

Inventarisatie en historische analyse zeeschelde habitats Slikken en schorren langs de Zeeschelde

Deelrapport 2
GEVOELIGHEIDSONDERZOEK 2D MODELLEN



713_21 WL Rapporten

Vervolgstudie inventarisatie en historische analyse van slikken en schorren langs de Zeeschelde

Gevoeligheidsonderzoek 2D modellen

Ides, S.; Vanlede, J.; De Mulder, T.; Mostaert, F.

december 2008

WL2008R713_21_2rev2_0

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Ides, S.; Vanlede, J.; De Mulder, T.; Mostaert, F. (2008). Vervolgstudie inventarisatie en historische analyse van slikken en schorren langs de Zeeschelde – Gevoeligheidsonderzoek 2D modellen. WL Rapporten, 713_21. 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 veelevoudigd 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:	Vervolgstudie inventarisatie en historische analyse van slikken en schorren langs de Zeeschelde – Gevoeligheidsonderzoek 2D modellen		
Opdrachtgever:	Afdeling Maritieme Toegang	Ref.:	WL2008R713_21_2rev2_0
Keywords (3-5):	Schelde-estuarium, 2D modellering, gevoeligheidsonderzoek		
Tekst (p.):	33	Tabellen (p.):	-
Bijlagen (p.):	4	Figuren (p.):	78
Vertrouwelijk:	<input type="checkbox"/> Ja	Uitzondering:	<input type="checkbox"/> Opdrachtgever
			<input type="checkbox"/> Intern
		Vrijgegeven vanaf	<input type="checkbox"/> Vlaamse overheid
	<input checked="" type="checkbox"/> Nee		

Goedkeuring

Auteur ir Stefaan Ides	Revisor ir Joris Vanlede	Projectleider ir Stefaan Ides	Afdelingshoofd Dr. Frank Mostaert
----------------------------------	------------------------------------	---	---

Revisies

Nr.	Datum	Omschrijving	Auteur
1_0	05/09/2008	Conceptversie deels	Stefaan Ides
1_1	16/09/2008	Conceptversie volledig	Stefaan Ides
1_2	20/10/2008	Revisie opdrachtgever	Stefaan Ides
2_0	04/12/2008	Definitieve versie	Stefaan Ides

Abstract

Voorliggend onderzoek kadert in het project *Vervolgstudie inventarisatie en historische analyse langs de Zeeschelde*. Deze studie is een aanvulling op de vroegere studie van *Van Braeckel et al. (2006)*. In voorliggende studie worden numerieke modellen ingezet teneinde verklaringen voor bepaalde vastgestelde fenomenen te kunnen geven.

Alvorens het numerieke modelinstrumentarium in te zetten, wordt een gevoeligheidsanalyse van het 2D NEVLA model uitgevoerd. Hierbij wordt nagegaan wat de invloed is van verschillende numerieke parameters op de modelresultaten. Het *rekenrooster* is zoals verwacht belangrijk, vooral in het meest opwaartse deel van het Schelde estuarium. Aanpassingen in de Boven Zeeschelde en het Rupelbekken worden doorgevoerd teneinde de getijdoorringing te verbeteren.

Verschiedende *methoden om meetdata te interpoleren* naar een bathymetrische diepte van het rekenrooster worden uitgetest. Daarbij blijken de methoden die gebruik maken van een gemiddelde van de meetpunten in de omgeving van het roosterpunt vrij gelijkaardige resultaten te geven. Grote afwijkingen in komberging (en bijgevolg eveneens in hydrodynamica) worden bekomen wanneer wordt overgestapt op de maximale en de minimale waarde van de omliggende meetpunten.

Aan de opwaartse *rand* wordt het model aangestuurd door opgelegde debieten. Te Merelbeke wordt voor eenzelfde periode 5 minuut, uur en daggemiddelde debieten opgelegd. Hieruit blijkt dat er weinig verschil is tussen het opleggen van 5 minuut of uur gemiddelde debieten. Wanneer echter daggemiddelde debieten worden opgelegd, wordt de invloed van de natuurlijke fluctuatie van de bovenafvoer op de waterdstand niet meer goed gemodelleerd. Het invloedsgebied strekt zich hierbij uit tot Hemiksem.

Tot slot wordt de gevoeligheid ten opzichte van de *bodemruwheid* onderzocht. Hierbij wordt enerzijds gewerkt met een uniforme waarde voor deze parameter, vervolgens met een ruimtevariërend veld. Eveneens worden verschillende ruwheidsformuleringen met elkaar vergeleken.

Inhoudstafel

Inhoudstafel	I
Lijst van de tabellen	II
Lijst van de figuren	III
1 Inleiding	6
2 Leeswijzer	8
3 Het NEVLA model	9
3.1 Rekenrooster	9
3.2 Topo-bathymetrie	9
3.3 Randvoorwaarden	9
4 Gevoeligheidsonderzoek: numeriek rekenrooster	10
4.1 Inleiding	10
4.2 Aanpassingen rekenrooster	10
4.3 Gevoeligheidsonderzoek resolutie rekenrooster	14
5 Gevoeligheidsonderzoek: topo-bathymetrie	17
5.1 Inleiding	17
5.2 Topo-bathymetrie van het rekenrooster	17
6 Gevoeligheidsonderzoek: debieten te Merelbeke	22
6.1 Inleiding	22
6.2 Debieten te Merelbeke	22
7 Gevoeligheidsonderzoek: bodemruwheid	24
7.1 Inleiding	24
7.2 Bodemruwheid	24
8 Conclusies en aanbevelingen	30
9 Referenties	33
Bijlage A	A1
Het aarde-zon systeem	A1
Het astronomische getij	A3
Het getij opgedeeld in harmonische componenten	A3
Figuren	

Lijst van de tabellen

Tabel 1: Overzicht simulaties aanpassingen rekenrooster	11
Tabel 2: Afwijkingen HW en LW van run104 tov run101 voor de periode 1-30 sept 2006. Positieve waarden wijzen op hogere waterstanden respectievelijk latere extrema van run104 tov run101.	12
Tabel 3: Afwijkingen HW en LW van run105 tov run104 voor de periode 1-30 sept 2006. Positieve waarden wijzen op hogere waterstanden respectievelijk latere extrema van run105 tov run104.	13
Tabel 4: Overzicht simulaties gevoeligheidsonderzoek rekenrooster	14
Tabel 5: Overzicht simulaties gevoeligheidsonderzoek rekenrooster. Afwijking HW en LW ten opzichte van run110. Positieve waarden wijzen op hogere waterstanden respectievelijk latere extrema van de betreffende run tov run110.	15
Tabel 6: Rekestijd simulaties roosterresolutie	16
Tabel 7: Overzicht simulaties topo-bathymetrie	18
Tabel 8: Afwijkingen HW en LW van run202 en run203 tov run201 voor de periode 1-30 sept 2006. Positieve waarden wijzen op hogere waterstanden respectievelijk latere extrema van run202 tov run203.	20
Tabel 9: Afwijkingen HW en LW van run204 en run205 tov run201 voor de periode 1-30 sept 2006. Positieve waarden wijzen op hogere waterstanden respectievelijk latere extrema van run204 / run205 tov run201.	21
Tabel 10: Afwijkingen HW en LW van run206 en run207 tov run201 voor de periode 1-30 sept 2006. Positieve waarden wijzen op hogere waterstanden respectievelijk latere extrema van run206 / run207 tov run201.	21
Tabel 11: Overzicht simulaties randvoorwaarde te Merelbeke	22
Tabel 12: Overzicht simulaties ruwheid	25
Tabel 13: Beschrijving van de verschillende deelgebieden	26

Lijst van de figuren

- Figuur 1: Waterstandsstations langsheen het Schelde-estuarium
- Figuur 2: Waterstandsstations op het Rupelbekken
- Figuur 3: Roosteraanpassingen in het Rupelbekken. Rood run101, groen run102. Dijle (boven), Grote Nete (onder)
- Figuur 4: Roosteraanpssingen in het Rupelbekken. Rood run101, groen run102. Kleine Nete (boven), Zenne (onder)
- Figuur 5: Roosteraanpassingen in de Boven Zeeschelde. Rood run103, groen run101.
- Figuur 6: Roosteraanpassingen in de Boven Zeeschelde. Rood run103, groen run101. Detail Sint-Amands (boven), detail Uitbergen (onder)
- Figuur 7: Roosteraanpassingen in de Boven Zeeschelde. Rood run103, groen run101. Detail schor aan de Rupelmonding
- Figuur 8: Afknippen van overstromingsgebieden. Rood run101, groen run105.
- Figuur 9: Topo-bathymetrie en gemodelleerde waterstand in de omgeving van Uitbergen. Oorspronkelijke schematisatie (NEVLA)
- Figuur 10: Topo-bathymetrie en gemodelleerde waterstand in de omgeving van Uitbergen. Verbeterde schematisatie (Verelst et al., 2008)
- Figuur 11: Modelbathymetrie en gesimuleerde snelheden in de omgeving van Kessel (Grote Nete). Oorspronkelijke schematisatie (NEVLA)
- Figuur 12: Modelbathymetrie en gesimuleerde snelheden in de omgeving van Kessel (Grote Nete). Verbeterde schematisatie (Adema, 2006)
- Figuur 13: Ongewenste instroming in een potentieel overstromingsgebied tussen Walem en Boom. Waterstand (kleur en waarden) en snelheid (pijlen), situatie rond HW.
- Figuur 14: Ongewenste instroming in een potentieel overstromingsgebied tussen Temse en Schelle. Waterstand (kleur en waarden) en snelheid (pijlen), situatie rond HW.
- Figuur 15: Topo-bathymetrie en locatie waterstandsstations detailmodel roosterverfijning.
- Figuur 16: Detail roosterverfijning omgeving van Uitbergen. Rood oorspronkelijk rooster, groen boven 1x2 verfijnd rooster, groen onder 4x4 verfijnd rooster.
- Figuur 17: Invloed roosterresolutie op waterstand. Gemeten en berekende waterstand te Dendermonde.
- Figuur 18: Invloed roosterresolutie op waterstand. Gemeten en berekende waterstand te Schoonaarde.
- Figuur 19: Invloed roosterresolutie op waterstand. Gemeten en berekende waterstand te Wetteren.
- Figuur 20: Invloed roosterresolutie op waterstand. Gemeten en berekende waterstand te Melle.
- Figuur 21: Stapsgewijze hypsometrische curve voor het hele estuarium relatief ten opzichte van de bodem van run201. Groter dan 1 is dieper dan run201.
- Figuur 22: Convexe en concave bodemvormen. Schematisch voorbeeld ter illustratie.
- Figuur 23: Gemeten debieten te Merelbeke van 26 juni tot 9 juli 2002. Vergelijking van 5minuut, uur en dag gemiddelde debieten.
- Figuur 24: Gemeten debieten te Merelbeke detail. Periode met lage afvoer (28-30 juni 2002).
- Figuur 25: Gemeten debieten te Merelbeke detail. Periode met hoge afvoer (1-5 juli 2002).
- Figuur 26: Berekende waterstand te Wetteren. Periode met lage afvoer (28-30 juni 2002).

Figuur 27: Berekende waterstand te Wetteren. Periode met hoge afvoer (1-5 juli 2002).

Figuur 28: Berekende waterstand te Schoonaarde. Periode met lage afvoer (28-30 juni 2002).

Figuur 29: Berekende waterstand te Schoonaarde. Periode met hoge afvoer (1-5 juli 2002).

Figuur 30: Berekende waterstand te Sint-Amands. Periode met lage afvoer (28-30 juni 2002).

Figuur 31: Berekende waterstand te Sint-Amands. Periode met hoge afvoer (1-5 juli 2002).

Figuur 32: Verschil in berekende waterstanden run302 ten opzichte van run301. Debieten te Merelbeke worden eveneens getoond op de figuur.

Figuur 33: Verschil in berekende waterstanden run303 ten opzichte van run301. Debieten te Merelbeke worden eveneens getoond op de figuur.

Figuur 34: M2 amplitude (boven) en fase (onder) voor run401, run402 en run403 - Effect verschillende uniforme ruwheid

Figuur 35: S2 amplitude (boven) en fase (onder) voor run401, run402 en run403 - Effect verschillende uniforme ruwheid

Figuur 36: M4 amplitude (boven) en fase (onder) voor run401, run402 en run403 - Effect verschillende uniforme ruwheid

Figuur 37: Faseverscheid 2M2-M4 (boven) en fase verhouding M4/M2 (onder) voor run401, run402 en run403 - Effect verschillende uniforme ruwheid

Figuur 38: De Westerschelde met aanduiding van macrocellen gevormd door de eb- en vloedgeulen

Figuur 39: M2 amplitude (boven) en S2 amplitude (onder) voor run401, run404 en run405 - Effect wijzigen ruwheid deelgebied 1

Figuur 40: M4 amplitude voor run401, run404 en run405 - Effect wijzigen ruwheid deelgebied 1

Figuur 41: Faseverscheid 2M2-M4 (boven) en fase verhouding M4/M2 (onder) voor run401, run404 en run405 - Effect wijzigen ruwheid deelgebied 1

Figuur 42: M2 amplitude (boven) en S2 amplitude (onder) voor run401, run406 en run407 - Effect wijzigen ruwheid deelgebied 2

Figuur 43: M4 amplitude voor run401, run406 en run407 - Effect wijzigen ruwheid deelgebied 2

Figuur 44: Faseverscheid 2M2-M4 (boven) en fase verhouding M4/M2 (onder) voor run401, run406 en run407 - Effect wijzigen ruwheid deelgebied 2

Figuur 45: M2 amplitude (boven) en S2 amplitude (onder) voor run401, run408 en run409 - Effect wijzigen ruwheid deelgebied 3

Figuur 46: M4 amplitude voor run401, run408 en run409 - Effect wijzigen ruwheid deelgebied 3

Figuur 47: Faseverscheid 2M2-M4 (boven) en fase verhouding M4/M2 (onder) voor run401, run408 en run409 - Effect wijzigen ruwheid deelgebied 3

Figuur 48: M2 amplitude (boven) en S2 amplitude (onder) voor run401, run410 en run411 - Effect wijzigen ruwheid deelgebied 4

Figuur 49: M4 amplitude voor run401, run410 en run411 - Effect wijzigen ruwheid deelgebied 4

Figuur 50: Faseverscheid 2M2-M4 (boven) en fase verhouding M4/M2 (onder) voor run401, run410 en run411 - Effect wijzigen ruwheid deelgebied 4

Figuur 51: M2 amplitude (boven) en S2 amplitude (onder) voor run401, run412 en run413 - Effect wijzigen ruwheid deelgebied 5

Figuur 52: M4 amplitude voor run401, run412 en run413 - Effect wijzigen ruwheid deelgebied 5

Figuur 53: Faseverscheid 2M2-M4 (boven) en fase verhouding M4/M2 (onder) voor run401, run412 en run413 - Effect wijzigen ruwheid deelgebied 5

Figuur 54: M2 amplitude (boven) en S2 amplitude (onder) voor run401, run414 en run415 - Effect wijzigen ruwheid deelgebied 6

Figuur 55: M4 amplitude voor run401, run414 en run415 - Effect wijzigen ruwheid deelgebied 6

Figuur 56: Faseverscheid 2M2-M4 (boven) en fase verhouding M4/M2 (onder) voor run401, run414 en run415 - Effect wijzigen ruwheid deelgebied 6

Figuur 57: M2 amplitude (boven) en S2 amplitude (onder) voor run401, run416 en run417 - Effect wijzigen ruwheid deelgebied 7

Figuur 58: M4 amplitude voor run401, run416 en run417 - Effect wijzigen ruwheid deelgebied 7

Figuur 59: Faseverscheid 2M2-M4 (boven) en fase verhouding M4/M2 (onder) voor run401, run416 en run417 - Effect wijzigen ruwheid deelgebied 7

Figuur 60: M2 amplitude (boven) en S2 amplitude (onder) voor run401, run418 en run419 - Effect wijzigen ruwheid deelgebied 8

Figuur 61: M4 amplitude voor run401, run418 en run419 - Effect wijzigen ruwheid deelgebied 8

Figuur 62: Faseverscheid 2M2-M4 (boven) en fase verhouding M4/M2 (onder) voor run401, run418 en run419 - Effect wijzigen ruwheid deelgebied 8

Figuur 63: M2 amplitude (boven) en S2 amplitude (onder) voor run401, run420 en run421 - Effect wijzigen ruwheid deelgebied 9

Figuur 64: M4 amplitude voor run401, run420 en run421 - Effect wijzigen ruwheid deelgebied 9

Figuur 65: Faseverscheid 2M2-M4 (boven) en fase verhouding M4/M2 (onder) voor run401, run420 en run421 - Effect wijzigen ruwheid deelgebied 9

Figuur 66: M2 amplitude (boven) en S2 amplitude (onder) voor run401, run422 en run423 - Effect wijzigen ruwheid deelgebied 10

Figuur 67: M4 amplitude voor run401, run422 en run423 - Effect wijzigen ruwheid deelgebied 10

Figuur 68: Faseverscheid 2M2-M4 (boven) en fase verhouding M4/M2 (onder) voor run401, run422 en run423 - Effect wijzigen ruwheid deelgebied 10

Figuur 69: Ruimtelijk variërende Manning bodemruwheid run424 (boven) en run425 (onder)

Figuur 70: M2 amplitude (boven) en fase (onder) voor run401, run424, run425 en run426 - Effect ruimtelijk variërende ruwheid

Figuur 71: S2 amplitude (boven) en fase (onder) voor run401, run424, run425 en run426 - Effect ruimtelijk variërende ruwheid

Figuur 72: M4 amplitude (boven) en fase (onder) voor run401, run424, run425 en run426 - Effect ruimtelijk variërende ruwheid

Figuur 73: Faseverscheid 2M2-M4 (boven) en fase verhouding M4/M2 (onder) voor run401, run424, run425 en run426 - Effect ruimtelijk variërende ruwheid

Figuur 74: M2 amplitude (boven) en fase (onder) voor run401, run427 en run428 - Effect verschillende ruwheidsformulering

Figuur 75: S2 amplitude (boven) en fase (onder) voor run401, run427 en run428 - Effect verschillende ruwheidsformulering

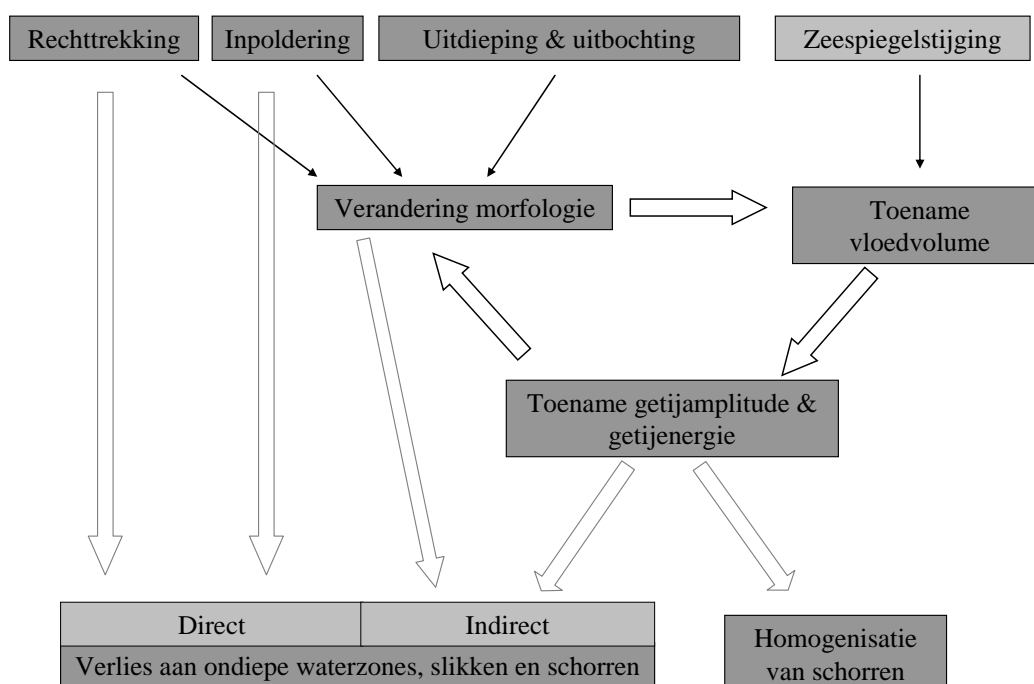
Figuur 76: M4 amplitude (boven) en fase (onder) voor run401, run427 en run428 - Effect verschillende ruwheidsformulering

Figuur 77: Faseverscheid 2M2-M4 (boven) en fase verhouding M4/M2 (onder) voor run401, run427 en run428 - Effect verschillende ruwheidsformulering

Figuur 78: Omgerekende Chézy bodemruwheid in funtie van de diepte voor verschillende ruwheidsformuleringen

1 Inleiding

Uit de historische analyse van de slikken en de schorren in de Zeeschelde [Van Braeckel et al., 2006] is gebleken dat het areaal aan schorren, slikken en ondiepe sublitorale gebieden langs de Zeeschelde en haar getijgebonden zijrivieren in de afgelopen anderhalve eeuw sterk is afgenomen. Dit is grotendeels te wijten aan direct habitatverlies door rechtekkingen, inpolderingen, dijk- en andere infrastructuurwerken. De laatste decennia is het relatieve belang van indirect habitatverlies (i.e. habitatverlies door erosie) echter sterk toegenomen als gevolg van de toenemende getijdenenergie in het estuarium. Verschillende natuurlijke processen en antropogene ingrepen kunnen hieraan ten grondslag liggen. Naast de eerder vermelde ingrepen zijn ook zeespiegelstijging, gewijzigde bovenstroomse debieten, verruiming en verdieping van de vaargeul, continue onderhoudsbaggerwerken, zandwinning en natuurlijke morfologische veranderingen in de Westerschelde mee bepalend voor de vloedvolumes en de manier waarop het getij het estuarium in- en uitgaat. Figuur 1 geeft een vereenvoudigde weergave van de onderlinge samenhang tussen de belangrijkste factoren. Over de relatieve bijdrage van deze factoren in de vastgestelde achteruitgang van sub- en intertidale gebieden is slechts weinig gekend. Dit gebrek aan systeemkennis maakt het moeilijk om de impact van toekomstige ingrepen in te schatten en indien nodig eventueel bij te sturen.



Figuur 1 – Schematische weergave van de relaties tussen natuurlijke evoluties, antropogene ingrepen en het effect op de slikken, schorren en subtidale gebieden. Uit [Braeckel et al., 2006]

Het doel van voorliggende studie *Vervolgstudie inventarisatie en historische analyse van slikken en schorren in de Zeeschelde* is om enerzijds het effect van de verschillende individuele ingrepen en hun onderlinge samenhang op de hydrodynamica en de morfologie van het estuarium te onderscheiden. Dit zal gebeuren door gebruik te maken van hydrodynamische numerieke modellen. Vervolgens zal een

doorvertaling worden gemaakt van dit effect op de arealen slikken, schorren en ondiepe sublitorale gebieden. Anderzijds zal bijkomend onderzoek op ecosysteemniveau gebeuren om een aantal hiaten uit de studie [*Van Braeckel et al., 2006*] op te vullen.

Voor de hydrodynamische modellering in deze studie wordt gebruik gemaakt van enerzijds het 1D SIGMA model [*Peeters et al., 2008*], anderzijds van het 2D NEVLA model [*Waterbouwkundig Laboratorium, 2004*]. Alvorens het NEVLA model te gebruiken voor deze studie, zal een gevoeligheidsonderzoek en daaropvolgend een kalibratieslag worden uitgevoerd. Hierbij zal vooral worden gefocust op het getijgebonden gedeelte van het Schelde estuarium opwaarts Antwerpen. Deze gevoeligheidsanalyse is het onderwerp van dit rapport.

2 Leeswijzer

In de inleiding wordt voorliggend rapport gesitueerd binnen het onderzoek *Vervolgstudie inventarisatie en historische analyse van slikken en schorren langs de Zeeschelde*. Hierbij worden eveneens de belangrijkste conclusies uit [Van Braeckel et al., 2006] herhaald.

Hoofdstuk 3 geeft een beknopte beschrijving van het gebruikte NEVLA model. In de daarop volgende hoofdstukken wordt de gehanteerde werkwijze van de gevoeligheidsanalyse beschreven alsook de bekomen resultaten. Hierbij wordt een onderscheid gemaakt tussen het numerieke rekenrooster (hoofdstuk 4), de interpolatie van de topo-bathymetrie op het rekenrooster (hoofdstuk 5), de meetfrequentie van de opwaartse debieten te Merelbeke (hoofdstuk 6) en tot slot de bodemruwheid (hoofdstuk 7). Deze verschillende hoofdstukken gaan dieper in op het effect van een bepaalde wijziging op de getij-doordringing in het estuarium, de hoog- en laagwaters in het bijzonder.

De conclusies alsook de aanbevelingen van dit onderzoek zijn terug te vinden in hoofdstuk 8.

3 Het NEVLA model

Voor deze studie werd gebruik gemaakt van het bestaande NEVLA model. Dit model werd begin 2004 door het Waterbouwkundig Laboratorium gekalibreerd en gevalideerd voornamelijk met het oog op een goede weergave van de getij-indringing in het estuarium [*Waterbouwkundig Laboratorium, 2004*]. In dit hoofdstuk wordt dit model kort besproken.

3.1 Rekenrooster

Daar waar het rekenrooster van het originele model van de Belgisch-Franse grens tot Oostkapelle loopt werd de zeewaartse rand voor deze studie bij de raai Westkapelle - Cadzand gelegd. Aangezien er zowel in Westkapelle als Cadzand waterstandsmeters van Hydro Meteo Centrum Zeeland zijn, kan op die manier het werkelijk opgetreden getij voor een bepaalde periode op de zeewaartse rand van het model worden opgelegd.

3.2 Topo-bathymetrie

In het NEVLA model werd een nieuwe bathymetrie ingevoerd. Hiervoor werd gebruik gemaakt van de meest recente topo-bathymetrische opmetingen van het modelgebied.

- *Boven Zeeschelde, Rupel en Durme*: Single Beam raaien opgemeten in 2001.
- *Beneden Zeeschelde*: Single Beam raaien opgemeten in 2004-2005.
- *Westerschelde*: Single Beam raaien opgemeten in 2006, LIDAR opname litoraal en sublitoraal gebied uit 2003.
- *Mondingsgebied van de Westerschelde*: Single Beam raaien opgemeten in 2003.

Aangezien de topo-bathymetrische meetpunten niet overeenkomen met de roosterpunten van het numerieke model, moet een interpolatie worden gemaakt. Hiervoor werden verschillende interpolatiemethodes met elkaar vergeleken. Voor meer informatie hieromtrent wordt verwezen naar hoofdstuk 5.

3.3 Randvoorwaarden

Het NEVLA model heeft meerdere opwaartse randen. Aan deze opwaartse randen worden dag-gemiddelde debieten opgelegd gemeten in de stations Grobbendonk (Kleine Nete), Itegem (Grote Nete), Epegem (Zenne), Haacht (Dijle), Dendermonde (Dender) en Melle (Bovenschede en Leie). Deze debieten werden ter beschikking gesteld door de cel Hydrometrie van het Waterbouwkundig Laboratorium. Te Melle werd eveneens nagegaan wat het effect is van een hogere meetfrequentie van de debieten (cfr. hoofdstuk 6).

De afwaartse rand van het model ligt ter hoogte van de raai Westkapelle - Cadzand. Op beide locaties heeft Hydro Meteo Centrum Zeeland een meetpost die de waterstand met een frequentie van 10 minuten opmeet. Als randvoorwaarde werd aan deze rand een waterstand opgelegd die lineair varieert tussen de gemeten waterstand te Westkapelle en deze te Cadzand.

Als simulatieperiode werd gekozen voor de periode 1-30 september 2006, aangezien er voor deze maand veel meetdata in de Schelde beschikbaar zijn. Waar een andere simulatieperiode werd gebruikt, wordt dit expliciet vermeld.

4 Gevoeligheidsonderzoek: numeriek rekenrooster

4.1 Inleiding

In een meerdimensionaal numeriek waterbewegingsmodel wordt een rivier of een waterloop geschematiseerd als een rooster van rekenpunten. De werkelijke rivier wordt als het ware gediscretiseerd in een eindig aantal cellen die onderling met elkaar water uitwisselen. Hoe groter het aantal rekenpunten, hoe beter de schematisatie van de rivier. Aan de andere kant betekent een groter aantal rekenpunten eveneens een langere rekentijd. Een compromis tussen rekentijd en nauwkeurigheid van de schematisatie dient dus gezocht te worden.

In dit hoofdstuk wordt in eerste fase het rooster in de meest opwaartse zone aangepast. Daarnaast zal eveneens een gevoeligheidsonderzoek worden uitgevoerd naar de resolutie van het rekenrooster in het opwaartse deel van het Schelde estuarium. Voor alle in dit hoofdstuk beschreven simulaties zullen alle parameters (randvoorwaarden, bodemruwheid, ...) behalve het rekenrooster constant worden gehouden, teneinde de verschillende simulaties met elkaar te kunnen vergelijken.

4.2 Aanpassingen rekenrooster

4.2.1 Overzicht vroegere studies

Voor voorliggende studie werd gebruik gemaakt van het zogenaamde NEVLA rooster: dit is een rekenrooster dat in 2004 werd ontwikkeld en het hele tijgebied van het Schelde estuarium (inclusief de tij-afhankelijke zijrivieren) omvat [*Waterbouwkundig Laboratorium, 2004*]. De voorbije jaren werden in het kader van verschillende projecten inspanningen geleverd om het rekenrooster van dit model in de meest opwaartse zone te verbeteren. Deze roosterverbeteringen kaderden in verschillende studies en werden tot op heden niet allen tezamen geïmplementeerd in het NEVLA rooster. In een eerste fase van dit onderzoek zullen deze verschillende roosterverbeteringen allen in het oorspronkelijke NEVLA rooster worden doorgevoerd.

In het project LTV slib [*Kessel et al, 2006*] werd de schematisatie van het Rupelbekken sterk vereenvoudigd om de rekentijd te optimaliseren en om een 3D-model te kunnen draaien. In het NEVLA-rooster wordt het Rupelbekken geschematiseerd in ongeveer 127.000 rekencellen. In het LTV slibrooster zijn dat er nog slechts 6375. Aangezien in deze studie enkel gebruik wordt gemaakt van een 2D model, werden deze roosterwijzigingen niet doorgevoerd.

In het project M729-09 "Evaluatie operationele voorspellingen getij en golven" is er in deelopdracht 3 "Afregeven Vlaamse rivieren in het kustzuid model en vergelijking Kalman sturing" door Alkyon (o.a.) gekeken naar de getijvoortplanting in het Rupelbekken. Meer bepaald is de doorstroming in het model verbeterd door roosteraanpassingen in de Grote en Kleine Nete opwaarts van Lier, en in de Zenne en de Dijle opwaarts van Walem. Verder is in de lengterichting een roostercelafmeting van 15 m aangehouden, zodat de langgerekte cellen, die in het NEVLA-model aanwezig zijn in de bovenlopen, zijn weggenomen [*Adema, 2006*]. Om de roosteraanpassingen van [*Adema, 2006*] gedraaid te krijgen in de huidige versie van SIMONA (2007-1) moesten er overlappende cellen in de binnenbochten van de bovenlopen worden verwijderd. De finale roosters van de Zenne, de Dijle, de Grote en de Kleine Nete zijn voorgesteld in Figuur 3 en Figuur 4.

Voor het project M800-1 "Verbetering hydrodynamisch modelinstrumentarium Zeeschelde tussen Gentbrugge en Melle" hebben Verelst et al. (2008) een aantal wijzigingen aangebracht in het rooster

tussen Temse en Melle. In de tijarm Gentbrugge-Melle is het rekenrooster zodanig aangepast dat de roosterlijnen het lengteprofiel van de dijken beter volgen. Verder is het rekenrooster in de bocht te St. Amands met een factor 3 in de lengterichting van de rivier verfijnd, zodat in de bocht min of meer vierkante roostercellen worden bekomen. Tenslotte is nog een schor toegevoegd in het rekenrooster tussen Temse en St. Amands. Daarnaast zijn ook de potentiële overstromingsgebieden uit het rooster verwijderd in de zone tussen Temse en Gent [Verelst et al., 2008]. Deze roosteraanpassingen zijn voorgesteld in Figuur 5 tot Figuur 7. Het gecombineerd effect van deze aanpassingen zorgt voor een uitbreiding van het aantal actieve roosterpunten van 18.000 naar 22.238 in de zone opwaarts van Temse [Verelst et al., 2008].

Bovenstaande aanpassingen in het Rupelbekken en het Zeescheldebekken werden geïmplementeerd in een nieuw rooster gebaseerd op het NEVLA rooster. De Zeeschelde opwaarts van Temse werd overgenomen van [Verelst et al., 2008] terwijl het Rupelbekken werd overgenomen van [Adema, 2006].

4.2.2 Verwijderen buitendijkse gebieden

In het oorspronkelijke NEVLA rooster zijn er naast het gebied gelegen binnen de dijken nog een groot aantal buitendijkse gebieden aanwezig. Deze gebieden – waarvan in het kader van het geactualiseerde Sigmaphan werd onderzocht of ze in aanmerking konden komen als gecontroleerde overstromingsgebieden – hebben in het huidige NEVLA rooster geen functie meer. De dijk die deze gebieden van de rivier scheidt is immers voldoende hoog om inwatering in deze gebieden te allen tijde te vermijden. Daarom werd beslist om deze buitendijkse gebieden uit het rooster te verwijderen. Dit vermindert het aantal rekenpunten en op die manier dus eveneens de rekentijd van het model. Op Figuur 8 wordt het rooster met en zonder deze buitendijkse rivieren gevisualiseerd.

4.2.3 Resultaten

Verscheidene simulaties waarbij het rekenrooster werd aangepast werden uitgevoerd. Onderstaande tabel geeft een overzicht van deze simulaties.

Naam	Beschrijving rooster	Periode
Run101	Bestaande NEVLA rooster (M753-01)	1-30 sept 2006
Run102	Run101 met aanpassingen Rupelbekken (M729-09)	1-30 sept 2006
Run103	Run101 met aanpassingen Boven Zeescheldebekken (M800-1)	1-30 sept 2006
Run104	Run101 met aanpassingen Rupelbekken (M729-09) en Boven Zeescheldebekken (M800-1)	1-30 sept 2006
Run105	Run104 zonder buitendijkse gebieden	1-30 sept 2006

Tabel 1: Overzicht simulaties aanpassingen rekenrooster

Om de verschillende simulaties met elkaar te vergelijken, wordt in eerste plaats gekeken naar de hoog- en de laagwaters in verschillende stations, eerder dan een tijdreeks van de gesimuleerde waterstanden te visualiseren. Om een representatief beeld te krijgen, worden deze waterstanden vergeleken voor de periode van 1 september tot 30 september 2006. De variatie van de doortij-springtij cyclus zit op die manier in deze vergelijking vervat, alsook de natuurlijke variatie van de bovenafvoer (die voor de betreffende periode echter vrij beperkt is). In Tabel 2 wordt run101 op deze manier vergeleken met run104. Hierbij werd een selectie gemaakt van de veelheid aan stations waar het numerieke model een output heeft gegenereerd. De ligging van deze stations is terug te vinden op Figuur 1 voor het Scheldebekken en op Figuur 2 voor het Rupelbekken.

De roosterveranderingen in het Rupelbekken en het bekken van de Boven Zeeschelde hebben zoals verwacht een betere getijdoordringing in het opwaartse deel van het estuarium als resultaat. Afwaarts

Antwerpen wijzigen de waterstanden nauwelijks. De grootste wijzigingen zijn gesitueerd in het Scheldebekken opwaarts Hemiksem en in het volledige Rupelbekken. Waar de HW's afwaarts Antwerpen identiek zijn voor beide simulaties, vertonen de LW's tussen Antwerpen en het mondingsgebied daarentegen een uniforme verlaging van 1cm. Ondanks het feit dat dit een kleine wijziging is, wordt deze consequent in alle waterstandstations in deze zone teruggevonden. De betere getijdoordringing in het opwaartse deel van het estuarium heeft dus een (beperkte) verlaging van de LW's als gevolg.

Meetstation	HW niveau [cm]	HW fase [min]	LW niveau [cm]	LW fase [min]
<i>Westerschelde</i>				
Vlissingen	0	-0.3	-1	0.0
Hansweert	-1	0.2	-1	0.9
Bath	0	-0.5	-1	0.7
<i>Zeeschelde</i>				
Antwerpen	0	-0.9	-1	0.2
Hemiksem	0	2.0	2	-0.2
Temse	10	9.6	1	-0.2
St Amands	10	-13.6	2	0.6
Schoonaarde	5	-4.0	-7	1.1
Wetteren	7	-28.8	-25	-19.6
<i>Rupel</i>				
Boom	5	-4.0	4	-1.6
Walem	2	-9.0	-1	-0.7
<i>Beneden Nete</i>				
Duffel	7	-10.2	25	-22.6
<i>Kleine Nete</i>				
Emblem	8	93.3	-	-
<i>Grote Nete</i>				
Kessel	-8	68.7	-88	240.0
<i>Dijle</i>				
Mechelen	21	7.7	-117	-86.3
Rijmenam	4	22.4	-	-
<i>Zenne</i>				
Hombeek	5	-7.6	6	-20.0

Tabel 2: Afwijkingen HW en LW van run104 tov run101 voor de periode 1-30 sept 2006. Positieve waarden wijzen op hogere waterstanden respectievelijk latere extrema van run104 tov run101.

Opwaarts Temse hebben de doorgevoerde roosteraanpassingen een belangrijke invloed in het bekken van de Boven Zeeschelde. De HW's stijgen (grootte-orde 10cm) terwijl de LW's nauwelijks wijzigen. Het is pas ter hoogte van Schoonaarde dat de LW's met de nieuwe roosterschematisatie lager worden, terwijl de HW's hoger worden. Deze verhoging van de getij-amplitude, die in het hele estuarium opwaarts Temse is terug te vinden en belangrijker wordt naarmate het station meer opwaarts gelegen is, wijst duidelijk op een betere penetratie van de getijgolf in dit deel van het estuarium. In Figuur 9 en 10 wordt het effect van de aangepaste roosterschematisatie voor de bocht ter hoogte van Uitbergen gevisualiseerd. In het oorspronkelijke rooster (Figuur 9) is de brede omgeving van de meander bedekt met roosterzellen, en is de rivier gedefinieerd in de topo-bathymetrie. In de omgeving van Uitbergen

staat de as van de rivier echter diagonaal op de oriëntatie van het rooster, waardoor een obstructie van de stroming ontstaat rond laag water (zie Figuur 9). In het verbeterde rooster daarentegen is deze zone geschematiseerd met een rooster dat de as van de rivier wel volgt (Figuur 10), met een betere doorstroming tot gevolg.

In het Rupelbekken wordt het effect van de roosteraanpassingen onmiddellijk zichtbaar. Zowel de HW's als de LW's vertonen hier belangrijke afwijkingen, waarbij de getij-amplitude in de meeste stations toeneemt. Belangrijk is eveneens op te merken dat er een verschil is in het tijdstip van HW en LW tussen de 2 simulaties. Opnieuw zijn deze verschillen te wijten aan een betere getijdoordringing in het aangepaste rooster. Dit wordt gevisualiseerd in Figuren 11 en 12 waarbij de doorstroming in de omgeving van Kessel in het oude NEVLA rooster (Figuur 11) en het aangepaste rooster (Figuur 12) wordt weergegeven. Uit deze 2 figuren volgt duidelijk dat de vernieuwde roosterschematisatie de thalweg beter volgt, waardoor de getijdoordringing beter wordt geschematiseerd.

Meetstation	HW niveau [cm]	HW fase [min]	LW niveau [cm]	LW fase [min]
<i>Westerschelde</i>				
Vlissingen	0	-1.0	0	-0.5
Hansweert	1	-0.2	-1	-0.2
Bath	0	0.4	-2	-0.2
<i>Zeeschelde</i>				
Antwerpen	0	2.5	-3	-0.3
Hemiksem	9	6.9	-5	-0.5
Temse	13	1.8	-6	-1.1
St Amands	14	3.8	-4	-0.4
Schoonaarde	10	0.6	-1	0.0
Wetteren	6	-0.2	-1	2.3
<i>Rupel</i>				
Boom	18	2.0	-9	-1.9
Walem	19	0.3	-9	-0.5
<i>Beneden Nete</i>				
Duffel	18	0.0	0	-1.7
<i>Kleine Nete</i>				
Emblem	11	-3.4	-	-
<i>Grote Nete</i>				
Kessel	7	-4.1	0	0.0
<i>Dijle</i>				
Mechelen	16	1.6	0	4.1
Rijmenam	29	23.1	-	-
<i>Zenne</i>				
Hombeek	19	3.6	0	0.0

Tabel 3: Afwijkingen HW en LW van run105 tov run104 voor de periode 1-30 sept 2006. Positieve waarden wijzen op hogere waterstanden respectievelijk latere extrema van run105 tov run104.

Het effect van het verwijderen van de buitendijkse gebieden werd onderzocht in run105. In het oorspronkelijke NEVLA rooster zijn immers een groot aantal buitendijkse gebieden – die in het kader van het geactualiseerde Sigmapijan werden onderzocht als zogenaamde potentiële overstromingsgebieden – mee opgenomen. Het schematiseren van deze buitendijkse gebieden houdt

in dat de dijken in de modelbathymetrie moeten worden ingebracht, wat het gevaar met zich meebrengt dat de dijkhoogte tijdens de interpolatie van de dieptemetingen op het rekenrooster wordt uitgemiddeld ten opzichte van lagere, omliggende hoogtemetingen. Dit kan in het model ongewenste overstromingen in buitendijkse gebieden geven, zoals geïllustreerd in Figuur 13 en Figuur 14. Daarom zijn de gebieden die een hele simulatie droog blijven preventief uit het rooster gehaald, wat heeft geresulteerd in run105.

De invloed van het wegsnijden uit het rooster van de buitendijkse gebieden in de Zeeschelde heeft zoals verwacht nauwelijks tot geen invloed op de waterstand in de Westerschelde. In de Zeeschelde is er vanaf Hemiksem wel een duidelijke invloed merkbaar. De HW's dalen met een maximum van ongeveer 14 cm in Sint Amands. Dit is te verklaren door het feit dat de (ongewenste) gesimuleerde instromingen in de buitendijkse gebieden de HW's in de onmiddellijke omgeving voor een deel zullen "afromen", vergelijkbaar met de werking van een gecontroleerd overstromingsgebied. De LW's daarentegen zijn voor wat betreft de Zeeschelde in run105 lager vergeleken met run104: dit effect is maximaal met een verlaging van 6 cm te Temse. Dit heeft vermoedelijk te maken met het effect van vertraagde uitwatering uit de buitendijkse gebieden in run104. In het Rupelbekken zijn dezelfde bevindingen als in de Zeeschelde terug te vinden voor wat betreft de HW's. Het effect van de verlaging van de LW's echter is enkel terug te vinden in de Rupel zelf.

De verschillen tussen run104 en run105 zijn het gevolg van een ongewenste instroming in de buitendijkse gebieden in het model. Het weghalen van deze gebieden brengt het model dus dichterbij de werkelijkheid. Voor het vervolg van deze studie zal daarom enkel nog worden verder gewerkt met het rekenrooster zonder de buitendijkse gebieden.

4.3 Gevoeligheidsonderzoek resolutie rekenrooster

4.3.1 Uitgevoerde simulaties

Om het effect van de resolutie van het rekenrooster op de getijvoortplanting te bestuderen, werd gebruik gemaakt van een detailmodel. Hierbij werd gefocust op het meest opwaartse deel van het estuarium, aangezien de resolutie hier grof is (roostercellen van ongeveer 20m x 50m) in vergelijking met de karakteristieke afmetingen van de rivier (stroomvoerende breedte tussen 80 en 200m). Als afwaartse grens werd Dendermonde gekozen, opwaarts strekt het detailmodel zich uit tot Gentbrugge, Zwijnaarde en Merelbeke (i.e. de grens van het getijgebied). Figuur 15 toont de topo-bathymetrie van dit detailmodel.

In Tabel 4 wordt een overzicht gegeven van de uitgevoerde simulaties. Als basisrooster (run110) werd gebruik gemaakt van het rekenrooster uit run105. Dit rekenrooster bestaat uit rechthoekige cellen waarbij de afmeting in de stroomvoerende richting (cfr. circa 50m) aanzienlijk groter is dan de afmeting van de rekencel loodrecht op de thalweg (cfr. circa 18m). Vandaar werd bij een eerste verfijning gekozen om enkel de resolutie volgens de thalweg te verfijnen (run111, zie Figuur 16 bovenaan). Vervolgens werden eveneens simulaties uitgevoerd waarbij de resolutie in beide richtingen werd verfijnd. Dit resulteerde in run112 met een 2x2 verfijning respectievelijk run113 met een 4x4 verfijning ten opzichte van het basisrooster. Dit laatste rooster wordt getoond in Figuur 16 onderaan de figuur.

Naam	Beschrijving rooster	Periode
Run110	Basisrooster run105	26jun-4jul 2002
Run111	Basisrooster 1x2 verfijnd	26jun-4jul 2002
Run112	Basisrooster 2x2 verfijnd	26jun-4jul 2002
Run113	Basisrooster 4x4 verfijnd	26jun-4jul 2002

Tabel 4: Overzicht simulaties gevoeligheidsonderzoek rekenrooster

Tot slot wordt vermeld dat voor elk rekenrooster uit Tabel 4 een nieuwe topo-bathymetrische interpolatie werd uitgevoerd. Daarnaast werd eveneens de tijdstap van de simulaties aangepast, teneinde het Courant getal voor alle simulaties vergelijkbaar te houden. Dit getal is een maat voor de numerieke stabiliteit van de simulatie. Een fijner rooster dient met een kleinere tijdstap te worden doorgerekend.

Voor elk doorgerekend rooster wordt het ruwheidsveld gelijk gehouden. Dit om het effect van een roosterverfijning te isoleren. Nu wordt echter wel verwacht dat de ruwheid in een fijner rooster anders doorwerkt op de waterbeweging dan in een grover rooster. In een fijner rooster worden bijvoorbeeld horizontale snelheidsgradiënten en de bijbehorende momentumdissipatie door interne wrijving beter geschematiseerd. Bij het calibreren van een model met grovere schematisatie kan dit effect deels gecompenseerd worden door lokaal de ruwheid aan te passen. Het is dus de verwachting dat een gecalibreerd fijn model en een gecalibreerd grof model beide een ander ruwheidsveld zullen hebben. Aangezien het hier echter om een gevoeligheidsanalyse gaat, wordt het ruwheidsveld constant gehouden tussen de verschillende runs.

4.3.2 Resultaten

De berekende waterstand voor de verschillende simulaties in 4 stations worden met elkaar vergeleken. De ligging van deze stations wordt getoond op Figuur 15. Enkele resultaten worden gevisualiseerd in Figuren 17-20. Naast de gesimuleerde waterstand, wordt op deze figuren eveneens de werkelijk opgemeten waterstand voor elke meetpost getoond. Deze is louter indicatief daar het hier een gevoeligheidsanalyse betreft, en dus geen kalibratie of validatie van het model.

Meetstation	HW niveau [cm]	HW fase [min]	LW niveau [cm]	LW fase [min]
Dendermonde				
Run111	-0,3	0,5	-0,3	-0,8
Run112	0,2	0,0	-1,4	-0,3
Run113	-1,4	-1,9	-0,9	0,0
Schoonaarde				
Run111	0,3	-1,2	2,0	0,4
Run112	10,6	-5,6	-17,1	-8,1
Run113	26,0	-10,6	-19,9	-11,3
Wetteren				
Run111	-0,4	0,6	1,9	4,4
Run112	12,8	-8,8	-11,7	-16,3
Run113	22,4	-17,5	-	-
Melle				
Run111	-0,4	-4,2	1,1	2,2
Run112	13,5	-13,6	-10,6	-16,8
Run113	15,4	-16,1	0,5	-12,9

Tabel 5: Overzicht simulaties gevoeligheidsonderzoek rekenrooster. Afwijking HW en LW ten opzichte van run110. Positieve waarden wijzen op hogere waterstanden respectievelijk latere extrema van de betreffende run tov run110.

Het station Dendermonde (zie Figuur 17) ligt vlak bij de afwaartse grens van het detailmodel. De waterstand in deze meetpost wordt bijna uitsluitend bepaald door de afwaartse randvoorwaarde en is bijgevolg voor alle simulaties dezelfde. Te Schoonaarde is er wel een afwijking tussen de verschillende simulaties terug te vinden (Figuur 18). Het verfijnen van de resolutie volgens de thalweg van de rivier (cfr. run110 vs run111) heeft hier slechts een beperkt effect. Verfijning volgens de 2 richtingen heeft hogere HW's en lagere LW's als resultaat, waarbij het effect het grootst is bij de 4x4 verfijning. Kortom

de getijdoordringing in de rivier wordt verbeterd ten gevolge van resolutieverfijning. Deze resultaten liggen ook dicht bij de gemeten waterstanden, al worden de LW's nog steeds overschat. De berekende waterstanden te Wetteren worden getoond in Figuur 19. Dit station is bij run113 gelegen in een roostercel op een diepte van 2,33m boven NAP, dus boven de LW-lijn. Bijgevolg wordt deze roostercel slechts overstroomd bij waterstanden hoger dan NAP+2,33m. Gelijkaardige conclusies als voor station Schoonaarde gelden hier. In station Melle is er opnieuw bijna geen verschil tussen run110 en run111 (zie Figuur 20). Op deze locatie is er eveneens slechts een beperkt verschil tussen run112 en run113 wat de HW's betreft. Qua LW's berekent run112 zelfs lagere waarden vergeleken met run113. Bovenstaande resultaten worden samengevat in Tabel 5, waar voor de verschillende locaties en de verschillende simulaties de afwijking ten opzichte van de referentierun 110 wordt gegeven.

Een mogelijke verklaring voor het feit dat het niveau van laag water niet monotoon daalt bij toenemende roosterverfijning voor de opwaartse stations Melle en Wetteren, kan het eerder aangehaalde effect zijn van eenzelfde ruwheidsveld dat anders doorwerkt in de modelresultaten voor een relatief grover of fijner rooster. Een mogelijke work-around voor dit probleem zou kunnen zijn om voor elke roosterresolutie een calibratie uit te voeren op het ruwheidsveld, en de resultaten van het beste gecalibreerde model en de gecalibreerde ruwheidsvelden zelf te vergelijken tussen de verschillende runs. Deze calibratie-oefening valt echter buiten de scope van deze gevoeligheidsanalyse.

Tot slot wordt nog vermeld dat de rekentijd aanzienlijk toeneemt met de roosterverfijning, zoals wordt aangetoond in Tabel 6. Hierbij moet opgemerkt worden dat een afwijking van het Courant getal eveneens verantwoordelijk is voor een afwijking in rekentijd. Zo was de rekentijd voor run112 kleiner dan die van run111 – ondanks het grotere aantal roosterpunten voor deze simulatie – omwille van een hogere Courant getal (en dus grotere tijdstap). Algemeen wordt gesteld dat het Courant getal van een numeriek model kleiner moet zijn dan 10 voor een stabiele berekening, hoewel 20 ook nog als aanvaardbare grens kan worden beschouwd. Gezien de lange rekentijden is geen extra gevoeligheidsanalyse uitgevoerd op de invloed van een wijziging van Courantgetal op de resultaten van de waterbeweging. De courant getallen in tabel 6 zijn nog voldoende laag om te veronderstellen dat de invloed van een wijziging in Courant getal niet doorwerkt in de resultaten van de waterbeweging.

Naam	Simulatieperiode	Rekentijd	Courant getal
Run110	26jun-4jul 2002	2u 41min	8,3
Run111	26jun-4jul 2002	28u 52min	8,8
Run112	26jun-4jul 2002	19u 23min	14,4
Run113	26jun-4jul 2002	236u 19min	7,2

Tabel 6: Rekentijd simulaties roosterresolutie

5 Gevoeligheidsonderzoek: topo-bathymetrie

5.1 Inleiding

Een topo-bathymetrische opname van een rivier of een waterloop resulteert steeds in een puntenwolk waarvan voor elk punt de diepte gekend is. Deze punten met gekende diepte vallen echter niet noodzakelijk samen met de punten uit het numerieke rekenrooster. Bijgevolg dient er nog een interpolatie te gebeuren tijdens dewelke de diepte van de roosterpunten wordt bepaald op basis van de gemeten dieptes van de puntenwolk. Hiervoor zijn verschillende interpolatiemethodes voorhanden.

In dit hoofdstuk zal het effect van de verschillende topo-bathymetrische interpolatiemethodes worden nagegaan. Daarnaast zal tevens worden bestudeerd in welke mate de minder nauwkeurige opname van de topo-bathymetrische diepte van de slikken en de schorren een effect heeft op de getijvoortplanting.

5.2 Topo-bathymetrie van het rekenrooster

Als basis voor de topo-bathymetrische interpolatie worden verschillende meetdata sets gebruikt:

- Boven Zeeschelde, Rupel en Durme: single beam raaien opgemeten in 2001. Deze raaien werden eerst omgezet naar een regelmatig rooster met een resolutie van 5m bij 5m en vervolgens geïnterpoleerd op het rekenrooster.
- Beneden Zeeschelde: single beam raaien opgemeten in 2004-2005. Deze raaien werden eerst omgezet naar een regelmatig rooster met een resolutie van 5m bij 5m en vervolgens geïnterpoleerd op het rekenrooster.
- Westerschelde: single beam raaien opgemeten in 2006, LIDAR opname litoraal en sublitoraal gebied uit 2003. Deze metingen werden eerst omgezet naar een regelmatig rooster met een resolutie van 20m bij 20m en vervolgens geïnterpoleerd op het rekenrooster.
- Mondingsgebied van de Westerschelde: single beam raaien opgemeten in 2003. Deze metingen werden eerst omgezet naar een regelmatig rooster met een resolutie van 20m bij 20m en vervolgens geïnterpoleerd op het rekenrooster.

5.2.1 Topo-bathymetrische interpolatiemethodes

In de literatuur zijn er vele interpolatiemethodes terug te vinden om de topo-bathymetrische diepte van roosterpunten te bepalen op basis van een gemeten puntenwolk. Aangezien het aantal meetpunten uit de puntenwolk (5m in Zeeschelde, 20m in Westerschelde tussen opeenvolgende gemeten punten) in het geval van het Schelde estuarium groot is ten opzichte van het aantal roosterpunten (grootte-orde 40m tot 150m tussen opeenvolgende roosterpunten), zal enkel gebruik worden gemaakt van zogenaamde “averaging value” methodes. Hierbij wordt de topo-bathymetrische waarde van een roosterpunt bepaald door een bepaald soort gemiddelde te nemen van de omliggende meetpunten. Als zoekafstand voor de meetpunten die worden meegenomen in de berekening van het gemiddelde, wordt de afstand tussen 2 roosterpunten gebruikt. De zoekafstand is bijgevolg afhankelijk van de resolutie van het rekenrooster.

Voor de gevoeligheidsanalyse worden 5 types van “averaging value” methodes gebruikt:

- “Gridcel averaging” interpolatiemethode: het roosterpunt krijgt als waarde het gemiddelde van de meetpunten binnen de zoekafstand
- “Closest value” interpolatiemethode: het roosterpunt krijgt de waarde van het meetpunt dat het dichtst bij dit roosterpunt is gelegen

- “Inverse distance weighted mean value” interpolatiemethode: de diepte van het roosterpunt wordt bepaald als gewogen gemiddelde van de meetpunten binnen de zoekafstand, waarbij het gewicht van elk meetpunt omgekeerd evenredig is met de afstand tot het roosterpunt
- “Maximum value of near points” interpolatiemethode: het roosterpunt krijgt als waarde de waarde van het meetpunt binnen zoekafstand met de grootste waarde
- “Minimum value of near points” interpolatiemethode: het roosterpunt krijgt als waarde de waarde van het meetpunt binnen zoekafstand met de kleinste waarde

Tot slot wordt opgemerkt dat de gevoeligheidsanalyse van de topo-bathymetrische interpolatiemethode enkel werd toegepast op de Schelde, niet op de getij-afhankelijke zijrivieren.

5.2.2 Topo-bathymetrische opmeting slikken en schorren

In tegenstelling tot de dieper gelegen delen van het estuarium, kunnen slikken en schorren niet worden opgemeten met de single beam meettechniek. De waterdiepte in deze zone is te beperkt voor een meetschip. Vandaar dat deze gebieden bij laagwater worden opgemeten met de zogenaamde LIDAR techniek vanuit een vliegtuig. Deze techniek heeft echter een veel kleinere nauwkeurigheid vergeleken met de single beam techniek. Waar als nauwkeurigheid voor de single beam techniek grootte-orde 5cm gehaald kan worden, is dit bij de LIDAR techniek grootte-orde 10cm [Ides et al., 2008].

Om op een eenvoudige manier na te gaan wat het effect is van deze kleinere nauwkeurigheid van de LIDAR meettechniek, werden 2 simulaties voorgesteld. Hierbij wordt de topo-bathymetrie op de slikken en de schorren respectievelijk 20cm lager en 20cm hoger dan de gemeten waarde verondersteld. Op die manier wordt een idee gekregen van de maximale afwijkingen die deze nauwkeurigheid van topo-bathymetrische opmeting op de getijvoortplanting in het estuarium heeft.

5.2.3 Resultaten

In Tabel 7 wordt een overzicht gegeven van de uitgevoerde simulaties. Er wordt herhaald dat deze simulaties werden uitgevoerd met identieke parameterinstellingen, op de gebruikte topo-bathymetrische interpolatiemethode na. Voor de topo-bathymetrische interpolatie werd steeds vertrokken vanuit de oorspronkelijke meetdata.

Naam	Beschrijving rooster	Periode
Run201	“Gridcell averaging” interpolatiemethode	1-30 sept 2006
Run202	“Closest value” interpolatiemethode	1-30 sept 2006
Run203	“Inverse distance weighted mean value” interpolatiemethode	1-30 sept 2006
Run204	“Maximum value of near points” interpolatiemethode	1-30 sept 2006
Run205	“Minimum value of near points” interpolatiemethode	1-30 sept 2006
Run206	Systematische verlaging -20cm slikken en schorren	1-30 sept 2006
Run207	Systematische verhoging +20cm slikken en schorren	1-30 sept 2006

Tabel 7: Overzicht simulaties topo-bathymetrie

Allereerst worden de verschillende runs vergeleken op basis van hun hypsometrische curve. Een hypsometrische curve geeft de evolutie weer van de komberging van een bekken onder een referentiehoogte. Deze curve heeft tussen de referentiehoogten -3m en +3m NAP een lineair karakter. Run204 en run205 zijn hierbij duidelijk te onderscheiden van de andere runs, waarvan de hypsometrische curve allen op elkaar lijkt te liggen. De topo-bathymetrie van run 204 is 69cm dieper vergeleken met run201, terwijl de topo-bathymetrie van run205 gemiddeld 70cm minder diep is.

Om de verschillen tussen de andere bodems beter in beeld te brengen, wordt er gekeken naar de

toename van de komberging tussen 2 referentieniveaus. Omdat we vooral geïnteresseerd zijn in de volumeveranderingen tussen de verschillende runs, wordt de toename van komberging relatief geplot ten opzichte van de bathymetrie van run201 (zie Figuur 21). Elke punt in deze grafiek staat tussen twee referentiehoogtes in, en stelt het volume voor tussen verschillende 'schijven' van 1m dikte, of telkens de volume-integraal tussen 2 horizontale vlakken met 1m hoogteverschil. Dit volume is dimensieloos gemaakt door te delen door de volumes van bathymetrie run201. Een waarde boven de 1 wil zeggen dat een bathymetrie in die bepaalde diepteklasse dieper is dan run201. Zo zien we dat de bathymetrie van run206 tot bijna 1% dieper is in de diepteklassen tussen waterstanden -4m en +3m NAP. In de andere diepteklassen is de bathymetrie van run206 gelijk aan de bathymetrie van run201. Voor bathymetrie van run207 geldt het tegenovergestelde, namelijk dat die in de intergetijdegebieden tot bijna 1% ondieper is dan run201.

De hypsometrische curves van run202 en run203 hebben een gelijkaardig verloop. Dit is niet verwonderlijk, gezien het feit dat beide interpolatiemethodes rekening houden met de afstand van het meetpunt tot het roosterpunt. Wat wel opvalt is dat beide interpolatiemethodes zowel voor de Westerschelde als de Zeeschelde iets diepere waarden geven in de diepere delen van het rooster, terwijl ze ondiepere waarden geven in het deel van het rooster dat boven de -3m NAP ligt. De eerste verwachting was dat door de bathymetrie af te leiden uit enkel het dichtste meetpunt (run202), de resulterende fout in de komberging willekeurig zou variëren over de verschillende diepteklassen. Dit is hier echter niet het geval. In de diepere delen van de bathymetrie is er een systematische overschatting van de komberging tussen opeenvolgende niveaus. In de ondiepere delen is er dan weer een systematische onderschatting. Het kantelpunt ligt ongeveer op -3m NAP. Dezelfde conclusies kunnen worden getrokken in het geval van de "Inverse distance weighted mean value" interpolatiemethode.

We trachten hiervoor een verklaring te vinden aan de hand van een conceptueel model. Figuur 22 verduidelijkt deze redenering. Indien we NxN verschillende samples in een cel conceptueel vereenvoudigen tot N samples op een lijn, en indien we verder ook veronderstellen dat de bathymetrie monotoon stijgt (of daalt) volgens de richting van de lijn, komt de "Closest value" interpolatiemethode overeen met de mediaan van de samples binnen 1 cel, terwijl de "Gridcel averaging" methode overeenkomt met het gemiddelde. In de diepere delen van de bathymetrie geeft de "Closest value" interpolatiemethode een diepere waarde dan de "Gridcel averaging" methode. In dat geval is de mediaan groter dan het gemiddelde. Deze links-scheve verdeling van de dieptewaarden kan worden gerelateerd aan de concave vorm van de diepere delen van de bathymetrie. Dezelfde redenering wijst ook op een meer convexe vorm in de ondiepe delen van de bathymetrie. De bodem is convex wanneer als 2 punten p1 en p2 deel uitmaken van de rand bodem-water, het lijnstuk p1-p2 integraal deel uitmaakt van de bodem. De overgang tussen een concave en een convexe bodem (het buigpunt van het dwarsprofiel) ligt op -3m NAP, niet toevallig ook het begin van de intergetijdegebieden. Het verloop van de curves van run202 en run203 kan op die manier worden gerelateerd aan vormeigenschappen van de bathymetrie. In Figuur 22 wordt deze redenering geïllustreerd aan de hand van een (hypothetisch) parabolisch dwarsprofiel dat al naargelang het teken van de kwadratische term dienst kan doen als analytische concave of convexe vorm [Vanlede et al., 2008].

In Tabel 8 worden de berekende HW's en LW's van run202 en run203 vergeleken met run201. Uit deze tabel blijkt dat er in de Westerschelde geen verschil is tussen de 3 interpolatiemethodes. Ook in de Zeeschelde is dit verschil nauwelijks aanwezig op de HW's. Enkel wat betreft de LW's is er opwaarts Schoonaarde een verlaging van de LW's terug te vinden. Deze verlaging is het meest uitgesproken bij de "Closest value" interpolatiemethode. Het vermoeden is dat de beperkte afwijking in komberging voor de diepere (overschatting) en de minder diepere zones (onderschatting) elkaar opheft. Hierdoor blijft de komberging van het estuarium voor alledrie de beproefde methodes gelijk en is er bijgevolg geen effect op de globale voortplanting van de getijgolf.

Meetstation	HW niveau run202 [cm]	HW niveau run203 [cm]	LW niveau run202 [cm]	LW niveau run203 [cm]
<i>Westerschelde</i>				
Vlissingen	0	0	0	0
Hansweert	0	0	0	0
Bath	0	0	0	0
<i>Zeeschelde</i>				
Antwerpen	0	1	0	0
Hemiksem	0	0	1	1
Temse	0	0	0	0
St Amands	0	0	0	0
Schoonaarde	0	0	-8	-5
Wetteren	2	0	-5	-4

Tabel 8: Afwijkingen HW en LW van run202 en run203 tov run201 voor de periode 1-30 sept 2006. Positieve waarden wijzen op hogere waterstanden respectievelijk latere extrema van run202 tov run203.

De meest extreme interpolatiemethodes betreffen de methodes waarbij als topo-bathymetrische waarde voor het roosterpunt respectievelijk de maximale en de minimale waarde van de gemeten punten binnen de zoekafstand wordt genomen. Hiervan werd bij de hypsometrische curve al opgemerkt dat de komberging met deze interpolatiemethodes aanzienlijk afwijkt van de komberging uit run201. In Tabel 9 worden de afwijkingen van HW en LW ten opzichte van run201 gegeven.

Zoals verwacht heeft de verhoogde komberging uit run204 in de Westerschelde hogere HW's als resultaat, terwijl de LW's nauwelijks wijzigen. In de Zeeschelde tot aan de Rupelmonding is de trend dezelfde. Opwaarts Rupelmonde echter dalen de HW's beperkt, terwijl de LW's fors afnemen. Ter hoogte van het meest opwaartse stuk van de Boven Zeeschelde zijn zelfs dalingen van de LW's tot 42cm waar te nemen. Het effect van een – gelijkaardige in omvang – verkleining van de komberging (cfr. run205) is groter. De HW's langs de volledige loop van de Schelde dalen, terwijl de LW's stijgen. Van de monding tot aan Temse zijn deze wijzigingen beperkt, tussen Temse en Merelbeke is de getijslag op sommige locaties wel meer dan 2m afgenomen. Opmerkelijk is de verlaging van het LW te Bath dat fel afsteekt tegen de verlagingen juist opwaarts en afwaarts deze locatie. Het relatief sterke effect van een verhoging van de bathymetrie (run205) op de opwaartse delen van het rekenrooster is gerelateerd aan het feit dat een ophoging van het model zorgt voor verdere obstructies van de stroming in een rekenrooster dat in de opwaartse delen maar een beperkt aantal rekencellen over de stroomvoerende breedte meer heeft.

Meetstation	HW niveau run204 [cm]	HW niveau run205 [cm]	LW niveau run204 [cm]	LW niveau run205 [cm]
<i>Westerschelde</i>				
Vlissingen	1	-2	-1	0
Hansweert	4	-3	0	4
Bath	5	-5	-1	42
<i>Zeeschelde</i>				
Antwerpen	2	-3	-1	2
Hemiksem	-1	-2	-1	0
Temse	1	-4	-3	16
St Amands	-3	-10	-11	198
Schoonaarde	-2	-104	-38	87
Wetteren	9	-82	-42	-

Tabel 9: Afwijkingen HW en LW van run204 en run205 tov run201 voor de periode 1-30 sept 2006. Positieve waarden wijzen op hogere waterstanden respectievelijk latere extrema van run204 / run205 tov run201.

Het effect van het verhogen of het verlagen van de intergetijdengebieden op de waterstand is terug te vinden in Tabel 10. In de Westerschelde – waar het grootste areaal aan intergetijdengebied aanwezig is – is er quasi geen effect ten gevolge van deze ingreep. In de Zeeschelde daarentegen laat dit effect zich vooral voelen bij de HW's. Van Bath tot Wetteren wordt een uniforme verlaging van circa 2cm op de hoogwaterstand berekend. Enkel in het meest opwaartse stuk is er eveneens een effect op de LW's: waar de LW's stijgen bij run204 is er een daling terug te vinden bij run205. Tot slot wordt vermeld dat de vastgestelde afwijkingen ten opzichte van run201 beperkt zijn.

Meetstation	HW niveau run206 [cm]	HW niveau run207 [cm]	LW niveau run206 [cm]	LW niveau run207 [cm]
<i>Westerschelde</i>				
Vlissingen	0	0	0	0
Hansweert	0	1	0	0
Bath	-2	2	0	0
<i>Zeeschelde</i>				
Antwerpen	-2	3	-1	0
Hemiksem	-2	2	0	0
Temse	-2	2	0	0
St Amands	-2	2	0	0
Schoonaarde	-2	2	1	-2
Wetteren	-2	2	2	-2

Tabel 10: Afwijkingen HW en LW van run206 en run207 tov run201 voor de periode 1-30 sept 2006. Positieve waarden wijzen op hogere waterstanden respectievelijk latere extrema van run206 / run207 tov run201.

6 Gevoeligheidsonderzoek: debieten te Merelbeke

6.1 Inleiding

De belangrijkste toevoer van zoet water vanuit de kanalen rond Gent in de Zeeschelde gebeurt vanuit het sluisencomplex te Merelbeke. Deze toevoer wordt in het numerieke model geïmplementeerd als een tijdreeks van debieten. Bij gebrek aan meer gedetailleerde metingen, wordt vaak gebruik gemaakt van daggemiddelde debieten. Echter gedurende een dag kunnen er grote fluctuaties qua debiet optreden, die op hun beurt een belangrijk effect op de waterstand in de Boven Zeeschelde kunnen hebben. In dit hoofdstuk wordt dit effect en het invloedsgebied ervan bestudeerd.

6.2 Debieten te Merelbeke

6.2.1 Frequentie van de debietsmeting

Tussen 10 juni en 17 juli 2002 werd in het sluisencomplex van Merelbeke een opmeting uitgevoerd van het debiet dat over de stuw van Merelbeke in de Zeeschelde stroomt [IMDC, 2002]. Deze datareeks is beschikbaar met een frequentie van 5 minuten. Op Figuur 23 wordt deze datareeks getoond, waarbij eveneens de gemiddelde uurwaarden en dagwaarden – beiden afgeleid uit de opgemeten 5 minuut waarden – zijn weergegeven. Uit deze grafiek volgt dat de variatie in bovendebiet, zoals die is gemeten in de 5 minuut waarden – nog goed wordt beschreven in uurgemiddelde waarden. Echter bij uitmiddeling naar dagwaarden verdwijnt een groot deel van deze variatie uit het signaal.

Om het effect van de frequentie van de debietsmeting te Merelbeke te bestuderen, zullen 3 simulaties worden uitgevoerd waarbij respectievelijk 5 minuut gemiddelde waarden, uur gemiddelde waarden en dag gemiddelde waarden gebruikt zullen worden.

6.2.2 Resultaten

In Tabel 11 wordt een overzicht gegeven van de uitgevoerde simulaties. Er wordt herhaald dat deze simulaties werden uitgevoerd met identieke parameterinstellingen, op de opgelegde debieten te Merelbeke na. Als simulatieperiode werd gekozen voor de periode van 26 juni tot 9 juli 2002, aangezien er in deze periode geen hiaten in de meetreeks zijn.

Naam	Beschrijving rooster	Periode
Run301	5 minuut gemiddelde waarden te Merelbeke	26jun-9jul 2002
Run302	Uur gemiddelde waarden te Merelbeke	26jun-9jul 2002
Run303	Dag gemiddelde waarden te Merelbeke	26jun-9jul 2002

Tabel 11: Overzicht simulaties randvoorwaarde te Merelbeke

Figuren 24 tot 31 tonen de resultaten van deze simulaties. Hierbij werd er gefocust op 2 periodes binnen de simulatieperiode. Van 28 juni tot 1 juli 2002 stroomde te Merelbeke slechts een beperkt debiet in de Zeeschelde (zie Figuur 24). De berekende waterstanden voor Wetteren (Figuur 26), Schoonaarde (Figuur 28) en Sint-Amands (Figuur 30) laten zien dat er voor deze periode slechts beperkte afwijkingen tussen de verschillende simulaties zijn. Van 1 juli tot 5 juli 2002 lopen de instromende debieten te Merelbeke op tot 200 m³/s, waarbij hoge en lage debieten elkaar snel afwisselen. Uit Figuur 25 is te zien dat de 5 minuut en uur gemiddelde waarden deze variatie goed weergeven, terwijl dit niet het geval is voor de dag gemiddelde waarden. De snelle debietsvariatie wordt als het ware bij uitmiddeling over een dag uit het signaal verwijderd. Wanneer de berekende waterstanden voor Wetteren (Figuur 27), Schoonaarde (Figuur 29) en Sint-Amands (Figuur 31) worden

bekeken, zijn er bijgevolg eveneens grote afwijkingen (tot 80cm) tussen de verschillende simulaties zichtbaar. Hierbij wordt opgemerkt dat het verschil tussen run301 en run302 beperkt is, terwijl run303 grote afwijkingen qua waterstand vertoont. Deze afwijkingen zijn het grootst in Wetteren en nemen af naar afwaarts. De runs met 5 minuut en uurwaarden voor de bovenafvoer in Merelbeke (run301, respectievelijk run302) kunnen zowel hogere als lagere waterstanden geven dan de run met dagwaarden als bovenafvoer indien de daggemiddelde bovenafvoer lager, respectievelijk hoger is dan de 5 minuut en de uurwaarden.

Figuren 32-33 geven het verschil in waterstand tussen respectievelijk run301-run302 en tussen run301-run303. Naast het verschil in waterstand voor verschillende stations, wordt eveneens het te Merelbeke instromende debiet gegeven op deze figuren. Hieruit blijkt het verschil tussen periodes met quasi constant debiet (cfr. kleine verschillen in waterstand) en periodes met sterk fluctuerend debiet (grote verschillen in waterstand). Eveneens wordt bevestigd dat de afwijking van run302 ten opzichte van run301 beperkt blijft tot maximaal 8cm, terwijl de verschillen van run303 ten opzichte van run301 kunnen oplopen tot het tienvoud hiervan. Tot slot kan op basis van deze figuren ook een uitspraak worden gedaan over het invloedsgebied: dit lijkt zich uit te strekken tot Hemiksem. In Temse zijn de verschillen beperkt tot 5cm, in Hemiksem zijn nog verschillen tot maximaal 2cm waar te nemen.

Aangezien het effect van de uitmiddeling van de debieten te Merelbeke enerzijds sterk afhankelijk is van het opgetreden debiet en anderzijds zowel een overschatting als een onderschatting van de waterstand kan veroorzaken, werden de verschillen in waterstand van de 3 uitgevoerde simulaties in dit hoofdstuk niet gemiddeld over de simulatieperiode.

7 Gevoeligheidsonderzoek: bodemruwheid

7.1 Inleiding

De bodemruwheid is een parameter die uitermate belangrijk is voor de getijvoortplanting in het Schelde-estuarium. Deze parameter is een indirecte maat voor de hoeveelheid energiedissipatie ten gevolge van bodemwrijving. Echter de bodemruwheid kan in de natuur niet gemeten worden, waardoor het inschatten van deze parameter veelal gebeurt op basis van een kalibratie oefening. Daarnaast bestaan er verschillende wiskundige formuleringen waarop het effect van deze parameter kan worden doorgerekend. In dit hoofdstuk zal aan de hand van een gevoeligheidsanalyse het effect van deze parameter op de berekende waterstanden – zowel qua grootte als in de ruimte – worden ingeschat.

7.2 Bodemruwheid

Een gevoeligheidsanalyse van de parameter bodemruwheid is niet eenvoudig. Enerzijds is er een range van waarden waarbinnen deze parameter kan liggen, anderzijds is er de ruimtelijke variatie van deze parameter. De 2 voorgaande zaken maken dat er vele combinaties mogelijk zijn voor een model van het hele Schelde-estuarium. Bovendien zijn er in de literatuur verschillende ruwheidsformuleringen beschikbaar. Kortom een gevoeligheidsonderzoek van de parameter bodemruwheid is geen eenvoudige opgave.

Voor de gevoeligheidsanalyse zal eerst worden bestudeerd wat het effect van een uniforme ruwheid over het hele Schelde-estuarium is, en dit voor verschillende ruwheidswaarden. Vervolgens wordt gewerkt met een ruimtelijk variërende ruwheid. In een eerste fase wordt het Schelde-estuarium opgedeeld in verschillende deelgebieden, waarbij de ruwheid van elk deelgebied afzonderlijk eerst wordt verhoogd en vervolgens wordt verlaagd. Met deze simulaties is het mogelijk om enerzijds het lokale effect van een dergelijke ruwheidswijziging na te gaan, alsook de invloedszone van deze wijziging. In een tweede fase zal worden gewerkt met een diepte-afhankelijke ruwheid, waarbij verschillende diepte-ruwheidrelaties zullen gebruikt worden. Tot slot wordt eveneens bestudeerd of er een effect is ten gevolge van het gebruik van een andere ruwheidsformulering.

7.2.1 Resultaten

Een overzicht van de uitgevoerde simulaties wordt teruggevonden in Tabel 12. Voor al deze simulaties werd de maand september 2006 doorgerekend. Teneinde de resultaten van deze simulaties eenvoudig met elkaar te kunnen vergelijken, werd gekozen om te werken met enkele harmonische componenten in plaats van met het volledige getijsignaal. Enerzijds zal worden gekeken naar de M2 (hoofdmaansgetij) en de S2 (hoofdzonsetij) component, aangezien deze de belangrijkste componenten zijn wat betreft amplitude. Daarnaast zal tevens het effect op de M4 component worden bestudeerd, aangezien de ruwheid een grote invloed heeft op hogere harmonische van M2. Om het effect op de getij-assymetrie te bestuderen, zullen 2 parameters worden bestudeerd: enerzijds het faseverschil 2M2-M4, anderzijds de verhouding M4/M2. In Bijlage A wordt een uitleg gegeven over de opsplitsing van het getij in harmonische componenten.

Naam	Beschrijving rooster	Periode
Run401	Uniforme Manning ruwheid 0,025 m ^{1/3} /s	1-30 sept 2006
Run402	Uniforme Manning ruwheid 0,022 m ^{1/3} /s	1-30 sept 2006
Run403	Uniforme Manning ruwheid 0,028 m ^{1/3} /s	1-30 sept 2006
Run404	Manning ruwheid deelgebied 1 verlaagt tot 0,020 m ^{1/3} /s	1-30 sept 2006
Run405	Manning ruwheid deelgebied 1 verhoogt tot 0,030 m ^{1/3} /s	1-30 sept 2006
Run406	Manning ruwheid deelgebied 2 verlaagt tot 0,020 m ^{1/3} /s	1-30 sept 2006
Run407	Manning ruwheid deelgebied 2 verhoogt tot 0,030 m ^{1/3} /s	1-30 sept 2006
Run408	Manning ruwheid deelgebied 3 verlaagt tot 0,020 m ^{1/3} /s	1-30 sept 2006
Run409	Manning ruwheid deelgebied 3 verhoogt tot 0,030 m ^{1/3} /s	1-30 sept 2006
Run410	Manning ruwheid deelgebied 4 verlaagt tot 0,020 m ^{1/3} /s	1-30 sept 2006
Run411	Manning ruwheid deelgebied 4 verhoogt tot 0,030 m ^{1/3} /s	1-30 sept 2006
Run412	Manning ruwheid deelgebied 5 verlaagt tot 0,020 m ^{1/3} /s	1-30 sept 2006
Run413	Manning ruwheid deelgebied 5 verhoogt tot 0,030 m ^{1/3} /s	1-30 sept 2006
Run414	Manning ruwheid deelgebied 6 verlaagt tot 0,020 m ^{1/3} /s	1-30 sept 2006
Run415	Manning ruwheid deelgebied 6 verhoogt tot 0,030 m ^{1/3} /s	1-30 sept 2006
Run416	Manning ruwheid deelgebied 7 verlaagt tot 0,020 m ^{1/3} /s	1-30 sept 2006
Run417	Manning ruwheid deelgebied 7 verhoogt tot 0,030 m ^{1/3} /s	1-30 sept 2006
Run418	Manning ruwheid deelgebied 8 verlaagt tot 0,020 m ^{1/3} /s	1-30 sept 2006
Run419	Manning ruwheid deelgebied 8 verhoogt tot 0,030 m ^{1/3} /s	1-30 sept 2006
Run420	Manning ruwheid deelgebied 9 verlaagt tot 0,020 m ^{1/3} /s	1-30 sept 2006
Run421	Manning ruwheid deelgebied 9 verhoogt tot 0,030 m ^{1/3} /s	1-30 sept 2006
Run422	Manning ruwheid deelgebied 10 verlaagt tot 0,020 m ^{1/3} /s	1-30 sept 2006
Run423	Manning ruwheid deelgebied 10 verhoogt tot 0,030 m ^{1/3} /s	1-30 sept 2006
Run424	Diepte afhankelijke Manning ruwheid n = f1(D)	1-30 sept 2006
Run425	Diepte afhankelijke Manning ruwheid n = f2(D)	1-30 sept 2006
Run426	Manning ruwheid model 0,025 m ^{1/3} /s, Manning ruwheid intergetijden-gebieden 0,030 m ^{1/3} /s	1-30 sept 2006
Run427	Chézy ruwheidsformulering (uniforme waarde equivalent aan Manning 0,025 m ^{1/3} /s)	1-30 sept 2006
Run428	White-Colebrook ruwheidsformulering (uniforme waarde equivalent aan Manning 0,025 m ^{1/3} /s)	1-30 sept 2006

Tabel 12: Overzicht simulaties ruwheid

7.2.1.1 Uniforme ruwheid

Als basisrun werd een simulatie uitgevoerd met een uniforme Manning waarde van 0,025 m^{1/3}/s. Vervolgens werd gekeken hoe de getij-indringing wijzigt wanneer deze uniforme waarde wordt gewijzigd. Hiervoor werden 2 extra simulaties uitgevoerd: run402 met een Manning waarde van 0,022 m^{1/3}/s en run403 met een Manning waarde van 0,028 m^{1/3}/s. In Figuren 34-37 worden de resultaten van deze oefening getoond.

Wat opvalt, is dat de helling van de M2 en de S2 amplitude in een langspoorprofiel verschilt tussen de verschillende simulaties. De versterking van de tijslag door het convergente karakter van het Schelde-estuarium wordt afgezwakt door een ruwere bodem of juist extra versterkt door de lagere weerstand van een gladde bodem. Voor de Westerschelde ligt de ideale gemiddelde Manning ruwheid ergens tussen 0,025 en 0,028 m^{1/3}/s, de metingen vertonen echter een M2 amplitude gradiënt die sterker varieert dan die bij een simulatie met uniforme ruwheid. Een variabele ruwheid is dus zeker gewenst teneinde de getijvoortplanting correct te kunnen simuleren. De invloed van de verandering van uniforme Manning

coëfficiënt is het sterkst in het meetpunt Schelle, met een verschil in M2 amplitude tussen run402 en run403 van 34 cm en een verschil in S2 amplitude van 15 cm.

Op Figuur 36 wordt het effect van de uniforme ruwheidswijziging op de M4 component getoond. Langsheen het estuarium verschilt de invloed van de ruwheid op de M4 amplitude sterk. Een groot verschil zien we in de Westerschelde, rond Antwerpen en opwaarts Sint Amands, slechts een zeer klein verschil tussen de Belgisch-Nederlandse grens en Kallo.

De fase van M2 is over het gehele estuarium groter bij toepassing van een grotere ruwheid en ijlt dus na. Dit wil zeggen dat ook de golfsnelheid in het estuarium wordt beïnvloed door de ruwheid. Voor S2 wordt dezelfde wijziging waargenomen. De fase van M4 daarentegen vertoont een omgekeerd gedrag en ijlt voor bij grotere ruwheid. Het effect is voor de variatie van uniforme Manning coëfficiënt van 0.022 $m^{1/3}/s$ tot 0.028 $m^{1/3}/s$ beperkt tot ongeveer 10 graden.

De verandering in 2M2-M4 faseverschuiving (zie Figuur 37) is positief met stijgende ruwheid. Een hogere ruwheid geeft een grotere faseverschuiving en dus een meer vloeddominant karakter aan de getijgolf. In dezelfde figuur is onderaan de M4/M2 verhouding afgebeeld die een maatstaf is voor de getij-asymmetrie. Ook deze parameter stijgt met grotere ruwheid, echter enkel opwaarts Bath. Tussen de zeerand en Bath is dit verloop net tegenovergesteld.

7.2.1.2 Ruimtelijke variatie

Om het effect van ruimtelijke variatie op de getijdoordringing na te gaan, werd het estuarium onderverdeeld in 10 deelgebieden. Voor deze opdeling werd ervoor geopteerd om de zogenaamde macrocellen van het meergeulensysteem in de Westerschelde en de Zeeschelde tot Doel aan te houden [Vanlede et al., 2008], [Winterwerp et al., 2001]. Elk van deze macrocellen bestaat uit een halve meander van de ebgeul die wordt kortgesloten door een vloedgeul (zie Figuur 38 boven). Opwaarts Doel worden de bovenlopen opgedeeld in 3 gebieden: de Beneden Zeeschelde van Doel tot Rupelmonde, de Boven Zeeschelde van Rupelmonde tot Merelbeke en ten slotte het Rupelbekken. Op Figuur 38 onderaan worden de 10 deelgebieden die voor het gevoeligheidsonderzoek worden gehanteerd weergegeven. In Tabel 13 is een beschrijving van deze deelgebieden terug te vinden.

Voor de gevoeligheidsanalyse werd gewerkt met een uniforme ruwheid van 0,025 $m^{1/3}/s$. Per simulatie werd de bodemruwheid van elk deelgebied verlaagd respectievelijk verhoogd met 0,005 $m^{1/3}/s$ en vervolgens vergeleken met run401. Opnieuw werd hierbij gewerkt met enkele getijcomponenten in plaats van met het volledige getijsignaal. Enkele resultaten van deze simulaties zijn terug te vinden in Figuren 34-68.

Deelgebied nr	Beschrijving
1	Cadzand-Westkapelle tot Vlissingen
2	Vlissingen tot Borssele
3	Borssele tot Baarland
4	Baarland tot Hansweert
5	Hansweert tot Valkenisse
6	Valkenisse tot Belgisch-Nederlandse grens
7	Belgisch-Nederlandse grens tot Liefkenshoek
8	Beneden Zeeschelde van Liefkenshoek tot Rupelmonde
9	Boven Zeeschelde van Rupelmonde tot Gent
10	Rupelbekken (Rupel, Dijle, Zenne en Nete)

Tabel 13: Beschrijving van de verschillende deelgebieden

Een eerste belangrijk effect betreft de *M2 amplitude*. Daar waar de ruwheid lokaal wordt aangepast treedt er een verandering op in de gradiënt langsheen het estuarium van de M2 amplitude. Een toename van de bodemruwheid veroorzaakt een kleinere gradiënt, een afname van de bodemruwheid een grotere gradiënt. In gebieden op- en afwaarts het gewijzigde deelgebied blijft de gradiënt van de

M2 component nagenoeg gelijk. Dit betekent echter niet dat ook de amplitude van M2 gelijk blijft. De lokale verandering in gradiënt werkt immers stroomopwaarts door, met andere woorden een wijziging van de bodemruwheid in een deelgebied verandert de M2 amplitude vooral in dit deelgebied en stroomopwaarts van dit gebied. Hierbij moet worden opgemerkt dat de modelrand met opgelegde waterstanden afwaarts ligt. Tussen deze waterstand aangedreven rand en het gebied met veranderde ruwheid is er quasi geen invloed.

De invloed van het variëren van de ruwheid op de M2 amplitude blijkt groter te worden naarmate de oppervlakte van deze zone groter wordt. Zo is bijvoorbeeld de invloed van een andere ruwheid in deelgebied 2 kleiner dan het effect van een gelijkaardige wijziging in bodemruwheid in deelgebied 5 (cfr. Figuur 42 versus Figuur 51). Een ruwheidsverlaging in deelgebied 2 resulteert in een stijging van M2 amplitude te Schelle van 1 cm, terwijl dezelfde ruwheidsverlaging in deelgebied 5 resulteert in een stijging te Schelle van 3 cm. Een verhoging van de ruwheid heeft dan weer een daling van 2 cm, respectievelijk 4 cm te Schelle als resultaat.

Het variëren van de ruwheid in de Beneden-Zeeschelde van Lillo tot Rupelmonde heeft een sterk effect op de lokale amplitude van M2 (zie Figuur 60), ook in de Boven-Zeeschelde werkt de ruwheid enkel lokaal (zie Figuur 63). Aanpassingen aan de ruwheid in het Rupelbekken (Figuur 66) hebben dan weer een minimaal effect op het getij in de Schelde. De invloed van een ruwheidsverhoging of –verlaging in het Rupelbekken heeft minder dan 1cm effect op de M2 amplitude in Rupelmonde.

Voor de harmonische *component S2* worden dezelfde effecten waargenomen als voor M2. Daarom wordt er hier niet verder op ingegaan.

Het effect van de ruwheid op de amplitude van de *M4 component* verandert van afwaarts naar opwaarts. Wanneer de ruwheid in de afwaartse deelgebieden 1 tot 3 wordt veranderd is het effect gelijkaardig aan de effecten zoals waargenomen bij de M2 component. Een verhoging van de ruwheid zorgt hier voor extra demping van M4, en dat effect is enkel merkbaar in en opwaarts van het deelgebied waarin de ruwheid is veranderd. In de rest van de Westerschelde (zones 4 tot 7) heeft een lokale ruwheidsverandering quasi geen effect op M4. Wanneer de ruwheid in de Zeeschelde wordt aangepast is het effect lokaal groot en bovendien treed er een invers effect op afwaarts. In de Beneden Zeeschelde (zie Figuur 61) wordt bij een lokaal kleinere ruwheid de amplitude lokaal groter (zoals verwacht), maar afwaarts wordt de M4 amplitude dan weer iets kleiner.

De fase van de verschillende componenten lijkt niet zeer gevoelig te zijn aan lokale verschillen in ruwheid. De maximale verandering van de fase door een ruwheidsvariatie van $0,010 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ komt voor bij variatie binnen deelgebied 8, de Beneden Zeeschelde. In deze situatie is er een maximaal verschil te Rupelmonde van 7 graden voor M2.

De verandering in 2M2-M4 faseverschuiving is positief met stijgende ruwheid. Dit wijst op een meer vloeddominant karakter van het getij. De invloed van een wijziging in bodemruwheid is merkbaar in het betreffende deelgebied alsook opwaarts. In grootte is de faseverschuiving van 2M2-M4 quasi constant tussen het betreffende deelgebied en Antwerpen. Vanaf Antwerpen is er een daling van de invloed tot ongeveer in Temse er geen invloed meer is waar te nemen. Vanaf deelgebied 8 is er afwaarts het betreffende deelgebied eveneens een effect op de 2M2-M4 faseverschuiving. Echter in de afwaartse zone treedt dan een verlaging op van de fase bij een stijgende ruwheid, respectievelijk een verhoging bij afname van ruwheid. Eveneens wordt opgemerkt dat de grootte van de fasewijziging afhangt van de oppervlakte van het betreffende deelgebied.

7.2.1.3 Diepte afhankelijke ruwheid

Als derde onderdeel wordt het effect van een variabele, diepte afhankelijke ruwheid onderzocht. In zekere zin houdt het gebruik van de Manning formulering reeds een Chézy coëfficiënt in die afhankelijk is van de waterdiepte, maar dit slechts met een exponent van 1/6. Wanneer nu ook de Manning coëfficiënt zelf lineair afhankelijk wordt van de bodemhoogte vergroot deze exponent op de waterdiepte

naar 7/6.

Voor run424 en run425 wordt volgend type functie gebruikt om de Manning waarde te bepalen:

$$n = n_{30} + n'(30 - D) / 30$$

Hierin is n_{30} de ruwheid op 30 m onder NAP, n' is het verschil in ruwheid tussen 0 m NAP en 30 m onder NAP. Tussen deze twee ruwheidswaarden wordt lineair geïnterpoleerd afhankelijk van de bodemdiepte D . Voor bodemdieptes van groter dan 30 m en kleiner dan nul (bodemp dus hoger dan 0 m NAP) wordt lineair geëxtrapoleerd. In run424 en run425 wordt n_{30} respectievelijk 0,020 en 0,022 $m^{1/3}/s$ gekozen, n' respectievelijk 0,010 en 0,006 $m^{1/3}/s$. Door deze instellingen varieert de Manning ruwheid telkens rond een centrale waarde van 0,025 (zoals in de referentierun401). In run424 varieert deze tussen 0,020 $m^{1/3}/s$ op 30m diepte en 0,030 $m^{1/3}/s$ op 0 m NAP. Voor run425 wordt dit 0,022 $m^{1/3}/s$ op 30m diepte en 0,028 $m^{1/3}/s$ op 0 m NAP, wat dus een kleinere spreiding betekent. Het ruwheidsveld van run424 en run425 wordt getoond in Figuur 69.

Als variatie op deze methode geldt run426 met een uniforme ruwheid van $n = 0,025 m^{1/3}/s$, behalve op de intergetijdegebieden waar gekozen werd voor een ruwheid van 0,030 $m^{1/3}/s$.

De resultaten van de hierboven beschreven simulaties worden vergeleken met referentiesimulatie run401 in Figuren 70-73. Uit deze resultaten kan besloten worden dat de verschillen in M2-, S2- en M4-amplitude tussen de simulaties klein zijn. Tussen run401 en run426 zijn de verschillen zelfs quasi onbestaande. Wat betreft run424 en run425 is er afwaarts Hoofdplaat geen verschil waar te nemen. Tussen Hoofdplaat en Boerenschans hebben deze simulaties een grotere M2- en S2- amplitude vergeleken met de referentierun401. Opwaarts Boerenschans is de M2- en S2-amplitude kleiner vergeleken met de referentiesimulatie run401. De maximale afwijking (toename M2 respectievelijk S2 van ongeveer 2,5 cm) wordt bereikt te Schelle. De afwijkingen van run424 ten opzichte van run401 zijn hierbij steeds het meest uitgesproken. Wat betreft de fase, wordt het grootste verschil gevonden bij component 2M2-M4. Tussen Boudewijnsluis en Sint-Amands is er een toename van dit faseverschil waar te nemen voor run424 en run425. Het maximale verschil doet zich opnieuw voor te Schelle.

Het gedrag van run424 en run425 ten opzichte van run401 kan worden verklaard aan de hand van de bathymetrie. Voor een bodempeil van -15 m NAP geldt voor de drie runs eenzelfde Manning ruwheid van 0,025 $m^{1/3}/s$. Diepere delen van de Schelde vertonen een kleinere ruwheid in de volgende volgorde: run401 > run425 > run424. Ondiepere gedeelten vertonen dan weer een grotere ruwheid in de omgekeerde volgorde: run401 < run425 < run424. Aangezien het dieper is aan de monding van de Westerschelde ligt daar verhoudingsgewijs een grotere zone waarvan de bathymetrie dieper dan -15m NAP is. Naar opwaarts toe vermindert het aandeel in bodemoppervlakte lager dan -15 m NAP waardoor ook de gemiddelde ruwheid van de natte sectie toeneemt: niet run401 maar run424 vertoont dan lokaal de hoogste ruwheid. Stroomopwaarts van Boerenschans zorgt de verdere verondieping van de Zeeschelde ervoor dat de ruwheid van run424 sneller toeneemt dan deze van run425. Bij run424 neemt de ruwheid $3,3 \cdot 10^{-4} m^{1/3}/s$ toe per meter diepte, waartegenover dit bij run425 slechts $2,0 \cdot 10^{-4} m/s$ per meter diepte bedraagt.

7.2.1.4 Ruwheidsformulering

Om het effect van een andere ruwheidsformulering op de getijvoortplanting na te gaan, is het nodig om een vergelijkbare waarde van de bodemruwheid in het model te implementeren. In de wiskundige vergelijkingen in de software wordt gebruik gemaakt van de Chézy ruwheid. Wanneer de gebruiker werkt met de Manning of de White-Colebrook ruwheidsformulering, wordt deze parameter eerste omgerekend naar een Chézy ruwheid. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de waterdiepte. Wanneer wordt berekend dat de gemiddelde waterdiepte in het model 8,36 m bedraagt, kunnen volgende equivalente ruwheden worden berekend:

- Manning ruwheid: $0,025 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
- Chézy ruwheid: $57 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$
- Nikuradse ruwheidslengte: $0,069 \text{ m}$

De invloed van de verschillende ruwheidsformuleringen op de M2, S2 en M4 amplitudes en fasen kan teruggevonden worden in Figuren 74-76. Hieruit volgt duidelijk dat hogere amplitudes worden bereikt in het hele model voor run428 (White Colebrook) en run401 (Manning) in vergelijking met een constante Chézy ruwheid (run427). Run427 ligt voor M2 amplitude tot 11 cm lager, en run428 tot 3 cm lager ten opzichte van de referentierun run401. Een gelijkaardig effect kan worden vastgesteld voor de componenten S2 en M4.

Deze variatie in amplitudes uit zich eveneens in de getij-asymmetrie (zie Figuur 77). Zo is de ratio M4/M2-amplitude het laagst voor run427. Stroomopwaarts van Temse worden de verschillen groter met run428 en run401. De faseverschuiving 2M2-M4 is het grootst voor run427: er zijn slechts kleine verschillen tussen run401 en run428.

Het gedrag van de harmonische componenten kan verklaard worden door de opgelegde ruwheden. In dit opzicht toont Figuur 78 de berekende Chézy ruwheidswaarden in functie van de waterdiepte. Deze figuur toont duidelijk aan dat voor waterdiepten groter dan 8,36 m de ruwheden afnemen (d.w.z. toenemende Chézy-waarde) volgens: run401 < run428 < run427. Voor diepten lager dan 8,36 m geldt het omgekeerde. Hiervan vertrekende is de evolutie van de verschillende harmonische componenten langsheen de Schelde te verklaren. In de diepere delen is de ruwheid het grootst voor run427 wat zich manifesteert in de laagste amplitudes voor M2, S2 en M4.

8 Conclusies en aanbevelingen

Voorliggend onderzoek kadert in het project *Vervolgstudie inventarisatie en historische analyse langs de Zeeschelde*. Het doel van dit project is om enerzijds het effect van de verschillende individuele ingrepen en hun onderlinge samenhang op de hydrodynamica en de morfologie van het estuarium te onderscheiden. Dit zal gebeuren door gebruik te maken van hydrodynamische numerieke modellen. Vervolgens zal een doorvertaling worden gemaakt van dit effect op de arealen slikken, schorren en ondiepe sublitorale gebieden. Anderzijds zal bijkomend onderzoek op ecosysteemniveau gebeuren om een aantal hiaten uit de studie [Van Braeckel et al., 2006] op te vullen.

Dit rapport maakt deel uit van de hydrodynamische modellering van deze studie. Hierbij werd vertrokken van het bestaande tweedimensionale NEVLA model: dit is een model dat in 2004 werd ontwikkeld en het hele tijgebied van het Schelde estuarium (inclusief de tij-afhankelijke zijrivieren) omvat [Waterbouwkundig Laboratorium, 2004]. In een eerste fase werd het rekenrooster van dit model aangepast op basis van verbeterlagen van verschillende vroegere studies. Zowel het Rupelbekken als het rekenrooster van de Boven Zeeschelde werden aangepast. Daarnaast werden enkele buitendijkse, niet-overstroombare gebieden uit het modelrooster verwijderd. Deze acties resulteerden in een belangrijke wijziging van de getijvoortplanting in het estuarium: in de Zeeschelde opwaarts Temse en in het gehele Rupelbekken was er een verlaging van de berekende LW's en een verhoging van de HW's terug te vinden. Dit wijst op een verbetering van de getijpenetratie in het opwaartse deel van het estuarium, die beter in overeenstemming is met de gemeten getij-amplitude in deze zone.

Met het gewijzigde rekenrooster werd vervolgens een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Hierbij werd in eerste instantie de resolutie van het rekenrooster onder de loep genomen. Met een detailmodel van Dendermonde tot Merelbeke werd nagegaan of een verfijning van de roosterresolutie een afwijking van de berekende HW's en LW's veroorzaakt. De rekencellen – die in het basismodel ongeveer 50 m lang en 18 m breed zijn – werden verfijnd zowel in de richting loodrecht op als parallel aan de thalweg. Dit resulteerde in belangrijke afwijkingen in het gehele modelgebied. De LW's werden bij een roosterverfijning lager, terwijl de HW's verhoogden. Bij een 2x2 verfijning van het rekenrooster werd een toename van de getijslag van ongeveer 25 cm berekend, bij een 4x4 verfijning een toename tot 45 cm. Deze wijzigingen in getijslag – te wijten aan een betere getijdoordringing – zijn belangrijk. De roosterresolutie van het NEVLA model lijkt in de Boven Zeeschelde dus te grof om de evolutie van het getij correct weer te geven. Aangezien de resultaten (nog) niet lijken te convergeren naar eenzelfde oplossing, is de verwachting dat een hogere verfijning van het rekenrooster nog een grotere getijslag als resultaat zal hebben. In toekomstig onderzoek zou onderzocht kunnen worden vanaf welke roosterresolutie de resultaten weldegelijk convergeren naar eenzelfde oplossing.

Naast een gevoeligheidsanalyse van de roosterresolutie werd eveneens de topo-bathymetrie getest. Aangezien de gemeten bathymetrische punten niet samenvallen met de roosterpunten, is een interpolatiemethode noodzakelijk. Verschillende interpolatiemethodes werden toegepast om na te gaan in welke mate deze een effect hebben op de komberging – en dus onrechtstreeks op de getijvoortplanting – van het estuarium. Zoals verwacht geeft het gebruik van respectievelijk de *Maximum value of near points* en de *Minimum value of near points* interpolatiemethode een sterke wijziging van de komberging vergeleken met de *Gridcel averaging* methode. Waar het effect op de getijslag bij een grotere komberging bij gebruik van de *Minimum value of near points* methode beperkt is tot maximaal 40 cm, is het effect van een kleinere komberging bij de *Maximum value of near points* methode tussen Sint-Amands en Schoonaarde groter dan 200 cm. In beide gevallen is het effect het meest uitgesproken opwaarts Temse. Een vergelijking tussen de *Gridcel averaging*, de *Closest value* en de *Inverse distance weighted mean* methode leerde dat deze methodes zeer vergelijkbare resultaten

gaven wat betreft de getijvoortplanting. De grootste wijziging was terug te vinden bij de LW's opwaarts Schoonaarde. Wegens de fysische meest onderbouwde methode, dient de voorkeur te worden gegeven aan de *Inverse distance weighted mean* methode. Echter het gebruik van de *Gridcell averaging* en *Closest value* methode is eveneens aanvaardbaar gezien de beperkte afwijkingen.

In tegenstelling tot de dieper gelegen delen kunnen slikken en schorren langs de Schelde niet worden opgemeten met de Single Beam techniek maar wel met de LIDAR techniek. Deze opmeting – die vanuit een vliegtuig gebeurt – is minder nauwkeurig. Daarom werd door middel van 2 eenvoudige simulaties – waarbij de slikken en schorren 20 cm verhoogd respectievelijk 20 cm verlaagd werden – nagegaan wat het effect van deze minder nauwkeurige opmeting is. In de Westerschelde – waar het grootste areaal aan intergetijdengebied aanwezig is – is er quasi geen effect ten gevolge van deze ingreep. In de Zeeschelde laat dit effect zich vooral voelen bij de HW's, al blijft het beperkt. Van Bath tot Wetteren wordt een uniforme verlaging van circa 2cm op de hoogwaterstand berekend. Enkel in het meest opwaartse stuk is er eveneens een effect op de LW's.

Te Merelbeke wordt het model aangestuurd door een gemeten tijdreeks van debieten. Bij gebrek aan meer gedetailleerde metingen, wordt hier vaak gebruik gemaakt van daggemiddelde debieten. Op basis van een debietreeks met een frequentie van 5 minuten, werd nagegaan wat het effect is van de frequentie van deze metingen op de modelresultaten. Uit deze resultaten volgt dat het invloedsgebied van de frequentie van de opgelegde debieten zich uitstrekt tot Hemiksem. Waar de verschillen tussen de 5 minuut gemiddelde debieten en de uur gemiddelde debieten eerder beperkt zijn, zijn er grote verschillen waar te nemen tussen de 5 minuut gemiddelde debieten en de dag gemiddelde debieten. Deze verschillen zijn kleiner in periodes met quasi constant debiet (cfr. kleine verschillen in waterstand) en het meest uitgesproken gedurende periodes met sterk fluctuerend debiet.

Teneinde de waterstand in de Boven Zeeschelde opwaarts Temse correct weer te geven, wordt aanbevolen om te Merelbeke minstens uur gemiddelde debieten te gebruiken. Dag gemiddelde debieten geven eveneens aanvaardbare resultaten tijdens periodes met constante afvoer, doch tijdens periodes met grote debiet fluctuaties geven deze aanleiding tot grote afwijkingen (meer dan 50 cm tussen Wetteren en Schoonaarde) in waterstand.

Tot slot werd bestudeerd wat het effect is van de bodemruwheid. Uit de simulaties met uniforme bodemruwheid bleek dat een ruimtelijk variërende ruwheid nodig is om de getijvoortplanting in het estuarium correct weer te geven. De versterking van de tijslag door het convergente karakter van het Schelde-estuarium wordt afgezwakt door een ruwere bodem of juist extra versterkt door de lagere weerstand van een gladde bodem.

Vervolgens werd het estuarium onderverdeeld in 10 zones, waarbij de ruwheid van elke zone werd verhoogd respectievelijk verlaagd. Daar waar de ruwheid lokaal werd aangepast trad er een verandering op in de gradiënt langsheen het estuarium van de M2 amplitude. Een toename van de bodemruwheid veroorzaakt een kleinere gradiënt, een afname van de bodemruwheid een grotere gradiënt. In gebieden op- en afwaarts het gewijzigde deelgebied blijft de gradiënt van de M2 component nagenoeg gelijk. Aangezien de M2 component de belangrijkste getijverwekkende component is, zijn deze resultaten extrapoleerbaar naar de volledige getijslag.

Daarnaast werd eveneens een diepte-afhankelijke ruwheid gebruikt. Hierbij werd vastgesteld dat de gemiddelde diepte afneemt – en dus een toename van de ruwheid – naar opwaarts toe. Dit resulteerde in een toename van de getijslag tussen Hoofdplaat en Boerenschans. Opwaarts Boerenschans was dan weer een daling van de getijslag terug te vinden.

Tot slot werden 3 verschillende ruwheidsformuleringen met elkaar vergeleken. Hierbij werd getracht om een gelijkwaardige ruwheid voor de 3 formuleringen te hanteren. Echter gezien het verschil in afhankelijkheid van de diepte tussen de 3 formuleringen, was de resulterende ruwheid verschillend waardoor de resultaten moeilijk met elkaar vergeleken konden worden.

Op basis van de resultaten van deze gevoeligheidsanalyse zal een kalibratie en validatie van het bestaande NEVLA model worden uitgevoerd. Hierbij zal het model worden afgeregeld teneinde de overeenstemming tussen de metingen en de modelresultaten zo goed mogelijk te krijgen. Vooreerst zal het rekenrooster worden aangepast zoals aangegeven in dit rapport om de getijpenetratie in het opwaartse deel van het Schelde estuarium te verbeteren. Vervolgens zal een topo-bathymetrische interpolatie worden uitgevoerd op basis van de meest recente meetdata. Als opwaartse randvoorwaarde zal worden getracht om te Merelbeke minstens uurgemiddelde waarden op te leggen. Voor de andere bovenlopen wordt bij gebrek aan meer gedetailleerde opmetingen gewerkt met daggemiddelde debieten. Tot slot zal het ruwheidsveld worden aangepast, waarmee de finale afregeling van het model wordt uitgevoerd. Hierbij zal worden teruggegrepen naar de resultaten van de gevoeligheidsanalyse zoals in dit rapport beschreven. Deze afregeling is in eerste instantie gericht op waterstand, echter debieten en stroomsnelheden zullen in beperkte mate eveneens worden vergeleken. Bijzondere aandacht bij dit alles zal worden besteed aan het stuk van het Schelde estuarium opwaarts Rupelmonde: zowel de Boven Zeeschelde als het Rupelbekken.

9 Referenties

Adema J. (2006). Evaluatie van hydraulische modellen voor operationele voorspellingen. Deelopdracht 3: Afregelen van Vlaamse rivieren in het Kustzuid model en vergelijking Kalman sturing. Rapport Alkyon A1401R3r2, in opdracht van WL Borgerhout (M.729-09)

Ides S., Plancke Y., Peters J.J. (2008). Deteminatieonderzoek plaatrandstortingen – Deelrapport 3 – Voorstel stortstrategie. WL Rapporten, 791/06. Waterbouwkundig Laboratorium. Borgerhout, België.

IMDC (2002). Studie densiteitsstromingen in het kader van LTV. Verslag van de langdurige debietsmeting aan het sluizencomplex te Merelbeke.

Kessel T. van, Vanlede J., Bruens A. (2006). Development of a mud transport model for the Scheldt estuary in the framework of LTV. WL | Delft Hydraulics (report Z4210) & WL Borgerhout (M756-01)

Peeters P. & Coen L. (2008). Inventarisatie en analyse historische Zeeschelde habitats: Effect antropogene ingrepen en natuurlijke evoluties op de getij-indringing in de Zeeschelde – Ondersteunende numerieke modellering. WL Rapporten, 713/21. Waterbouwkundig Laboratorium Borgerhout, België

RIKZ (1998). Hoe ontstaan getijden? Rijksinstituut voor kust en zee, Nederland.

Van Braeckel A., Piesschaert F. & Van den Bergh E. (2006). Historische analyse van de Zeeschelde en haar getijgebonden zijrivieren – 19^e eeuw tot heden. INBO.R.2006.29. Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel, België.

Vanlede J., Decrop B., De Clercq B., Ides, S., De Mulder, T., Mostaert, F. (2008). Verbetering randvoorwaardenmodel - Deelrapport 1: gevoeligheidsanalyse. WL Rapporten, 753_09. Waterbouwkundig Laboratorium & IMDC: Antwerpen, België.

Verelst K, De Mulder T, Mostaert F (2008). Zeeschelde tussen Gentbrugge en Melle – Verbetering hydrodynamisch numeriek modelinstrumentarium. WL Rapporten, 800-1. Waterbouwkundig Laboratorium Borgerhout, België.

Waterbouwkundig Laboratorium, *2Dh NEVLA Scheldemodel – Bouw en afregeling stromingsmodel*, februari 2004.

Winterwerp J.C., Wang Z.B., Stive M.J.F., Arends A.A., Jeuken M.C.J.L., Kuijper C. & Thoolen P.M.C. (2001). A new morphological schematization of the Western Scheldt Estuary, the Netherlands. Proceedings of the 2nd IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics.

Waterbouwkundig Laboratorium Borgerhout (2004). 2Dh NEVLA-Scheldemodel – Bouw en afregeling stromingsmodel. WL Rapporten, 753-01. Waterbouwkundig Laboratorium Borgerhout, België.

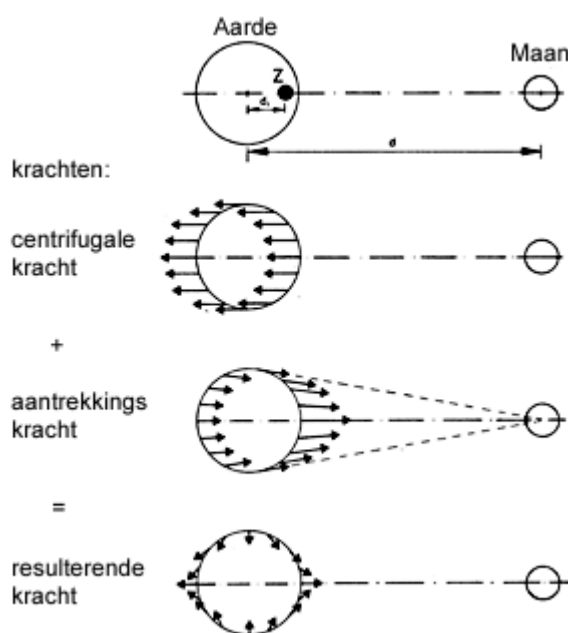
Bijlage A

In deze bijlage wordt kort ingegaan op het ontstaan van het getij, meer specifiek op de opdeling van het getij in harmonische componenten.

Het aarde-zon systeem

Isaac Newton heeft in de 17^{de} eeuw reeds aangegeven hoe we het getij kunnen verklaren. Hierbij veronderstelde hij een aardbol zonder continenten, volledig bedekt met een uniforme waterlaag, met alleen de aantrekkingskracht van de maan. Tussen de aarde en de maan is er een wederzijdse aantrekkingskracht, die ervoor zorgt dat de aarde en de maan in een ellipsvormige baan rond elkaar bewegen. Zoals aangegeven op Figuur A1 ondervindt het water op de aarde hierbij enerzijds een centrifugale kracht, anderzijds een aantrekkingskracht, wat resulteert in zones met hogere en zones met lagere waterstanden.

De omlooptijd van de maan rond de aarde bedraagt 27,32 dagen. Tegelijkertijd draait de aarde om haar eigen as in dezelfde richting als de maan rond de aarde draait. Na 1 dag is de aarde rond haar eigen as geroteerd, terwijl de maan eveneens een stukje in haar baan is opgeschoven. Een bepaald punt op de aarde heeft daardoor niet dezelfde positie ten opzichte van de maan als 24 uur daarvoor. De aarde moet nog een stukje doordraaien om ervoor te zorgen dat die plek op aarde weer dezelfde positie heeft ten opzichte van de maan. Dit doordraaien van de aarde duurt 50 minuten. Het hoogwater op een bepaald punt op aarde komt dus terug na 12 uur en 25 minuten.



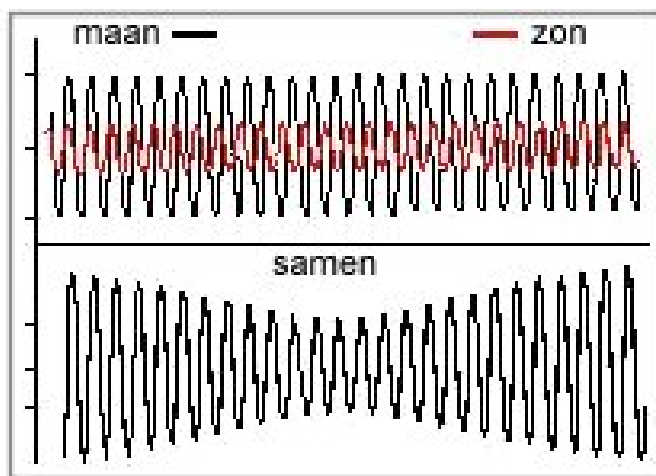
Figuur A 1: Het maansgetij [RIKZ, 1998]

Naast de maan is ook de zon verantwoordelijk voor het getij op aarde. De verre afstand van de zon ten opzichte van de aarde wordt ruimschoots gecompenseerd door de grote massa van dit hemellichaam. Aangezien de sterkte van de aantrekkingskracht evenredig is met de massa en omgekeerd evenredig met de derde macht van de afstand, kan worden berekend dat de zon ongeveer 45% van de kracht van de maan uitoefent op het aardoppervlak. Aangezien een punt op aarde exact 24 uur nodig heeft om

dezelfde positie ten opzichte van de zon te hebben, verwekt de zon precies tweemaal per dag een hoog- en een laagwater.

Zoals aangegeven op Figuur A2, is het getij in een punt op aarde de combinatie van het getij ten gevolge van de maan en het getij veroorzaakt door de zon. Wanneer de zon en de maan in elkaars verlengde staan ten opzichte van de aarde, dan bundelen zij als het ware hun krachten en treedt een zogenaamd springtij op. De zon en de maan kunnen elkaar ook tegenwerken: dit gebeurt wanneer de 2 hemellichamen haaks op elkaar staan. De getij amplitude is dan minimaal en wordt ook wel doortij genoemd.

Het zonsgetij, met een periode van 12 uur, haalt het maansgetij, met een periode van 12 uur en 25 minuten, voortdurend in. Dit zorgt ervoor dat het maansgetij periodiek wordt versterkt en verzwakt. Het heeft tevens een effect op de timing van het getij. Tussen springtij en doortij heeft het zonsgetij een vervroegend effect op het maansgetij, tussen doortij en springtij een vertragend effect.

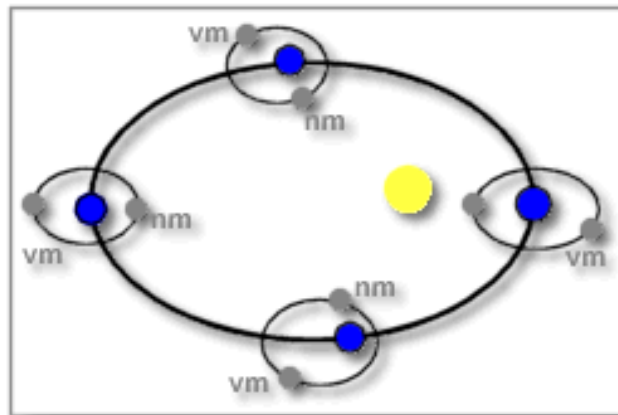


Figuur A 2: Spring- en doortij [RIKZ, 1998]

De draaiingsas van de aarde maakt een hoek met de verbindinglijn aarde-maan en aarde-zon. Als gevolg hiervan, zal iemand op een bepaald punt op aarde bij een volledige rotatie 2 hoog- en 2 laagwaters tegenkomen die ongelijk van hoogte zijn. Dit wordt de dagelijkse ongelijkheid genoemd. Er kan worden berekend dat dit fenomeen een frequentie van 376 dagen heeft.

Daarnaast is de baan van de maan rondom de aarde ellipsvormig (zie Figuur A3). Door deze ellipsvormige baan enerzijds, de declinatiehoek tussen rotatie-as aarde en verbindinglijn aarde-maan anderzijds, en de rotatie van het stelsel aarde-maan rond de zon tot slot treden allerlei andere cycli op. Volgende cycli worden vermeld:

- Een cyclus van 440 dagen, te wijten aan de ellipsvormige baan van de maan rond de aarde;
- De 8,85 jarige cyclus die wordt veroorzaakt doordat de lange as van de ellips van de maanbaan in deze tijd rond de aarde roteert;
- De 18,6 jarige cyclus. In deze tijd varieert de hoek die de maan maakt met het equatorvlak van de aarde tussen 8,5 graden en 28,5 graden.



Figuur A 3: Het systeem aarde-maan-zon [RIKZ, 1998]

Het uit alle processen hierboven beschreven resulterende getij wordt ook wel het *evenwichtsgetij* genoemd.

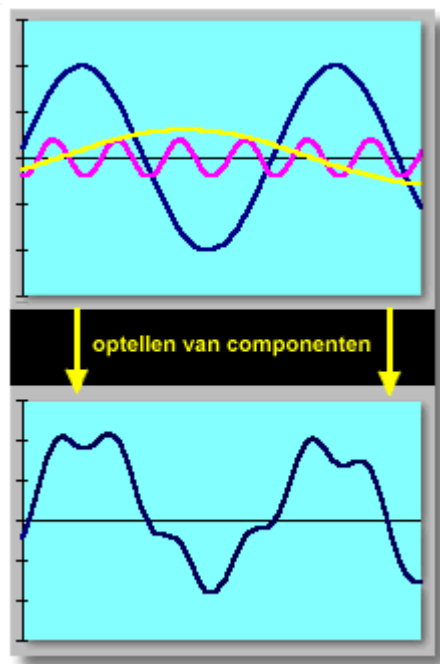
Het astronomische getij

In bovenstaande beschrijving werd ervan uitgegaan dat de gehele aarde met water is bedekt. De werkelijke situatie is echter een stuk ingewikkelder aangezien er landmassa's zijn en de aarde dus niet gelijkmatig met water is bedekt. Continenten en eilanden zijn obstakels op de weg en de zee is niet overal even diep. In de praktijk is de locatie van de obstakels stabiel, waardoor verwacht kan worden dat er een grote regelmaat qua getij is. Alle hierboven beschreven cycli zijn daarin terug te vinden. Dit voorspelbare getij noemen we het *astronomische getij*.

In de praktijk kan het *werkelijke getij* afwijken van het voorspelbare astronomische getij. Oorzaken hiervoor zijn de luchtdruk in beperkte mate en vooral de wind.

Het getij opgedeeld in harmonische componenten

Het astronomische getij zoals hierboven beschreven kan worden opgedeeld in harmonische componenten. Hierbij wordt het getij voorgesteld als de som van een aantal sinusoiden, ook wel harmonische componenten of partiële getijden genoemd. De hoeksnelheden van deze sinusoiden volgen uit de schijnbare bewegingen van zon en maan ten opzichte van de aarde, en zijn bijgevolg gelijk voor alle plaatsen. De amplituden en fasen moeten per plaats uit waarnemingen worden berekend.



Figuur A 4: Astronomisch getij samengesteld uit partiële getijden of sinusoiden [RIKZ, 1998]

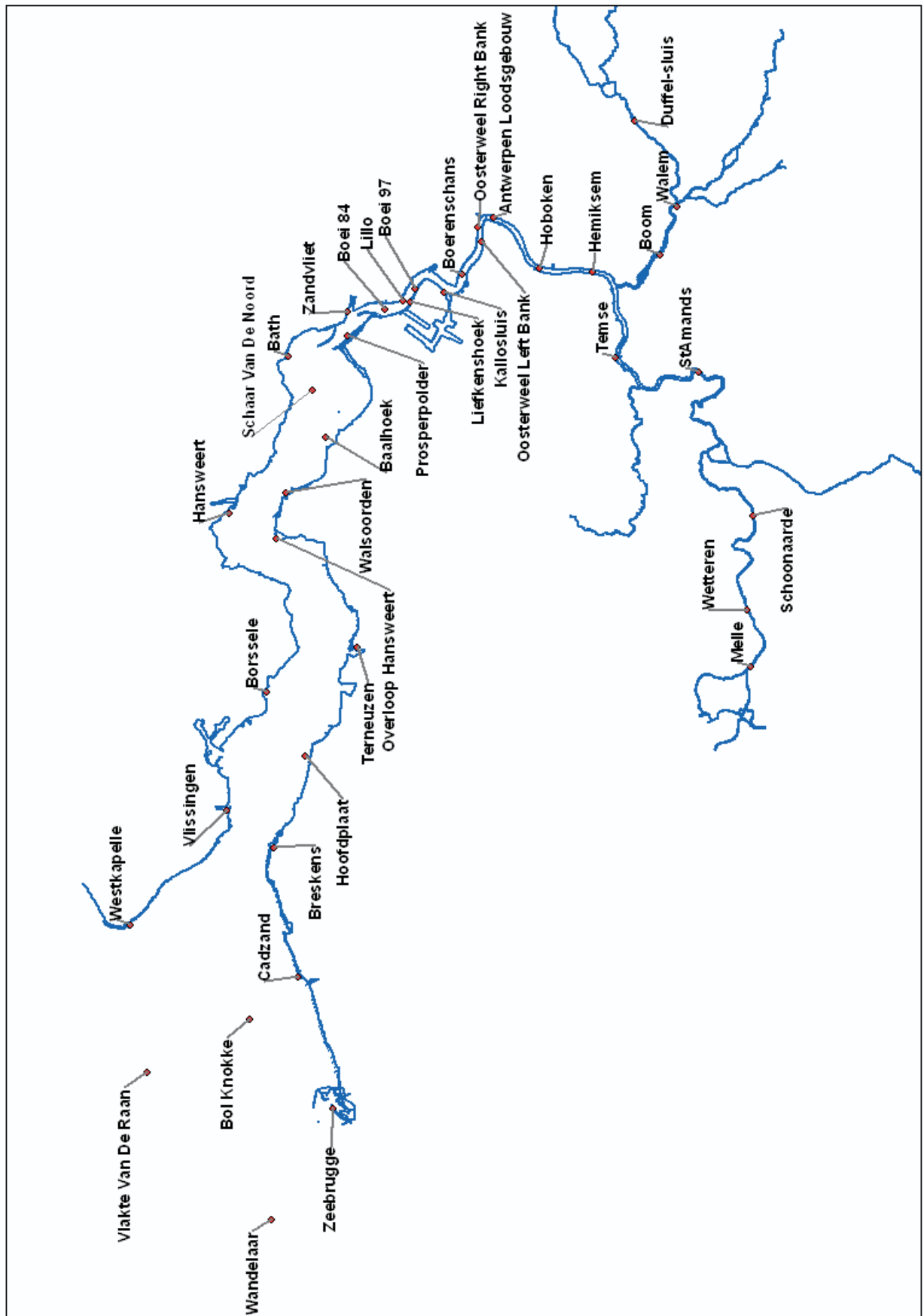
Daar waar het werkelijke getij een samenstelling van meer dan 100 harmonische componenten is, heeft men op vele plaatsen op de wereld genoeg aan 5 componenten voor een redelijke getijvoorspelling. Het betreft ten eerste de componenten M2, het hoofdmaansgetij, en S2, het hoofdzonsgetij. Daarnaast is component N2 de grootste van de componenten die samenhangt met het feit dat de maansbaan ellips- in plaats van cirkelvormig is. De componenten K1 en O1 tot slot zijn enkeldaagse declinatiegetijden, die samenhangen met het feit dat de schijnbare banen van maan en zon een hoek maken ten opzichte van het equatorvlak van de aarde.

Voor de getijvoorspelling langs de Belgische kust (en eveneens in het Schelde-estuarium) heeft men aan hierboven vermelde 5 componenten niet voldoende, daar men hier moet rekening houden met zogeheten ondiepwatergetijden, die het gevolg zijn van de beperkte diepte van de Noordzee. De belangrijkste hiervan is de viermaaldaagse component M4 (tweemaal zo snel als M2) en de zesmaaldaagse component M6 (driemaal zo snel als M2). In Tabel A1 wordt die geïllustreerd aan de hand van de harmonische componenten te Bath.

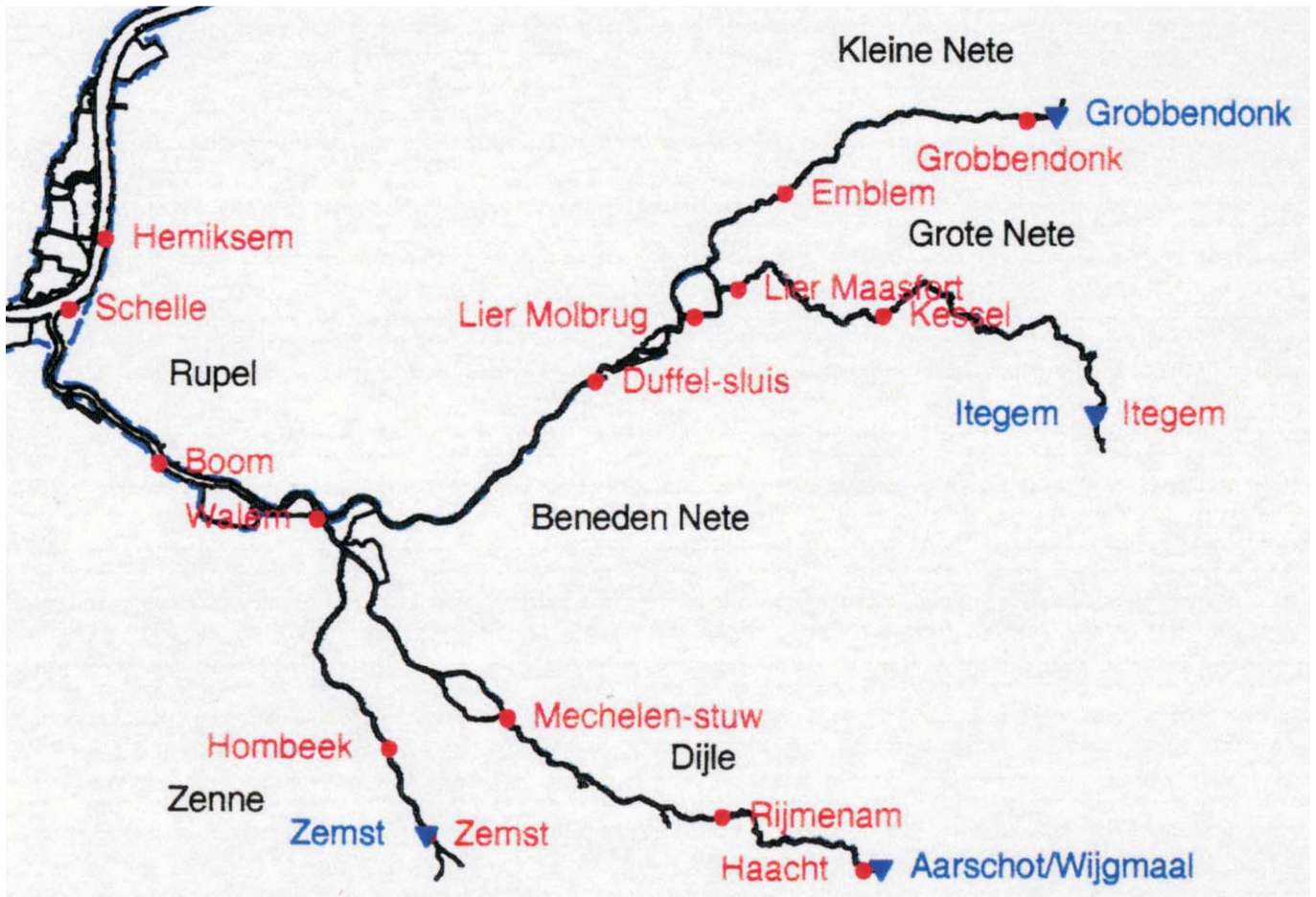
Naam component	Amplitude	Relatieve bijdrage
M2	213 cm	43,5 %
S2	55 cm	11,2 %
N2	35 cm	7,1 %
K1	7 cm	1,4 %
O1	11 cm	2,2 %
M4	12 cm	2,4 %
M6	12 cm	2,4 %

Tabel A 1: Selectie harmonische componenten te Bath. De relatieve bijdrage geeft de verhouding van de grootte van de betreffende component ten opzichte van het gemiddelde getijverschil op deze locatie.

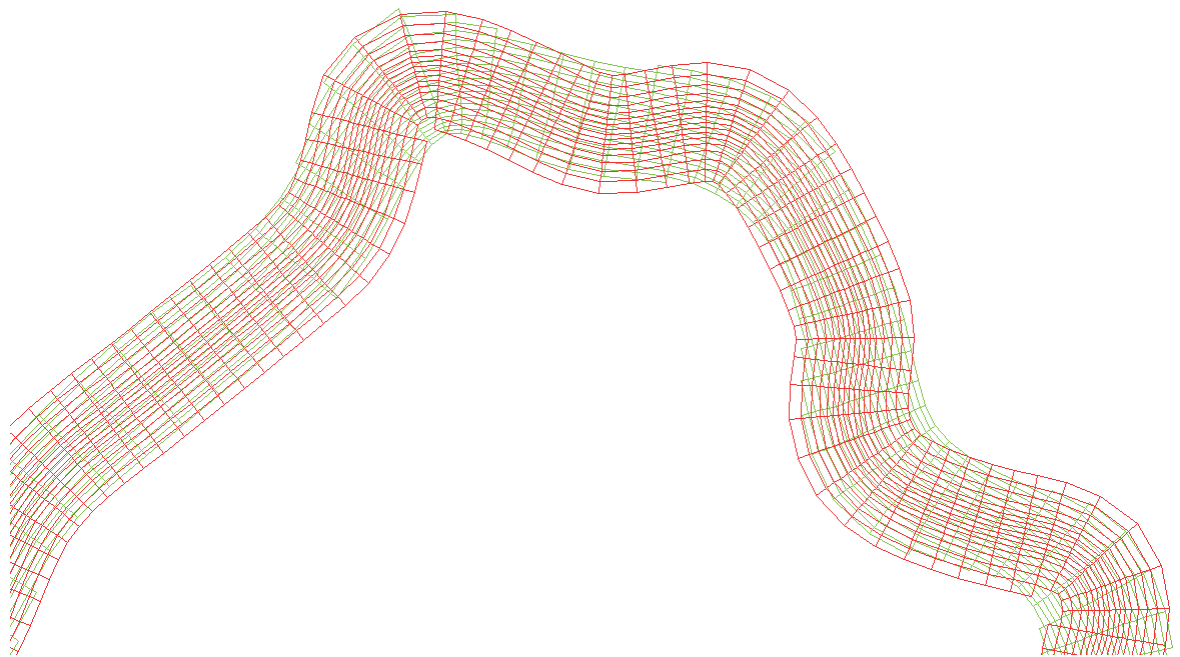
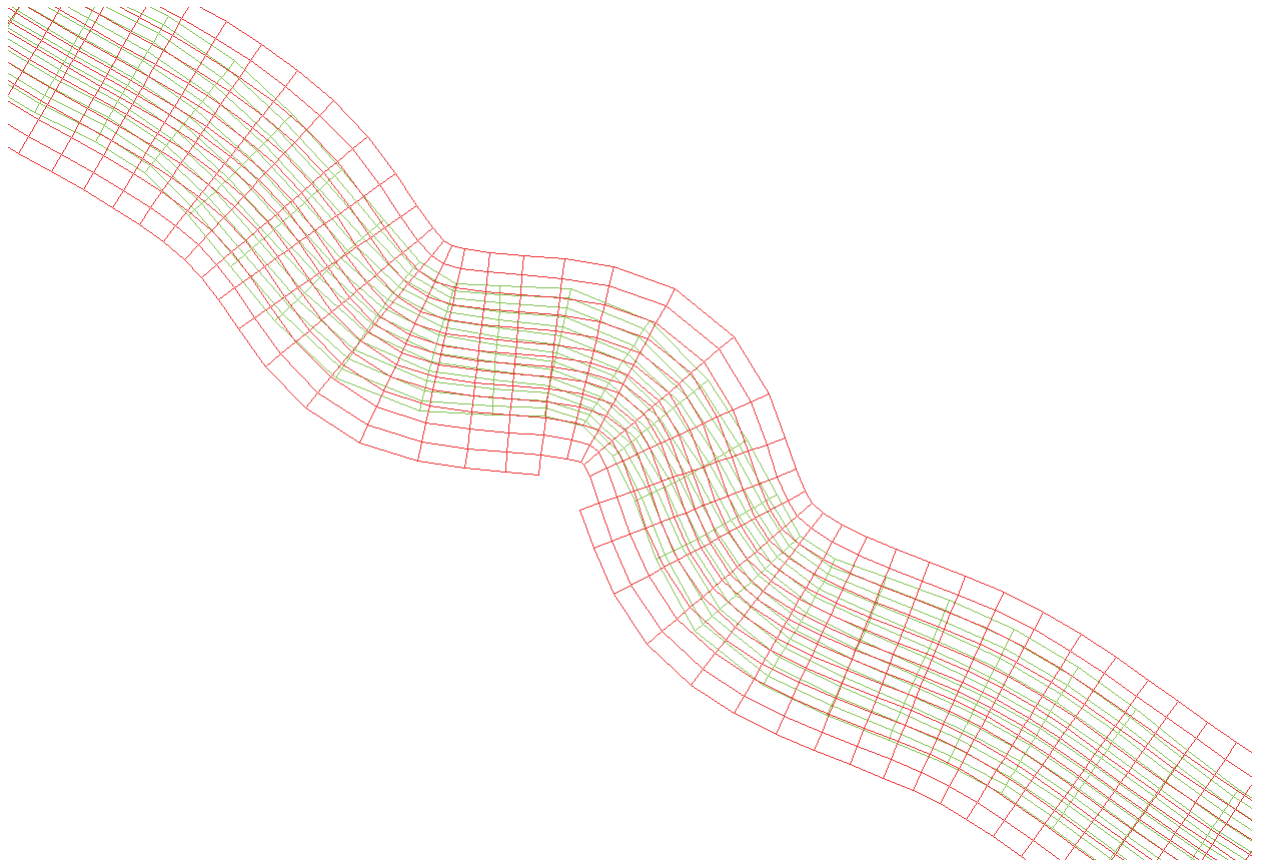
Figuren



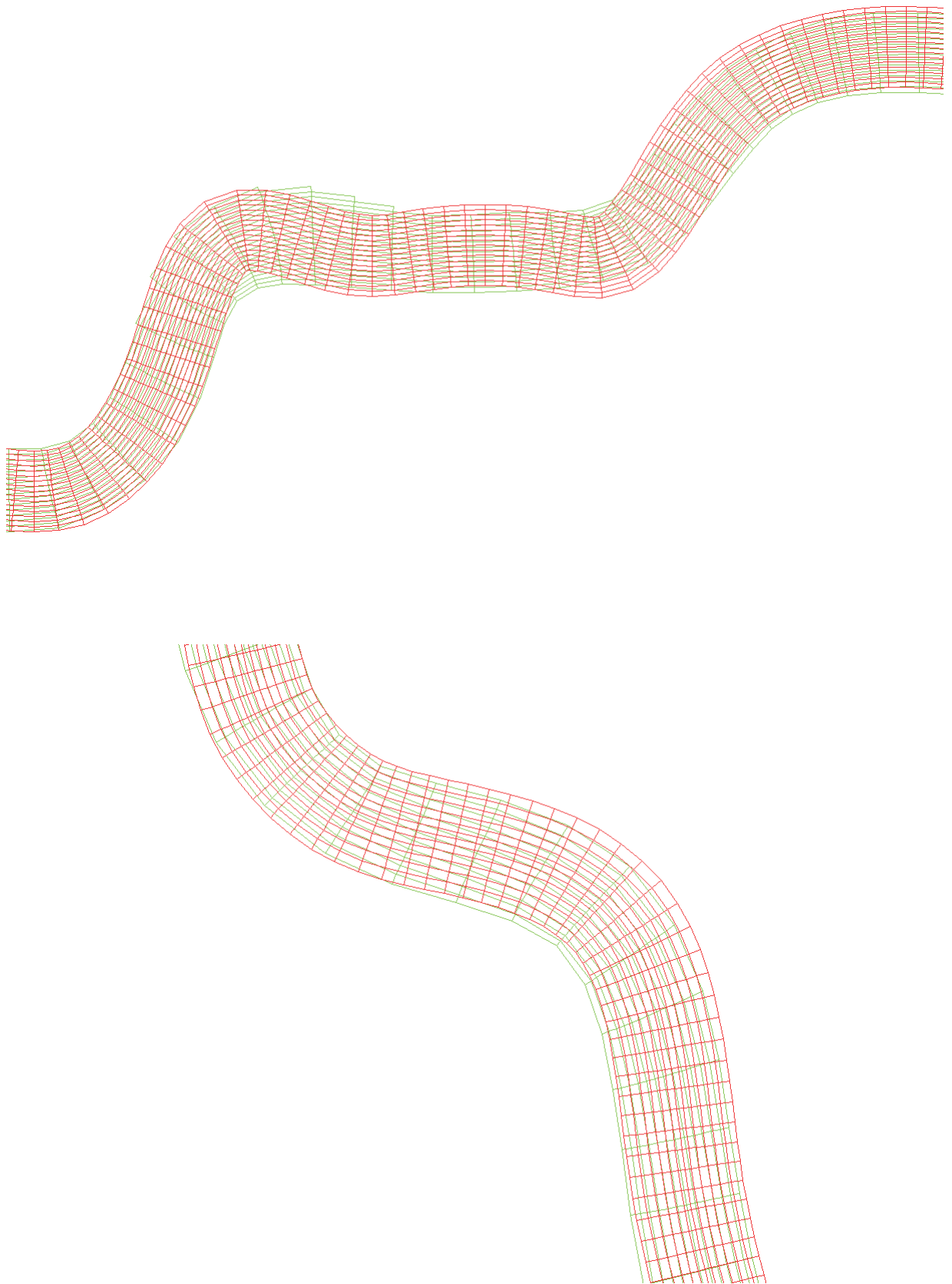
Waterstandsstations langsheen het Schelde-estuarium



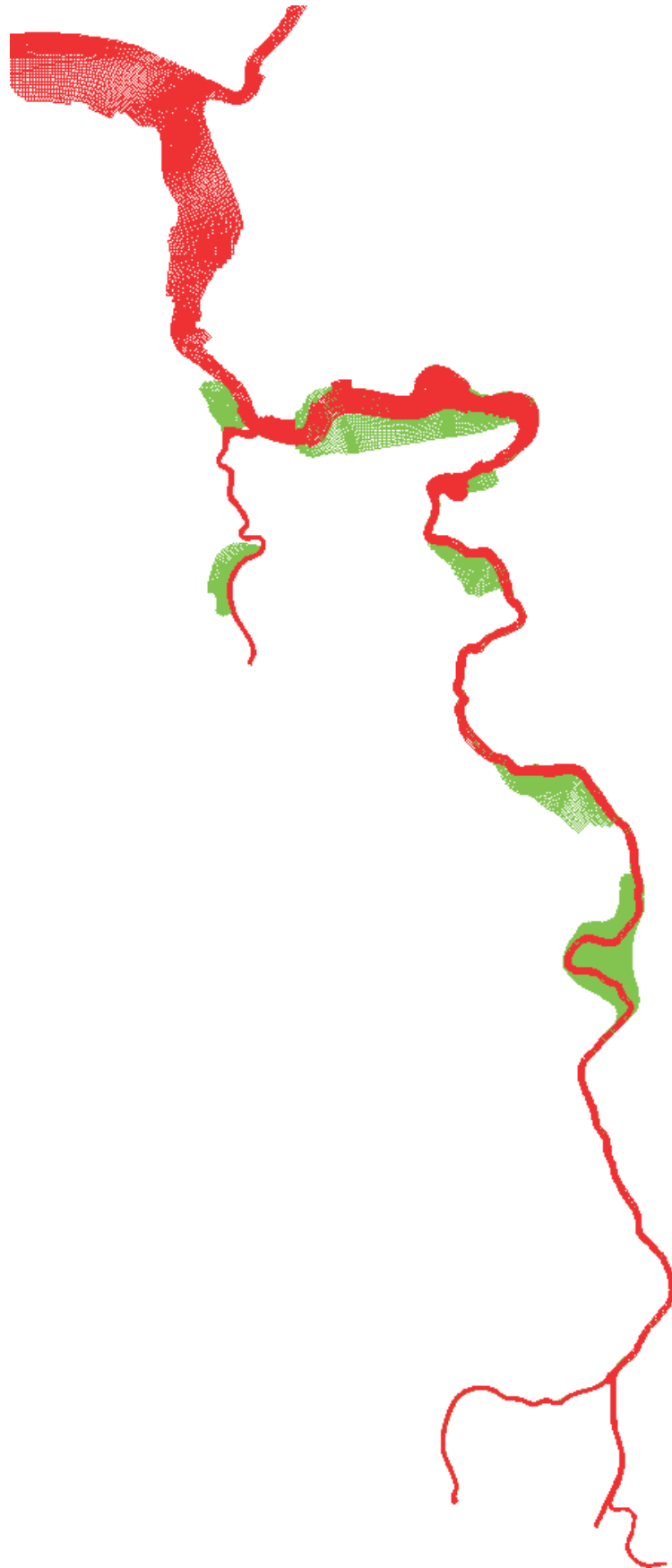
Waterstandsstations op het Rupelbekken



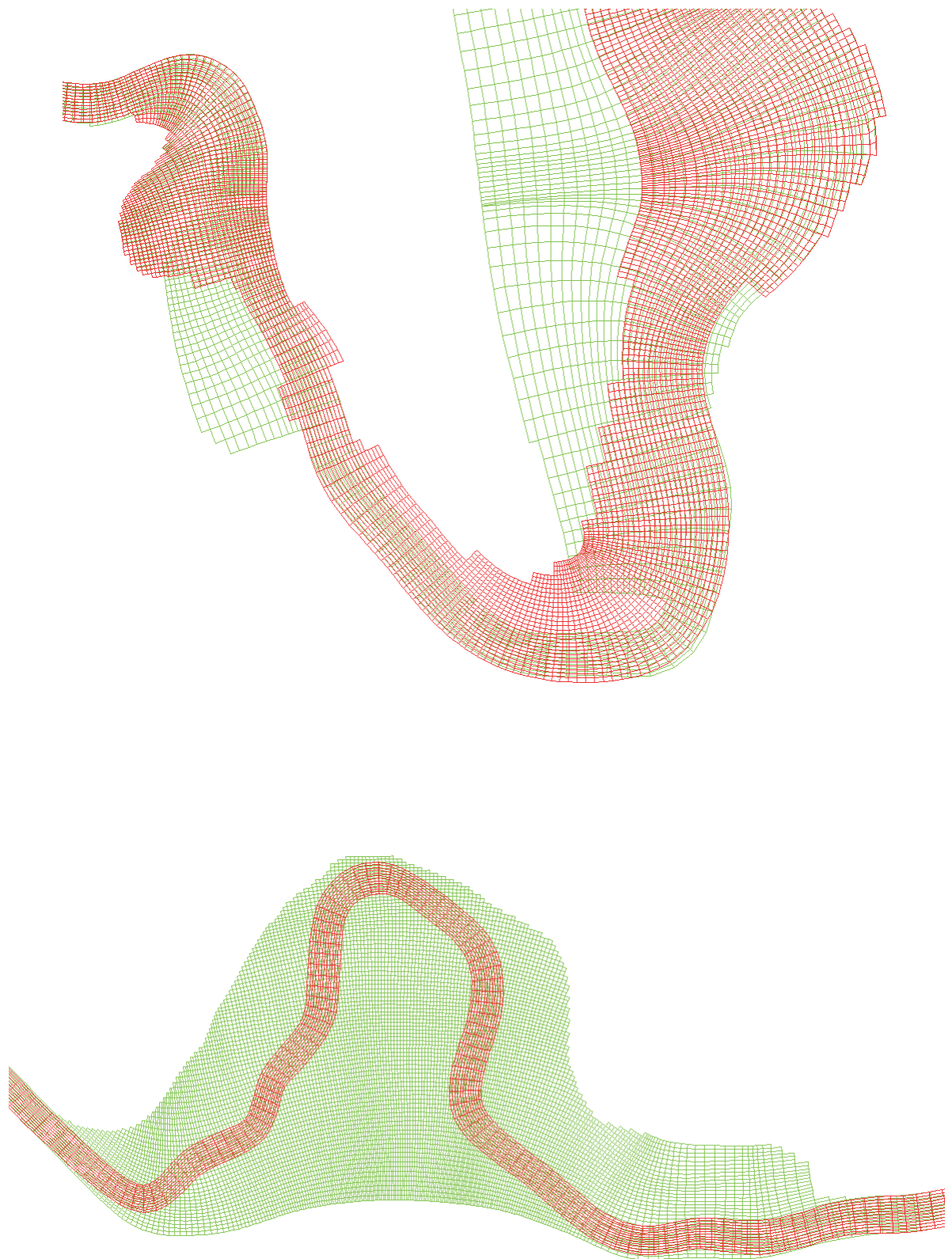
Roosteraanpassingen in het Rupelbekken
Rood run101, groen run102 - Dijle (boven), Grote Nete (onder)



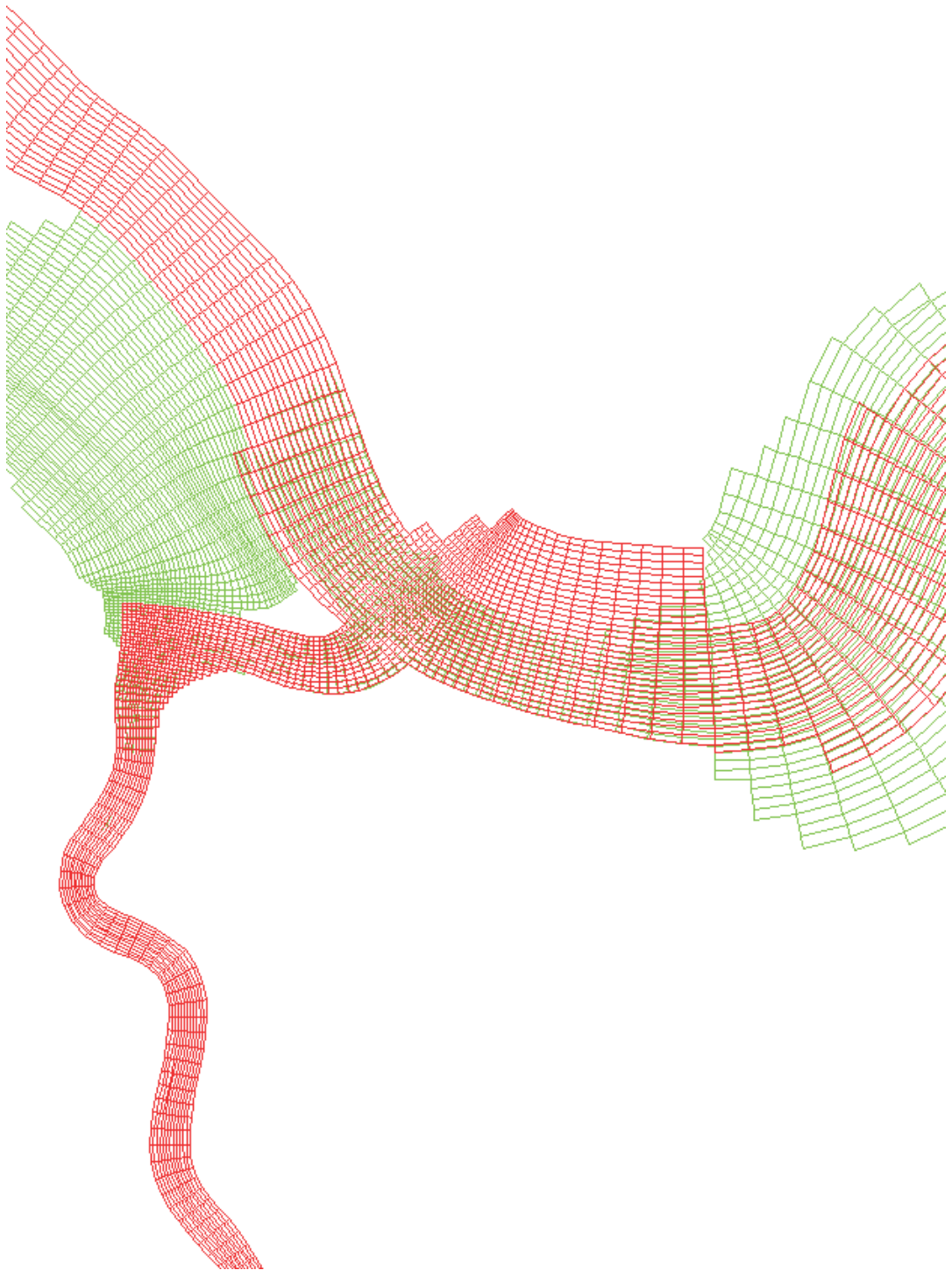
Roosteraanpassingen in het Rupelbekken
Rood run101, groen run102 - Kleine Nete (boven), Zenne (onder)



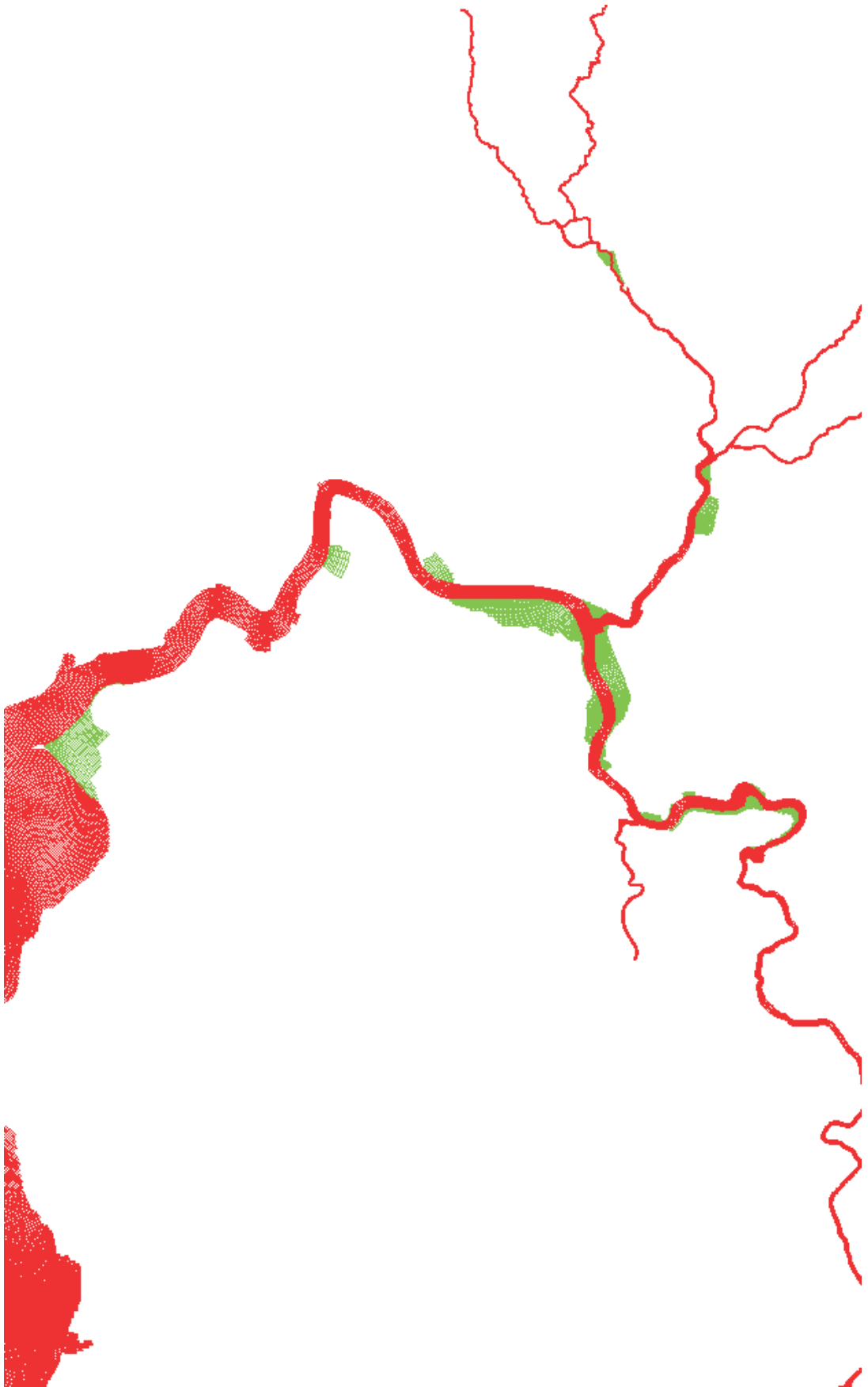
Roosteraanpassingen in de Boven Zeeschelde
Rood run103, groen run101



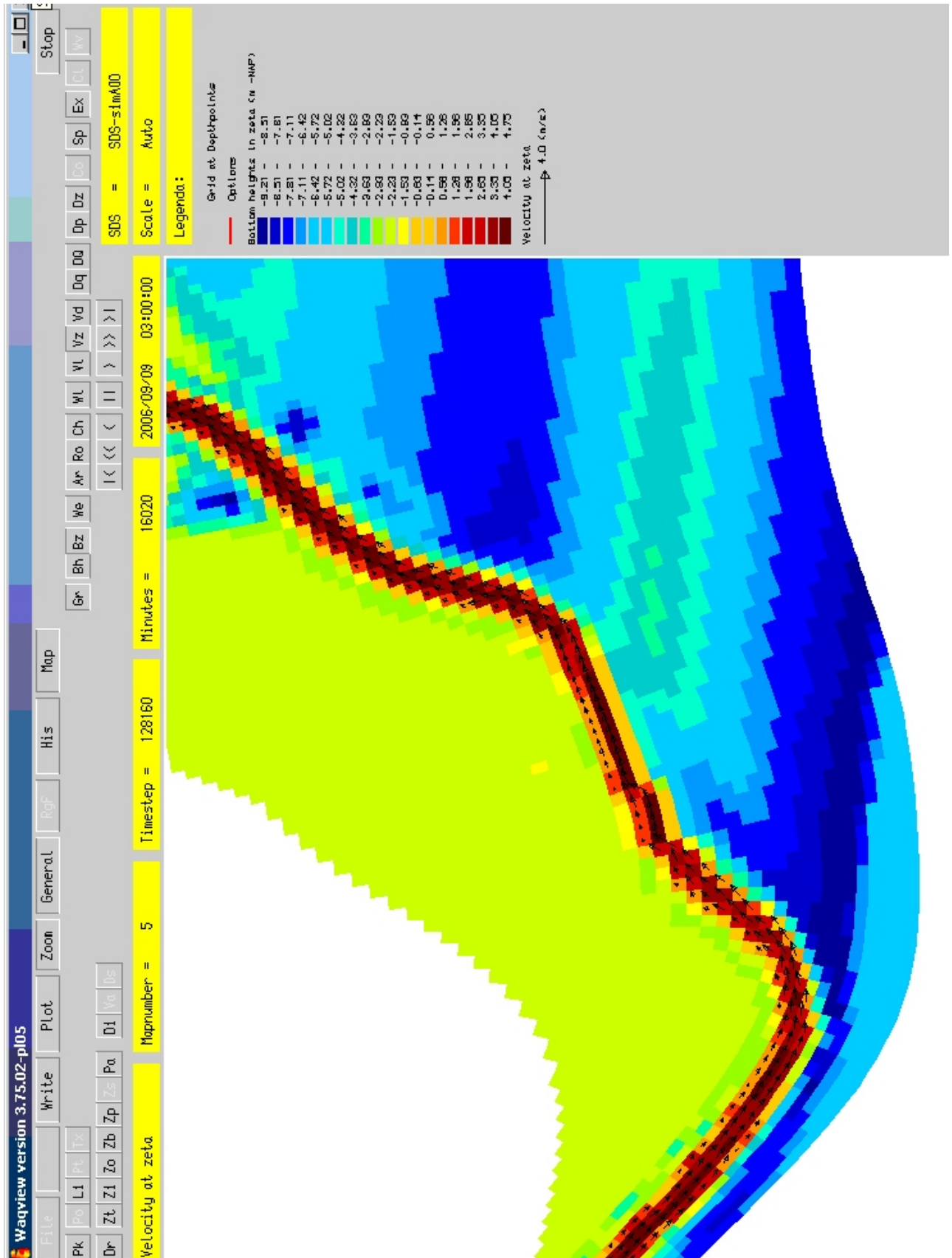
Roosteraanpassingen in de Boven Zeeschelde
Rood run103, groen run101 - Detail Sint-Amands (boven), detail Uitbergen
(onder)



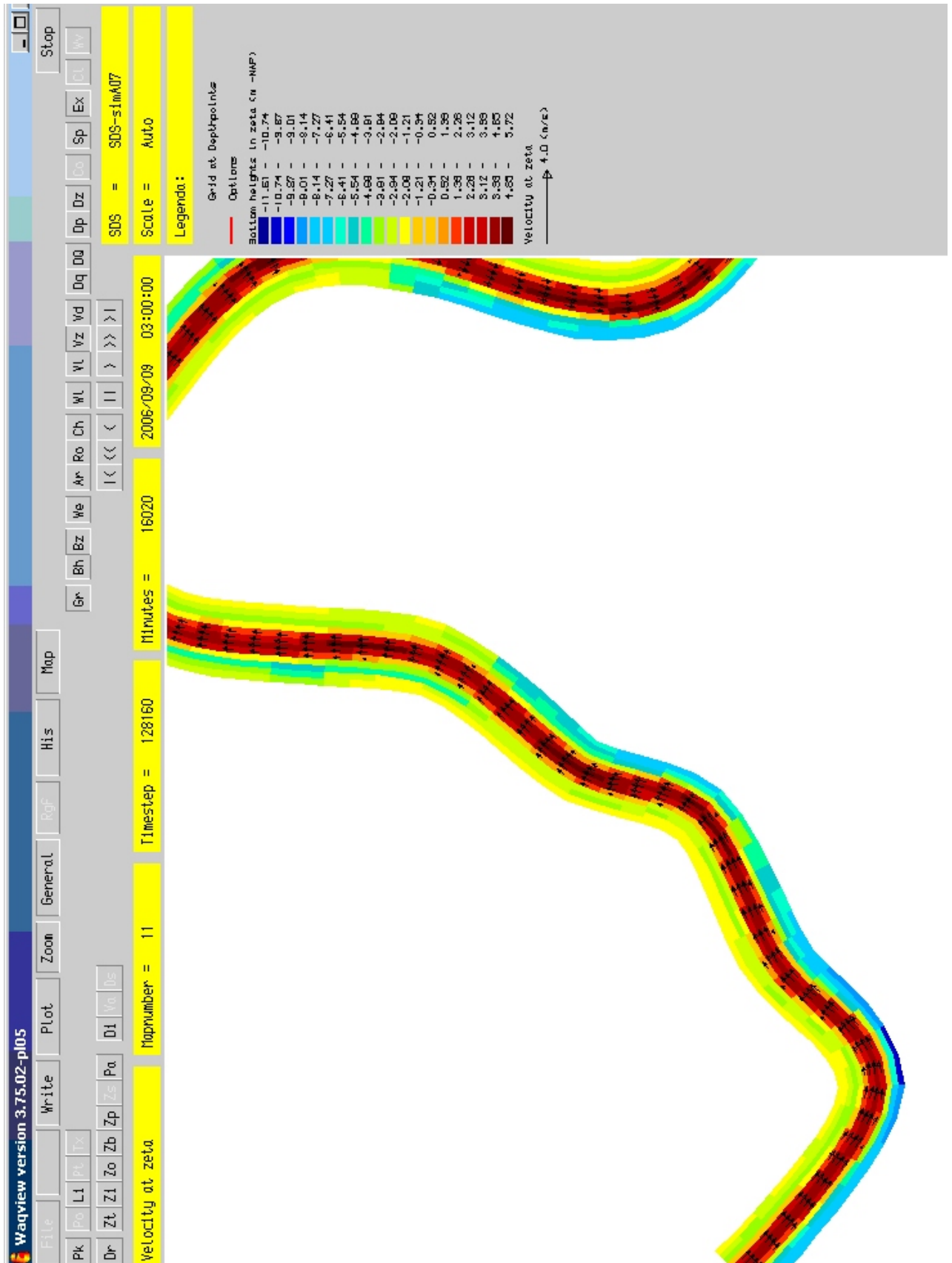
Roosteraanpassingen in de Boven Zeeschelde
Rood run103, groen run101 - Detail schor aan de Rupelmonding



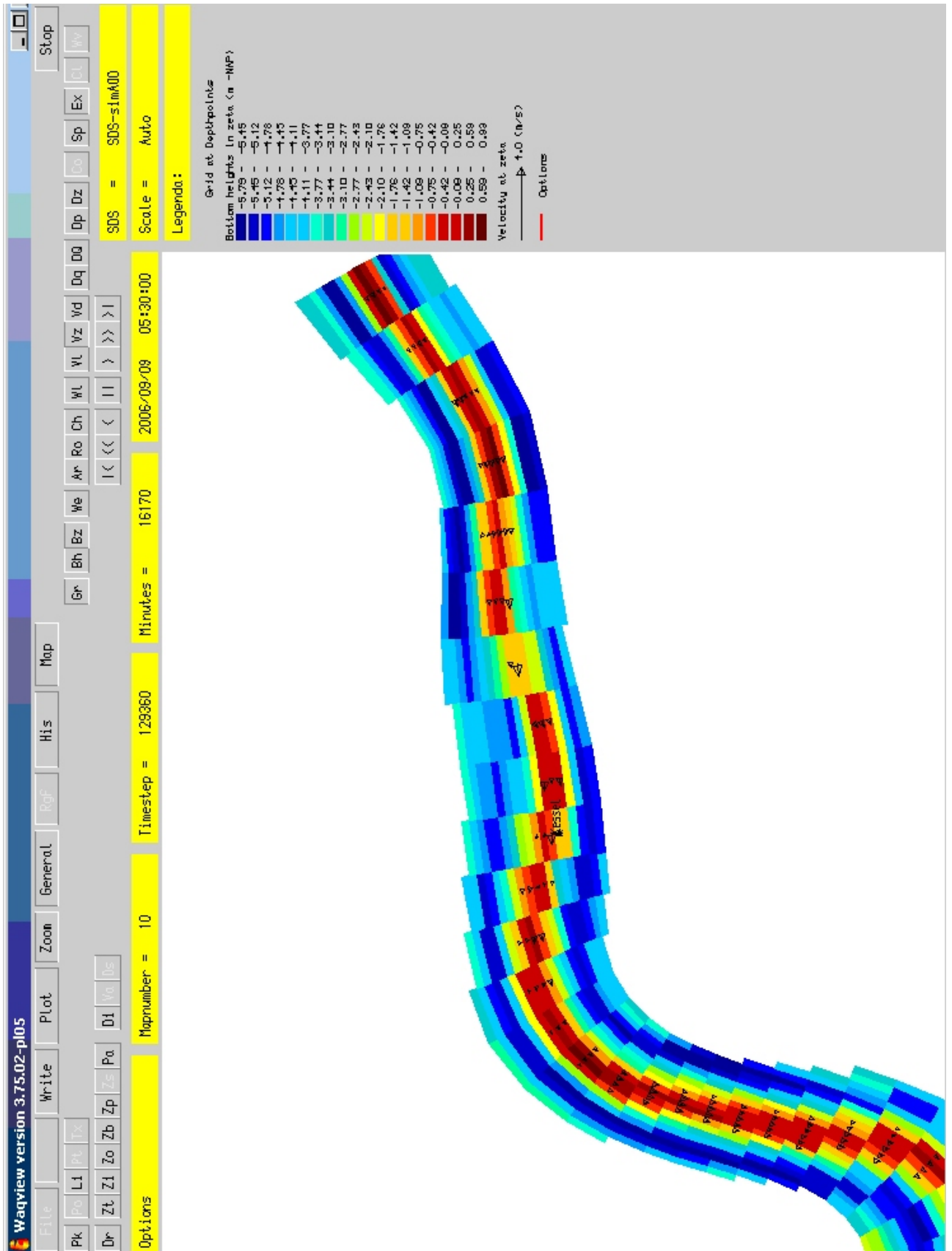
Afknippen van overstromingsgebieden
Rood run101, groen run105



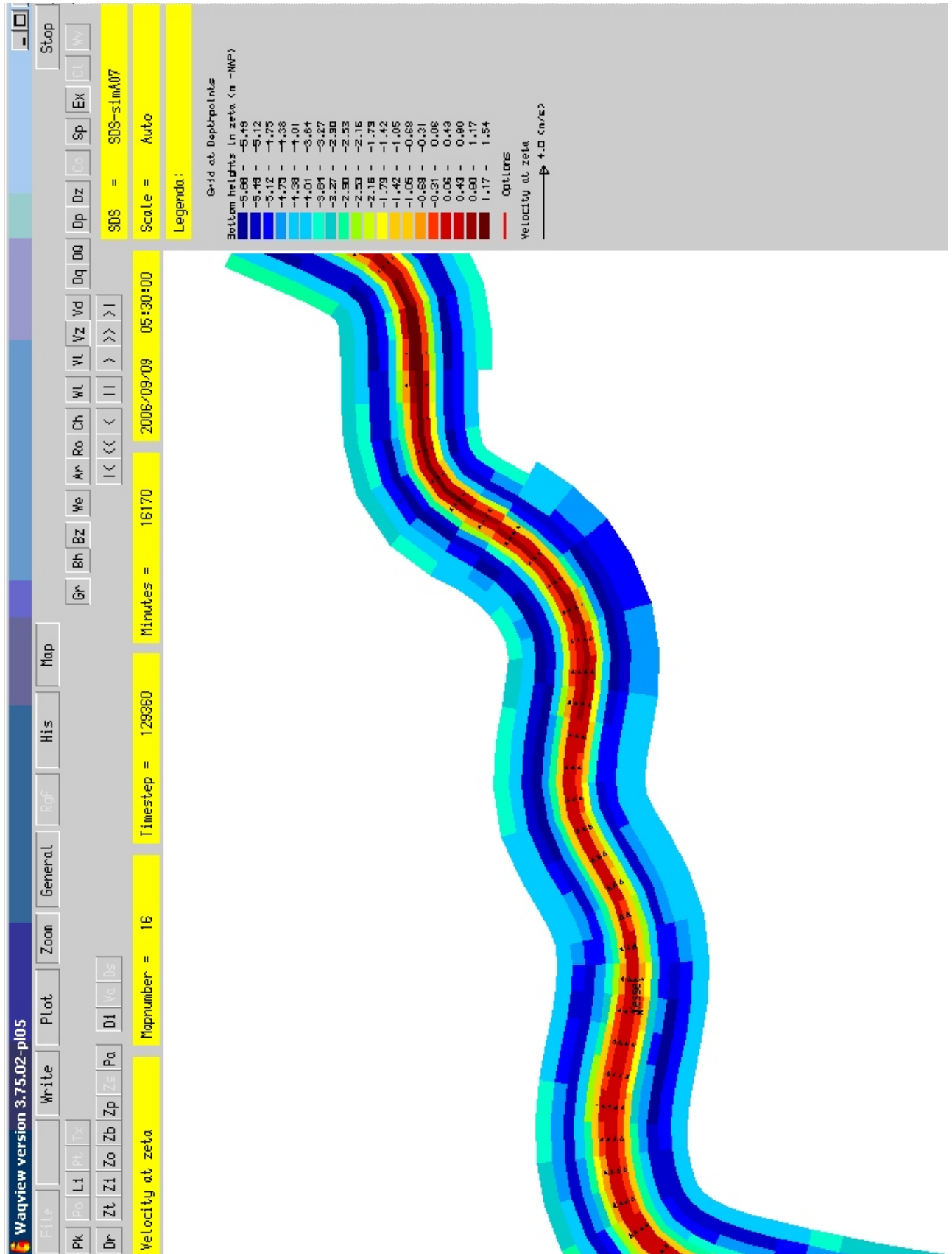
Modelbathymetrie en berekende stroomsnelheid in de omgeving van Uitbergen
Oorspronkelijke schematisatie (NEVLA)



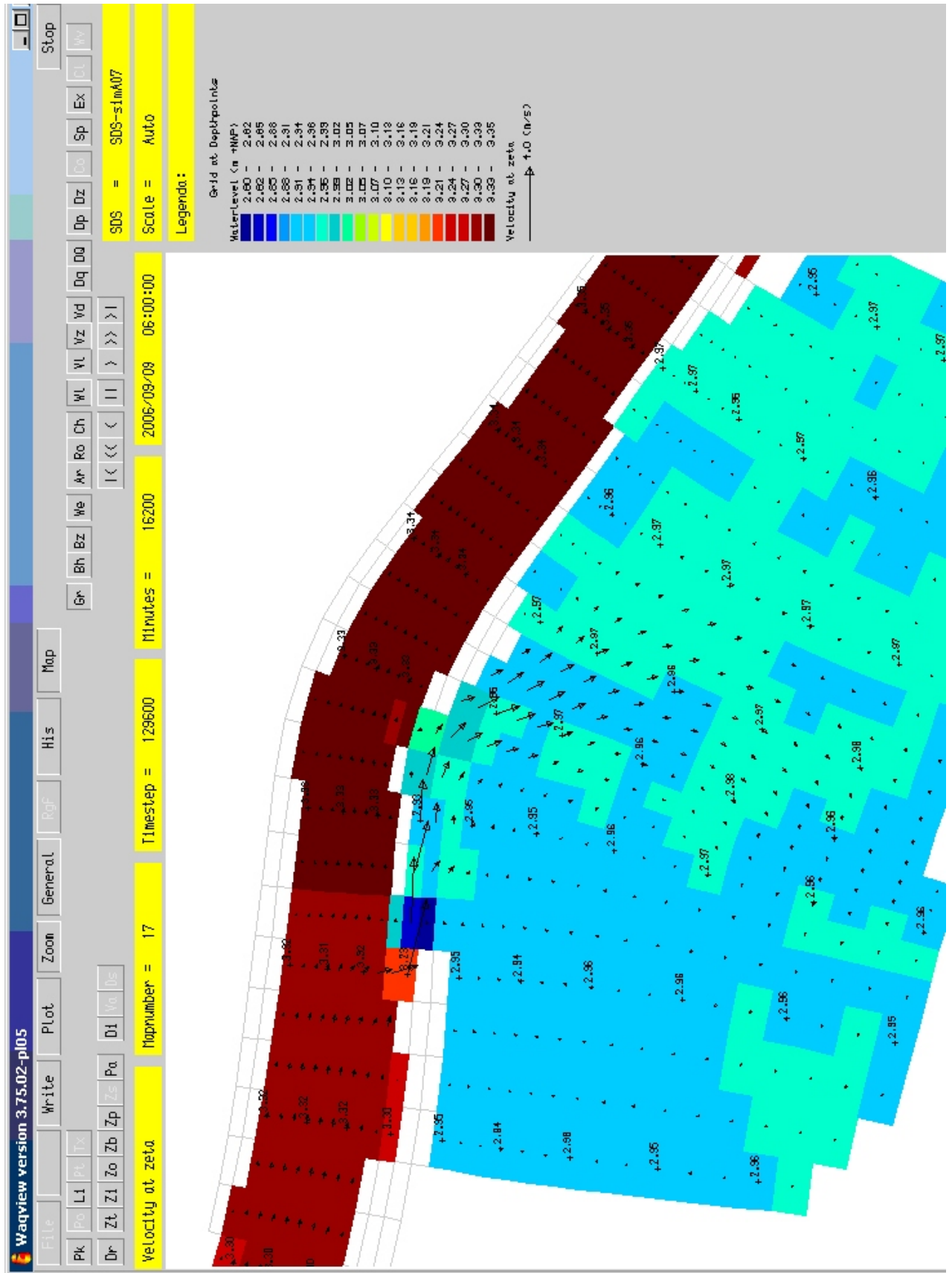
Modelbathymetrie en berekende stroomsnelheid in de omgeving van Uitbergen
 Verbeterde schematisatie (Verelst et al., 2008)



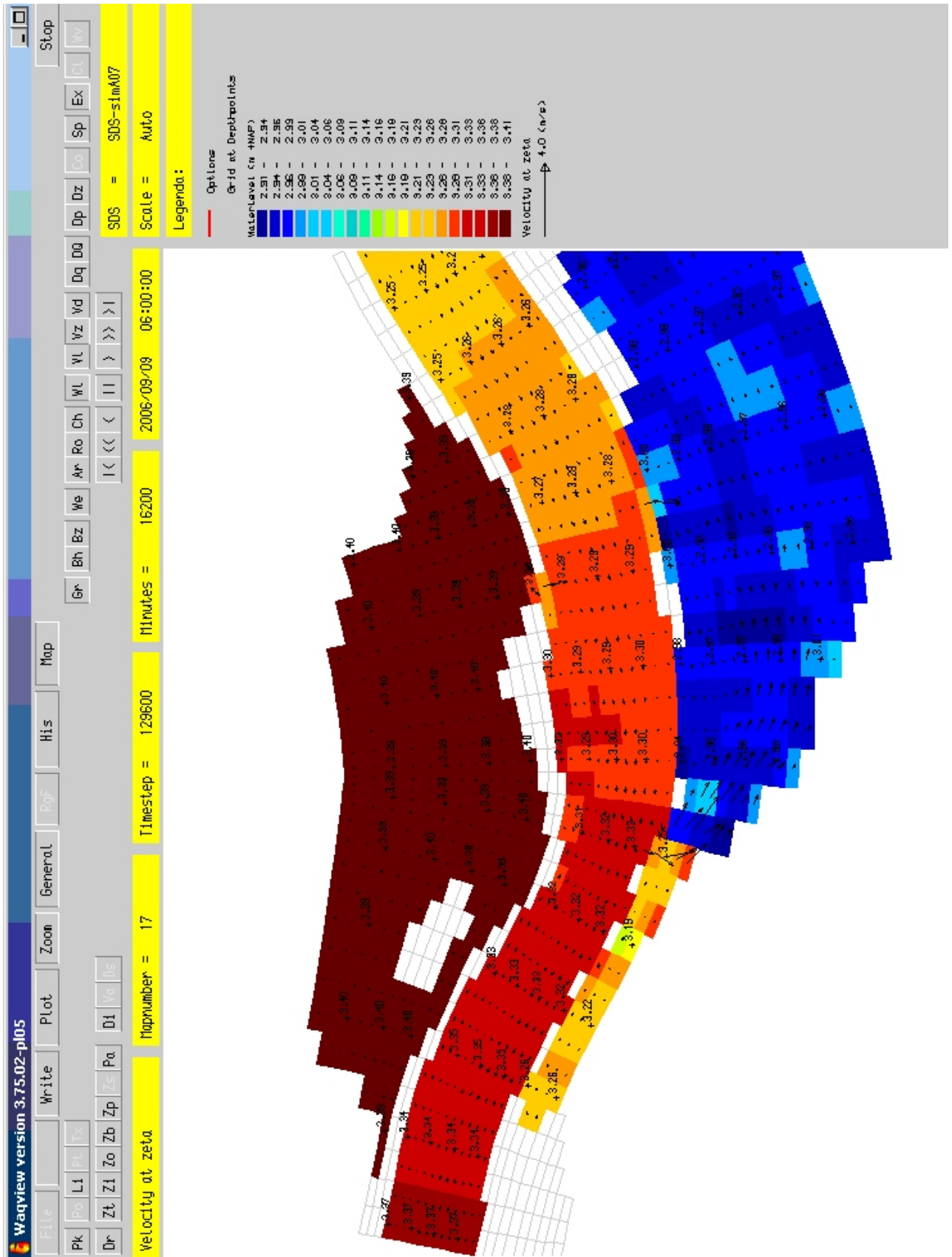
Modelbathymetrie en berekende stroomsnelheid in de omgeving van Kessel (Grote Nete)
Oorspronkelijke schematisatie (NEVLA)



Modelbathymetrie en berekende stroomsnelheid in de omgeving van Kessel (Grote Nete)
 Verbeterde schematisatie (Adema, 2006)



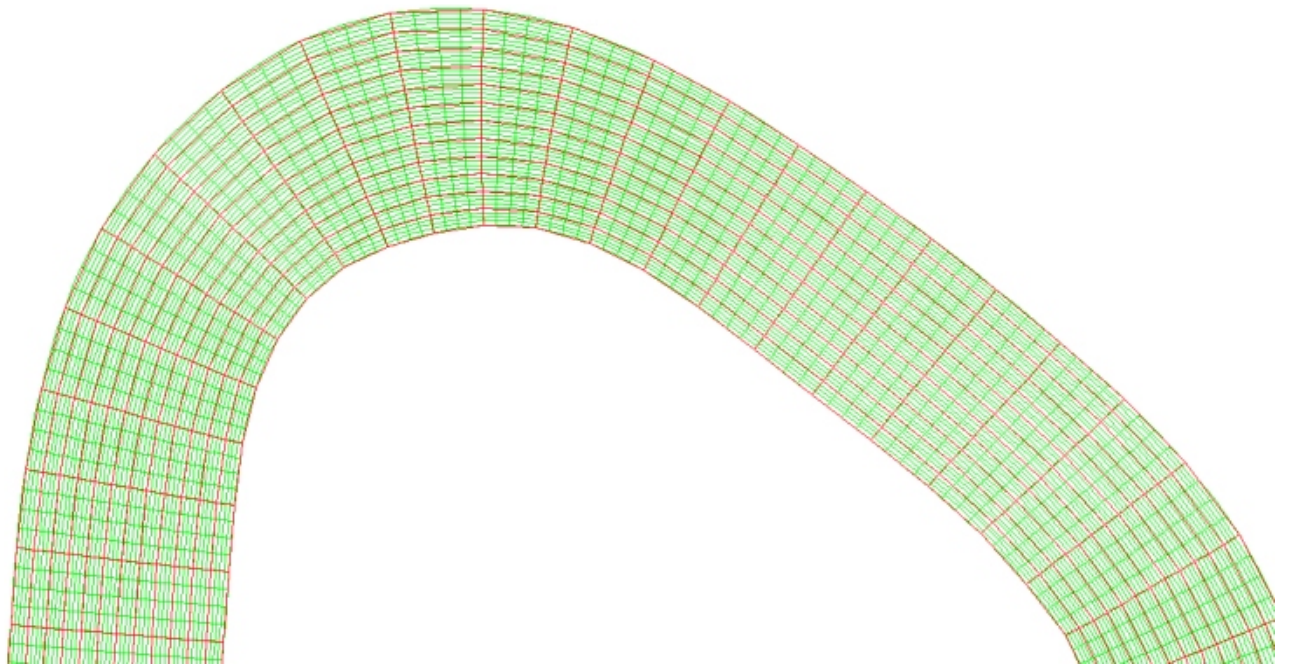
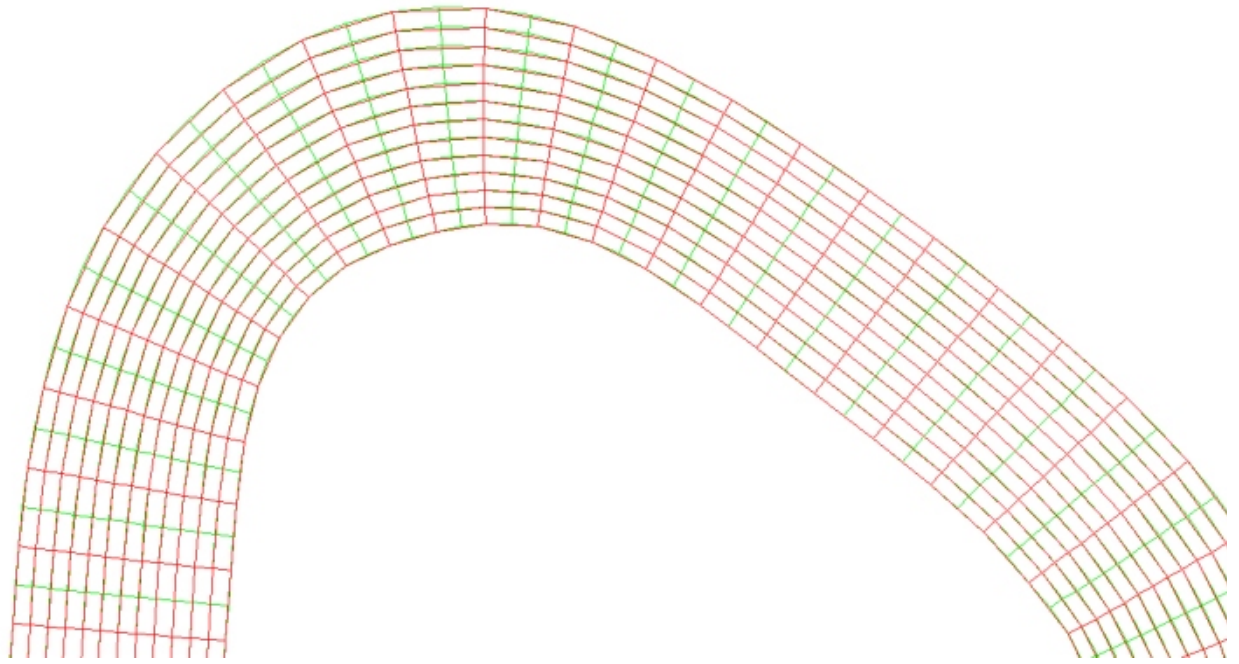
Ongewenste instroming in een potentieel overstromingsgebied tussen Walem en Boom
 Waterstand (kleur en waarden) en snelheid (pijlen), situatie rond HW



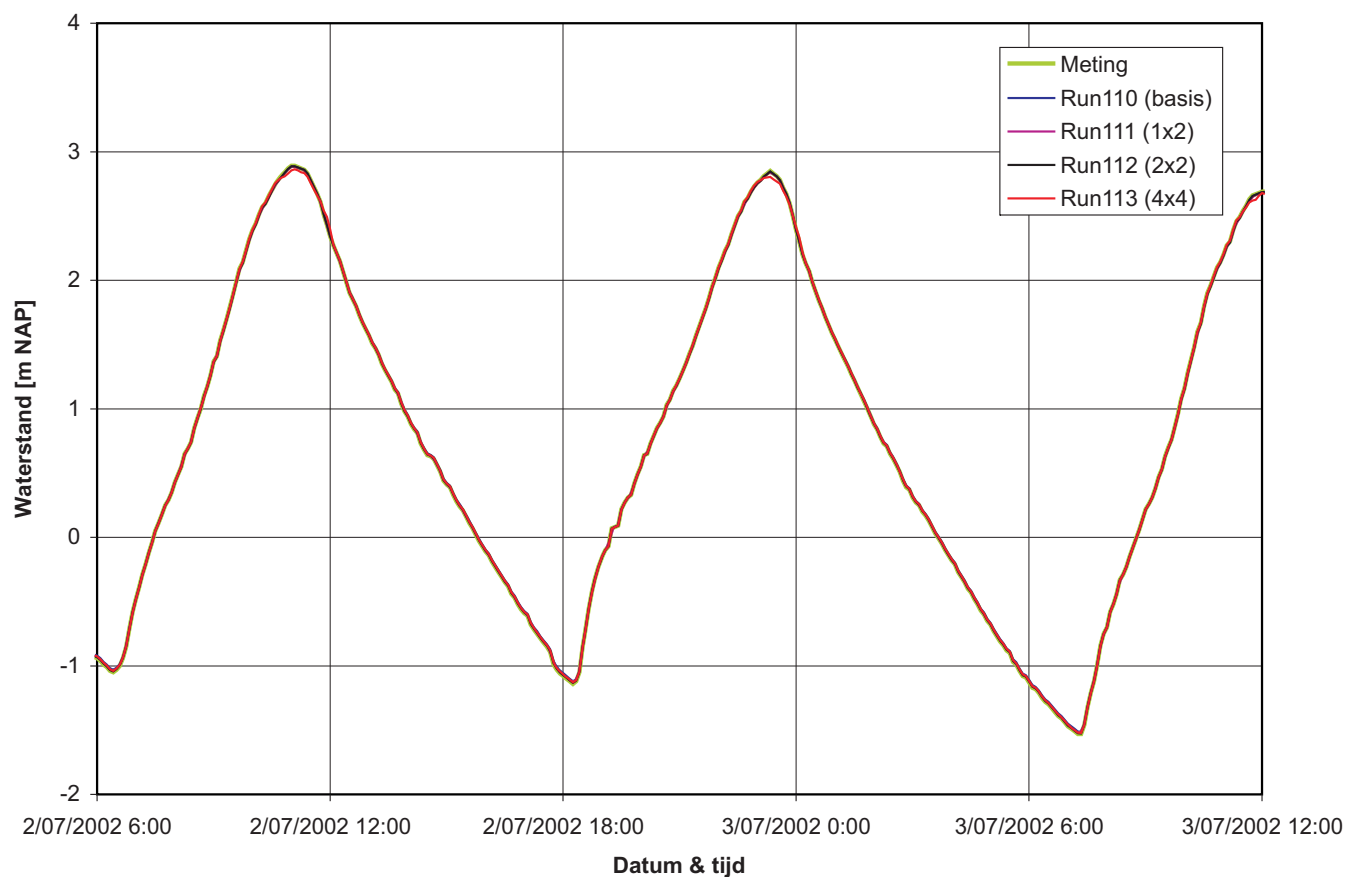
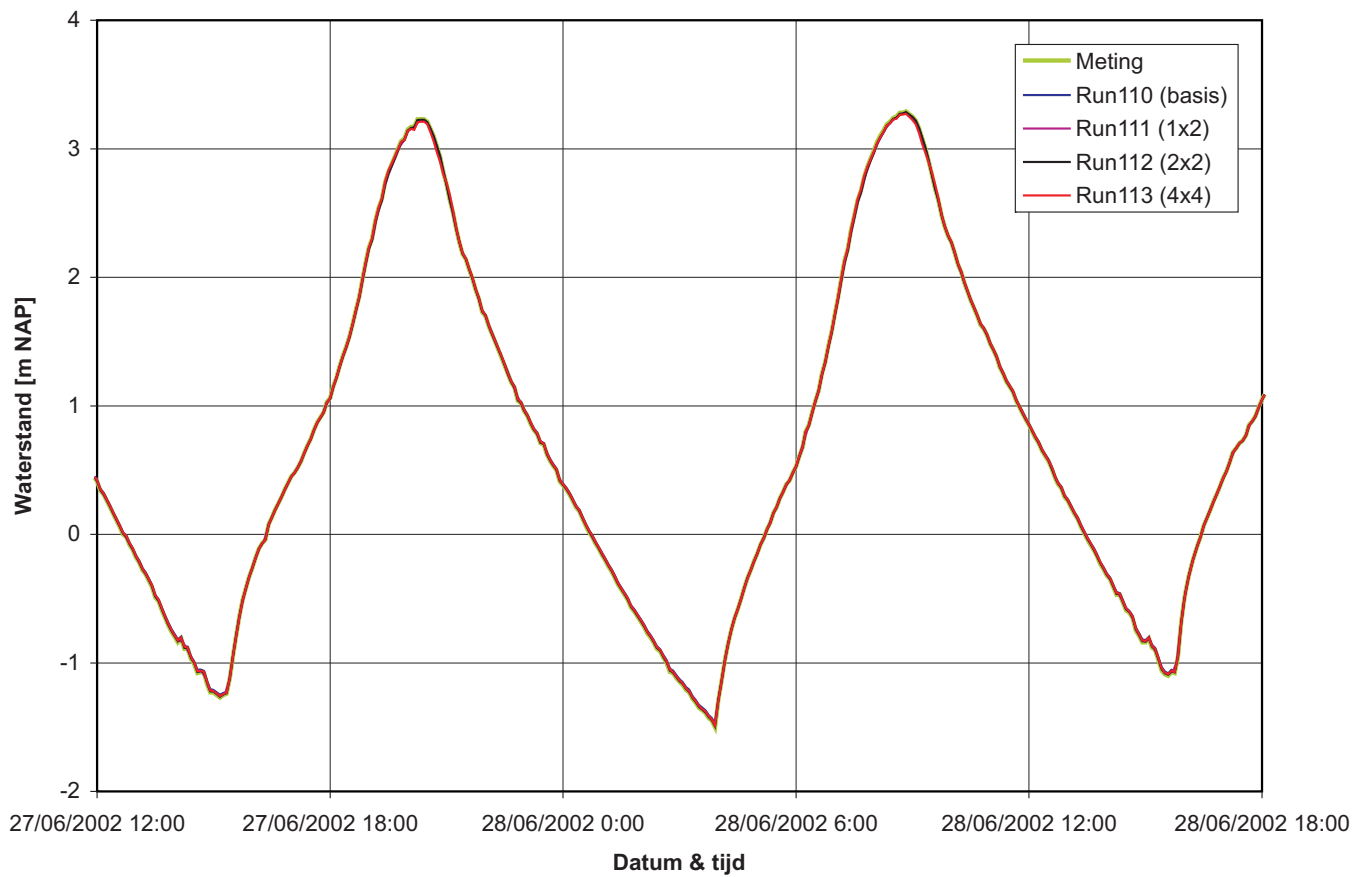
Ongewenste instroming in een potentieel overstromingsgebied tussen Temse en Schelle
 Waterstand (kleur en waarden) en snelheid (pijlen), situatie rond HW



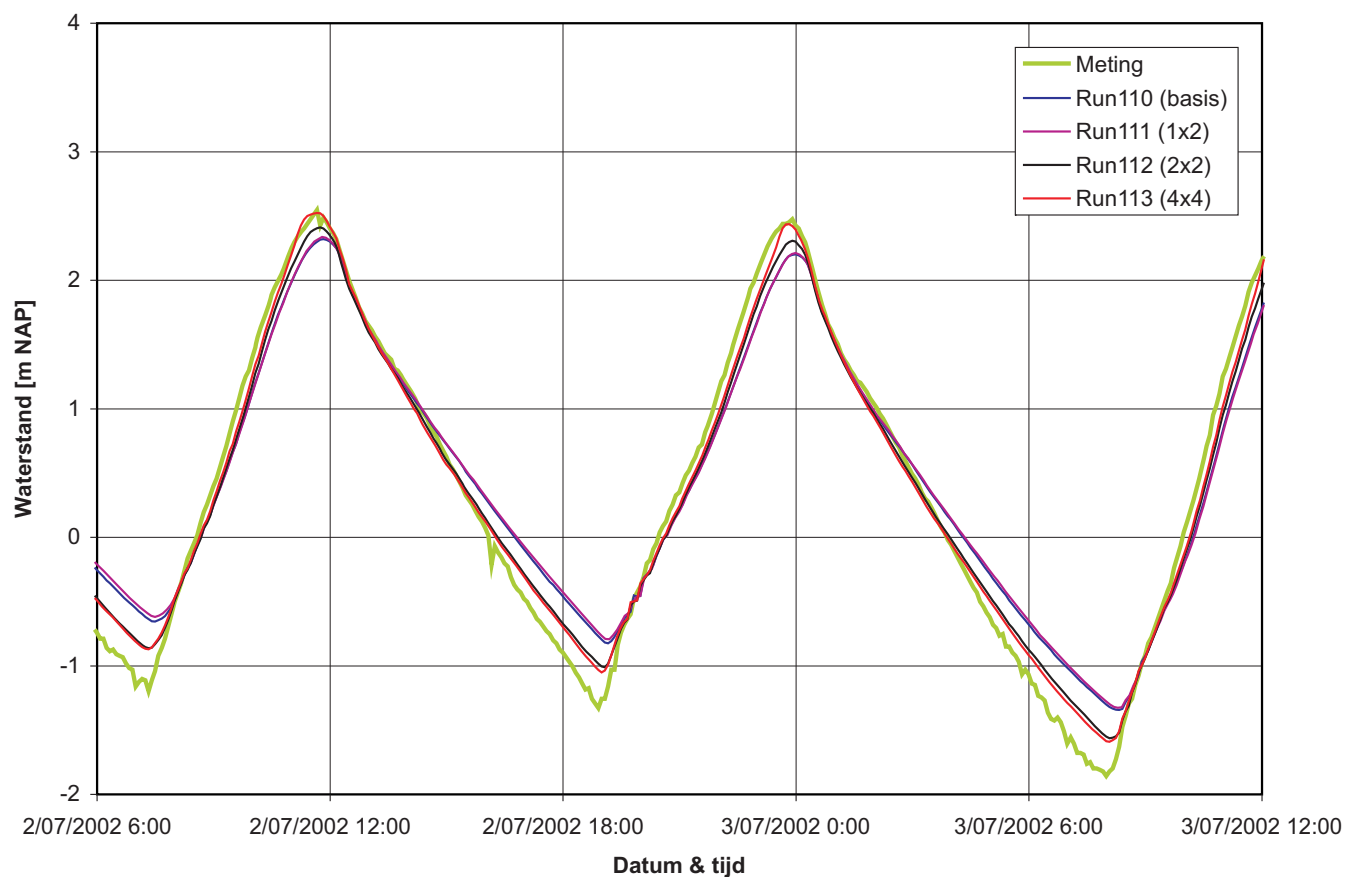
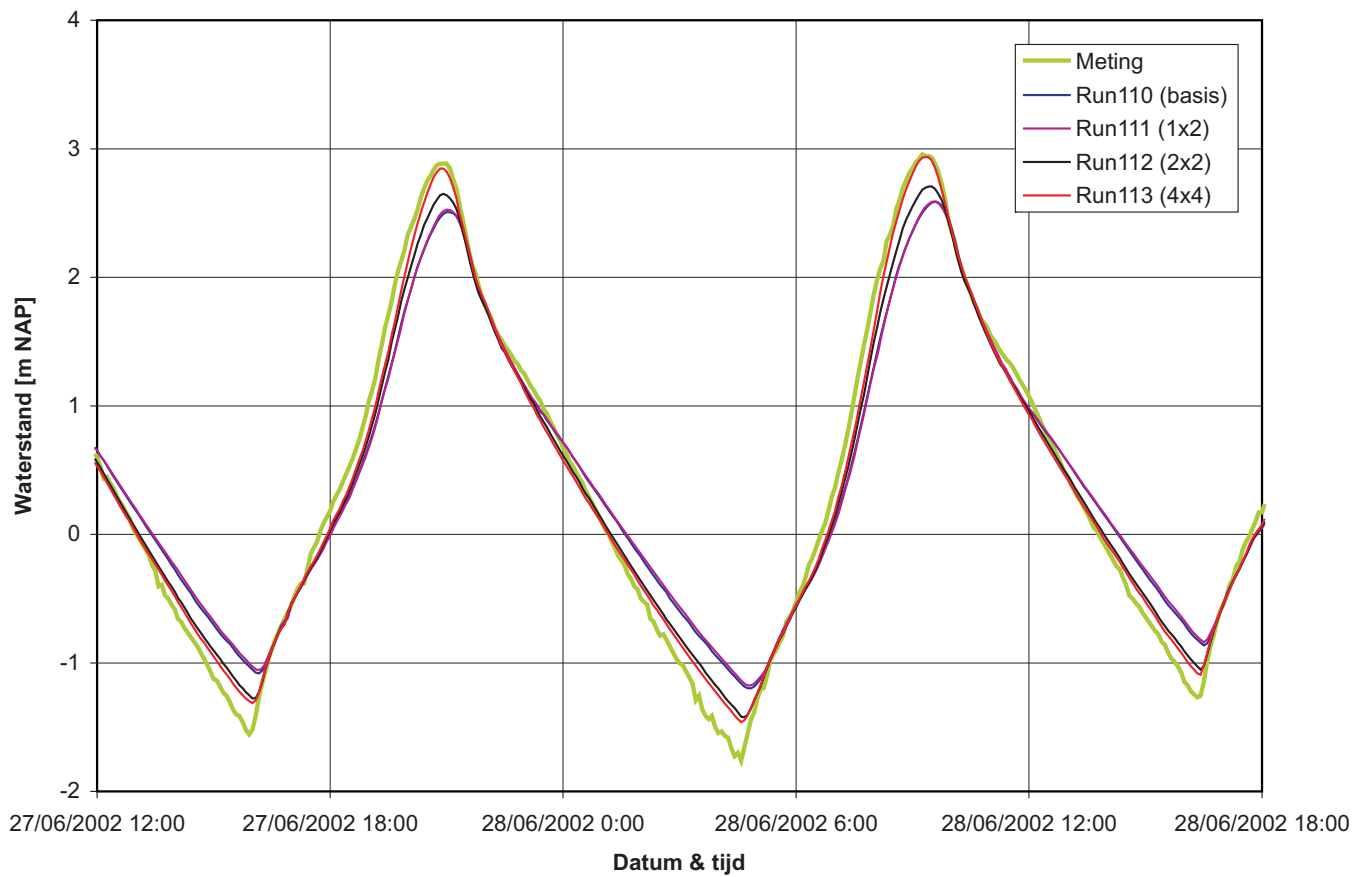
Topo-bathymetrie (m NAP) en locatie waterstandsstations detailmodel roosterverfijning



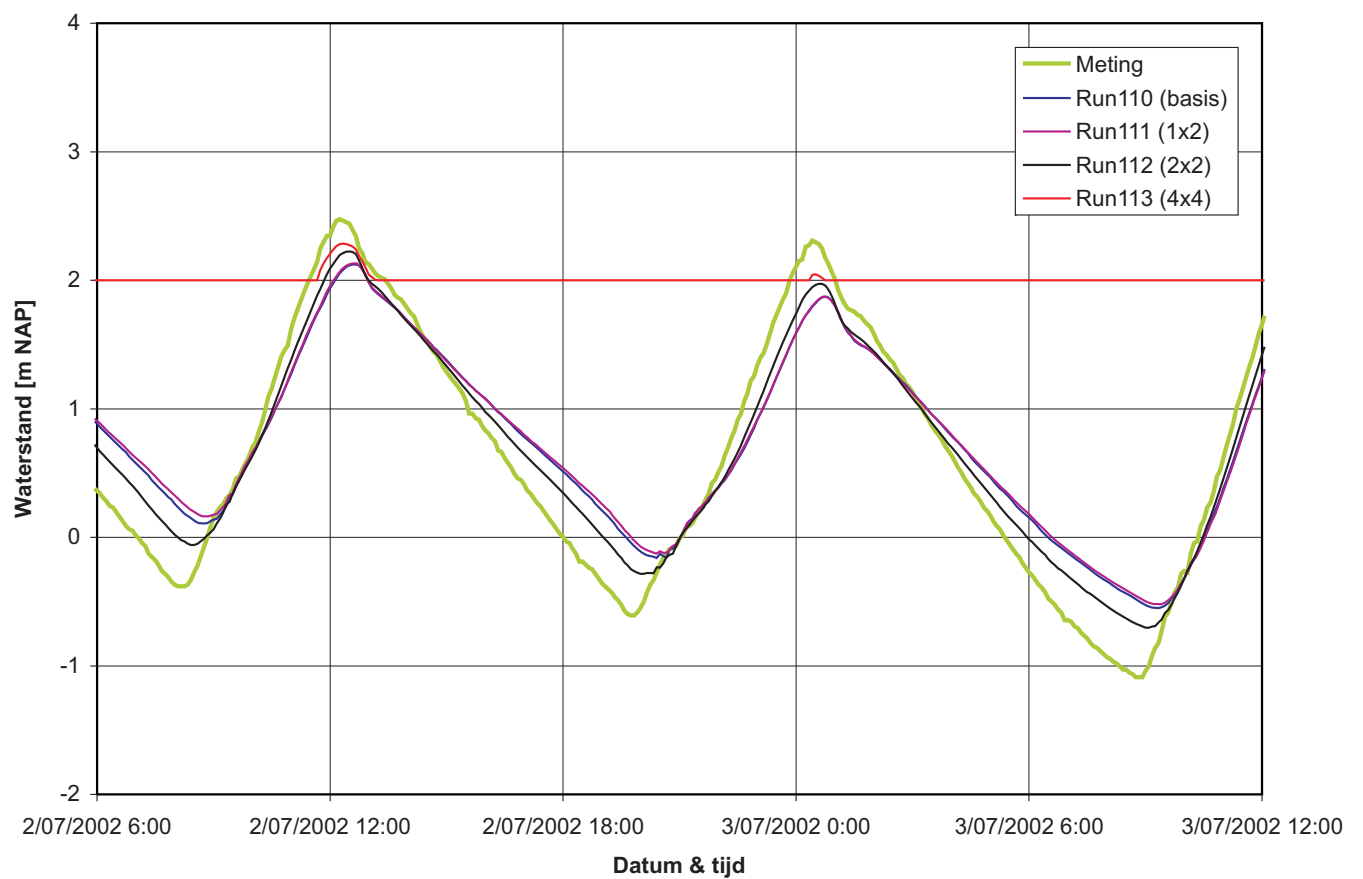
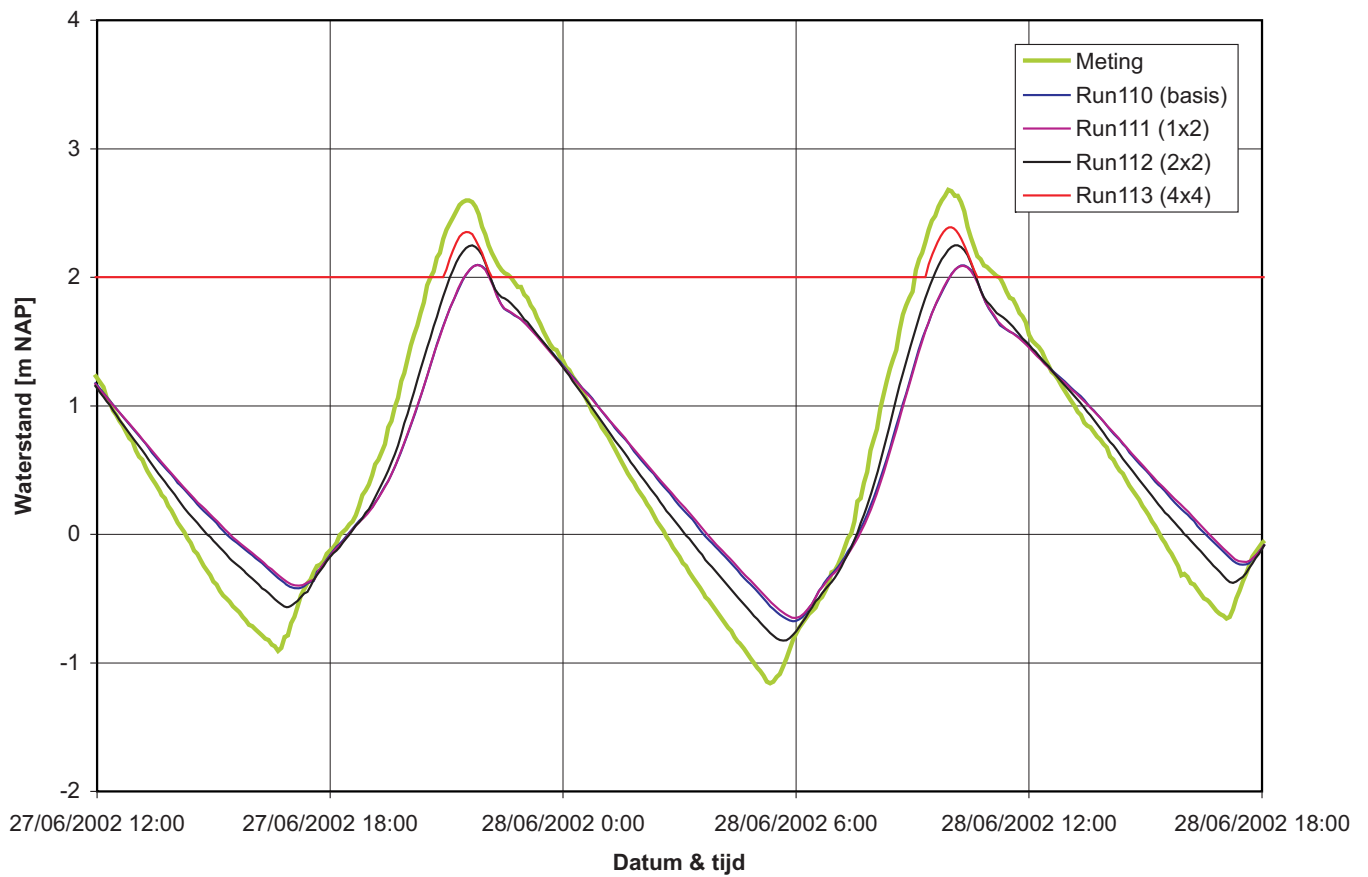
Detail roosterverfijning omgeving van Uitbergen
Rood oorspronkelijk rooster
groen boven 1x2 verfijnd rooster - groen onder 4x4 verfijnd rooster



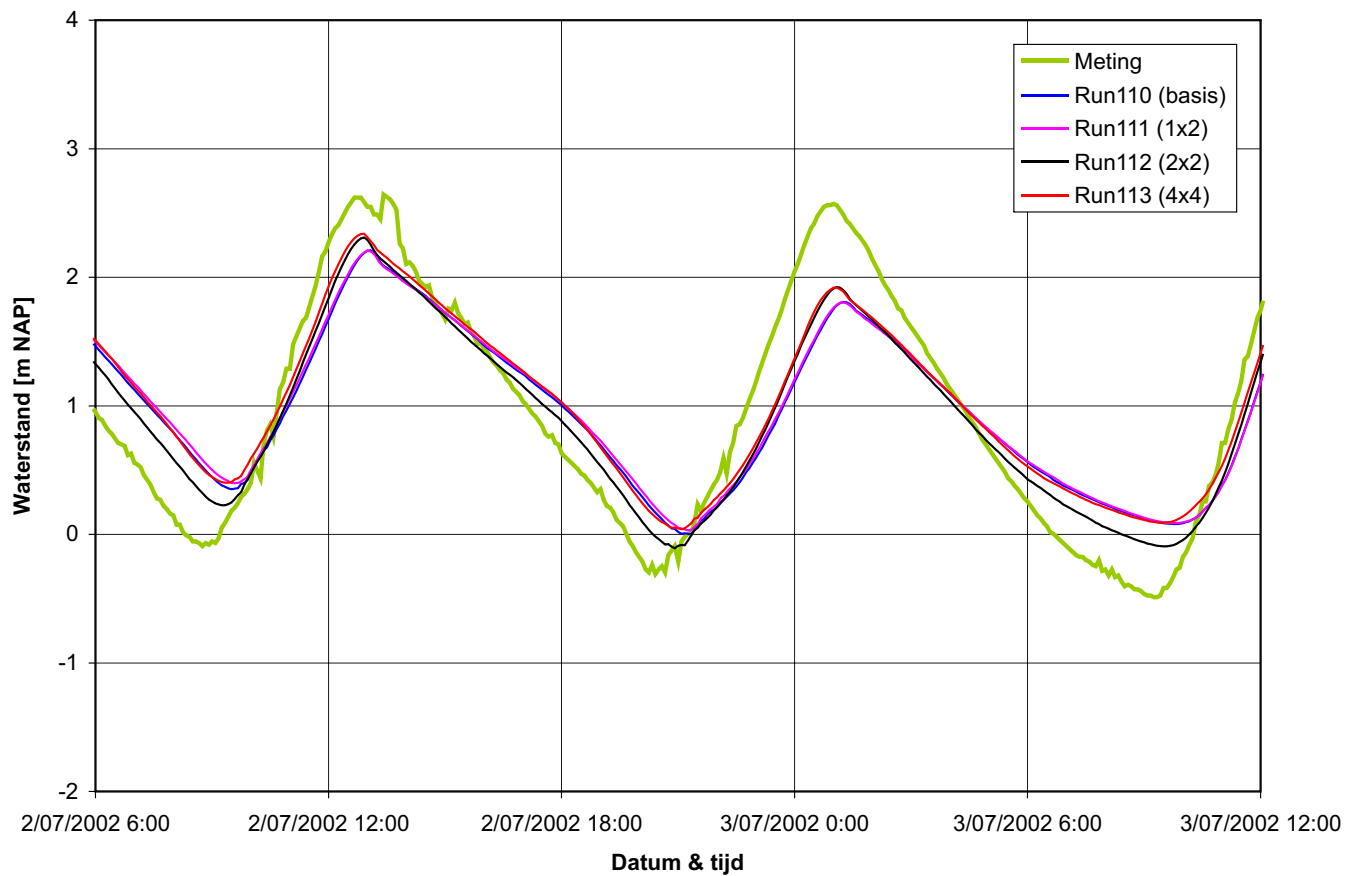
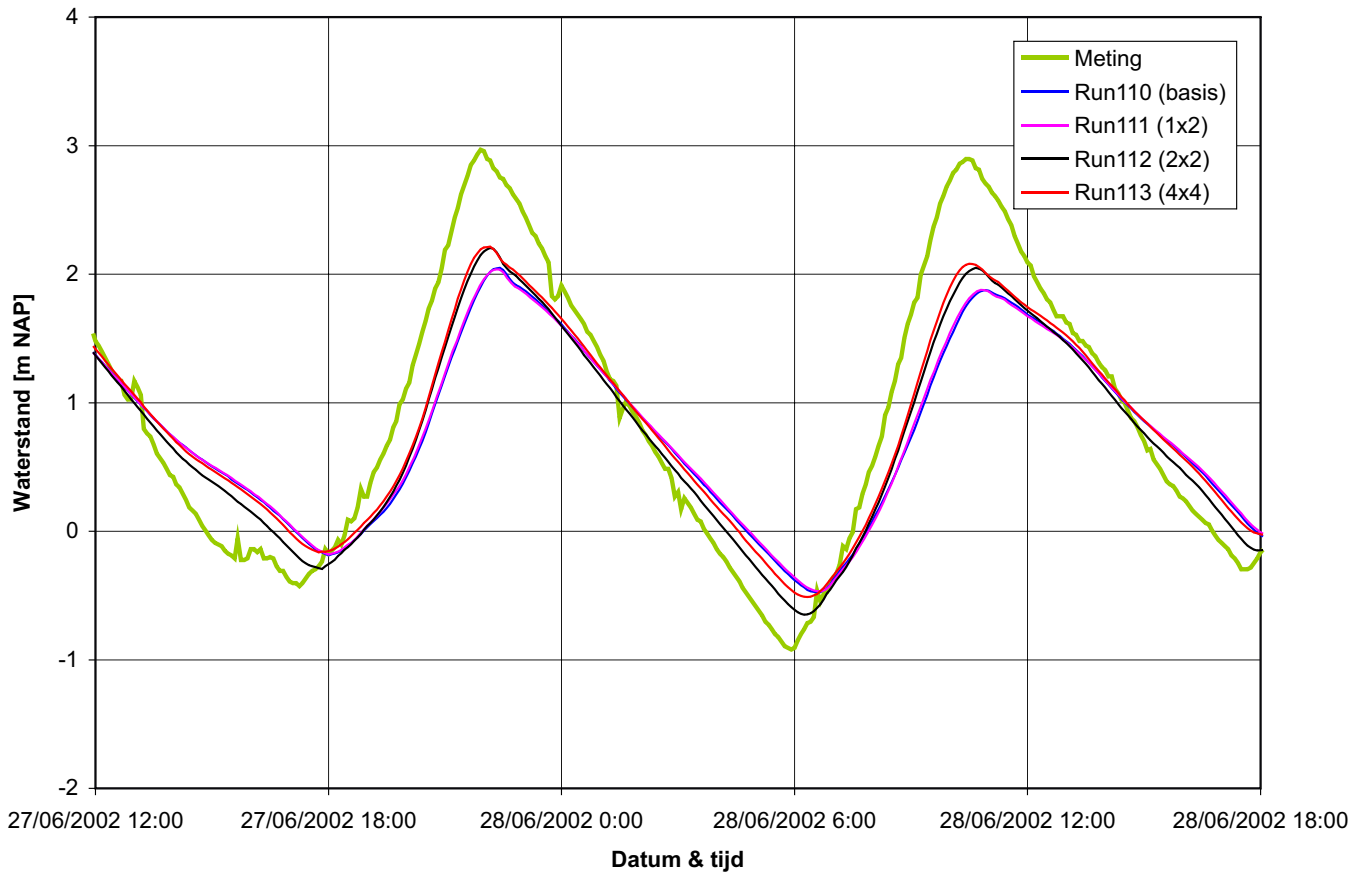
Invloed roosterresolutie op waterstand
Gemeten en berekende waterstand te Dendermonde



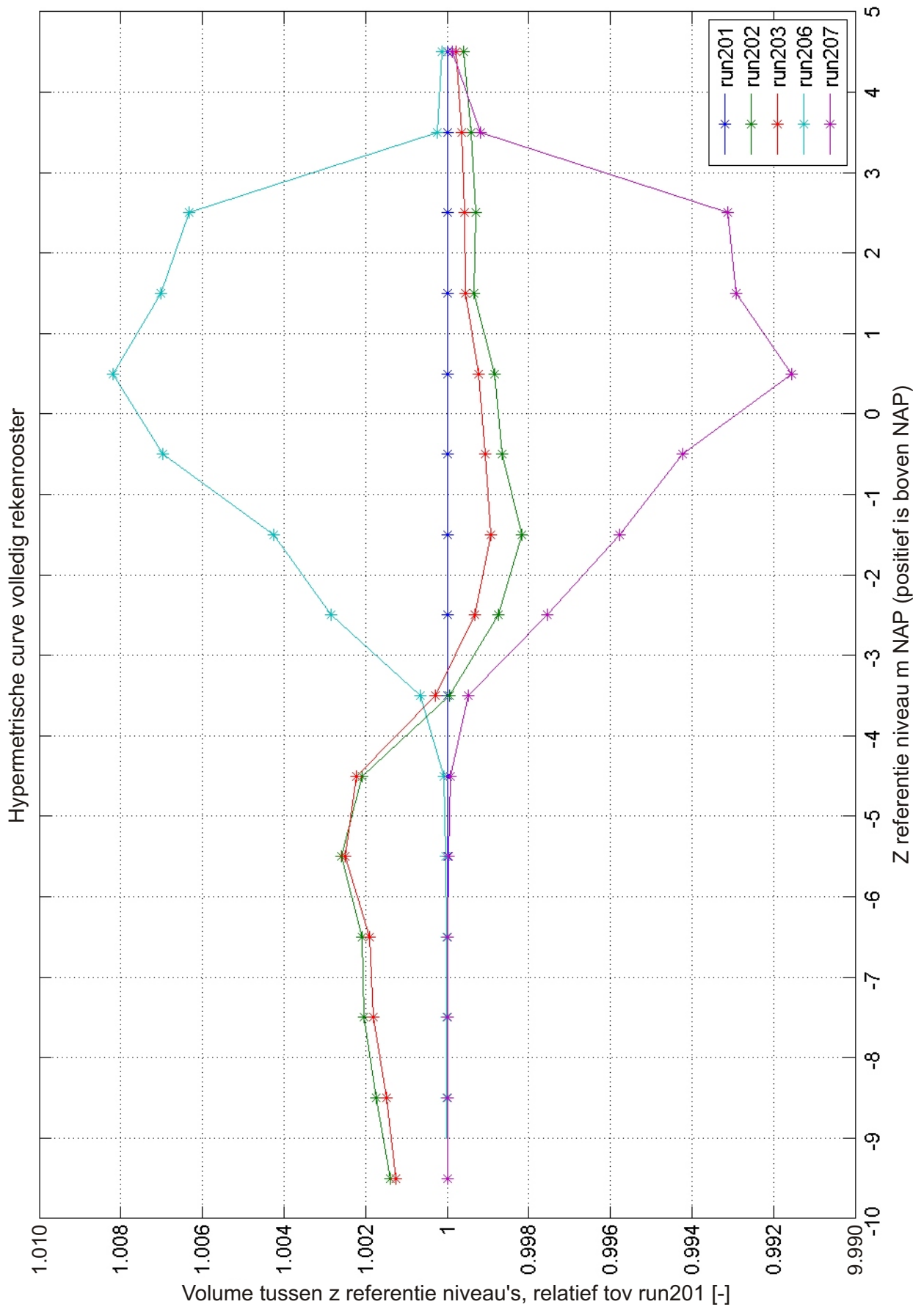
Invloed roosterresolutie op waterstand
Gemeten en berekende waterstand te Schoonaarde



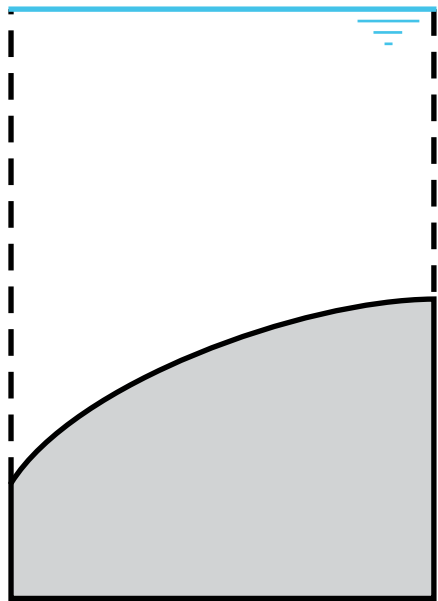
Invloed roosterresolutie op waterstand
Gemeten en berekende waterstand te Wetteren



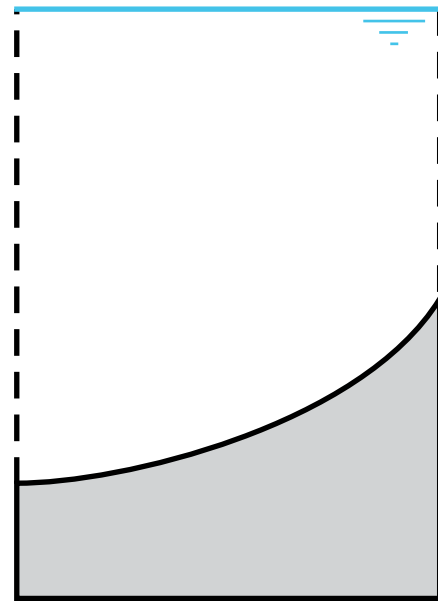
Invloed roosterresolutie op waterstand
Gemeten en berekende waterstand te Melle



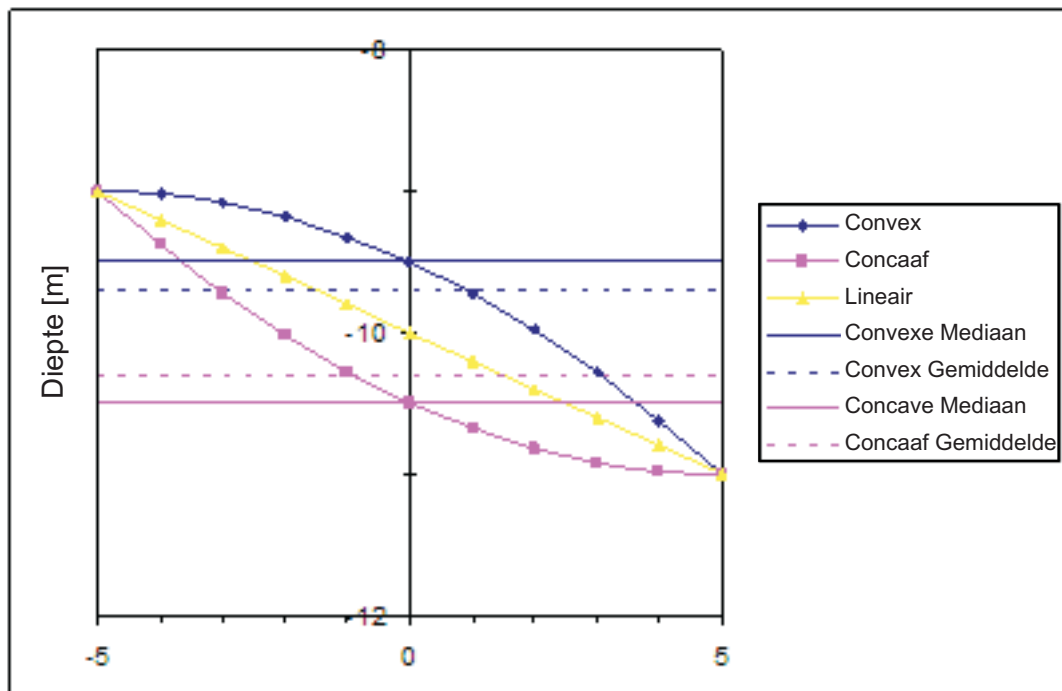
Stapsgewijze hypsometrische curve voor het hele estuarium relatief ten opzichte van de bodem van run201
 Groter dan 1 is dieper dan run201



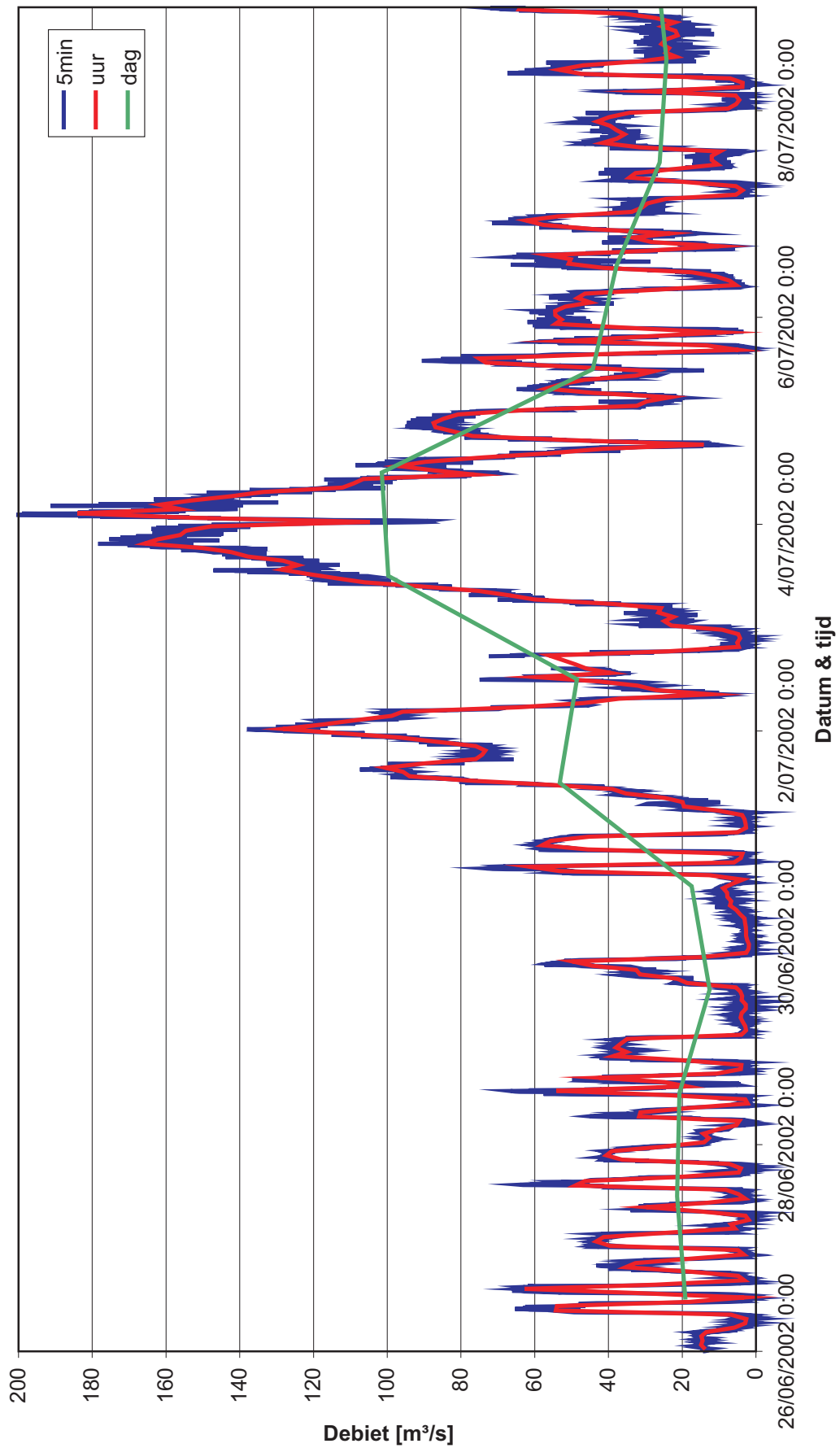
Convex bottomshape



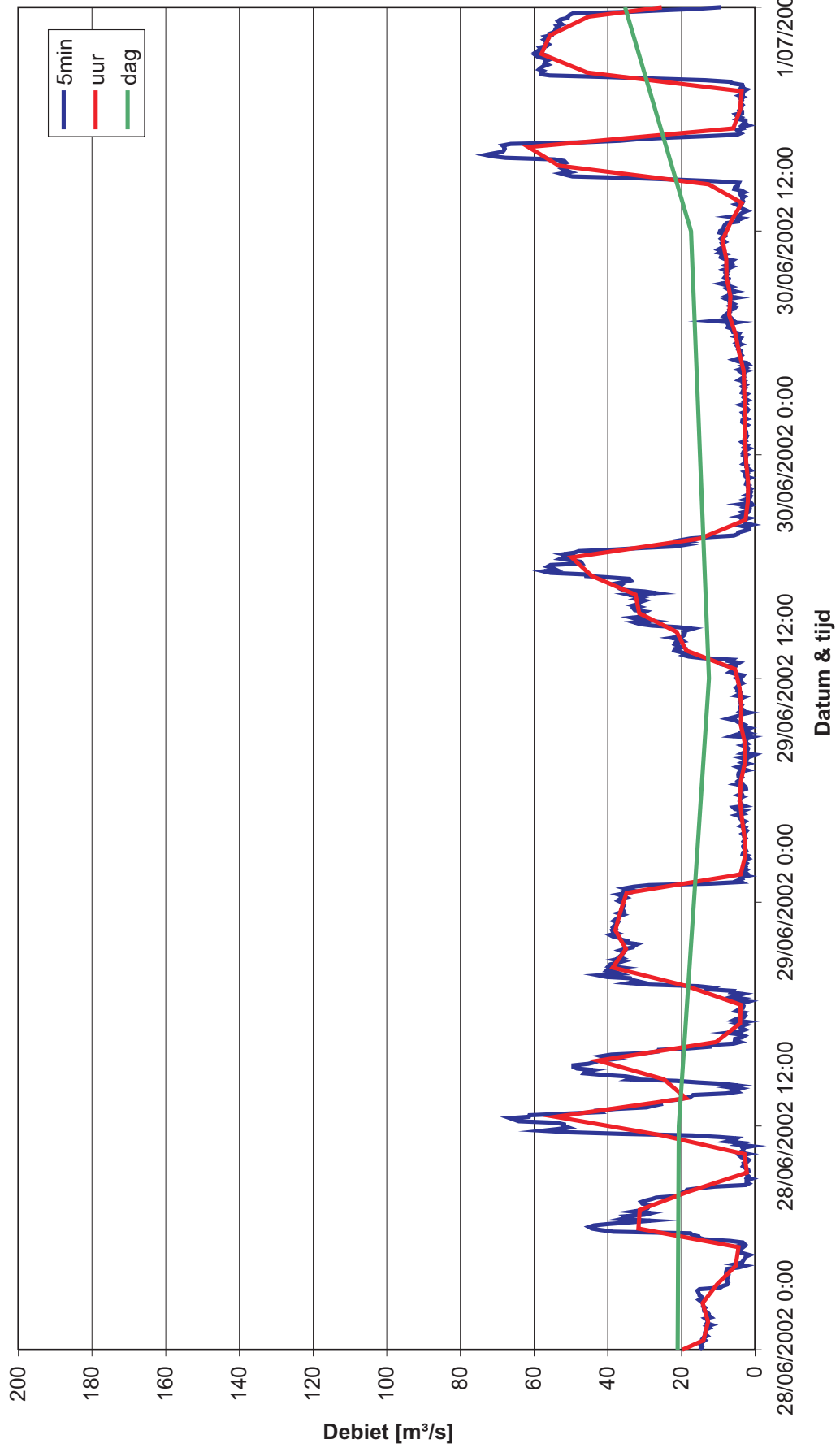
Concave bottomshape



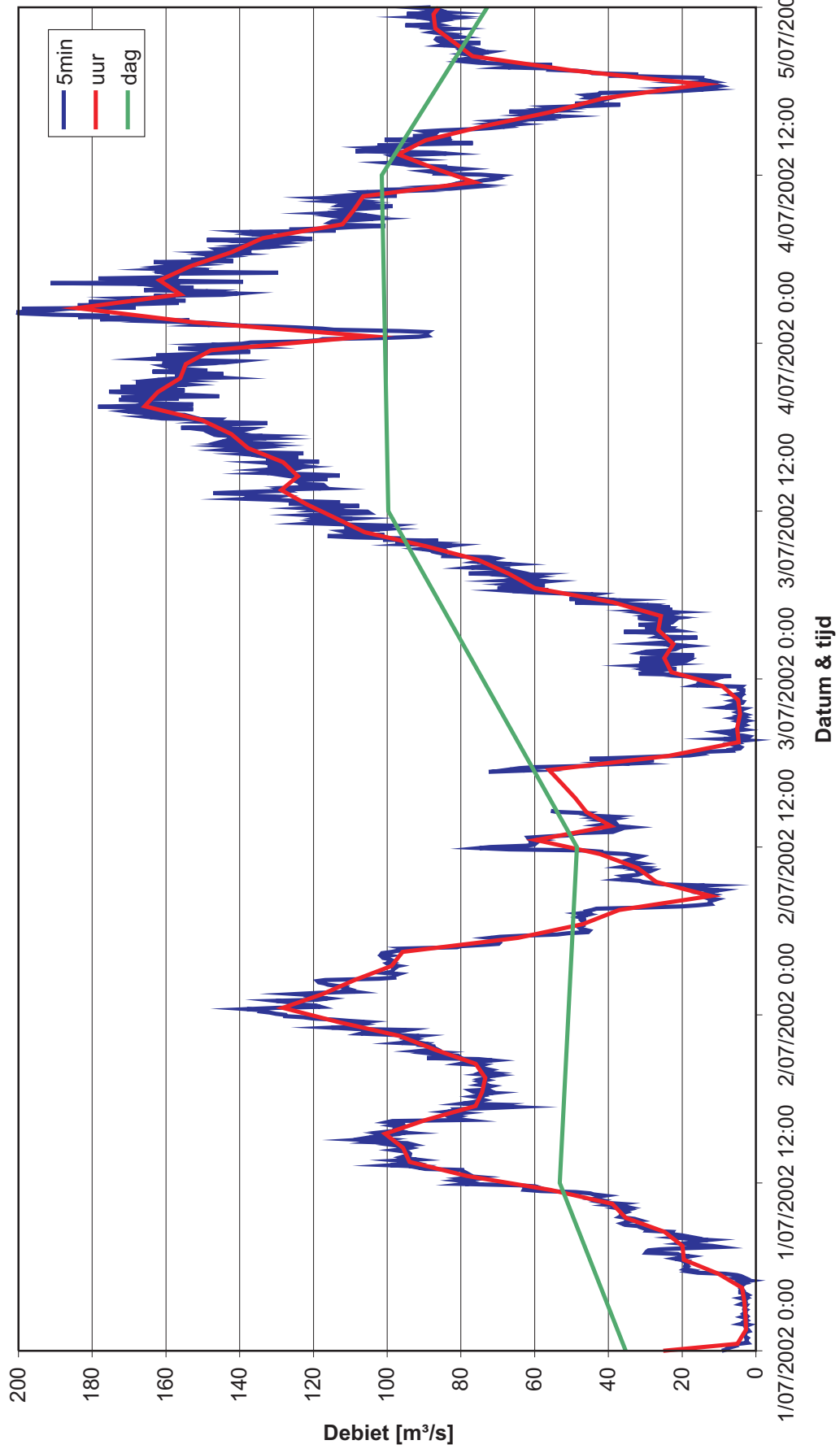
Convexe en concave bodenvormen - Schematisch voorbeeld ter illustratie



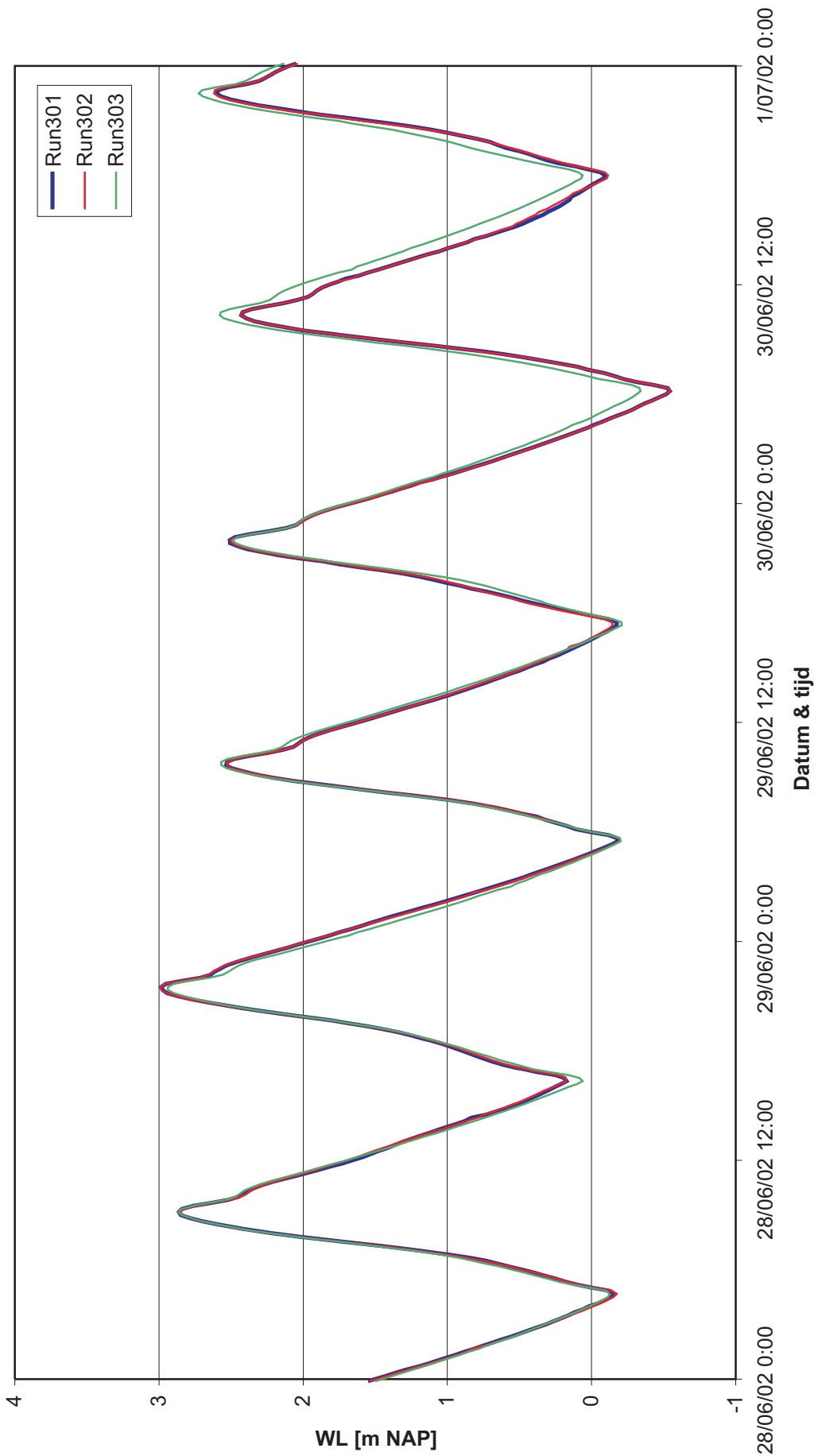
Gemeten debieten te Merelbeke van 26 juni tot 9 juli 2002
 Vergelijking van 5minuut, uur en dag gemiddelde debieten



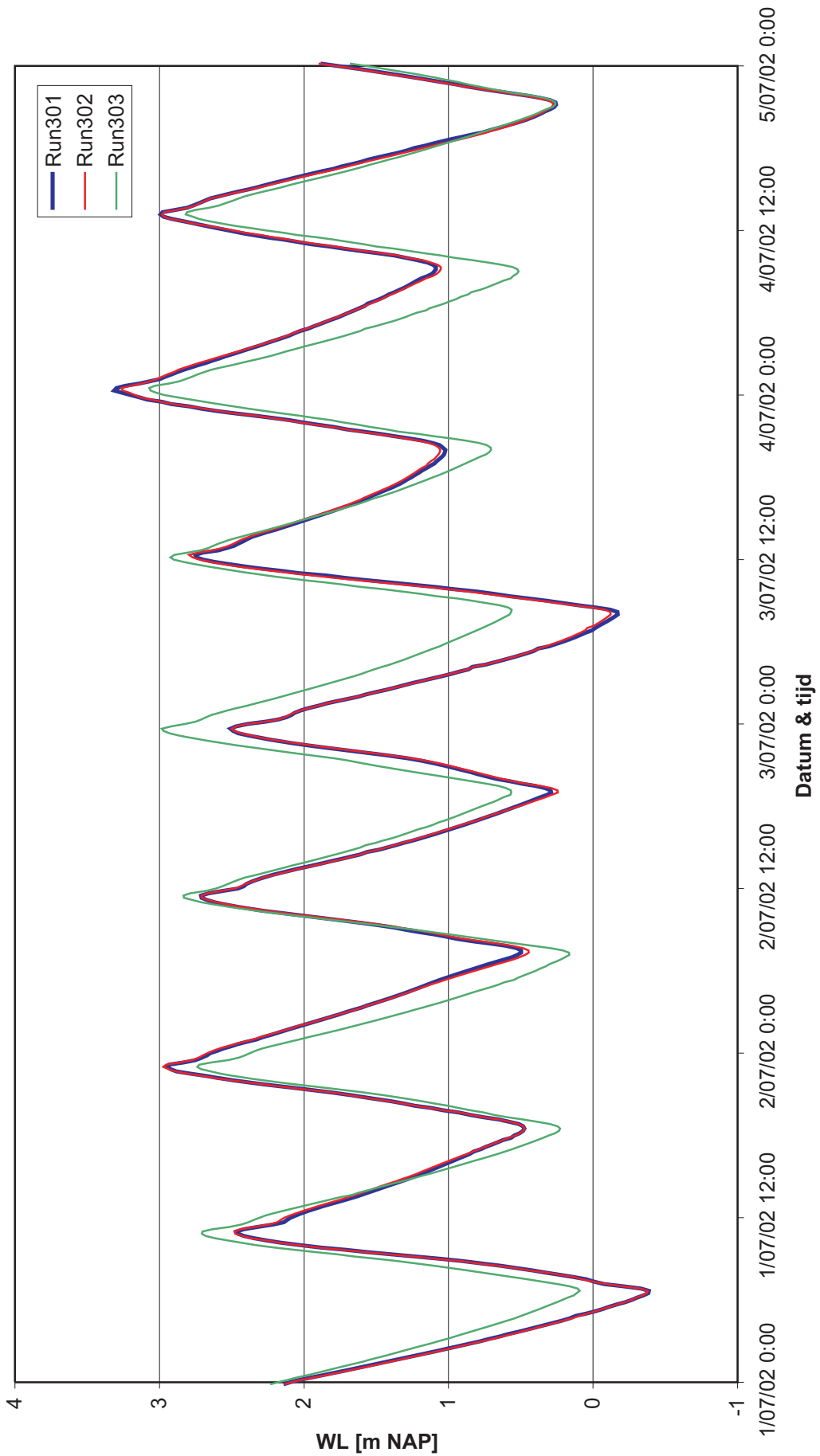
Gemeten debieten te Merelbeke detail
 Periode met lage afvoer (28-30 juni 2002)



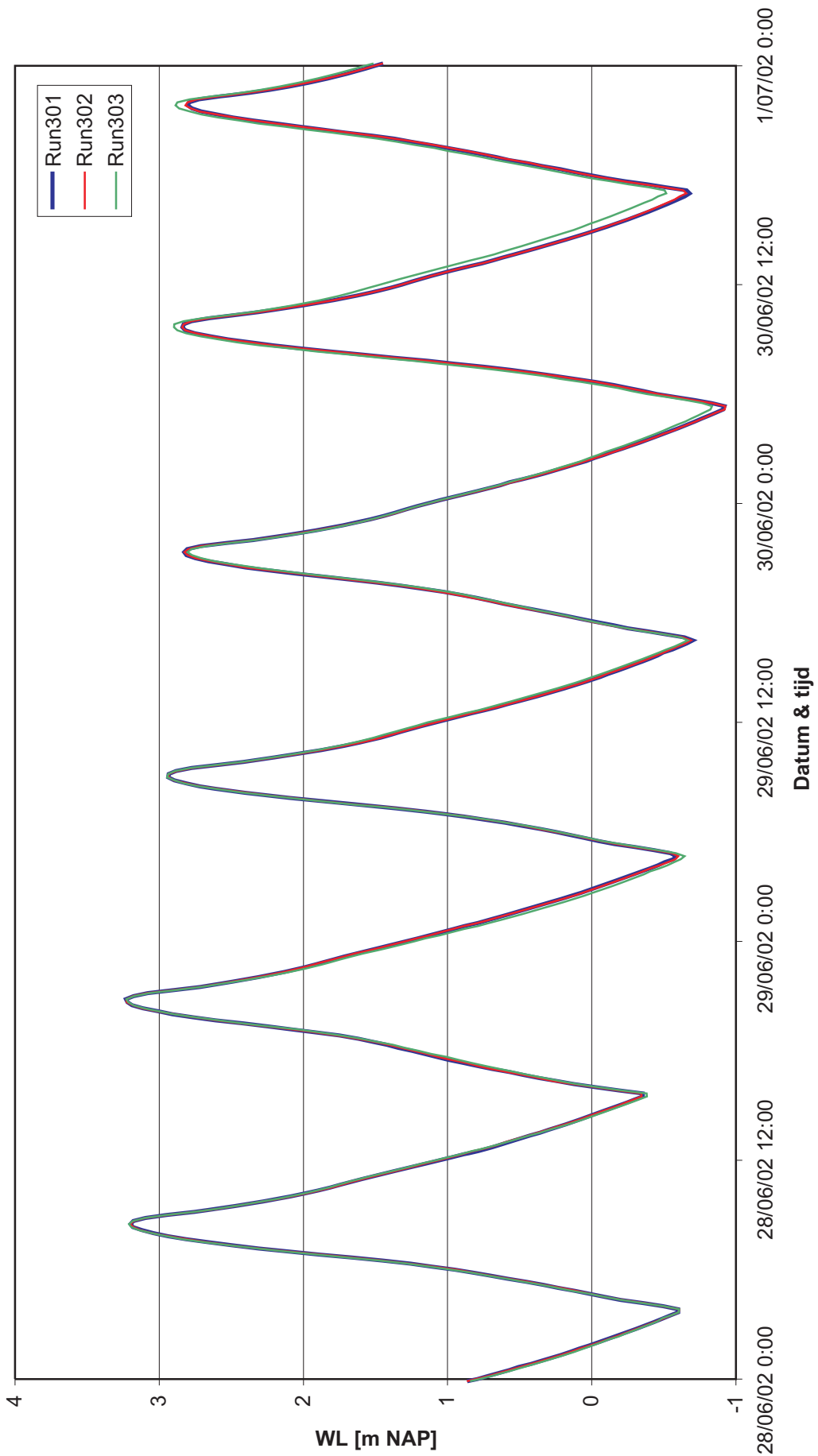
Gemeten debieten te Merelbeke detail
 Periode met hoge afvoer (1-5 juli 2002)



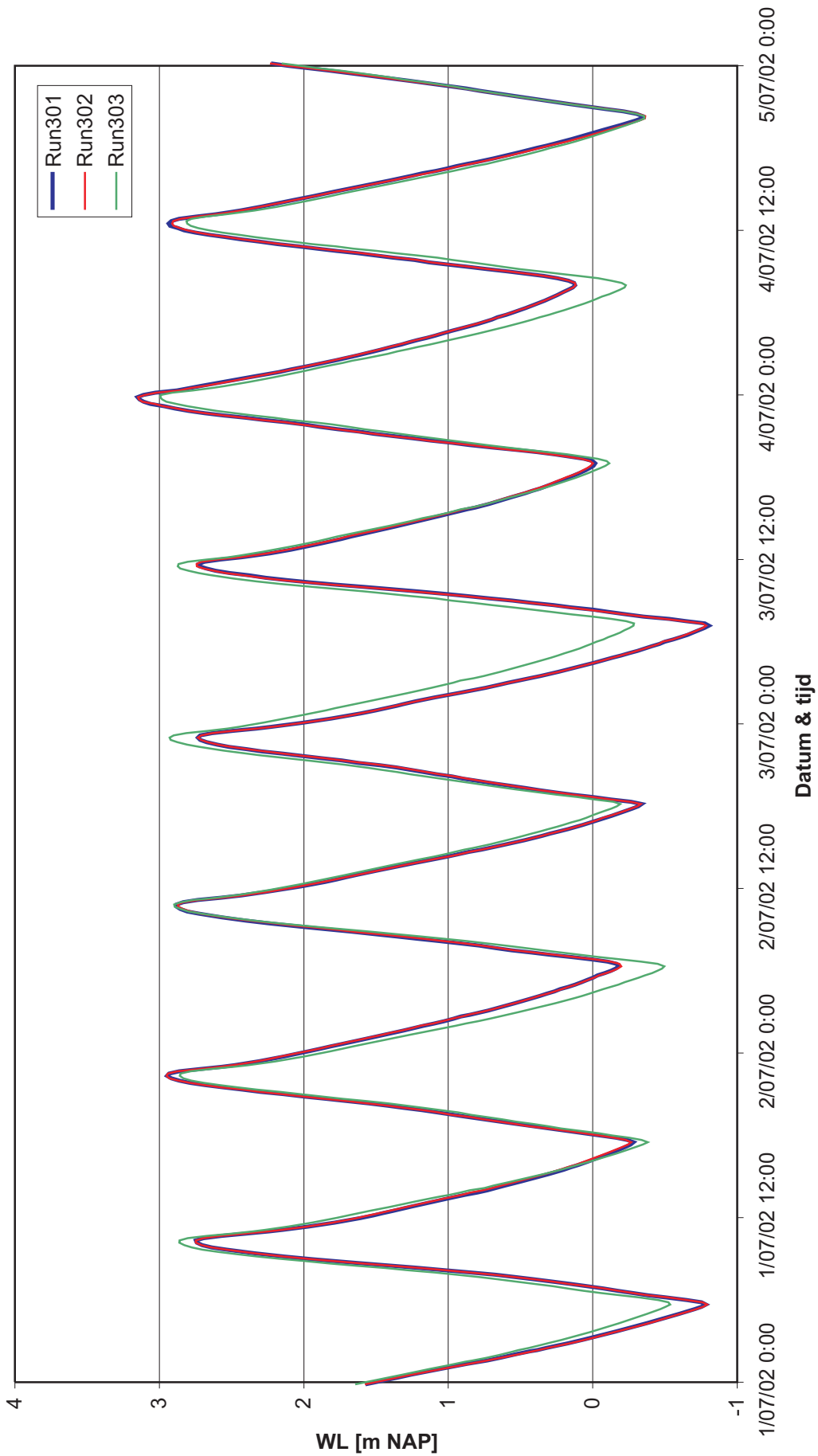
Berekende waterstand te Wetteren
 Periode met lage afvoer (28-30 juni 2002)



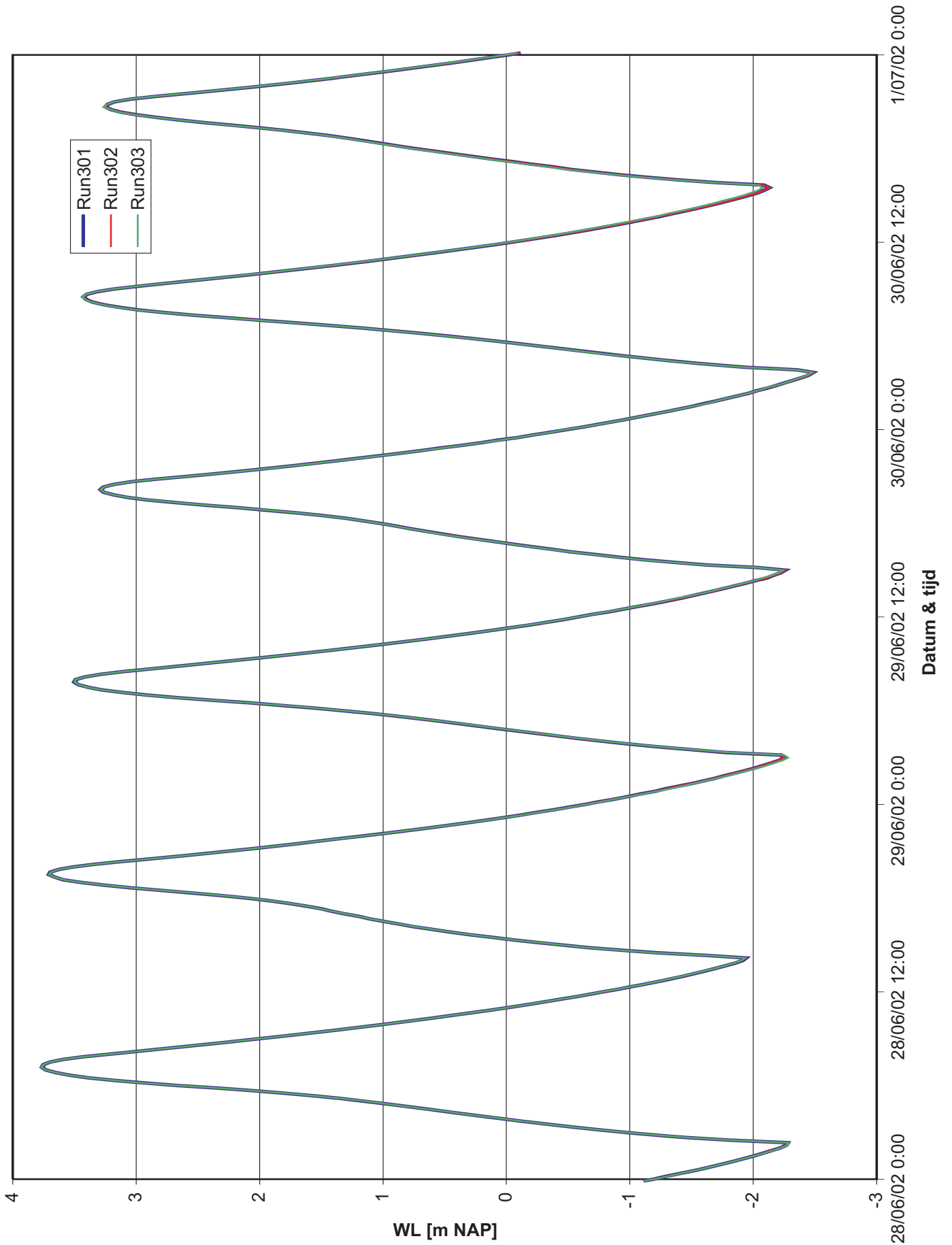
Berekende waterstand te Wetteren
 Periode met hoge afvoer (1-5 juli 2002)



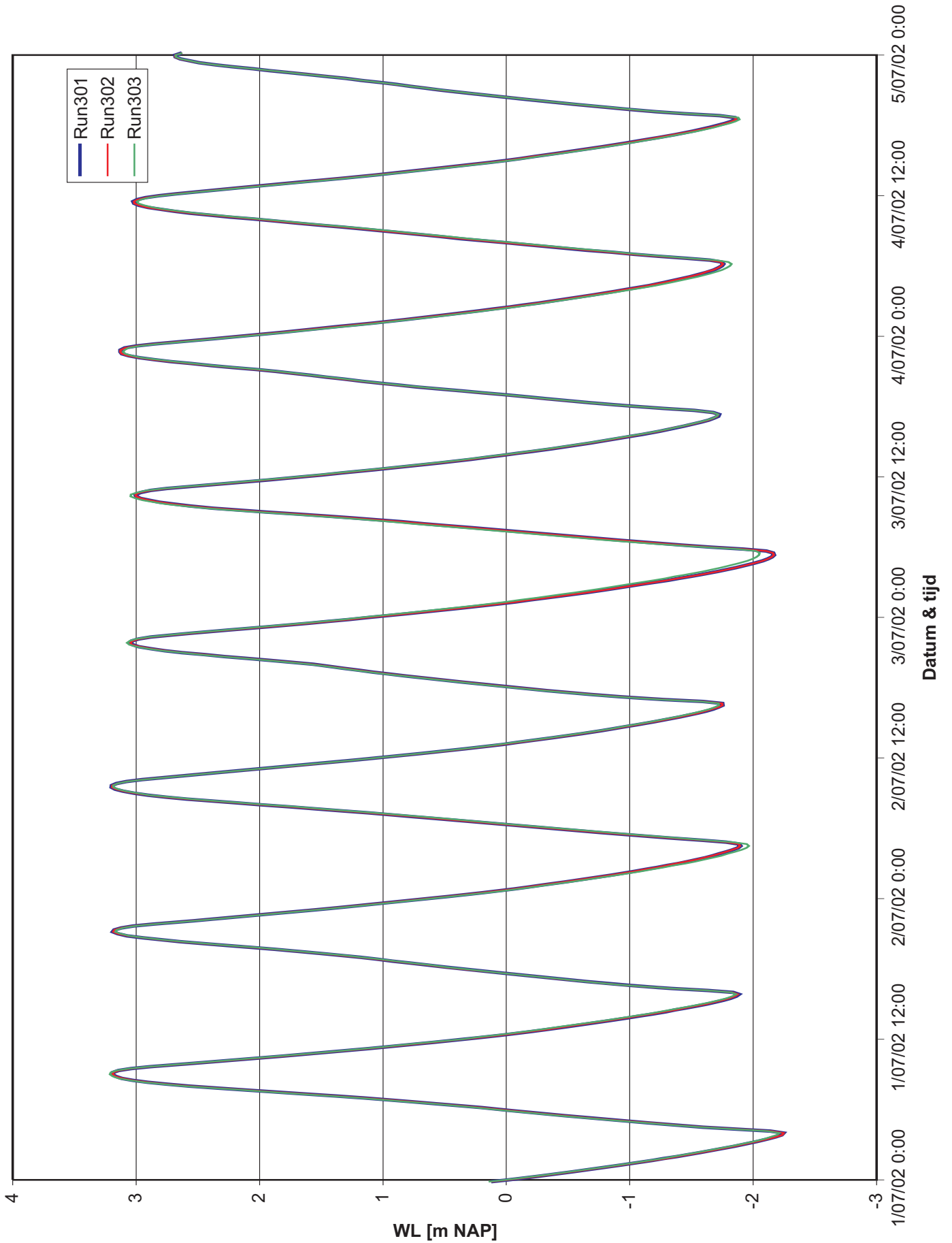
Berekende waterstand te Schoonaarde
 Periode met lage afvoer (28-30 juni 2002)



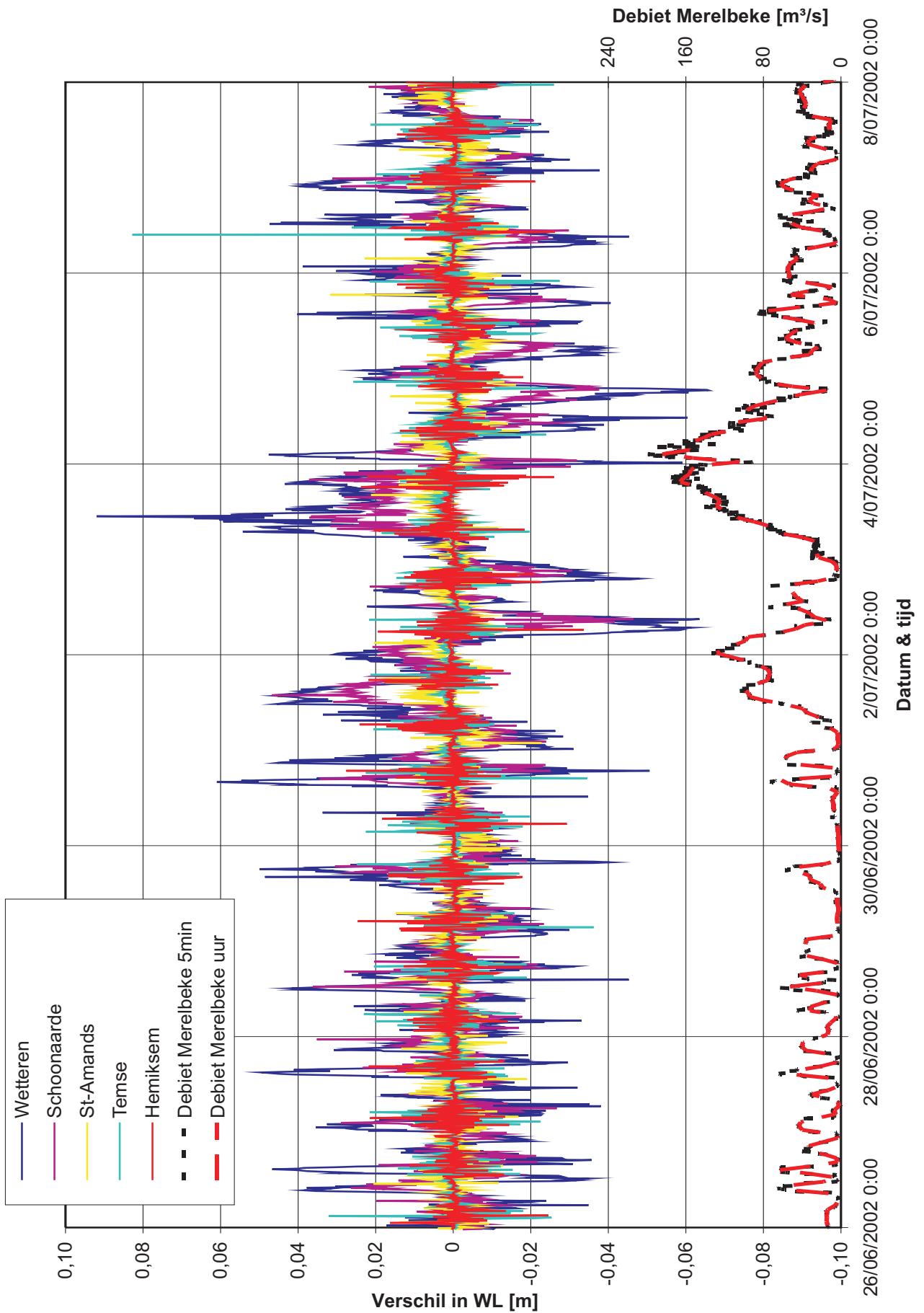
Berekende waterstand te Schoonaarde
 Periode met hoge afvoer (1-5 juli 2002)



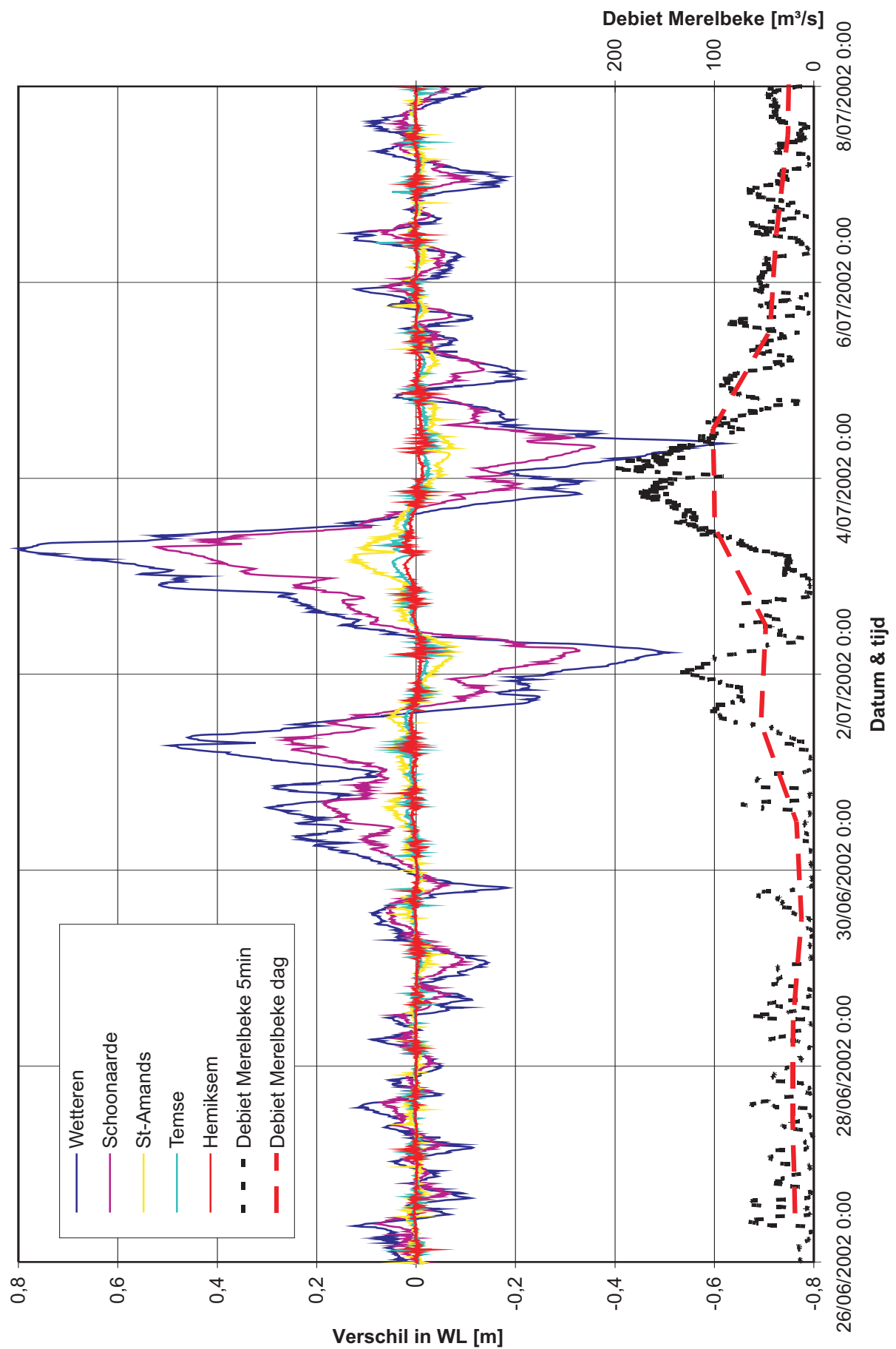
Berekende waterstand te Sint-Amands
 Periode met lage afvoer (28-30 juni 2002)



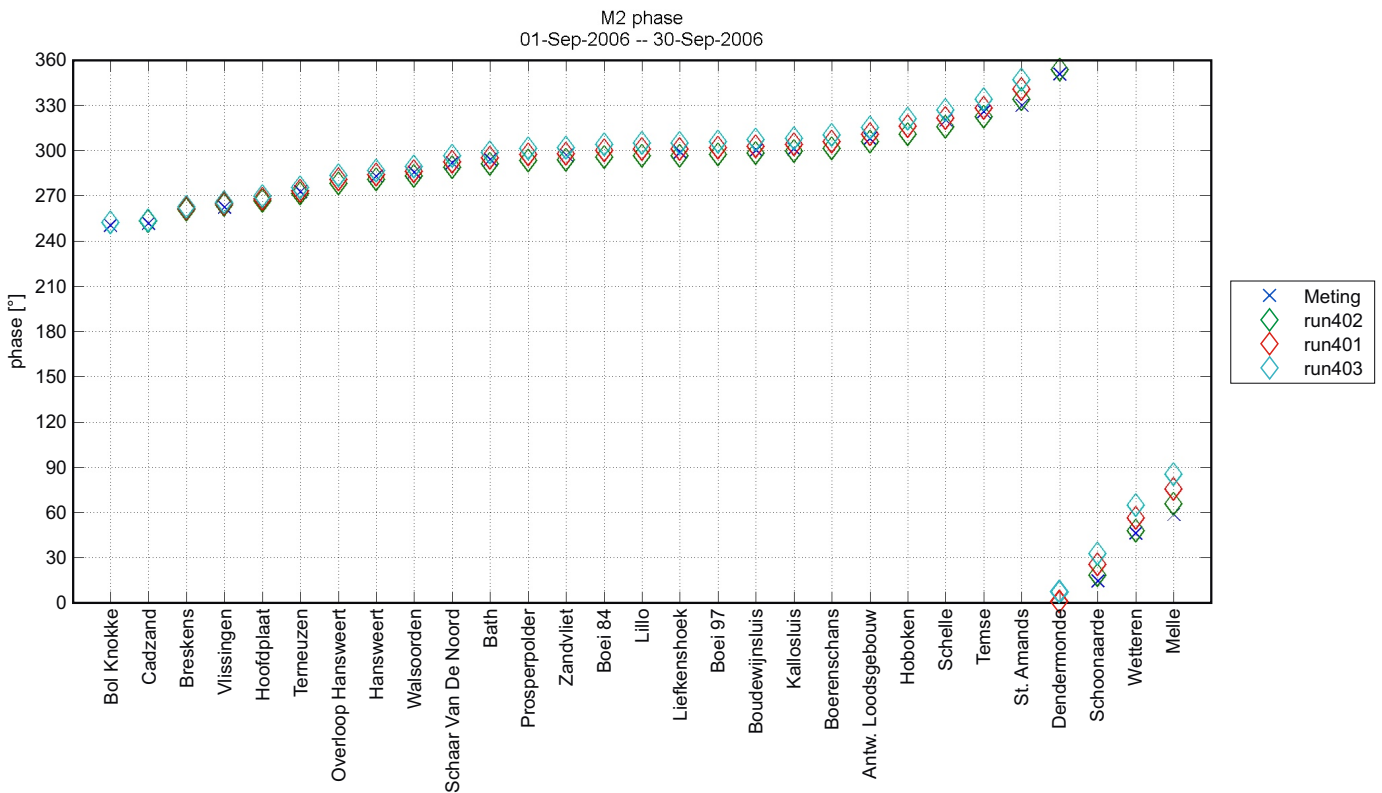
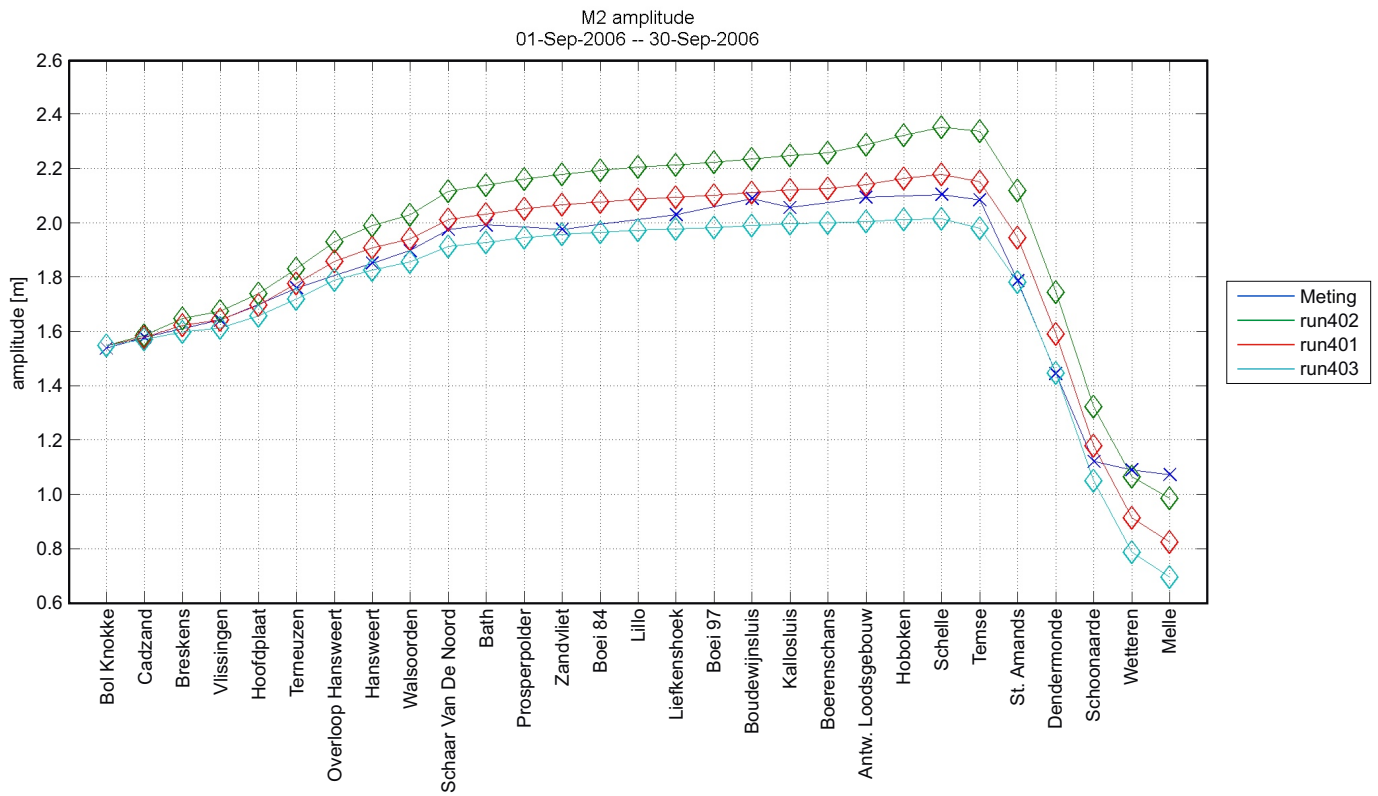
Berekende waterstand te Sint-Amands
 Periode met hoge afvoer (1-5 juli 2002)



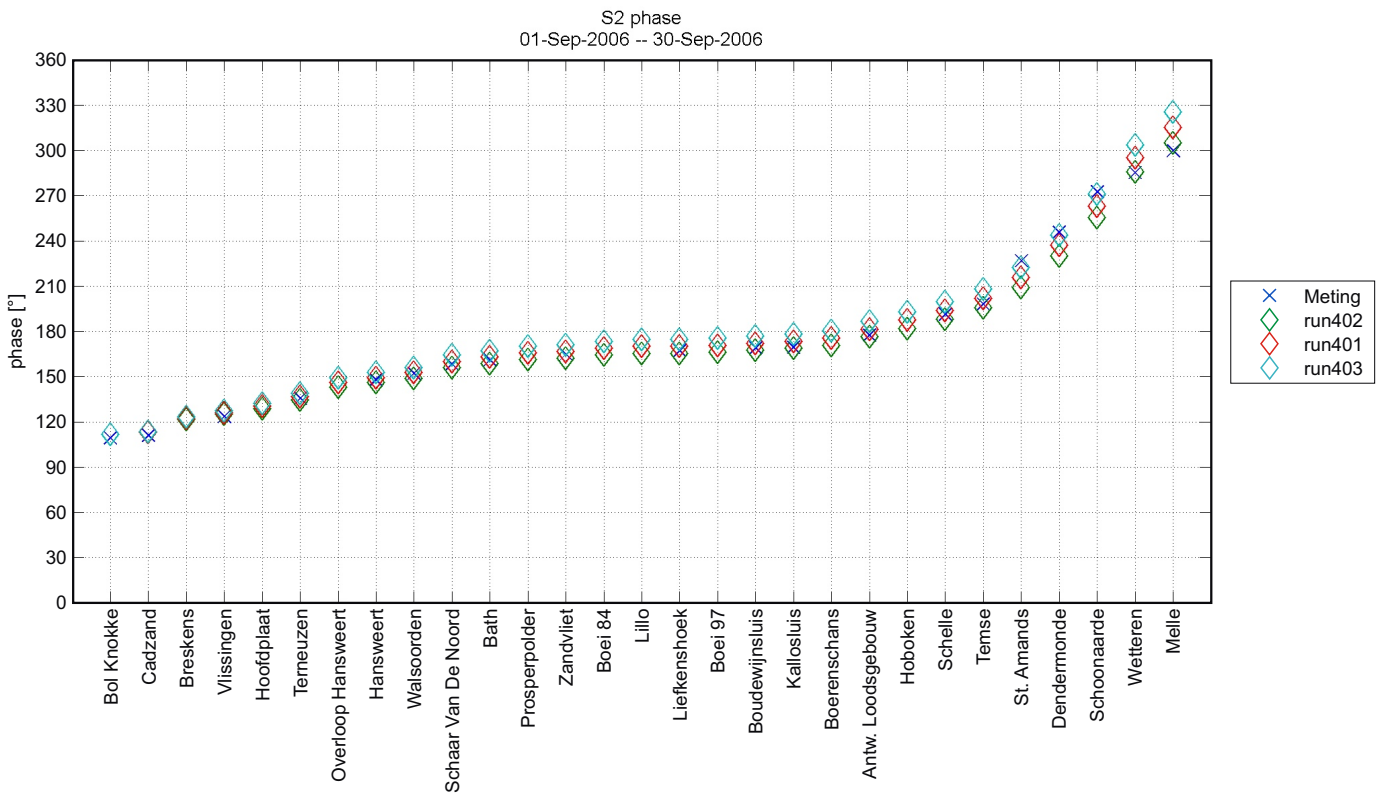
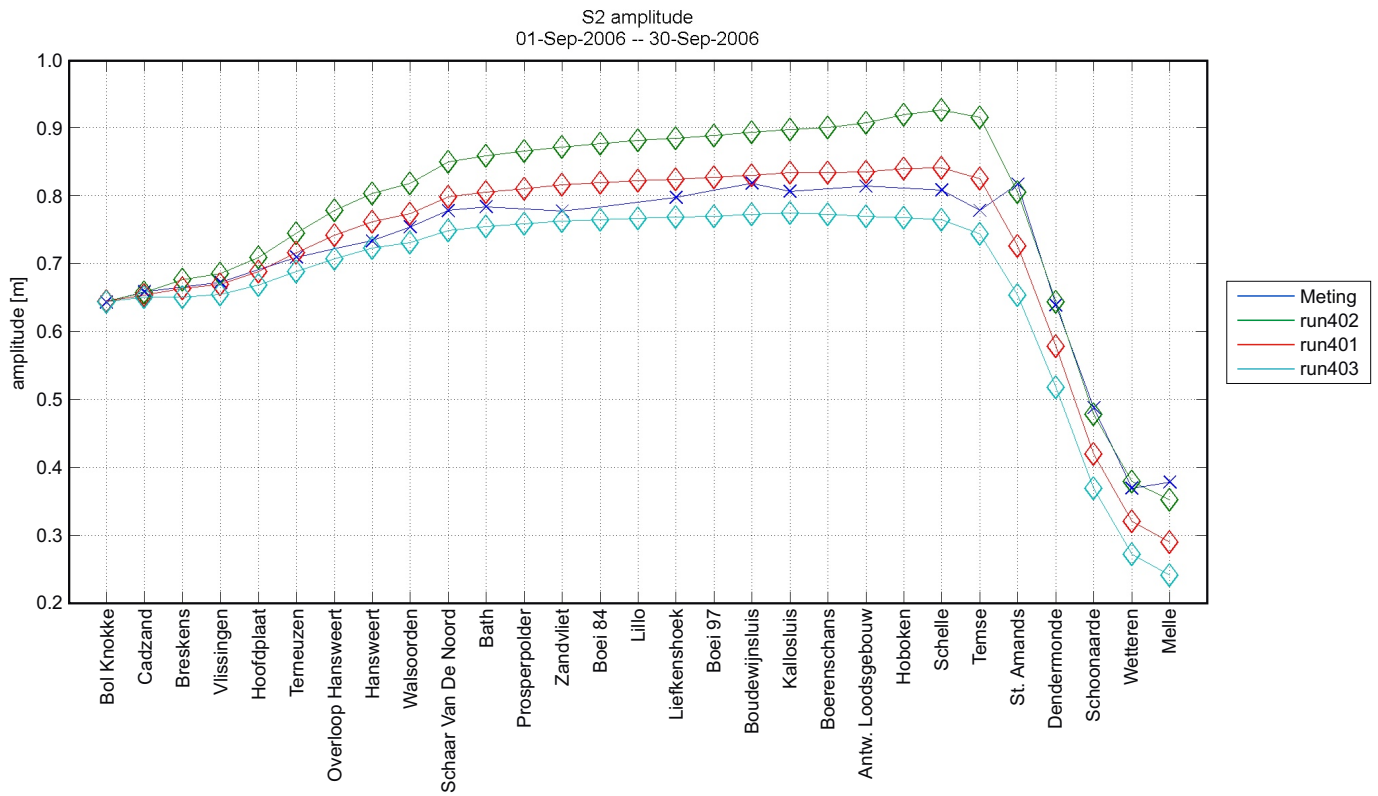
Verschil in berekende waterstanden run302 ten opzichte van run301
 Debieten te Merelbeke worden eveneens getoond op de figuur



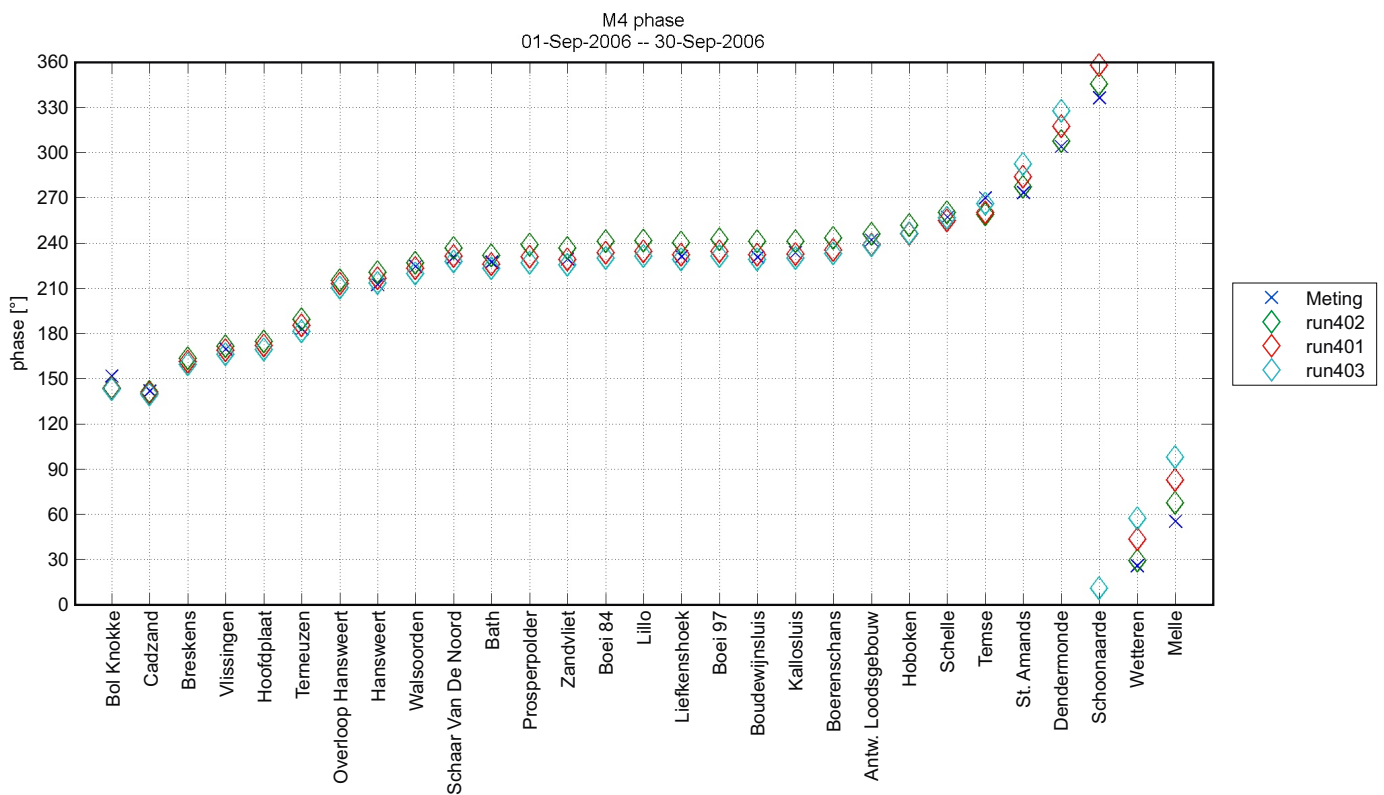
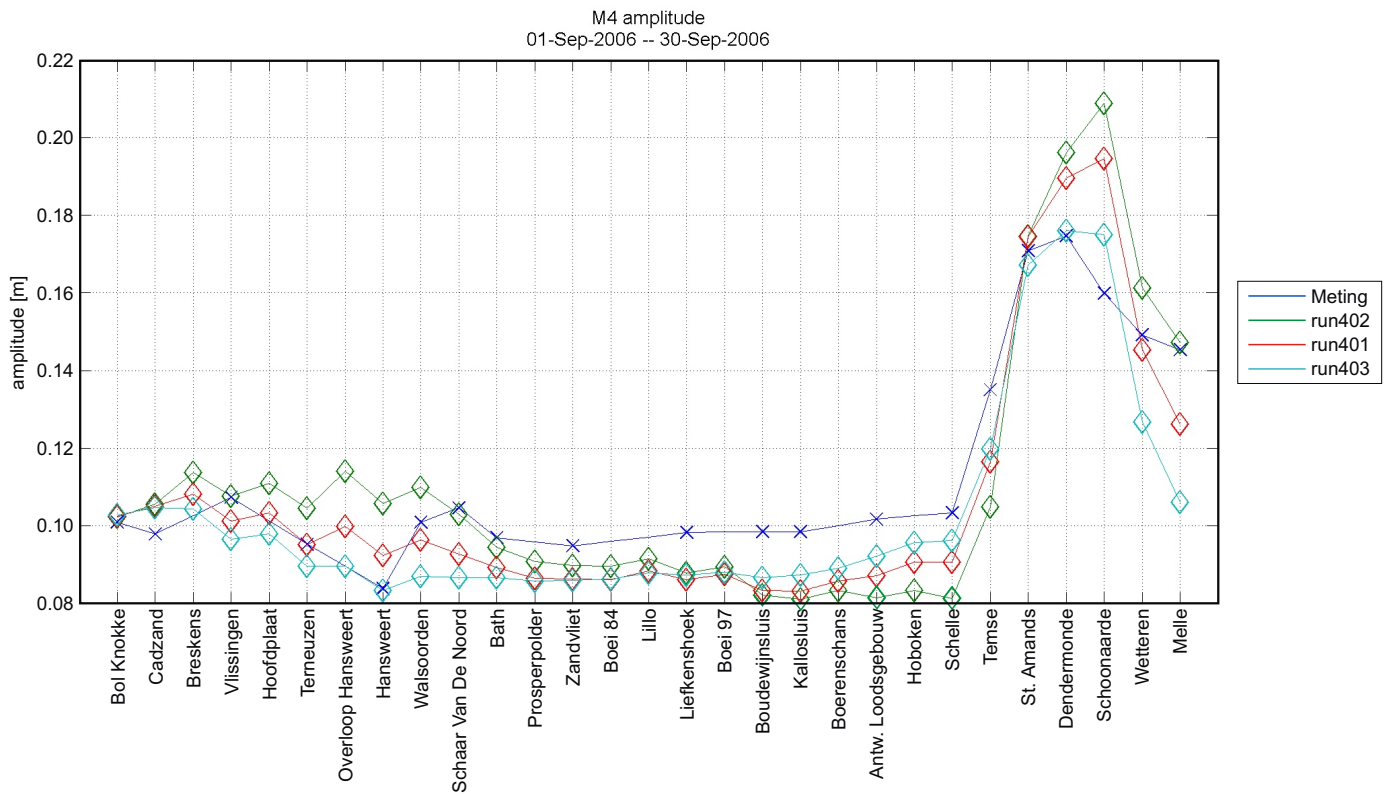
Verschil in berekende waterstanden run303 ten opzichte van run301
 Debieten te Merelbeke worden eveneens getoond op de figuur



M2 amplitude (boven) en fase (onder) voor run401, run402 en run403
Effect gewijzigde uniforme ruwheid

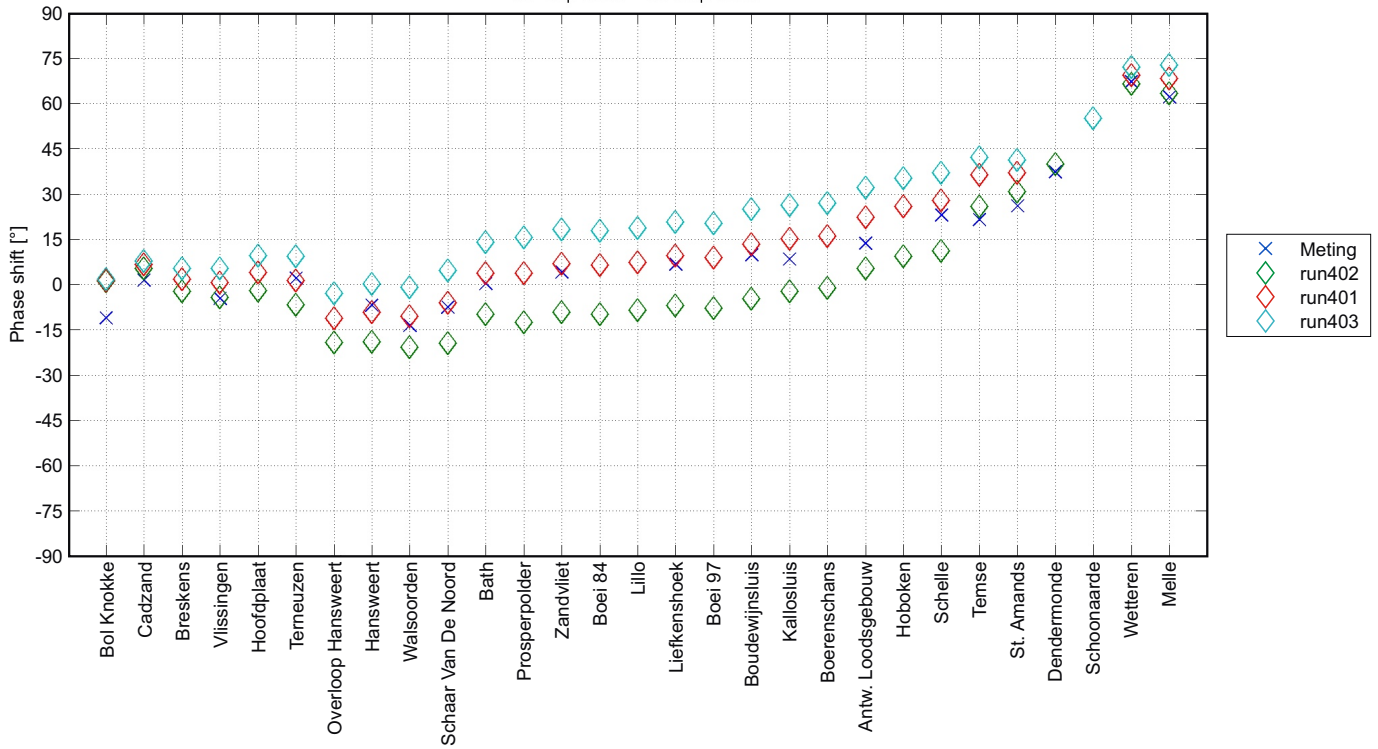


S2 amplitude (boven) en fase (onder) voor run401, run402 en run403
Effect gewijzigde uniforme ruwheid

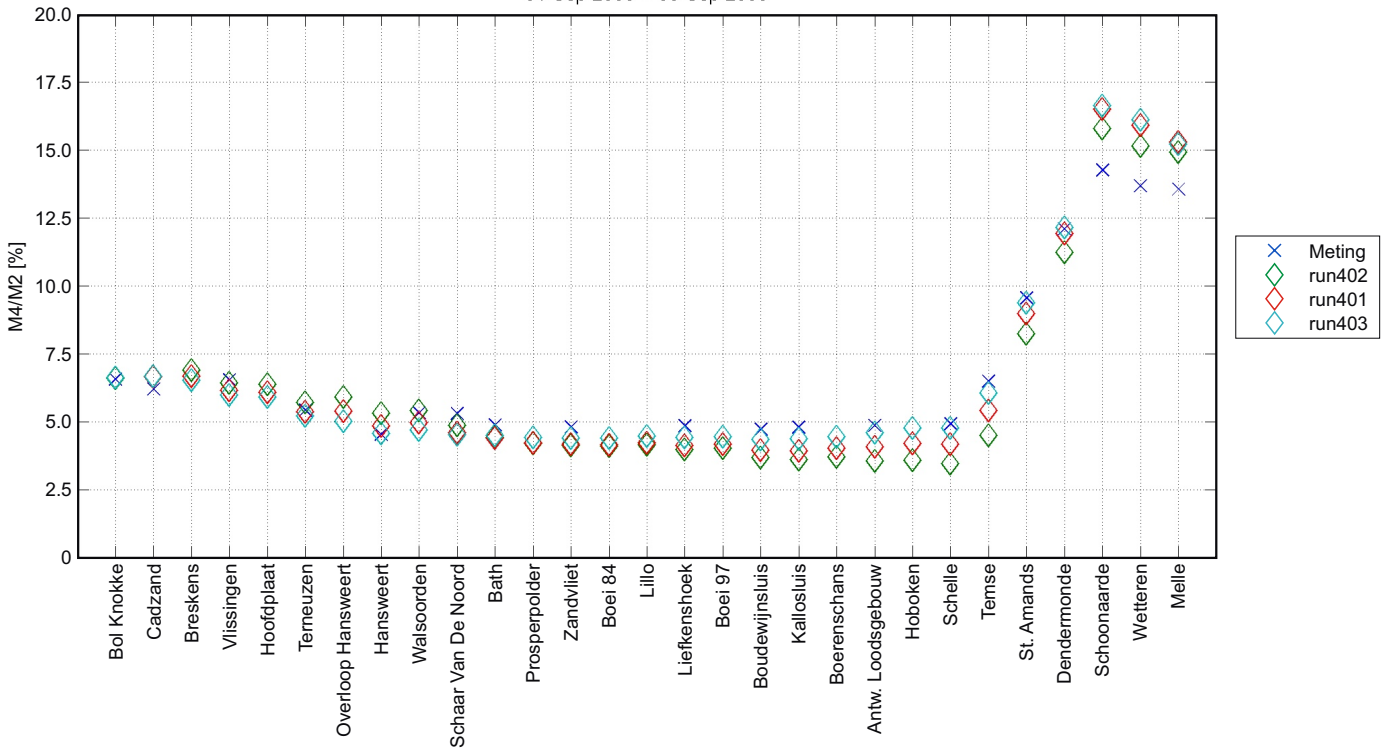


M4 amplitude (boven) en fase (onder) voor run401, run402 en run403
Effect gewijzigde uniforme ruwheid

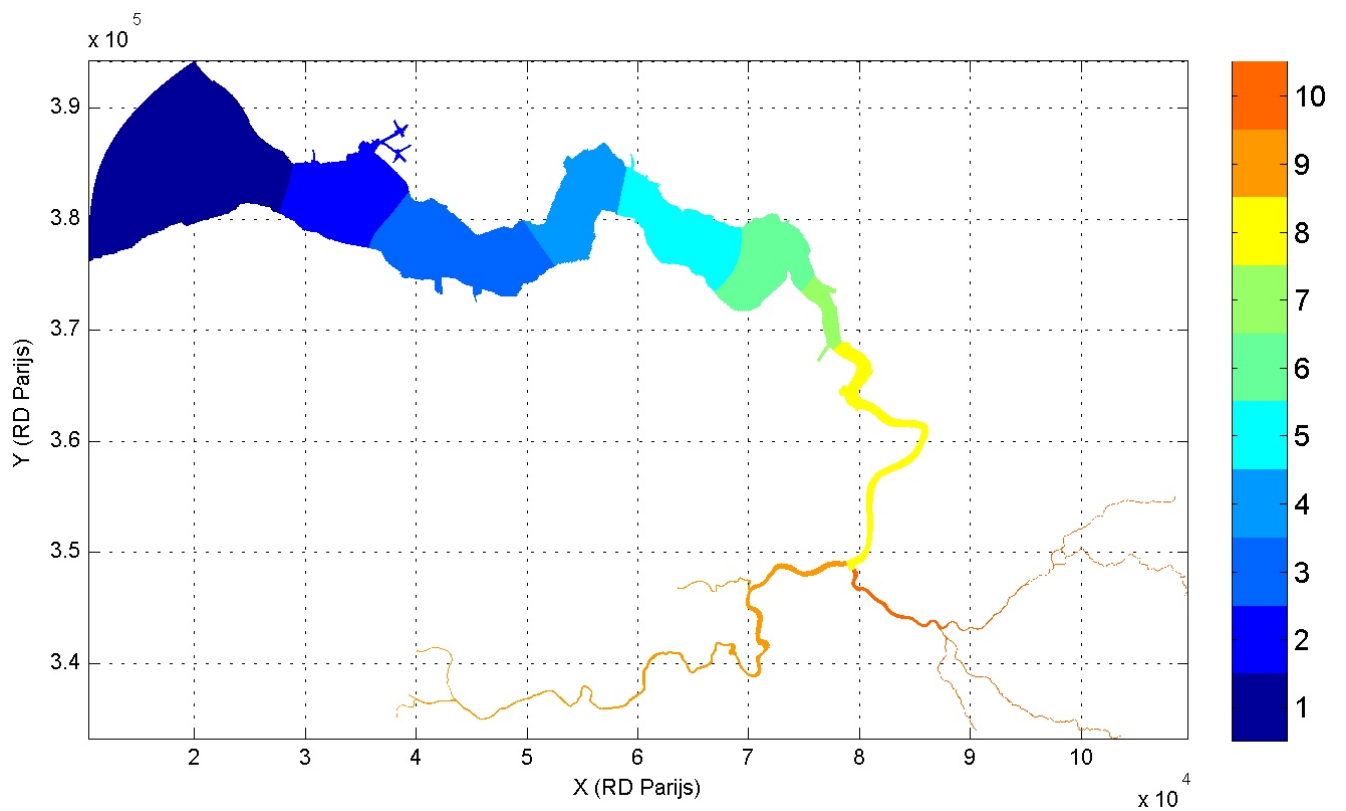
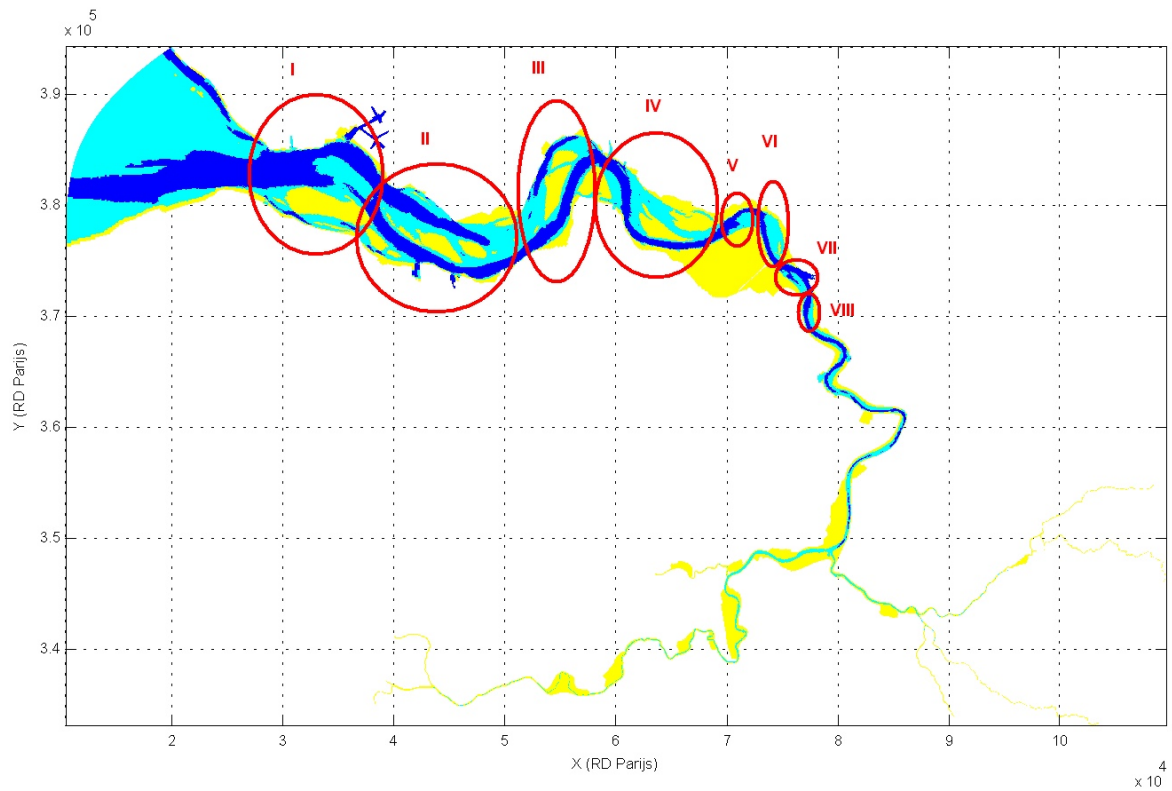
Faseverschil 2M2-M4
01-Sep-2006 -- 30-Sep-2006



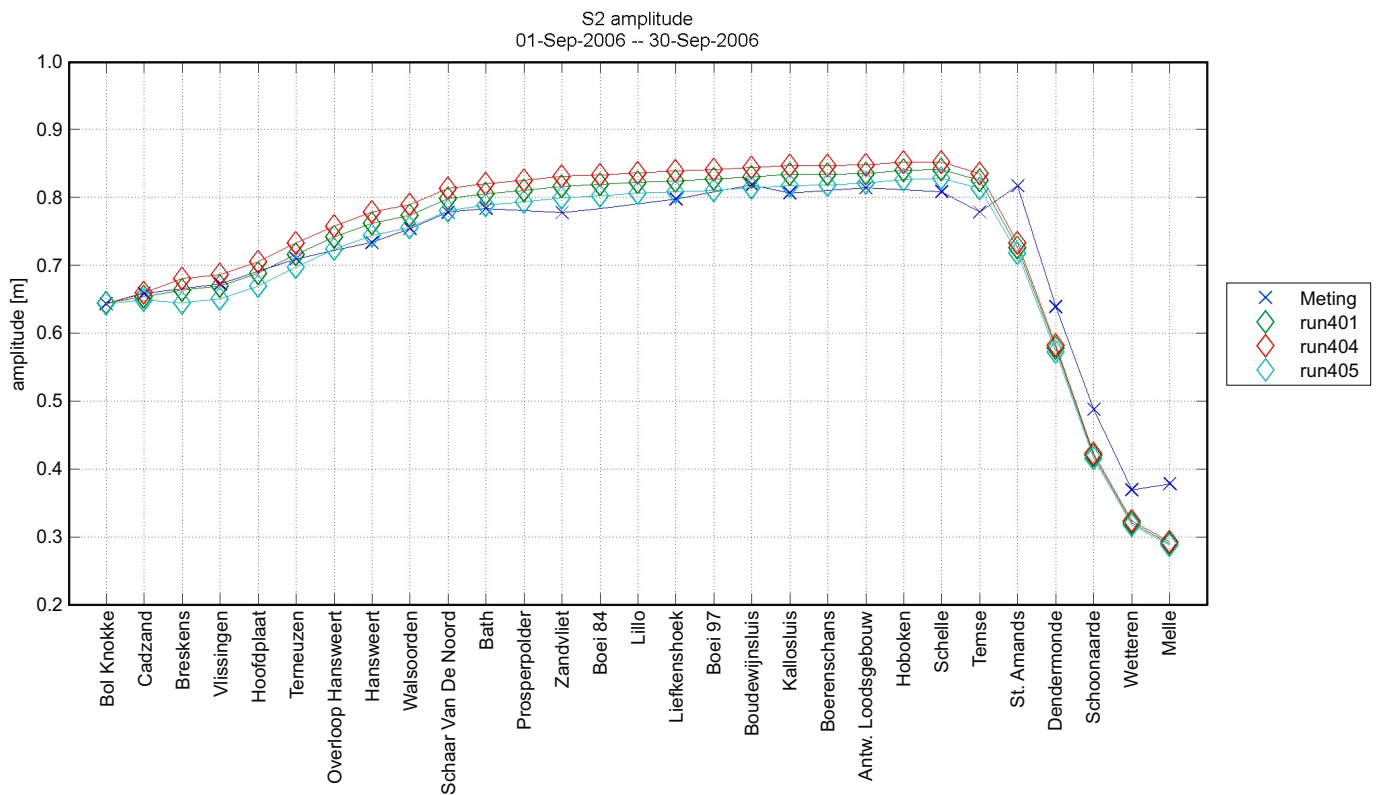
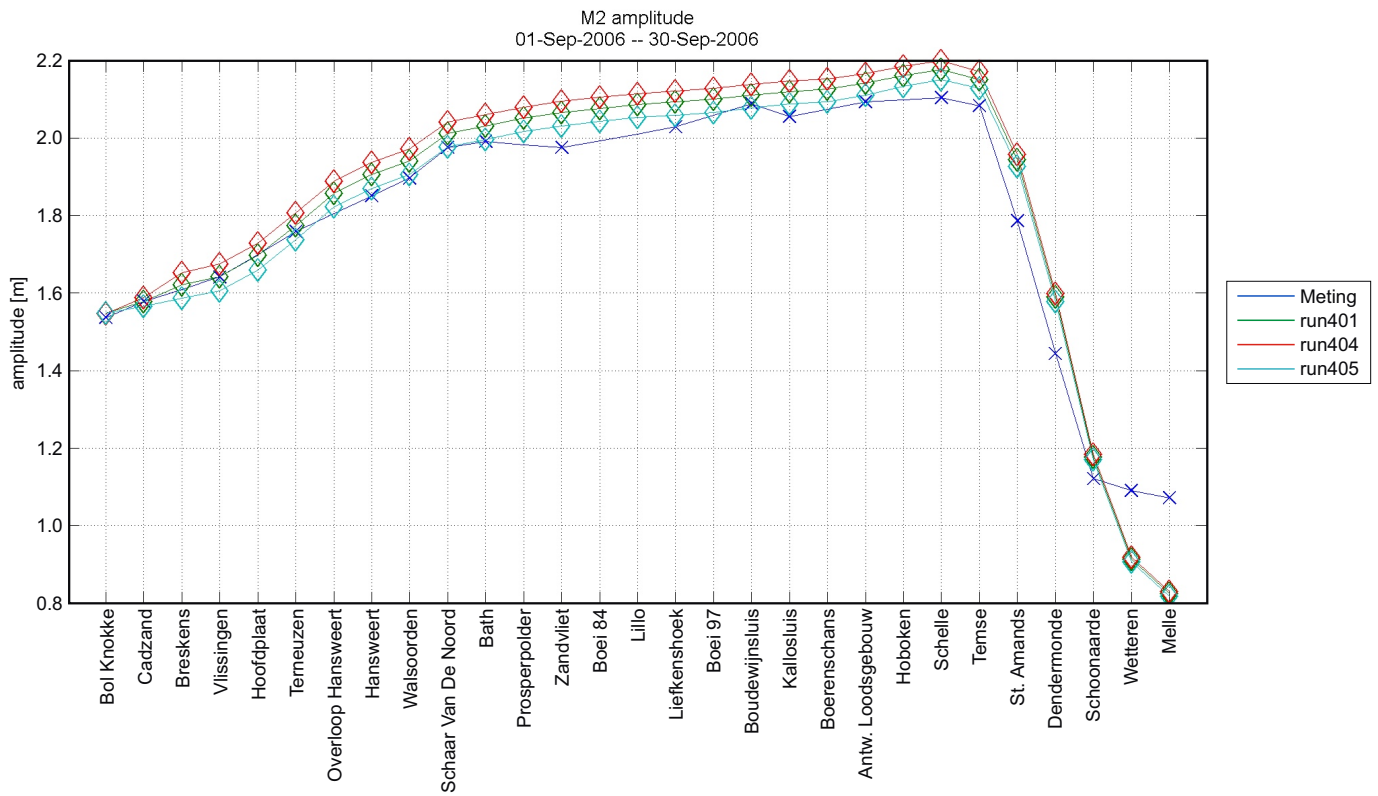
Verhouding fase M4/M2
01-Sep-2006 -- 30-Sep-2006



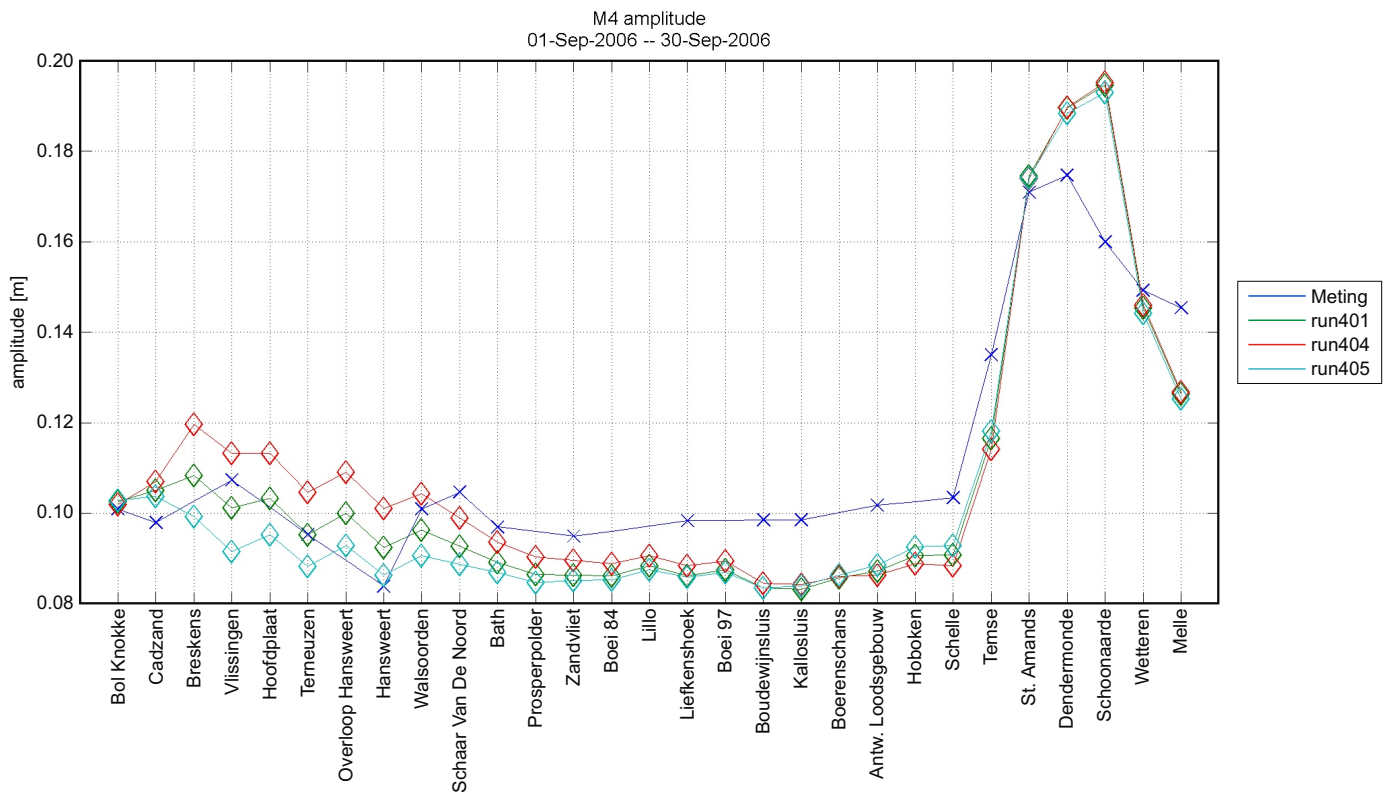
Faseverschil 2M2-M4 (boven) en fase verhouding M4/M2 (onder)
voor run401, run402 en run403
Effect gewijzigde uniforme ruwheid



De Westerschelde met aanduiding van macrocellen gevormd door de eb- en vloedgeulen

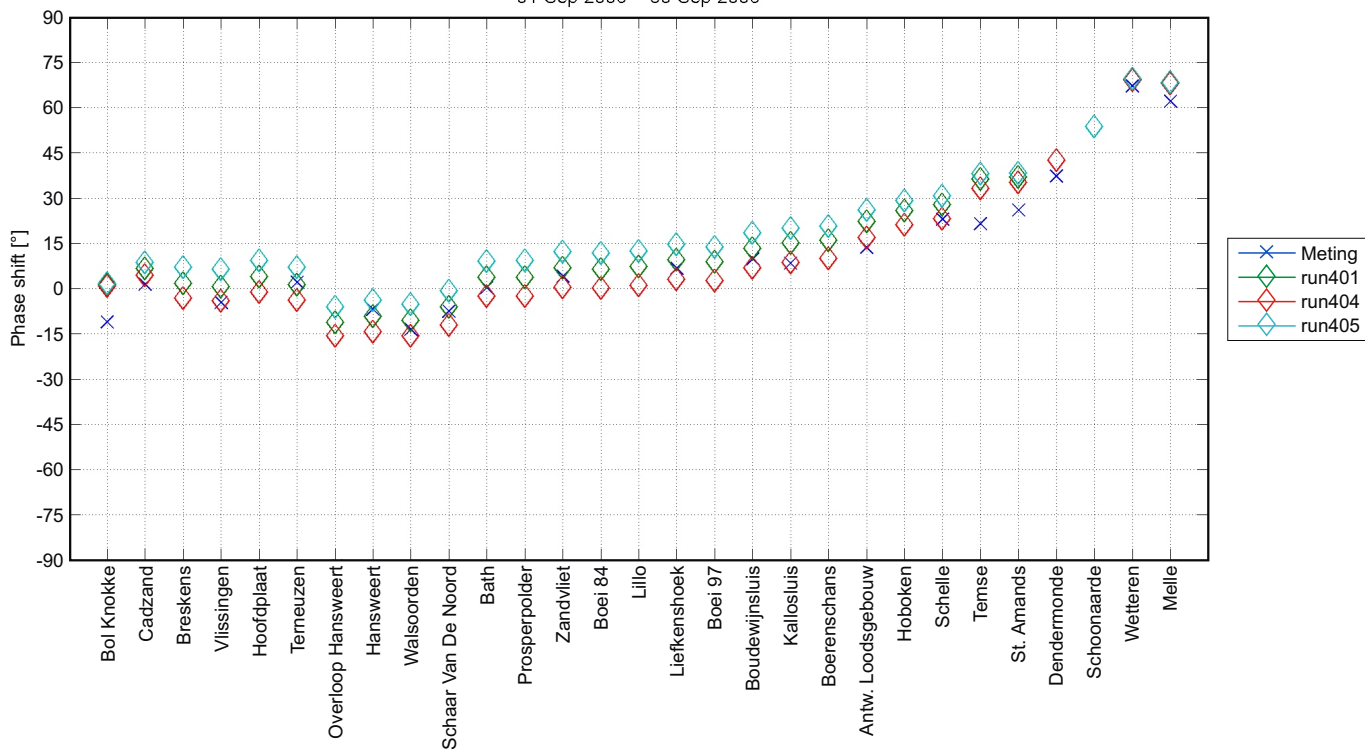


M2 amplitude (boven) en S2 amplitude (onder) voor run401, run404 en run405
Effect wijzigen ruwheid deelgebied 1

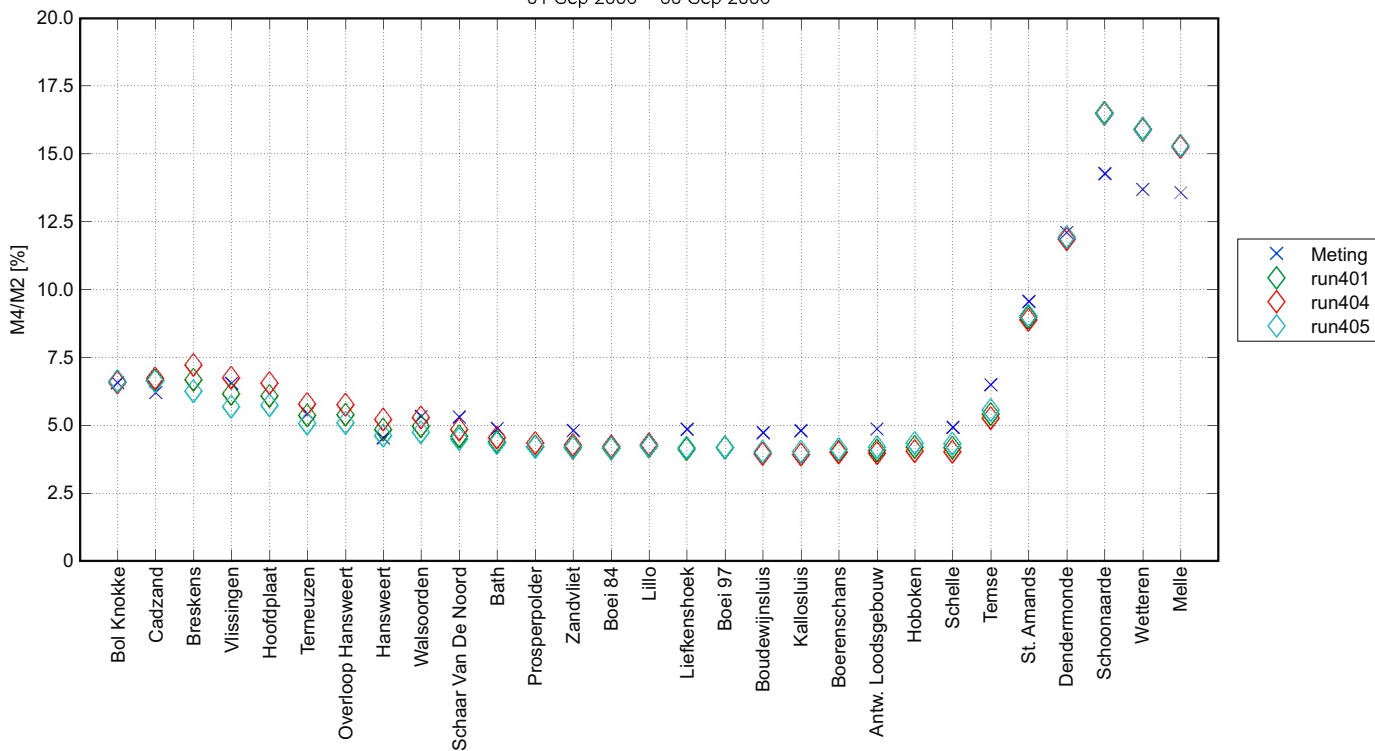


M4 amplitude voor run401, run404 en run405
Effect wijzigen ruwheid deelgebied 1

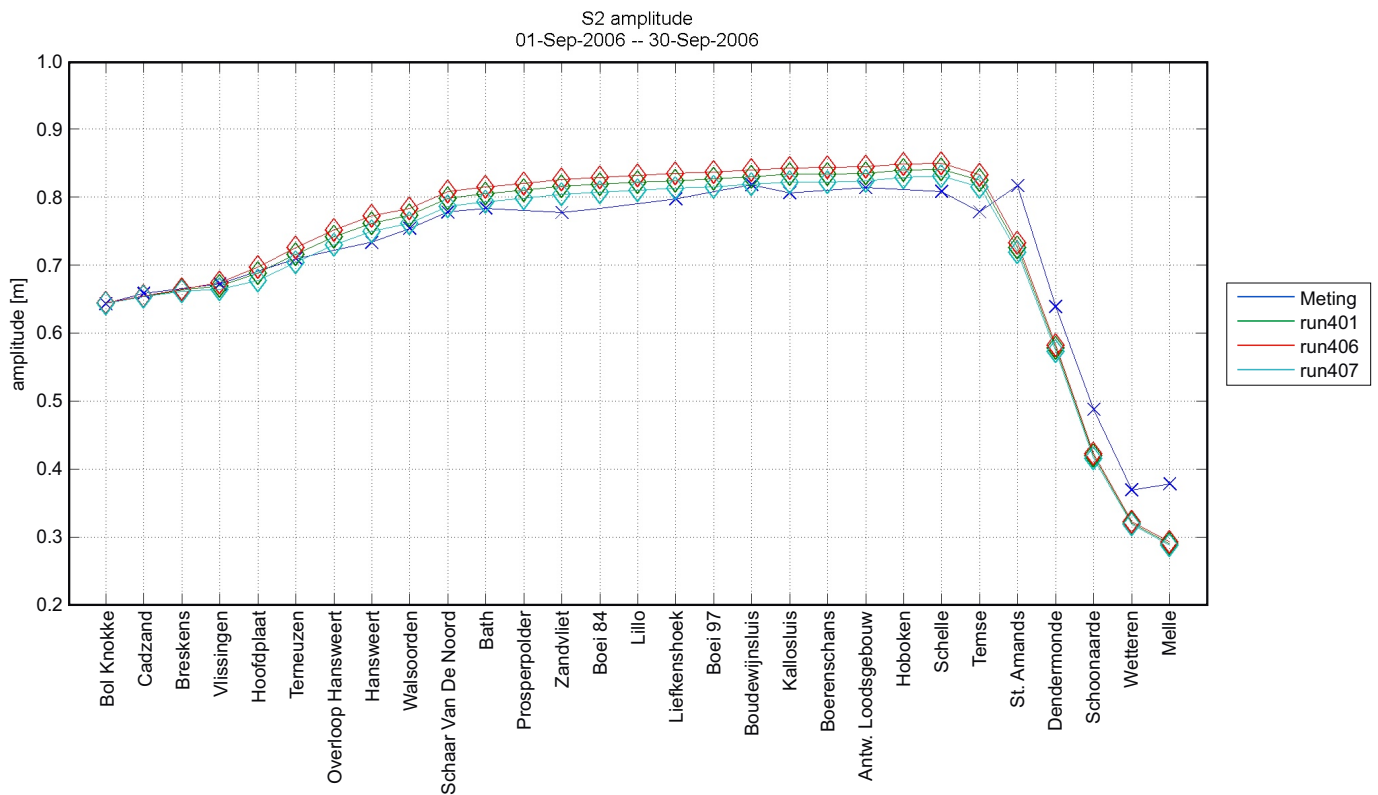
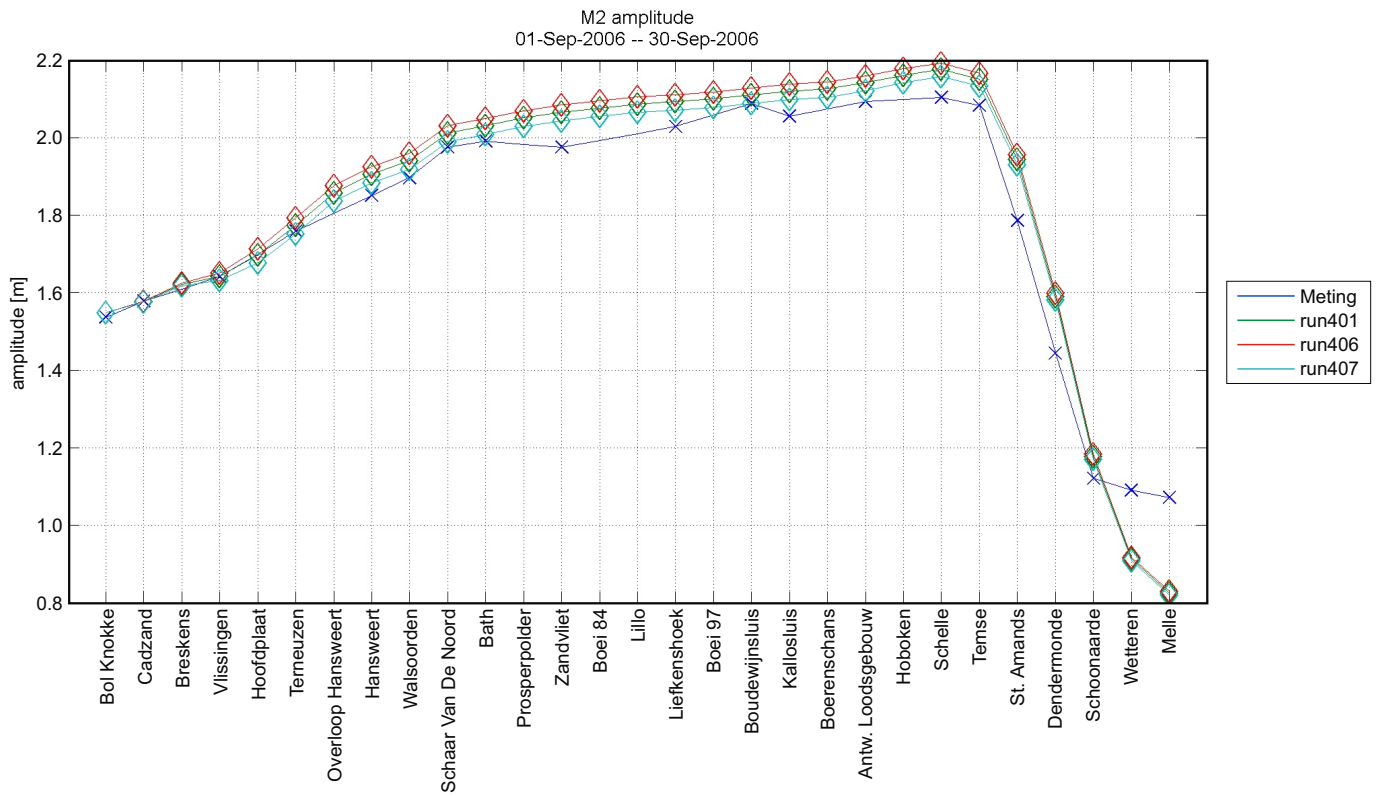
Faseverschil 2M2-M4
01-Sep-2006 -- 30-Sep-2006



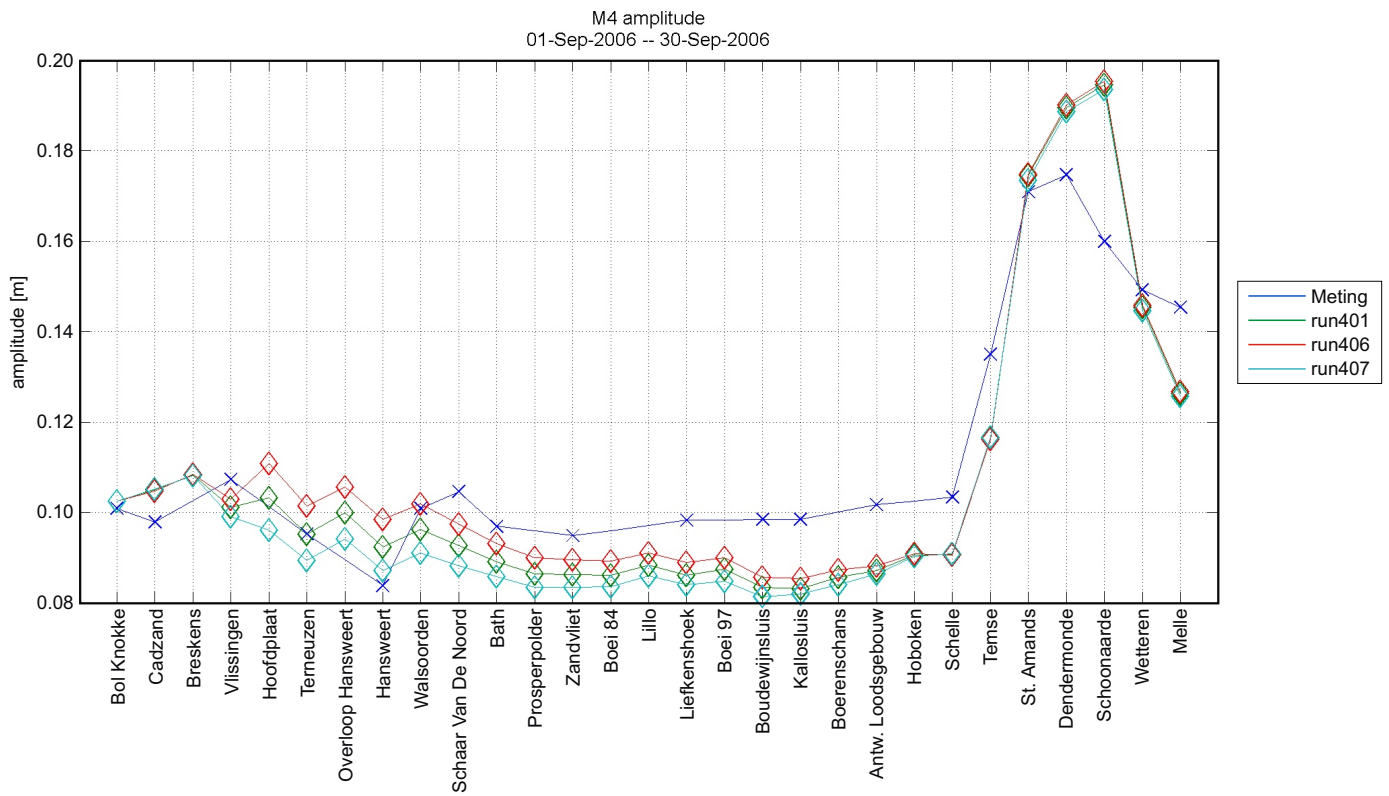
Verhouding fase M4/M2
01-Sep-2006 -- 30-Sep-2006



Faseverschil 2M2-M4 (boven) en fase verhouding M4/M2 (onder) voor run401, run404 en run405
Effect wijzigen ruwheid deelgebied 1

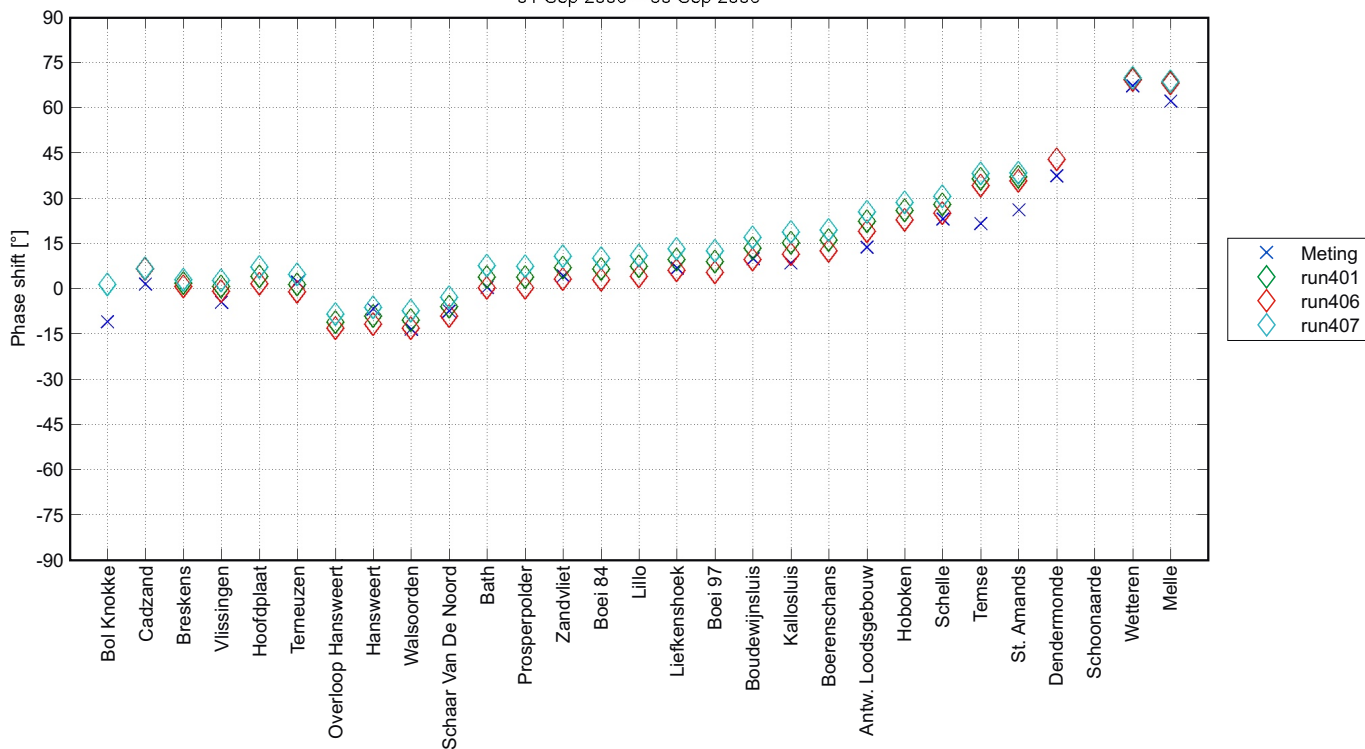


M2 amplitude (boven) en S2 amplitude (onder) voor run401, run406 en run407
Effect wijzigen ruwheid deelgebied 2

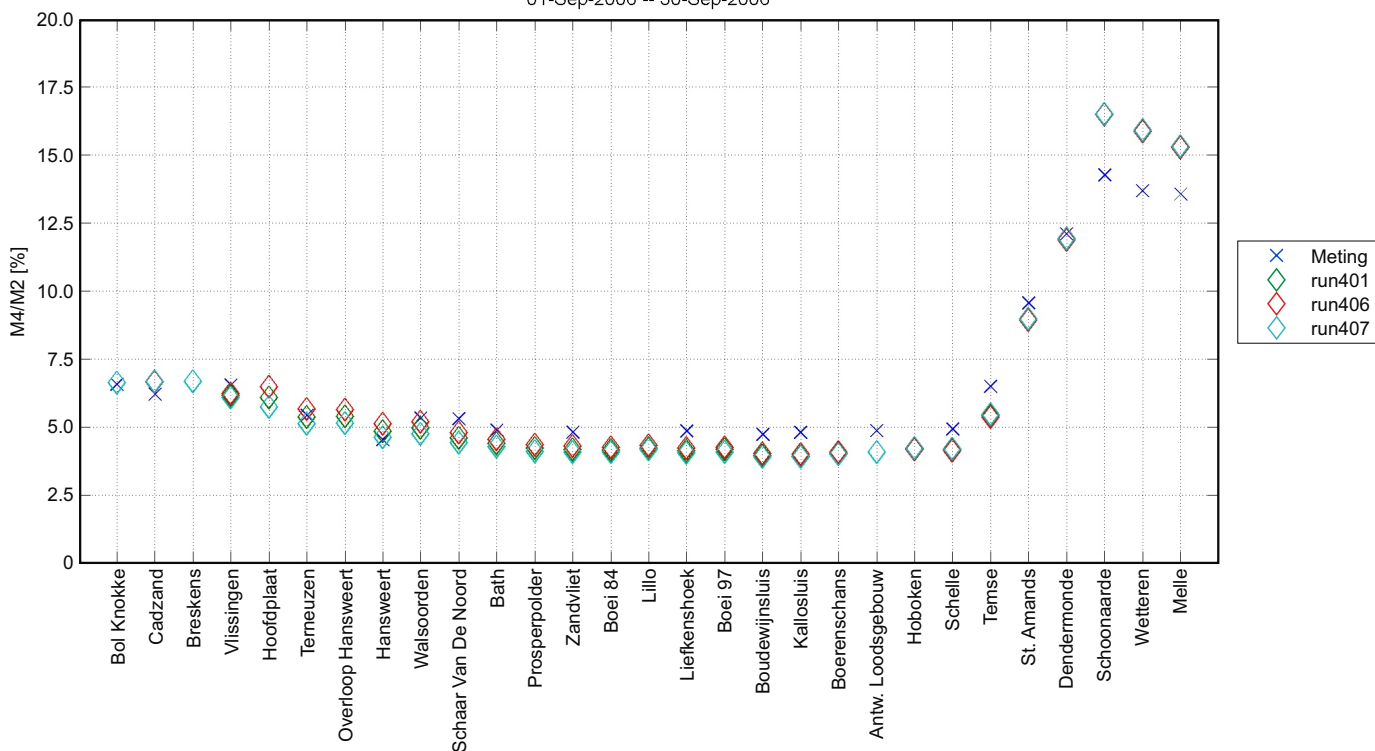


M4 amplitude voor run401, run406 en run407
Effect wijzigen ruwheid deelgebied 2

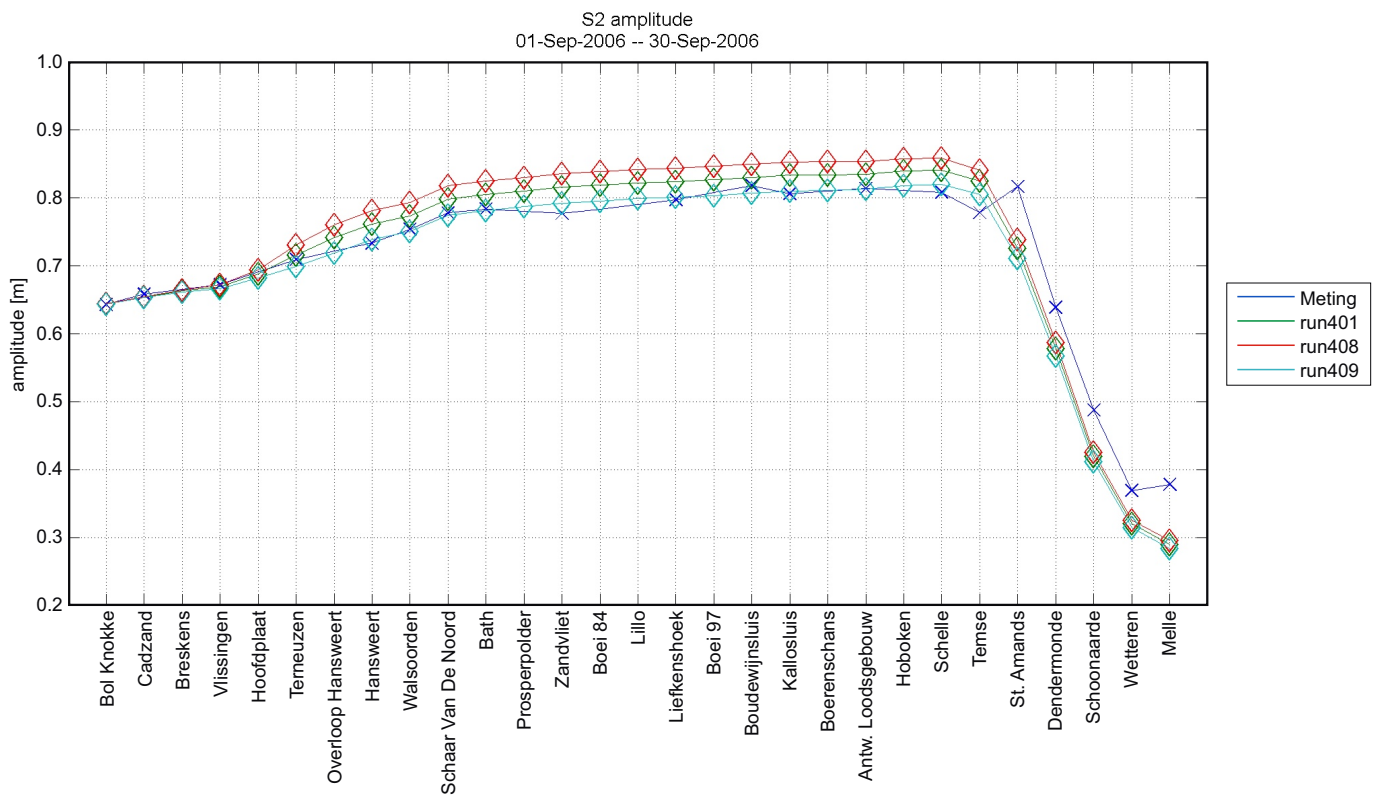
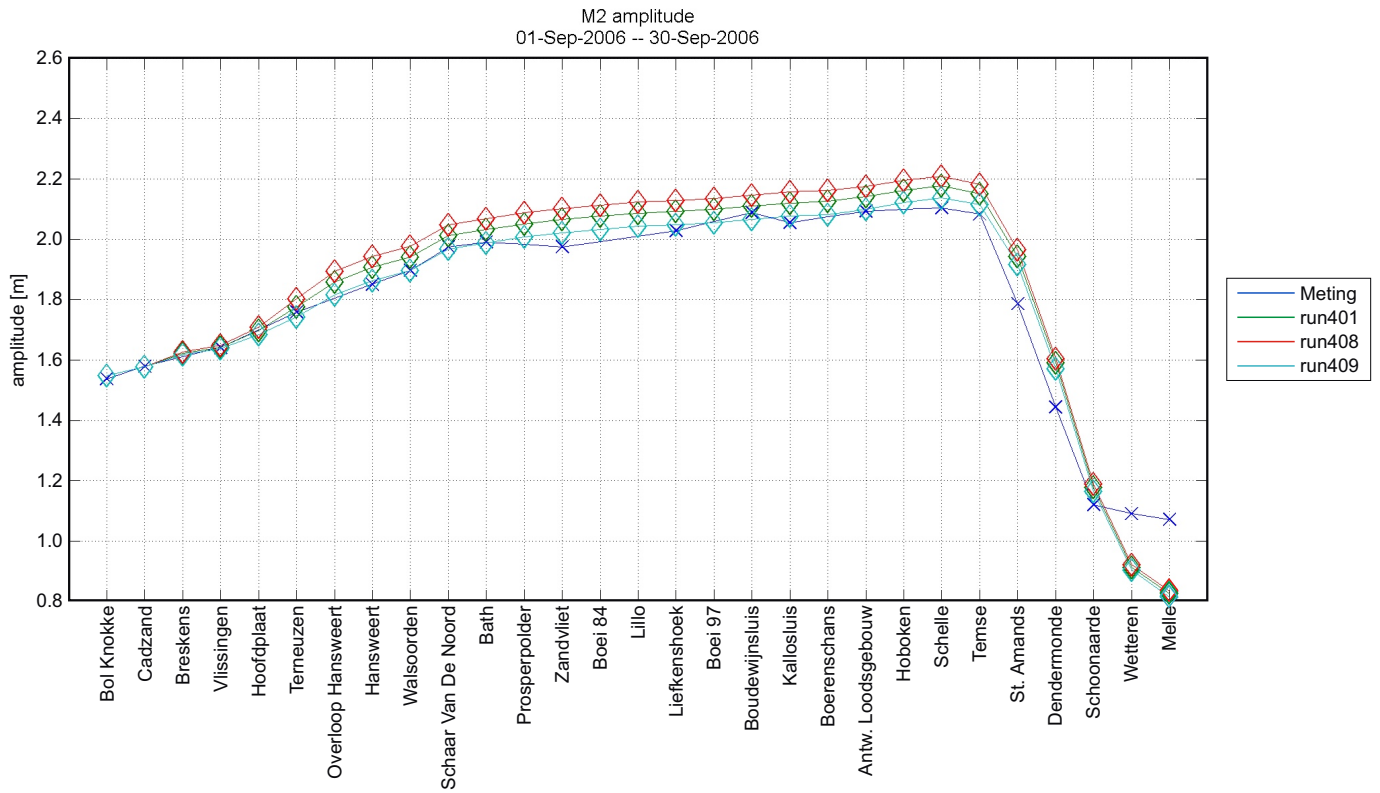
Faseverschil 2M2-M4
01-Sep-2006 -- 30-Sep-2006



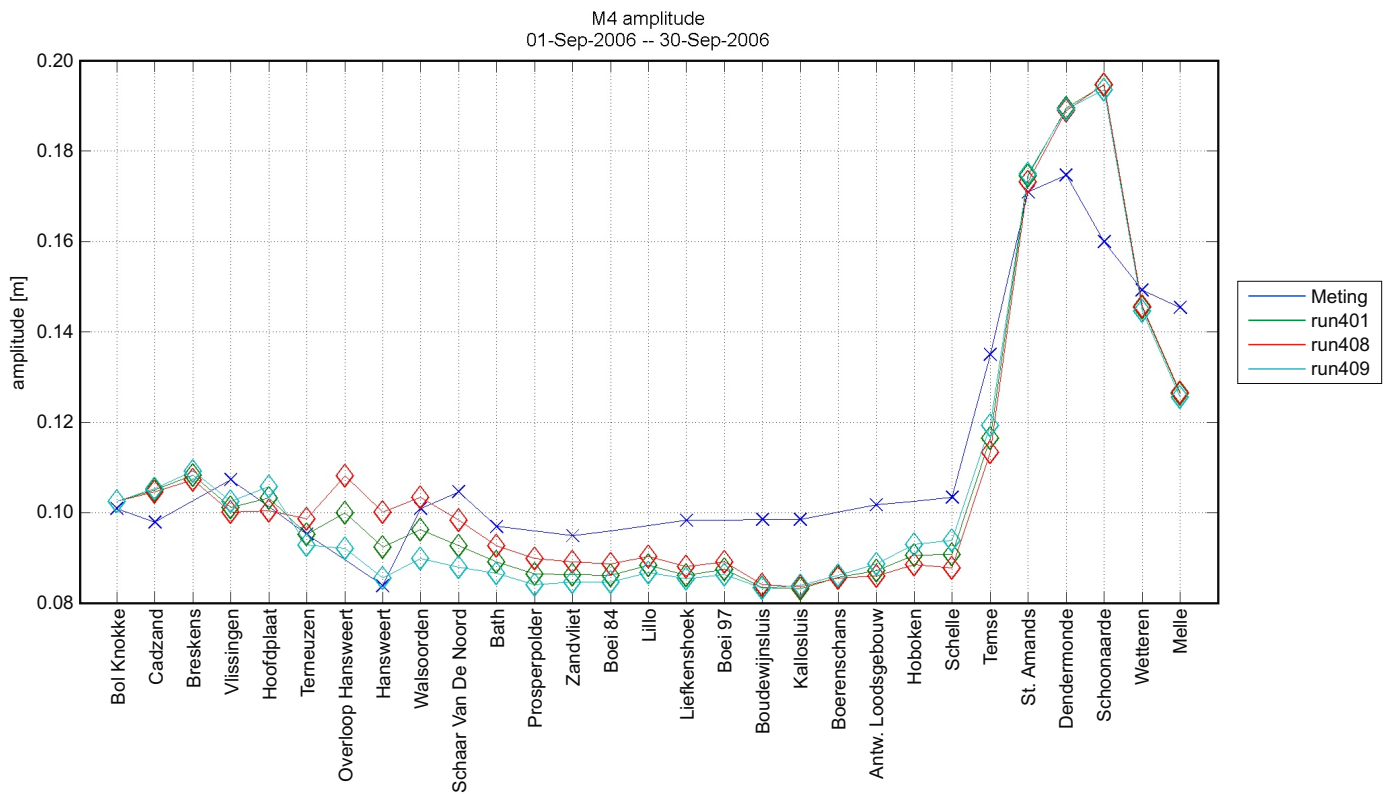
Verhouding fase M4/M2
01-Sep-2006 -- 30-Sep-2006



Faseverschil 2M2-M4 (boven) en fase verhouding M4/M2 (onder) voor run401, run406 en run407
Effect wijzigen ruwheid deelgebied 2

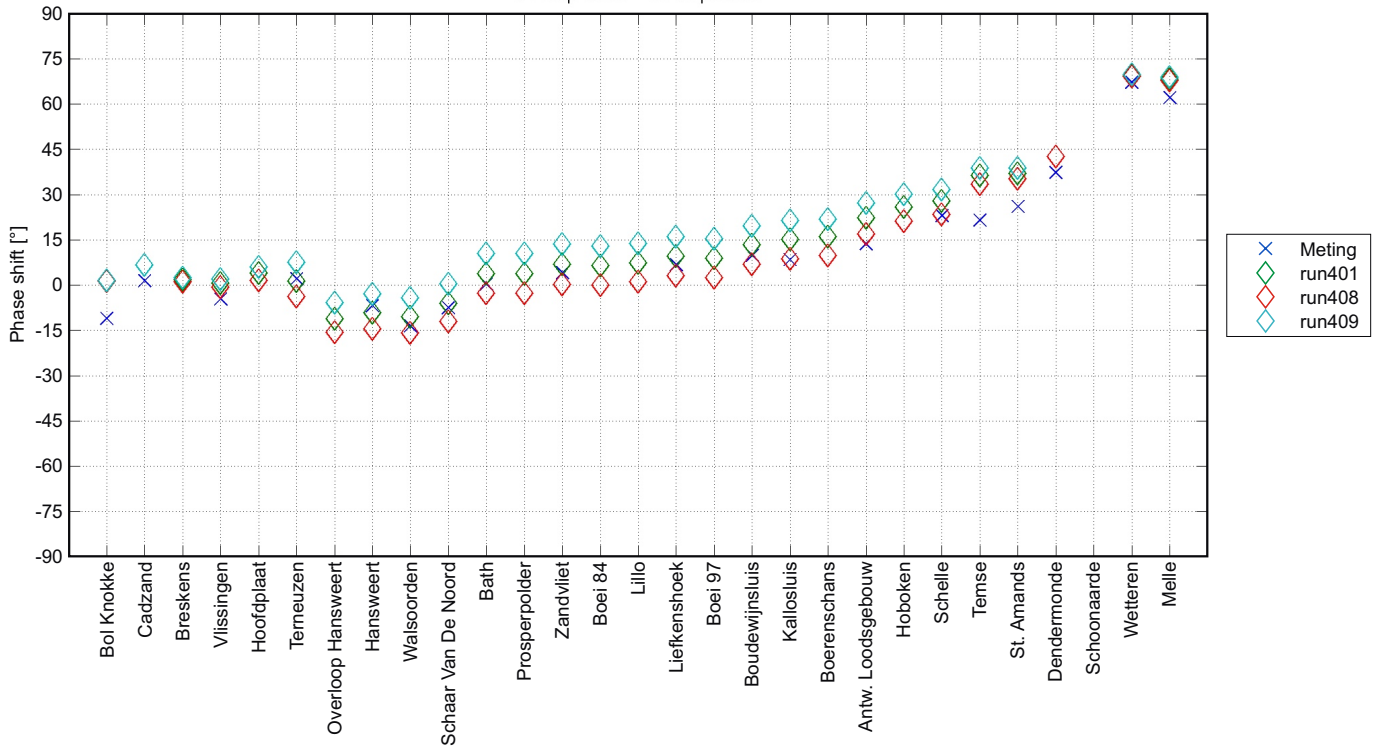


M2 amplitude (boven) en S2 amplitude (onder) voor run401, run408 en run409
Effect wijzigen ruwheid deelgebied 3

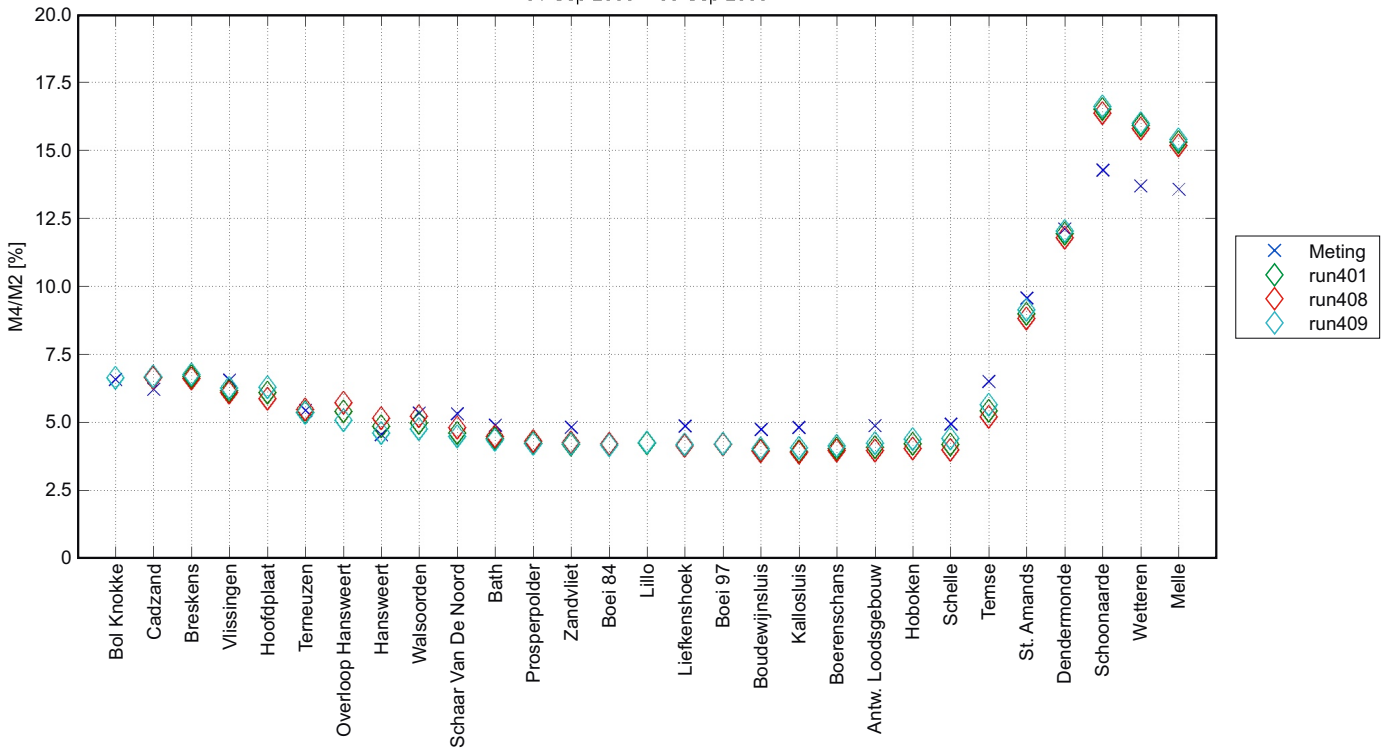


M4 amplitude voor run401, run408 en run409
Effect wijzigen ruwheid deelgebied 3

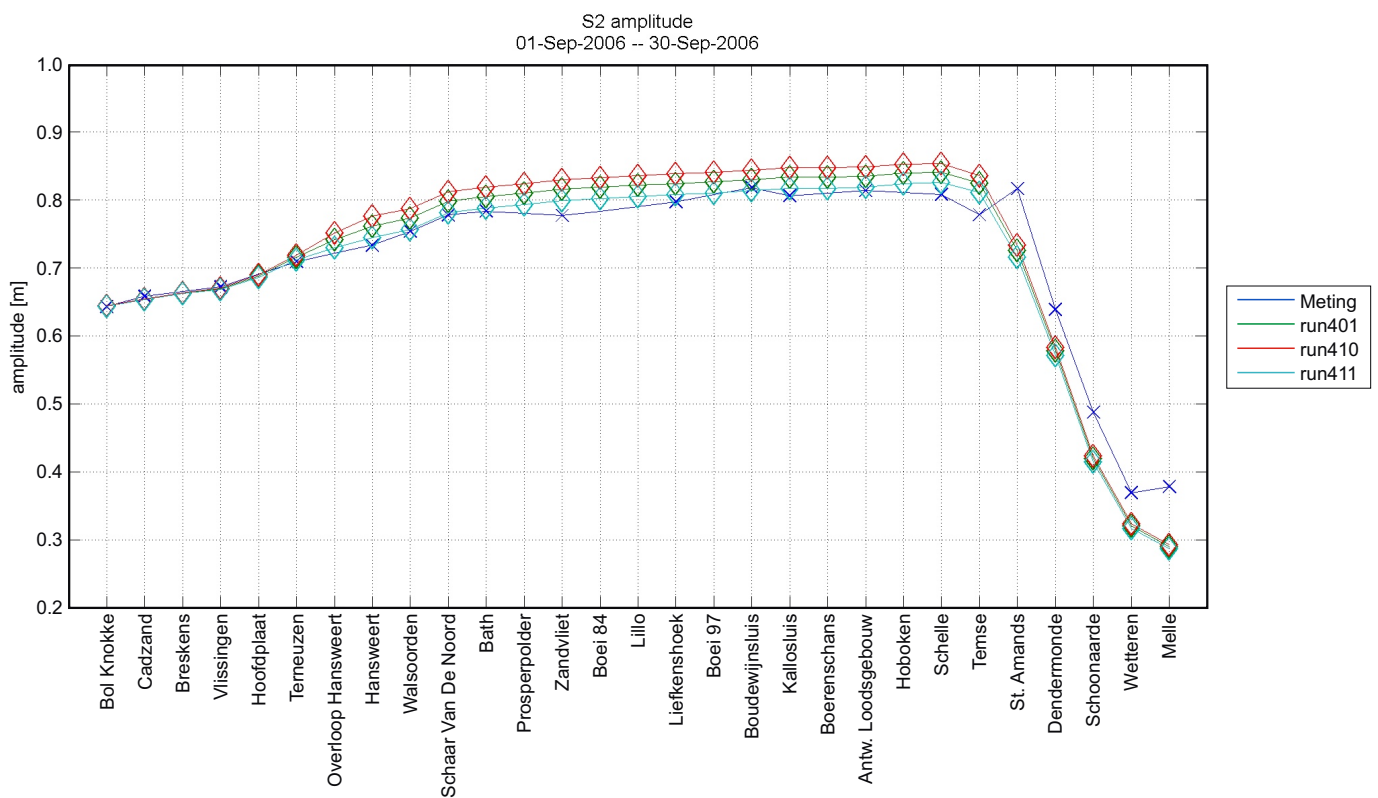
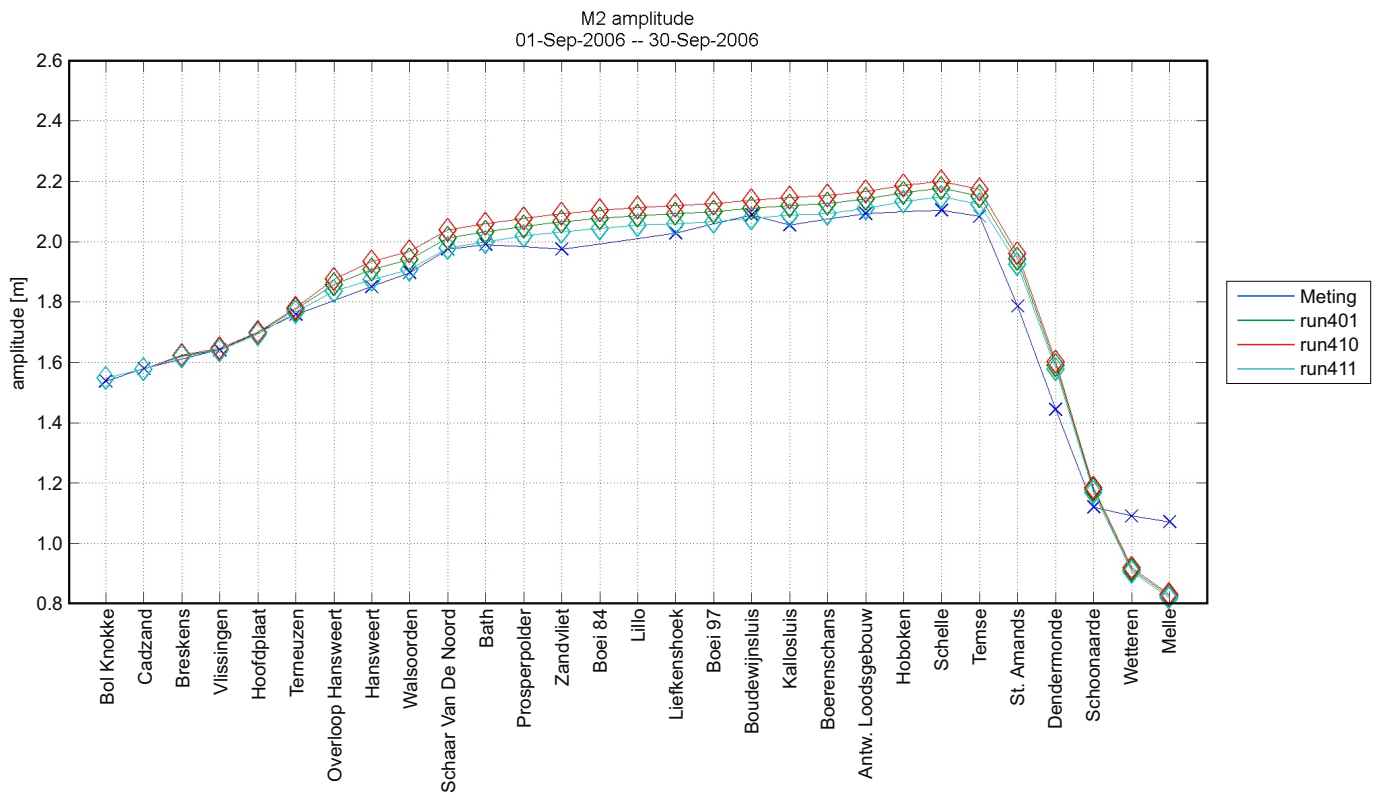
Faseverschil 2M2-M4
01-Sep-2006 -- 30-Sep-2006



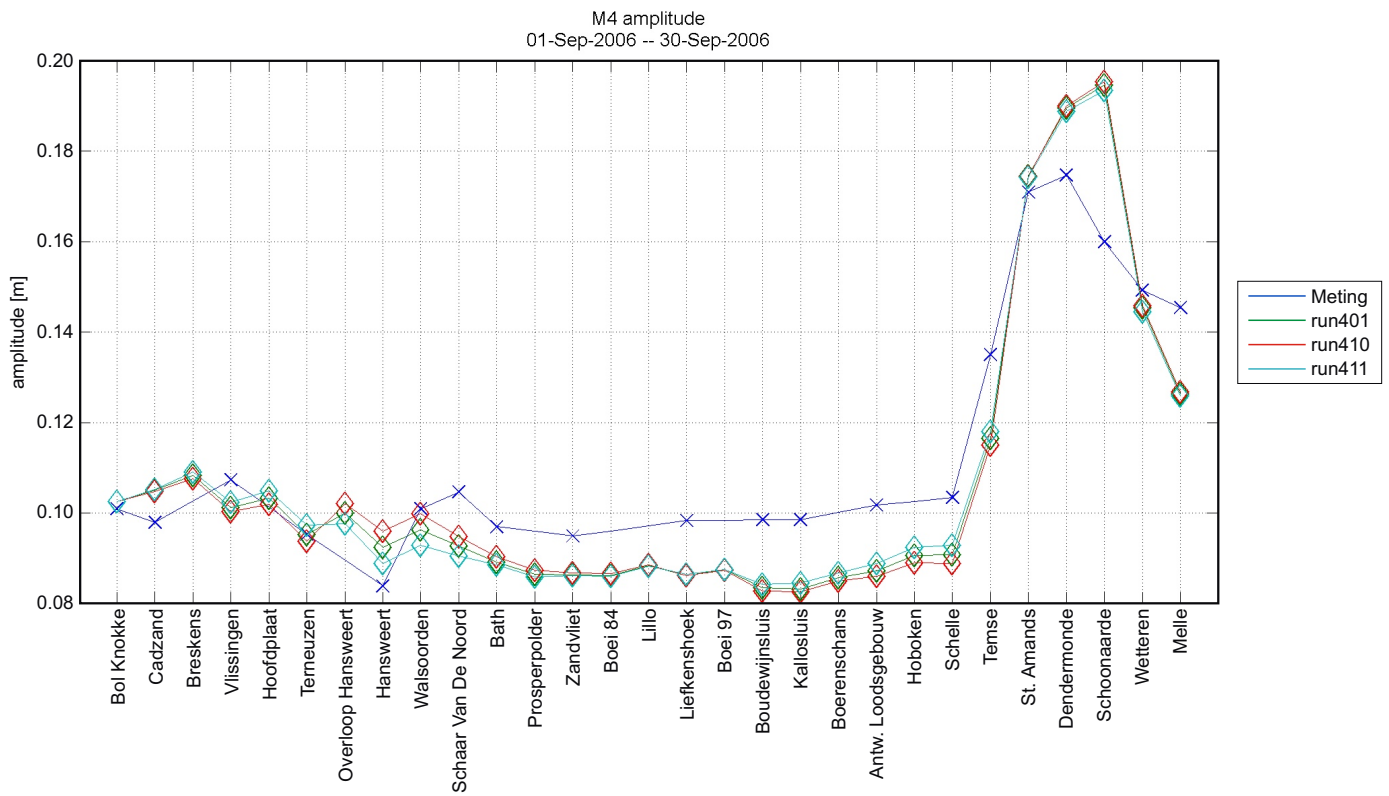
Verhouding fase M4/M2
01-Sep-2006 -- 30-Sep-2006



Faseverschil 2M2-M4 (boven) en fase verhouding M4/M2 (onder)
voor run401, run408 en run409
Effect wijzigen ruwheid deelgebied 3

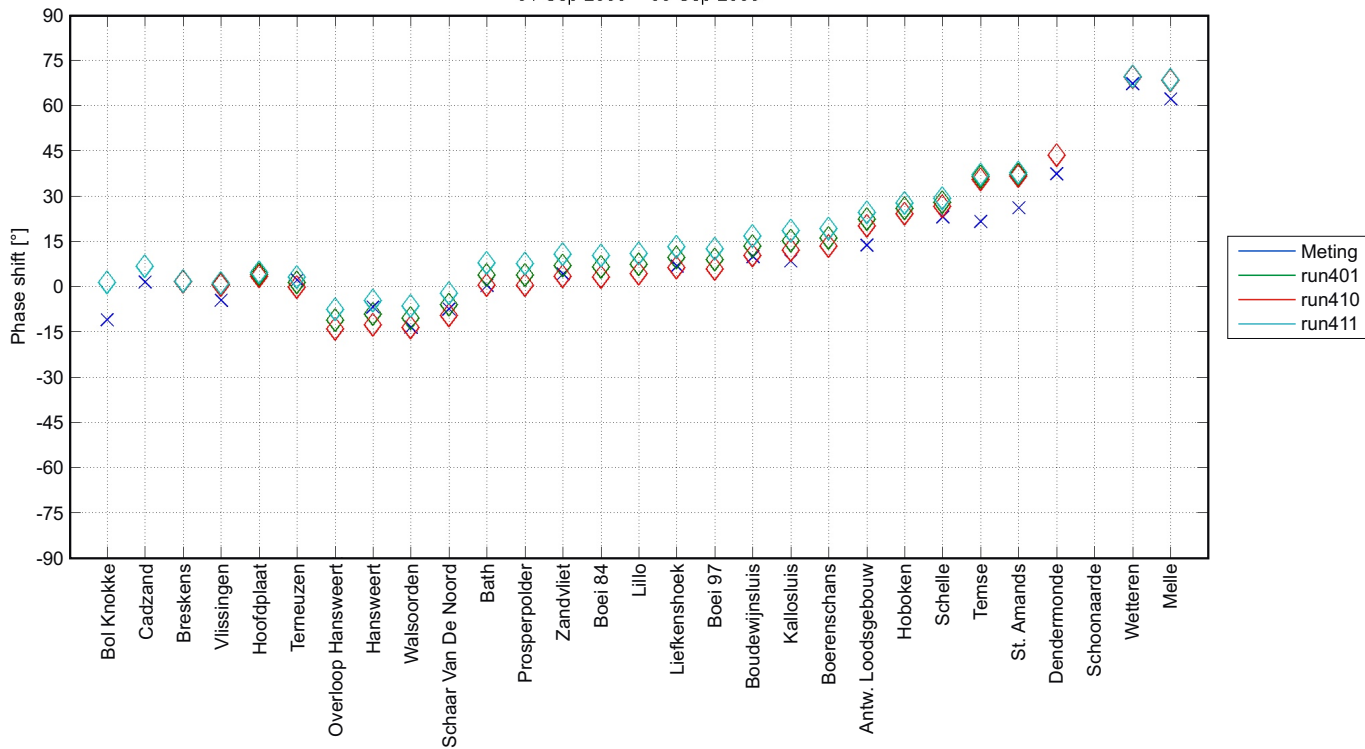


M2 amplitude (boven) en S2 amplitude (onder) voor run401, run410 en run411
Effect wijzigen ruwheid deelgebied 4

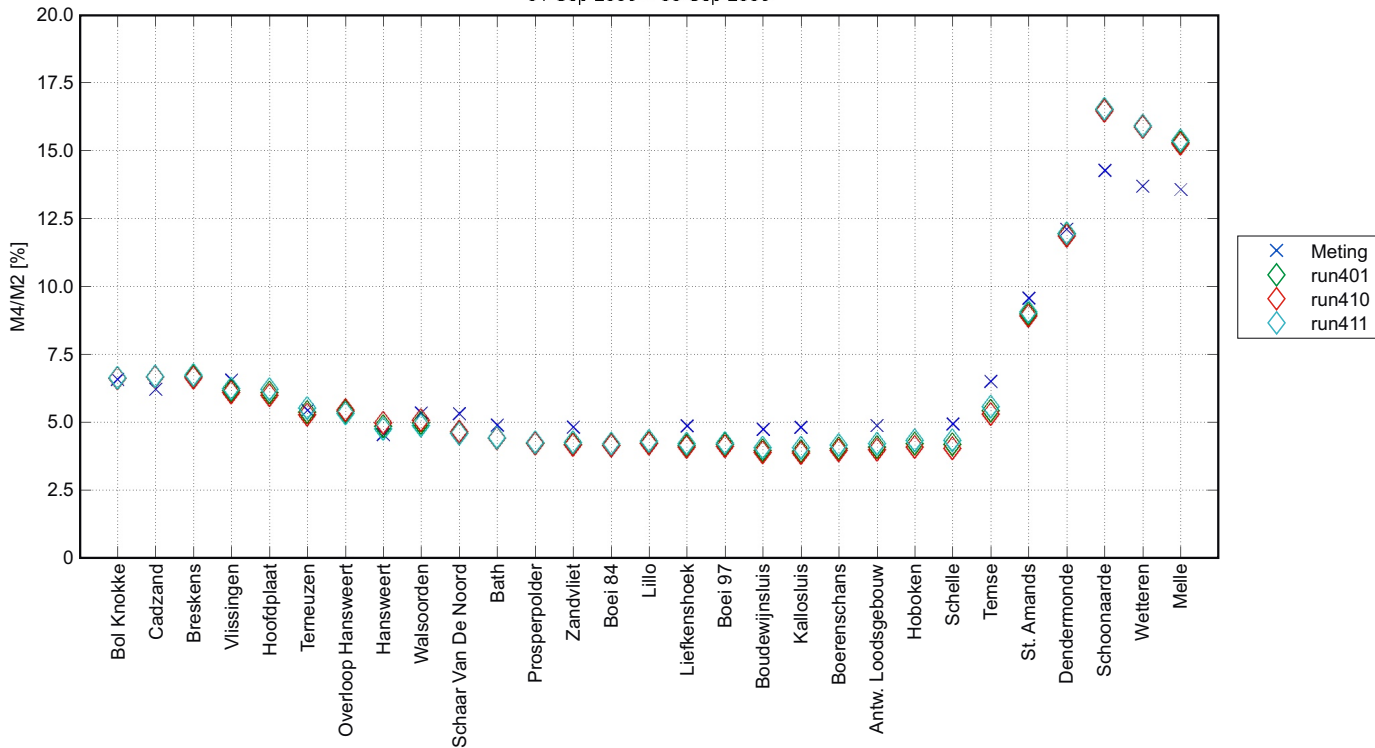


M4 amplitude voor run401, run410 en run411
Effect wijzigen ruwheid deelgebied 4

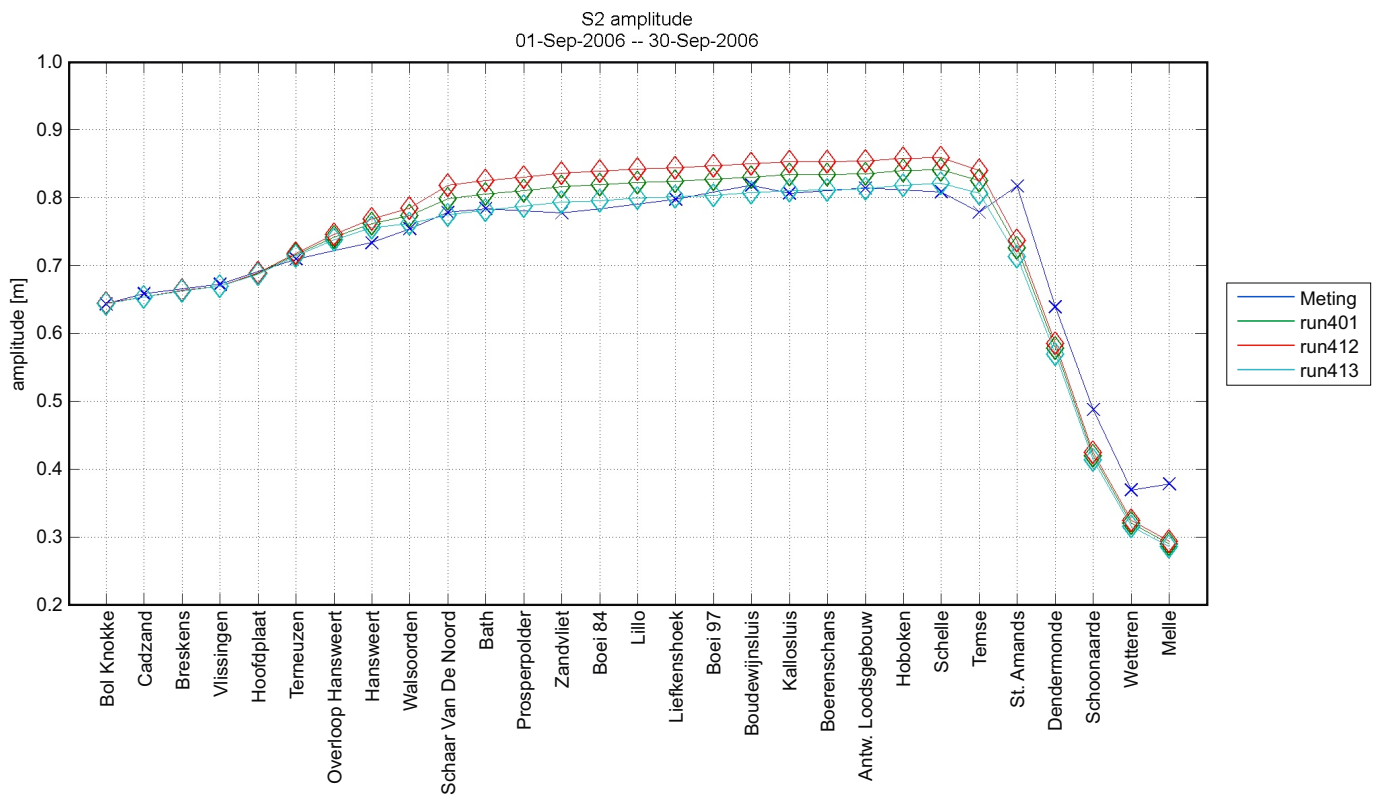
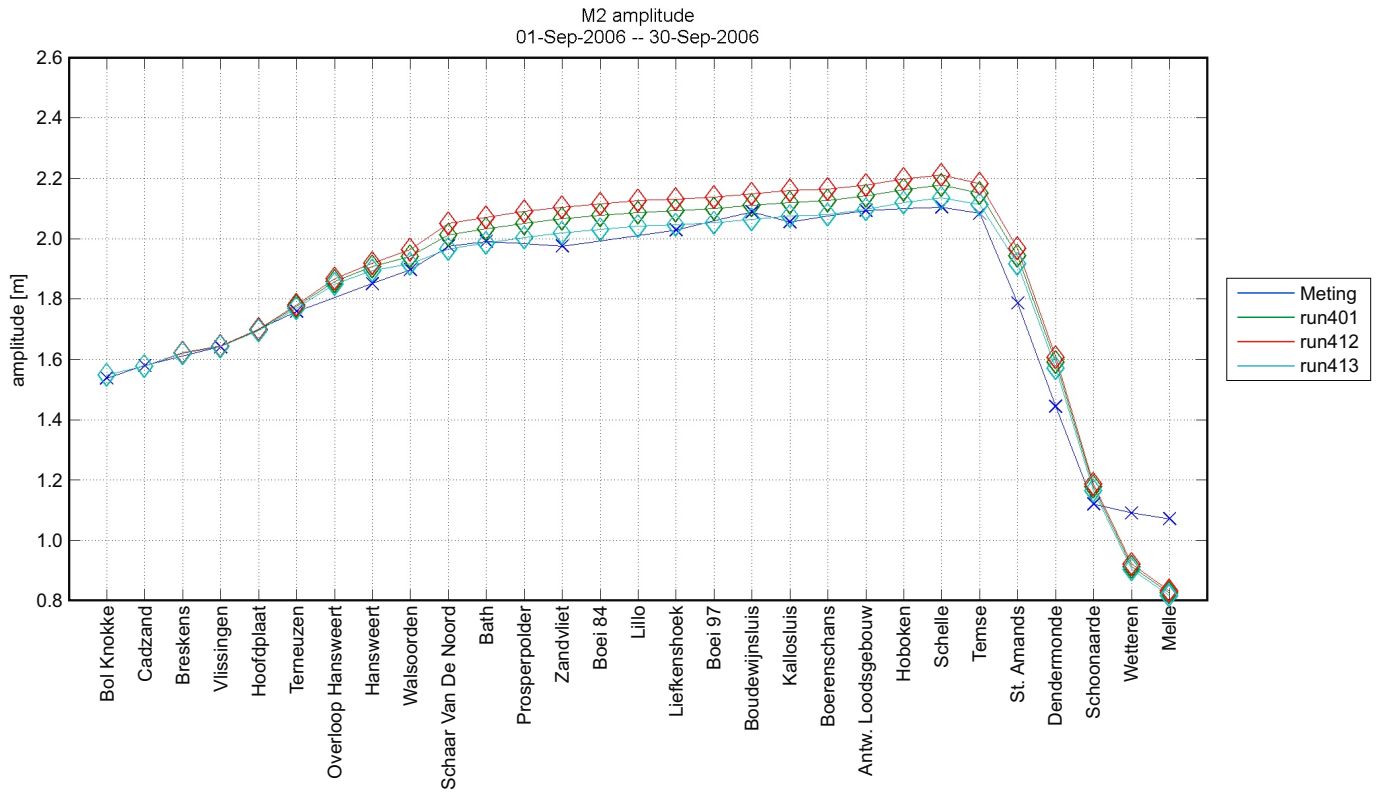
Faseverschil 2M2-M4
01-Sep-2006 -- 30-Sep-2006



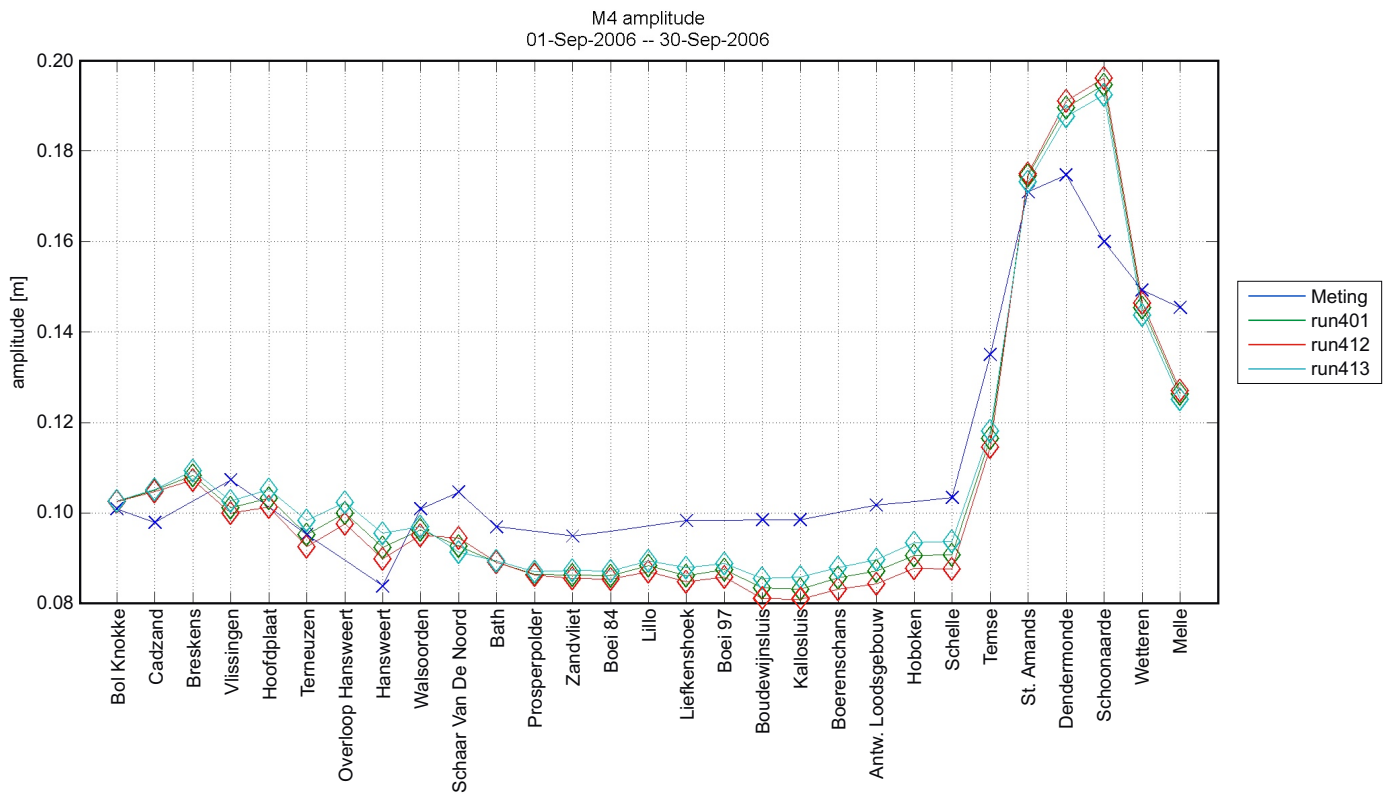
Verhouding fase M4/M2
01-Sep-2006 -- 30-Sep-2006



Faseverschil 2M2-M4 (boven) en fase verhouding M4/M2 (onder)
voor run401, run410 en run411
Effect wijzigen ruwheid deelgebied 4

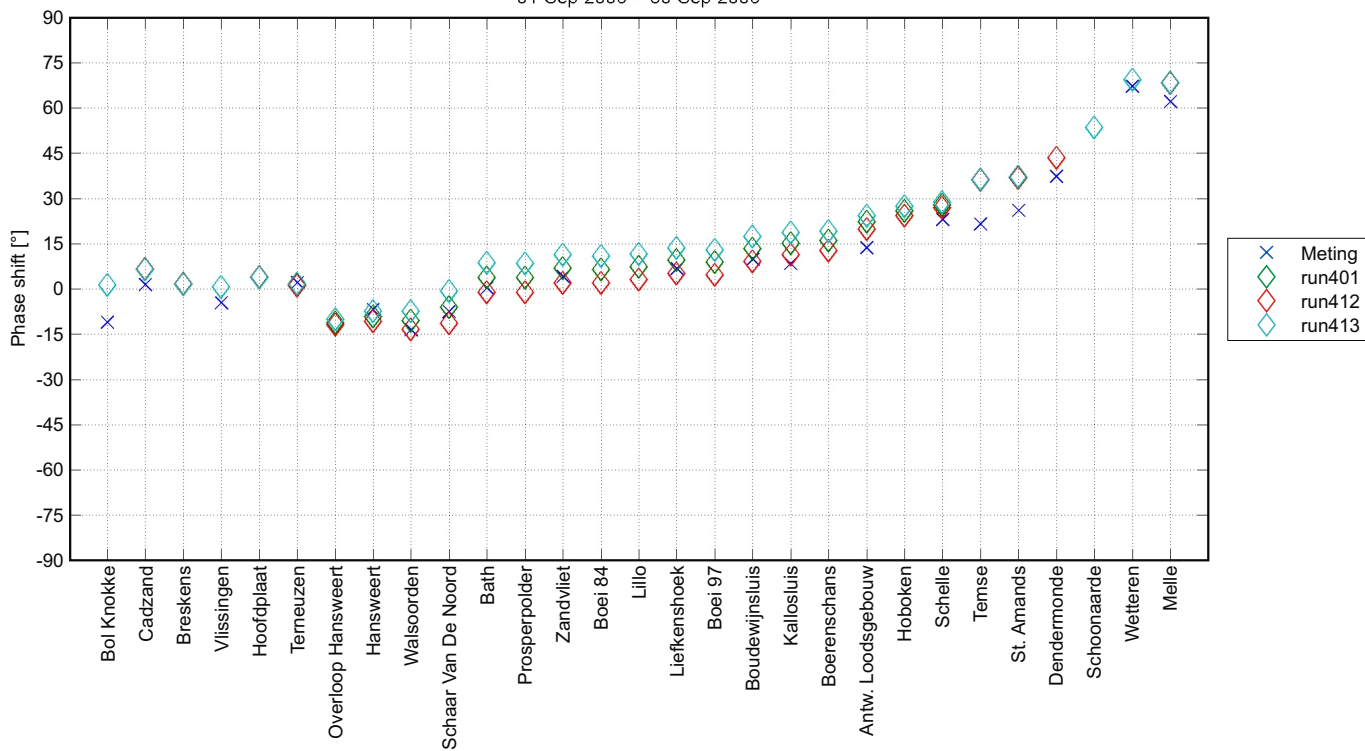


M2 amplitude (boven) en S2 amplitude (onder) voor run401, run412 en run413
Effect wijzigen ruwheid deelgebied 5

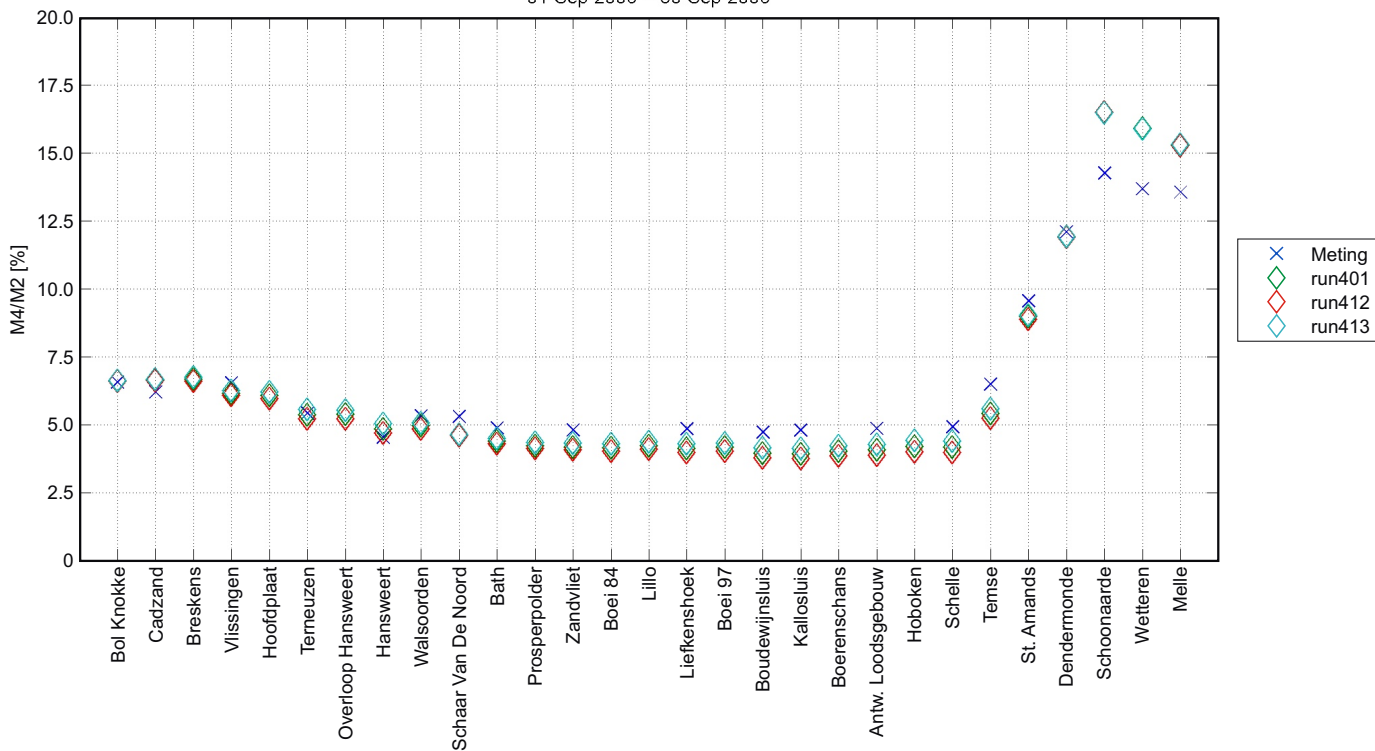


M4 amplitude voor run401, run412 en run413
Effect wijzigen ruwheid deelgebied 5

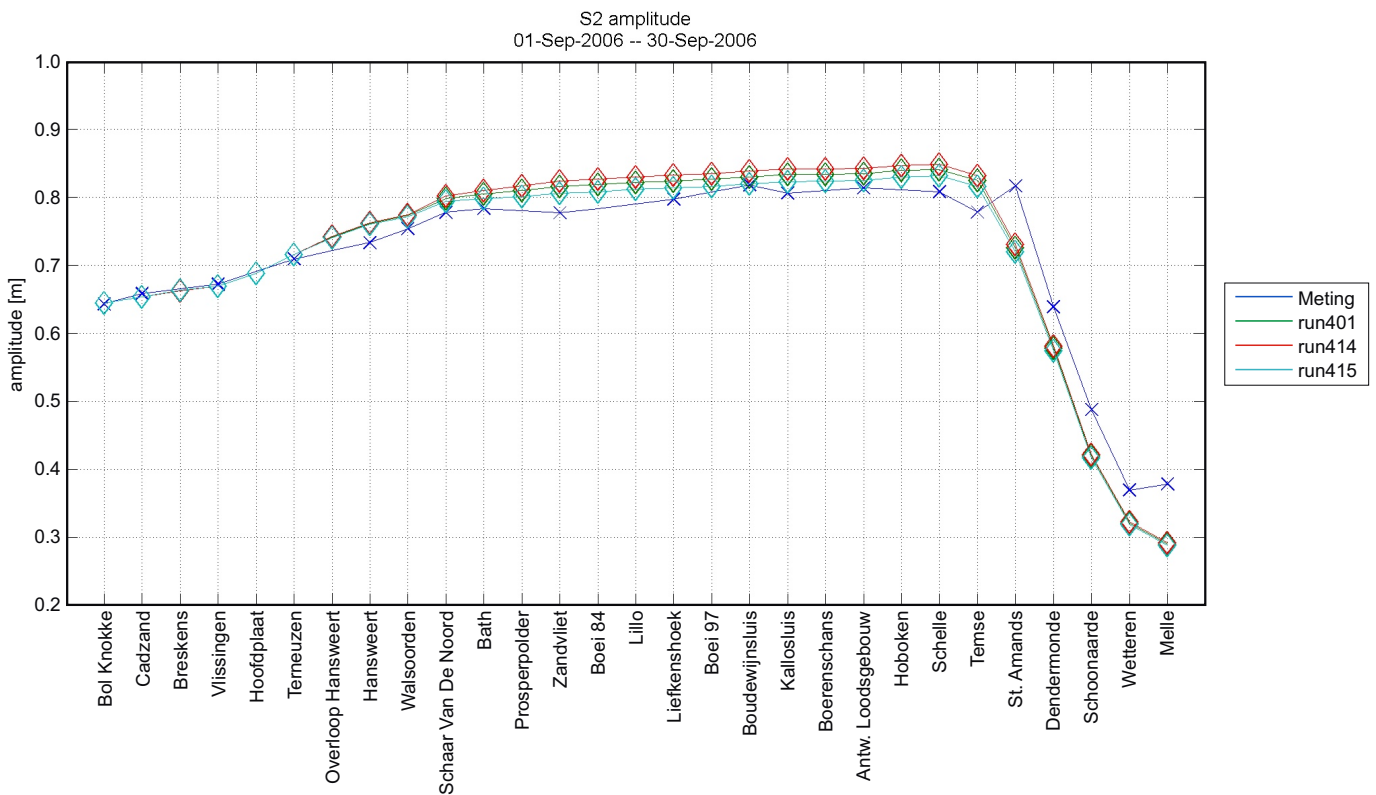
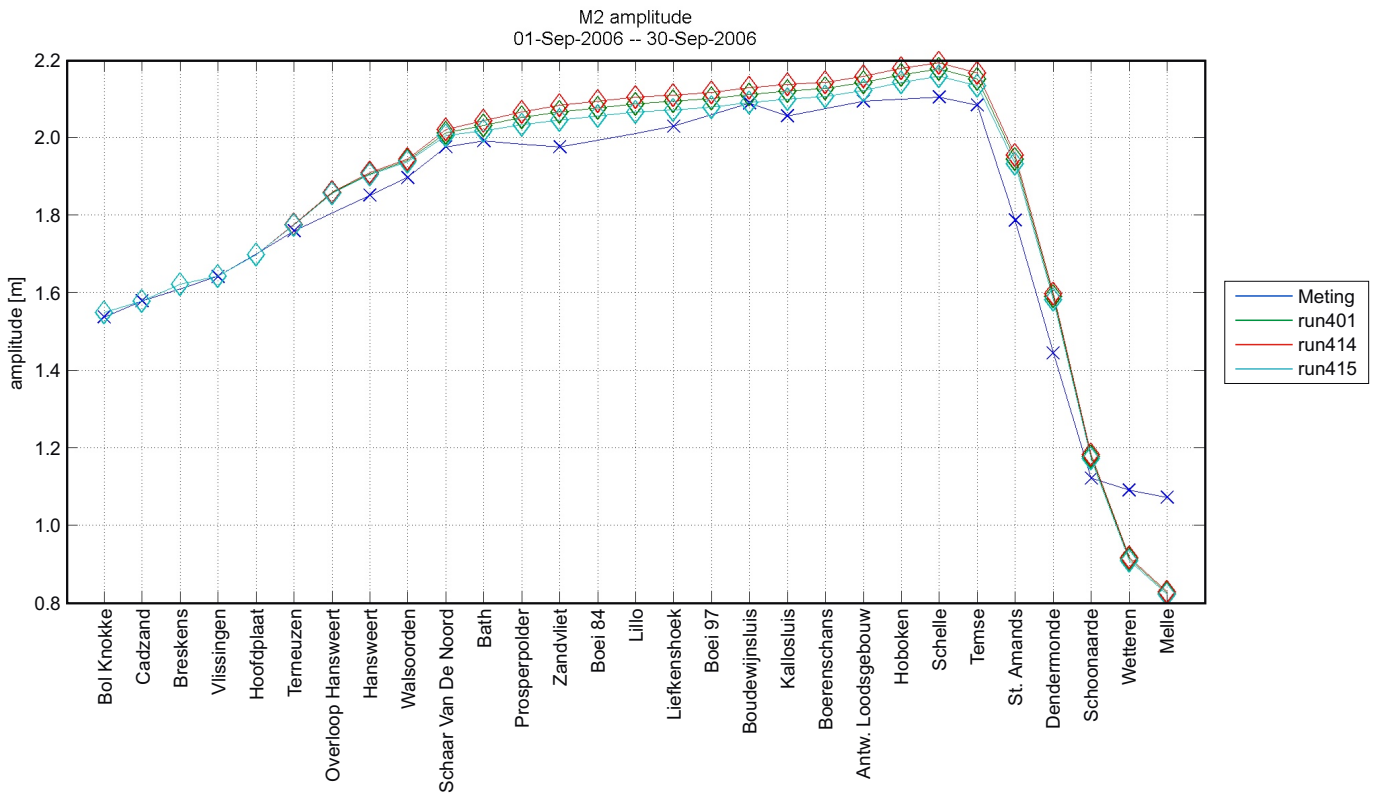
Faseverschil 2M2-M4
01-Sep-2006 -- 30-Sep-2006



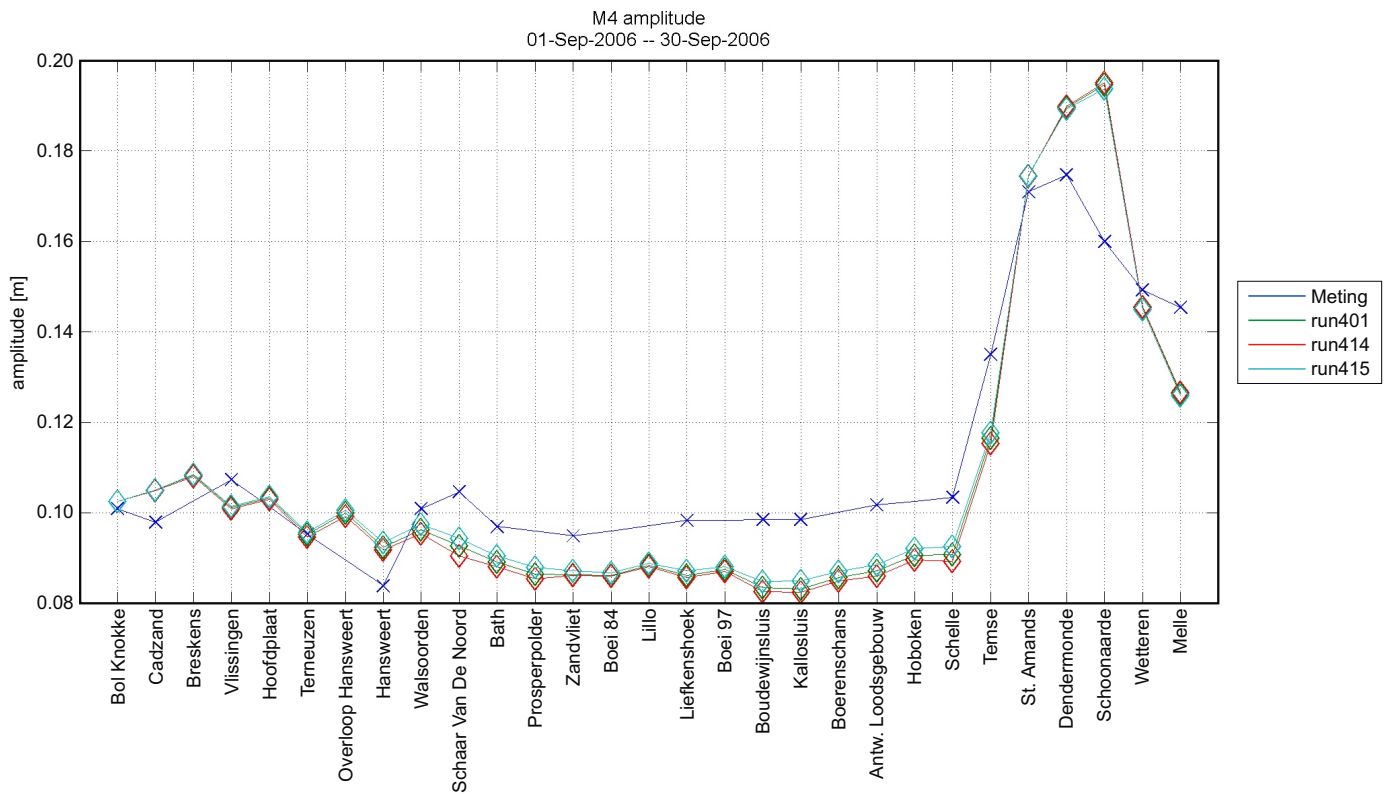
Verhouding fase M4/M2
01-Sep-2006 -- 30-Sep-2006



Faseverschil 2M2-M4 (boven) en fase verhouding M4/M2 (onder)
voor run401, run412 en run413
Effect wijzigen ruwheid deelgebied 5

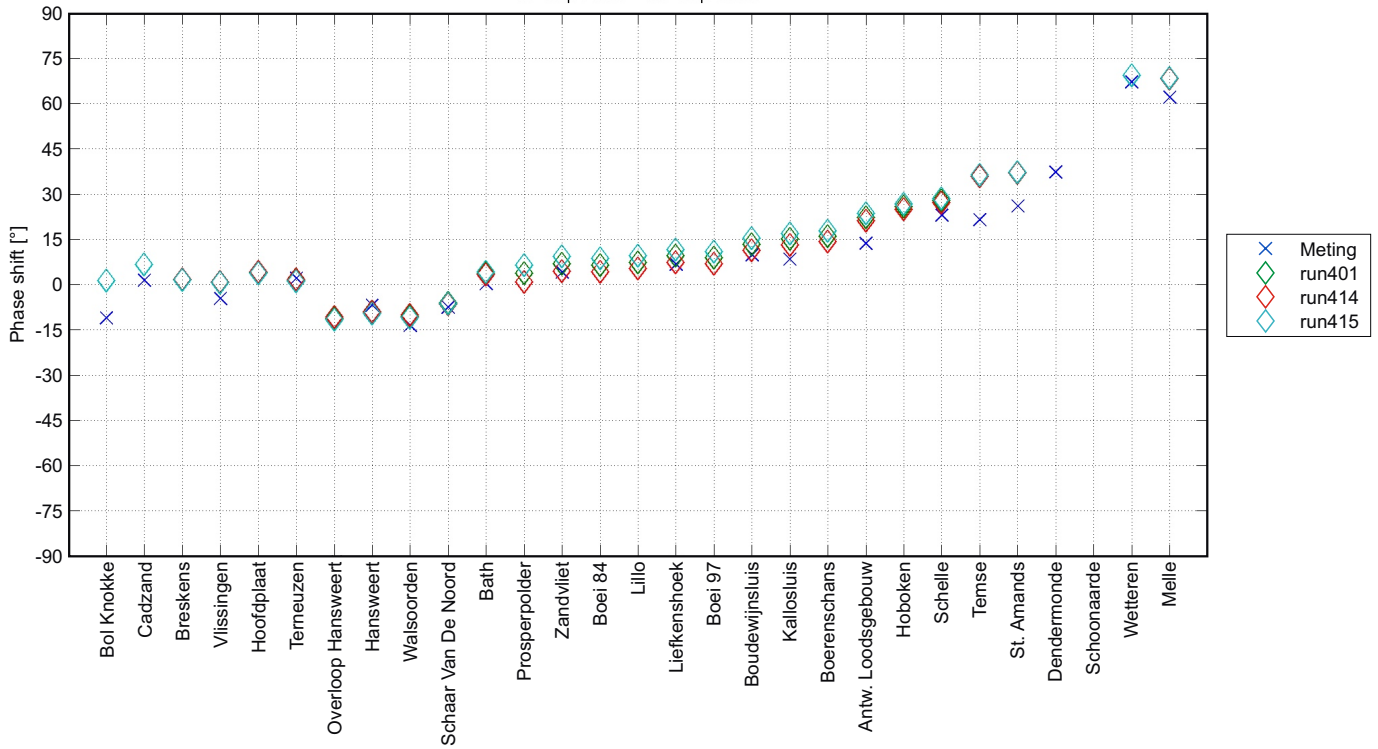


M2 amplitude (boven) en S2 amplitude (onder) voor run401, run414 en run415
Effect wijzigen ruwheid deelgebied 6

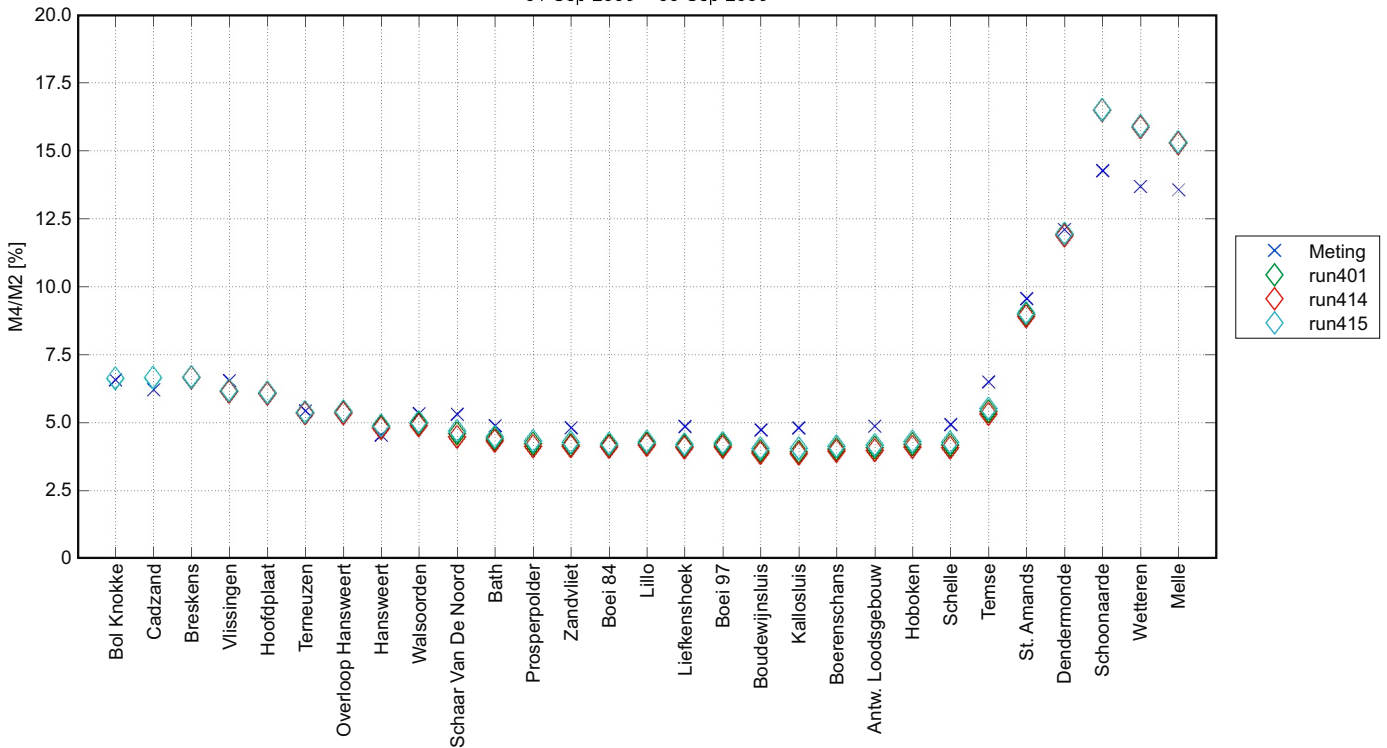


M4 amplitude voor run401, run414 en run415
Effect wijzigen ruwheid deelgebied 6

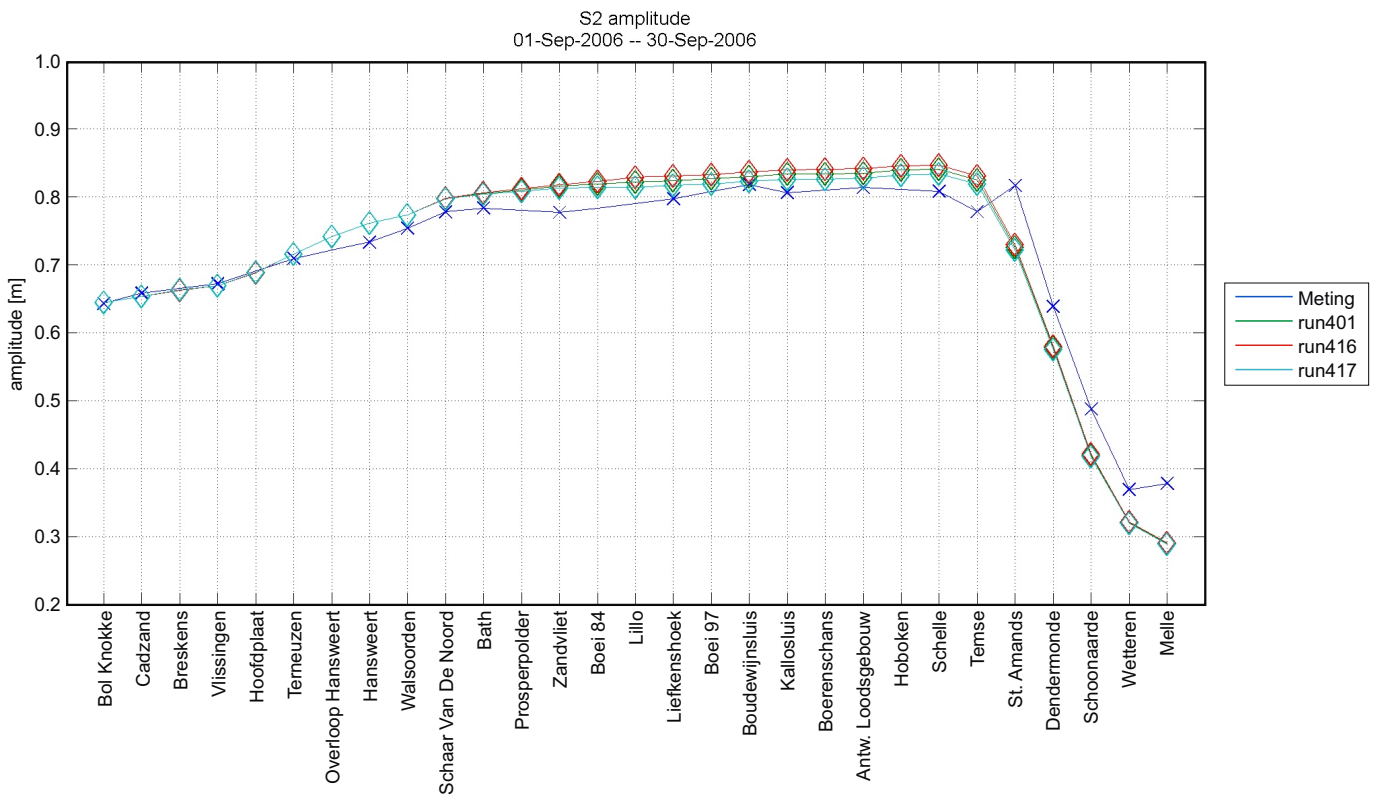
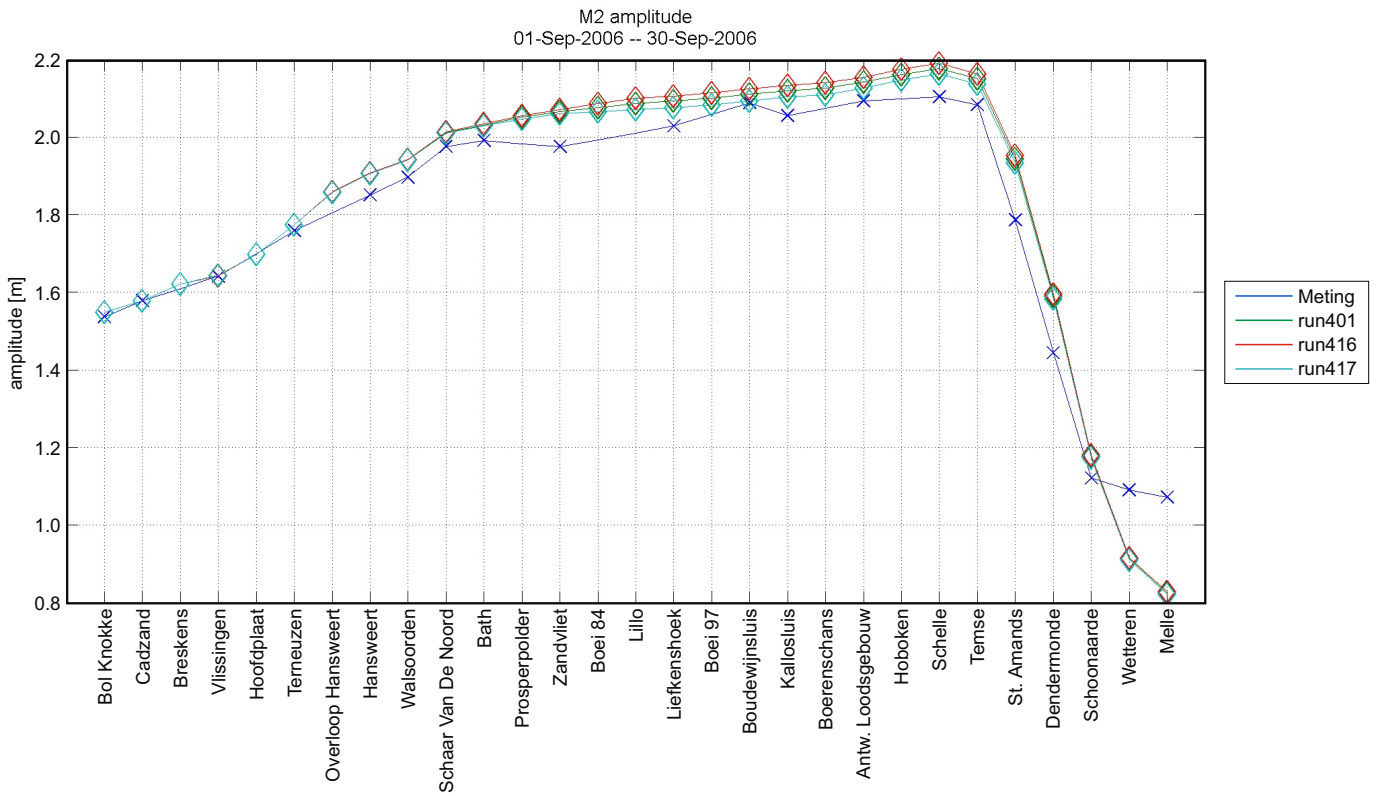
Faseverschil 2M2-M4
01-Sep-2006 -- 30-Sep-2006



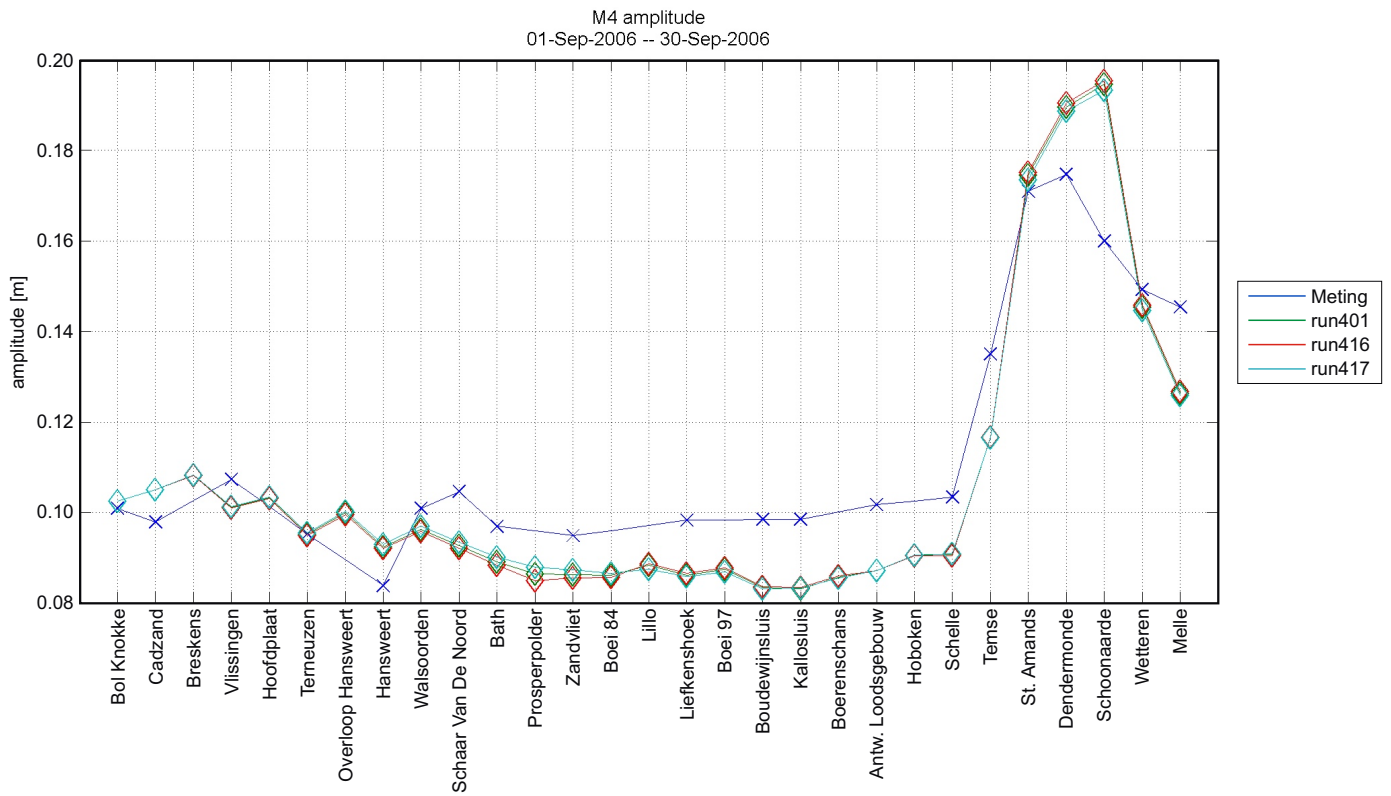
Verhouding fase M4/M2
01-Sep-2006 -- 30-Sep-2006



Faseverschil 2M2-M4 (boven) en fase verhouding M4/M2 (onder)
voor run401, run414 en run415
Effect wijzigen ruwheid deelgebied 6

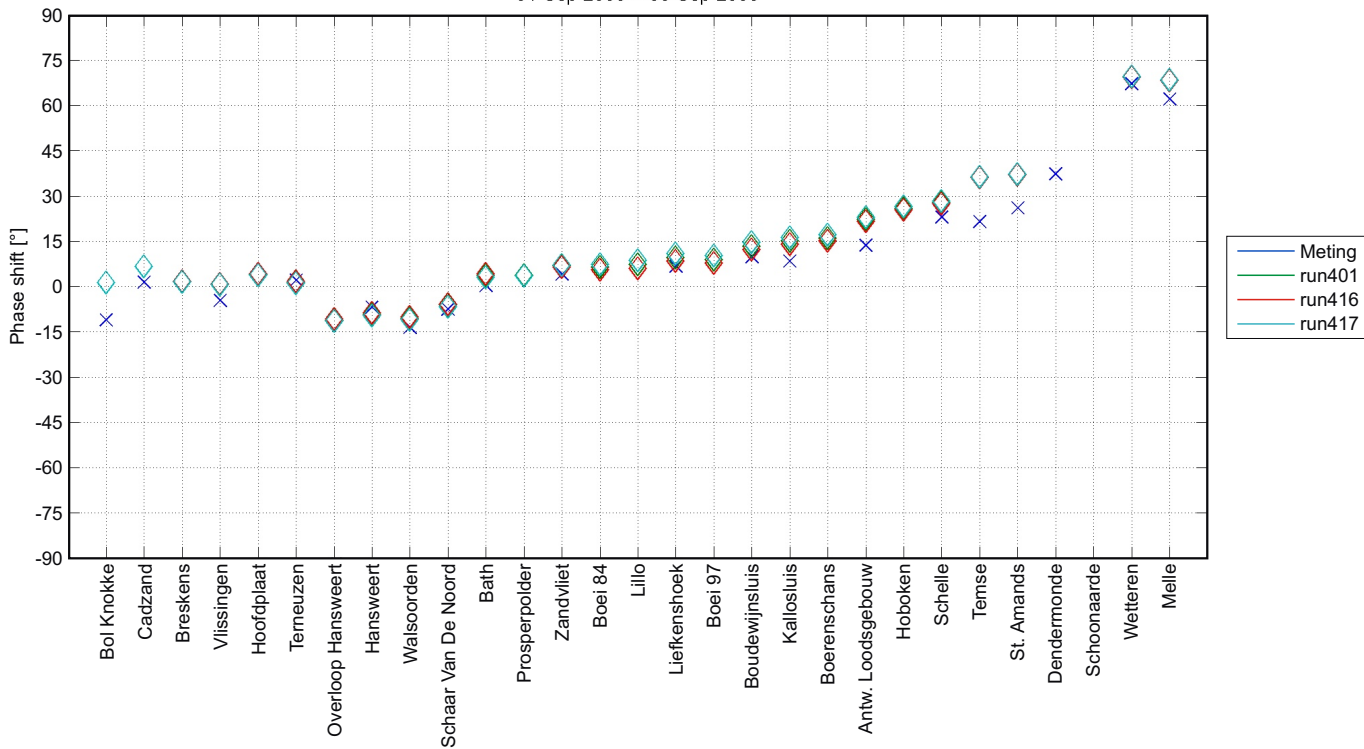


M2 amplitude (boven) en S2 amplitude (onder) voor run401, run416 en run417
Effect wijzigen ruwheid deelgebied 7

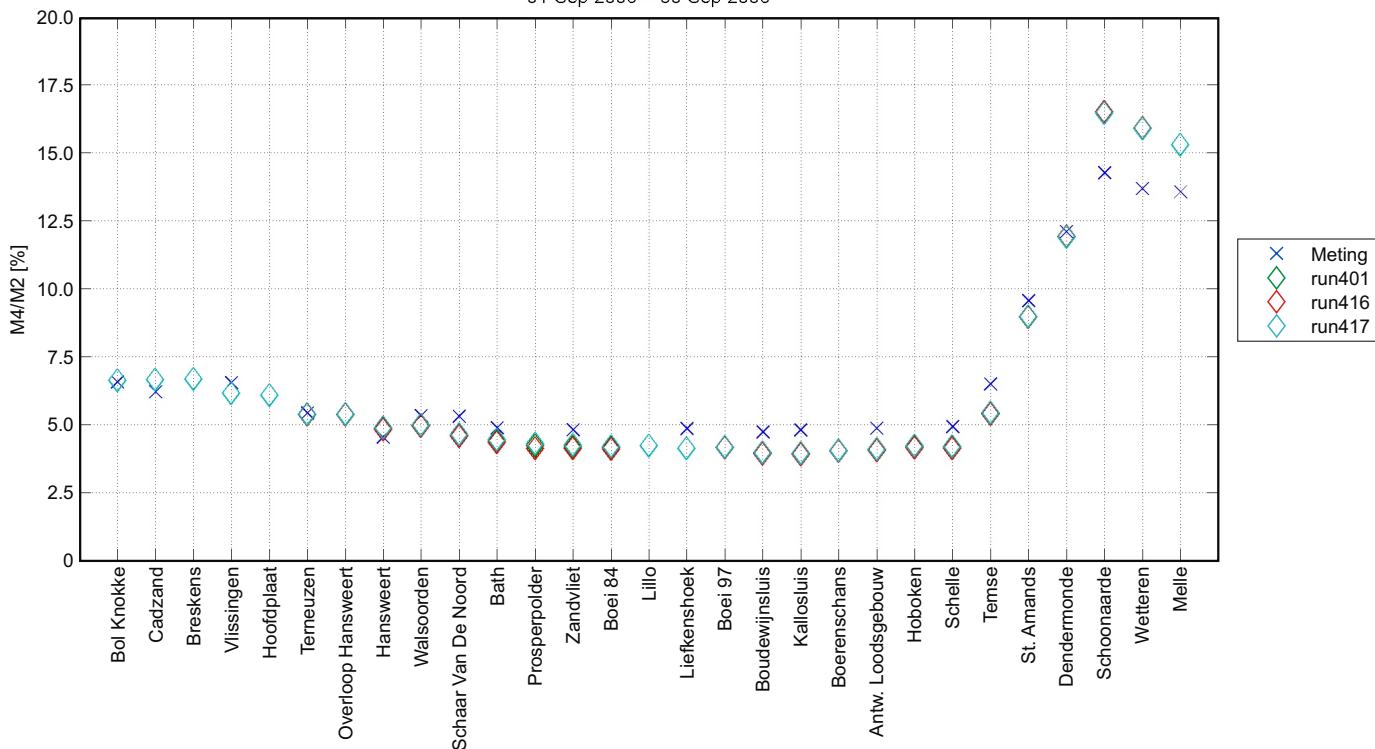


M4 amplitude voor run401, run416 en run417
Effect wijzigen ruwheid deelgebied 7

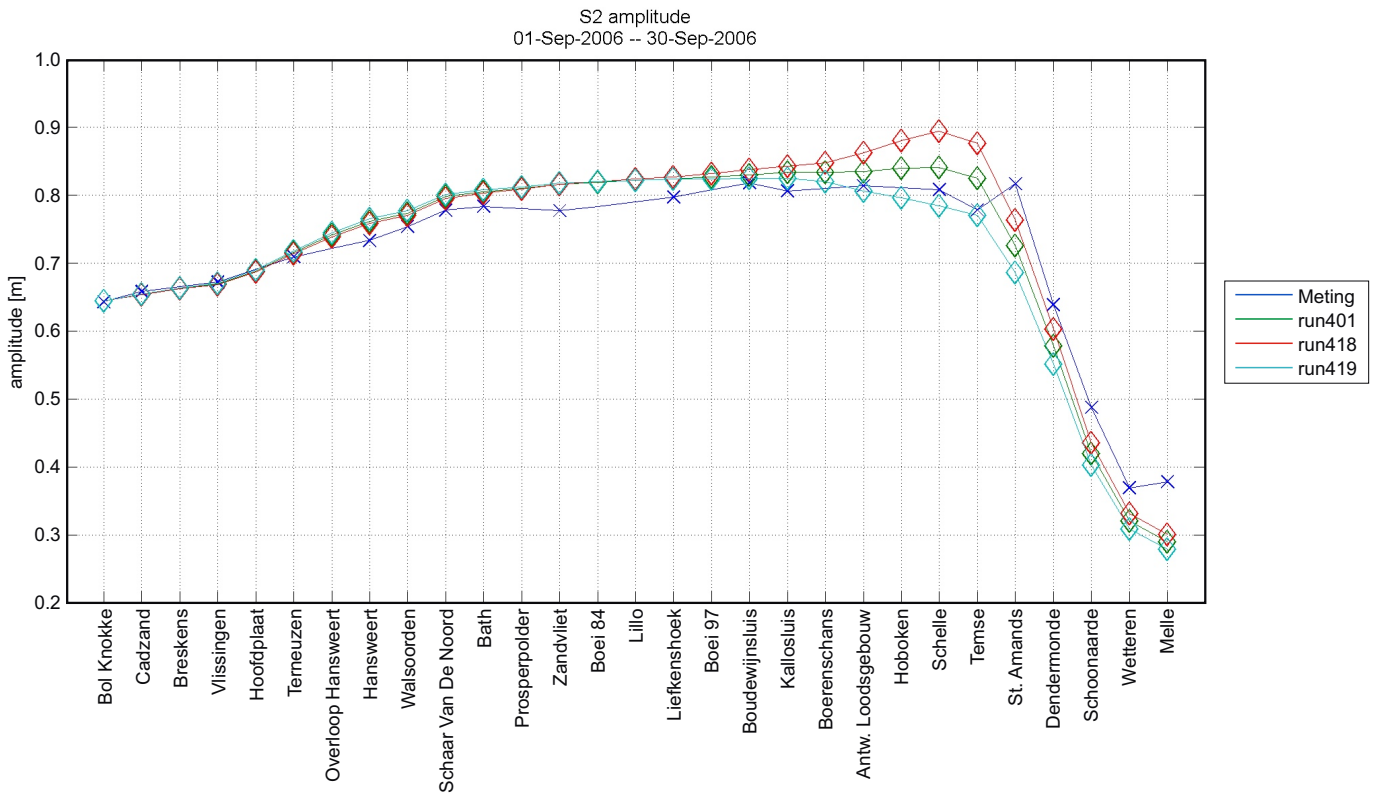
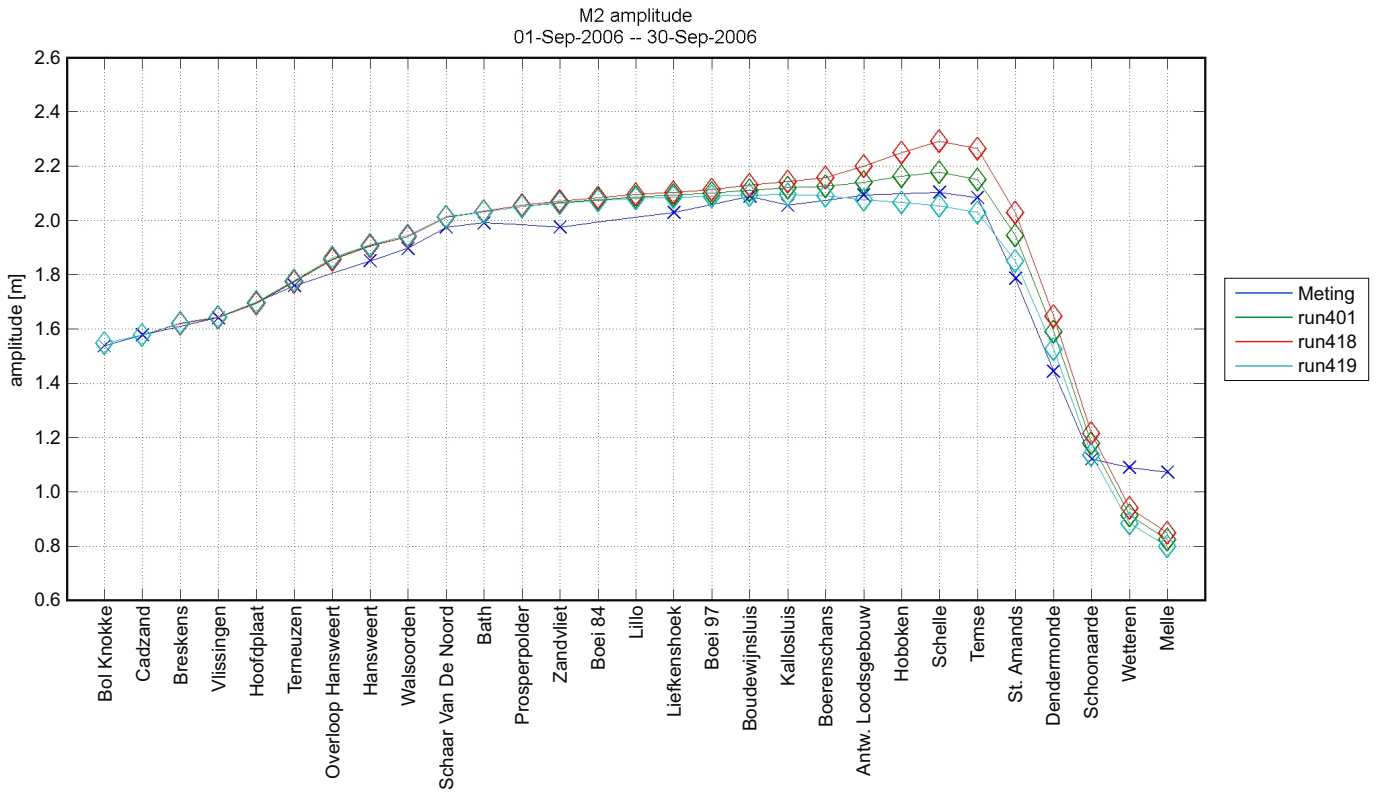
Faseverschil 2M2-M4
01-Sep-2006 -- 30-Sep-2006



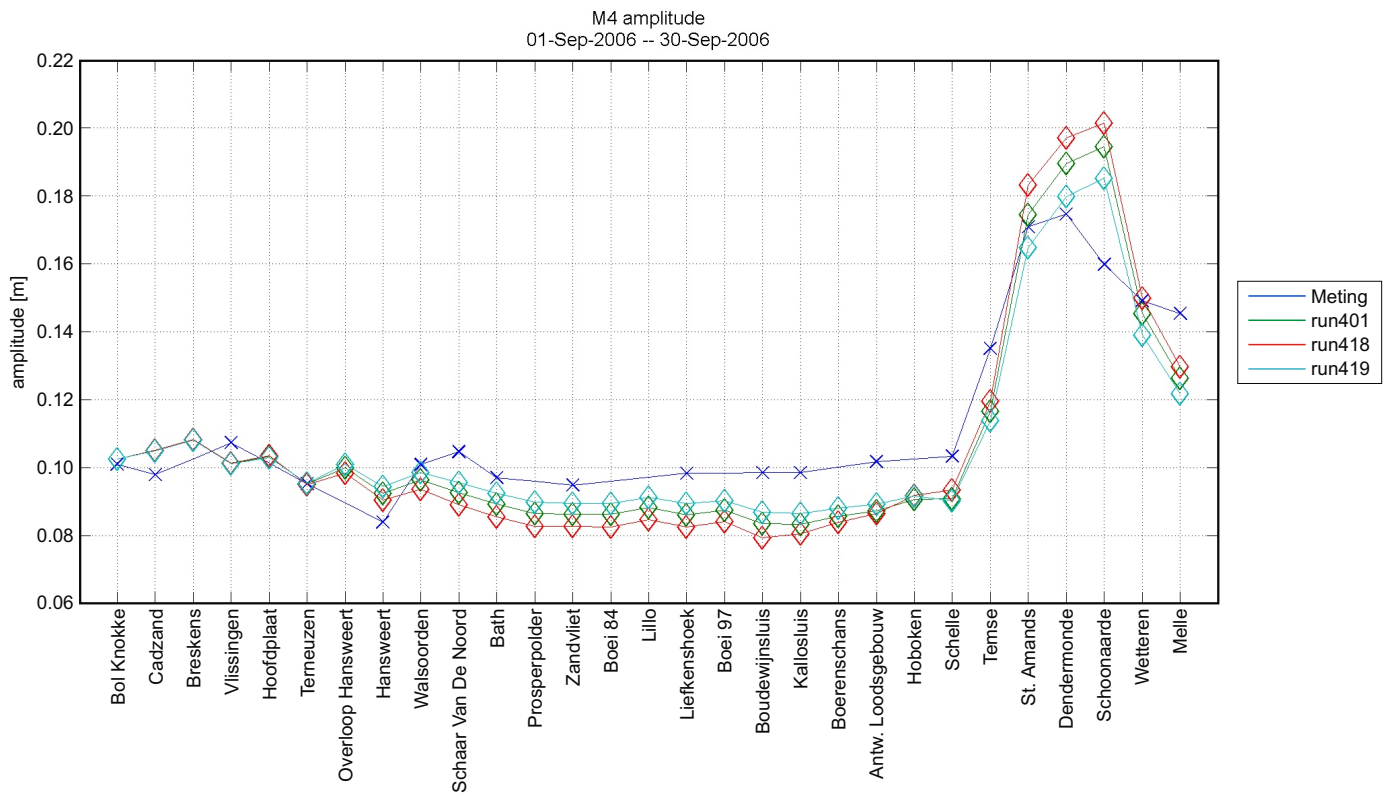
Verhouding fase M4/M2
01-Sep-2006 -- 30-Sep-2006



Faseverschil 2M2-M4 (boven) en fase verhouding M4/M2 (onder)
voor run401, run416 en run417
Effect wijzigen ruwheid deelgebied 7

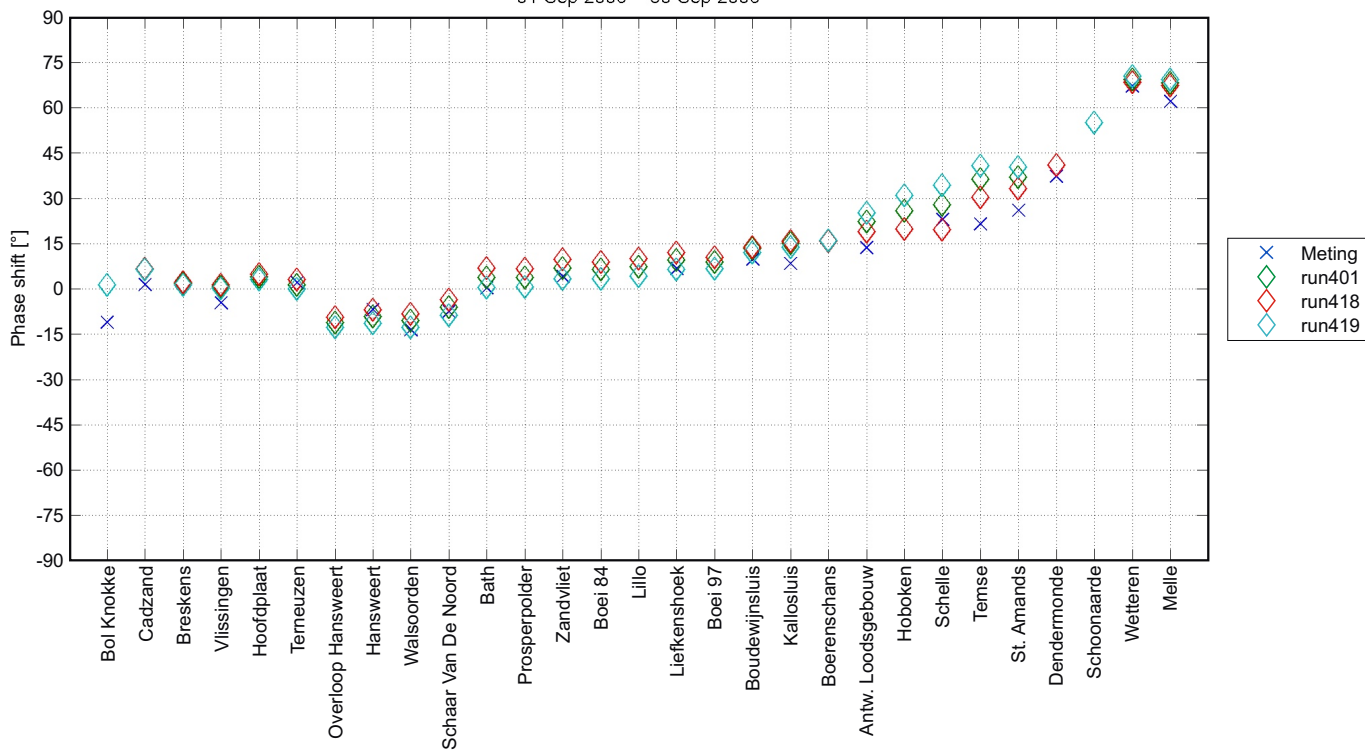


M2 amplitude (boven) en S2 amplitude (onder) voor run401, run418 en run419
Effect wijzigen ruwheid deelgebied 8

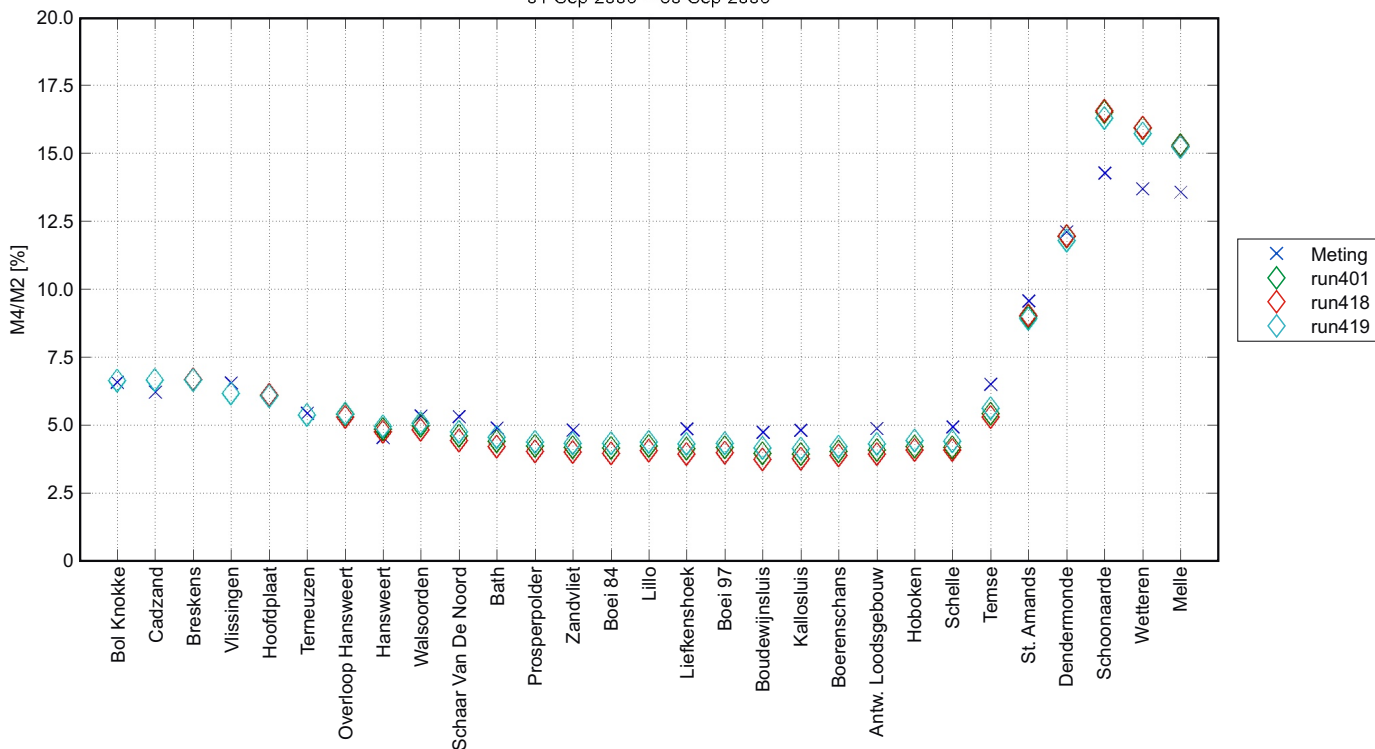


M4 amplitude voor run401, run418 en run419
Effect wijzigen ruwheid deelgebied 8

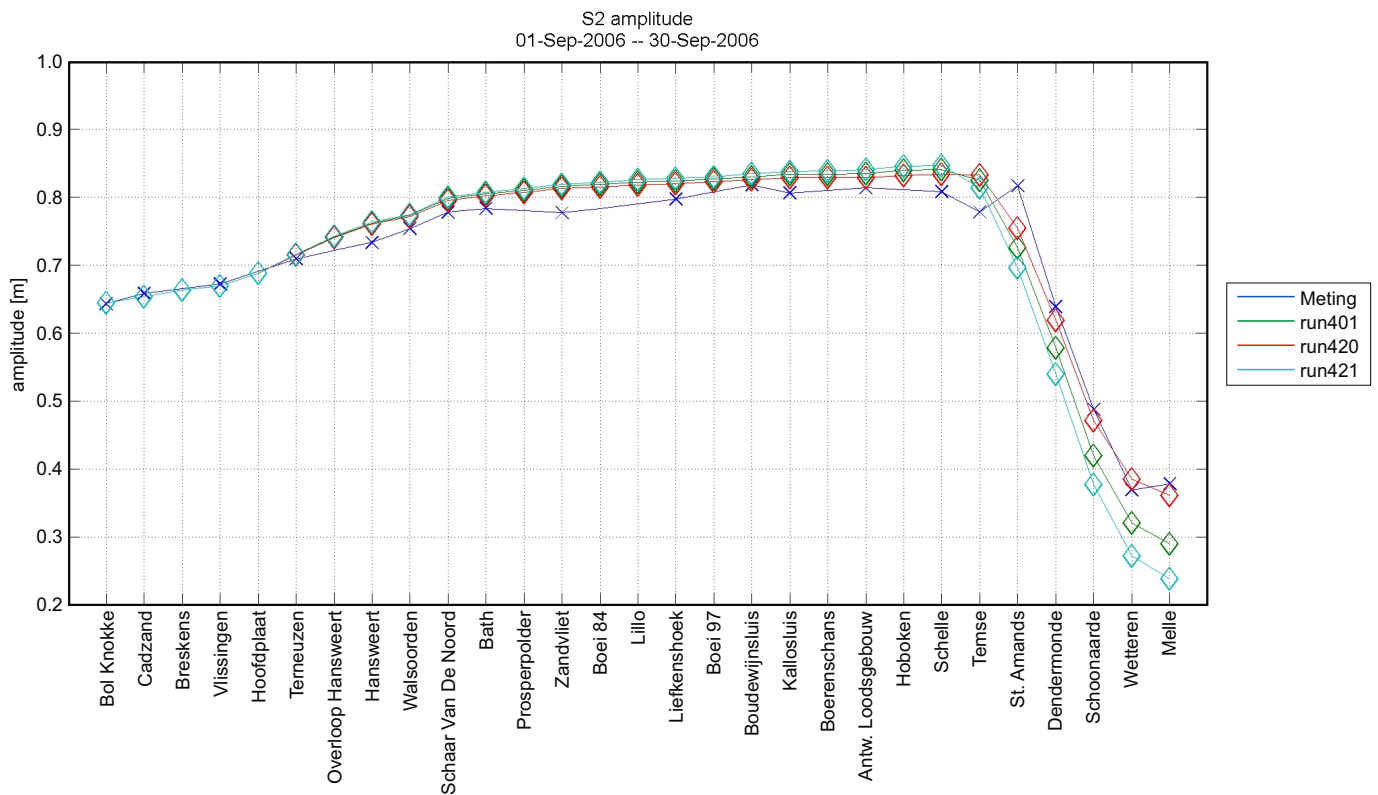
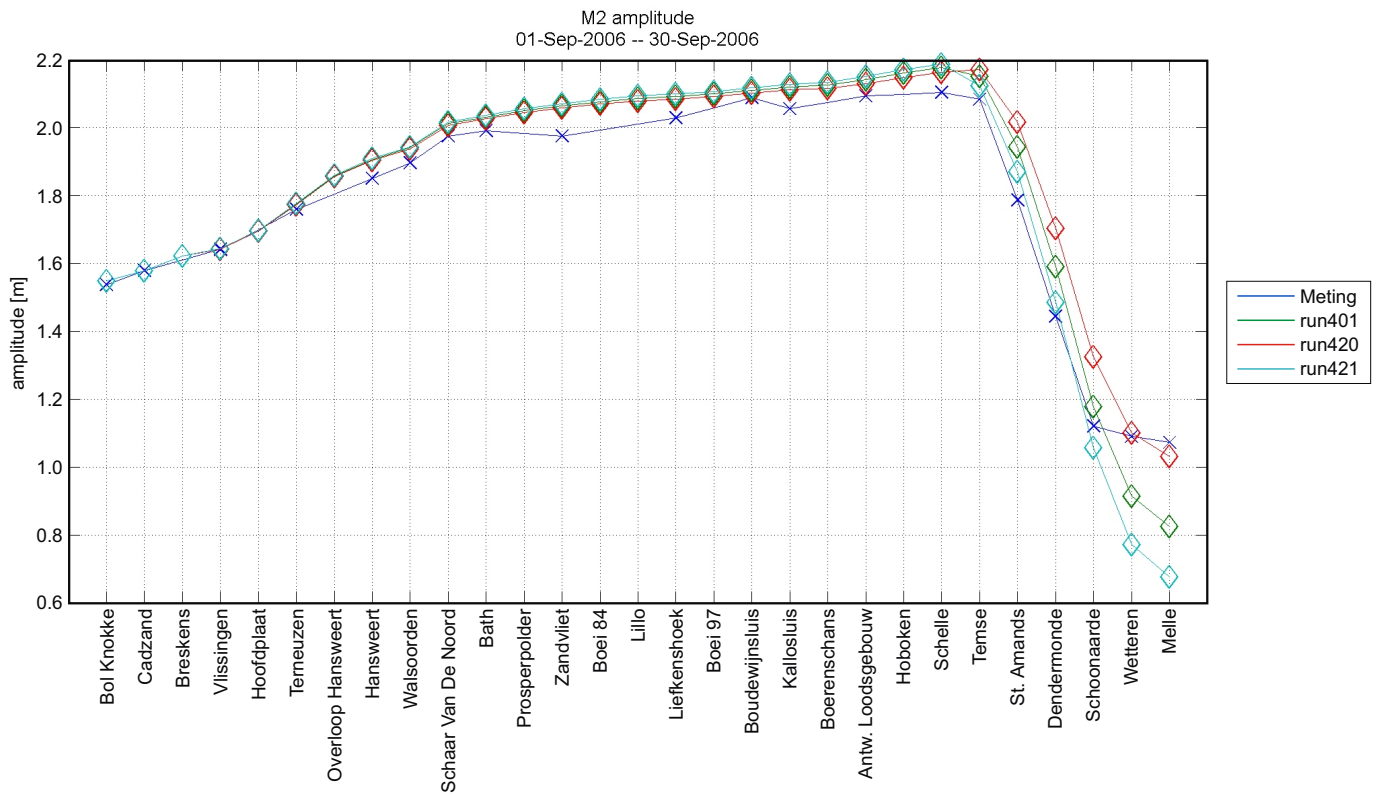
Faseverschil 2M2-M4
01-Sep-2006 -- 30-Sep-2006



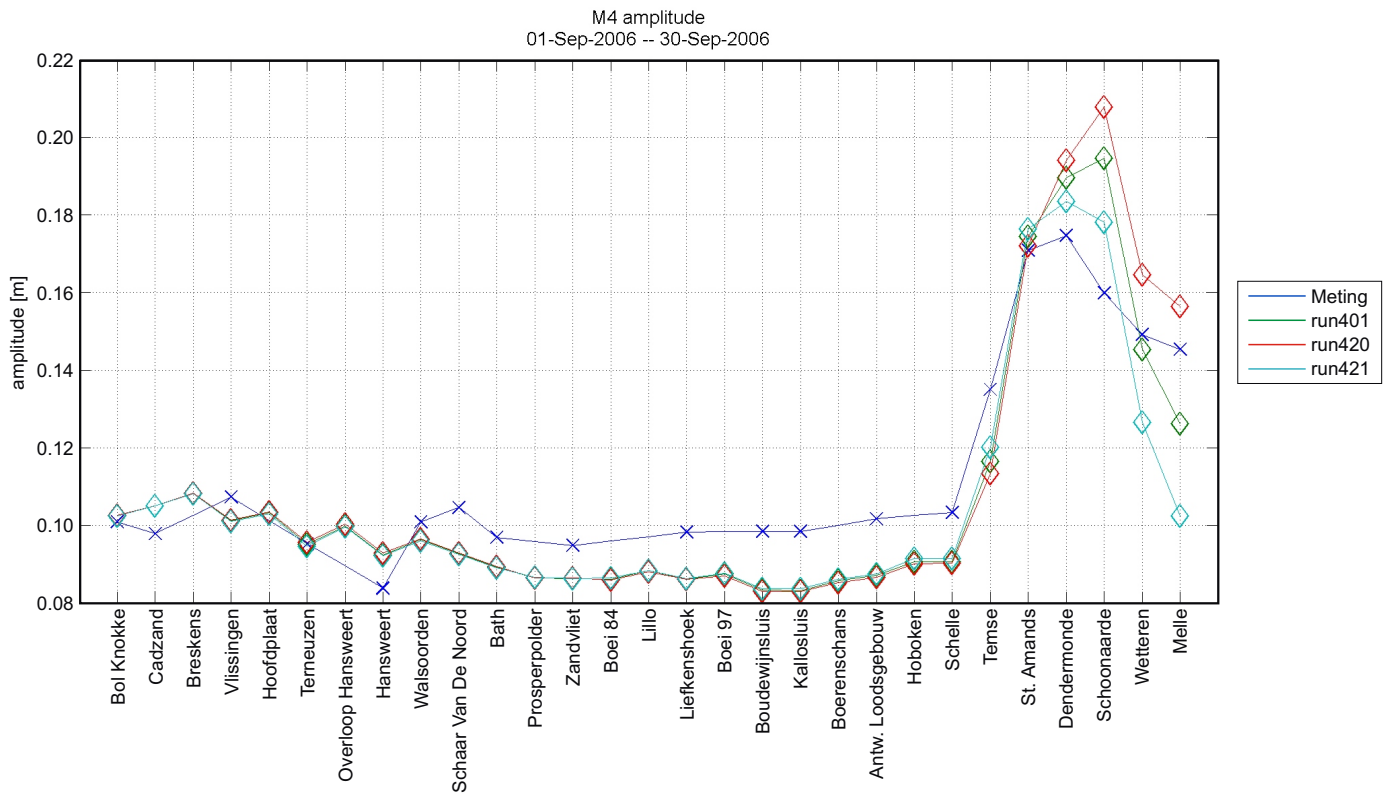
Verhouding fase M4/M2
01-Sep-2006 -- 30-Sep-2006



Faseverschil 2M2-M4 (boven) en fase verhouding M4/M2 (onder)
voor run401, run418 en run419
Effect wijzigen ruwheid deelgebied 8

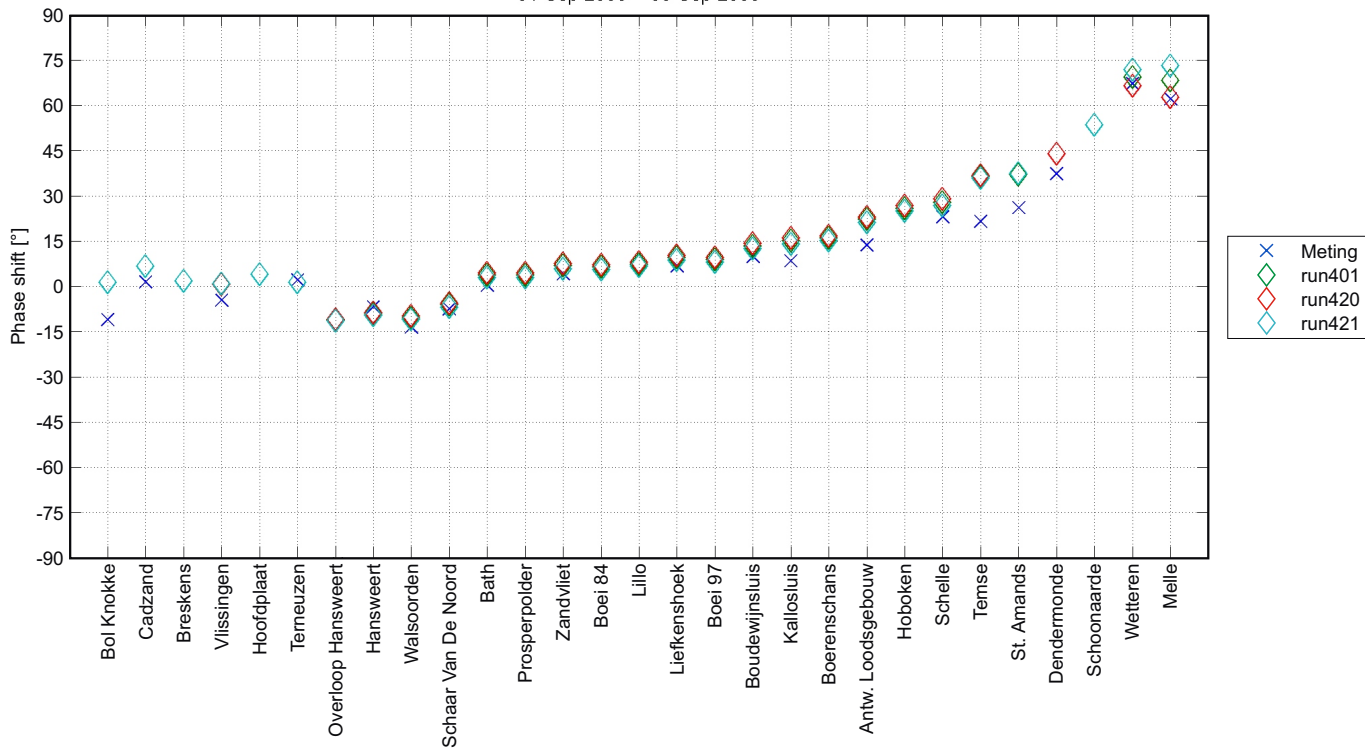


M2 amplitude (boven) en S2 amplitude (onder) voor run401, run420 en run421
Effect wijzigen ruwheid deelgebied 9

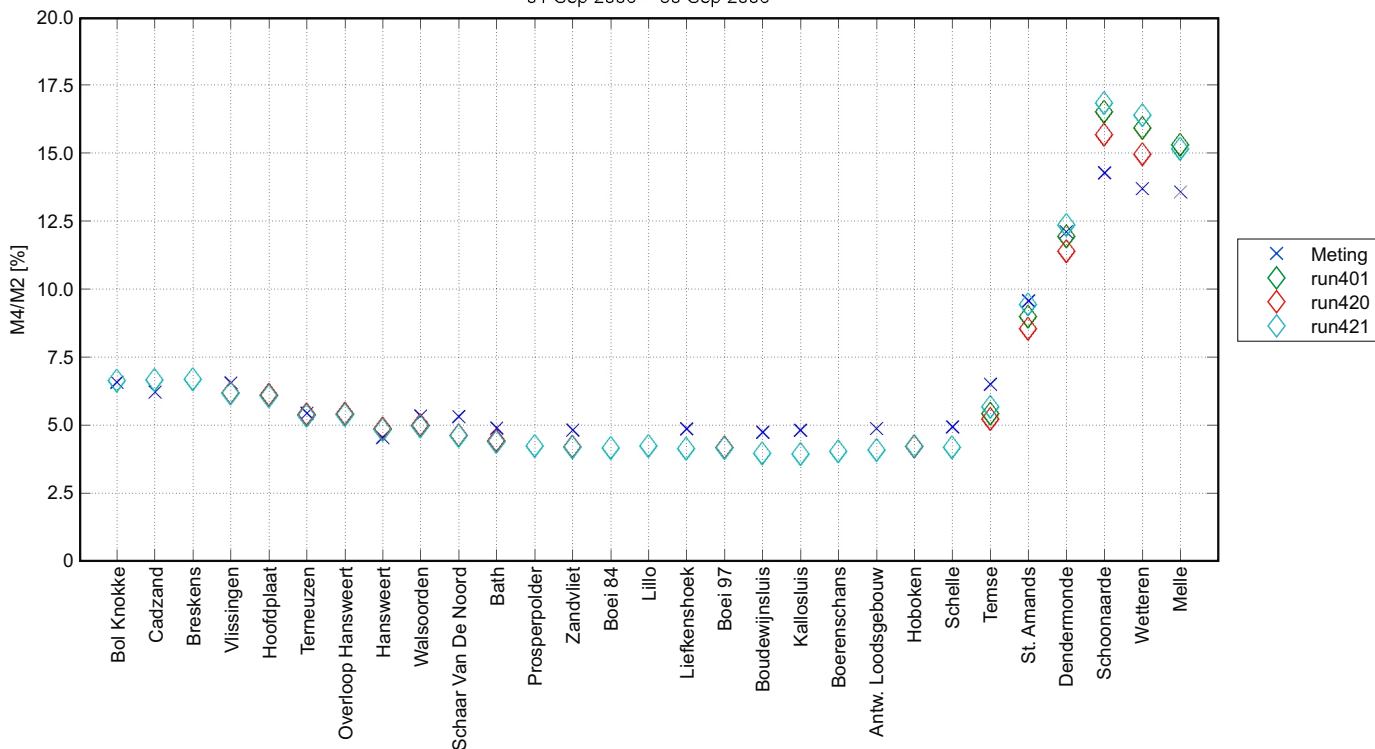


M4 amplitude voor run401, run420 en run421
Effect wijzigen ruwheid deelgebied 9

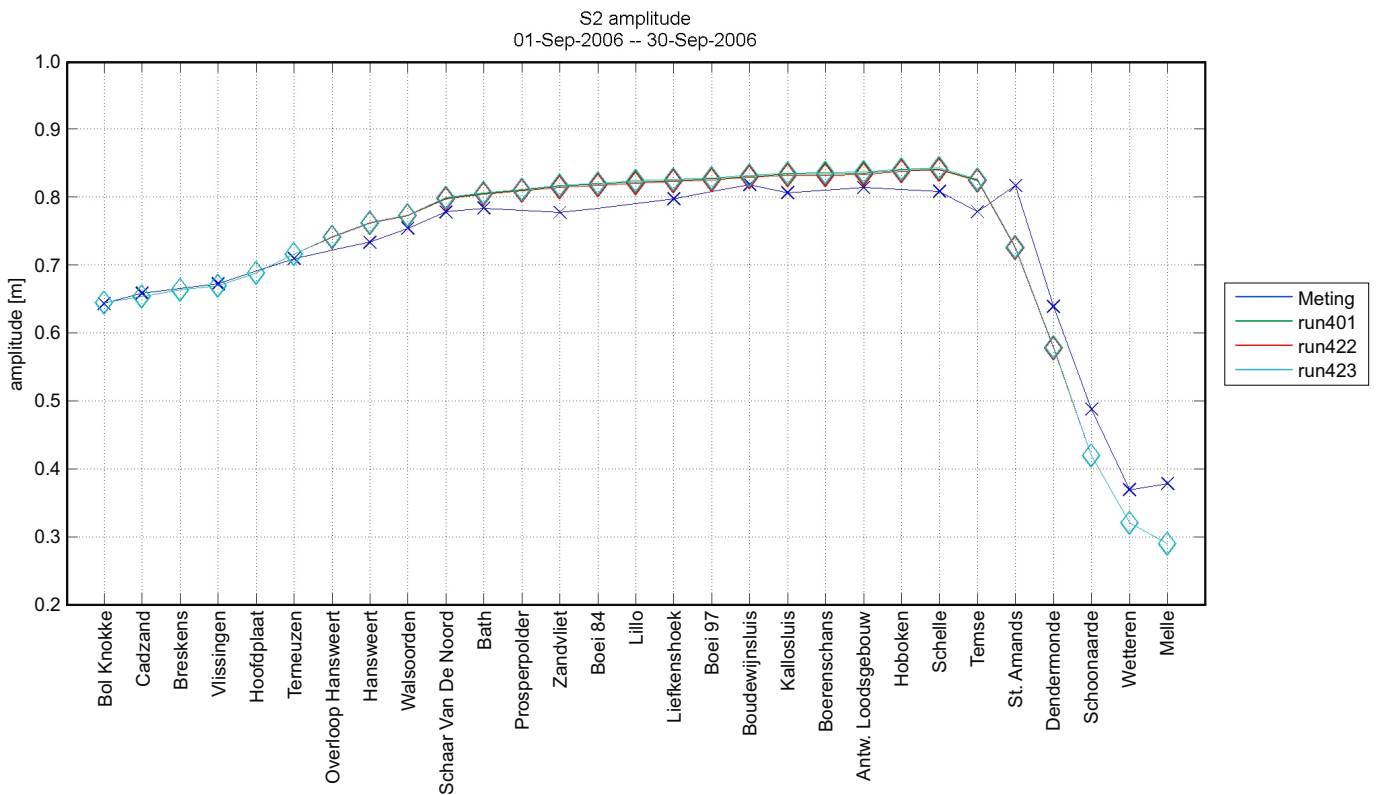
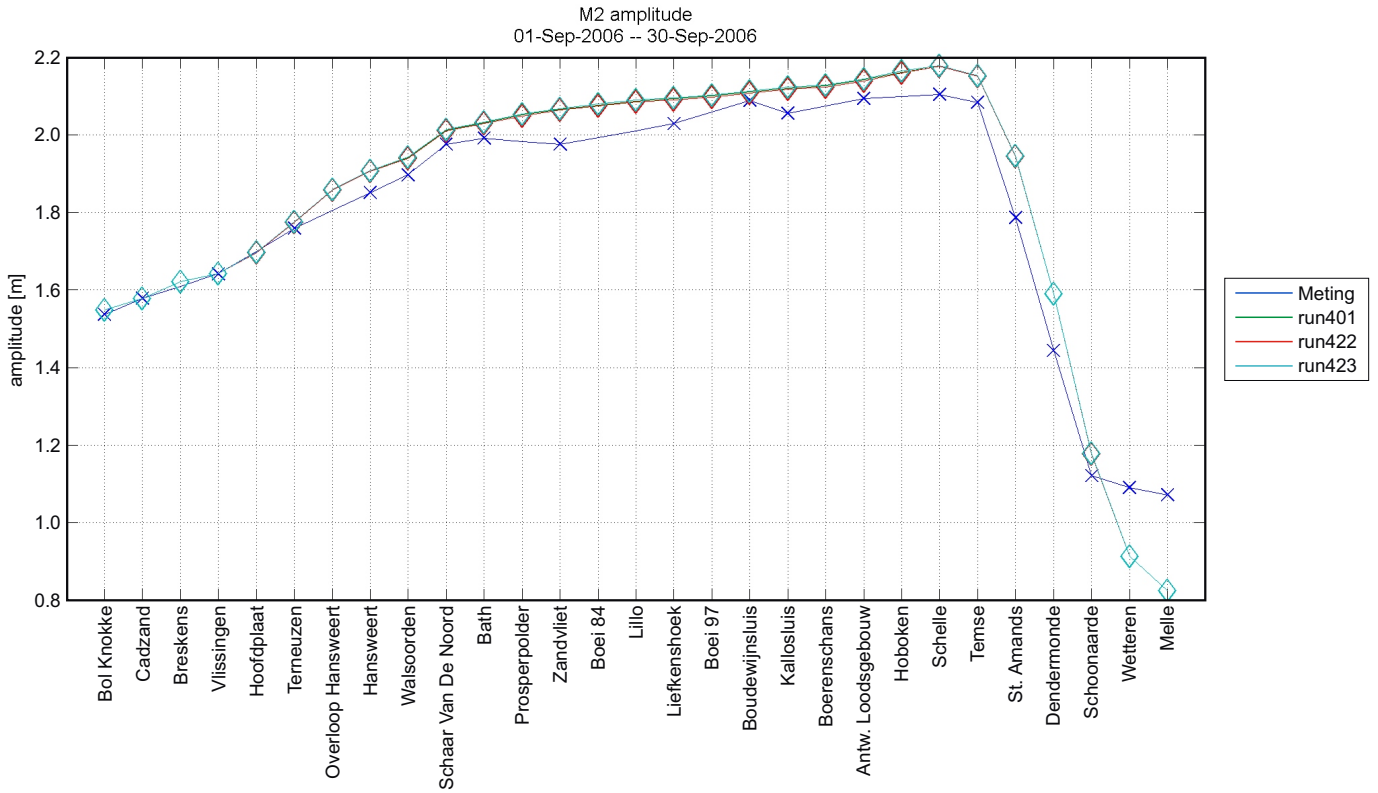
Faseverschil 2M2-M4
01-Sep-2006 -- 30-Sep-2006



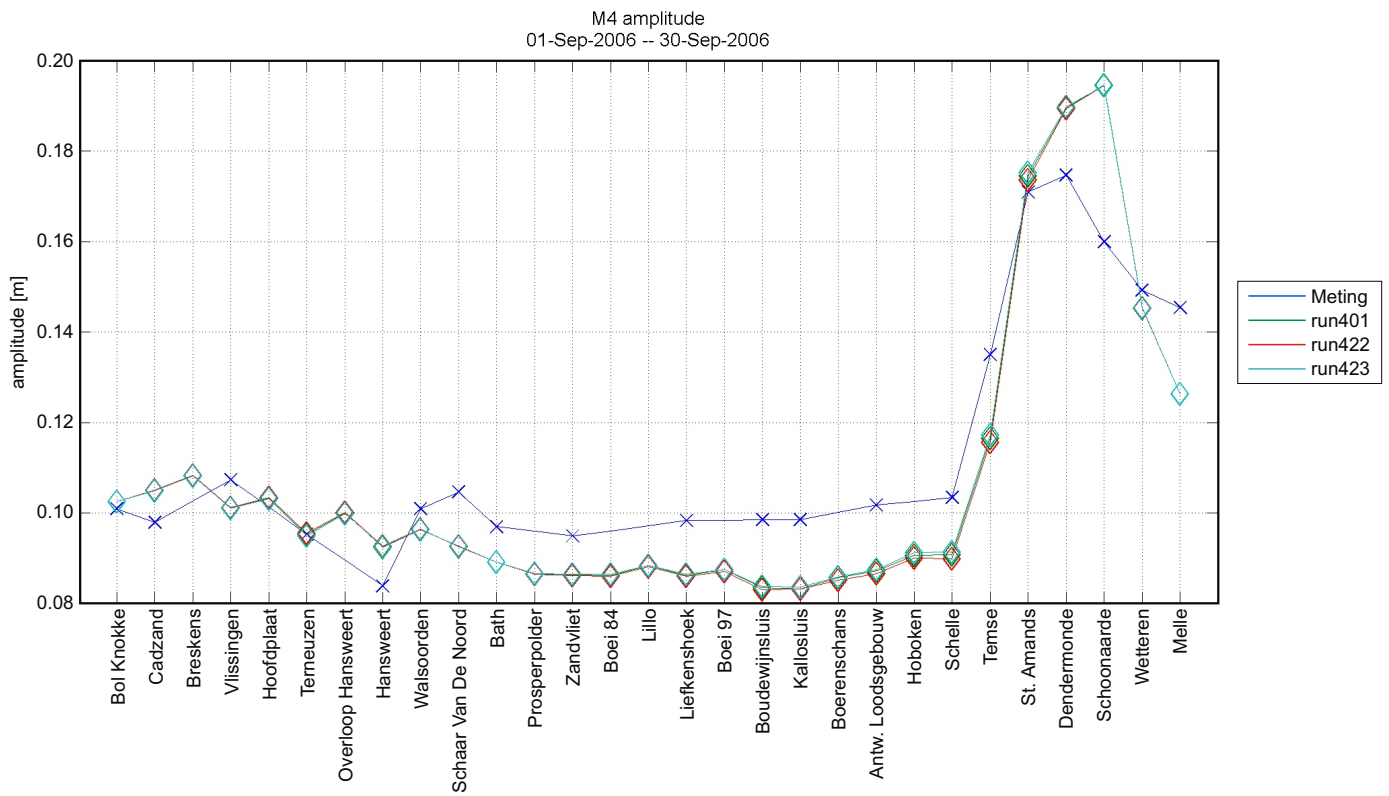
Verhouding fase M4/M2
01-Sep-2006 -- 30-Sep-2006



Faseverschil 2M2-M4 (boven) en fase verhouding M4/M2 (onder)
voor run401, run420 en run421
Effect wijzigen ruwheid deelgebied 9

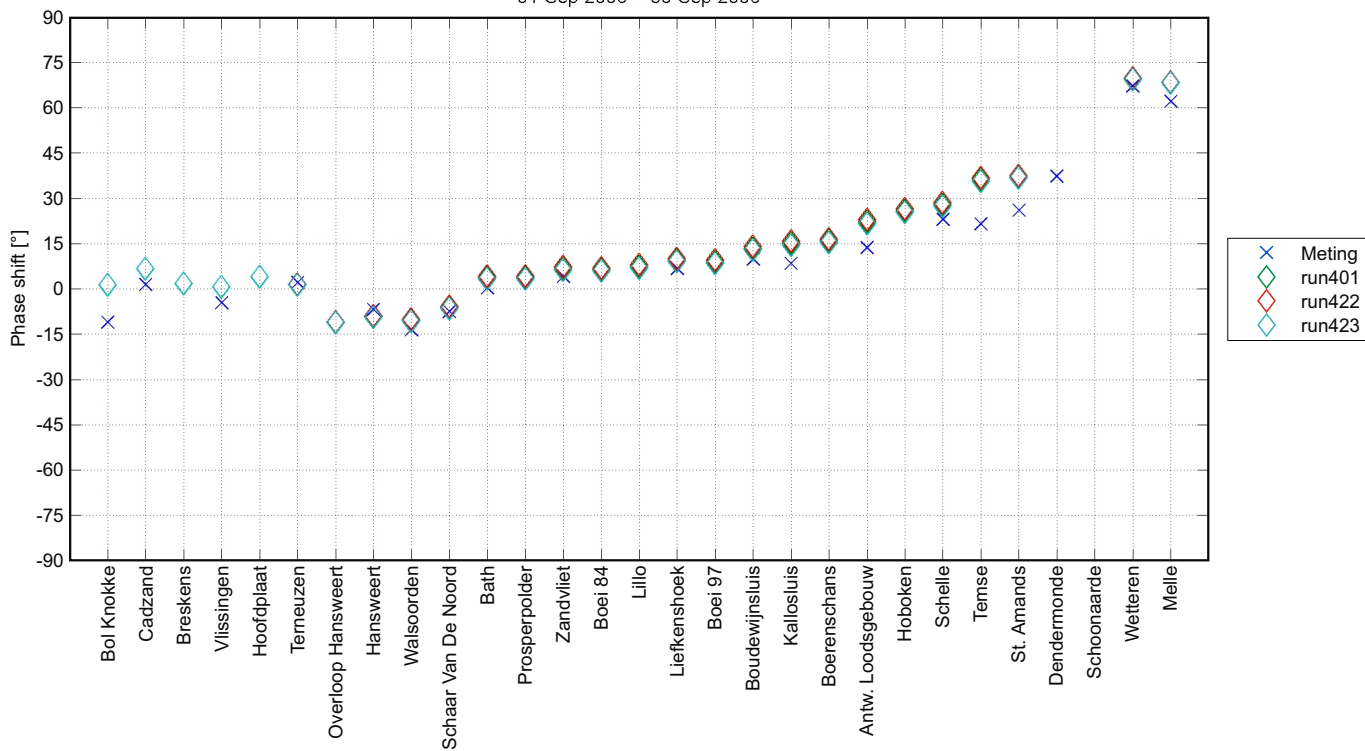


M2 amplitude (boven) en S2 amplitude (onder) voor run401, run422 en run423
Effect wijzigen ruwheid deelgebied 10

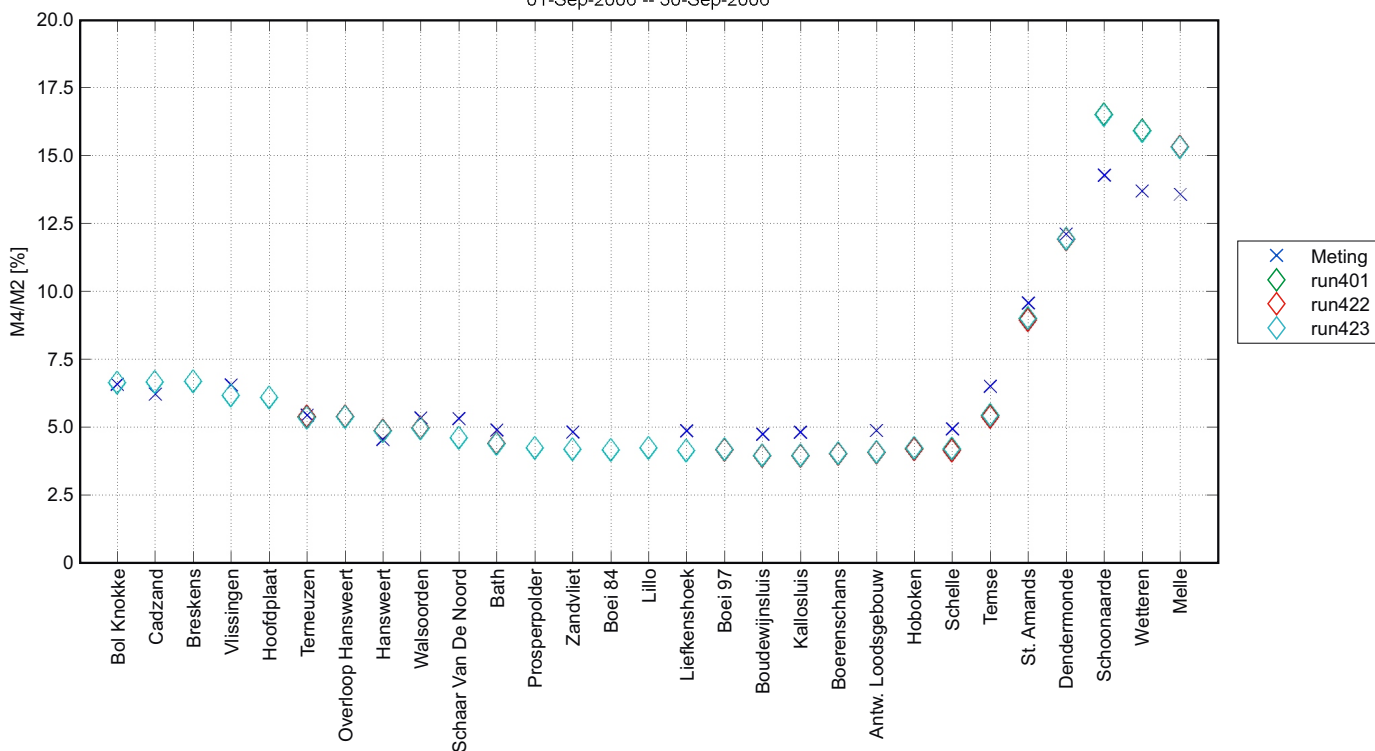


M4 amplitude voor run401, run422 en run423
Effect wijzigen ruwheid deelgebied 10

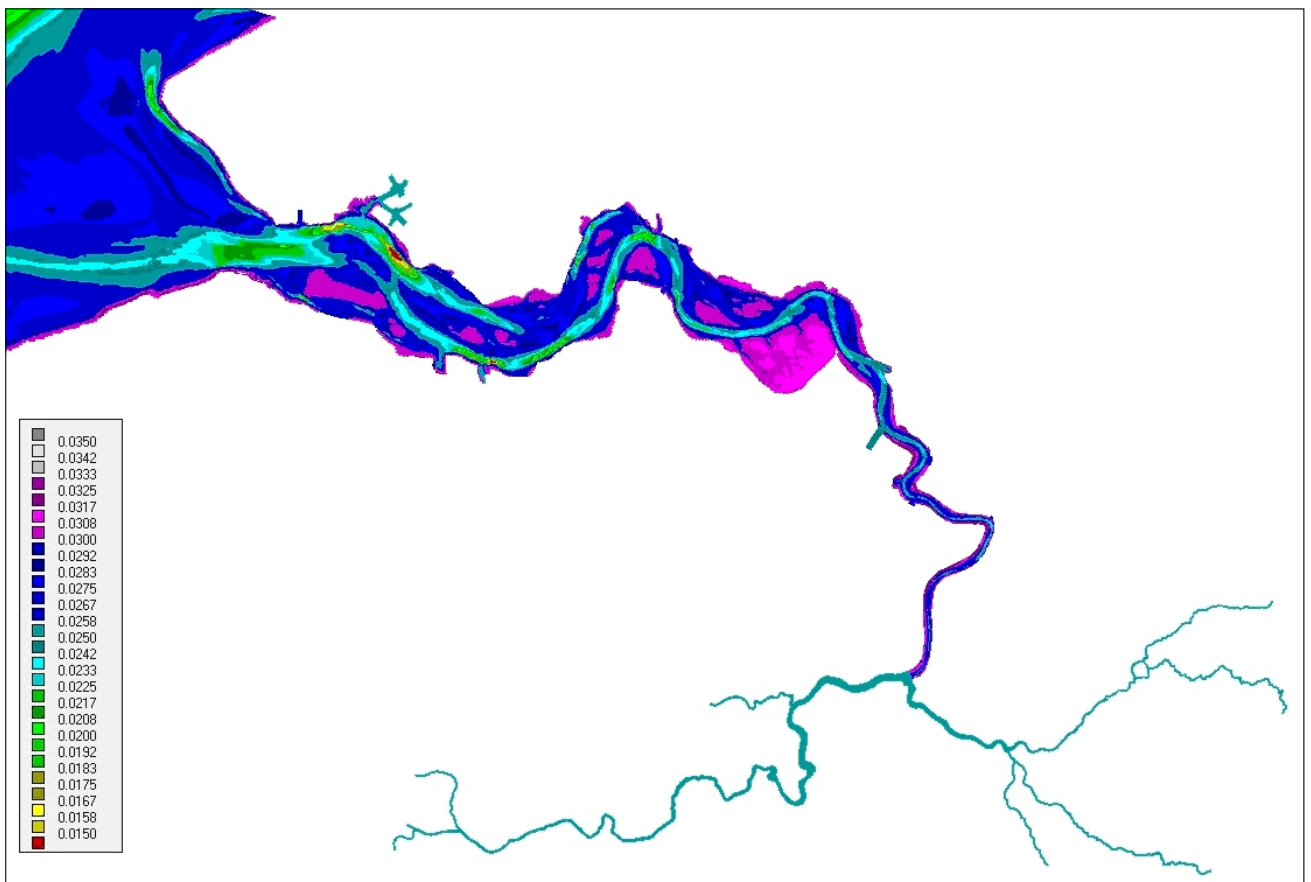
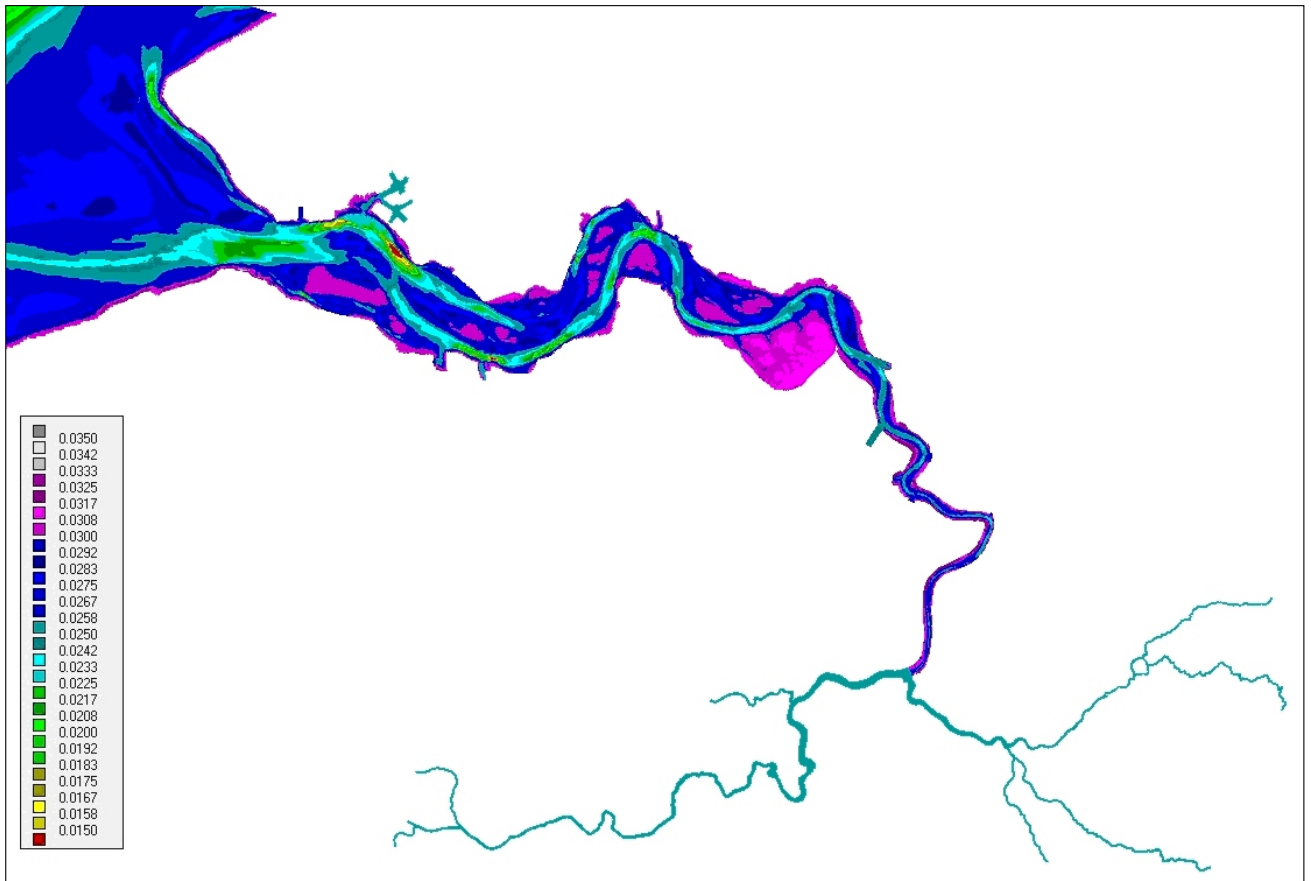
Faseverschil 2M2-M4
01-Sep-2006 -- 30-Sep-2006



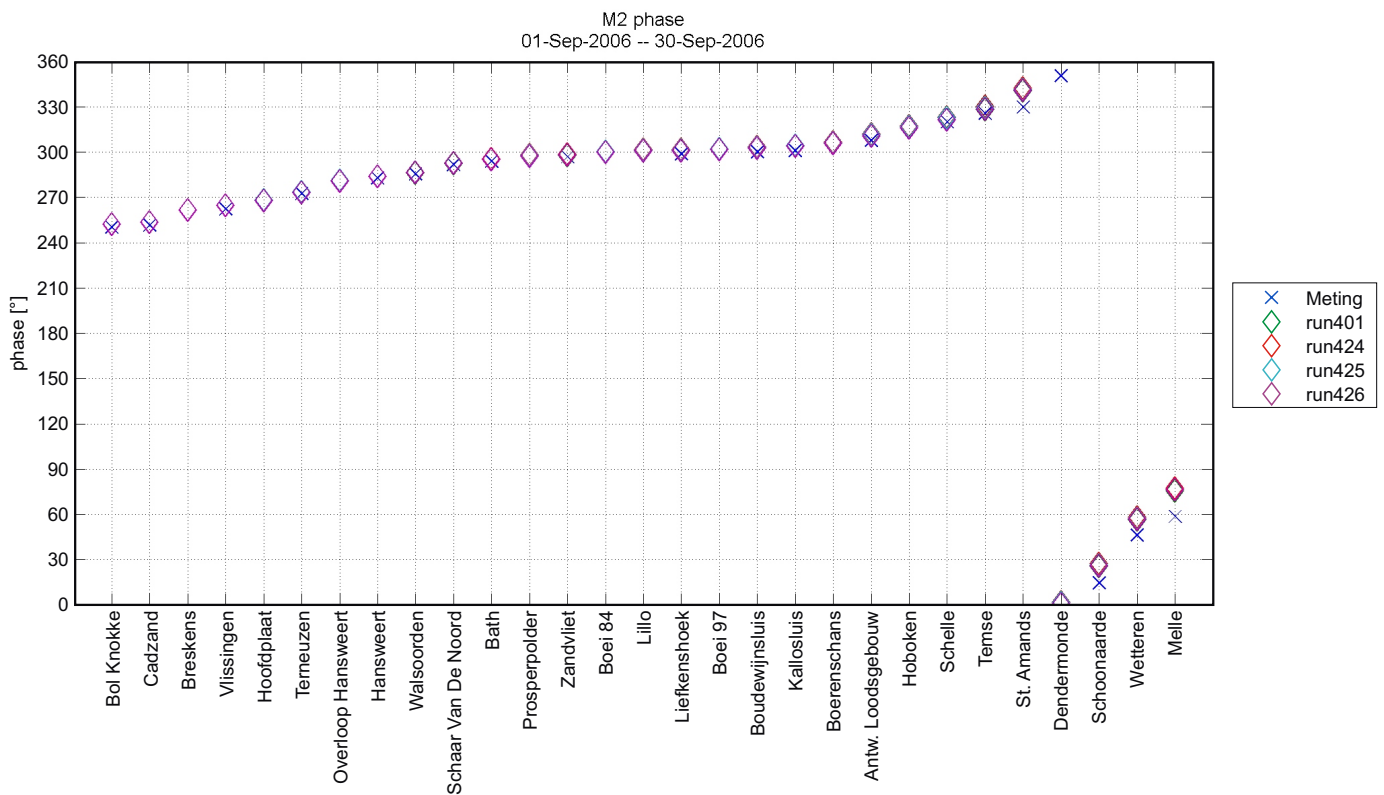
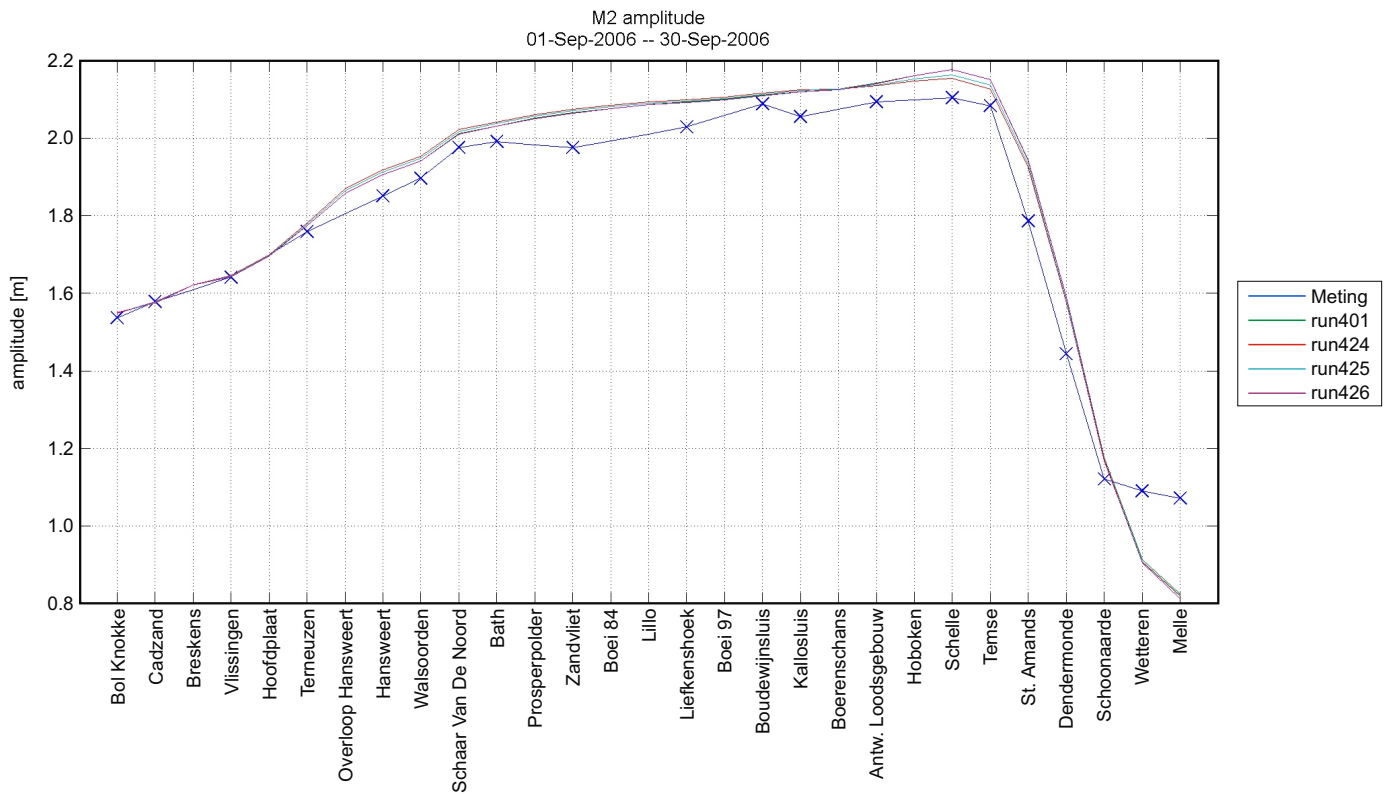
Verhouding fase M4/M2
01-Sep-2006 -- 30-Sep-2006



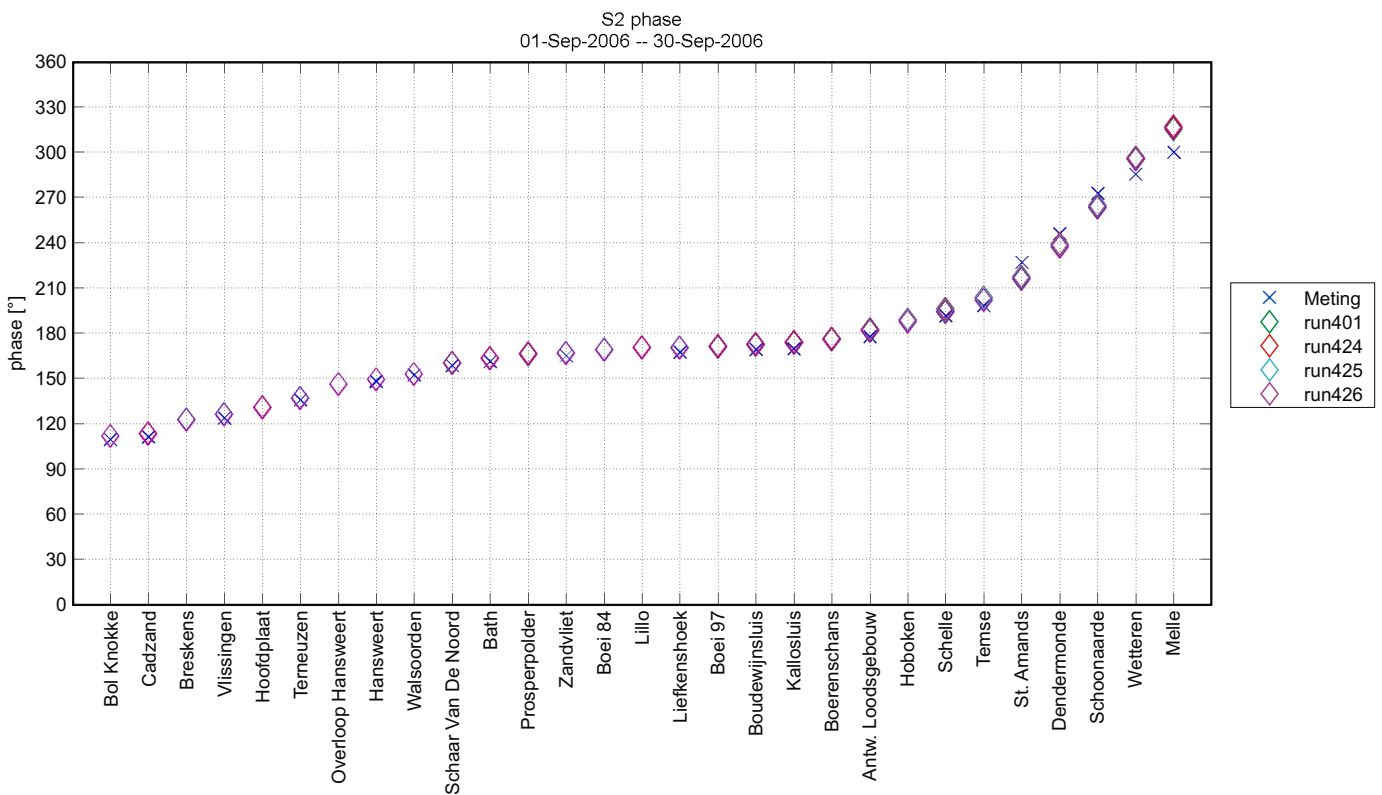
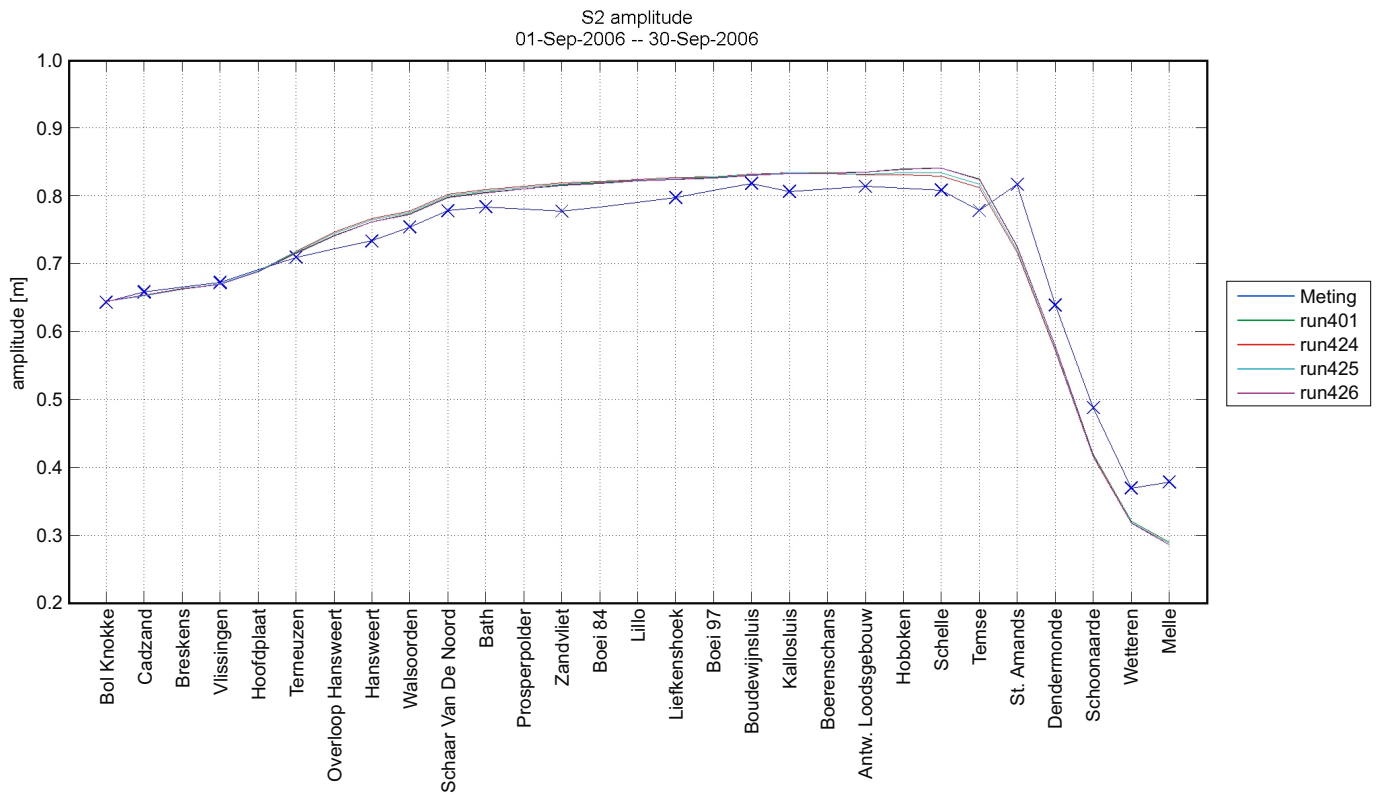
Faseverschil 2M2-M4 (boven) en fase verhouding M4/M2 (onder)
voor run401, run422 en run423
Effect wijzigen ruwheid deelgebied 10



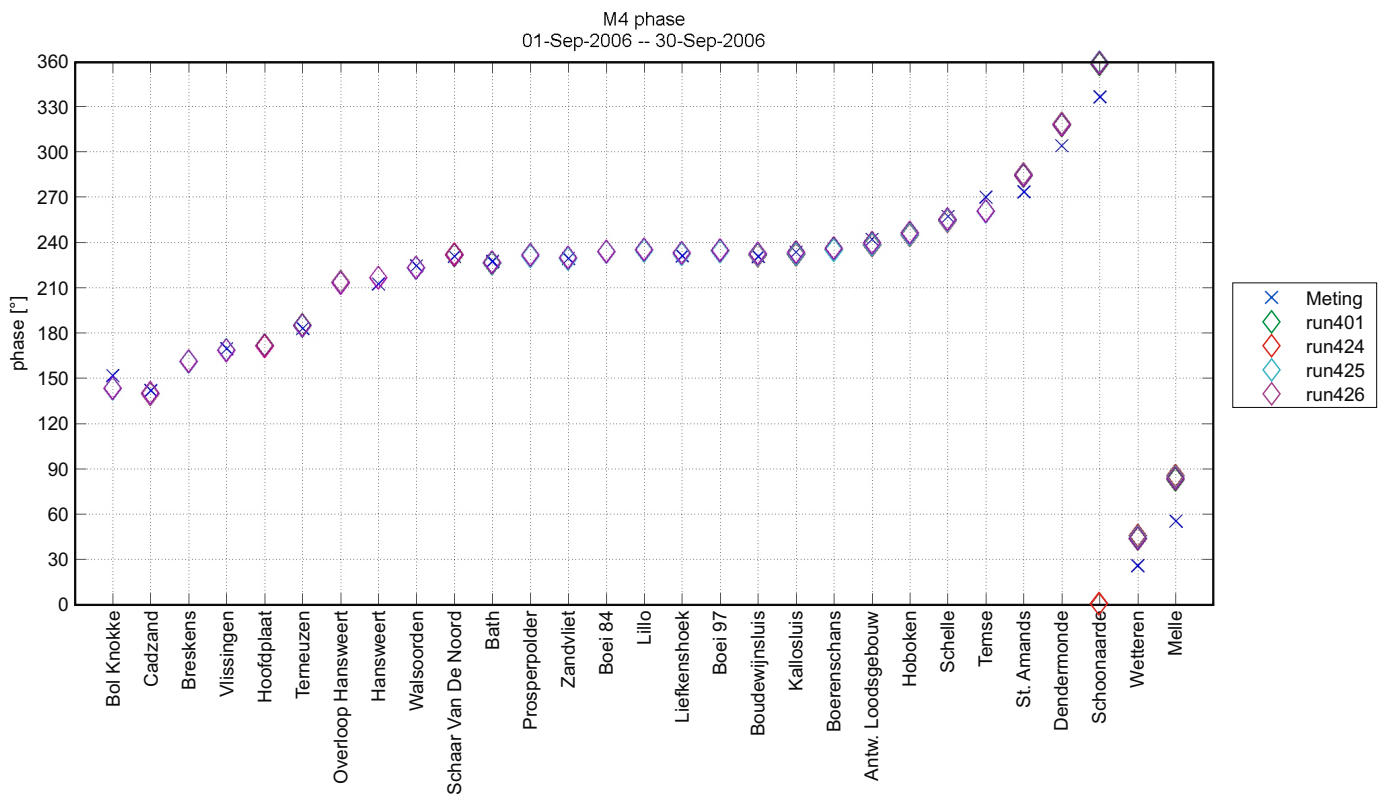
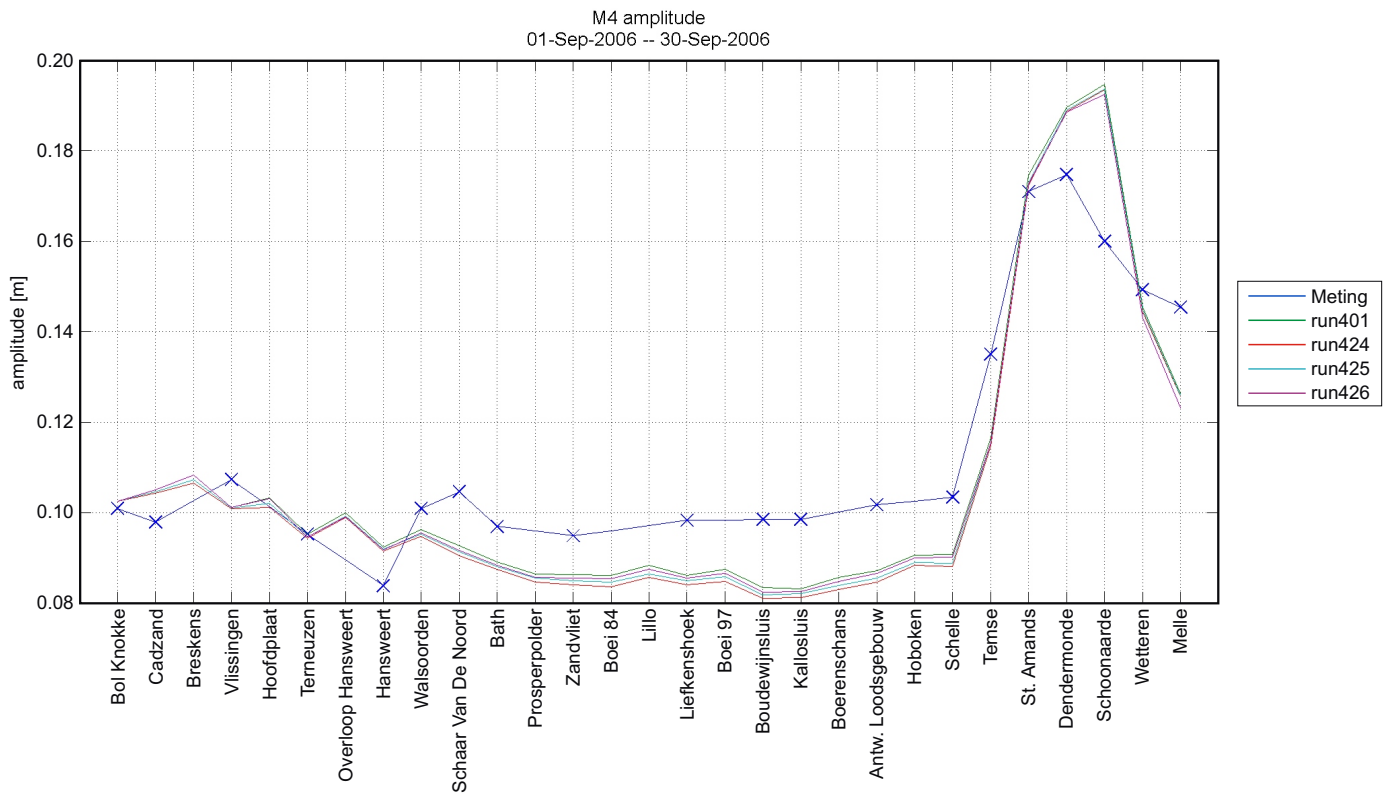
Ruimtelijk variërende Manning bodemruwheid run424 (boven) en run425 (onder)



M2 amplitude (boven) en fase (onder) voor run401, run424, run425 en run426
Effect ruimtelijk variërende ruwheid

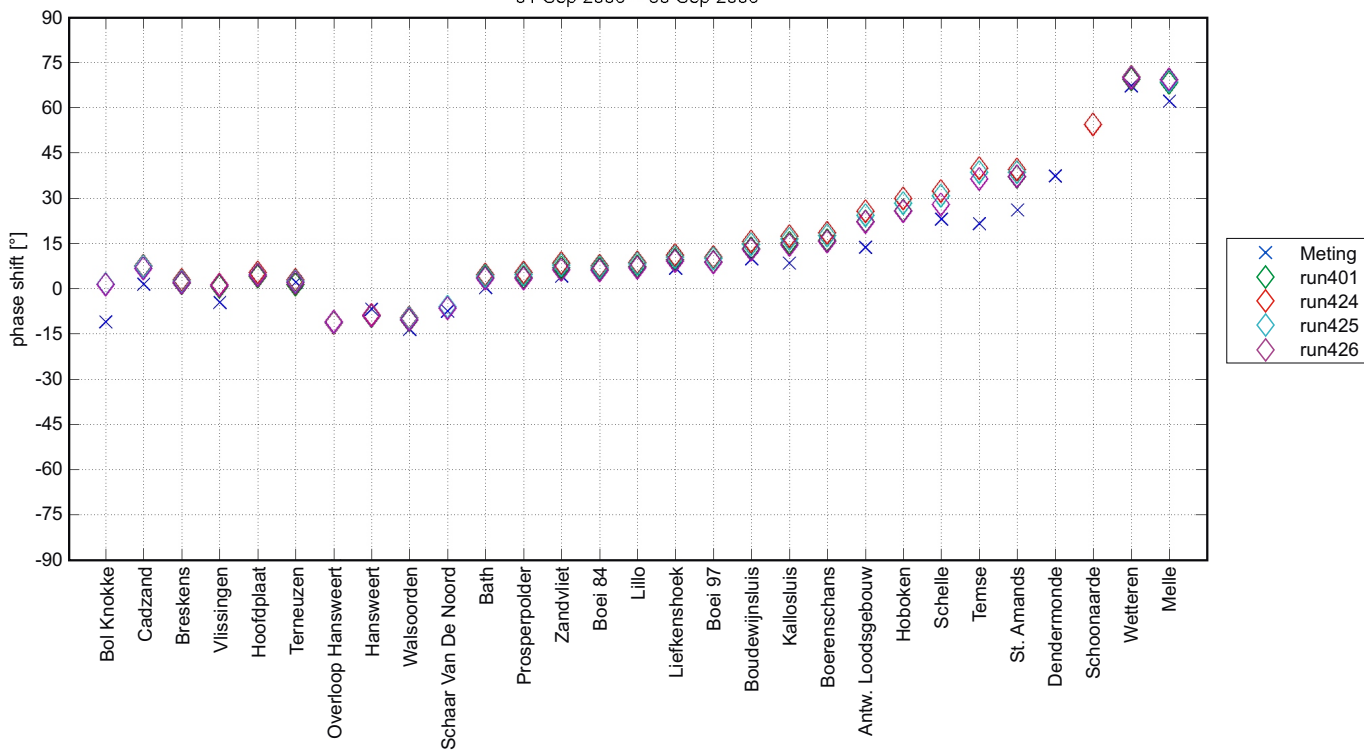


S2 amplitude (boven) en fase (onder) voor run401, run424, run425 en run426
Effect ruimtelijk variërende ruwheid

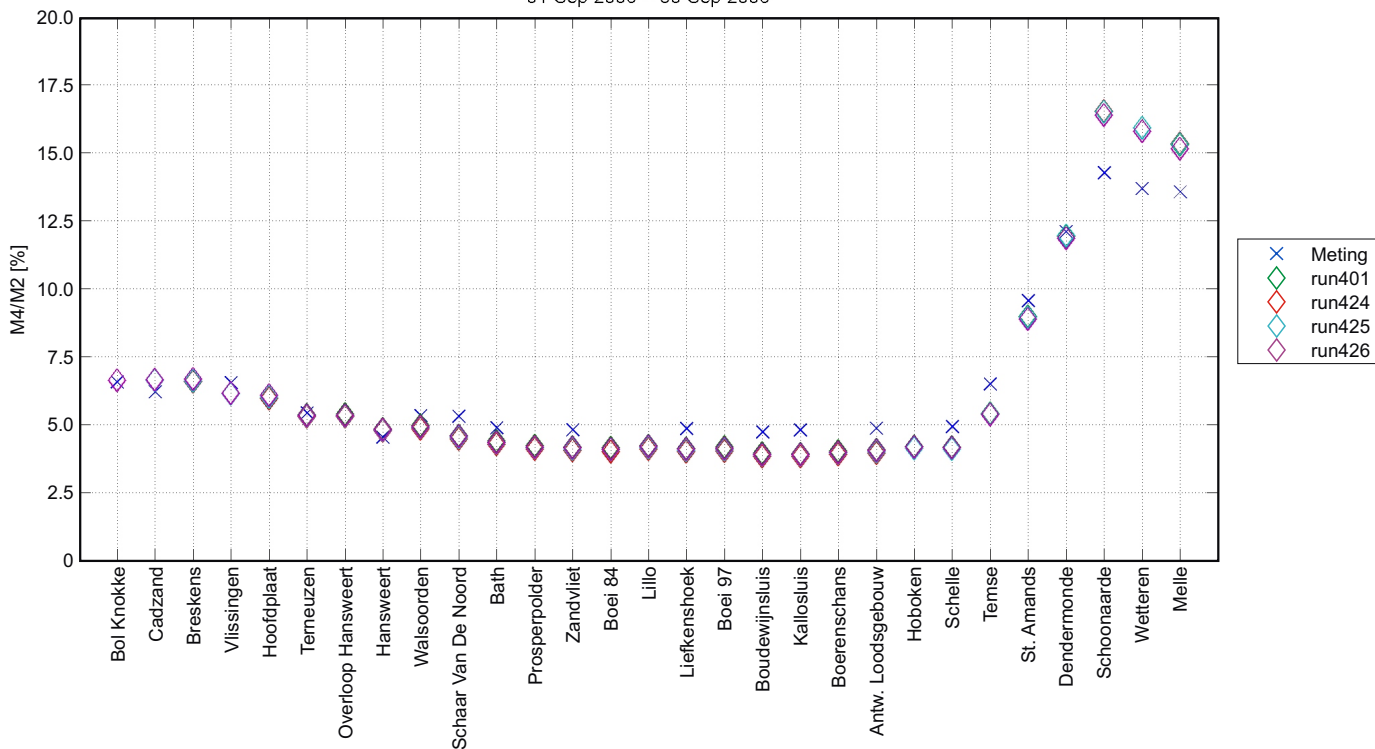


M4 amplitude (boven) en fase (onder) voor run401, run424, run425 en run426
Effect ruimtelijk variërende ruwheid

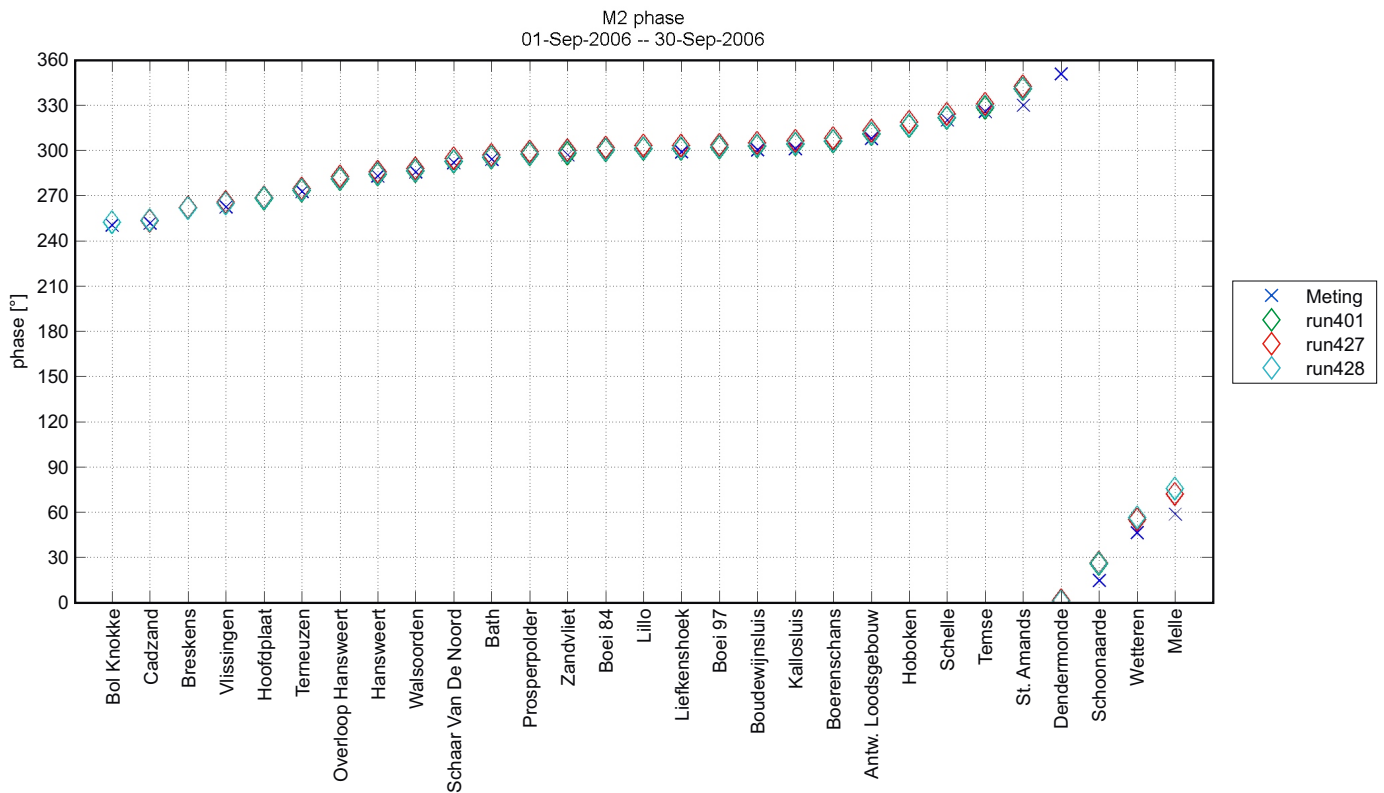
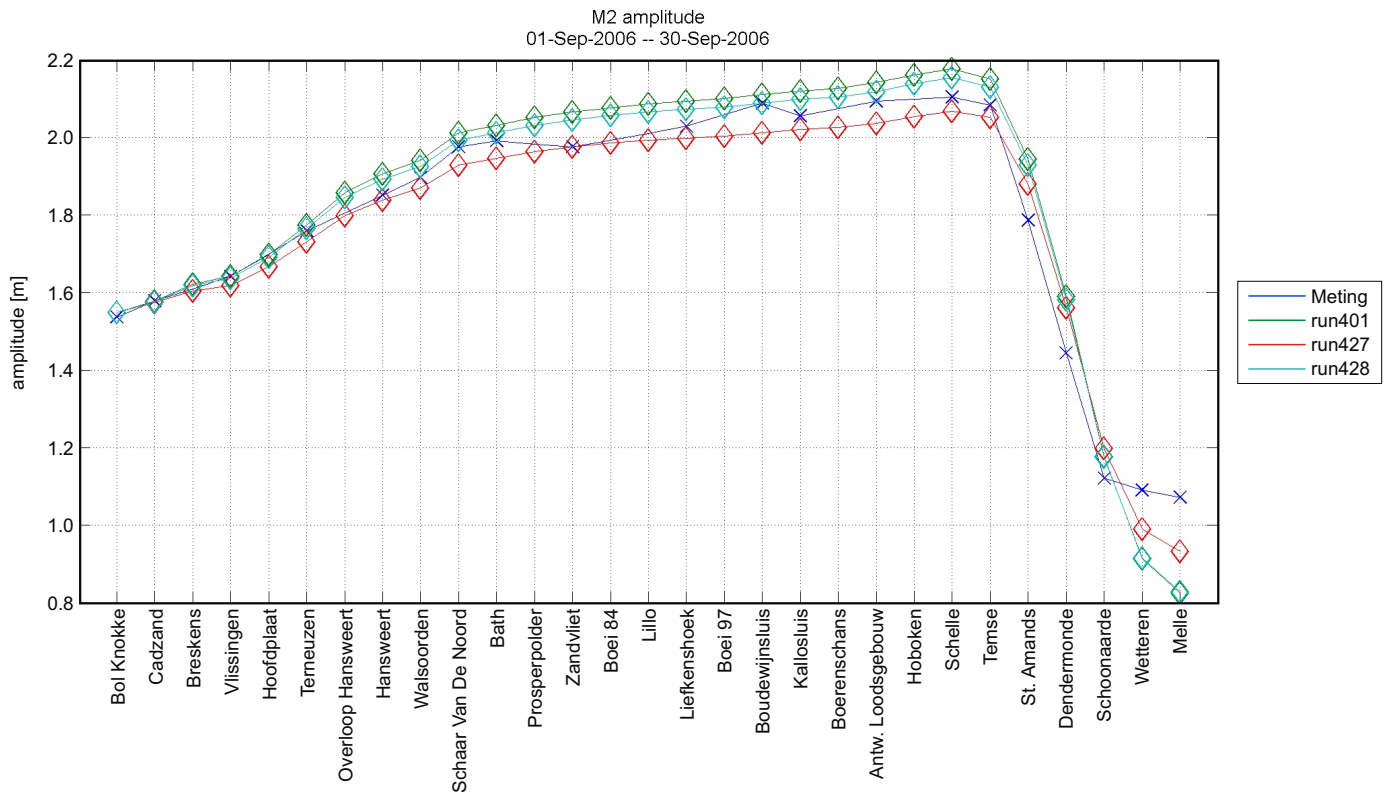
Faseverschil 2M2-M4
01-Sep-2006 -- 30-Sep-2006



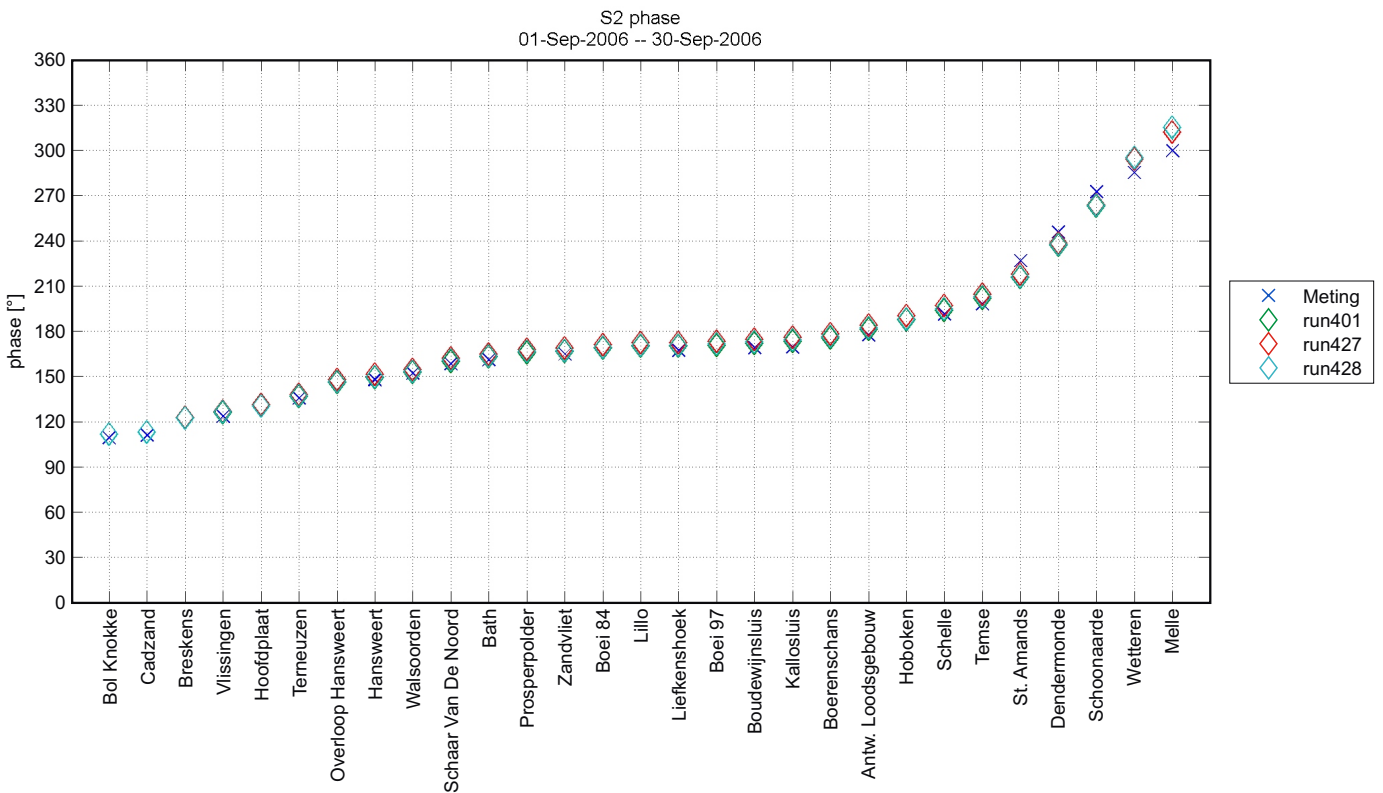
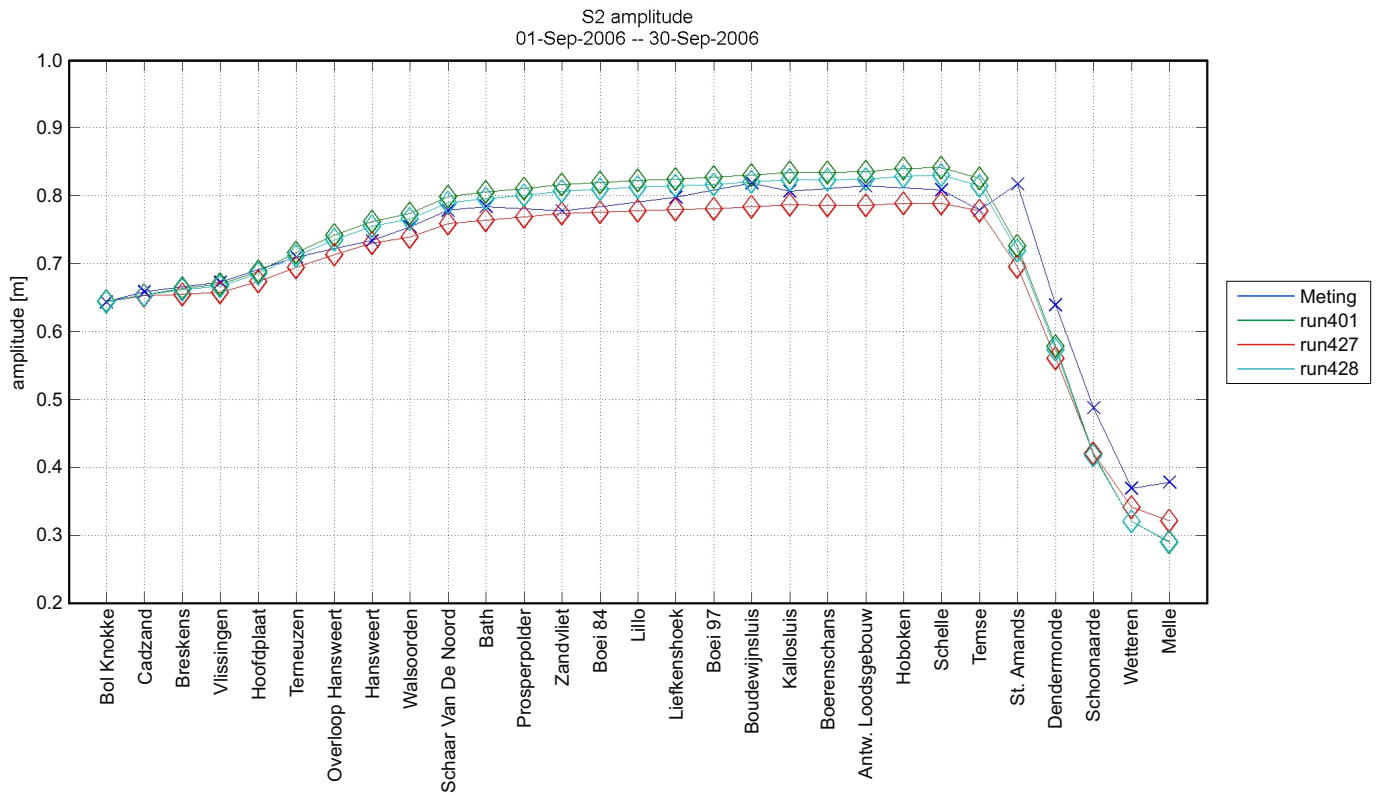
Verhouding fase M4/M2
01-Sep-2006 -- 30-Sep-2006



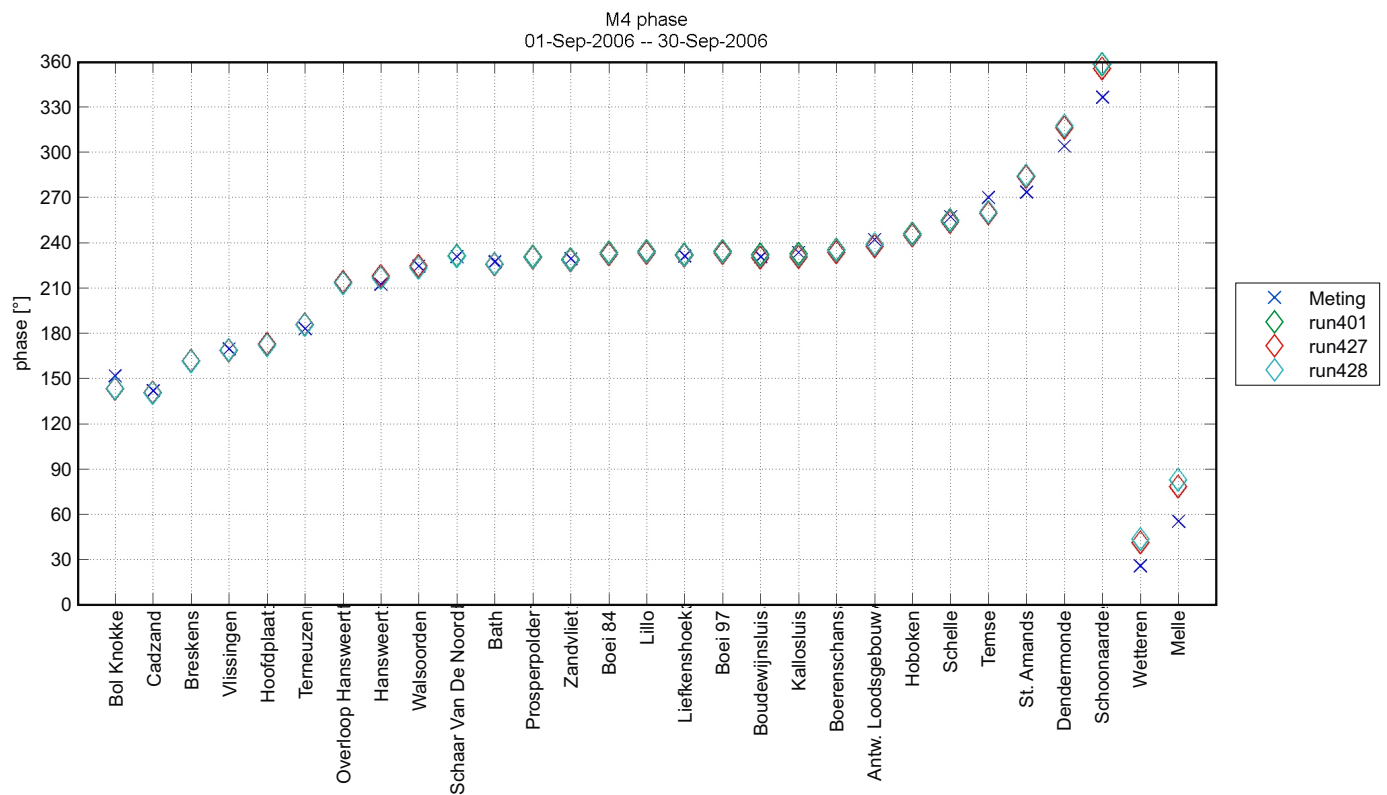
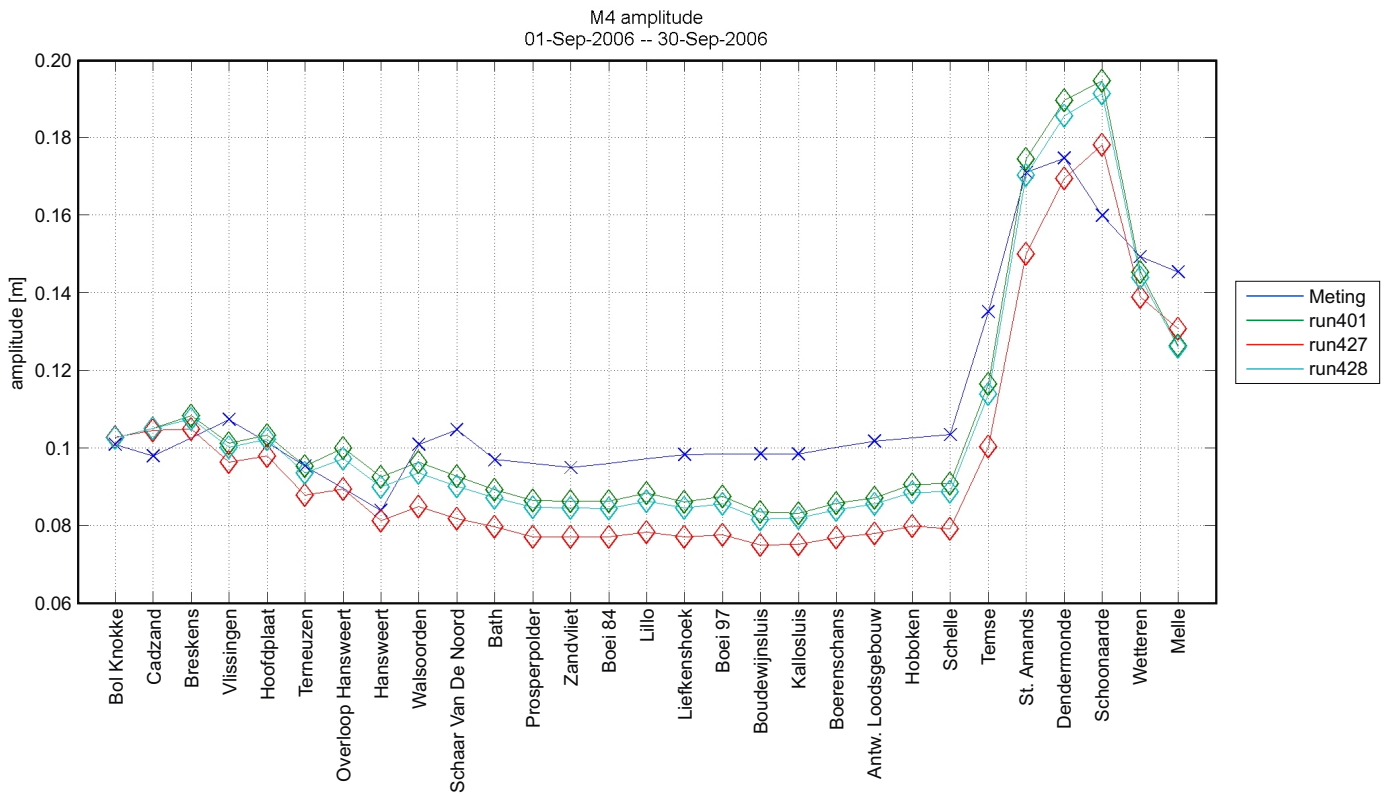
Faseverschil 2M2-M4 (boven) en fase verhouding M4/M2 (onder)
voor run401, run424, run425 en run426
Effect ruimtelijk variërende ruwheid



M2 amplitude (boven) en fase (onder) voor run401, run427 en run428
Effect verschillende ruwheidsformulering

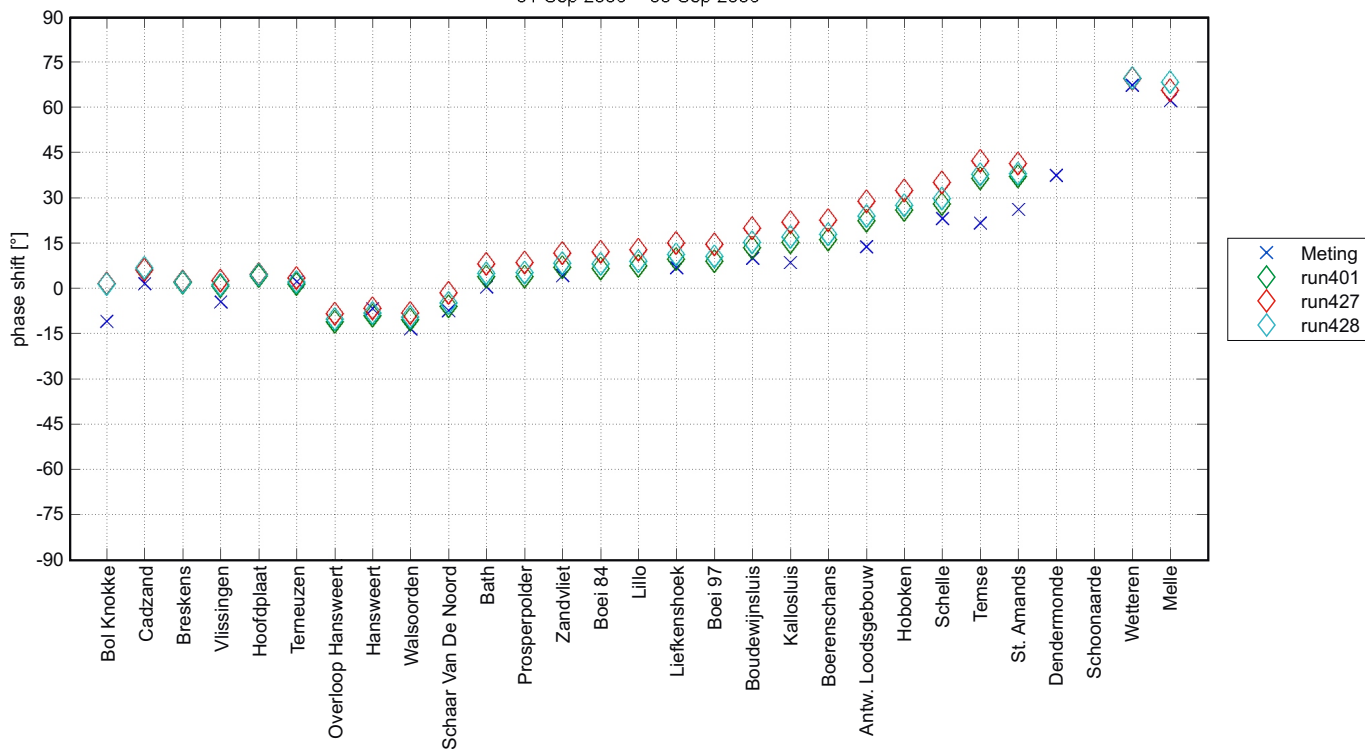


S2 amplitude (boven) en fase (onder) voor run401, run427 en run428
Effect verschillende ruwheidsformulering

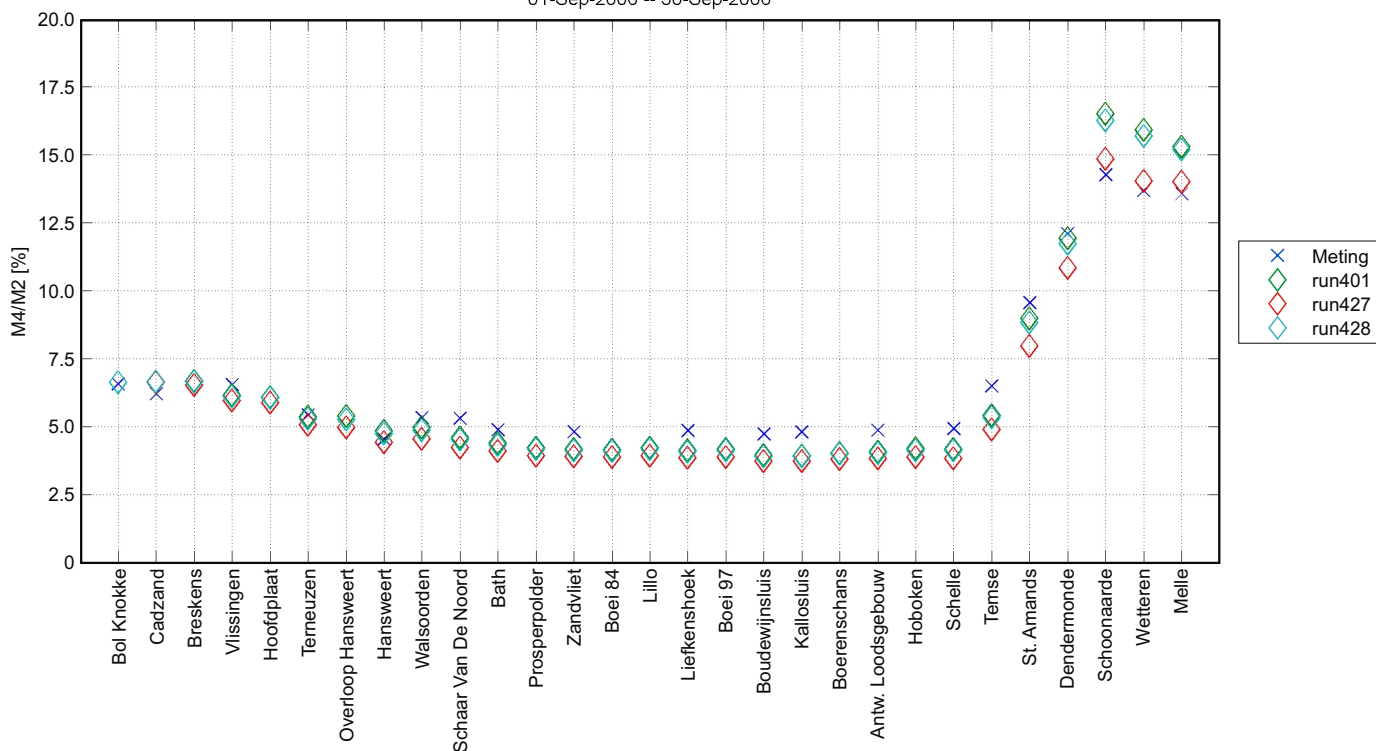


M4 amplitude (boven) en fase (onder) voor run401, run427 en run428
Effect verschillende ruwheidsformulering

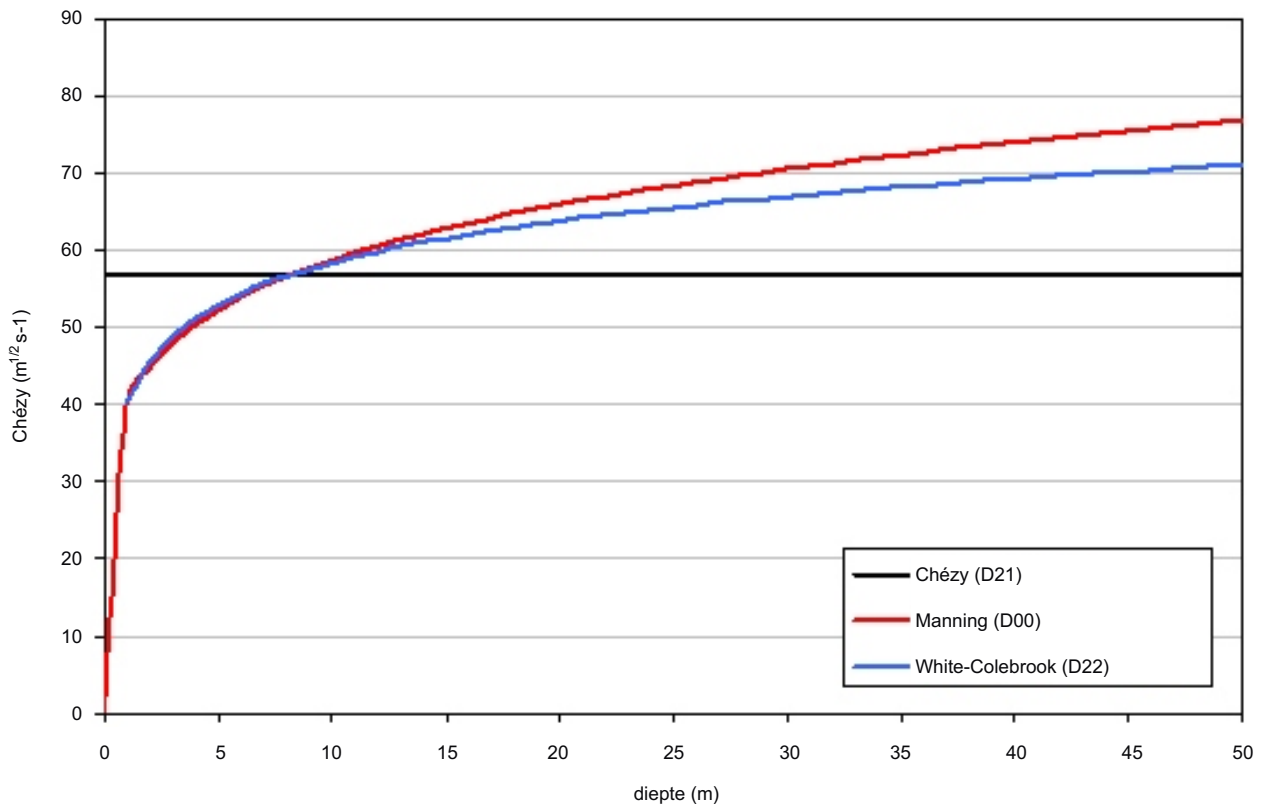
Faseverschil 2M2-M4
01-Sep-2006 -- 30-Sep-2006



Verhouding fase M4/M2
01-Sep-2006 -- 30-Sep-2006



Faseverschil 2M2-M4 (boven) en fase verhouding M4/M2 (onder)
voor run401, run427 en run428
Effect verschillende ruwheidsformulering



Omgerekende Chézy bodemruwheid in functie van de diepte voor verschillende ruwheidsformuleringen



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