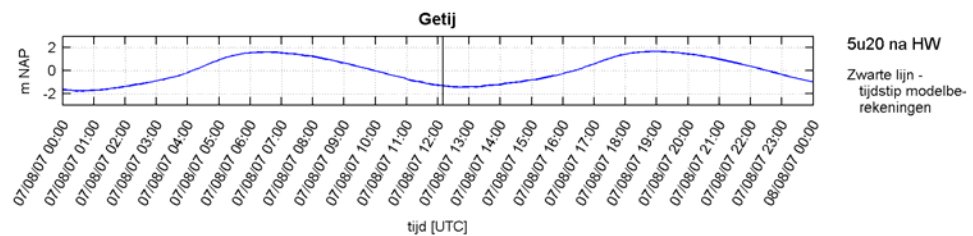
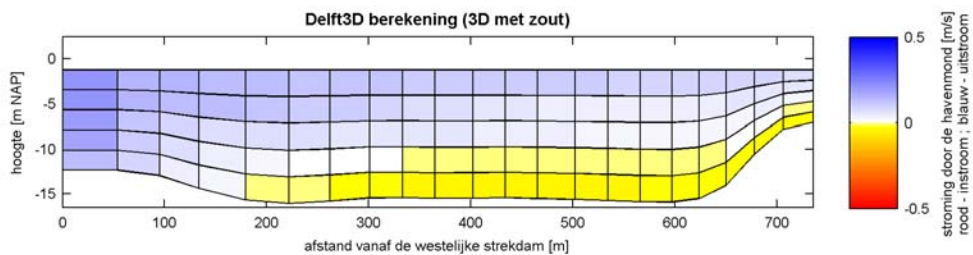
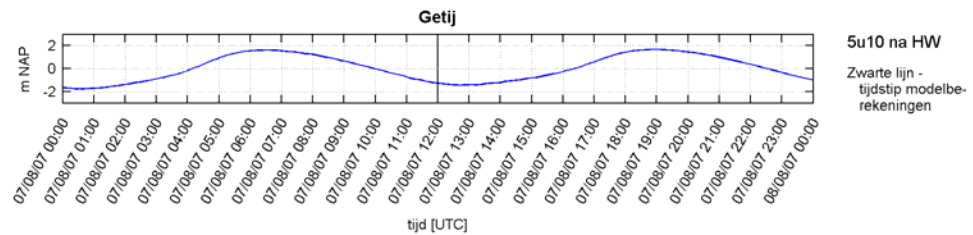
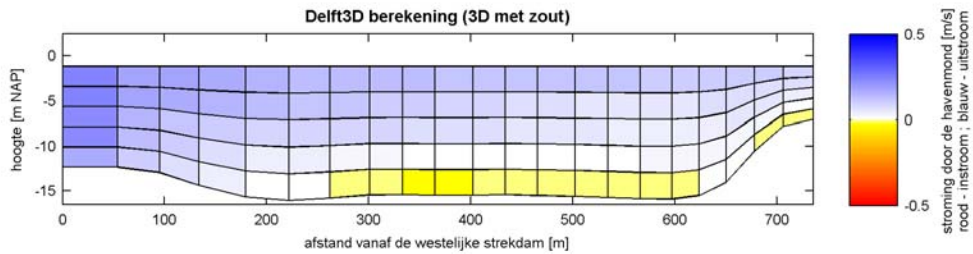
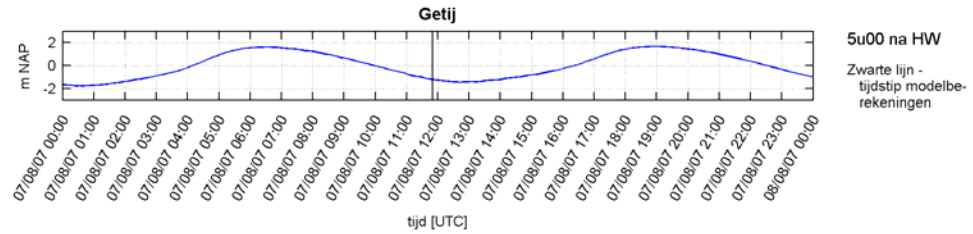
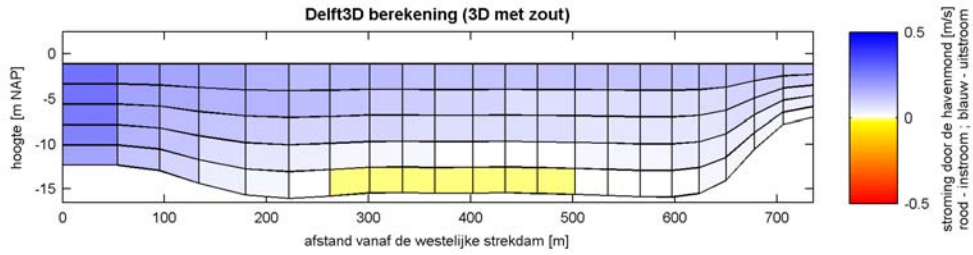


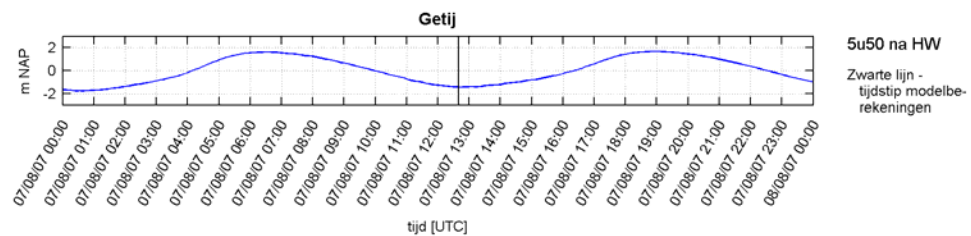
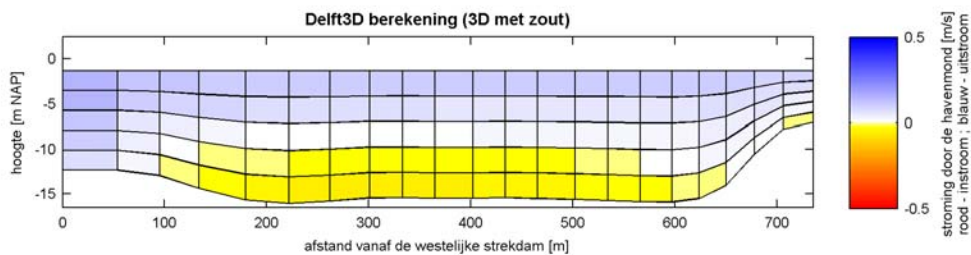
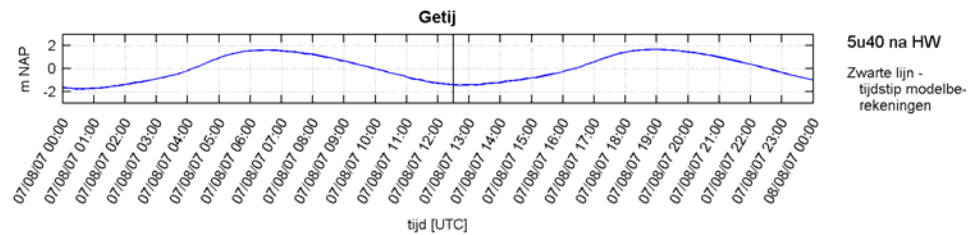
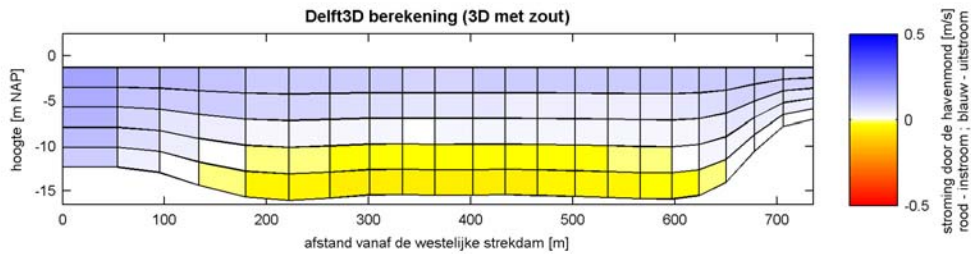
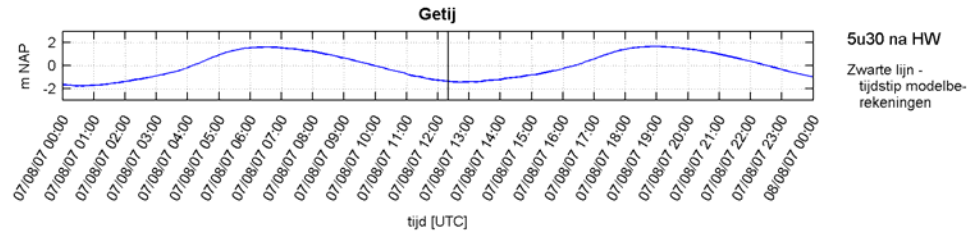
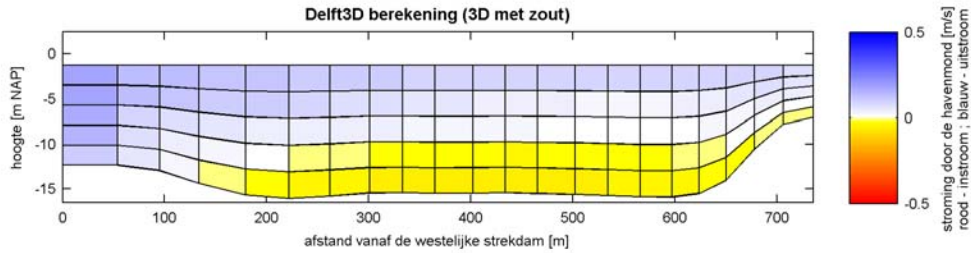


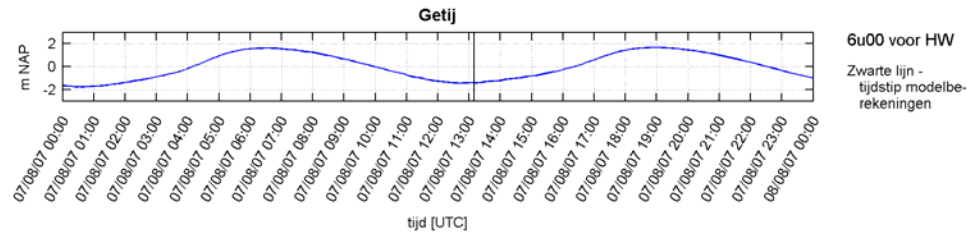
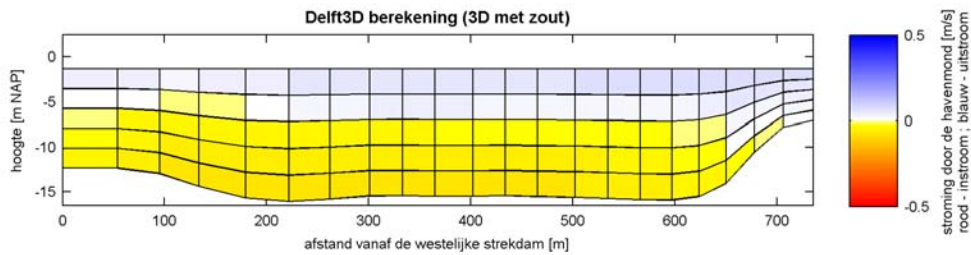
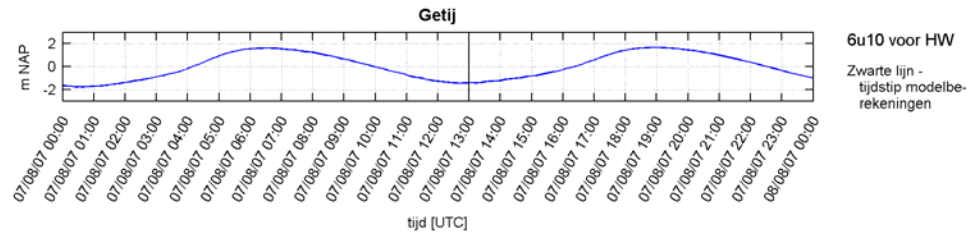
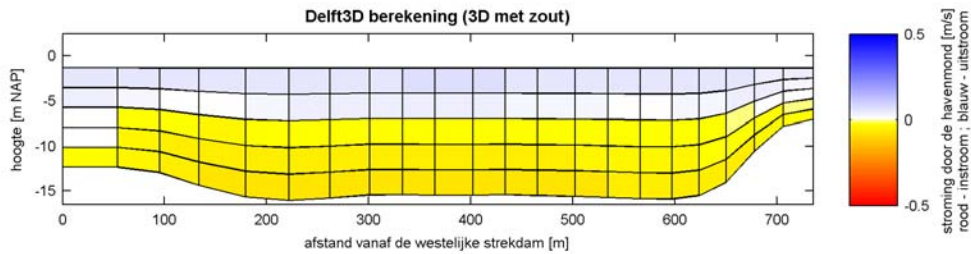
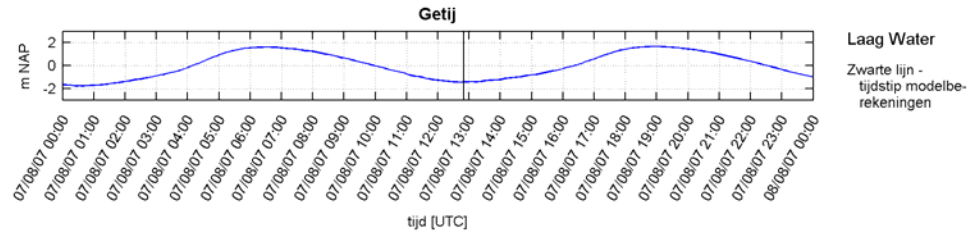
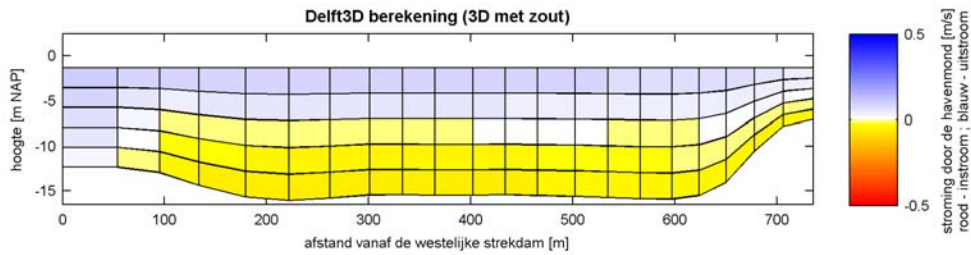


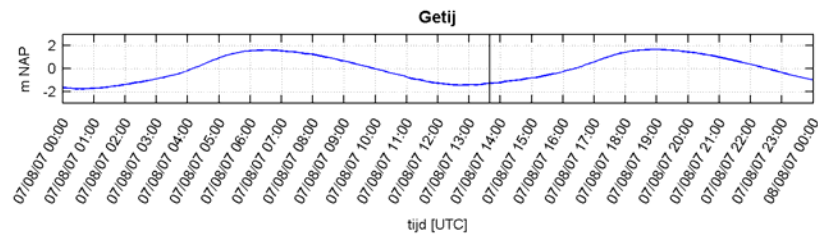
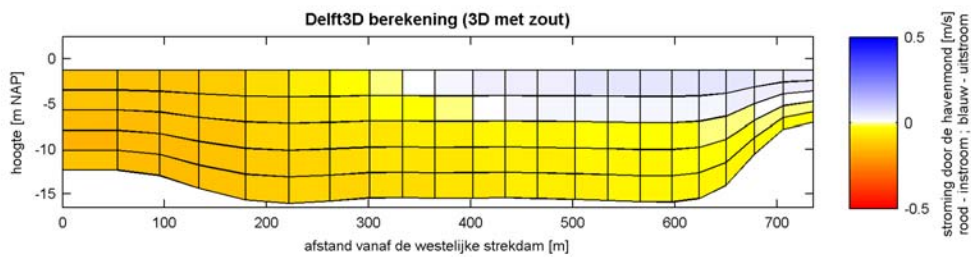
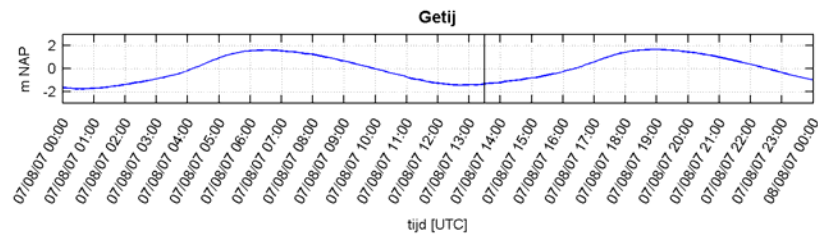
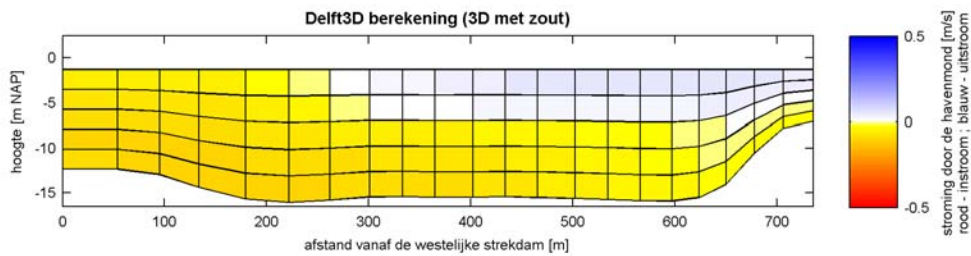
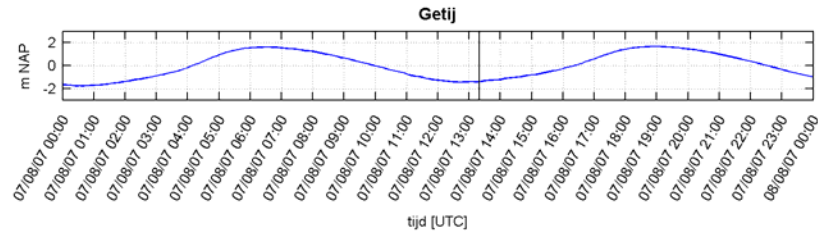
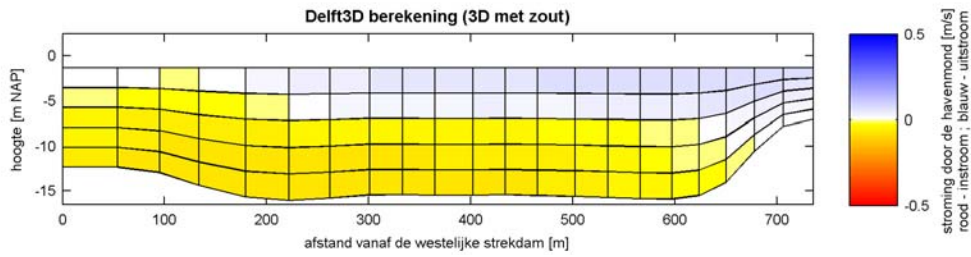


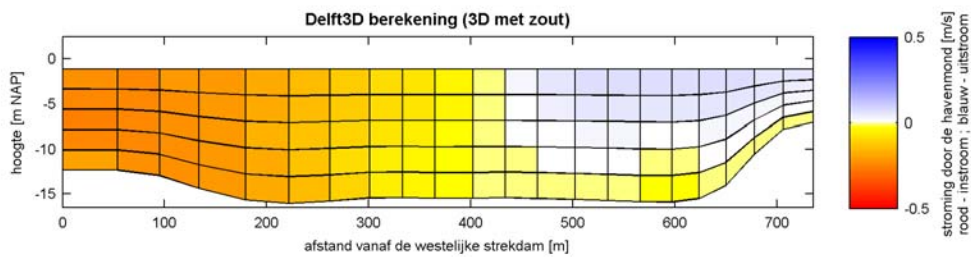
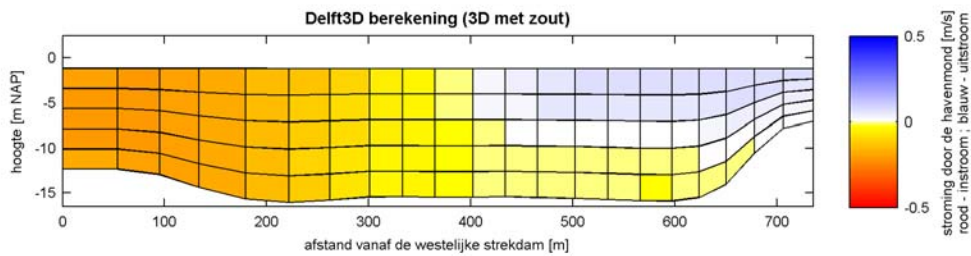
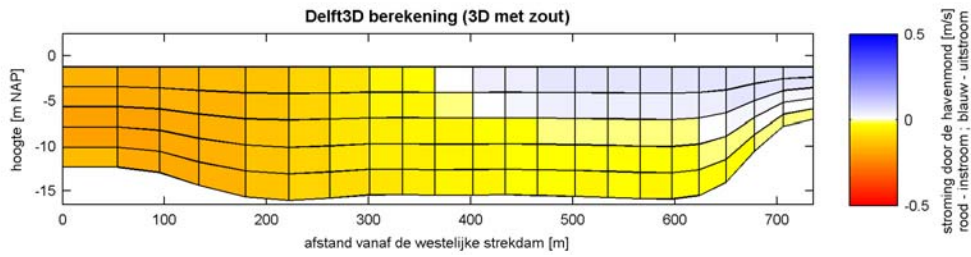


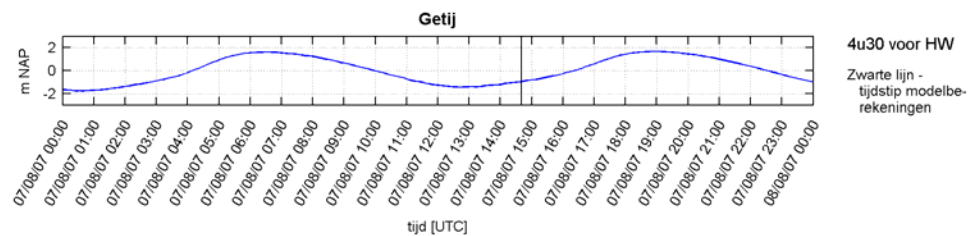
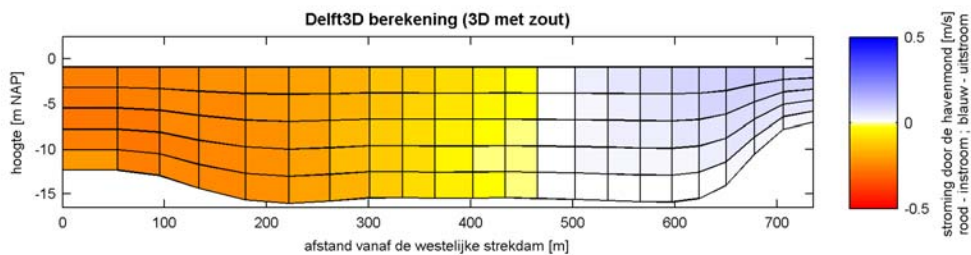
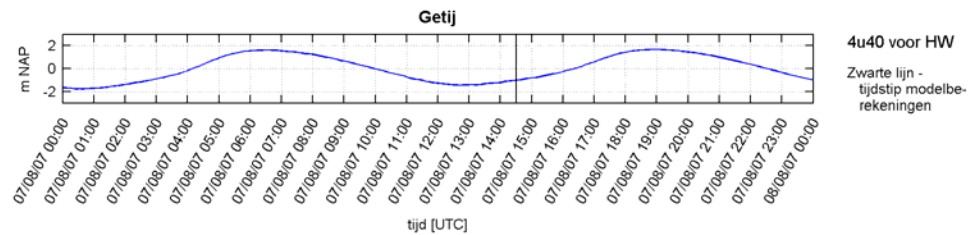
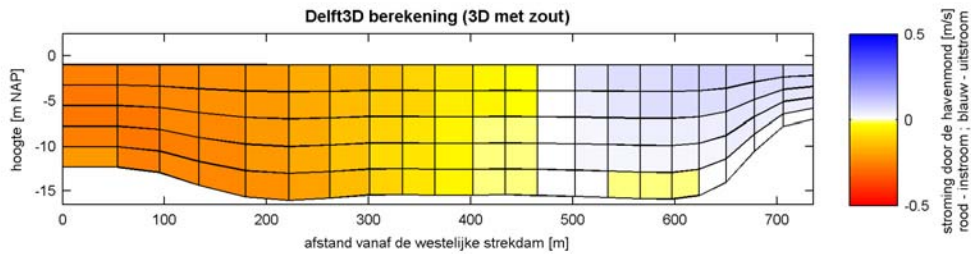
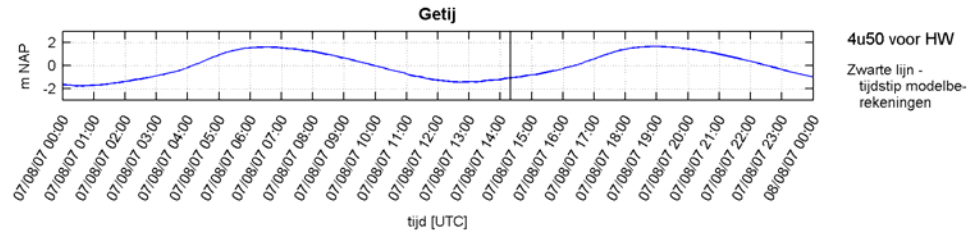
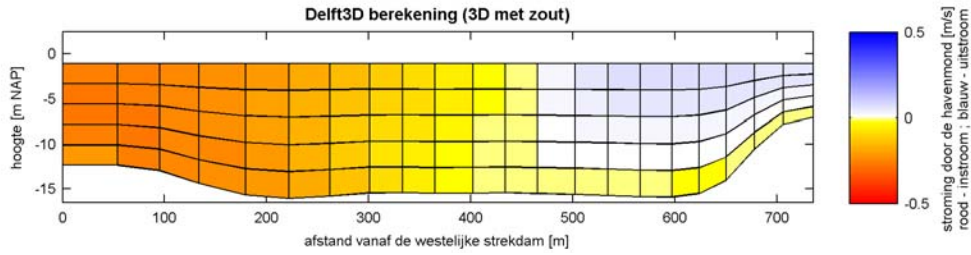


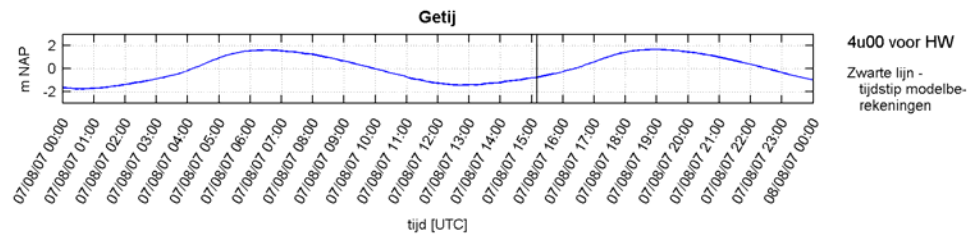
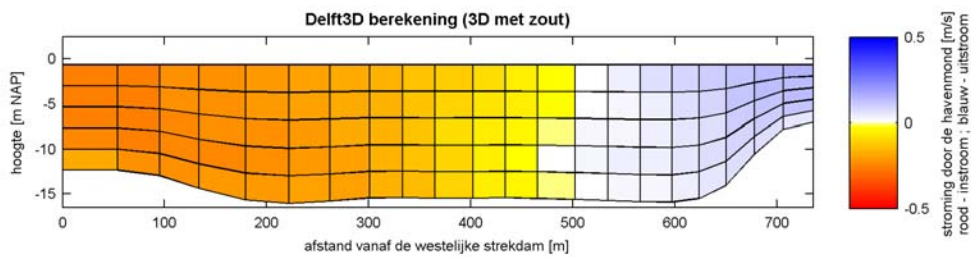
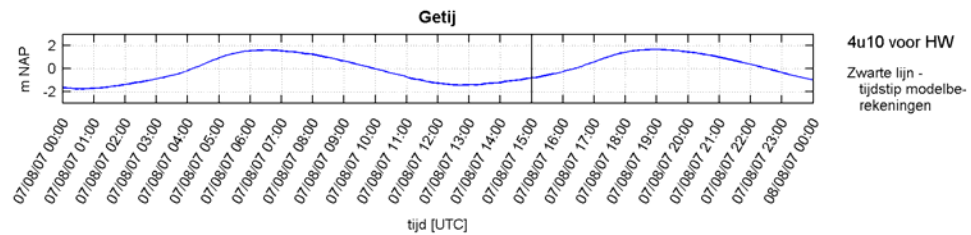
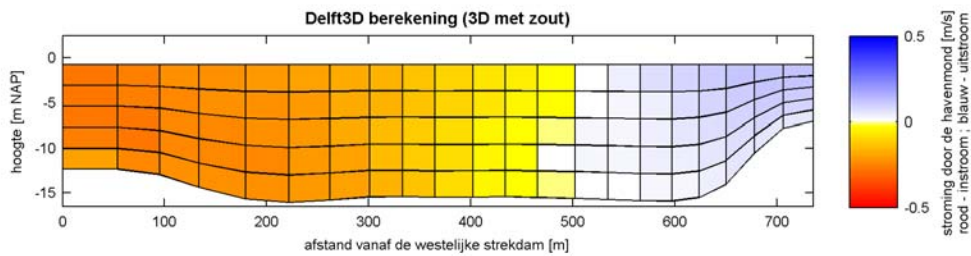
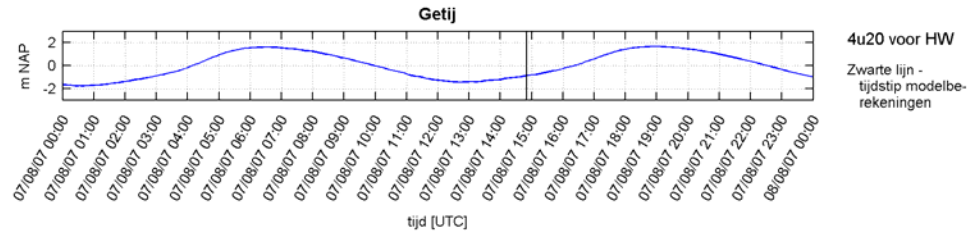
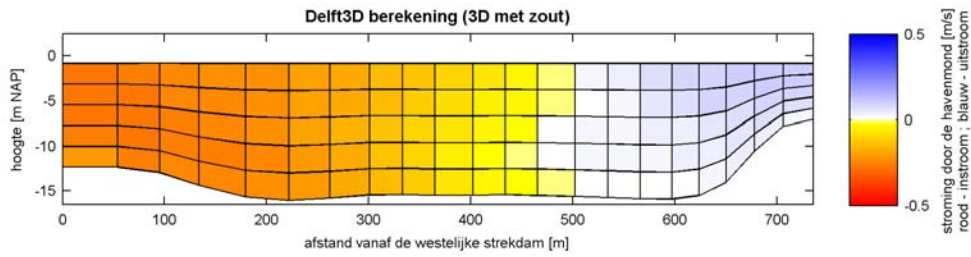


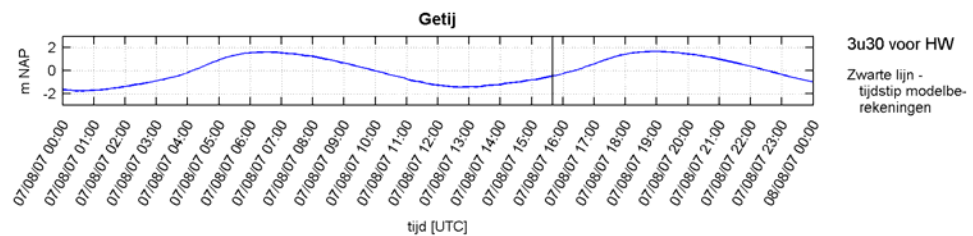
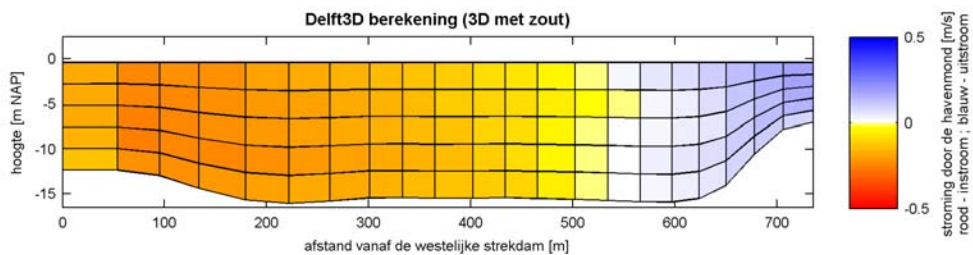
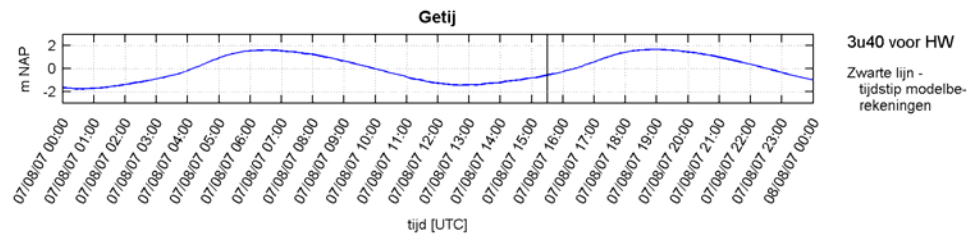
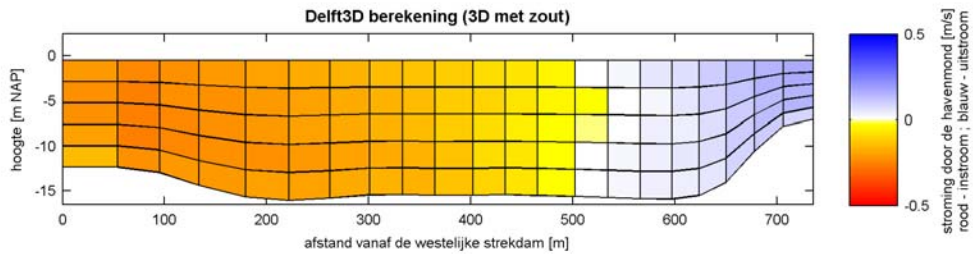
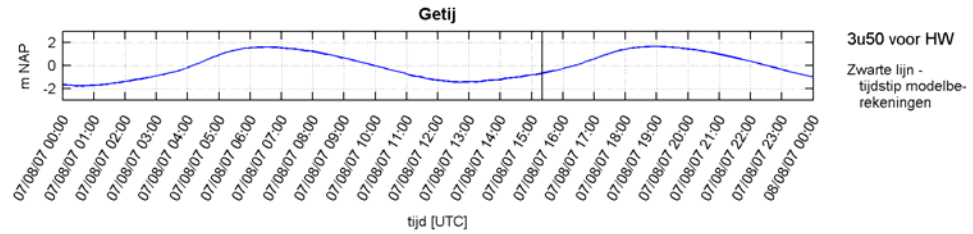
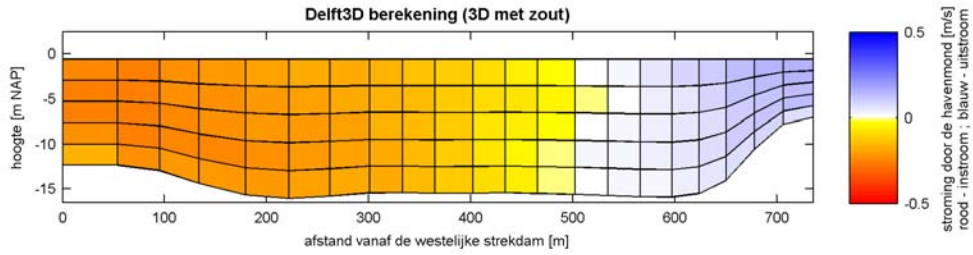


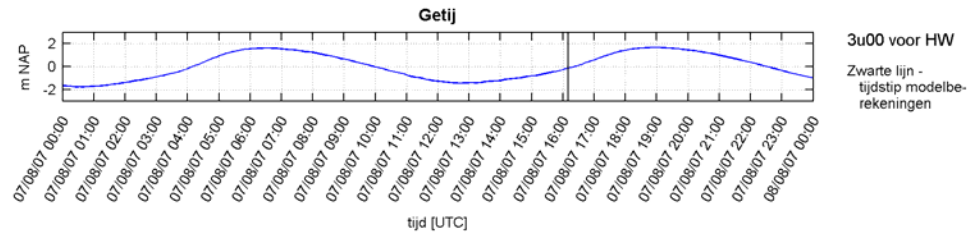
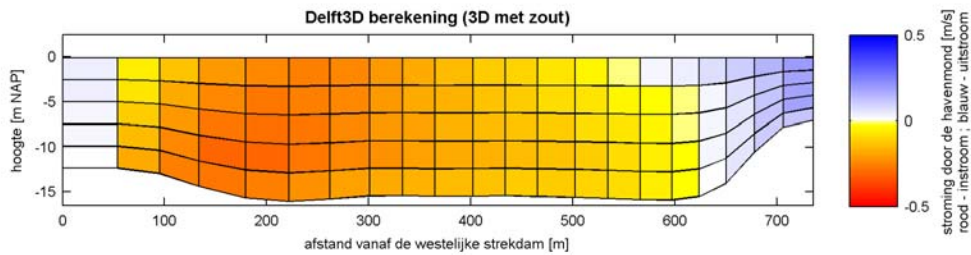
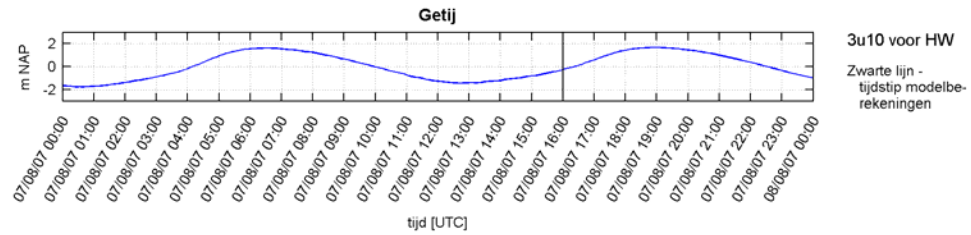
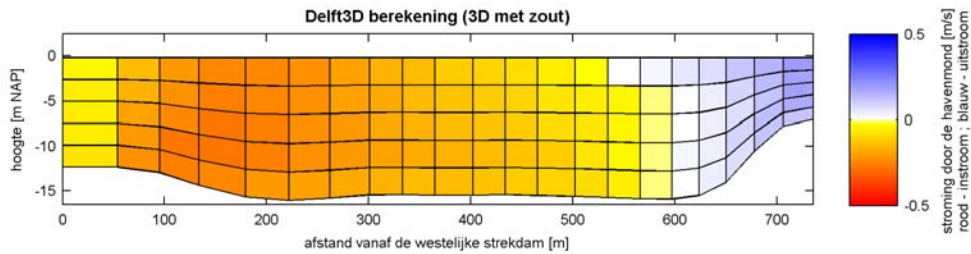
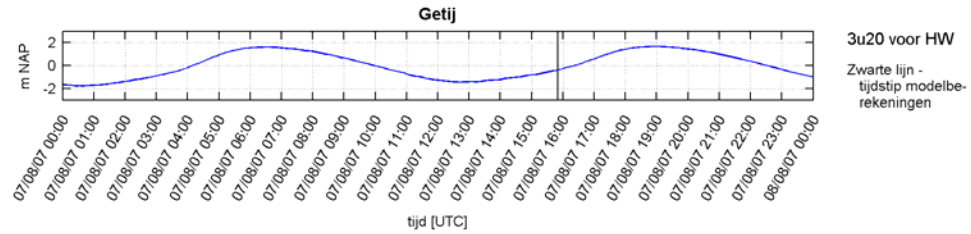
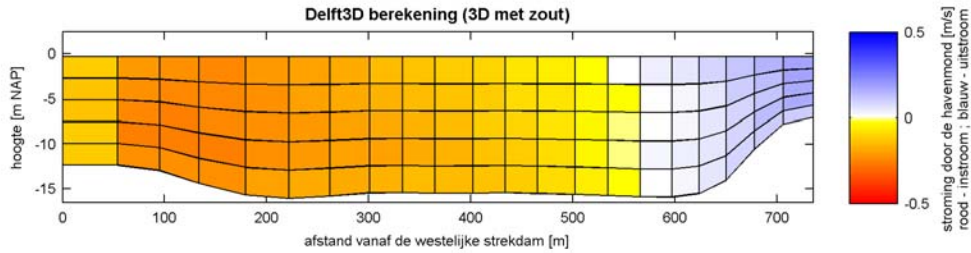


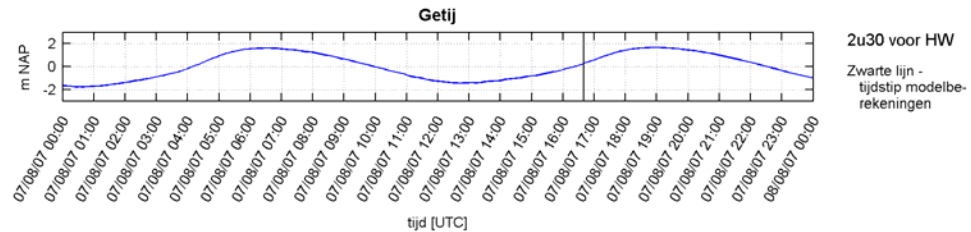
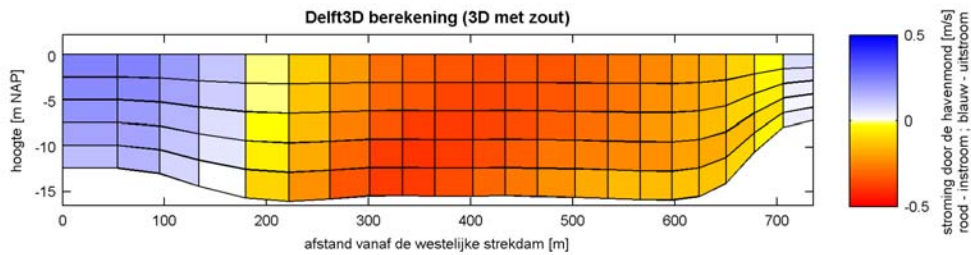
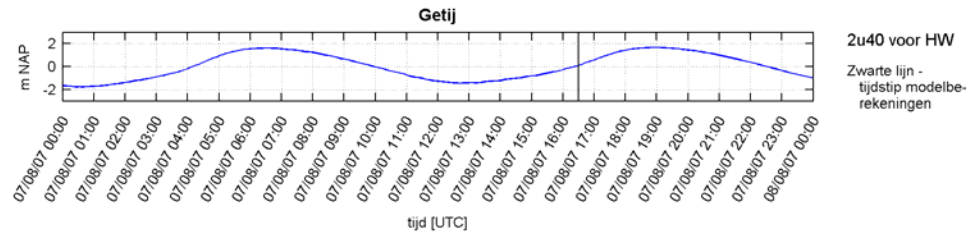
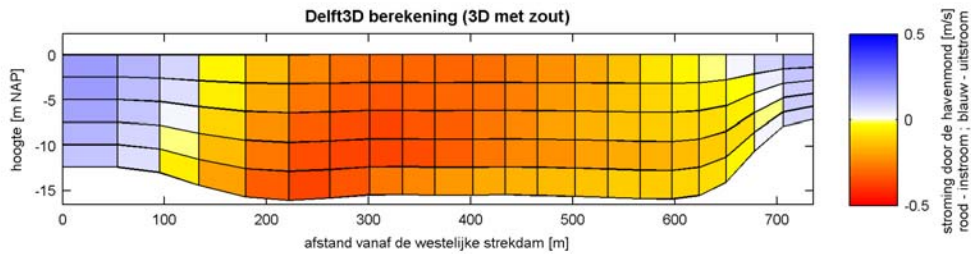
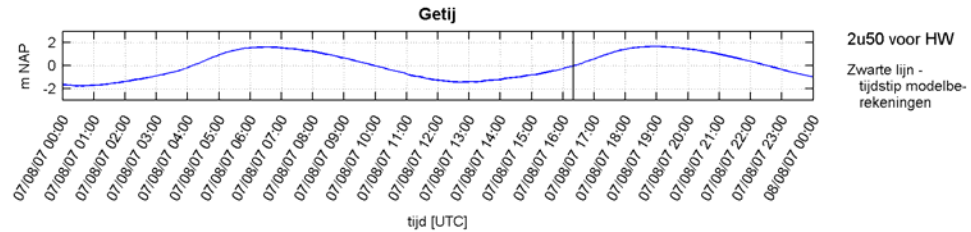
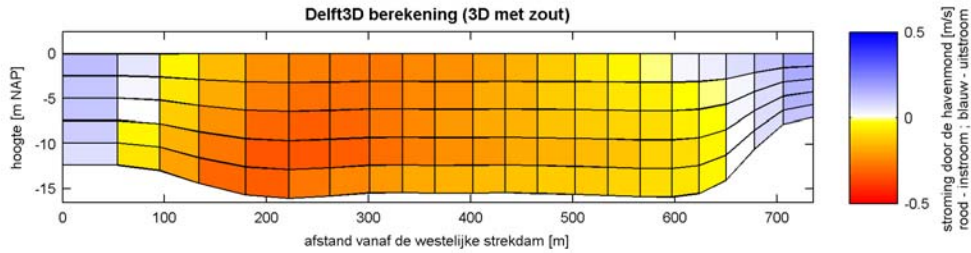


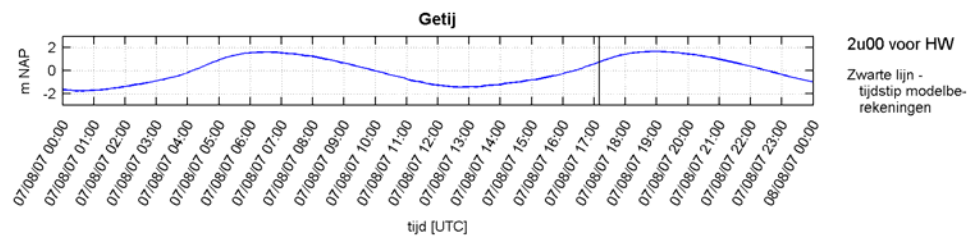
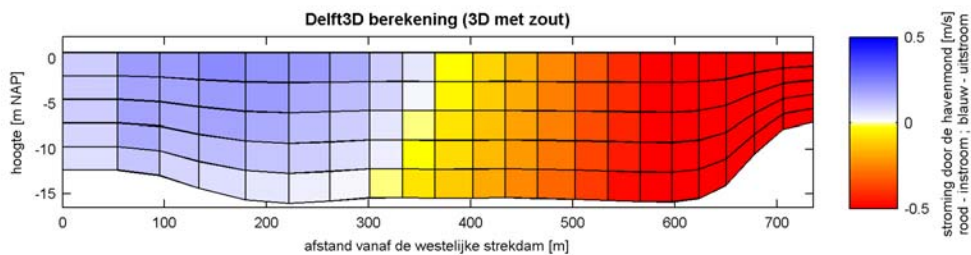
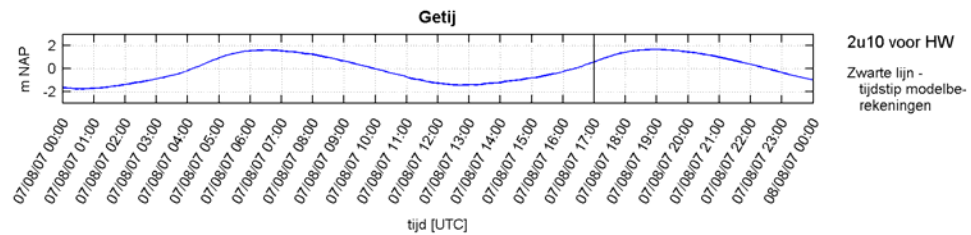
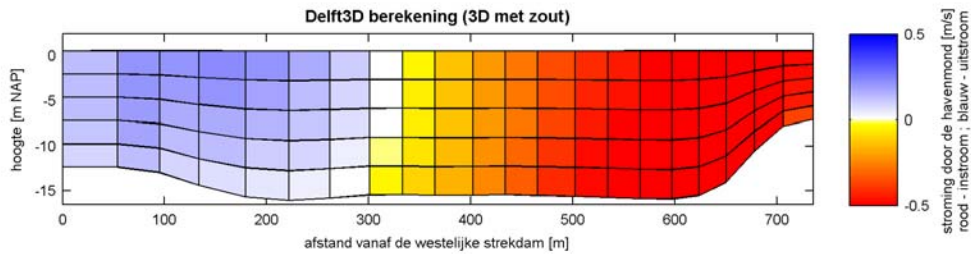
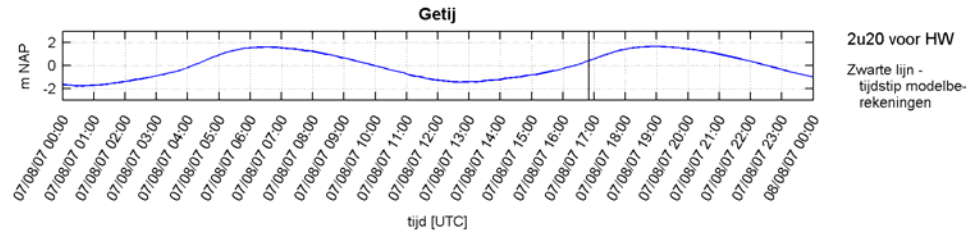
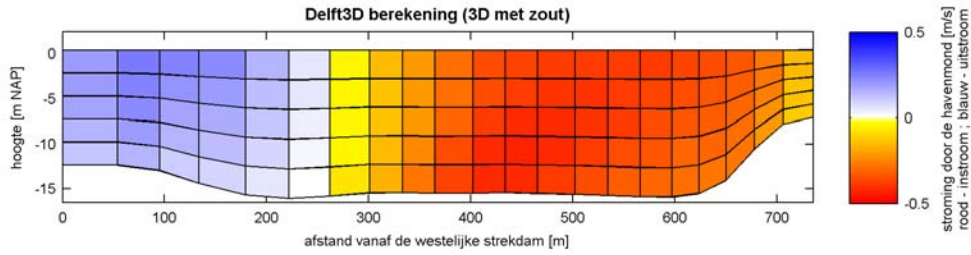


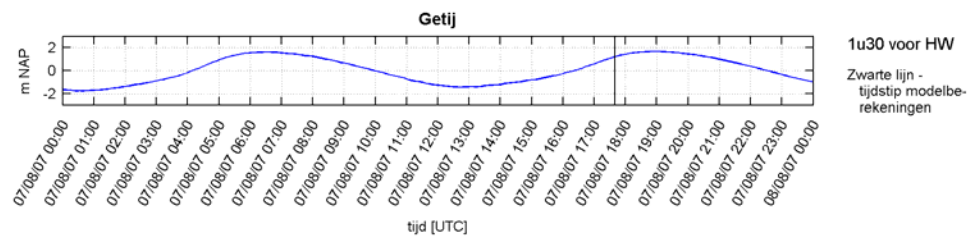
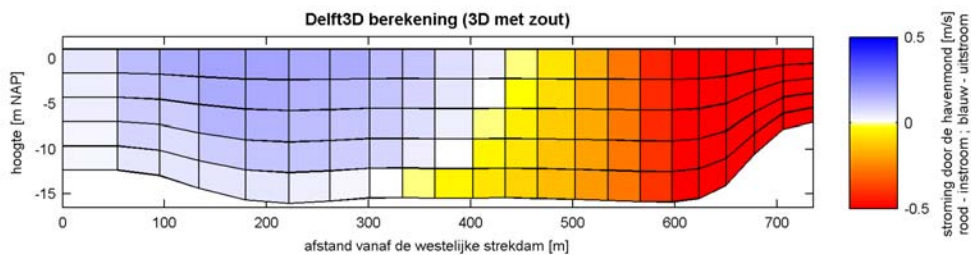
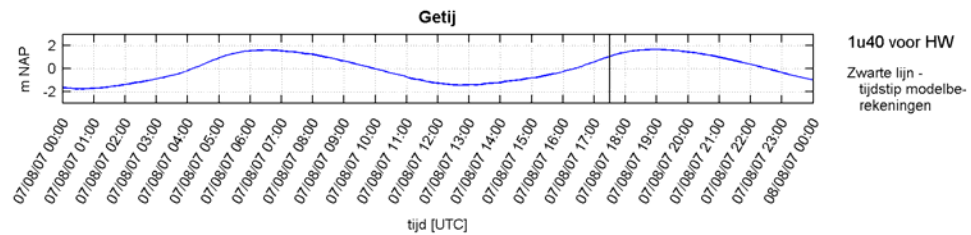
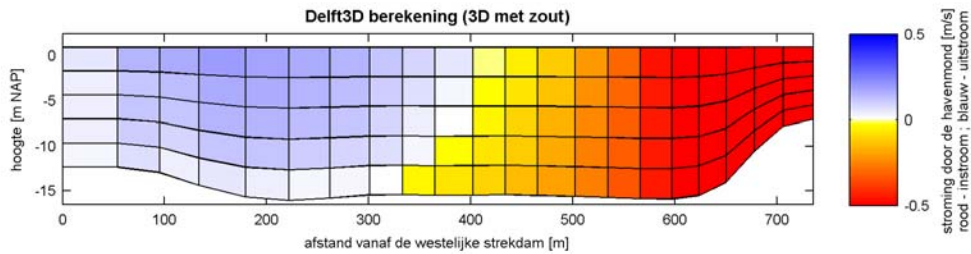
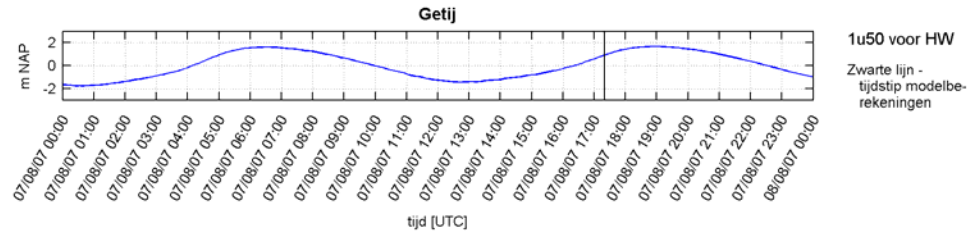
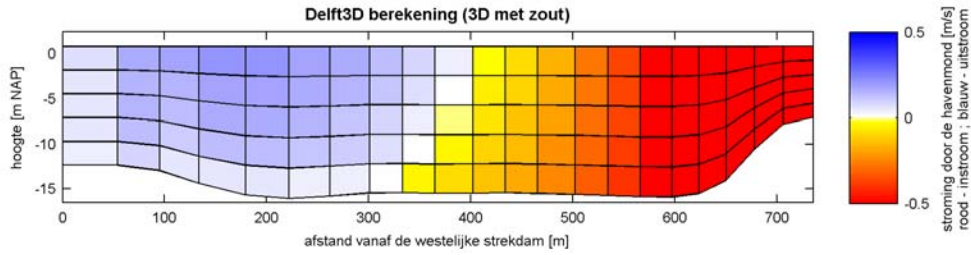


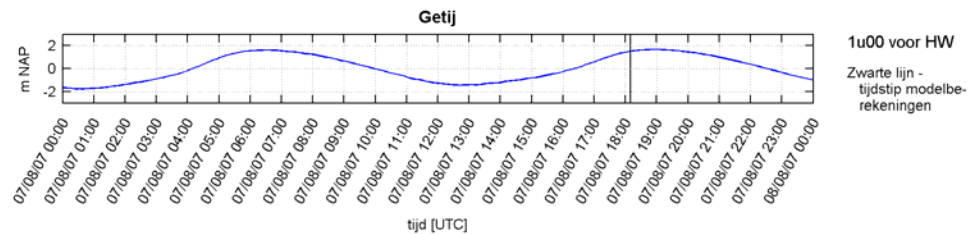
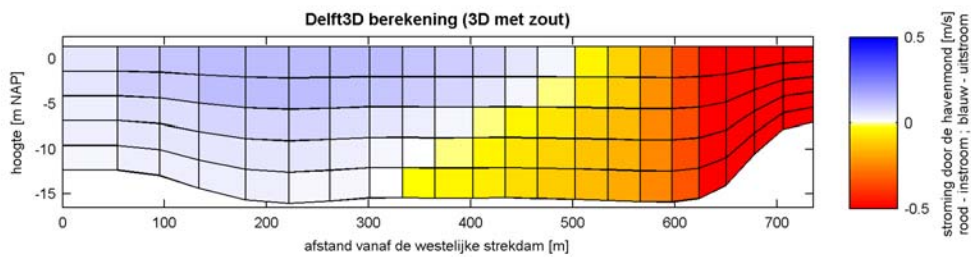
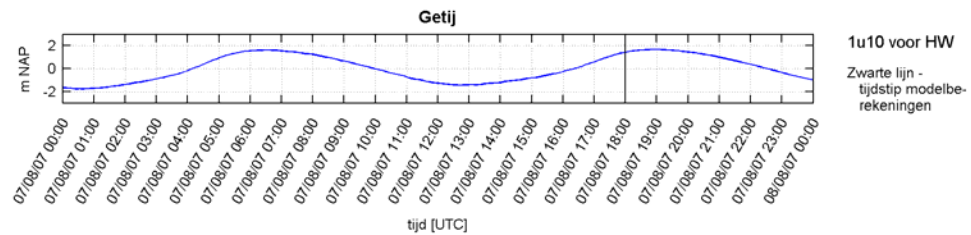
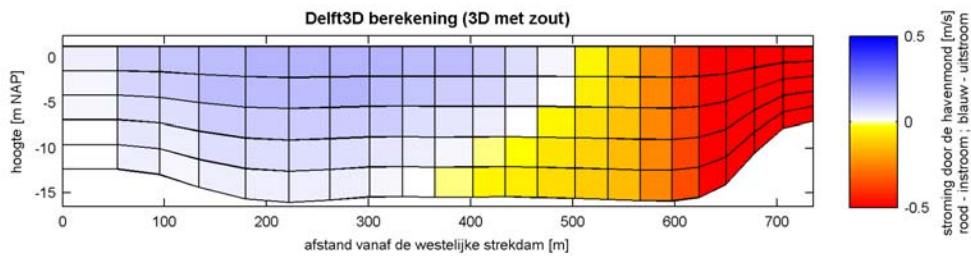
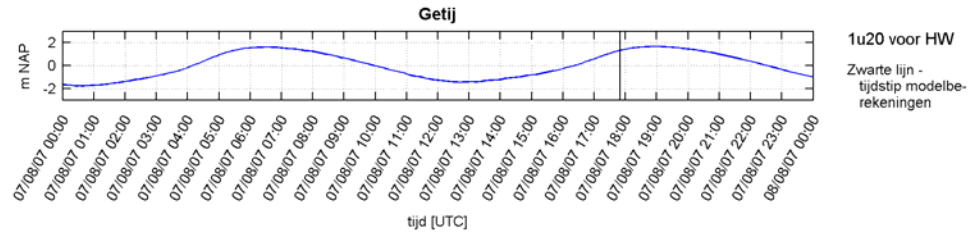
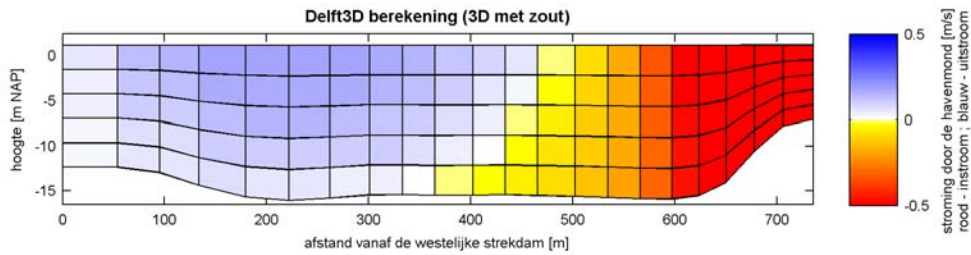


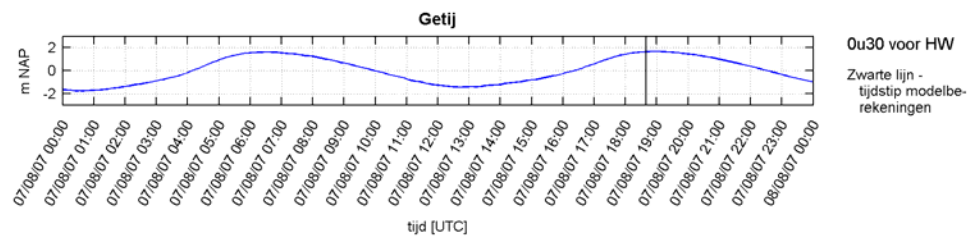
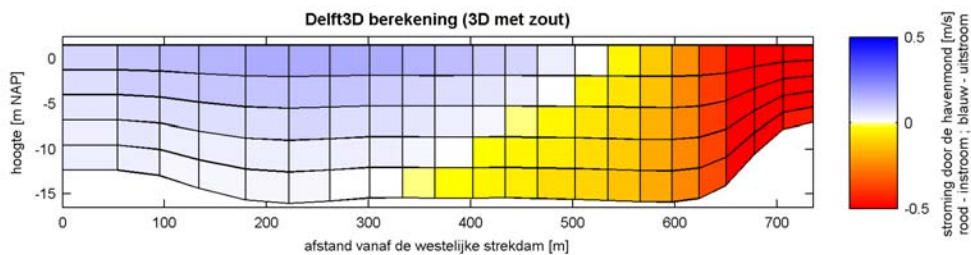
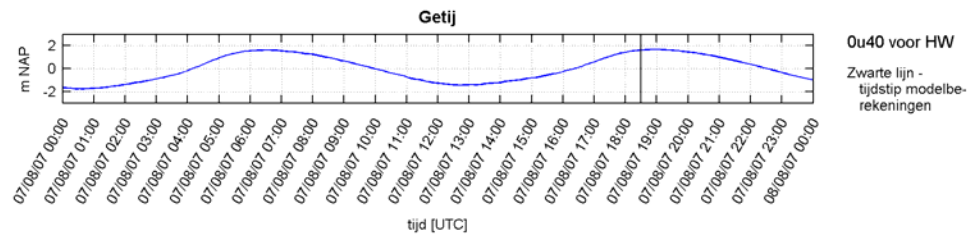
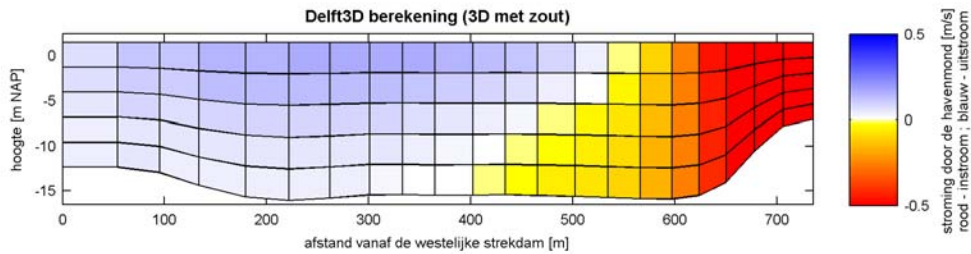
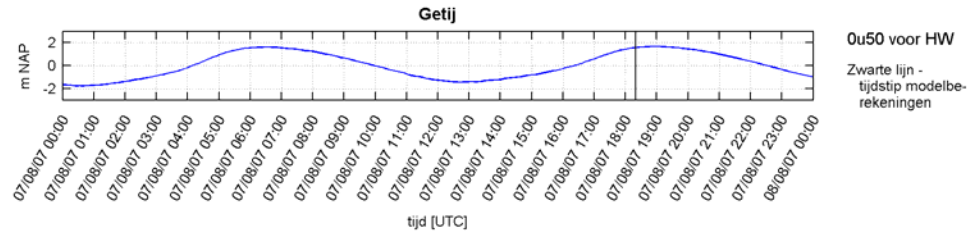
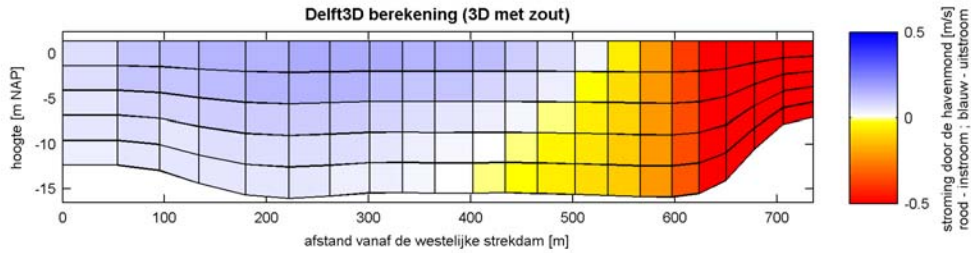


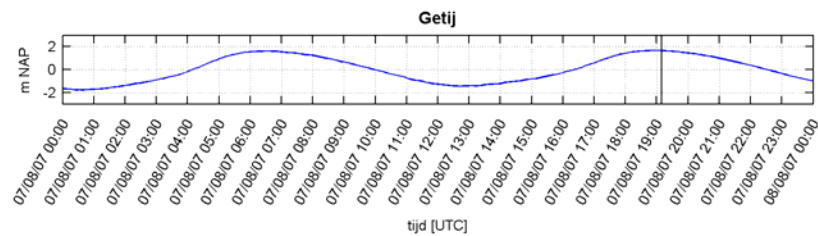
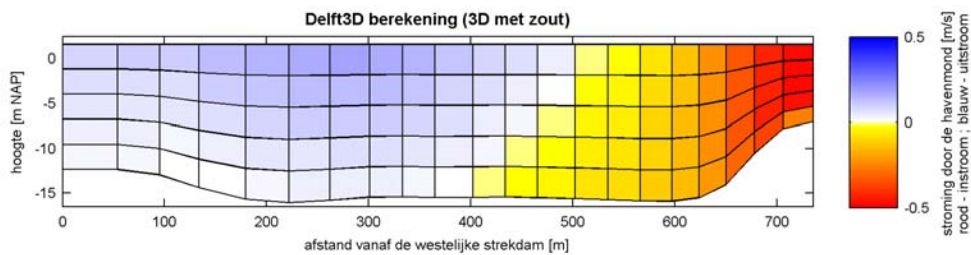
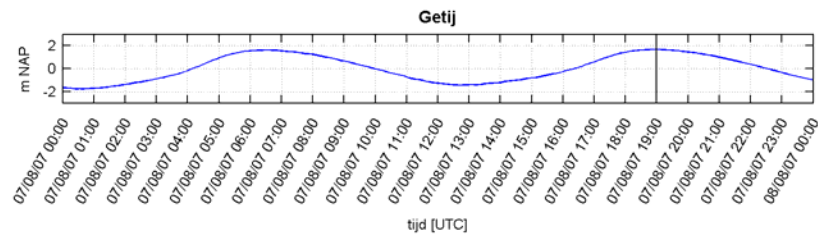
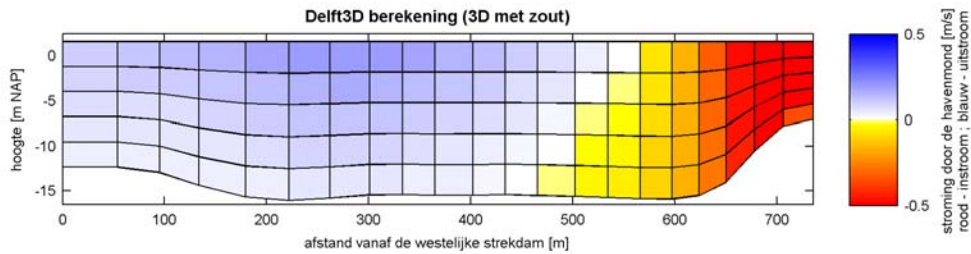
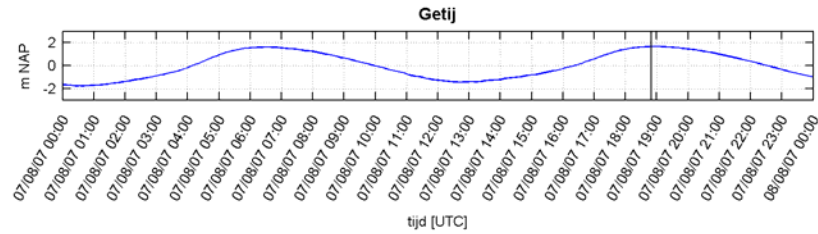
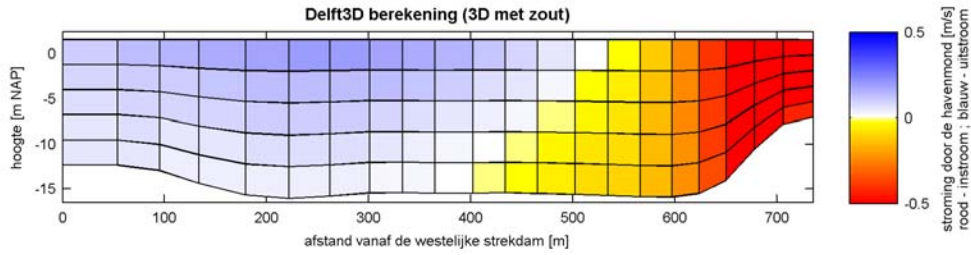




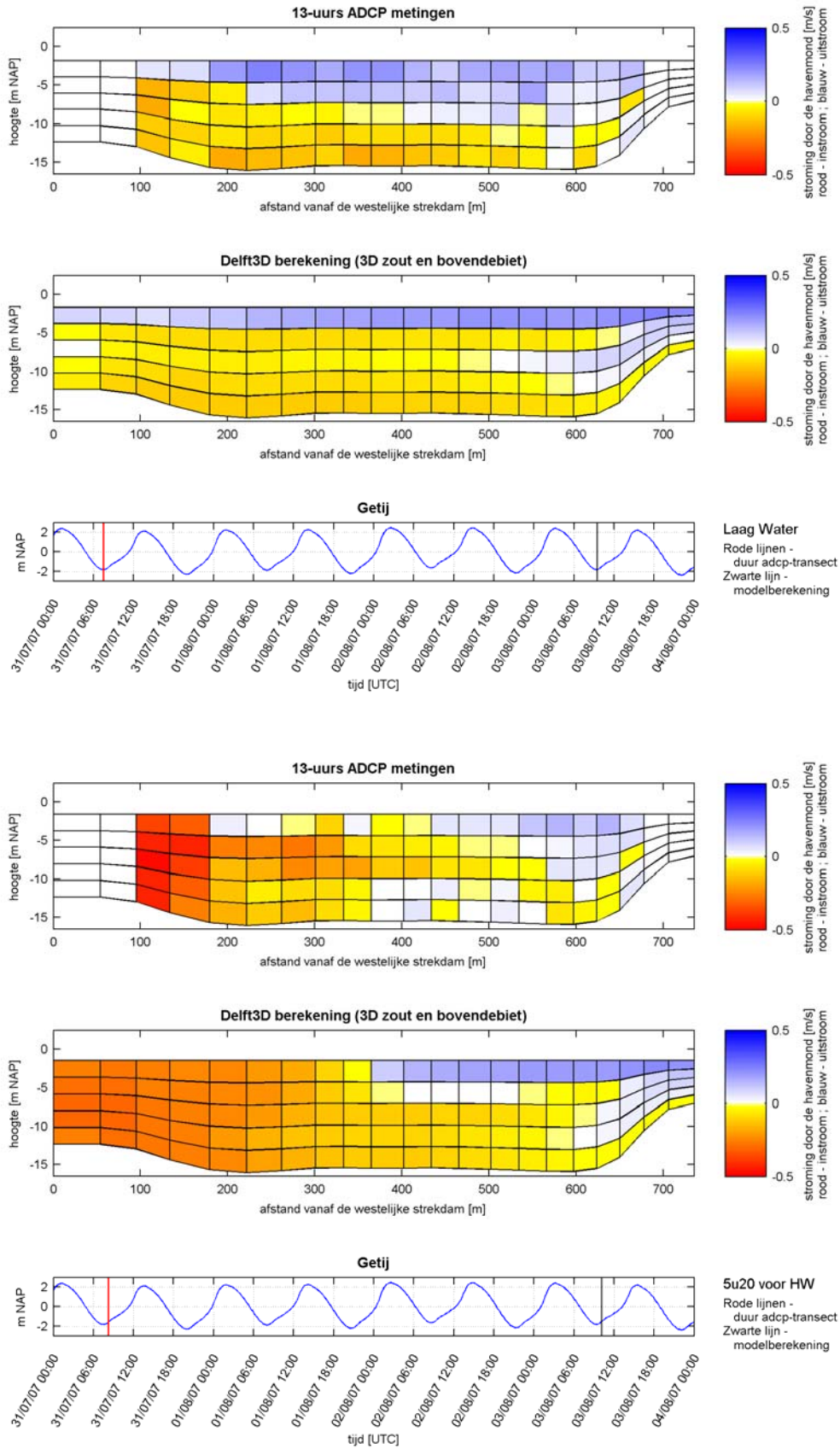


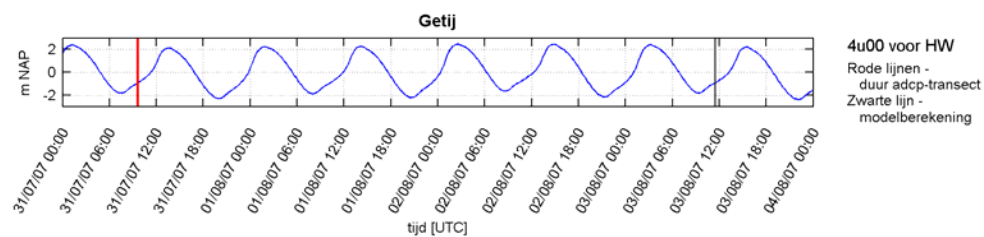
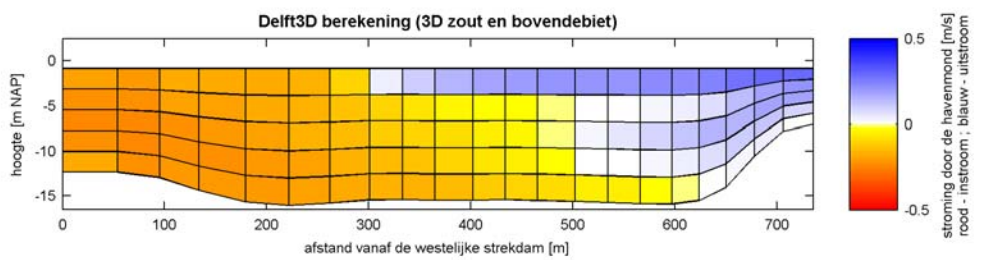
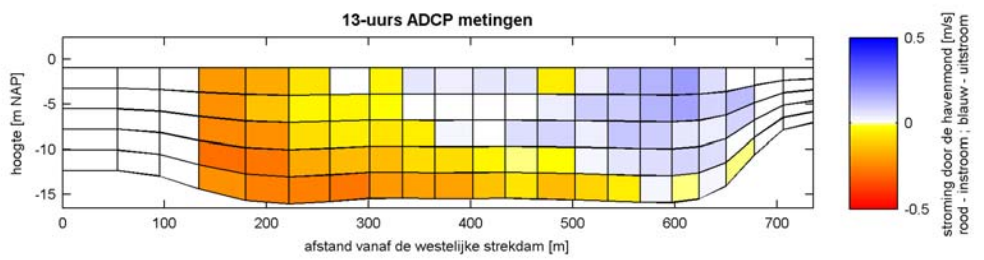
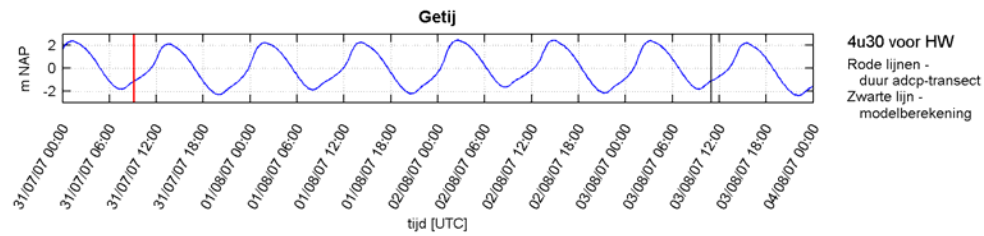
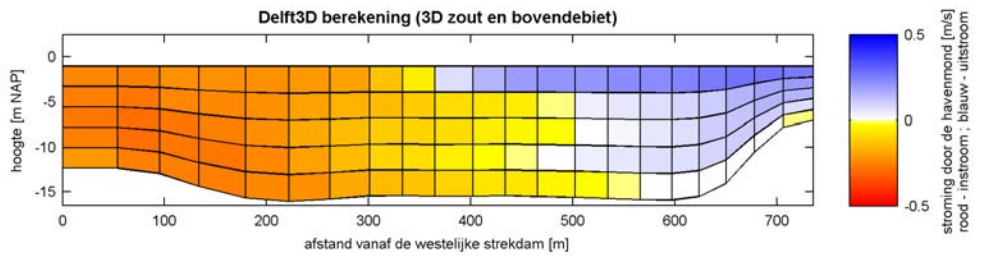
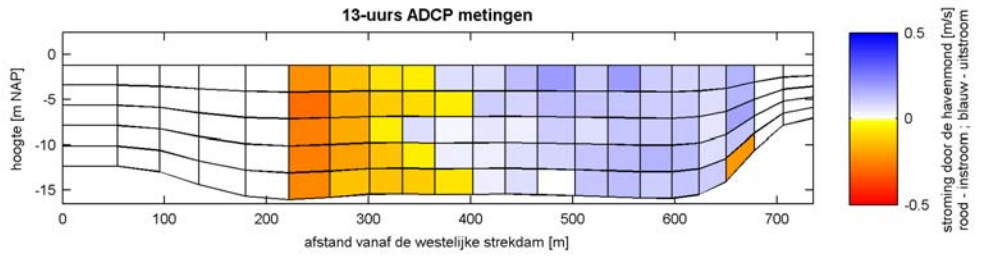


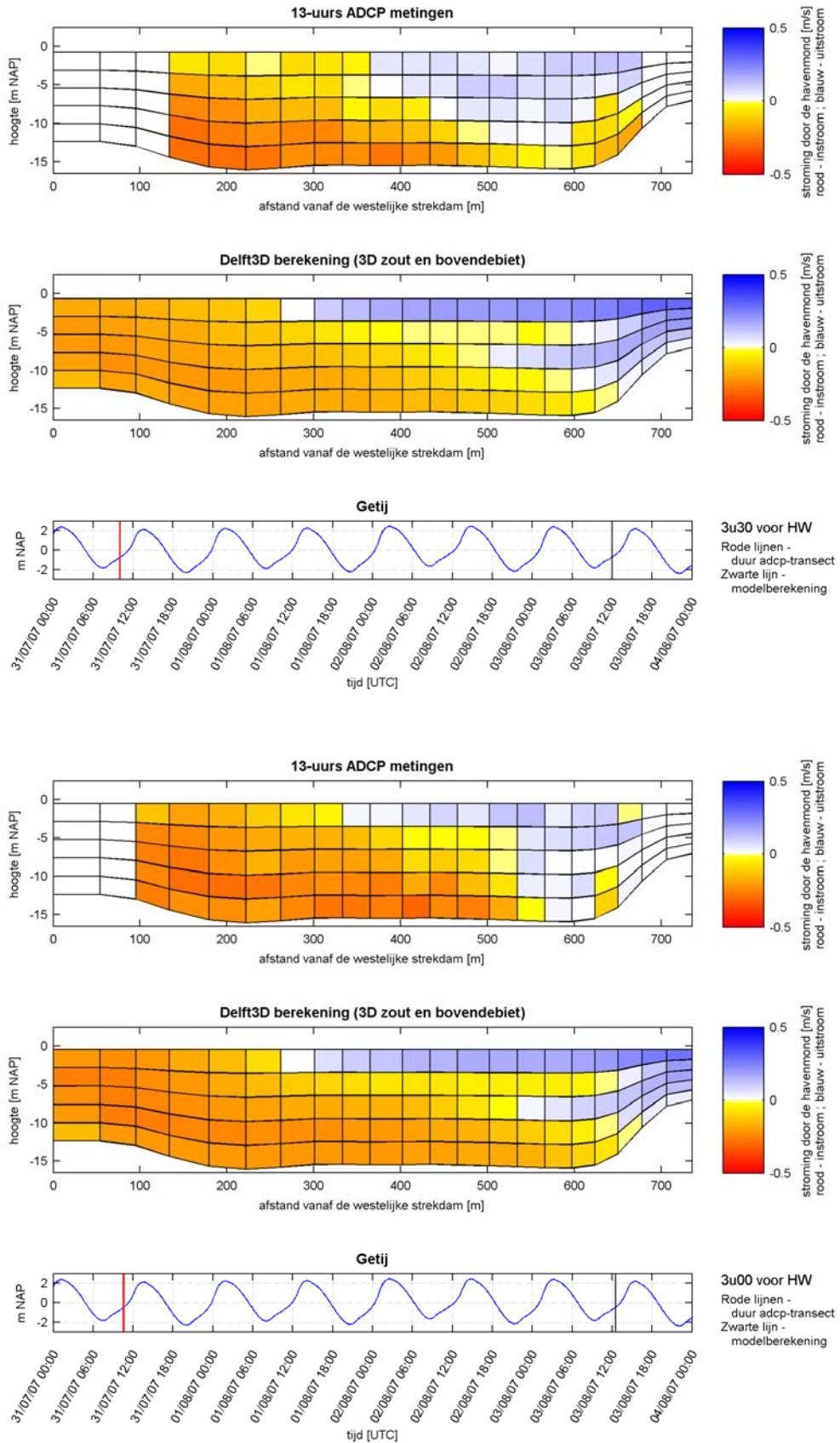


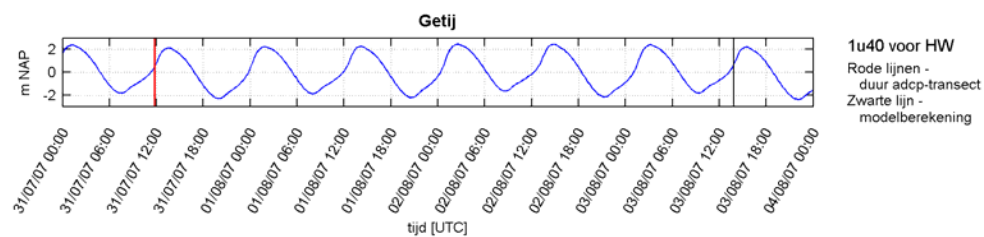
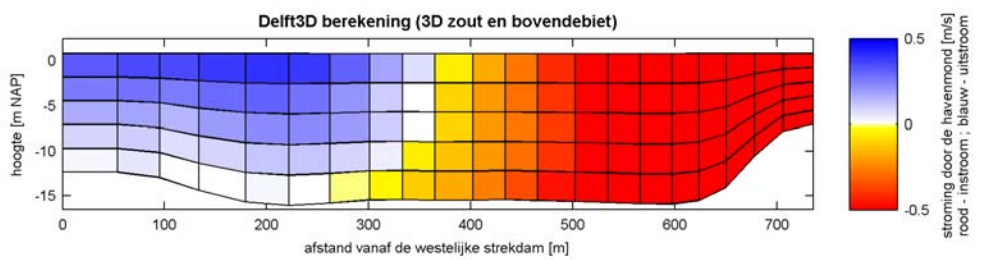
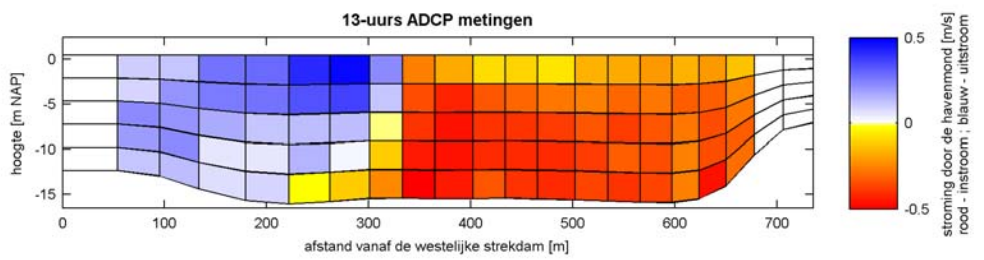
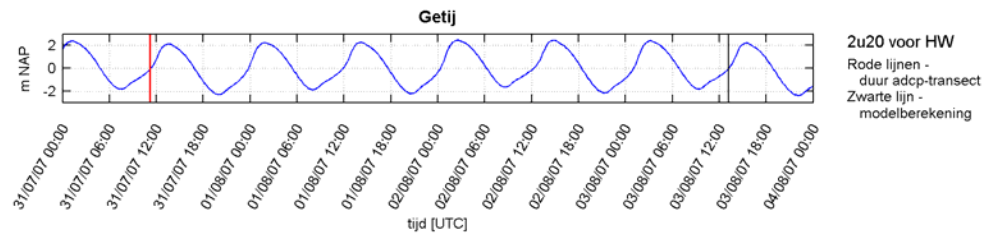
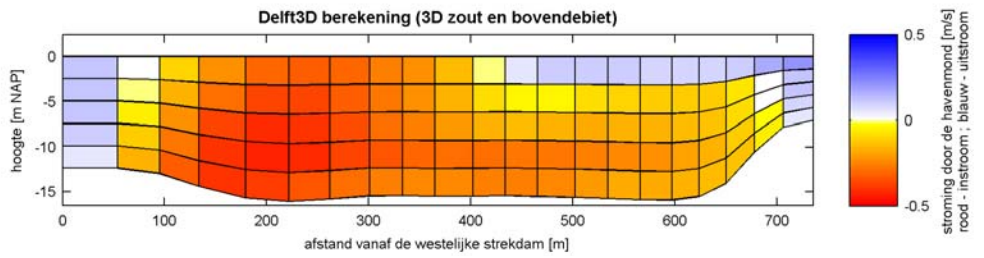
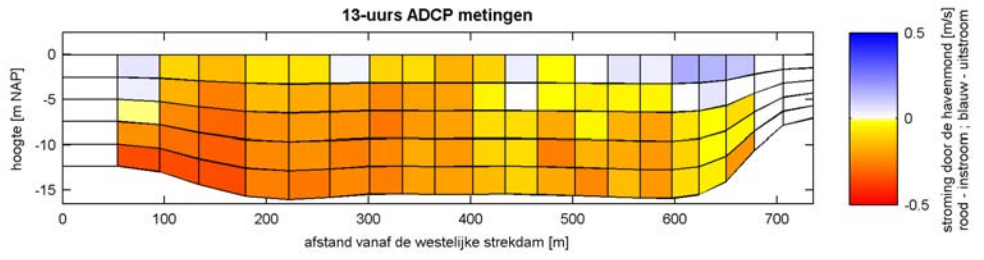


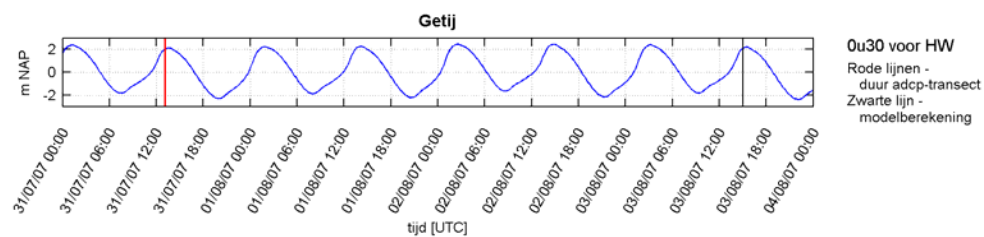
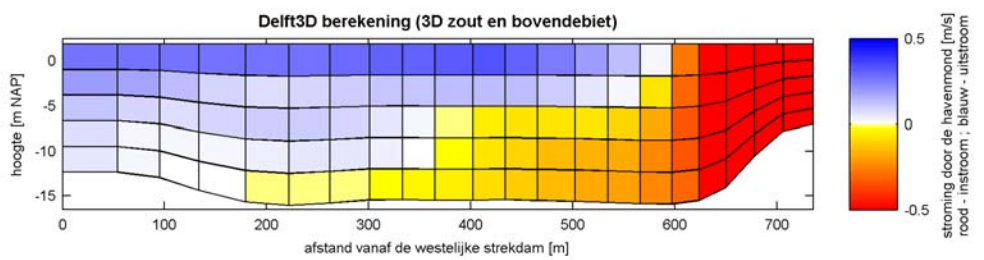
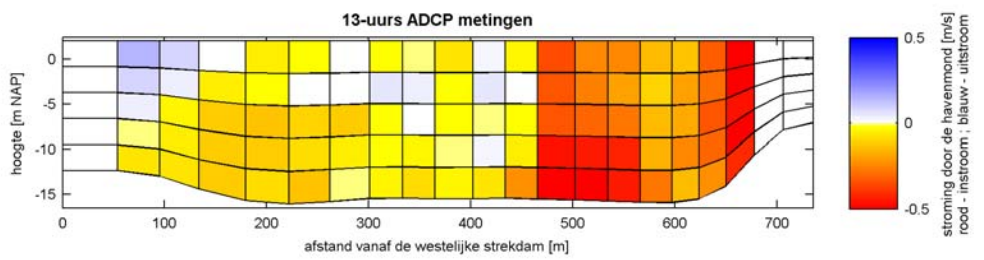
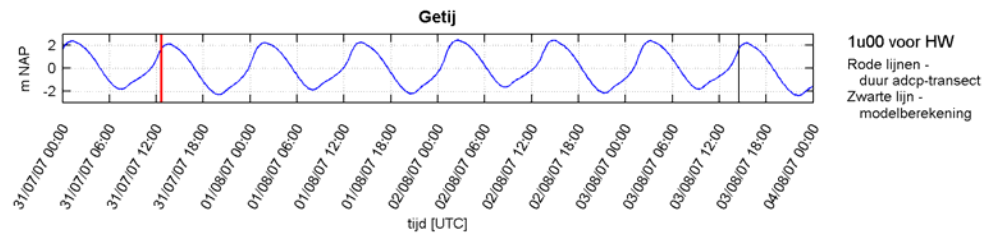
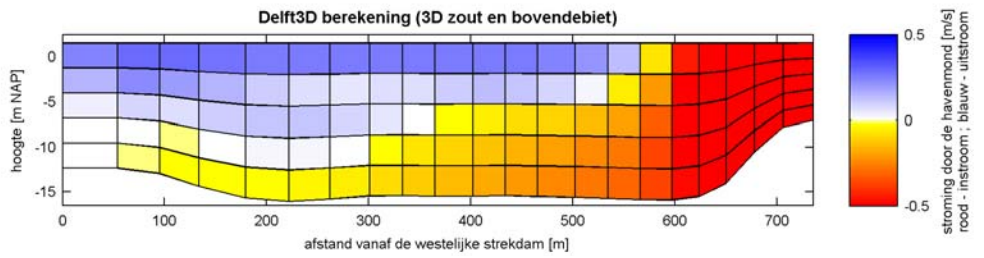
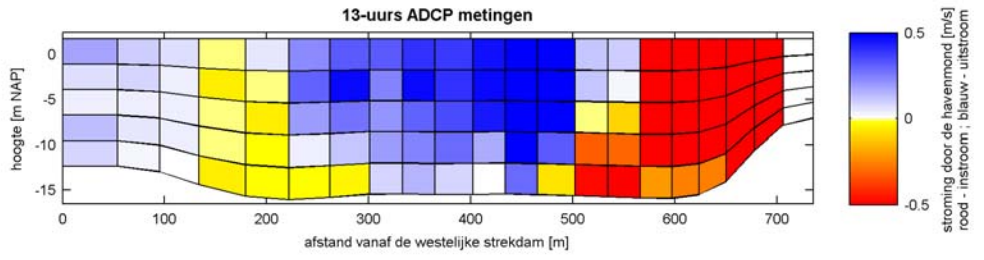
Bijlage D: Validatie van numerieke modelresultaten bij springtij: 13-uurs ADCP metingen springtij t.o.v. 3D model met zout en bovendebiet

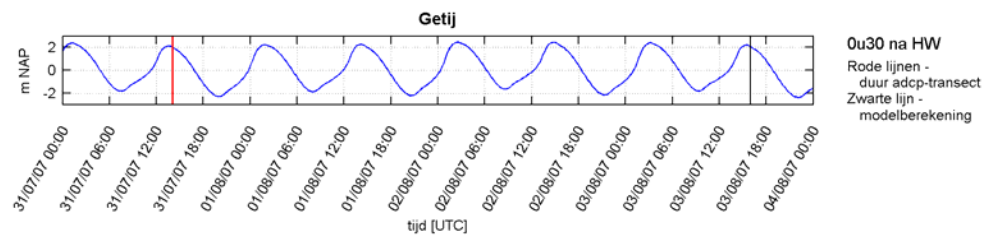
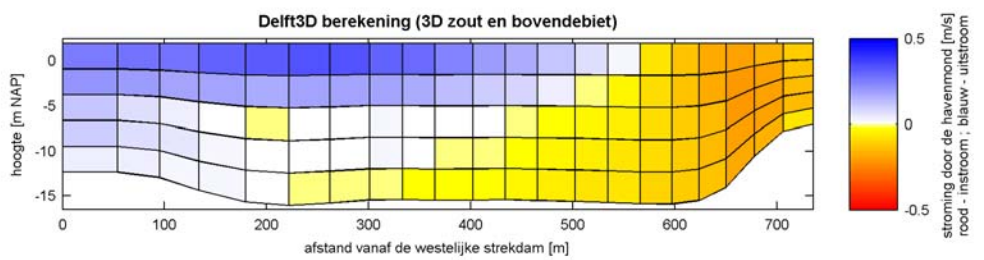
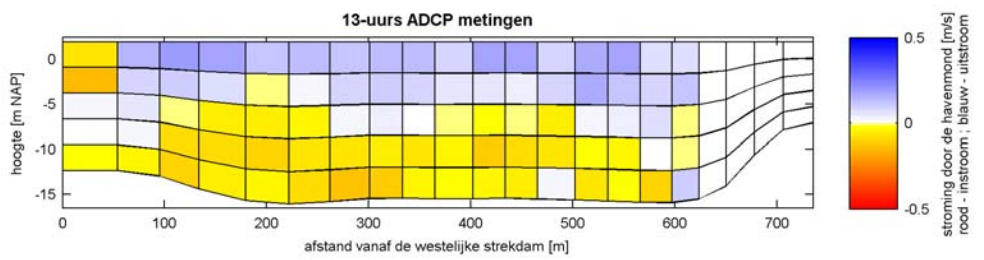
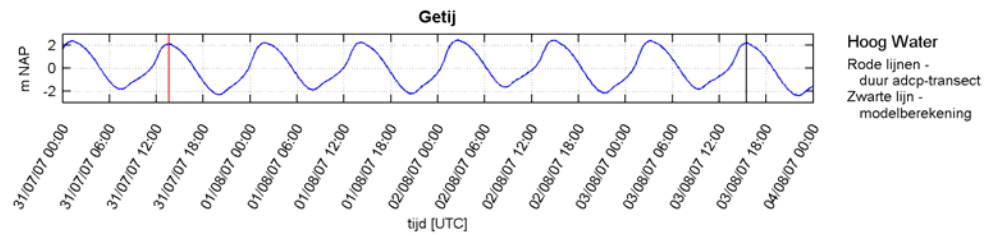
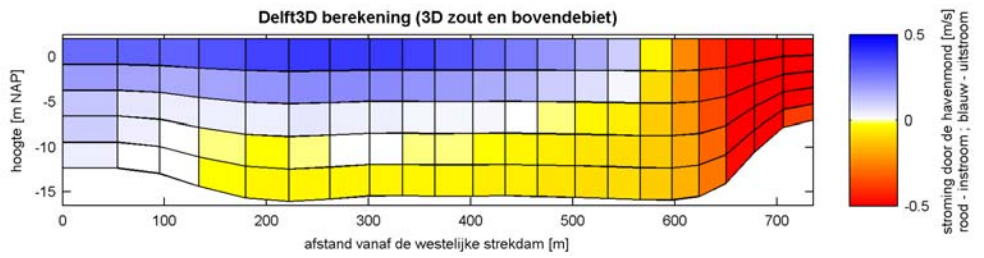
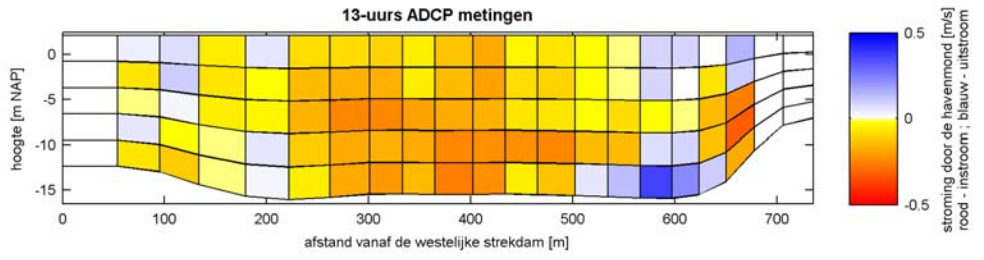


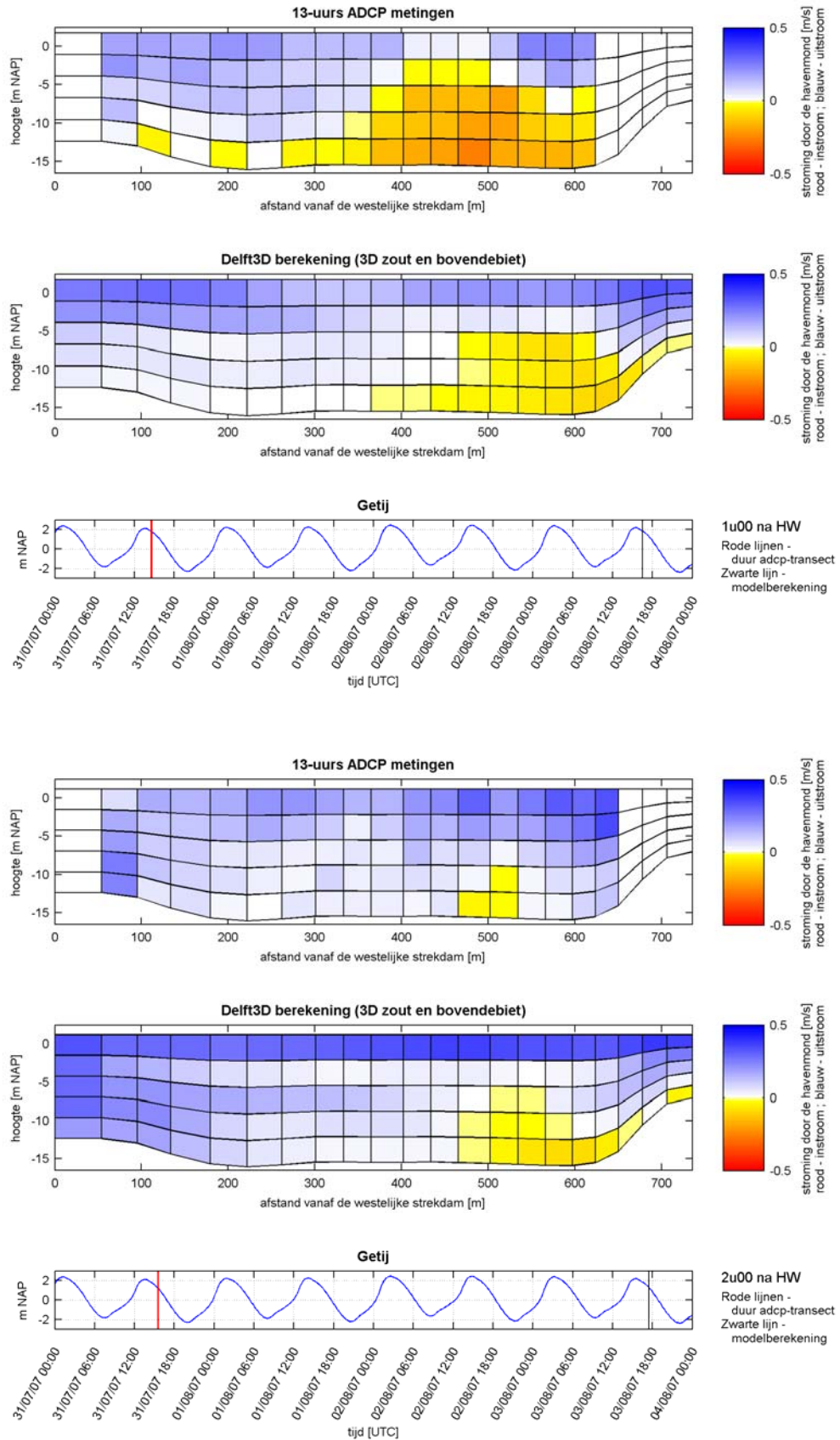


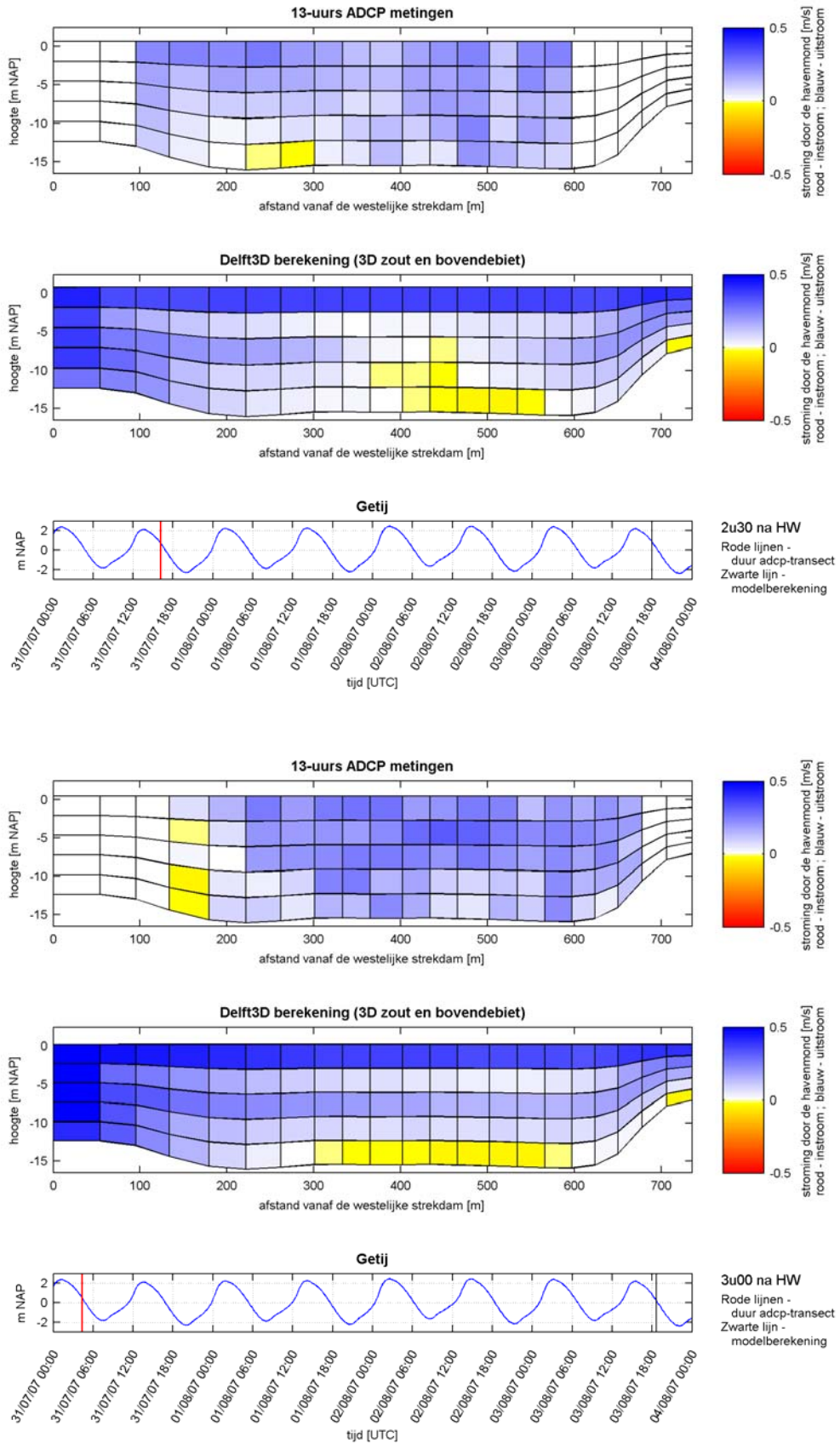


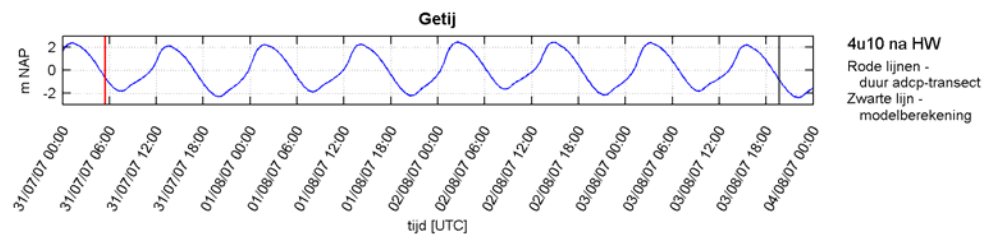
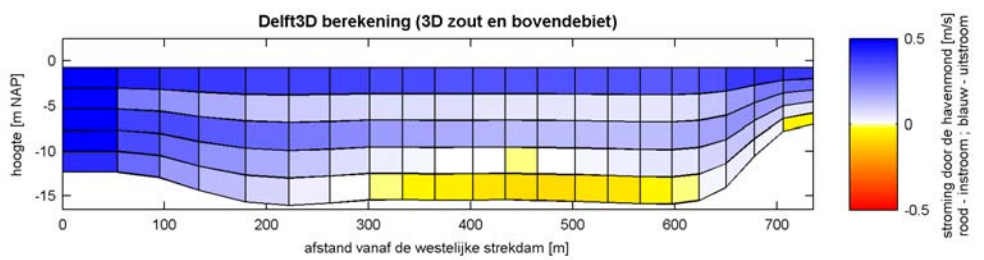
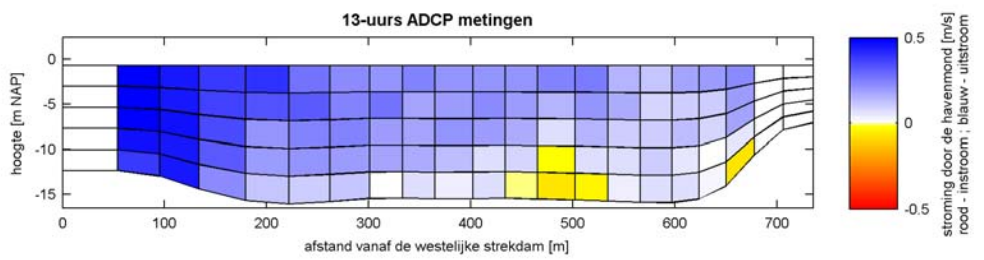
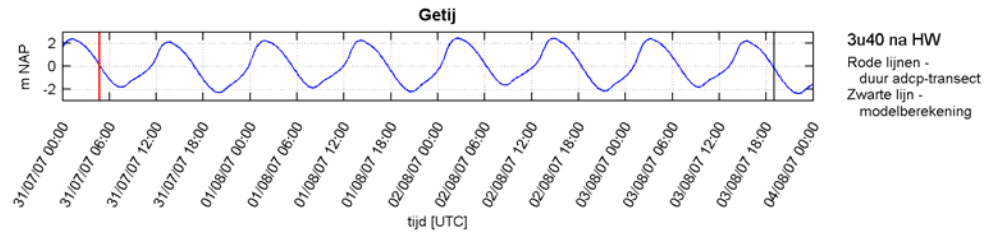
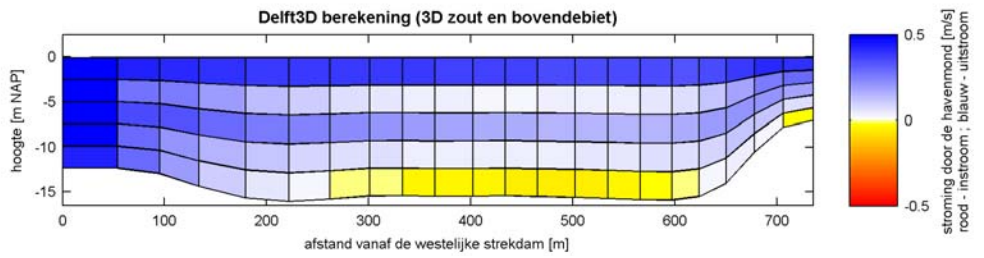
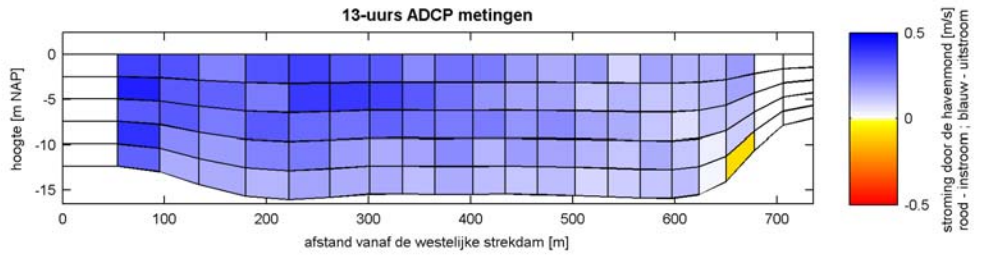


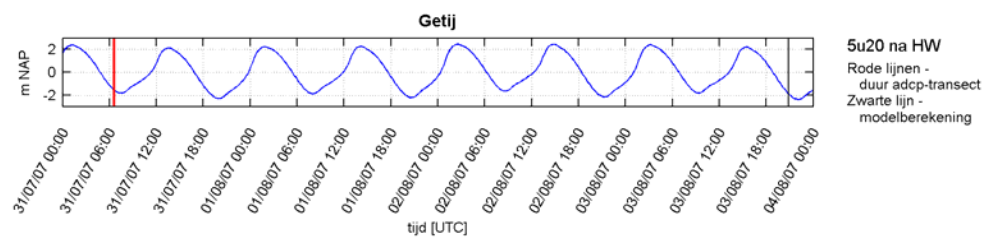
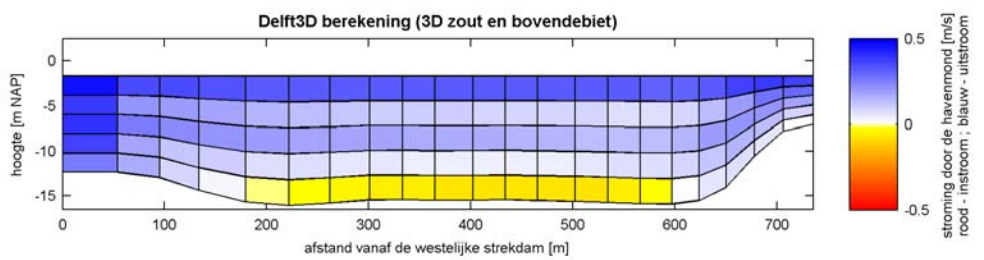
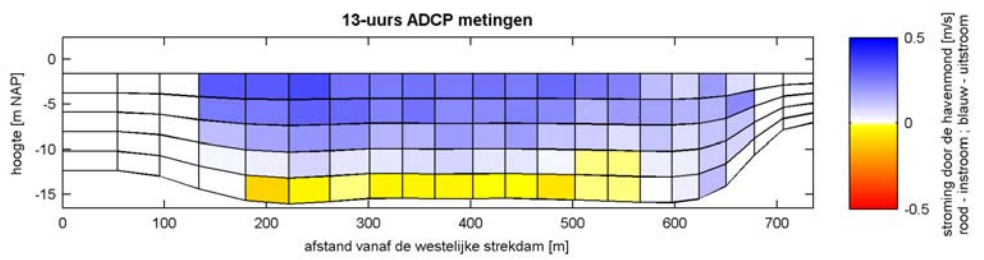
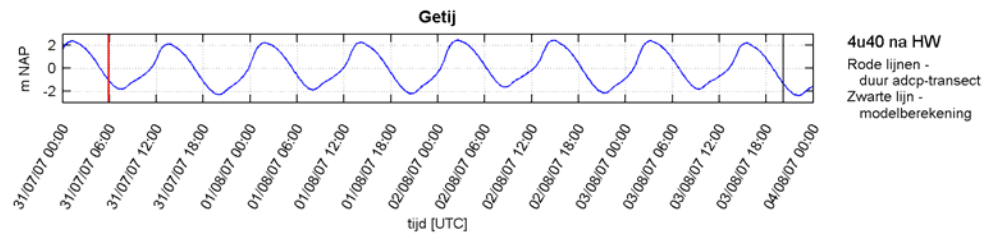
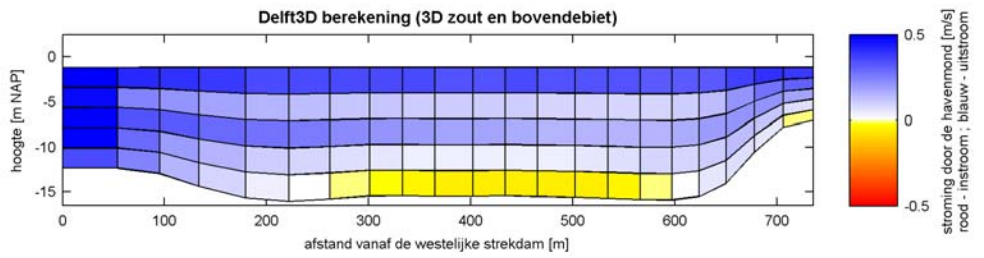
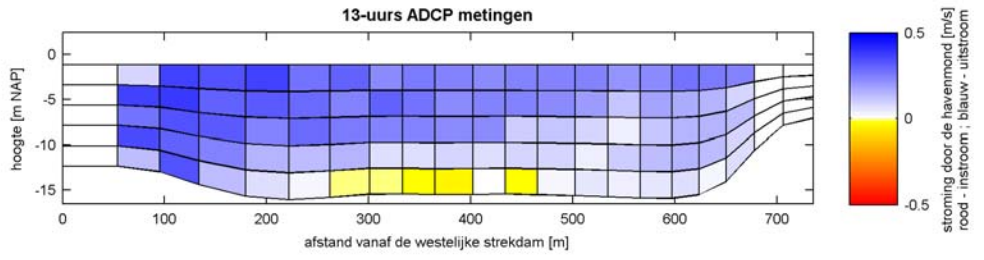


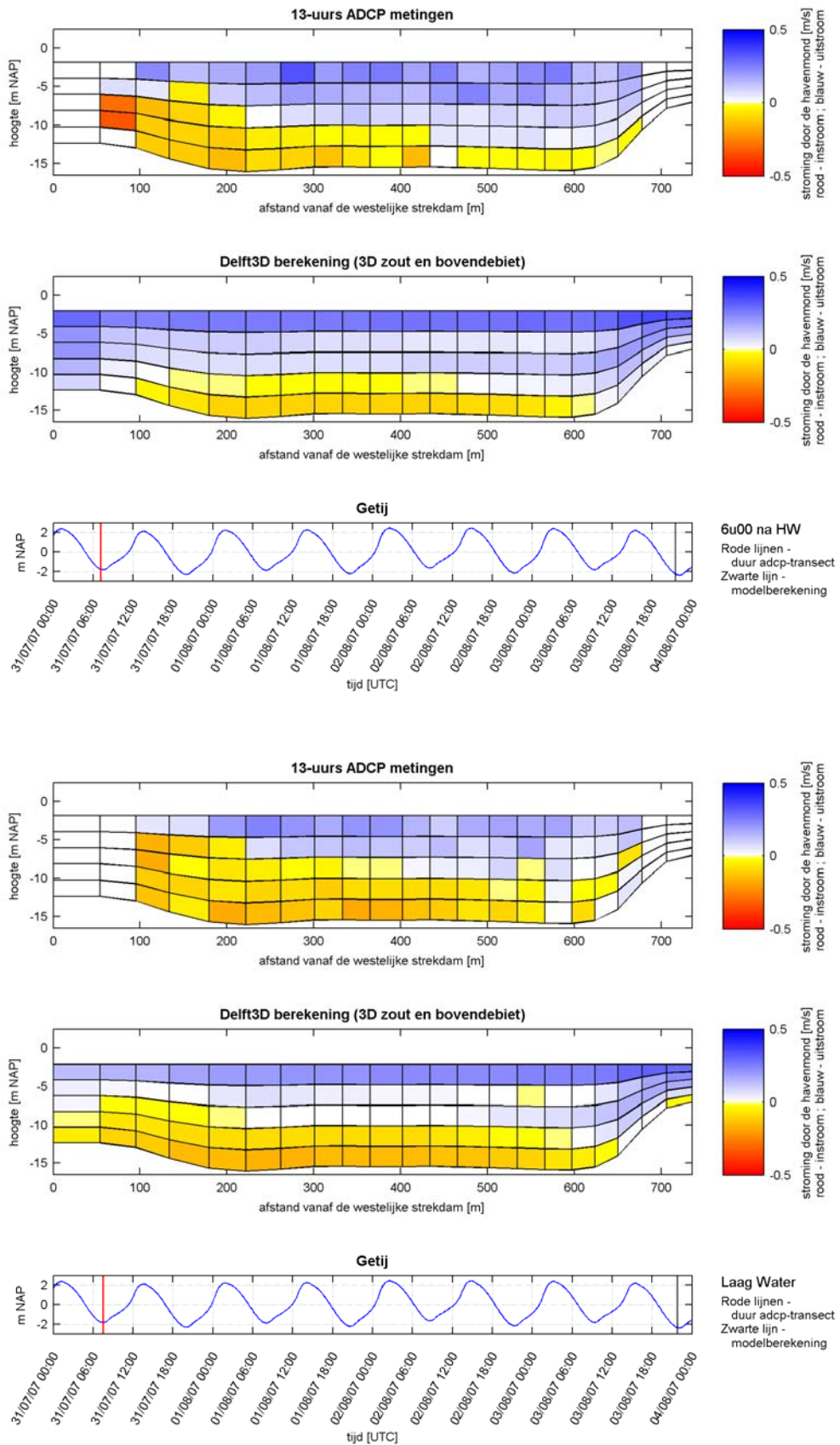




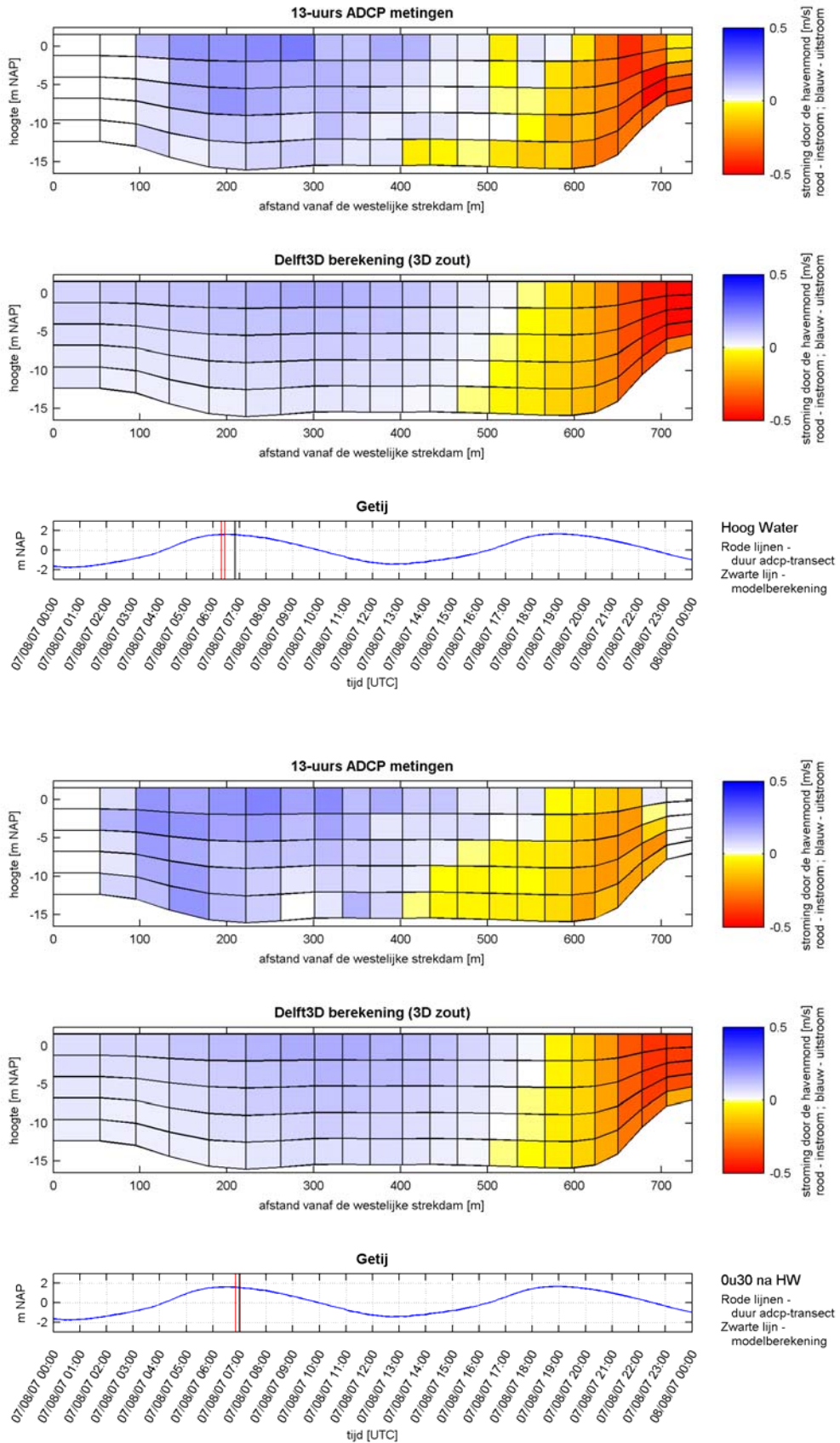


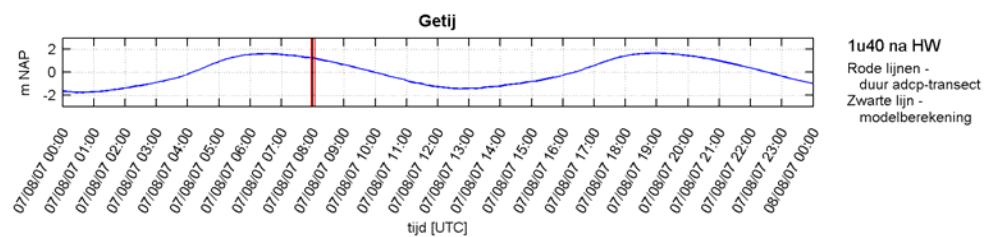
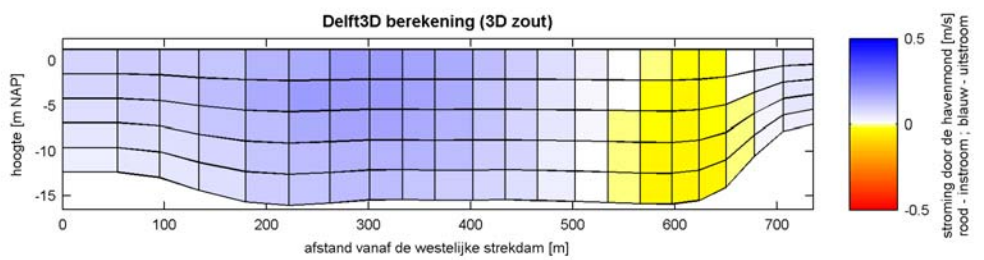
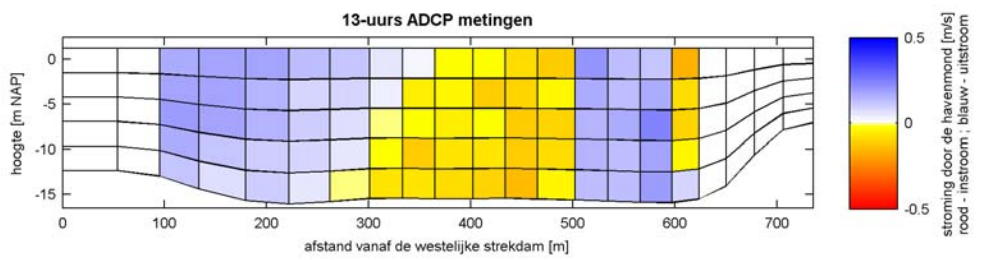
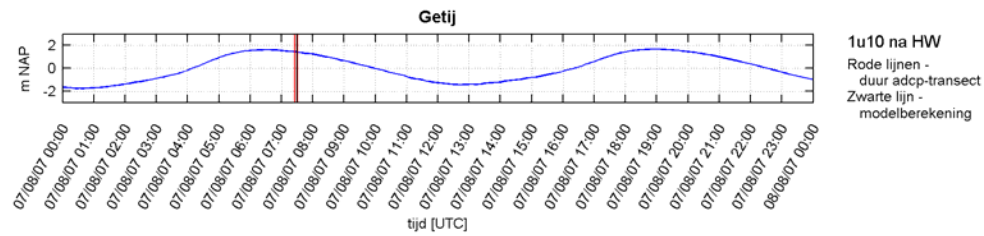
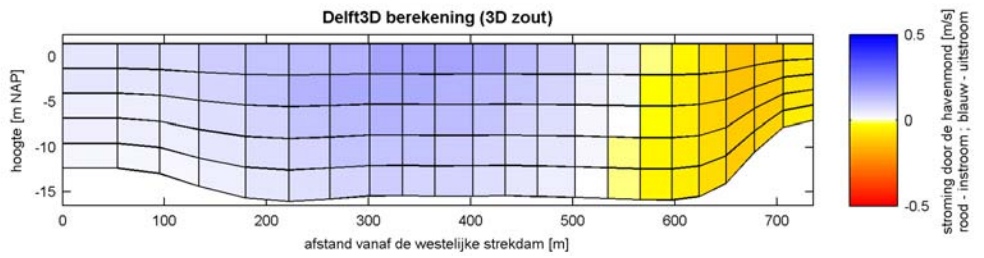
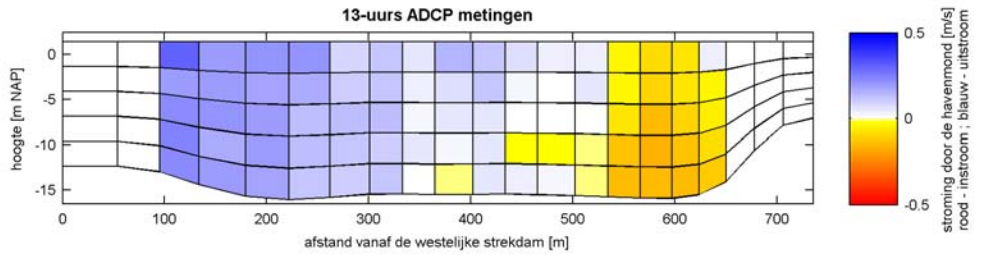


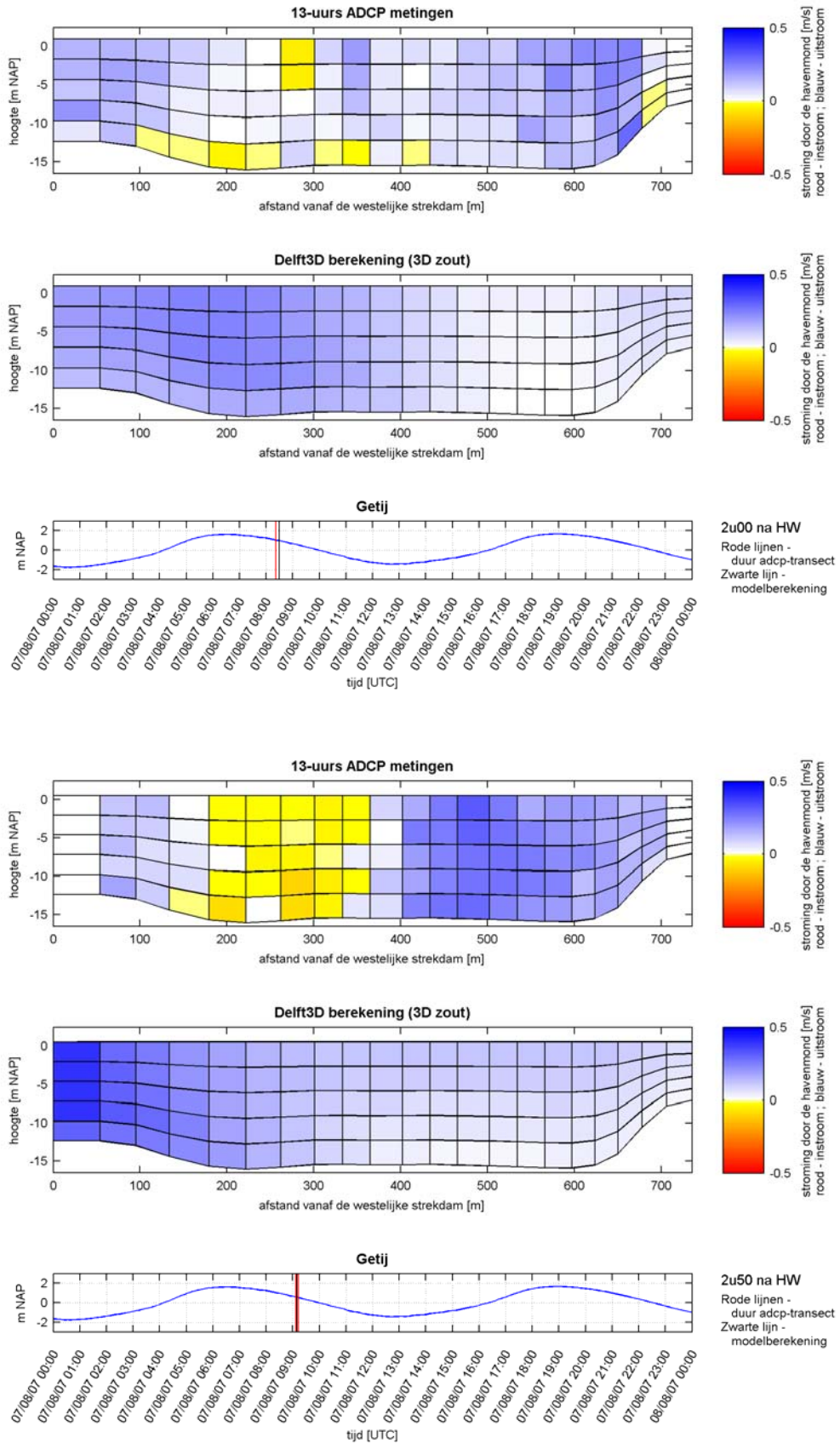


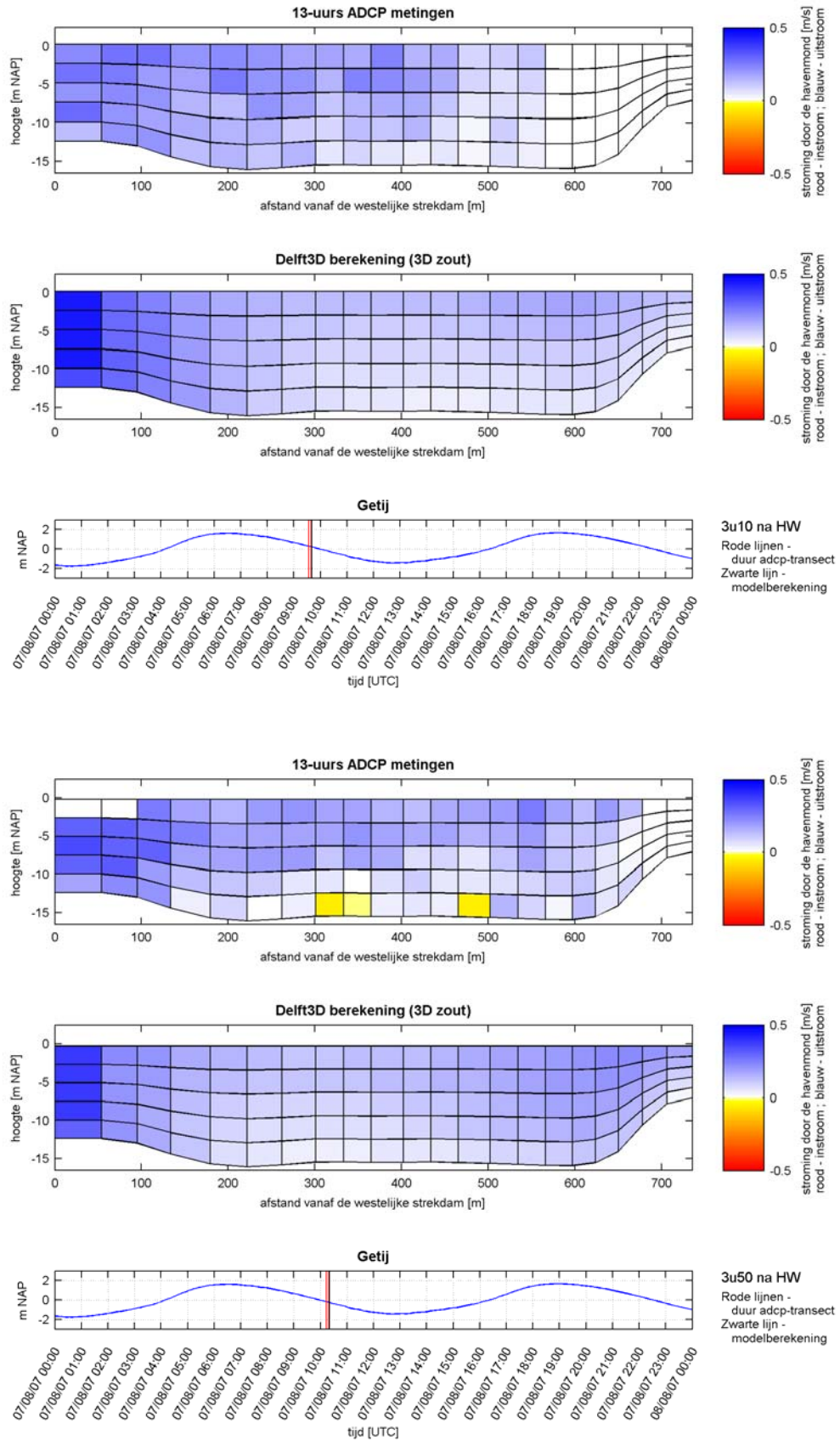


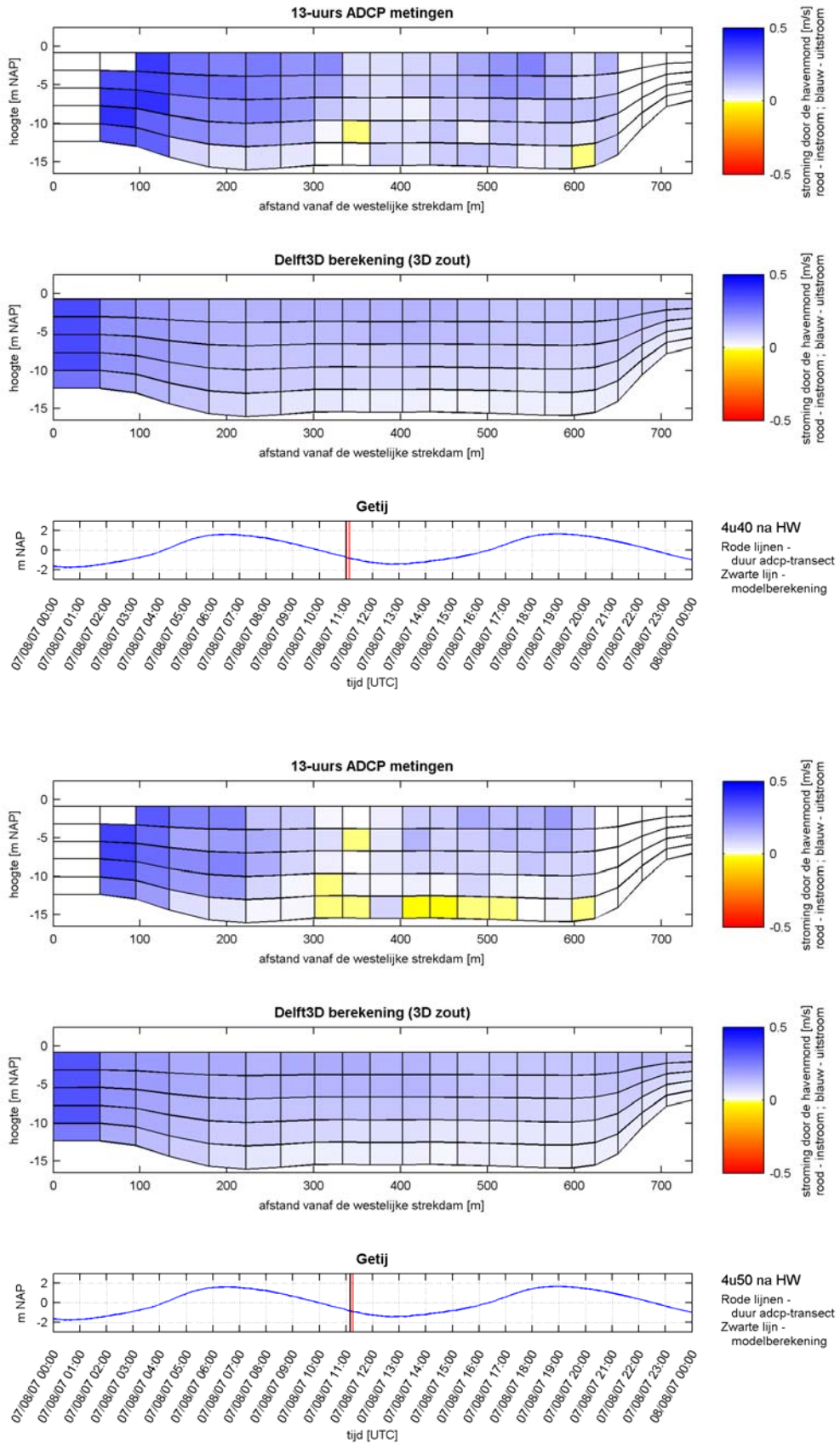
Bijlage E: Validatie van numerieke modelresultaten bij doortij: 13-uurs ADCP metingen doortij t.o.v. 3D model met zout

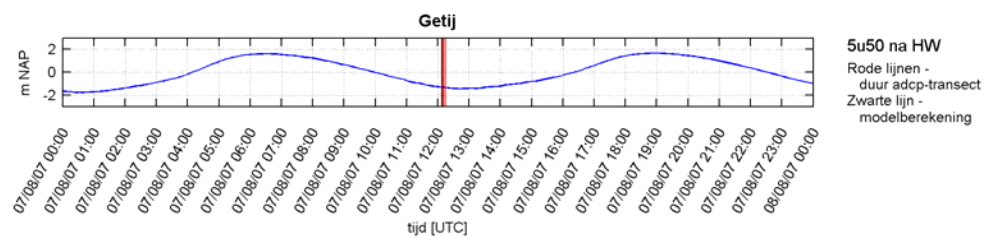
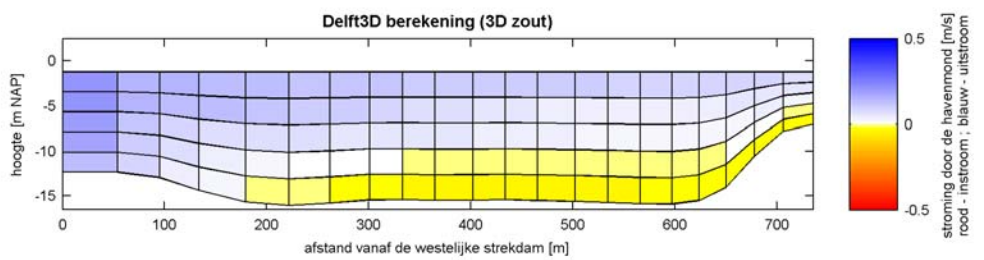
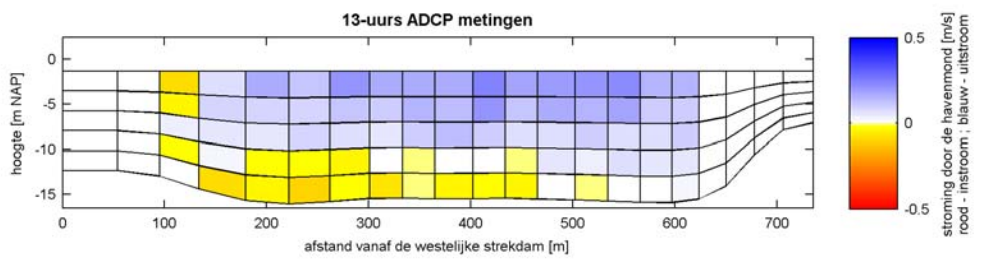
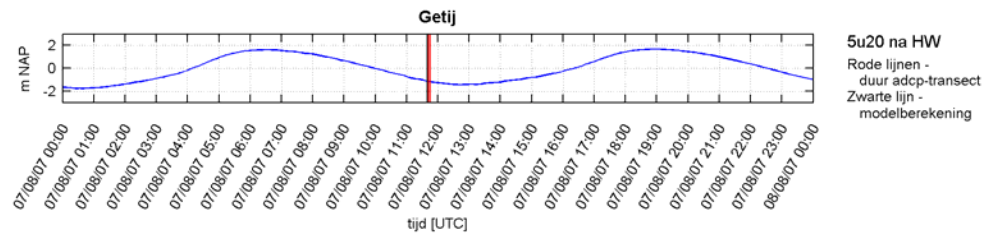
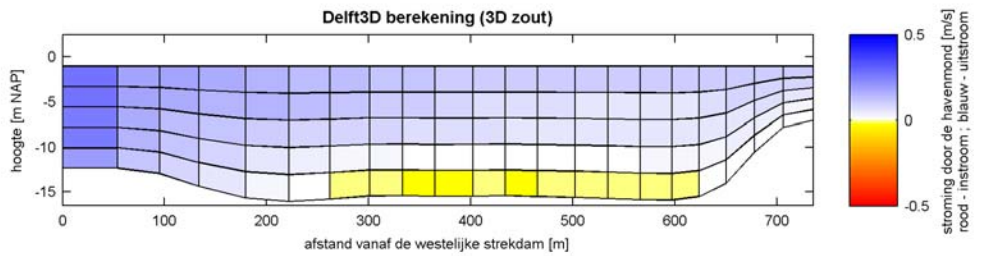
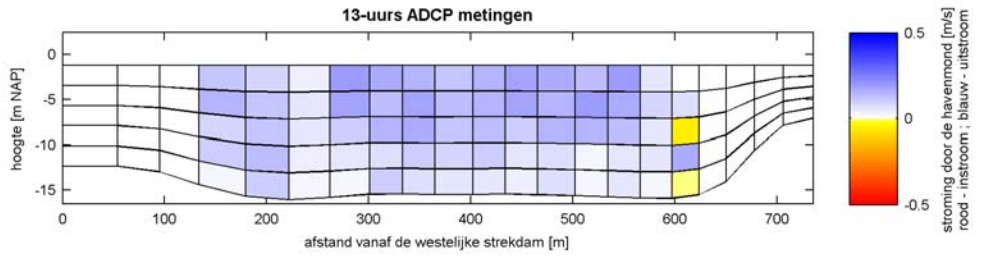


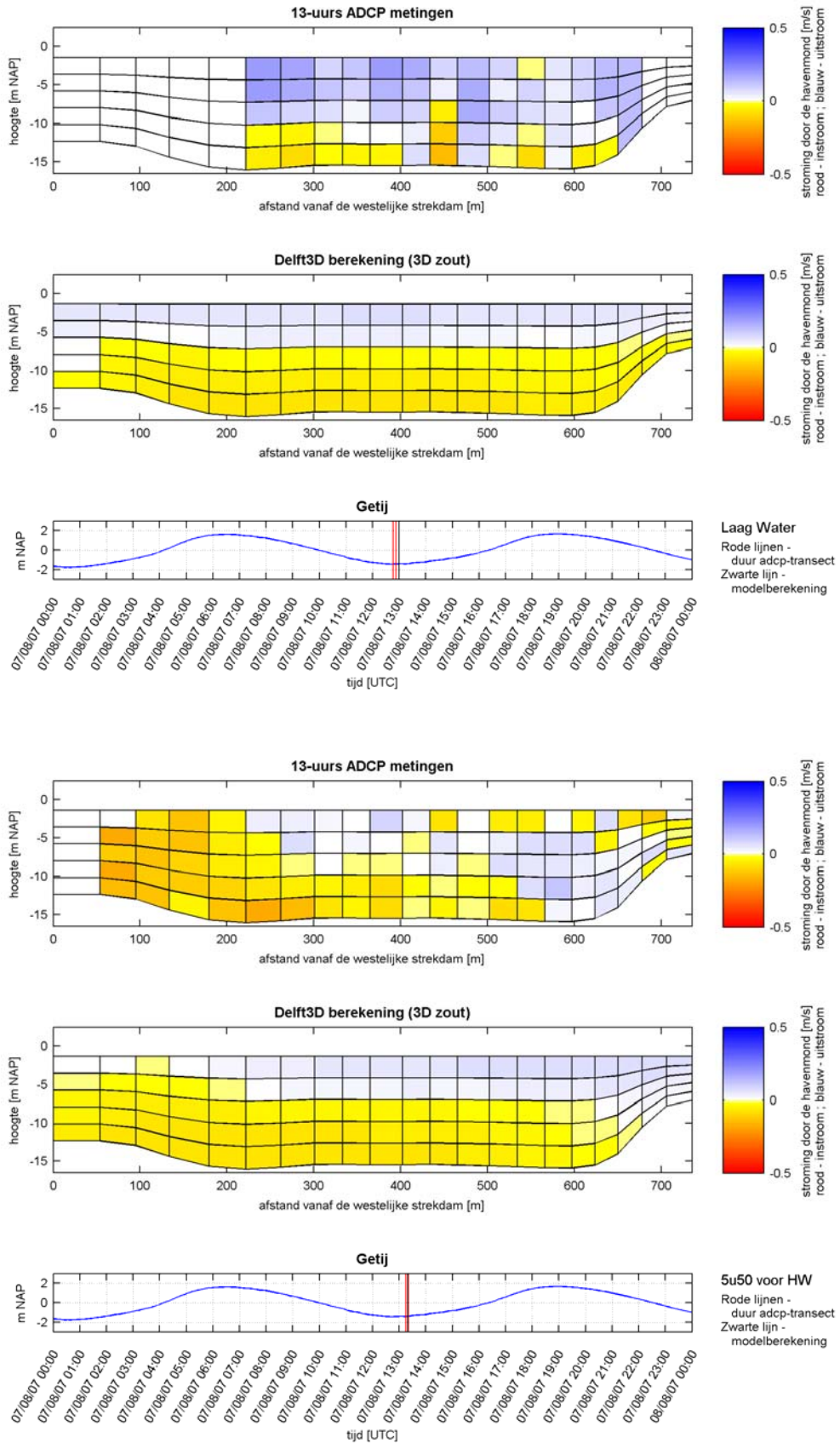


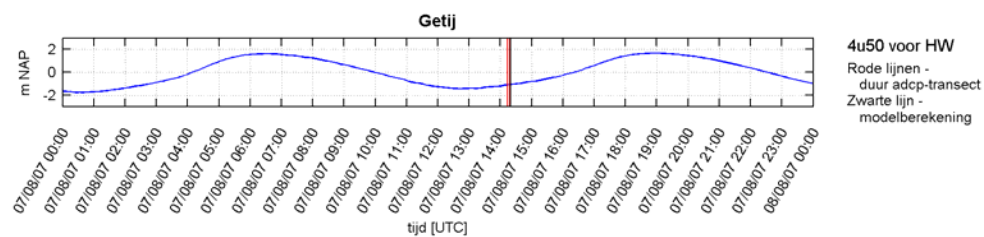
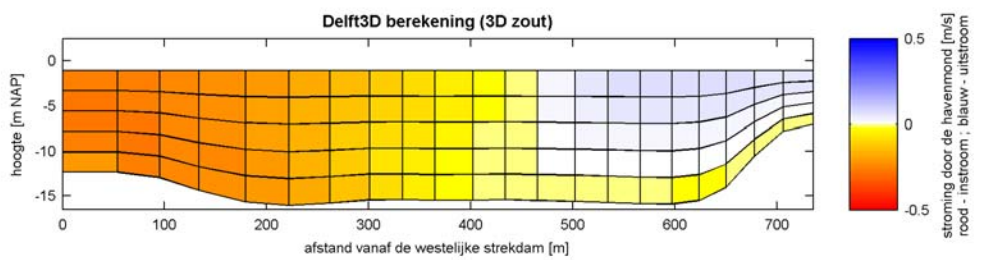
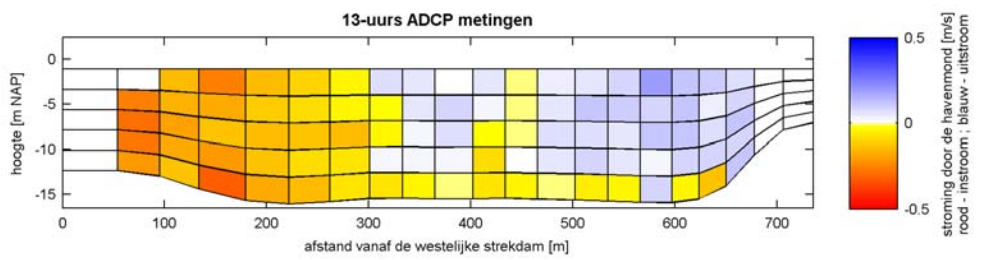
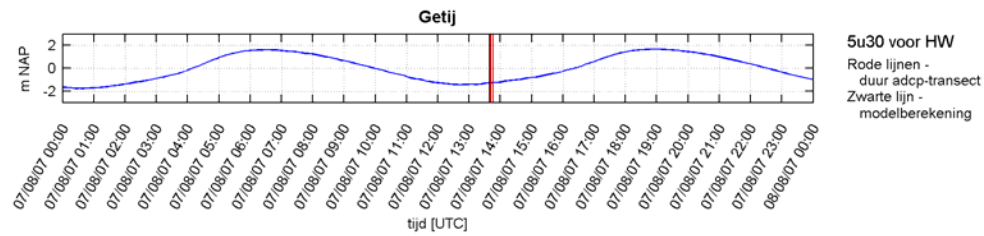
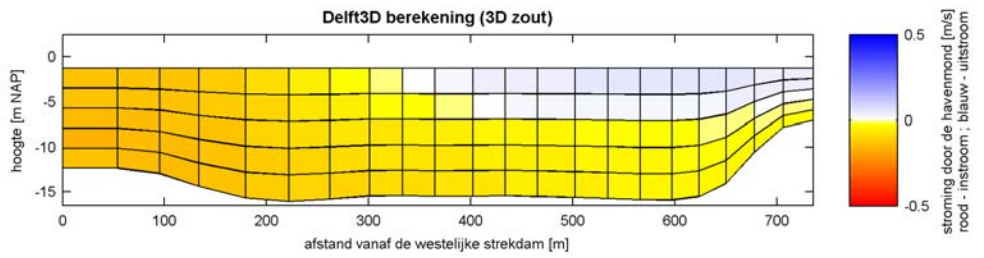
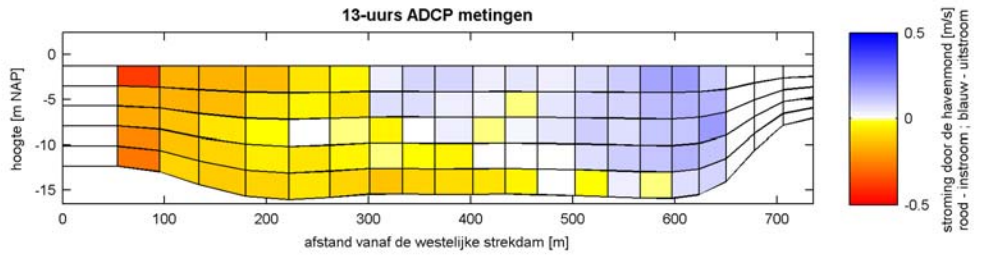


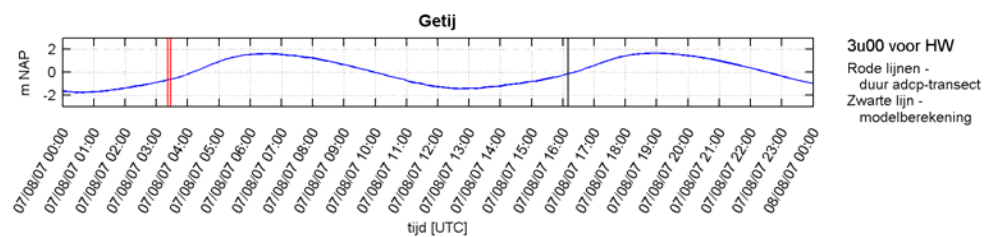
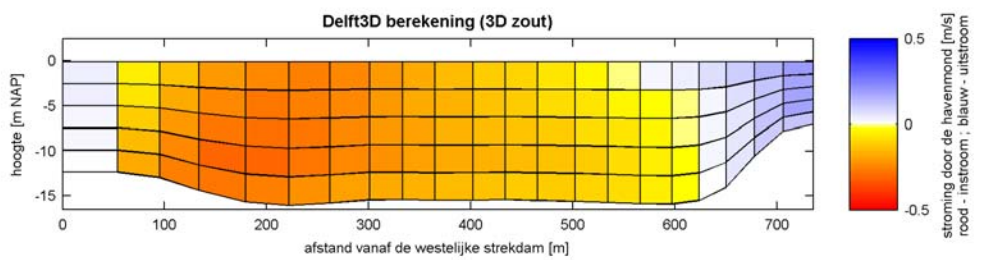
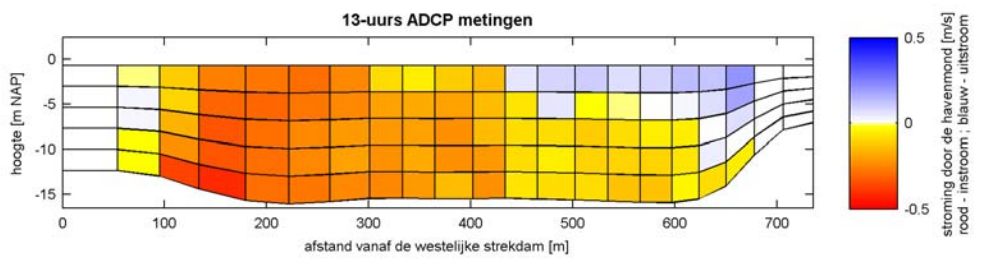
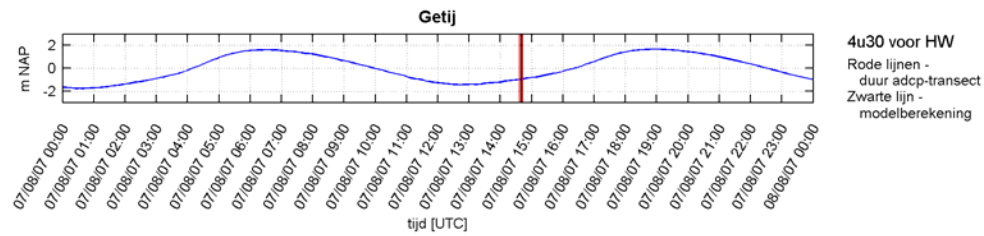
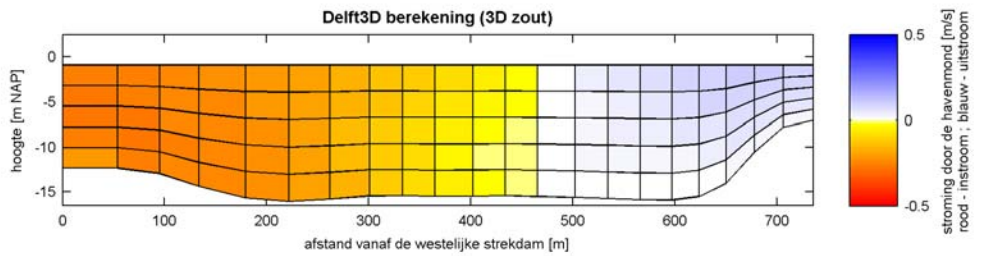
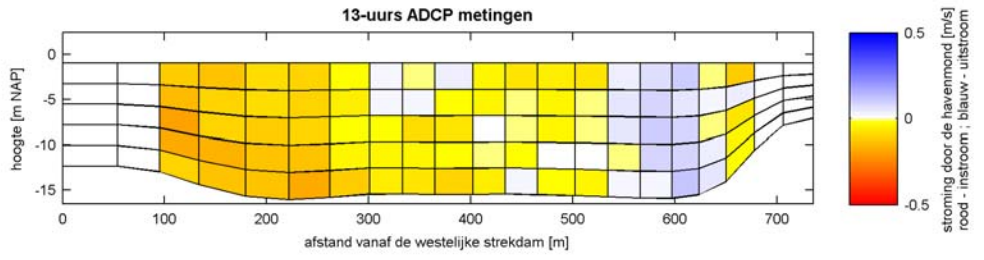


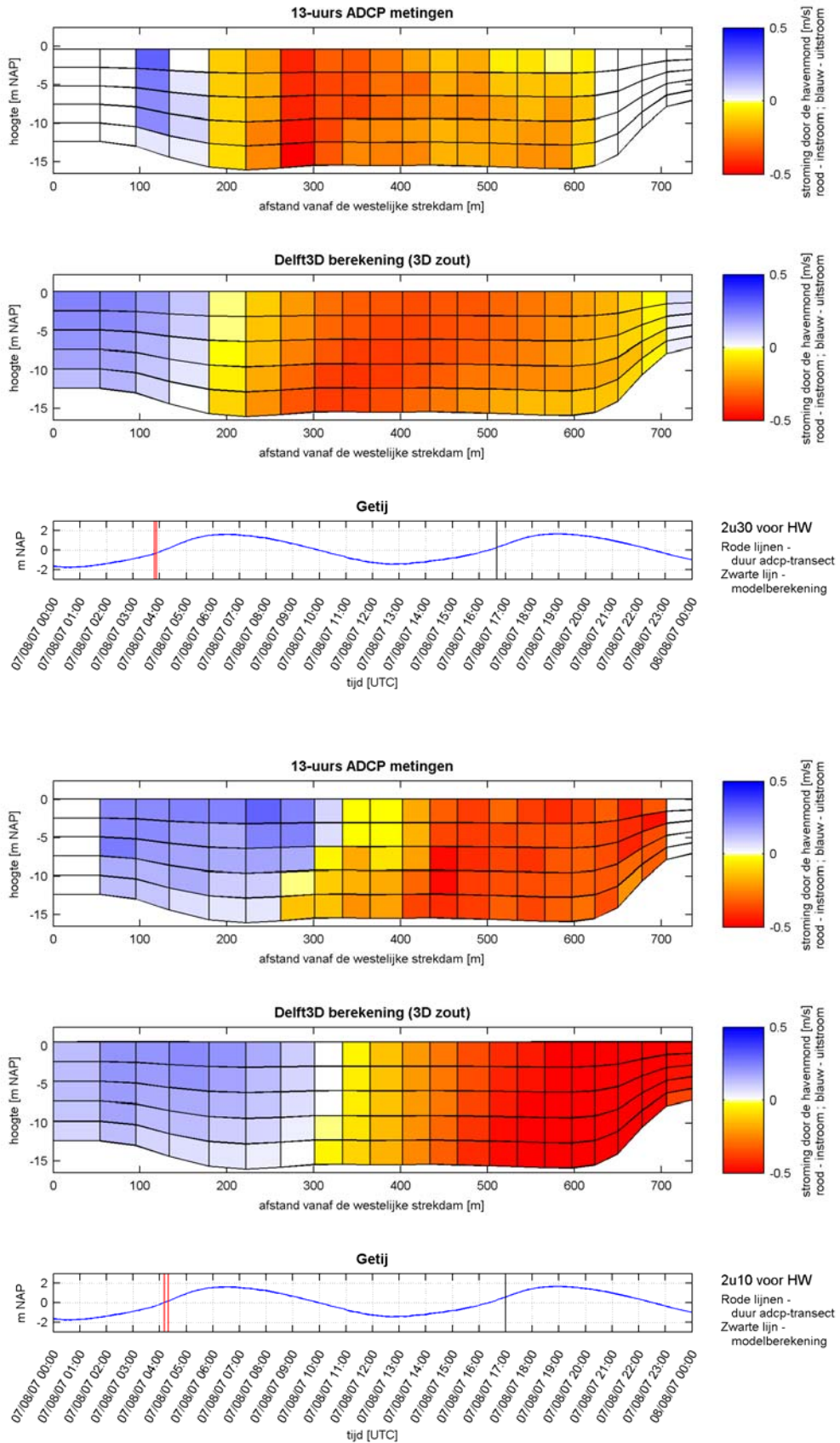


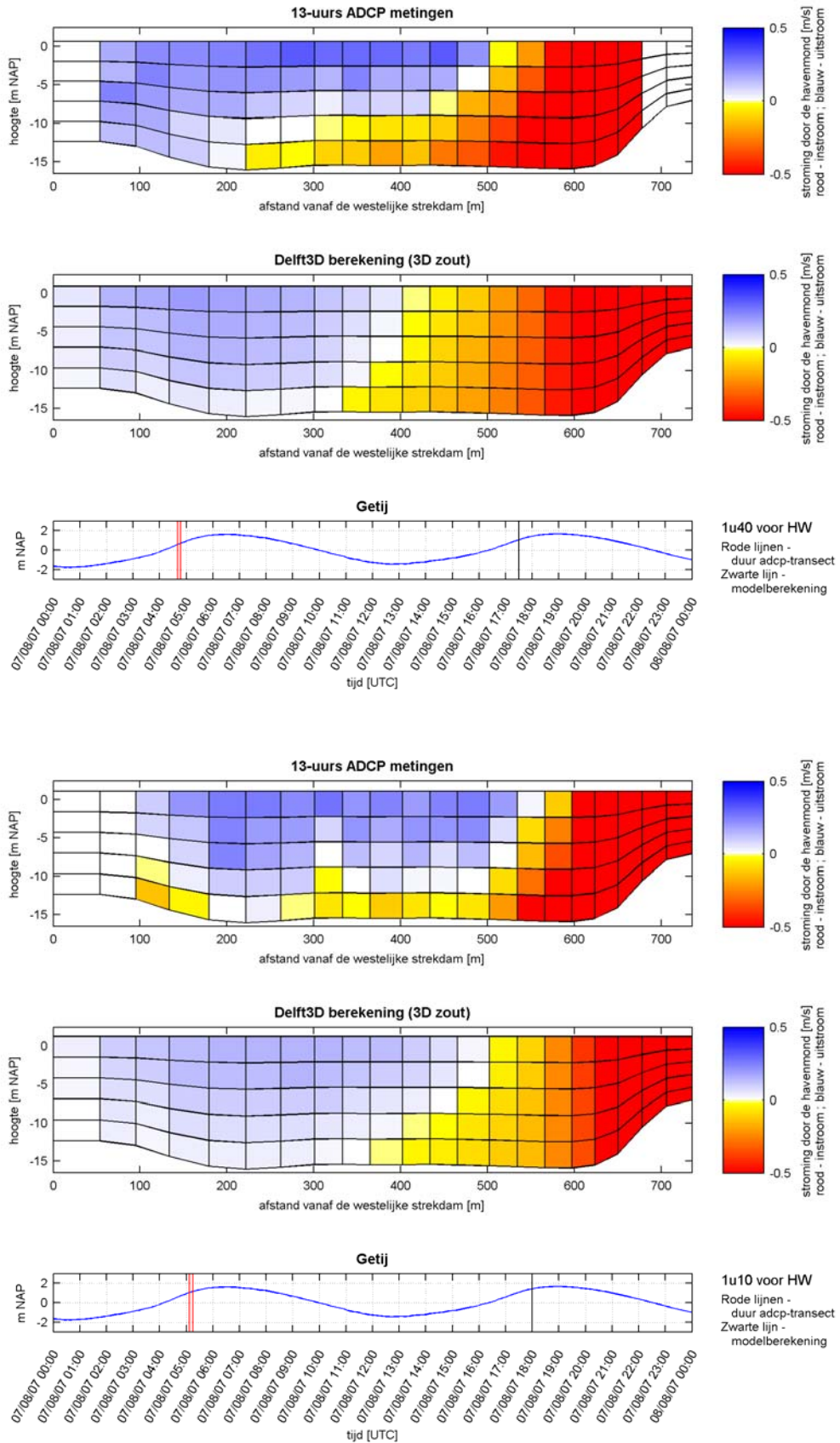


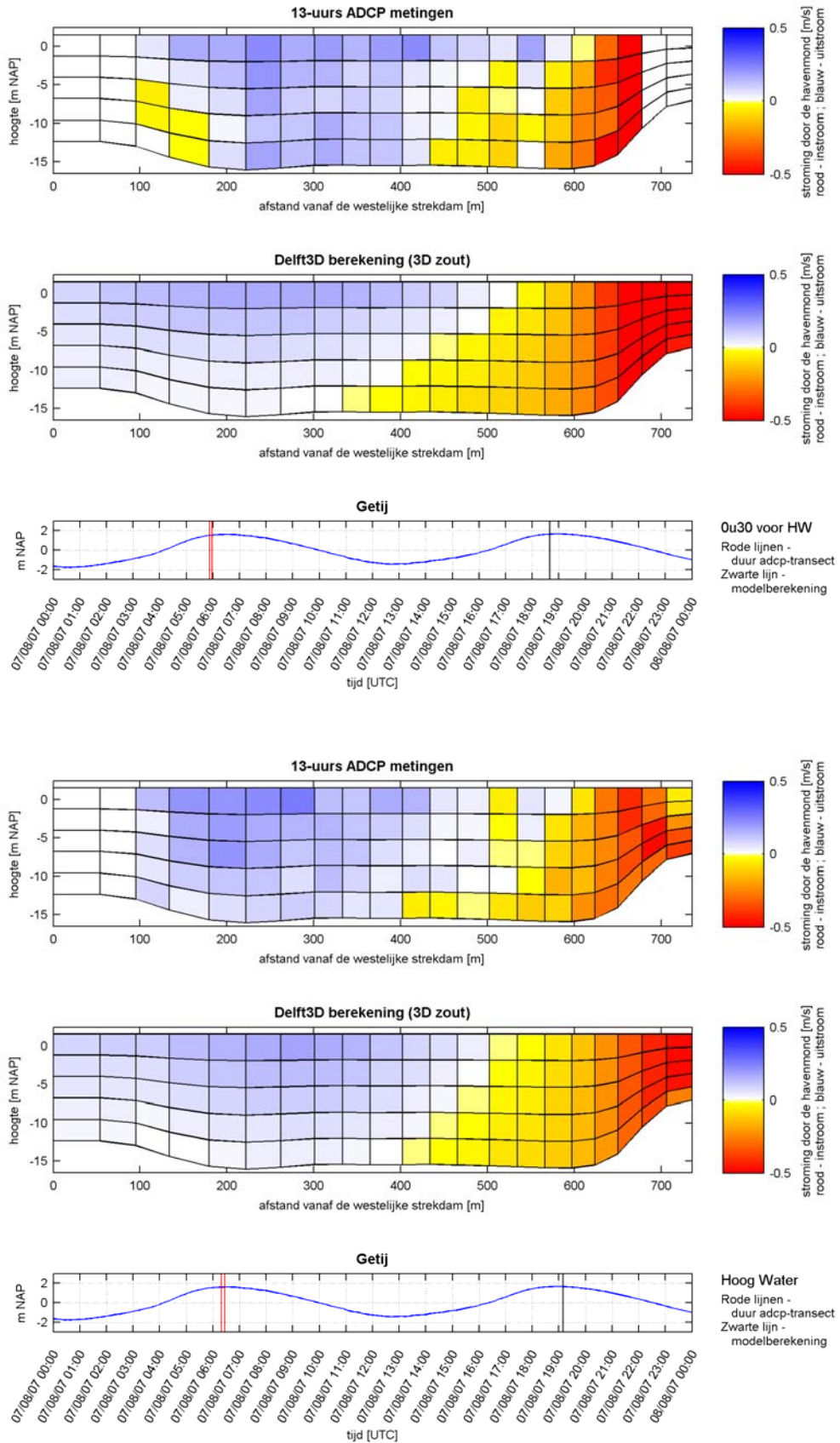




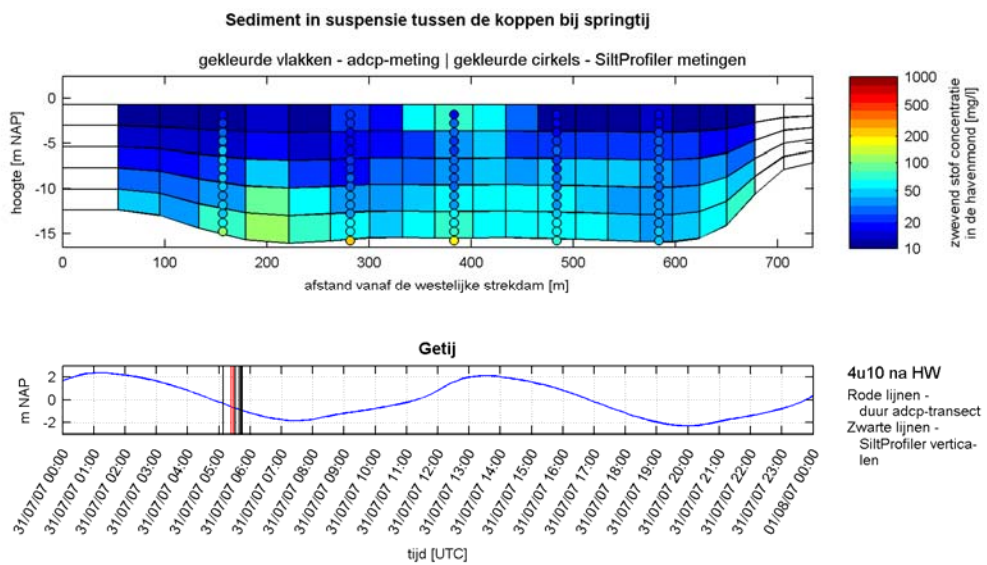
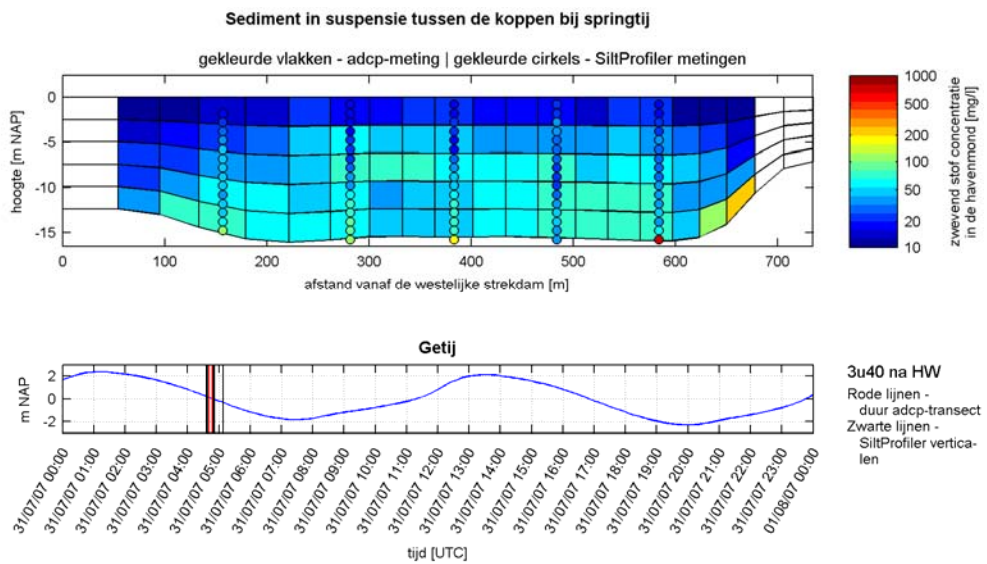
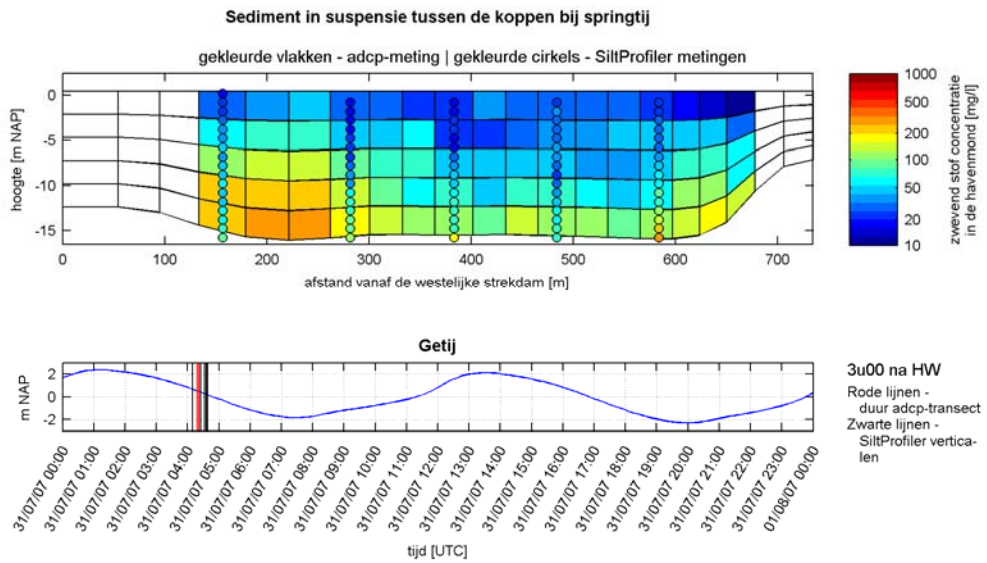


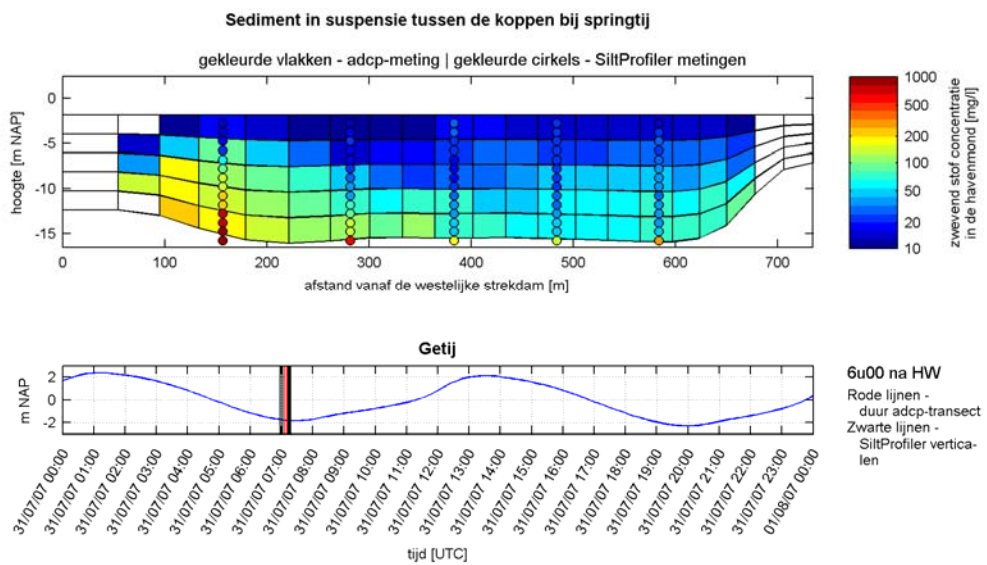
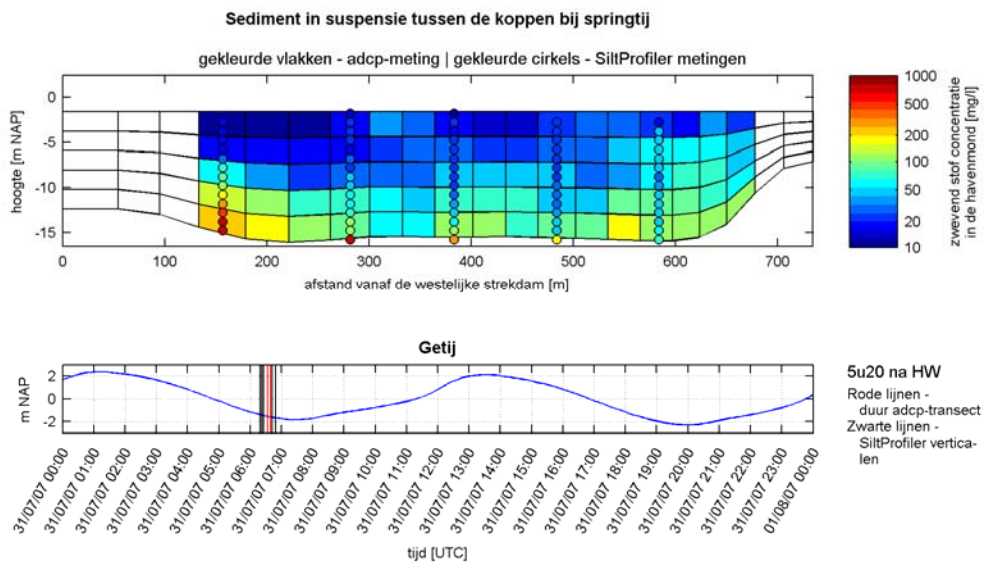
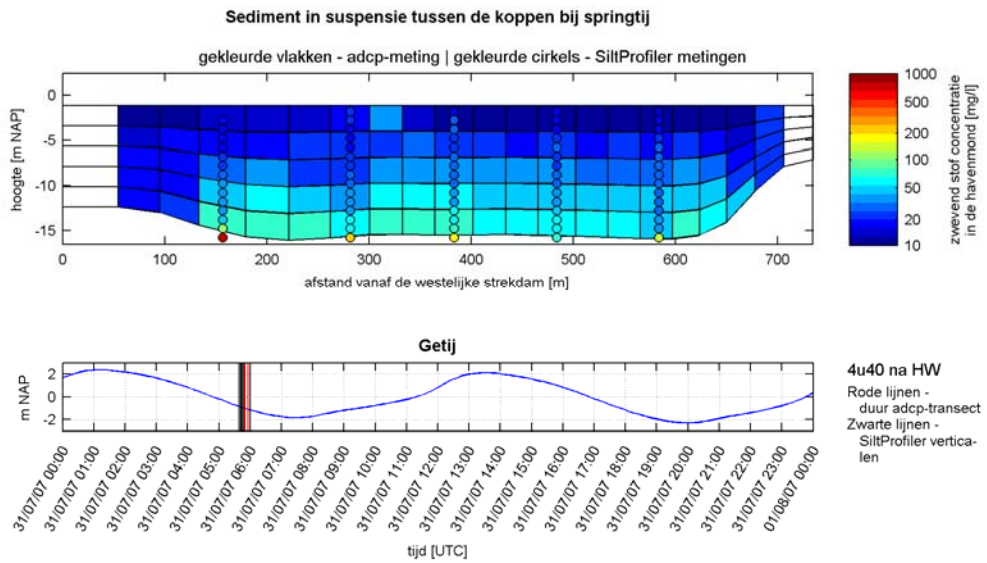


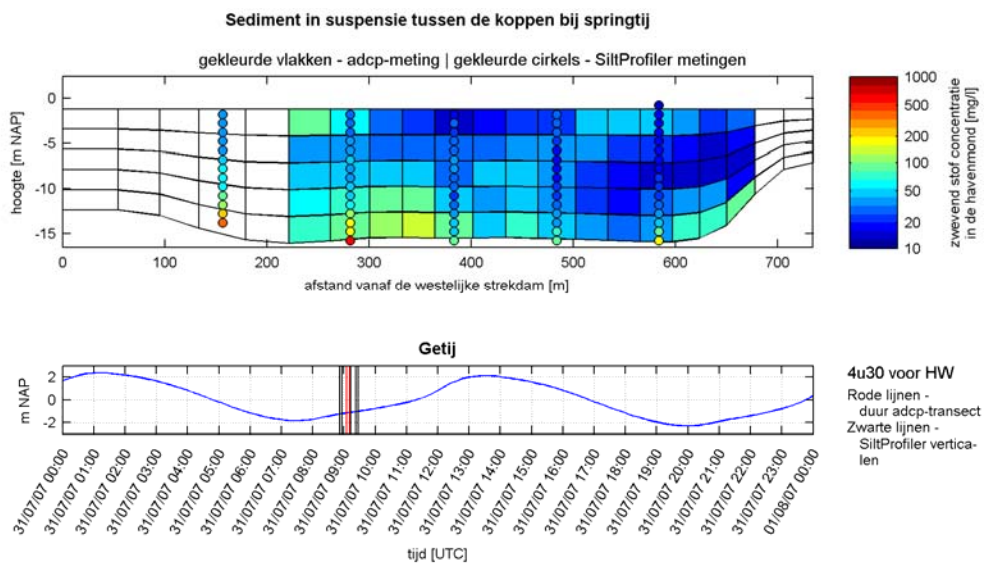
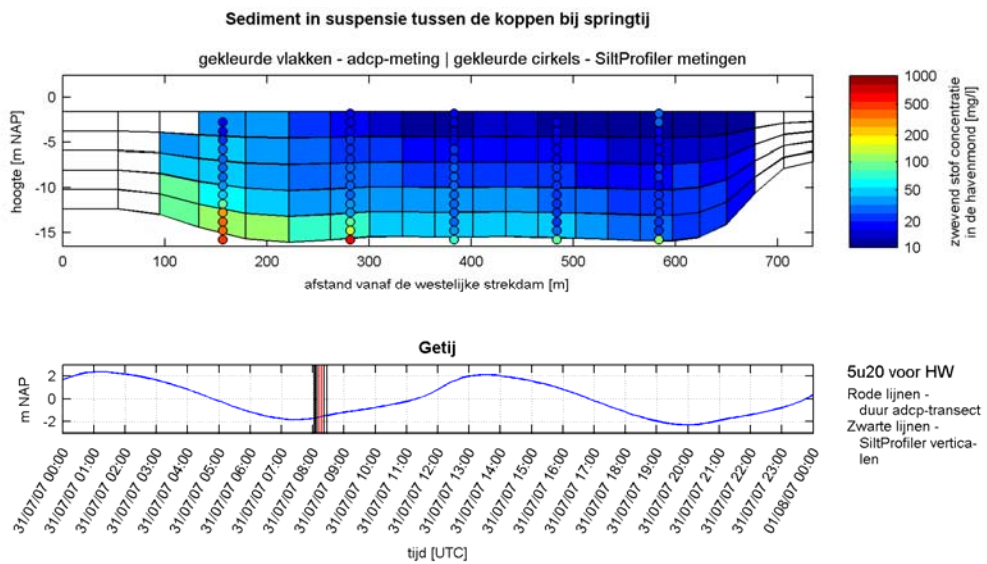
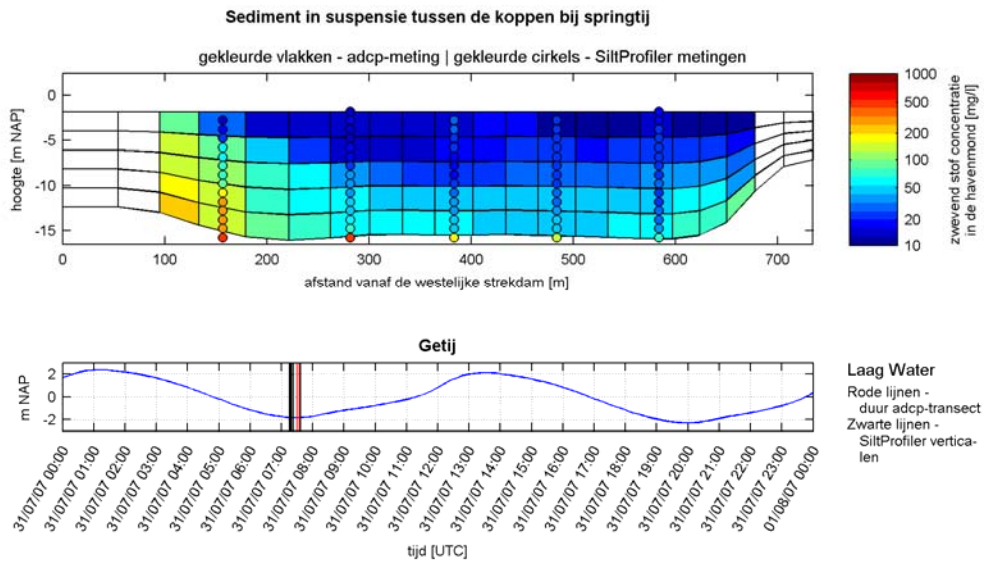


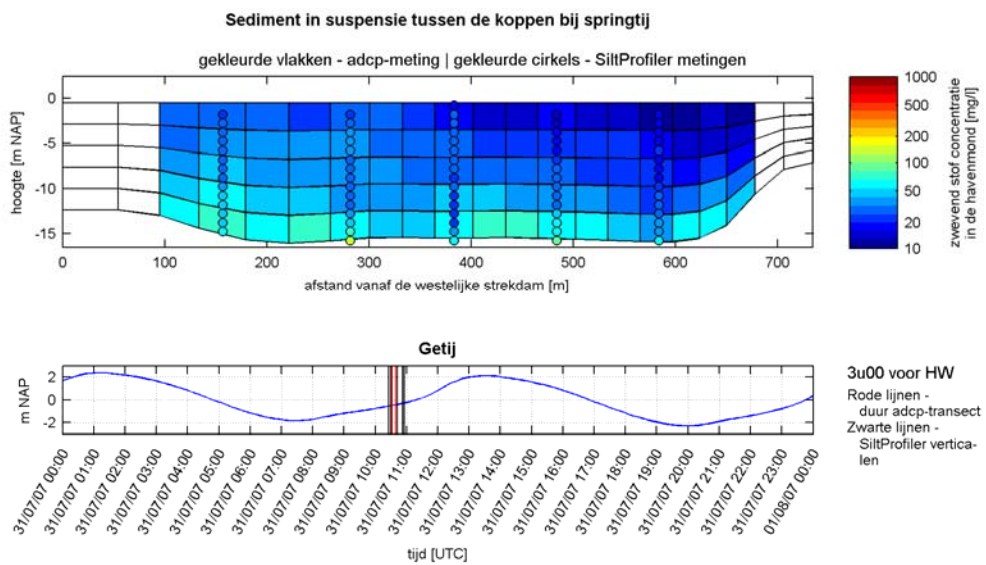
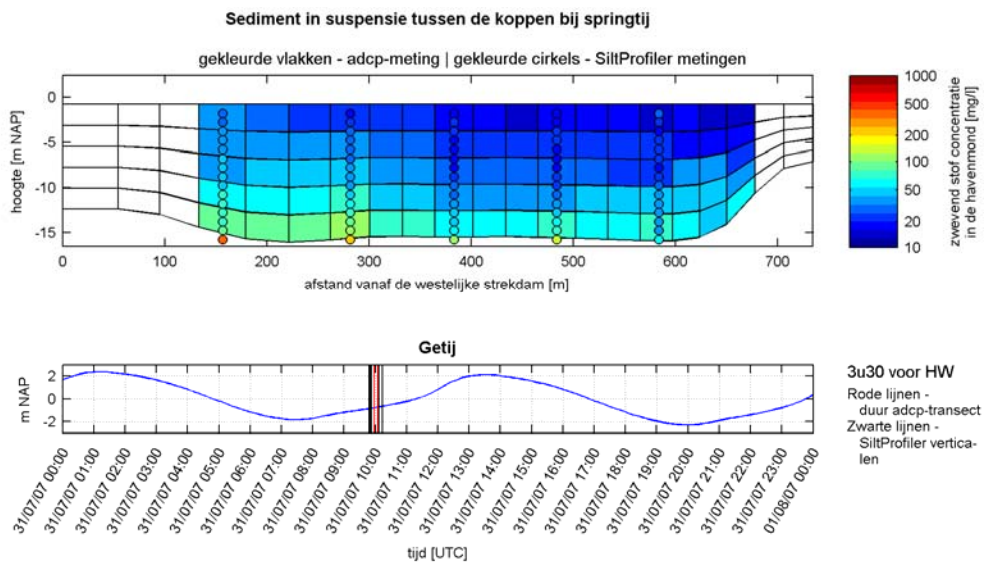
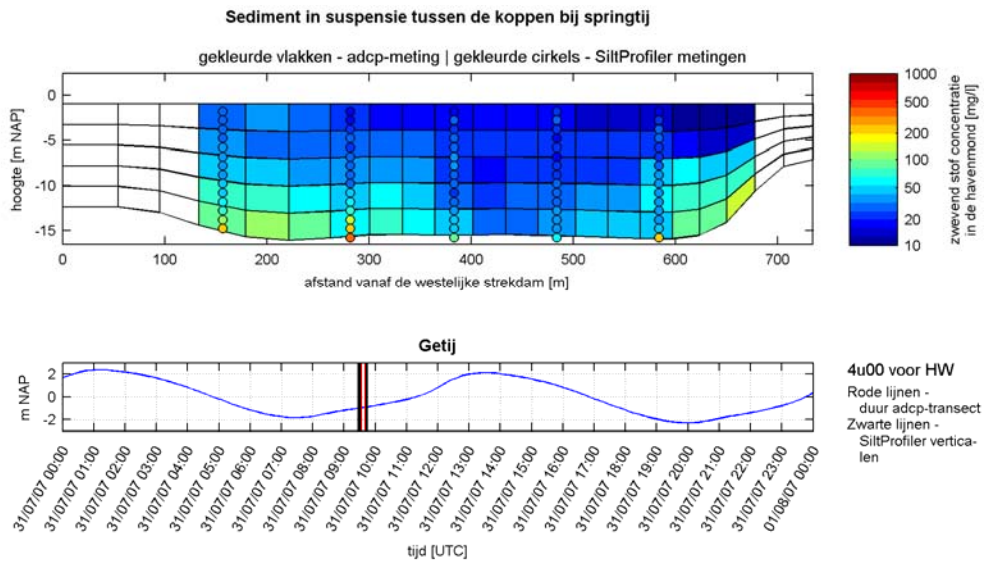


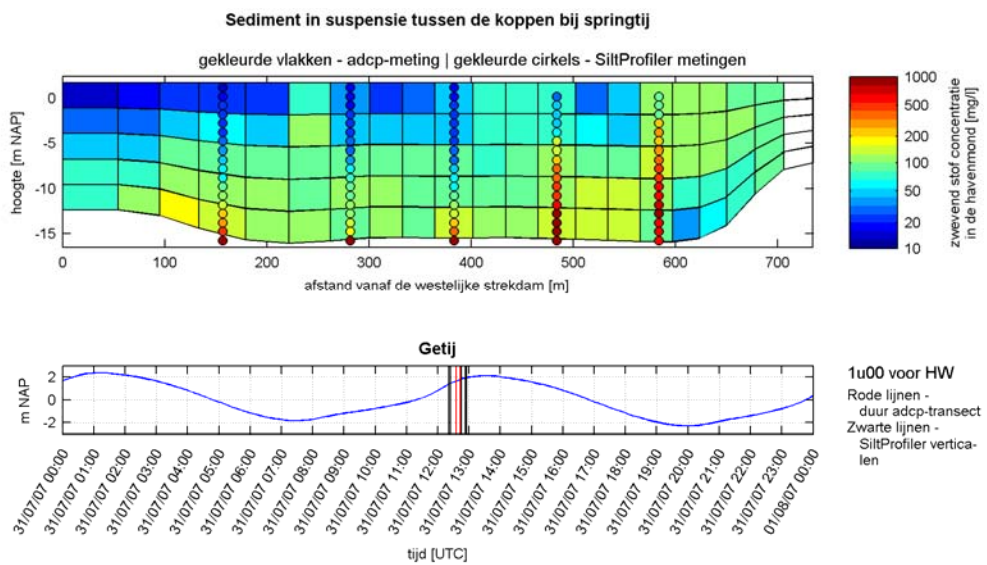
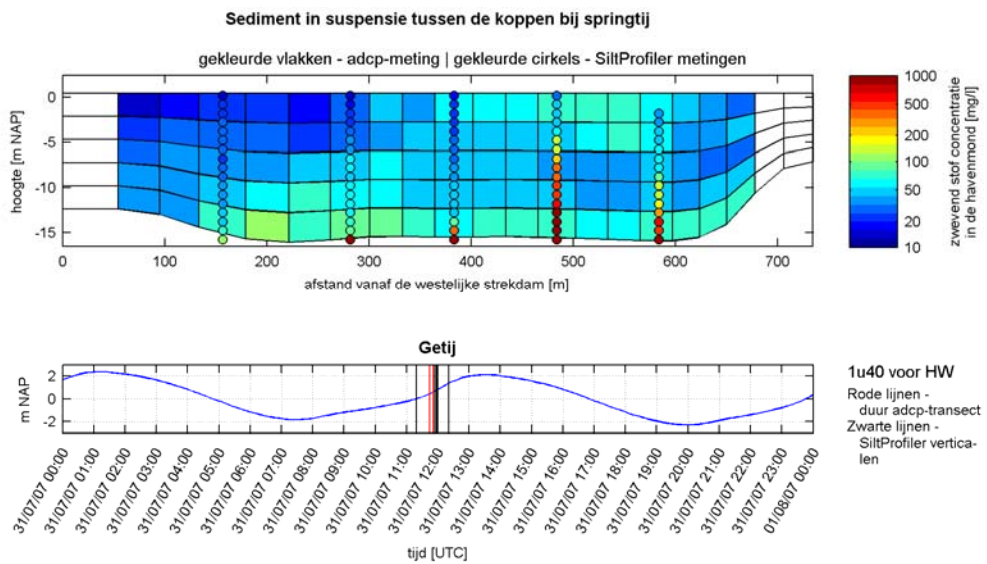
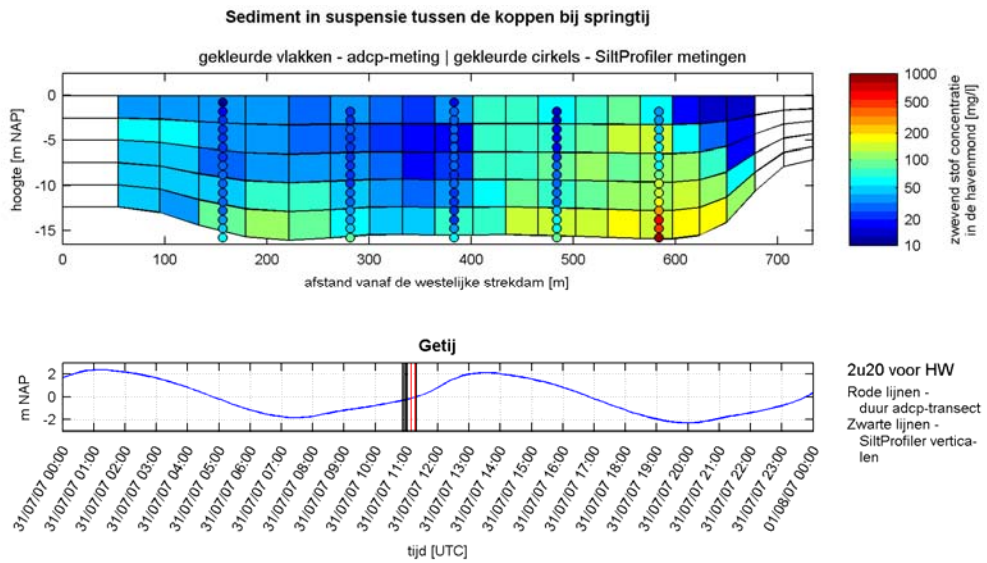
Bijlage F: Vergelijking van ADCP- en SiltProfiler metingen bij springtij

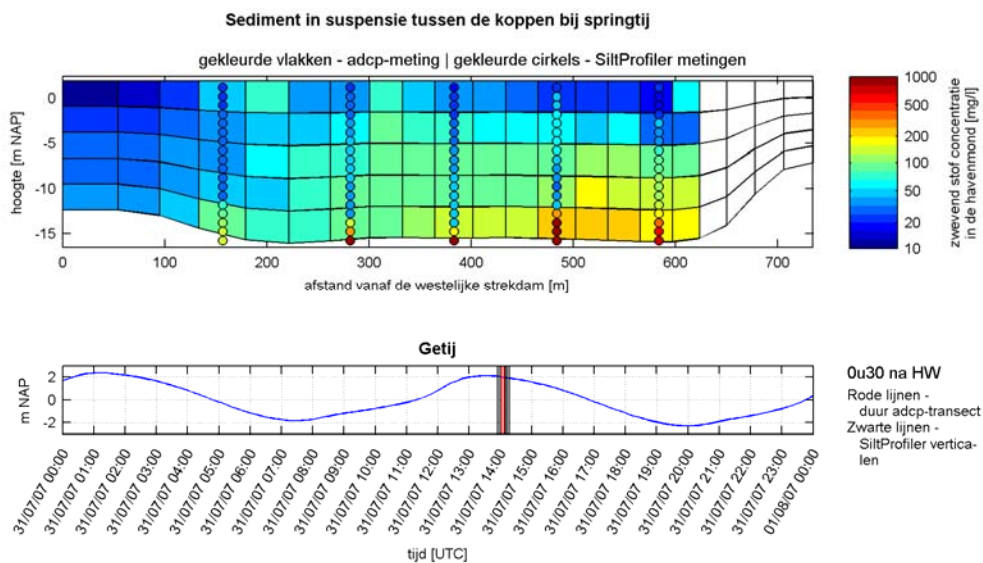
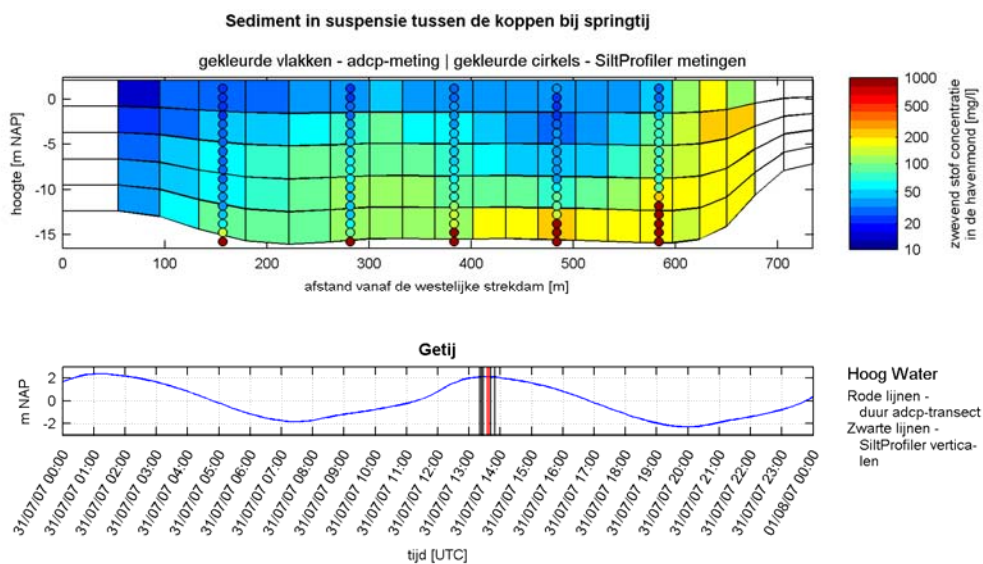
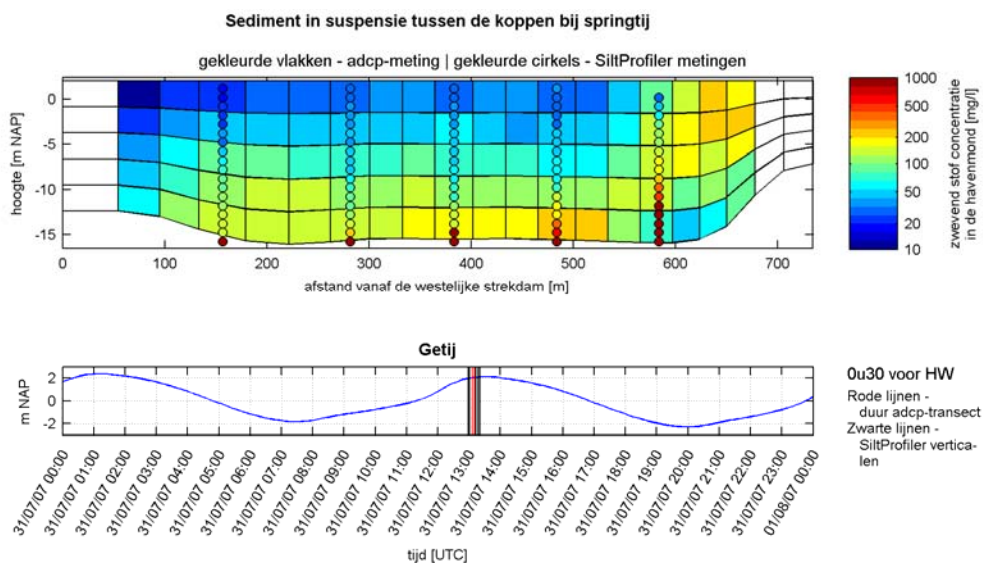


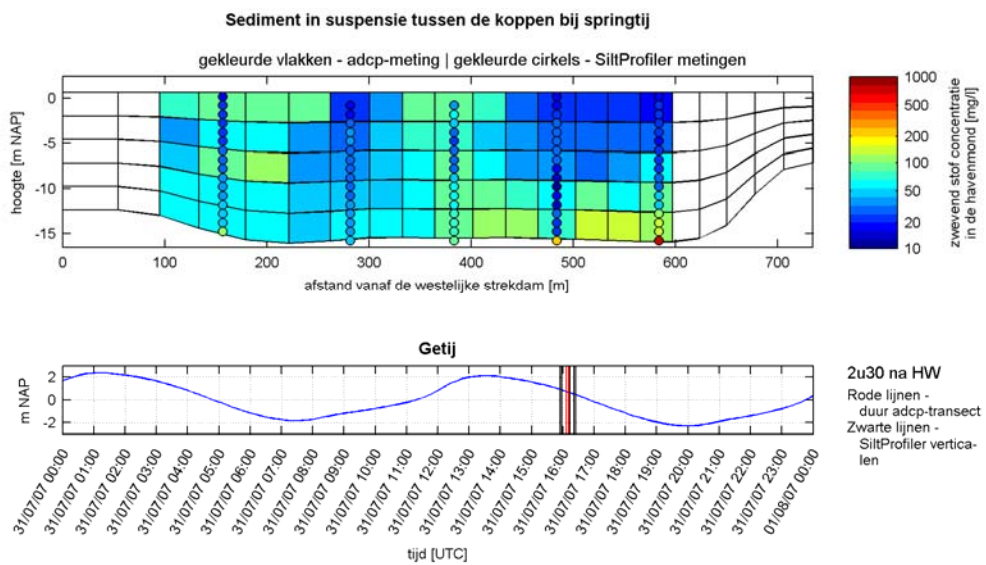
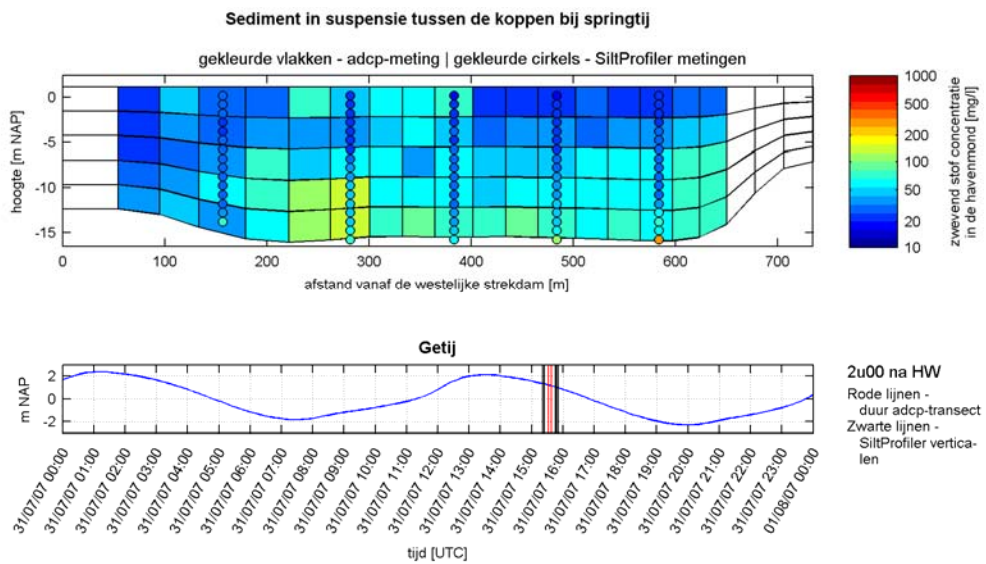
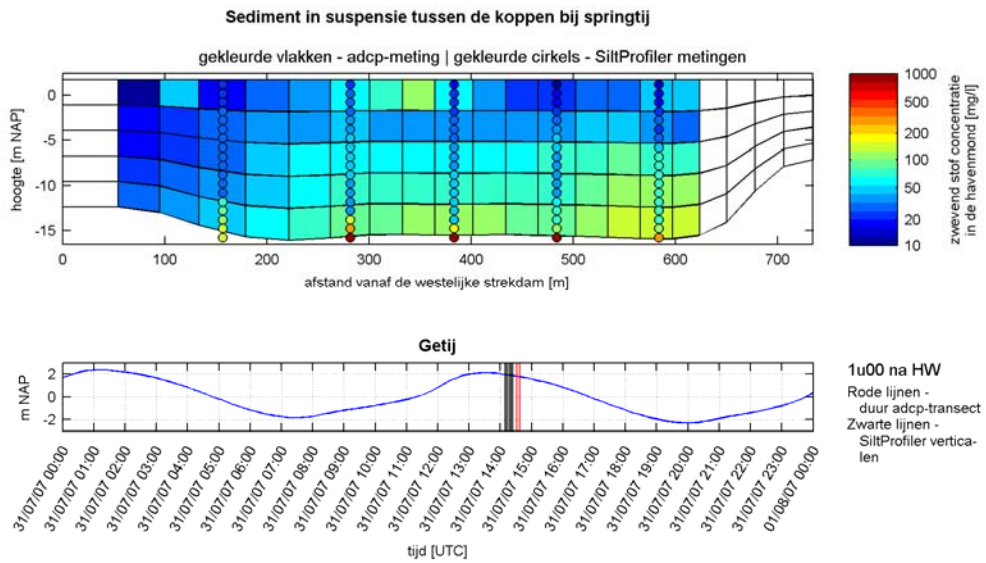


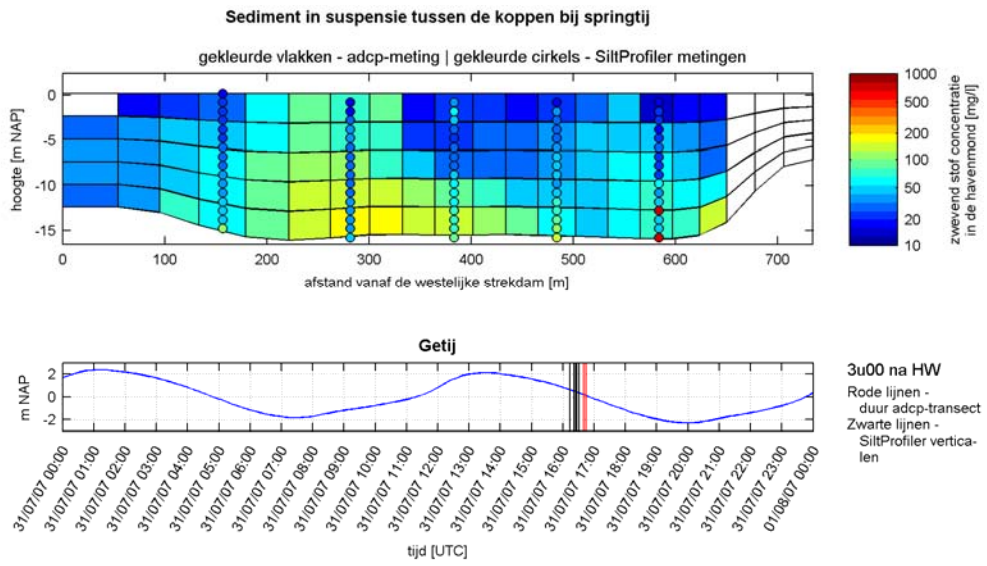




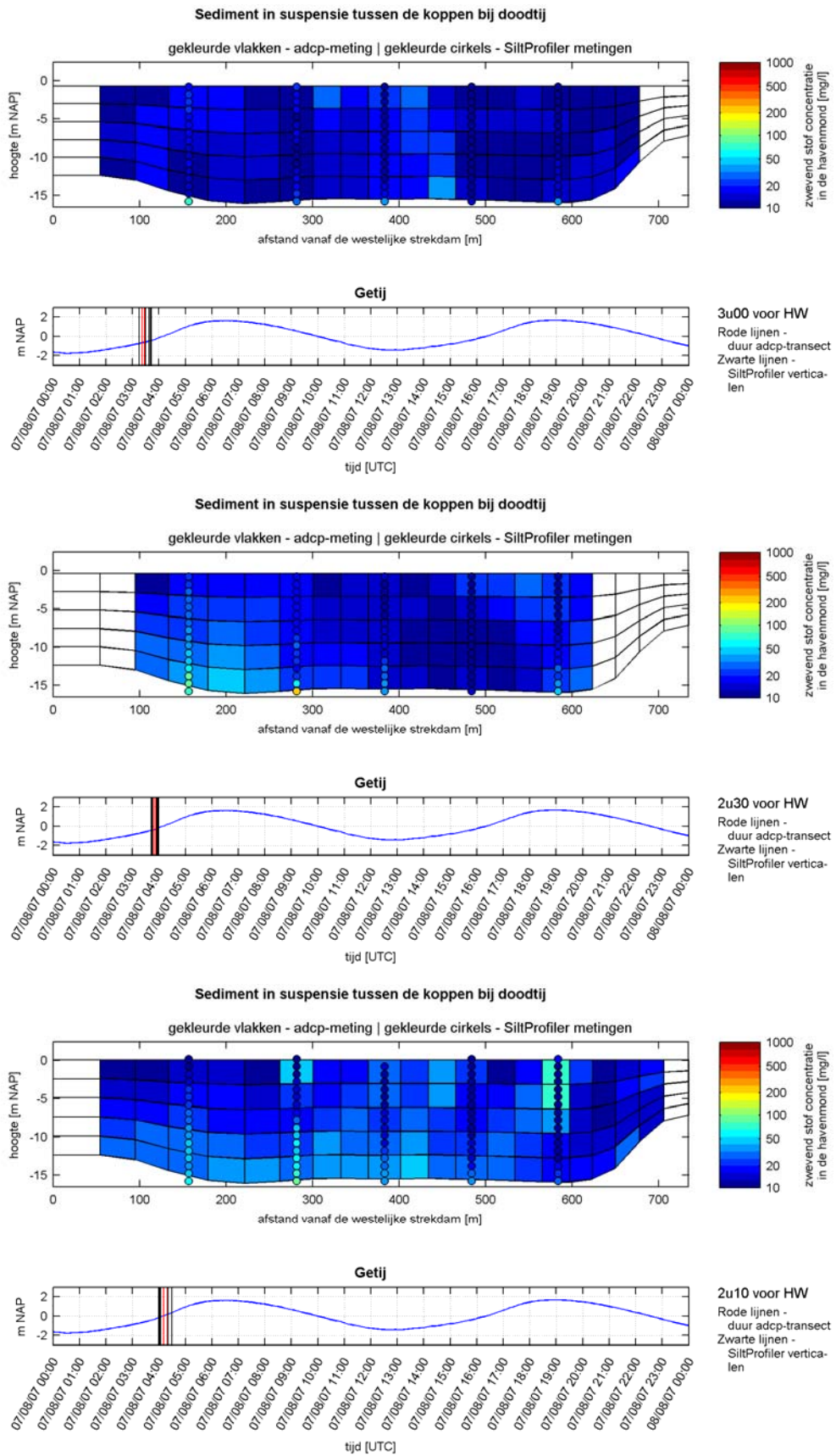


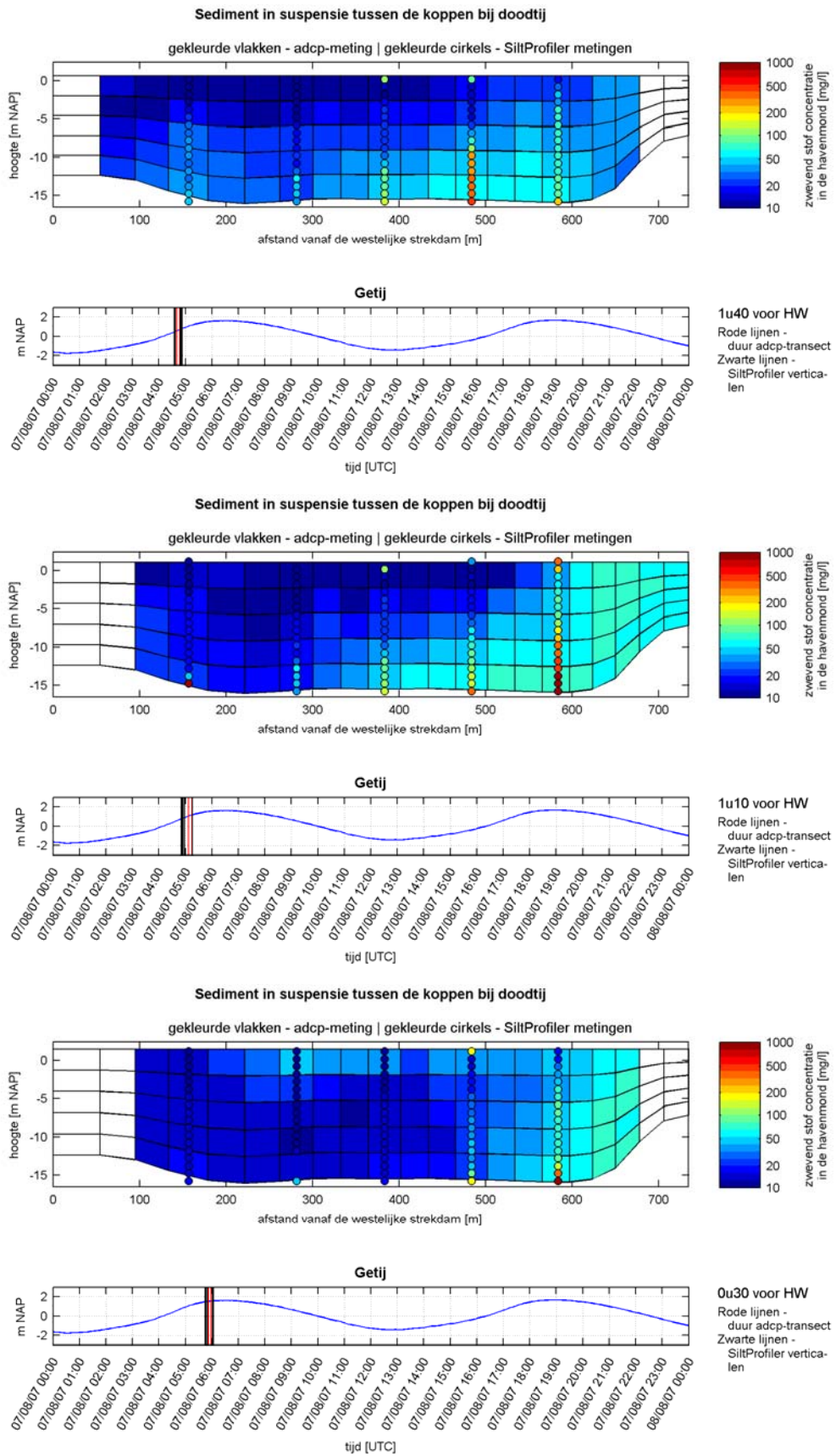


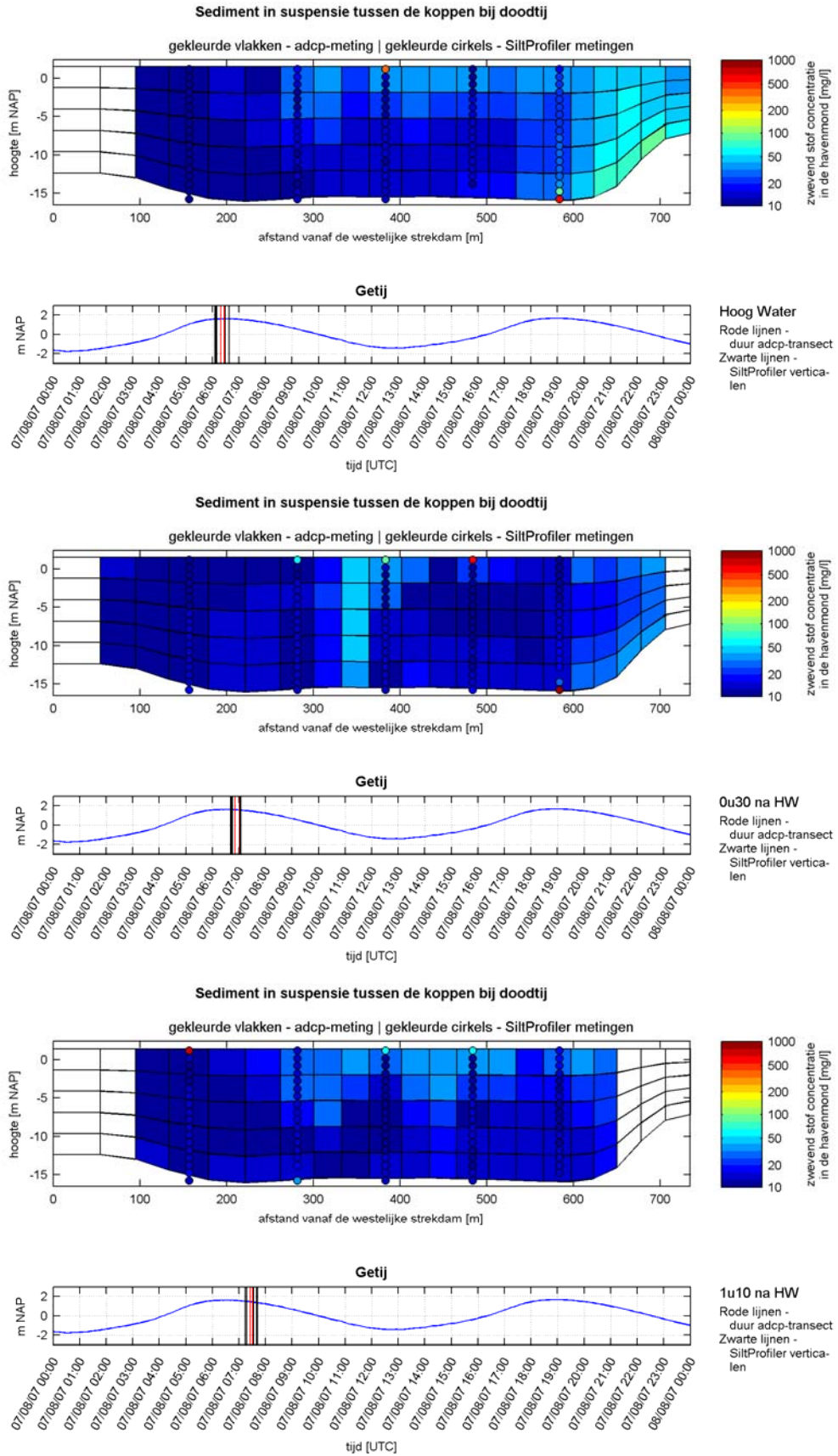


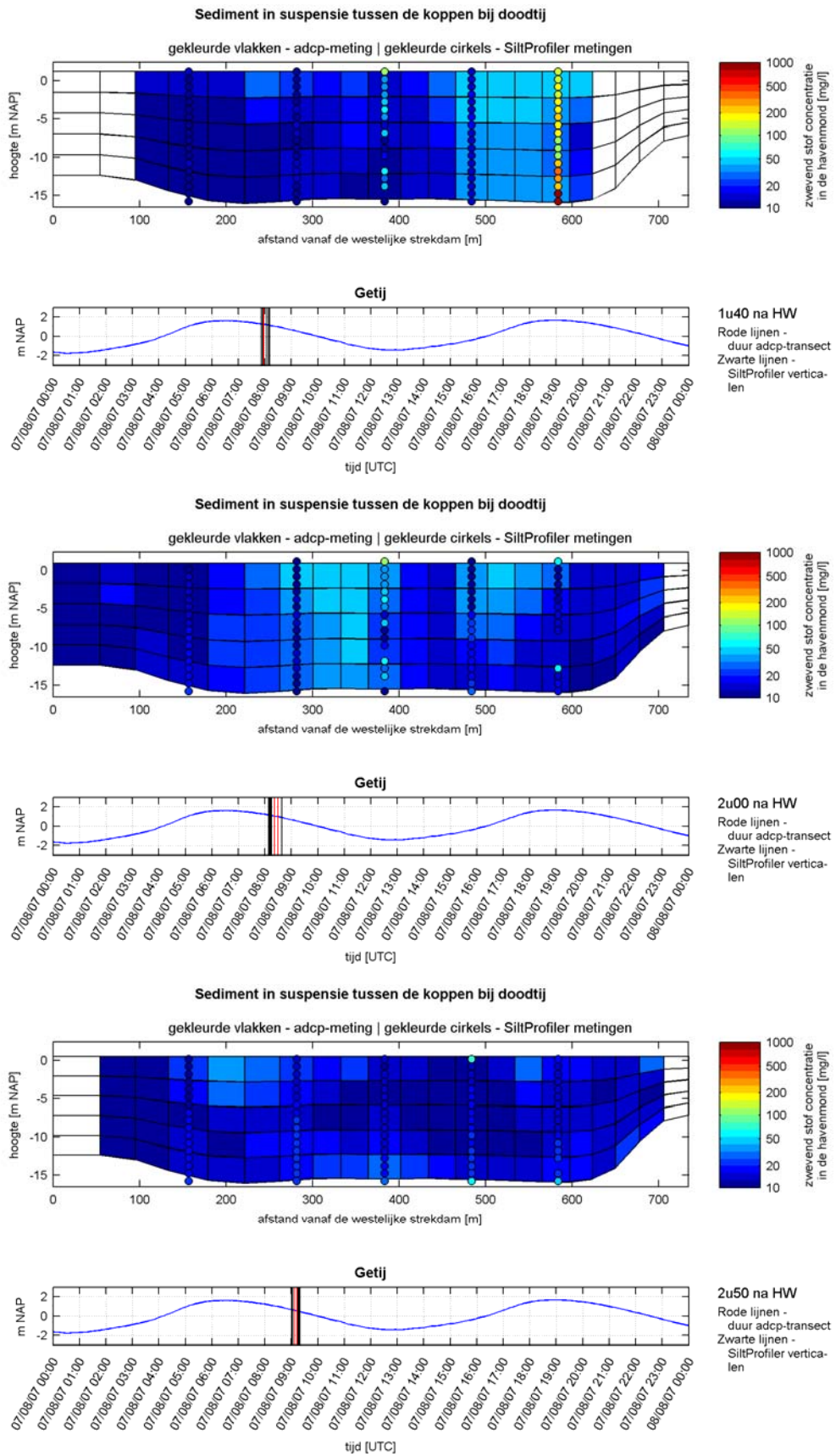


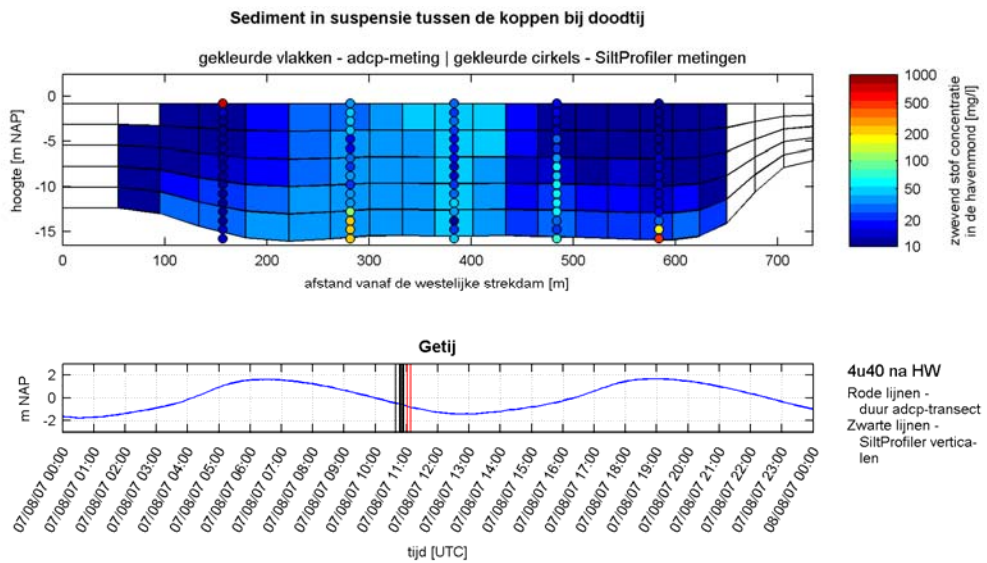
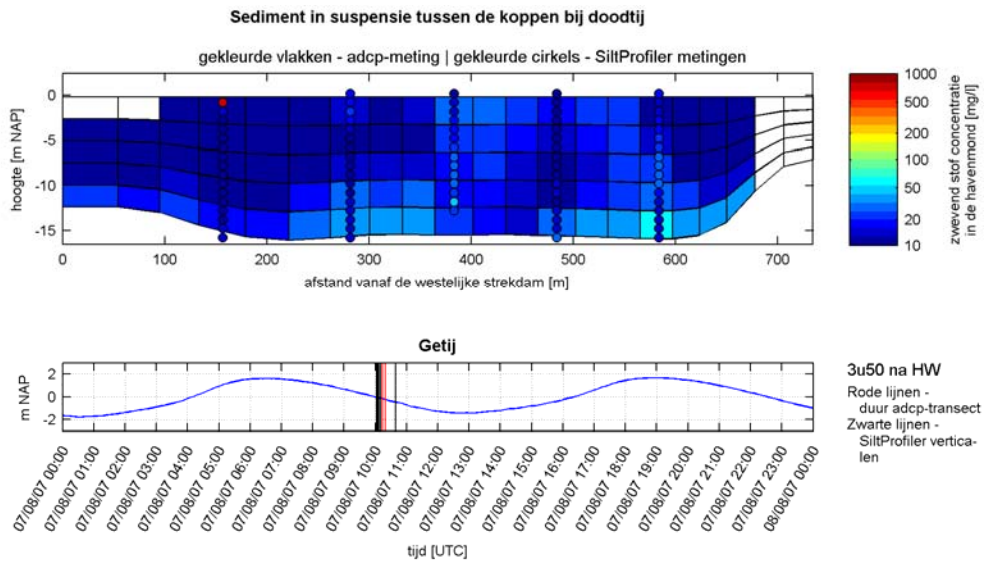
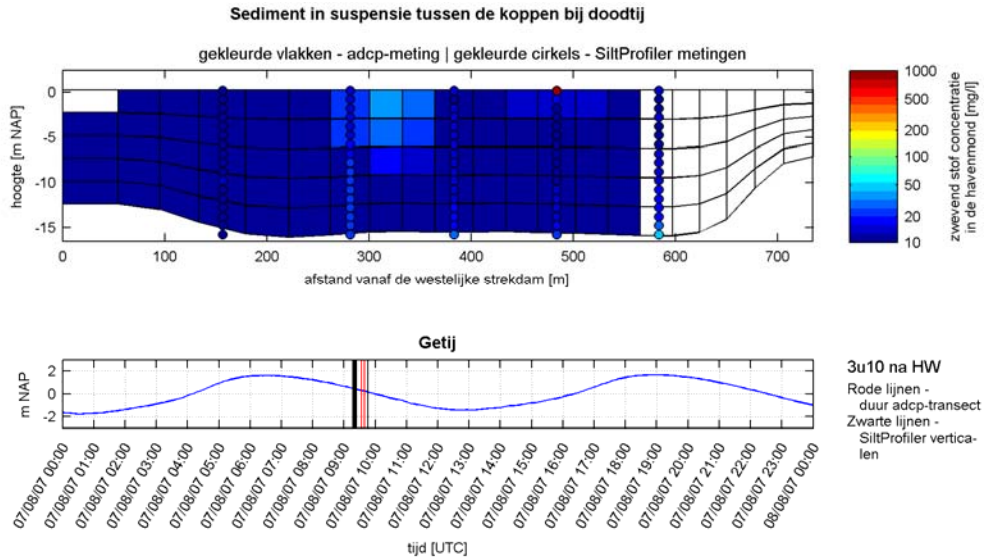
Bijlage G: Vergelijking van ADCP- en SiltProfiler metingen bij doodtij

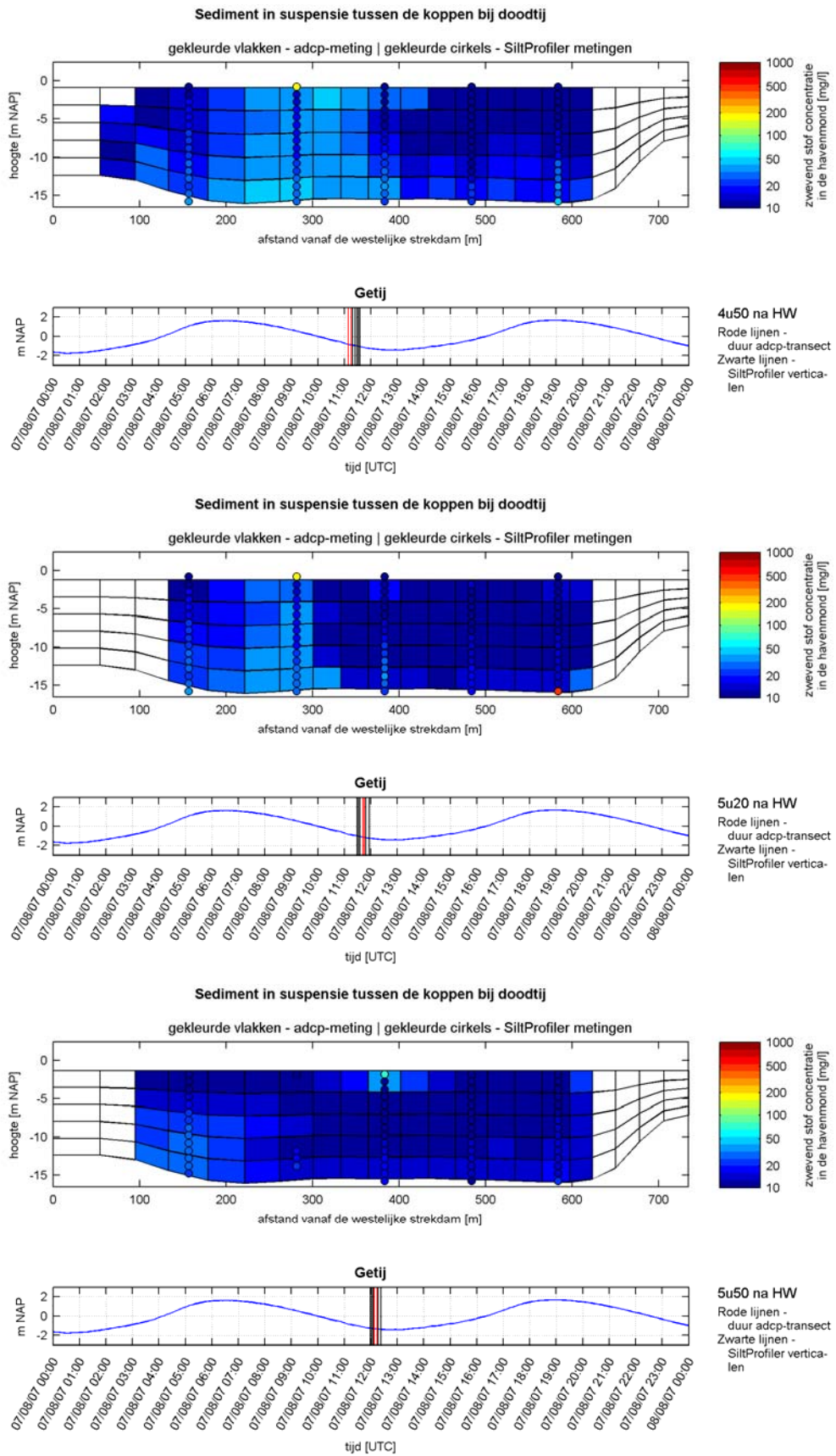


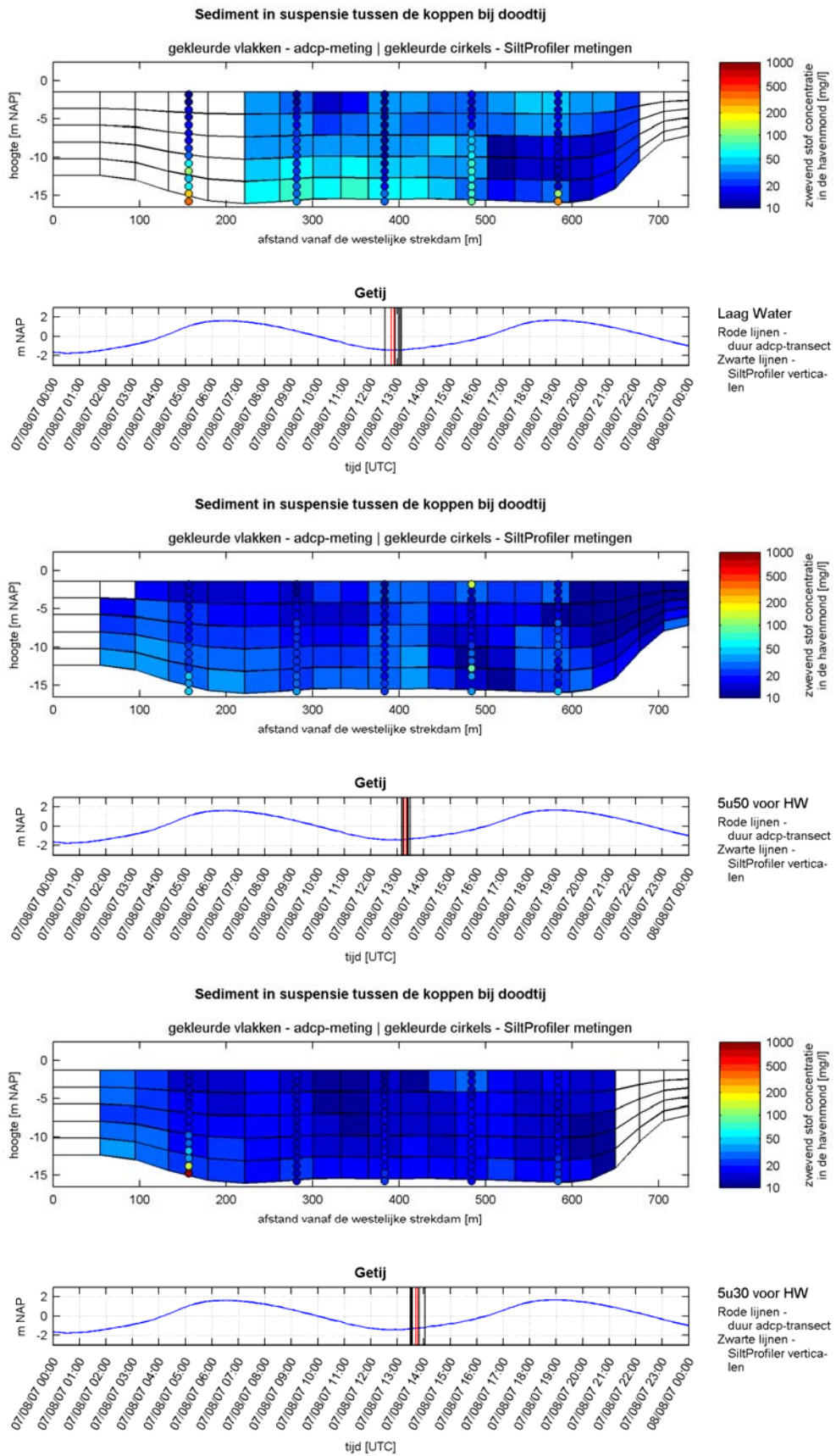


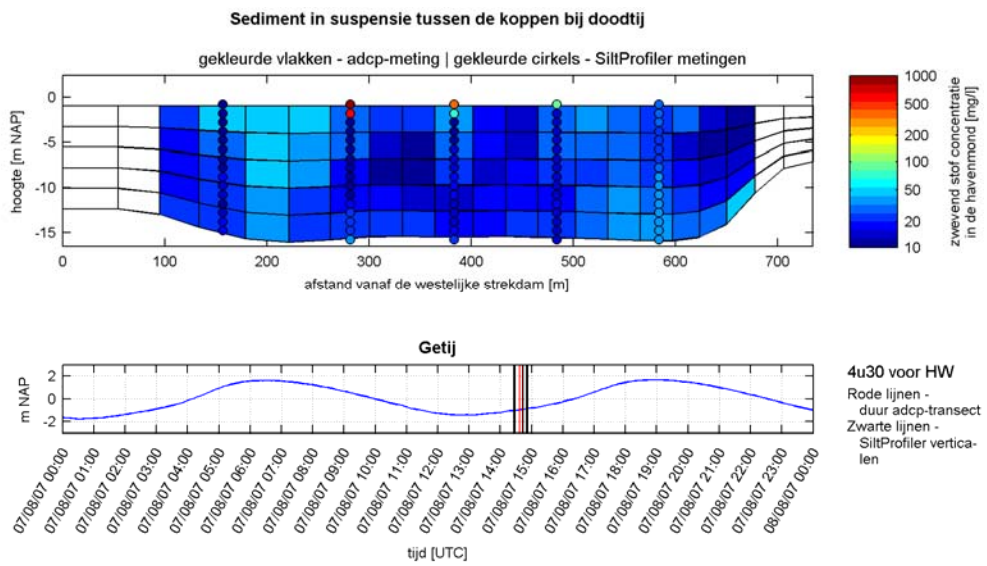
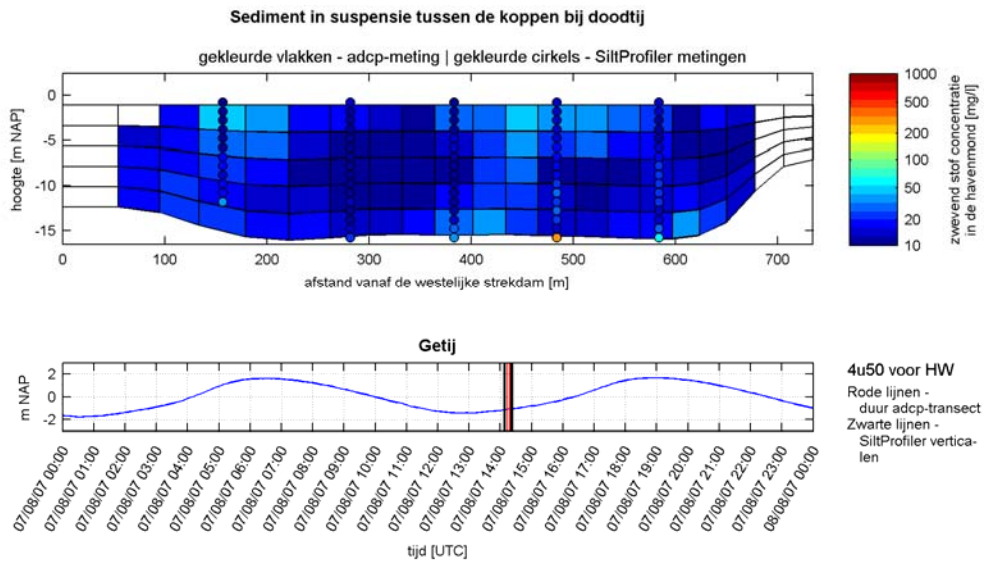




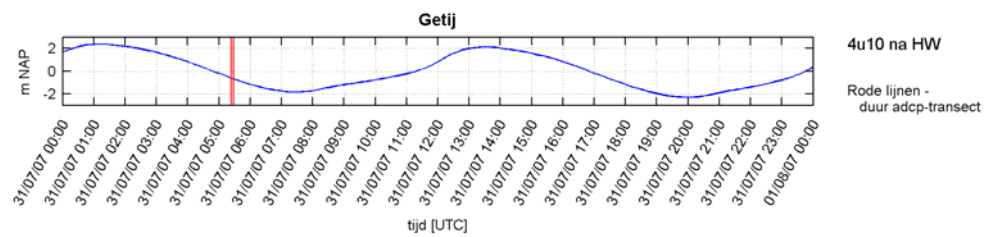
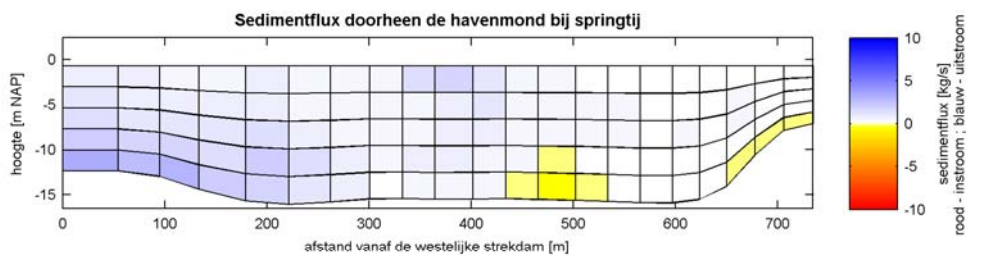
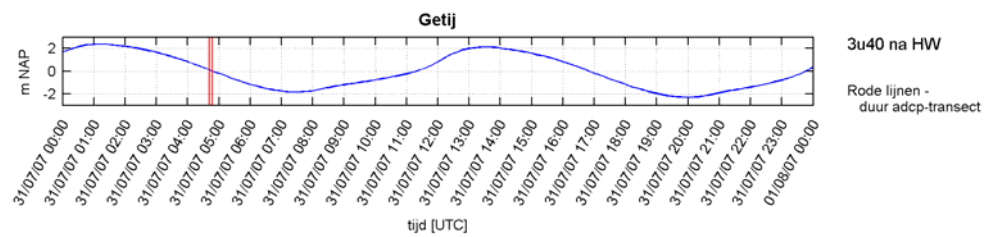
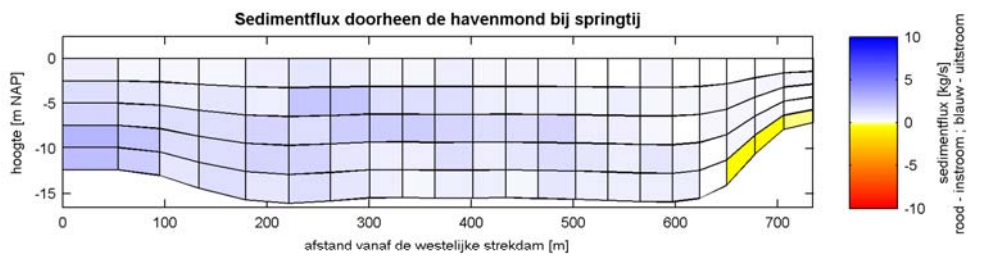
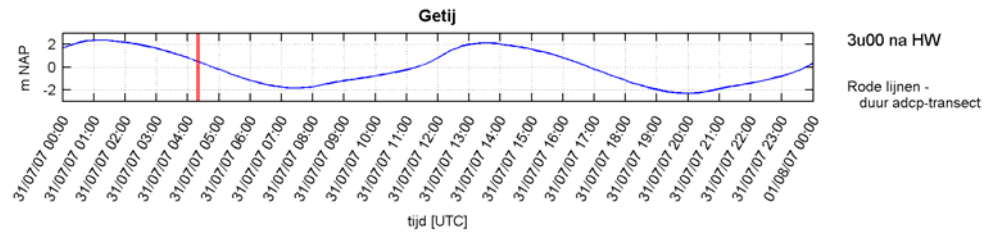
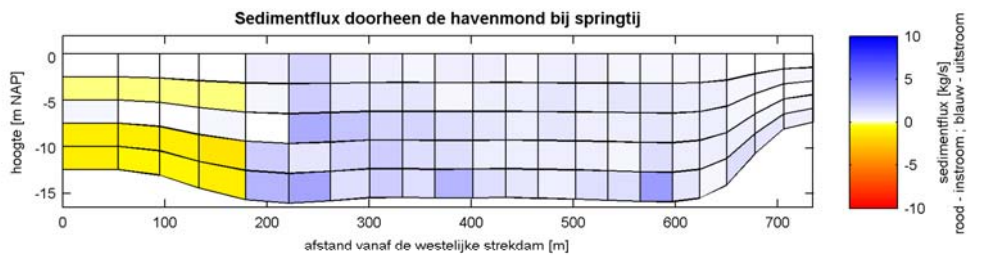


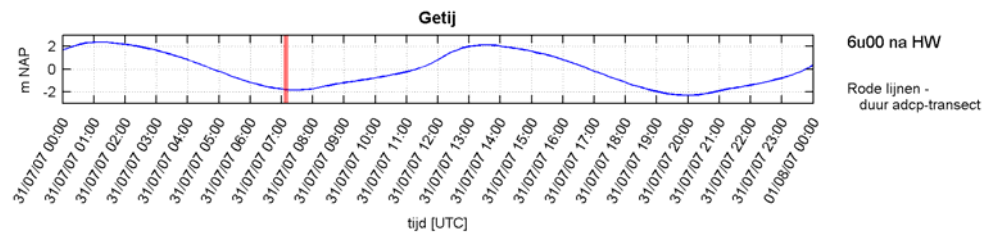
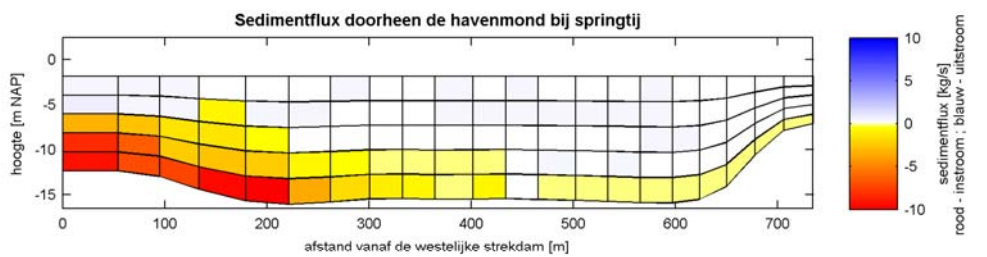
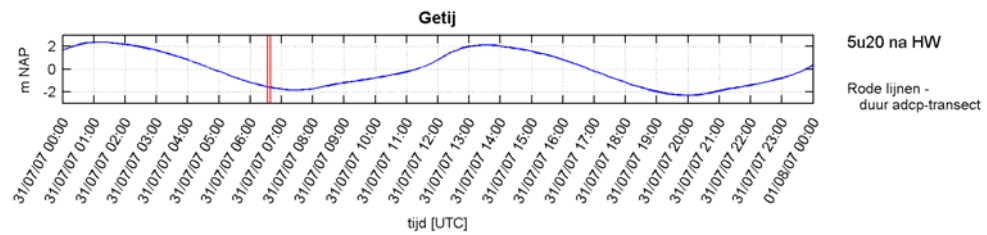
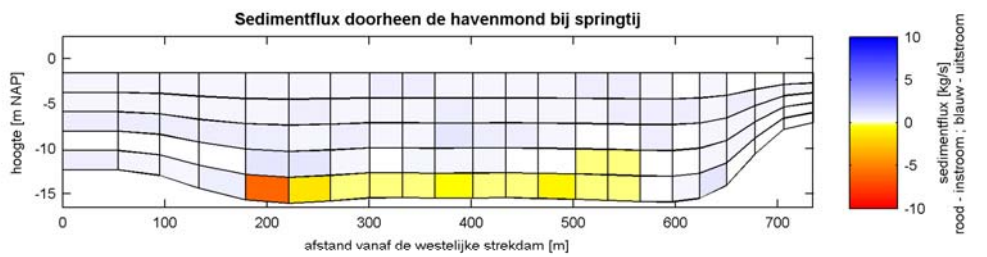
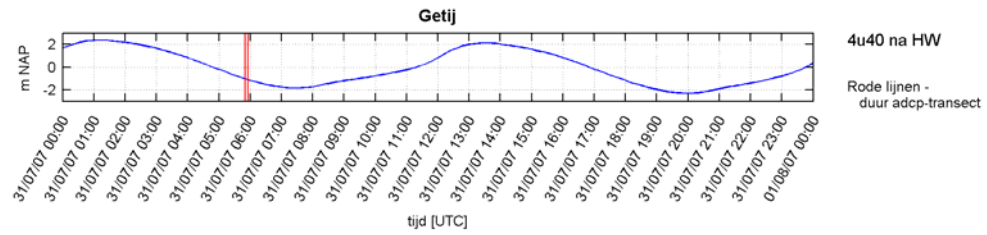
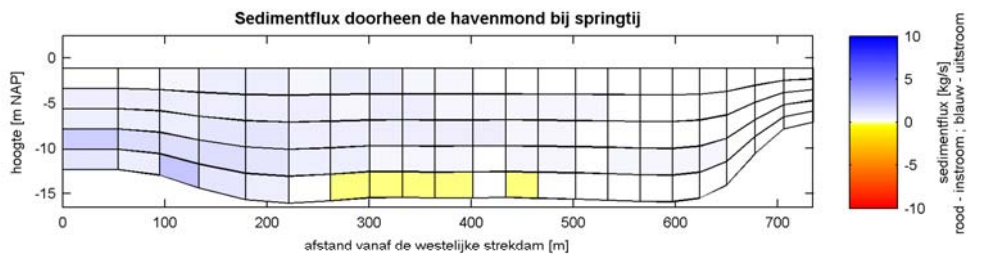


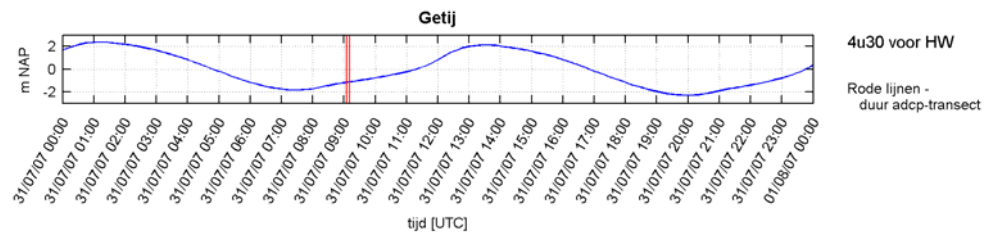
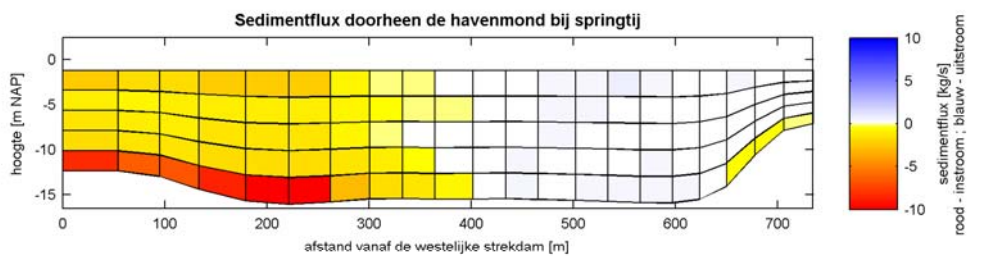
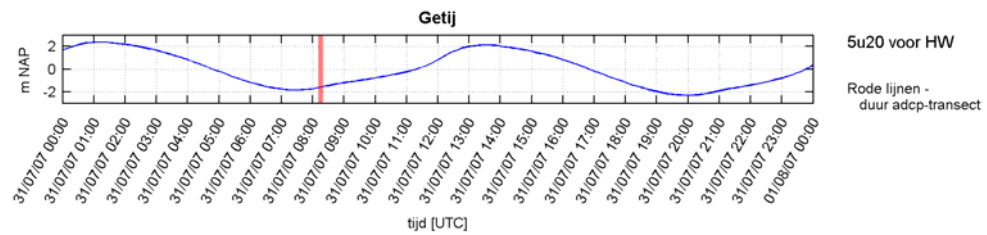
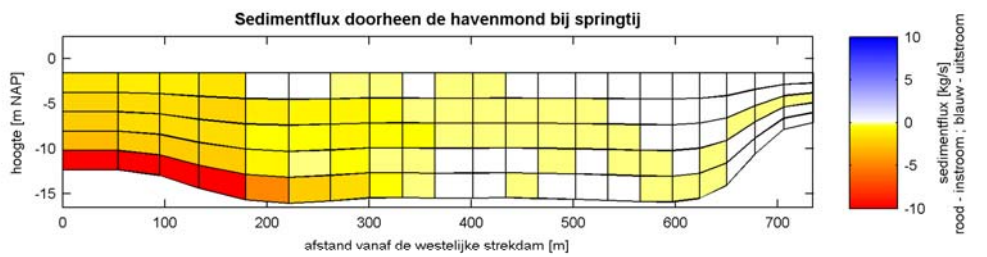
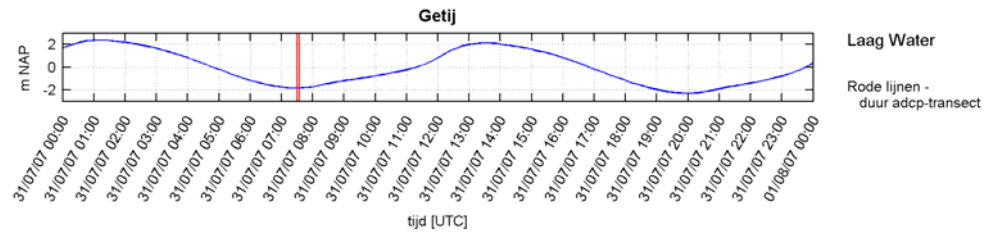
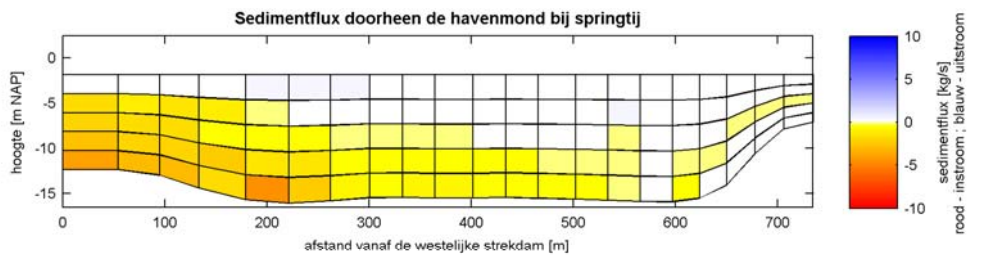


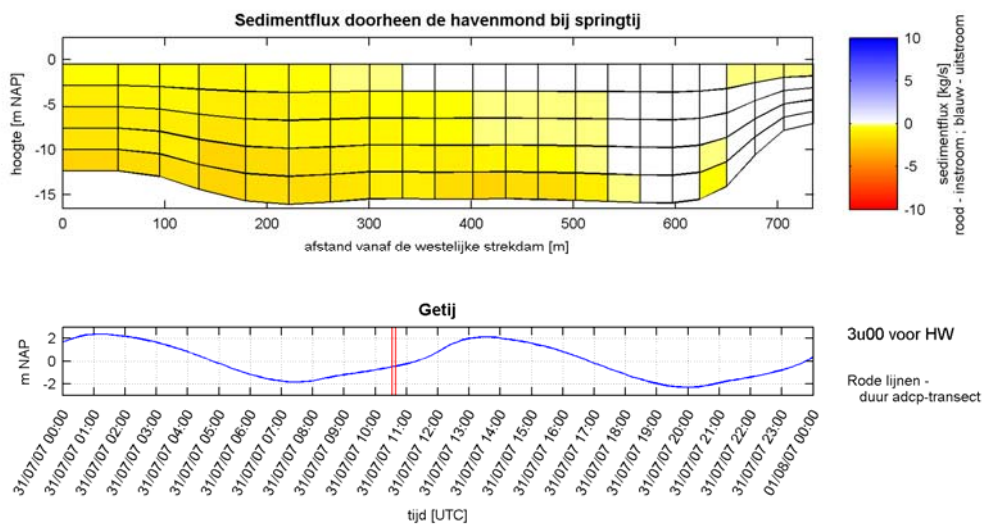
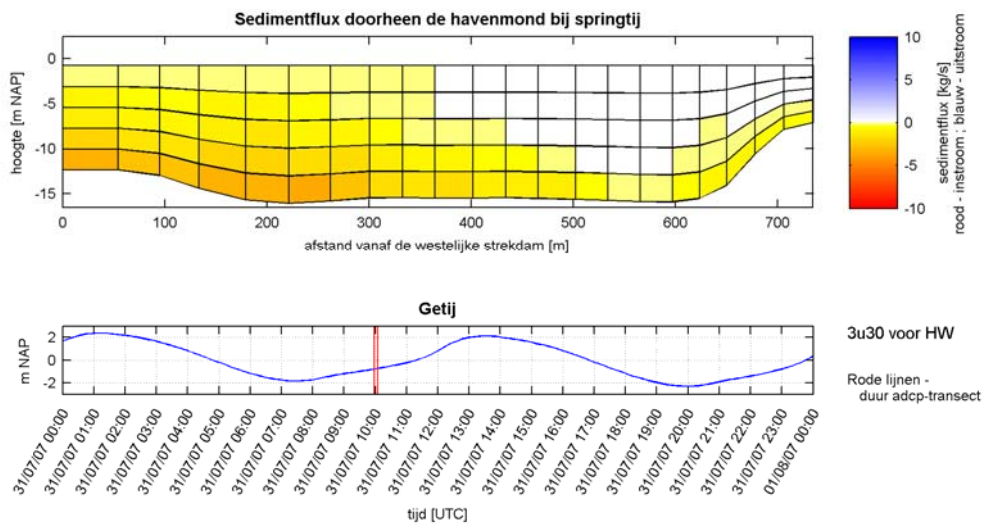
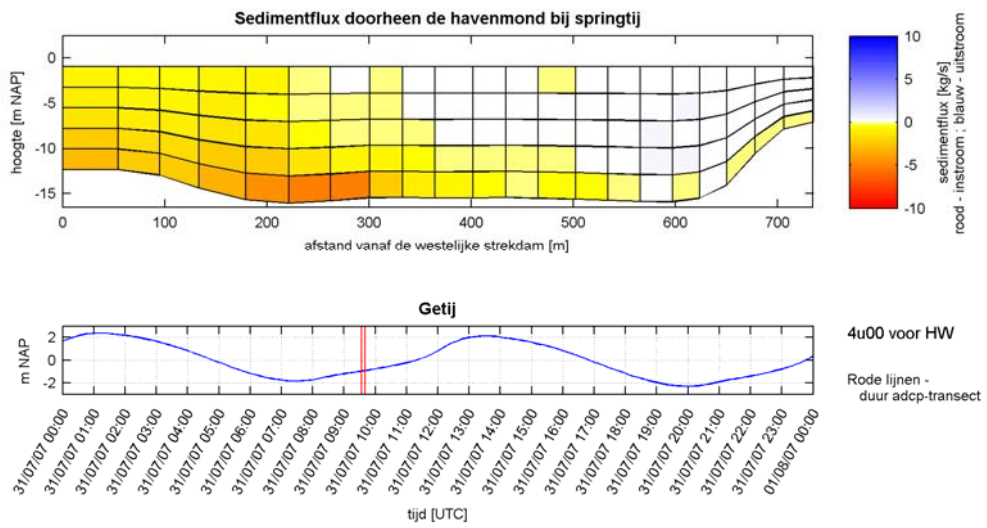


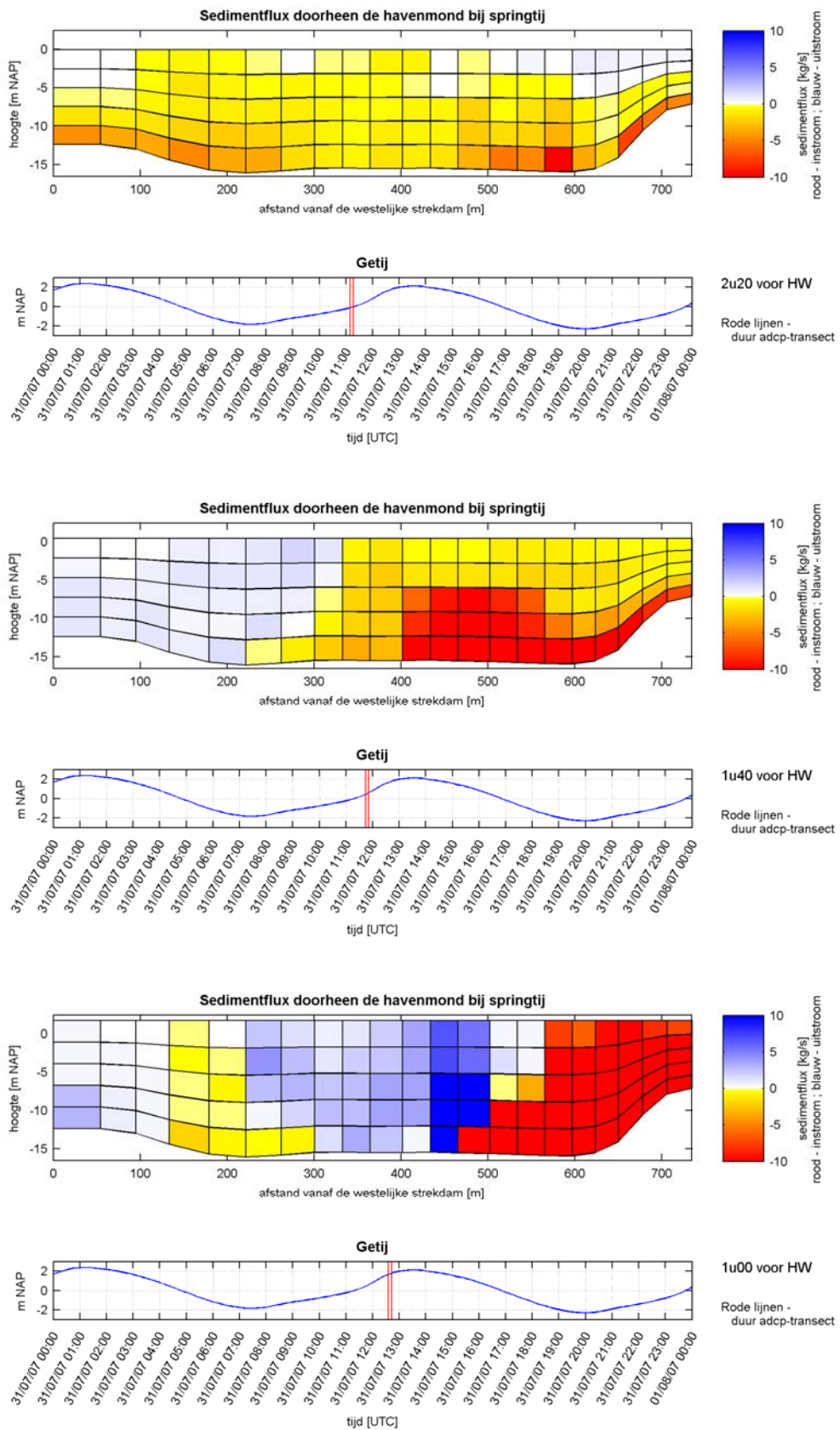
Bijlage H: Sedimentflux bij springtij

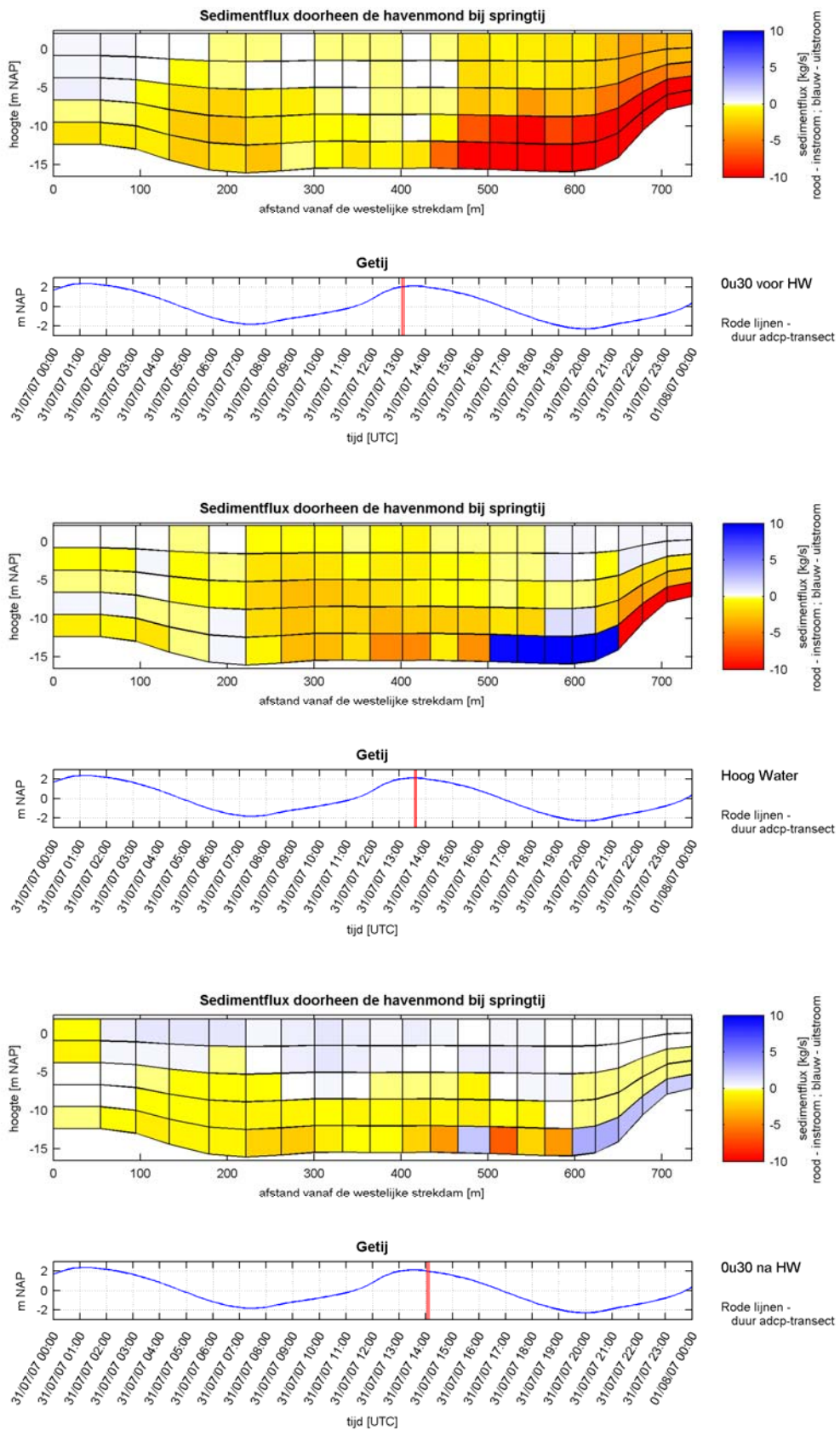


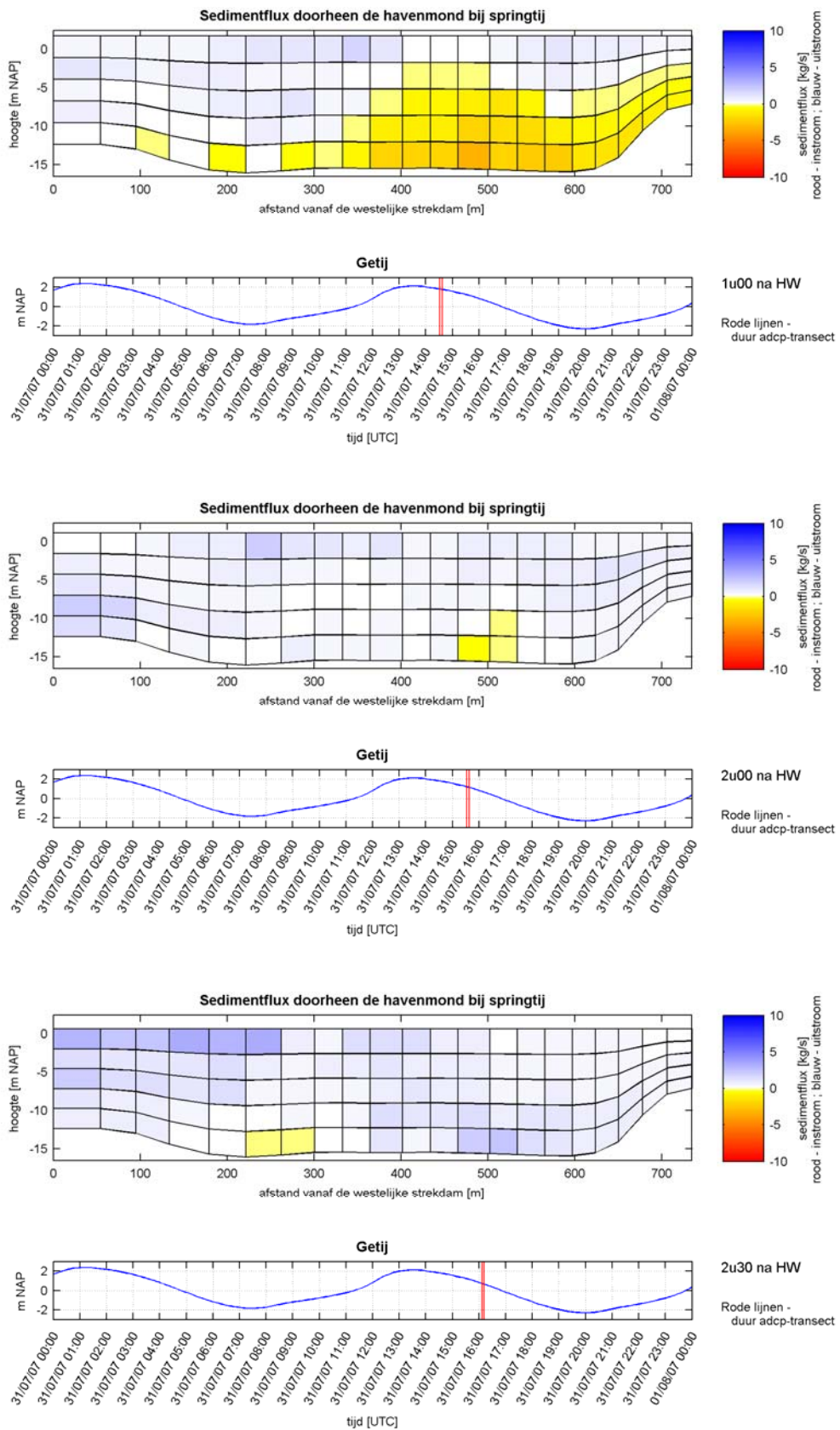


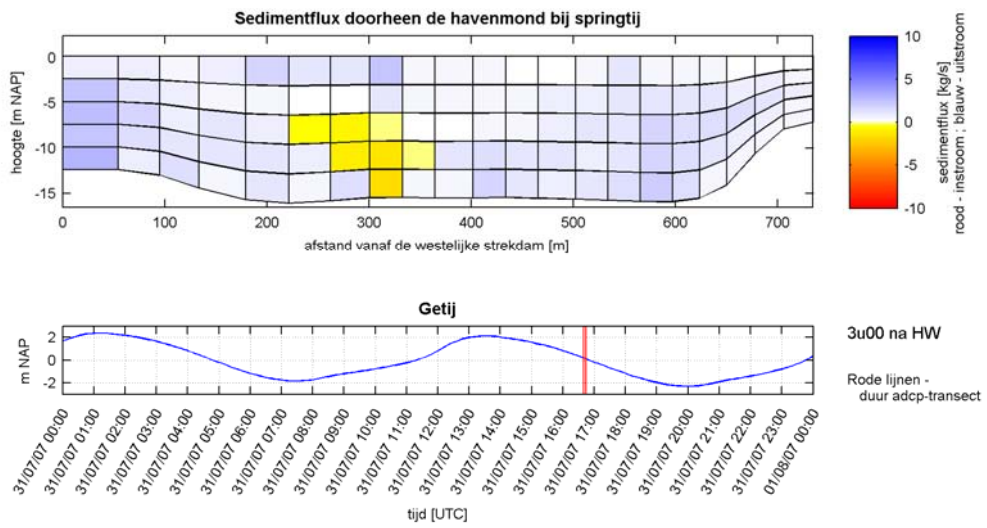




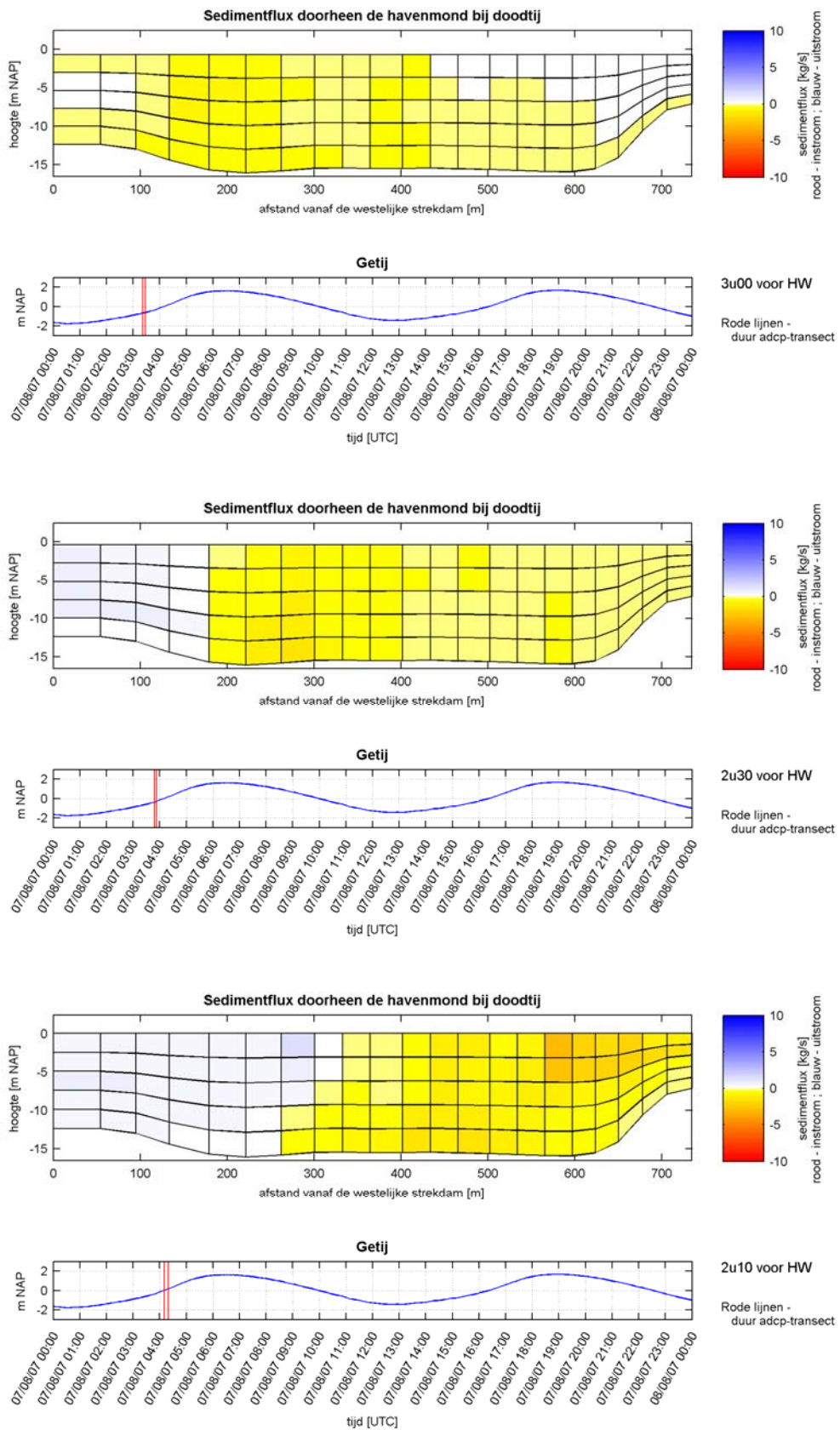


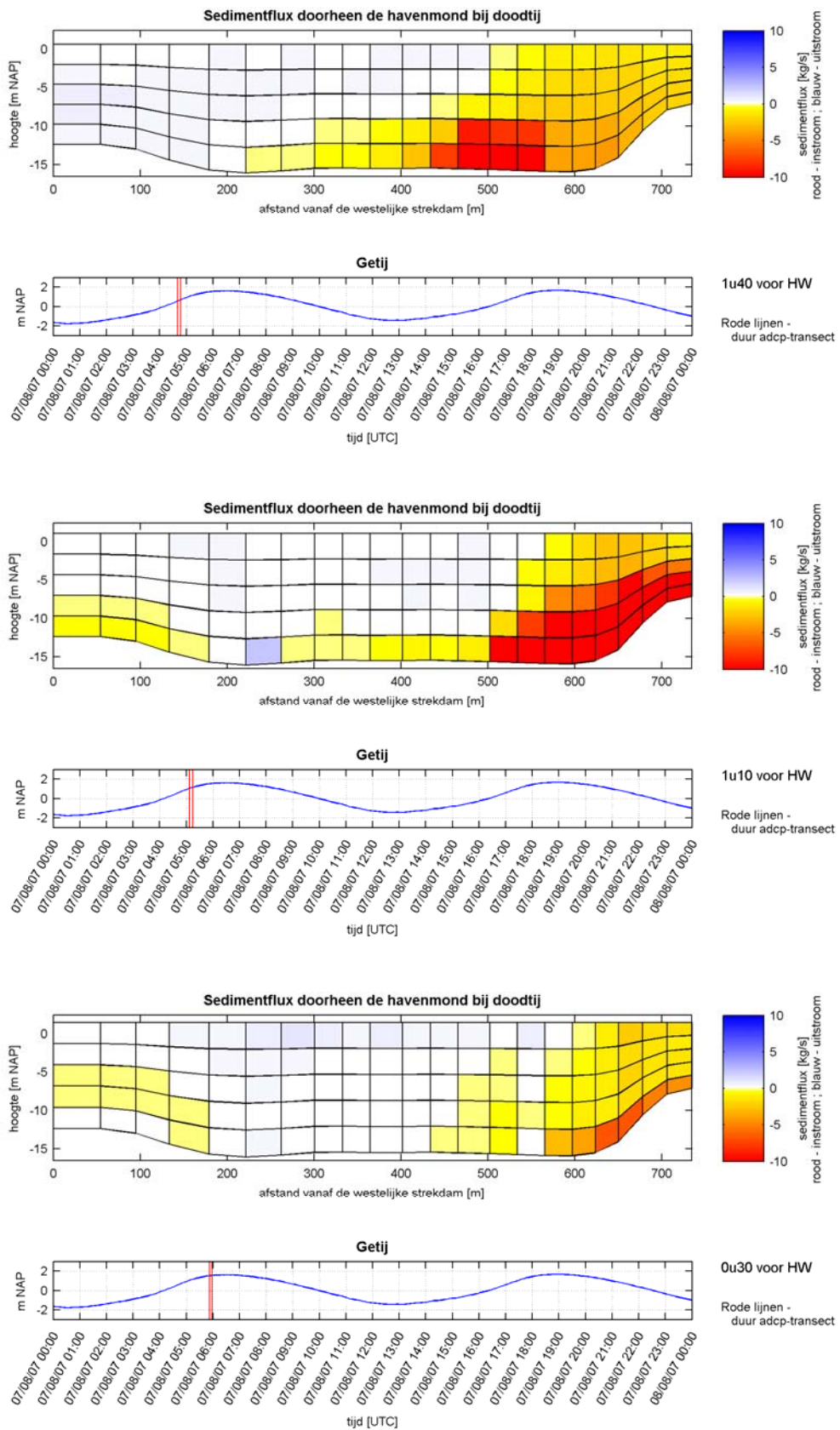


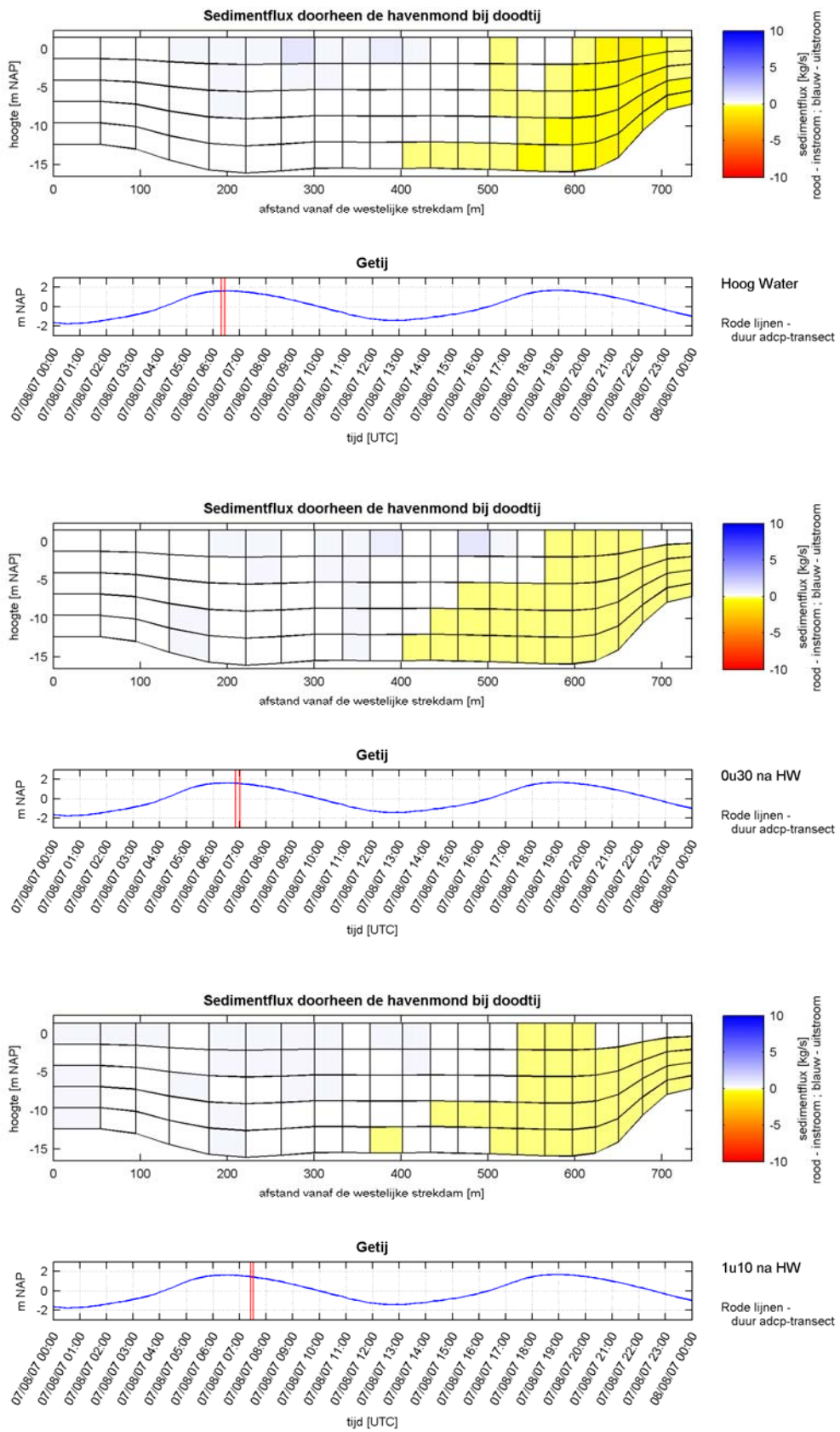


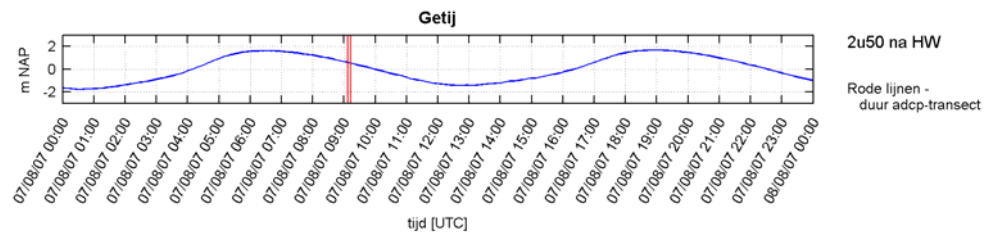
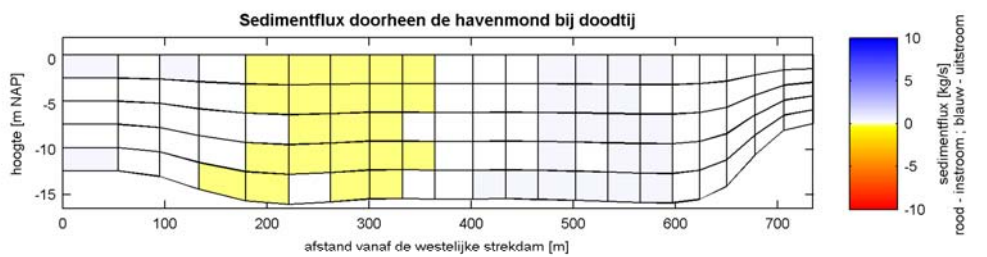
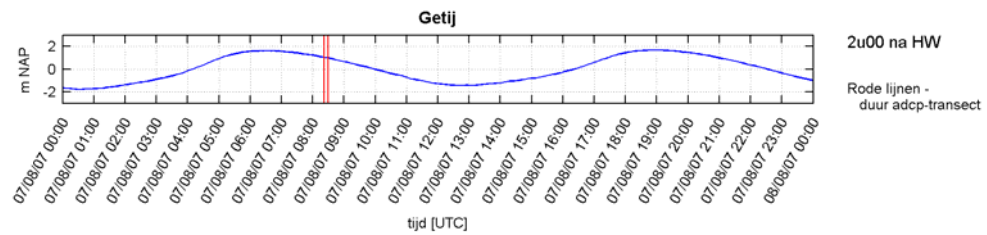
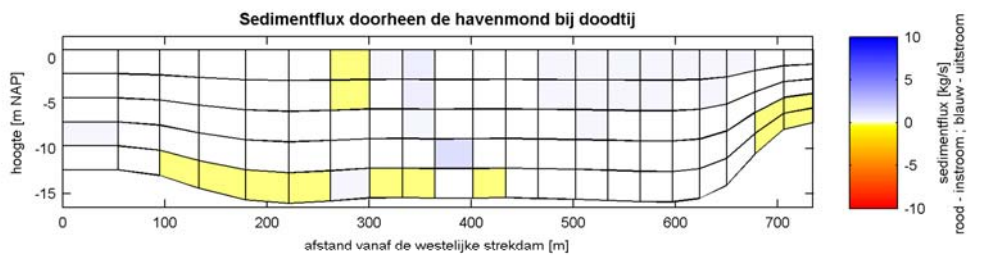
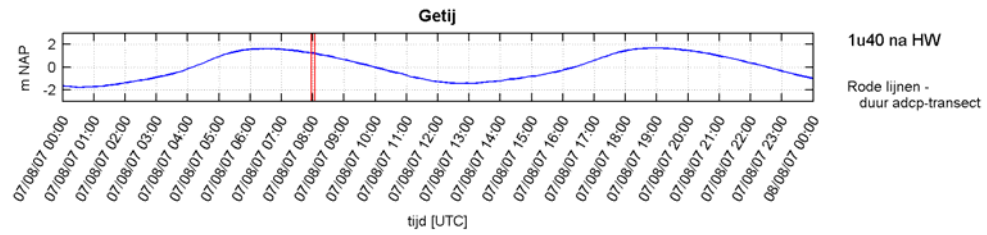
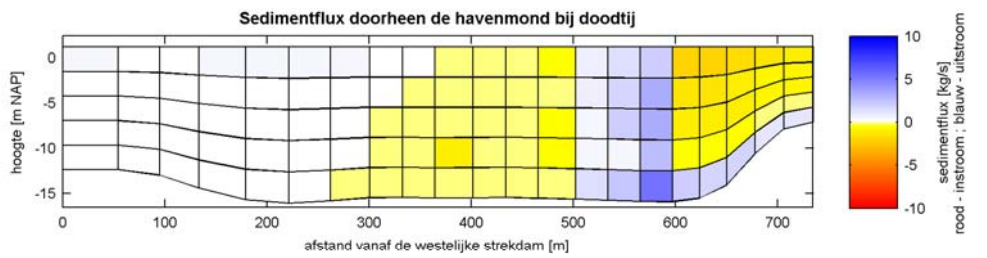


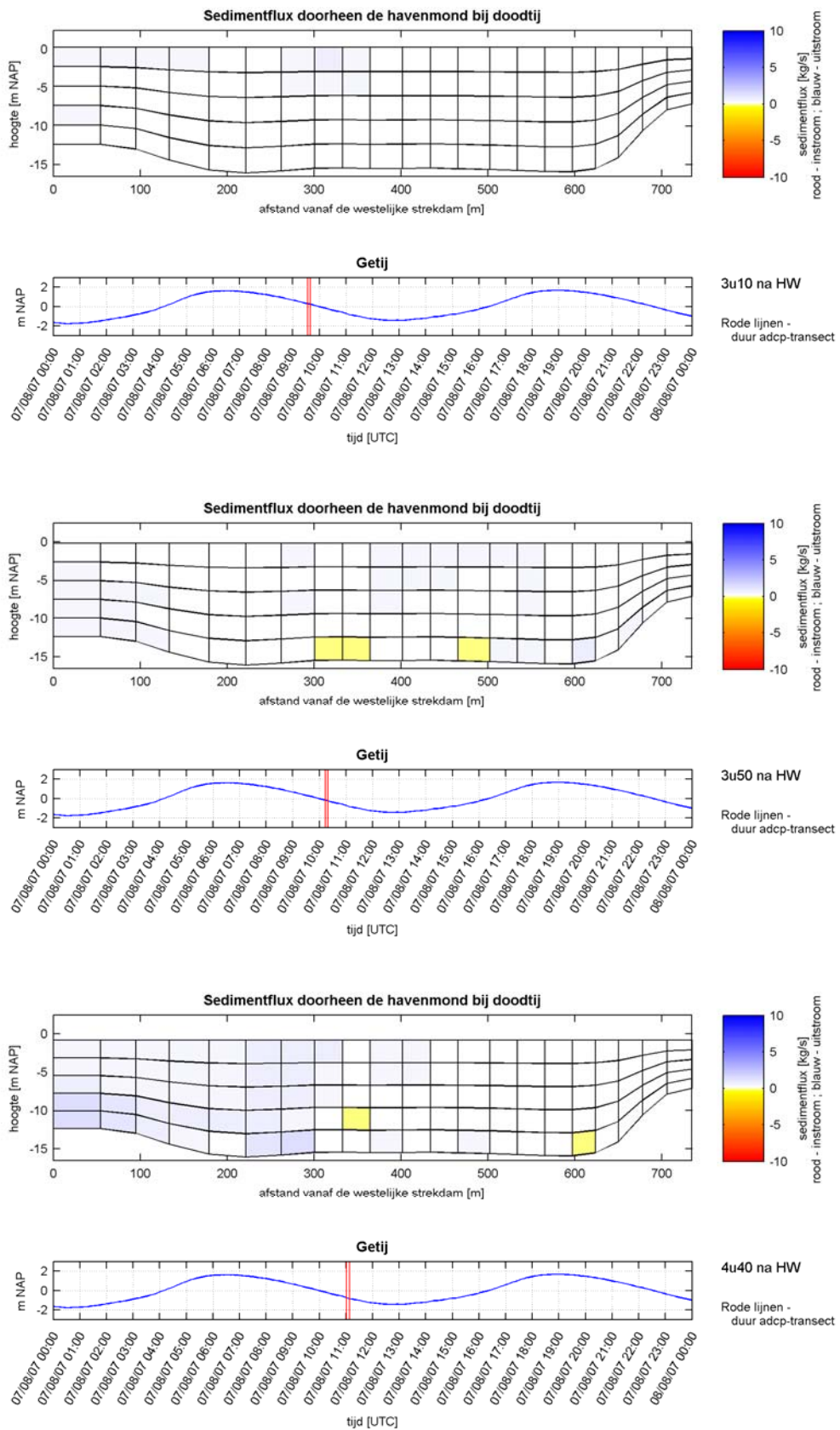
Bijlage I: Sedimentflux bij doodtij

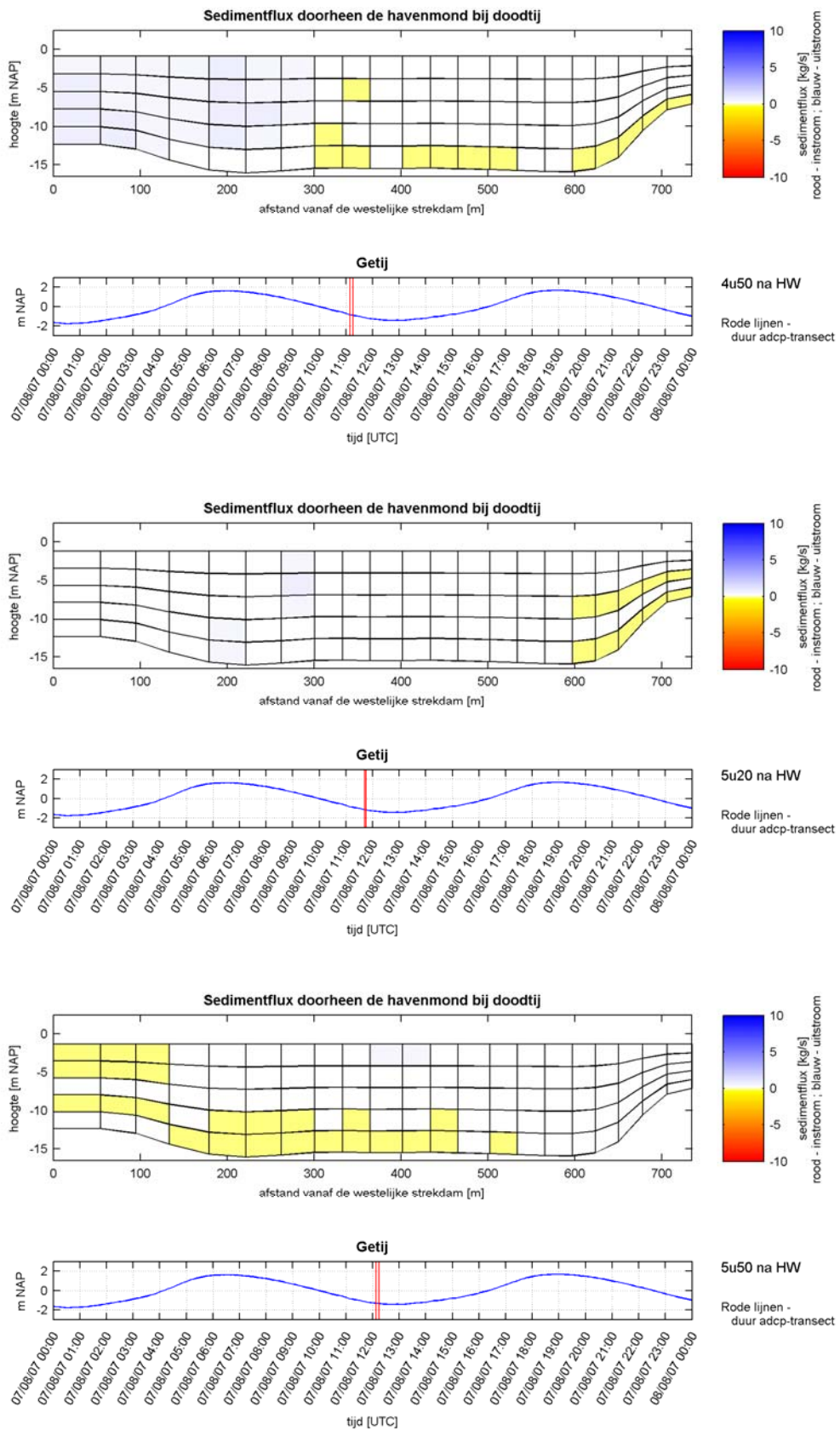


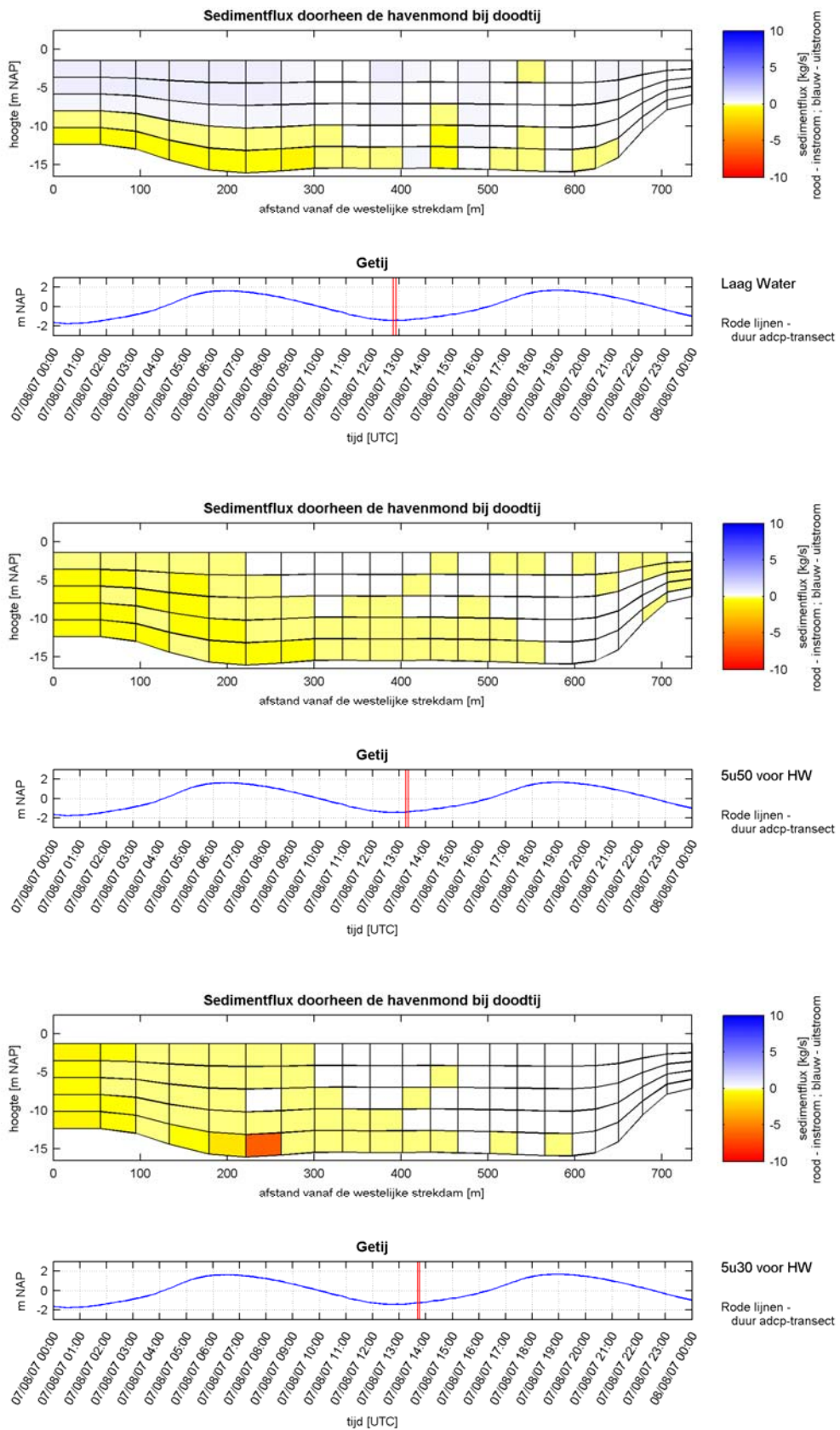


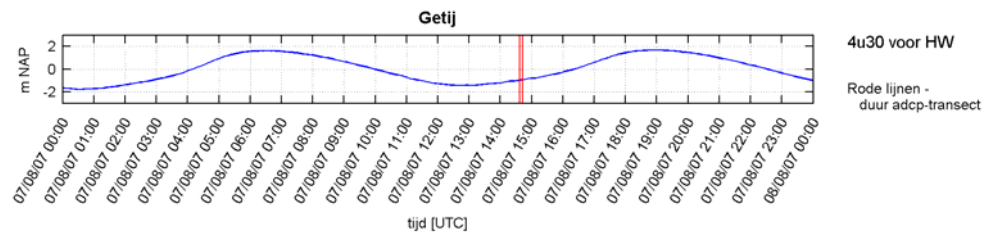
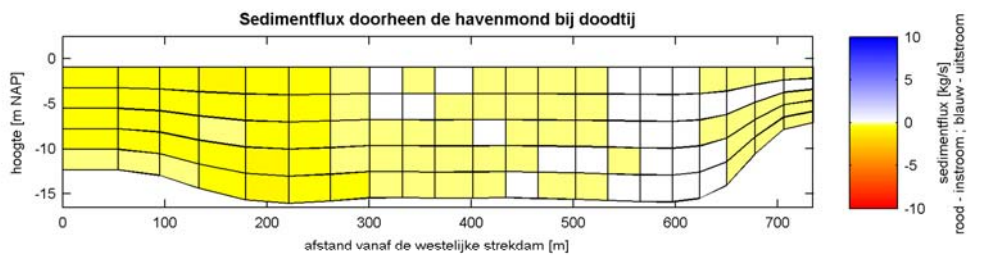
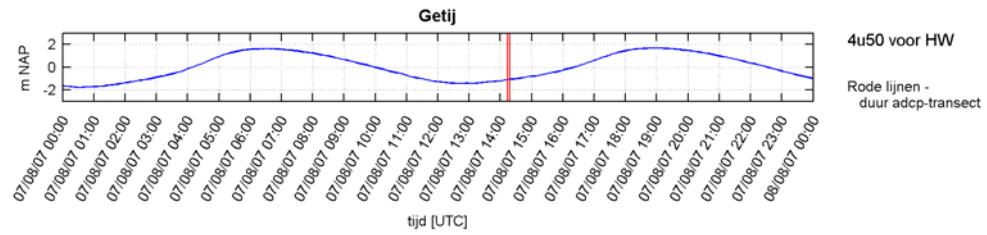
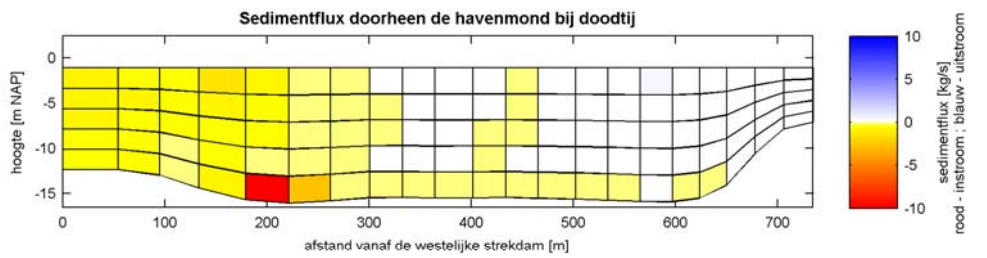














Waterbouwkundig Laboratorium

Flanders Hydraulics Research

Berchemlei 115

B-2140 Antwerpen

Tel. +32 (0)3 224 60 35

Fax +32 (0)3 224 60 36

E-mail: waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be

www.watlab.be