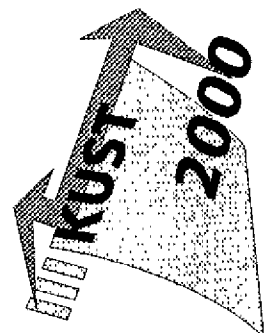


**De rol van het getij in de
morfologische ontwikkeling van
de Westerscheldemon**

- een modelmatige onderbouwing -

eindrapport
getijreconstructie Westerscheldemon

Project: K2000*KOP



INHOUDSOPGAVE

Pag. nr.

Samenvatting	- 2 -
Voorwoord	- 5 -
1. Inleiding	- 6 -
1.1 ONDERZOEKSPROGRAMMA KUST*2000	- 6 -
1.2 DEFINITIE WESTERSCHELDEMOND	- 6 -
1.3 DOEL EN OPZET GETIJANALYSE EN GETIJRECONSTRUCTIE	- 6 -
1.4 UITGEVOERDE MODELBEREKENINGEN	- 8 -
1.5 OPBOUW VAN HET RAPPORT	- 9 -
2. KUSTSTROOK-model	- 10 -
2.1 ALGEMEEN	- 10 -
2.2 RESULTATEN ORIËTERENDE BERECENINGEN	- 10 -
2.3 BESCHRIJVING VERSIE JANUARI 1998	- 11 -
2.4 AANPASSINGEN EN CALIBRATIE	- 12 -
2.5 VERIFICATIE REFERENTIEBEREKENING	- 13 -
3. Getij anno 1996 (referentieberekening)	- 14 -
3.1 ALGEMEEN	- 14 -
3.2 GROOTSCHALIGE WATERBEWEGING	- 14 -
3.3 STROMINGEN IN HET MONDINGSGEBIED	- 17 -
3.4 DOODTIJ-SPRINGTIJ CYCLUS	- 20 -
4. Veranderingen in getij (gevoeligheidsberekeningen)	- 22 -
4.1 ALGEMEEN	- 22 -
4.2 Aangepast Geulensysteem in de monding	- 22 -
4.3 Opgelegde stroomrichting in en uit de Westerschelde	- 25 -
4.4 Bodemligging scheur/wielingen en Westerschelde	- 26 -
4.5 Stormvloedkering Oosterschelde	- 28 -
5. Conclusies en aanbevelingen	- 30 -
5.1 HET GETIJ	- 30 -
5.2 MORFOLOGISCHE STRUCTUUR	- 30 -
5.3 MORFOLOGISCHE ONTWIKKELINGEN	- 31 -
5.4 METHODIEK EN MIDDELEN	- 32 -
Referenties	- 34 -
Lijst van figuren	- 35 -
Lijst van bijlagen	- 35 -

Samenvatting

DOEL VAN DE STUDIE

In het kader van het project K2000*KOP wordt onderzoek verricht naar de morfologische structuur van het mondingsgebied van de Westerschelde. Een van de belangrijkste vragen daarbij is de gevoeligheid van de morfologische structuur voor natuurlijke en/of mensgestuurde ontwikkelingen: zou een kunstmatige of natuurlijke verandering kunnen leiden tot een significante wijziging van de situatie in het mondingsgebied, zoals (bijvoorbeeld) het ontstaan van een nieuwe hoofdgeul door de Vlake van de Raan.

Het doel van deze studie is de gevoeligheid van het mondingsgebied voor natuurlijke en kunstmatige verstoringen te onderzoeken: wat is het risico dat op korte en middellange termijn (ca. 50 jaar) processen in het mondingsgebied worden geïnitieerd die kunnen leiden tot grootschalige aanpassingen van de morfologische structuur.

AANPAK VAN DE STUDIE

Uit eerdere studies is gebleken dat de grootschalige morfologische structuur van het mondingsgebied grotendeels bepaald wordt door de getijbeweging. Om deze reden is gekozen voor een reconstructie van de getijbeweging in het mondingsgebied met behulp van een 2DH-waterbewegingsmodel. De reconstructie betreft zowel historische situaties (bijvoorbeeld de situatie voor de aanleg van de stormvloedkering in de Oosterschelde) als fictieve situaties (bijvoorbeeld het afvlakken van het mondingsgebied). De nadruk lag hierbij op gevoeligheidsonderzoek. Een volledige historische reconstructie van het getij is niet gerealiseerd.

De resultaten van de historische berekeningen zijn vergeleken met de waargenomen ontwikkelingen van het getij zoals die in een eerdere studie zijn geanalyseerd (zie Svašek, 1997 a). Op basis van deze berekeningen, in combinatie met de fictieve situaties, is de gevoeligheid van het mondingsgebied voor veranderende omstandigheden vastgesteld.

Voor het waterbewegingsmodel is gebruik gemaakt van het KUSTSTROOK-model. Dit model bleek na een aantal aanpassingen en een aanvullende calibratie de waterbeweging in het mondingsgebied met voldoende mate van detail te kunnen reproduceren om de onderzoeksvraag te beantwoorden.

HOOFDSTRUCTUUR MONDINGSGBIED

De hoofdstructuur van het mondingsgebied wordt gevormd door een diepe en brede hoofdgeul vanaf Vlissingen in zuidwestelijke richting (Scheur/Wielingen) en een kleinere geul vanaf Vlissingen langs de kust van Walcheren in noordwestelijke richting (Oostgat). Tussen beide geulsystemen bevindt zich een uitgestrekt ondiep gebied (Vlake van de Raan) met een aantal geulaanzetten.

De vraag is in hoeverre deze hoofdstructuur stabiel is.

Hiertoe is in het model een aantal situaties onderzocht waarbij de bodem in het mondingsgebied in meerdere of mindere mate is afgevlakt. De getijrandvoorwaarden op zee zijn in deze berekeningen gelijkgesteld aan de huidige situatie.

De stroomrichtingen in de hals van het estuarium (lijn Vlissingen - Breskens) zijn gevarieerd: ofwel gelijk aan de huidige stroomrichting, ofwel een meer gestrekte oost-west

richting, overeenkomend met een gewijzigde oriëntatie van de geulen in het binnengebied (Schaar van Spijkerplaat).

Uit deze berekeningen blijkt een voorkeursrichting in het mondingsgebied aanwezig te zijn die min of meer samenvalt met de huidige oriëntatie van de Scheur/Wielingen. De breedte is wel groter dan de huidige geul. Dit geldt zowel tijdens eb als tijdens vloed. Daarnaast blijkt contractie op te treden rond de kop van Walcheren en bij Vlissingen.

De stroming langs de Vlaamse kust wordt vooral aangedreven door faseverschillen tussen het getij op zee (Zeebrugge) en in de hals van het estuarium (Vlissingen). Bij de stroming langs de Walcherse kust spelen naast faseverschillen ook verschillen in amplitude een belangrijke rol (afname amplitude in noordelijke richting).

In het tussengebied (de huidige Vlakte van de Raan) kunnen weliswaar ook aanzienlijke stroomsnelheden optreden, maar de richting van deze stroming heeft over het getij gezien een rondgaand karakter, waarbij de richtingen van en naar de hals van het estuarium slechts in beperkte mate domineren. Geulvorming in dit gebied ligt dan ook niet voor de hand.

Samenvattend kan gesteld worden dat de huidige morfologische hoofdstructuur met een hoofdgeul langs de Vlaamse kust en een nevengeul langs de Walcherse kust overeenstemt met de voorkeursrichting van de getijgedreven stromingen. Met andere woorden: de huidige hoofdstructuur van het mondingsgebied is stabiel.

DETAILSTRUCTUUR MONDINGSGBIED

De detailstructuur van het mondingsgebied is onderzocht door het uitvoeren van een aantal berekeningen waarbij de bodemligging van ca. 1971/1972 is ingevoerd, d.w.z. voor het uitvoeren van de verdieping van de Westerschelde begin 70-er jaren. Ook de situatie zonder Oosterscheldekering is onderzocht.

Bij deze berekeningen is de getijrandvoorwaarde op zee niet aangepast aan de toestand van 1971/1972, zodat alleen gekeken wordt naar de gevolgen van bodemveranderingen en/of ingrepen.

Uit de berekeningen blijkt in de eerste plaats dat de veranderingen die in het getij in Vlissingen zijn opgetreden in belangrijke mate veroorzaakt worden door de interne veranderingen in het mondingsgebied en de Westerschelde. De invloed van veranderingen in de zee-randvoorwaarden is ondergeschikt aan de veranderingen die in de monding en in het estuarium worden opgewekt.

In Vlissingen is sinds 1971/72 sprake van een vervroeging van het getij met ca. 2 minuten en een toename van het getijverschil met ca. 4 centimeter.

De bouw van de Oosterscheldekering heeft nauwelijks directe invloed gehad op het mondingsgebied van de Westerschelde, afgezien van een zeer geringe toename van getijvolumina in Oostgat/Deurloo. In de loop van de tijd kan de invloed van de Oosterscheldekering indirect (via de morfologie van de voordelta) wel invloed gaan uitoefenen op het Westerscheldegebied. Oostgat en Deurloo blijken derhalve geen kortsluitfunctie te vervullen tussen Wester- en Oosterschelde.

De diverse ingrepen (baggeren/storten) en natuurlijke ontwikkelingen in de periode 1971/72 tot heden (d.w.z. begin 90-er jaren, het tijdstip van de KUSTSTROOK schematisatie) hebben geleid tot een beperkte herverdeling van de debieten en getijvolumina in het mondingsgebied.

Vanaf 1971/72 zijn de volgende veranderingen opgetreden:

- Scheur/Wielingen: toename getijvolumina als gevolg van verdieping van de geul zelf en als gevolg van verdiepingen in de Westerschelde (die een groter getijverschil bij Bath veroorzaken)
- Oostgat/Deurloo: geringe toename getijvolumina als netto resultaat van afname door de verdieping van Scheur/Wielingen en toename door verdiepingen in de Westerschelde zelf
- Vlake van de Raan: afname van de getijvolumina, hoofdzakelijk als gevolg van de verdieping van Scheur/Wielingen.

Uit de diverse berekeningen konden geen conclusies getrokken worden ten aanzien van de aanwezigheid van het Bankje van Zoutelande en de debietverdeling tussen Oostgat enerzijds en Geul van de Rassen/Deurloo anderzijds. De mate van detail van de KUSTSTROOK berekeningen is onvoldoende om op dit detailniveau betrouwbare uitspraken te doen. Bovendien speelt naar verwachting ook de golfwerking een belangrijke rol in dit gebied.

Dat de Geul van de Walvischstaart zich in de afgelopen decennia tot een meer westelijke oriëntatie lijkt te ontwikkelen is wel in overeenstemming met de invloed van de morfologische veranderingen in Scheur/Wielingen en Westerschelde.

GETIJSYSTEEM IN MONDINGSGBIED

Een belangrijk resultaat van het onderzoek is een toename van het inzicht in de getijdewerking. Het mondingsgebied is een gecompliceerd systeem waar een interactie plaatsvindt tussen de van zuid naar noord lopende en tegelijk afnemende getijgolf op de Noordzee en de naar binnen lopende getijgolf op de Westerschelde.

Algemene modellen van ebdelta's zoals van Van Veen, zijn niet in staat om het gecompliceerde gecombineerde verloop van fasen en amplitude van het getij eenduidig te beschrijven en zijn daarom niet goed toepasbaar. Ook een onderverdeling in eb- en vloedgeulen blijkt voor grote delen van het mondingsgebied niet gemaakt te kunnen worden. Zo kan voor Oostgat en Deurloo een ebfunctie gezien vanuit de Westerschelde tegelijk een vloedfunctie inhouden voor het Noordzeegetij. Op de Vlake van de Raan treedt rondstroming op waardoor een onderscheid tussen eb- en vloedfunctie onmogelijk wordt.

In dit onderzoek is gekozen voor een aanpak met een 2DH waterbewegingsmodel. Deze aanpak, waarbij men voor iedere fase van het getij het verloop van de verhangen en de stroombeelden goed op zich moet laten inwerken, is vooralsnog de beste methode om inzicht op te bouwen in de waterbeweging in een gecompliceerd systeem als het mondingsgebied van de Westerschelde. Dit inzicht vormt de basis voor de bepaling van de effecten van natuurlijke en/of kunstmatige ontwikkelingen op het morfodynamische systeem van het mondingsgebied.

Voorwoord

Het voorliggende rapport is de eindrapportage van een studie die in opdracht van het RIKZ is uitgevoerd als onderdeel van het onderzoeksproject K2000*KOP. Het doel van deze studie is om de rol van het getij in de morfologische ontwikkeling van de Westerscheldemond te beschrijven en te verklaren.

Op basis van waargenomen ontwikkelingen in getij en morfologie zijn hypothesen opgesteld over de morfologische structuur en ontwikkeling van het gebied.

Modelberekeningen zijn uitgevoerd om:

- het getij in het mondingsgebied te beschrijven;
- de morfologische structuur vanuit het getij te verklaren;
- voor enkele waargenomen morfologische veranderingen de invloed op het getij te bepalen.

Deze studie is uitgevoerd door Bram Blik, Arie de Gelder, Caroline Gautier en Bas Les (Svašek) onder verantwoordelijkheid van eerstgenoemde. Bijdragen zijn geleverd door Tom Pieters (Getijdewateren). Vanuit het RIKZ is de studie begeleid door Daan Dunsbergen, Ad Langerak en Aline Arends.

1. Inleiding

1.1 ONDERZOEKSPROGRAMMA KUST*2000

Om de landelijke beleidsuitvoering van de kustlijn­zorg te ondersteunen wordt door het RIKZ het onderzoeksprogramma KUST*2000 uitgevoerd. Binnen dit programma worden een aantal projecten uitgevoerd, waaronder het project K2000*KOP dat uit kust­morfologisch onderzoek bestaat, gerelateerd aan de erosieproblematiek rond eiland­koppen. Eén van de studiegebieden binnen K2000*KOP is de Westerscheldemon. De belangrijkste aandachtspunten voor dit gebied zijn de lange termijn strategie inzake baggeren en storten en de erosieproblematiek van de zuidwestkust van Walcheren.

In een eerder stadium van het KUST*2000 programma is de beheersproblematiek geïnventariseerd en is een aantal hypothesen opgesteld omtrent de relaties tussen veranderingen in waterbeweging, morfologie en ingrepen (Svašek, 1995). Om deze hypothesen te toetsen is een aantal studies uitgevoerd. Onder andere is een analyse van het gemeten getij uitgevoerd en is de invloed van bepaalde ontwikkelingen en ingrepen gereconstrueerd met behulp van het 2DH-waterbewegingsmodel KUSTSTROOK. Zowel de getijanalyse als de getijreconstructie zijn ingezet om het getij in het studiegebied en de interactie met morfologie en menselijke activiteiten te beschrijven en te verklaren. Deze studies dienen te worden aangevuld met studies naar sedimentstromen, zandbalans en geologie. De verkregen kennis moet uiteindelijk optimaal beheer van het gebied, met name het vaarweg- en kustbeheer mogelijk maken.

1.2 DEFINITIE WESTERSCHELDEMON

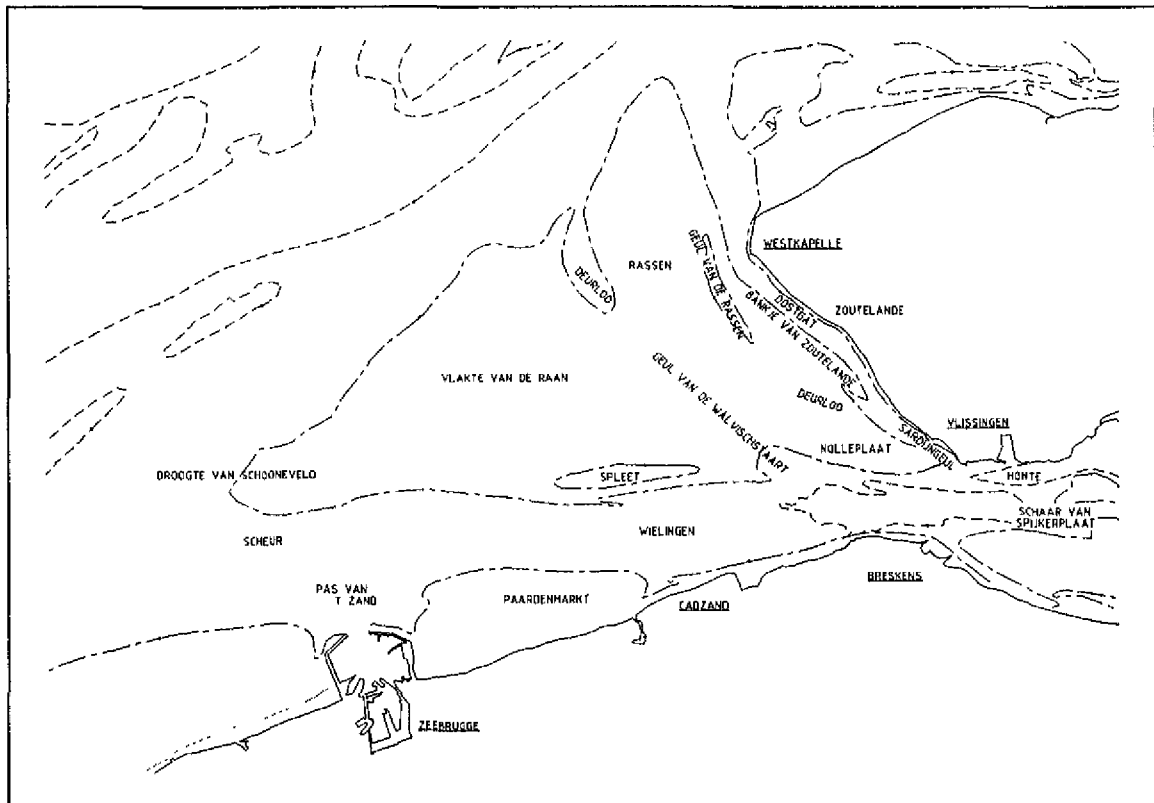
De westelijke grens van het mondingsgebied van de Westerschelde strekt zich globaal uit van de uitloop van de Scheur ter hoogte van Oostende (België) tot de uitloop van het Oostgat ten noorden van Westkapelle op Walcheren (de NAP -20 m dieptelijn). Dit laatste gebied vormt de overgang met het mondingsgebied van de Oosterschelde. Aan de oostzijde wordt in het algemeen de geografische lijn Vlissingen-Breskens aangehouden als scheiding tussen de Westerschelde zelf en het mondingsgebied. Ten zuiden van het studiegebied bevinden zich de Vlaamse Banken voor de Belgische kust.

In grote lijnen bestaat het gebied uit de geulenstelsels Wielingen/Scheur en Oostgat/Deurloo, met daartussen een uitgestrekt bankengebied, de Vlakte van de Raan. De vaarroutes in het gebied zijn Scheur/Wielingen (NAP -15m), Oostgat (NAP -10m) en Deurloo (NAP -7m). De banken op de Vlakte van de Raan hebben een diepte van ongeveer 5 m ten opzichte van NAP.

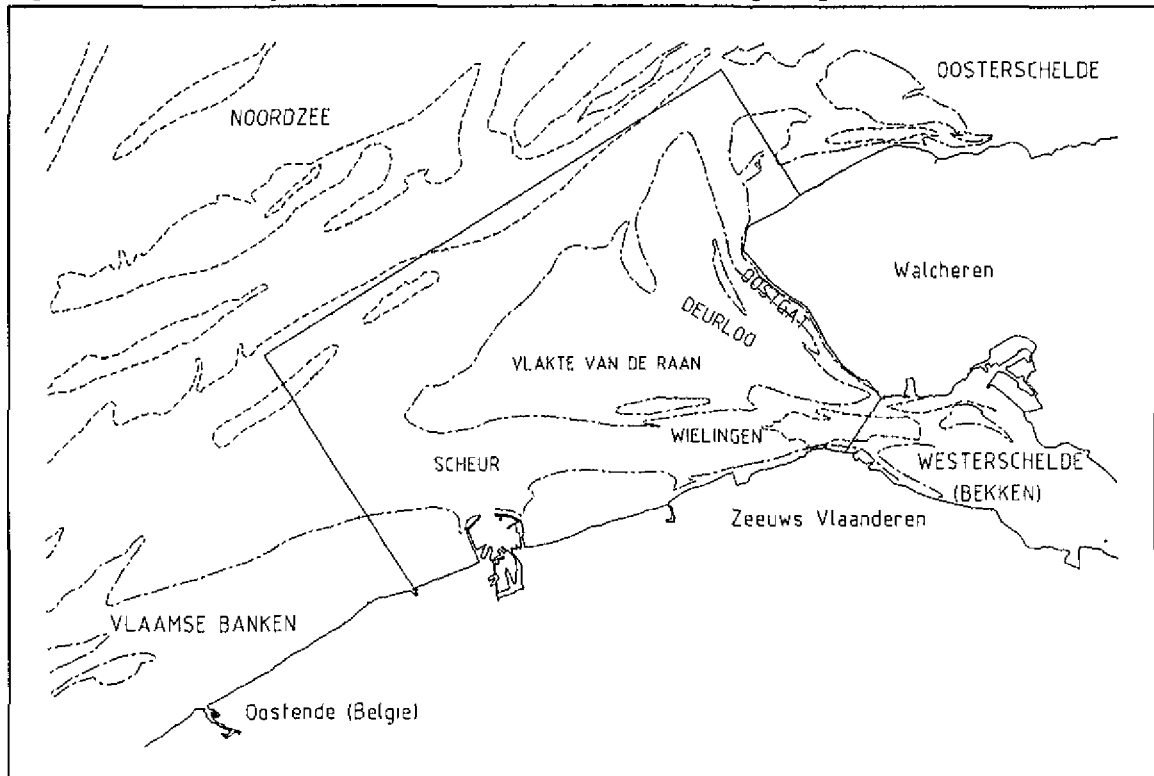
1.3 DOEL EN OPZET GETIJANALYSE EN GETIJRECONSTRUCTIE

De getijanalyse en getijreconstructie vormen inhoudelijk één geheel. Binnen deze studies is onderzocht of en hoe de morfologische structuur en ontwikkeling van het mondingsgebied van de Westerschelde bepaald worden door de getijbeweging in het gebied. Dit is van belang voor de vraag of menselijke activiteiten ontwikkelingen in gang kunnen zetten die leiden tot een significante verandering van de morfologische hoofdstructuur.

De gangbare opvatting is dat de oriëntatie en afmetingen van de belangrijkste geulen in het studiegebied bepaald worden door de getijstromen. Vergeleken met andere ebgetijdelta's is de verhouding tussen getijamplitude en golfhoogte namelijk hoog. De geulconfiguratie heeft echter zelf weer invloed op de getijbeweging. Om de interactie tussen



Figuur 1.1 Mondingsgebied van de Westerschelde en omgeving



Figuur 1.2 Geulen en banken in het mondingsgebied van de Westerschelde

geulenstructuur en getijbeweging uit te werken is een analyse van oorzaken en gevolgen van waargenomen veranderingen in getij en morfologie uitgevoerd. Hierbij zijn ook historische ontwikkelingen in de omliggende gebieden (Noordzee, Westerschelde en Oosterschelde) betrokken, die via de getijbeweging invloed kunnen hebben gehad op het mondingsgebied. Ontwikkelingen in het mondingsgebied kunnen via de getijbeweging op hun beurt deze gebieden (vooral de Westerschelde) beïnvloeden hebben.

De beschikbaarheid en nauwkeurigheid van historische gegevens is beperkt. Vooral stroommetingen zijn zeldzaam en moeilijk interpreteerbaar met het oog op historische ontwikkelingen. Verder overlappen morfologische veranderingen ten gevolge van diverse menselijke ingrepen (en autonome processen) elkaar, waardoor het in een aantal gevallen niet direct duidelijk is welke ontwikkeling wat veroorzaakt heeft.

Naast een analyse van het gemeten getij is daarom een reconstructie van het getij met behulp van een 2DH-waterbewegingsmodel uitgevoerd. Hierbij wordt voor een bepaald getij elke tijdstap de waterstand en stroomsnelheid per roosterpunt berekend. Het model is ingezet om de invloed van historische ontwikkelingen op de getijbeweging te reproduceren, maar ook de invloed van de huidige geulconfiguratie en de stroomrichting in de hals van het estuarium te bepalen. In paragraaf 1.4 is de motivatie voor de uitgevoerde modelberekeningen gegeven.

Bij deze studie is veel aandacht besteed aan het ontwikkelen van interpreteerbare presentatietechnieken. De motivatie hiervoor wordt toegelicht in paragraaf 3.3.

1.4 UITGEVOERDE MODELBEREKENINGEN

aanvullende calibratie

Om de invloed van bodemveranderingen op de waterbeweging te onderzoeken is een afgeregeld model nodig met voldoende detail om bodemveranderingen te kunnen modelleren en interpreteren. Verder moeten de randvoorwaarden buiten het gebied liggen dat door de aanpassingen beïnvloed wordt. Het meest gedetailleerde model van het studiegebied en omgeving was bij aanvang van deze studie het KUSTSTROOK-model. Tijdens de oriëntatiefase van deze studie is met een rechtlijnige versie van het KUSTSTROOK-model (oktober 1997) gekeken of veranderingen waarneembaar zijn en wat het invloedsgebied van grootschalige bodemaanpassingen is. Naar aanleiding van deze oriëntatiefase (zie paragraaf 2.2) is besloten om tijdens de tweede fase berekeningen op basis van een recent ontwikkelde kromlijnige versie van het KUSTSTROOK-model (januari 1998) uit te voeren. Om dit model geschikt te maken is een aanvullende calibratie uitgevoerd. De berekeningen die daartoe zijn uitgevoerd zijn beschreven in hoofdstuk 2.

referentieberekening

Het getij in de Westerscheldemon is beschreven en geanalyseerd in hoofdstuk 3. Van de resultaten van het aangepaste KUSTSTROOK-model (referentieberekening) is gebruik gemaakt om een aantal karakteristieke grootheden te kwantificeren en te visualiseren. Om te bepalen hoe groot de variatie in de getijbeweging binnen een doortij-springtijcyclus is, is het geanalyseerde getij (7 januari 1996, iets sterker dan gemiddeld getij) vergeleken met een gemiddeld springtij.

gevoeligheidsberekeningen

Het model is vervolgens ingezet om de rol van het getij in de morfologische structuur en ontwikkeling uit te werken. Dit is gedaan door de invloed van een aantal aanpassingen in de bodemschematisatie op de berekende waterbeweging te bepalen. De motivatie voor de

uitgevoerde berekeningen wordt hier kort samengevat. De aanpassingen van het model en de resultaten van de berekeningen worden uitgebreid besproken in hoofdstuk 4.

aangepast geulenstelsel in de monding

Om de invloed van de getijbeweging op de oriëntatie en omvang van geulen onafhankelijk van de bestaande geulconfiguratie te onderzoeken zijn de geulen in het mondingsgebied in het model verwijderd. De resultaten van deze berekeningen zijn geïnterpreteerd op basis van de hypothese dat in gebieden waar zich hogere snelheden ontwikkelen dan in omliggende gebieden geulen zullen ontstaan (willen bestaan, voorkeursligging).

opgelegde stroomrichting in en uit de Westerschelde

In verband met de oriëntatie en omvang van de geulen in het mondingsgebied (met name de ontwikkelingen van Deurloo en de Geul van de Walvischstaart) wordt in een aantal beschouwingen de veranderende richting van de ebstroming vanuit de Westerschelde (door een afname van de Honte ten gunste van de Schaar van Spijkerplaat) als belangrijke parameter genoemd. Om deze invloed te onderzoeken is de stroomrichting in de raai Vlissingen-Breskens geforceerd opgelegd.

bodemligging Scheur/Wielingen en Westerschelde

De laatste decennia is ten behoeve van de scheepvaart een aantal geuldelen in de Westerschelde en het mondingsgebied kunstmatig verdiept. Ook de bodemligging in andere delen van de Westerschelde is veranderd. Om de invloed van deze veranderingen op de waterbeweging in het mondingsgebied te onderzoeken is de bodemschematisatie in deze gebieden aangepast, zodat die overeenkomt met de situatie rond 1970. Dit is zowel voor Scheur/Wielingen, het westelijk deel en het midden/oostelijk deel van de Westerschelde afzonderlijk als voor een combinatie van deze aanpassingen gedaan.

stormvloedkering Oosterschelde

Om de directe invloed van de bouw van de stormvloedkering op de waterbeweging in het mondingsgebied van de Westerschelde te onderzoeken is de stormvloedkering in de Oosterschelde uit het model verwijderd. De indirecte invloed via morfologische aanpassingen in het mondingsgebied van de Oosterschelde is niet onderzocht.

1.5 OPBOUW VAN HET RAPPORT

Hoofdstuk 2 beschrijft de gebruikte versies van het model, de oriëntatiefase, de aanvullende calibratie en verificatie. Een beschrijving van het getij in het mondingsgebied van de Westerschelde (anno 1996) wordt gegeven in hoofdstuk 3. In hoofdstuk 4 worden de resultaten van berekeningen met aangepaste modelschematisaties gegeven. De berekende getijveranderingen zijn vergeleken met waargenomen ontwikkelingen. De conclusies van deze studie worden samengevat in hoofdstuk 5. Hierbij worden de resultaten van de modelberekeningen onder andere gebruikt om de morfologische structuur en ontwikkeling van de Westerscheldemond vanuit de getijbeweging te verklaren. Tenslotte worden aanbevelingen gedaan om resterende onbegrepen factoren in de morfologische ontwikkeling van de Westerscheldemond verder te onderzoeken.

Een belangrijk deel van dit rapport wordt gevormd door de bijlagen, waarin de modelresultaten op diverse wijzen zijn gepresenteerd.

2. KUSTSTROOK-model

2.1 ALGEMEEN

Om de invloed van bodemveranderingen op de waterbeweging te onderzoeken is een afgeregeld model nodig met voldoende detail om bodemveranderingen te kunnen modelleren en interpreteren en met randvoorwaarden die buiten het gebied liggen dat door de aanpassingen beïnvloed wordt.

Tijdens de oriëntatiefase van de getijreconstructie zijn een aantal berekeningen uitgevoerd op basis van het rechte KUSTSTROOK-model, zoals dat beschikbaar was in oktober 1997. Tijdens deze oriëntatie is gekeken of veranderingen waarneembaar zijn en wat het invloedsgebied van grootschalige bodemaanpassingen is. Het KUSTSTROOK-model bleek in principe geschikt te zijn. De bodemschematisatie van het noordelijk deel van het gebied (langs de zuidwestkust van Walcheren, Oostgat) was echter te grof om de stroming in dit gebied met voldoende detail te kunnen reproduceren. Sprongen in het rechthoekige rooster langs de kustlijn veroorzaakten ongewenste randeffecten.

Parallel aan de oriëntatiefase werd door RIKZ gewerkt aan een update van het KUSTSTROOK-model. Aan het begin van de tweede fase van de getijreconstructie (januari 1998) was een aangepaste kromlijnige modelschematisatie beschikbaar (zie figuur 2.1). Het rekenrooster in het noordelijk deel van het studiegebied (Oostgat/Deurloo systeem voor de zuidwestkust van Walcheren) bleek veel beter: kleinere gridafmetingen (ca. 400 m) en gelijkmatiger begrenzingen. In het zuidelijk deel (voor de Zeeuws Vlaamse kust) zijn de gridafmetingen groter (ca. 1000 m).

Hoewel de versie van januari 1998 een hele verbetering is ten opzichte van de versie van oktober 1997 is de resolutie van het KUSTSTROOK-model in het mondingsgebied van de Westerschelde nog steeds vrij grof vergeleken met de geulafmetingen. Het Oostgat is in het model bijvoorbeeld maar 2 tot 3 gridcellen breed.

2.2 RESULTATEN ORIËNTERENDE BEREKENINGEN

In deze paragraaf worden de resultaten van de tijdens de oriëntatiefase uitgevoerde berekeningen samengevat. Voor een uitgebreider verslag van deze fase van de studie wordt verwezen naar Svašek, 1997b.

Tijdens de oriëntatiefase zijn de volgende berekeningen uitgevoerd:

- Referentieberekening oriëntatiefase (A)
- Verondieping van de Vlakte van de Raan (B)
- Verondieping Scheur (C)
- Oosterschelde zonder stormvloedkering (D)
- Doorbraak van de Geul van de Walvischstaart (E)
- Volledige afsluiting Oosterschelde (F)

De bodemligging van de gebruikte versie van het KUSTSTROOK-model (oktober 1997) was gebaseerd op lodingen uitgevoerd in de jaren 1989 tot 1994. Voor elke berekening is de periode van 1 t/m 3 oktober 1992 gesimuleerd, waarvan de resultaten alleen voor de laatste dag, een doortij, zijn bekeken (berekend getijverschil bij Vlissingen 3.26m, terwijl gemiddeld doortij, gemiddeld tij en gemiddeld springtij respectievelijk 3.02, 3.86 en 4.47 m zijn).

De berekeningen met verondieping Scheur (C) en Oosterschelde zonder stormvloedkering

(D) zijn vergelijkbaar met berekeningen die tijdens de tweede fase zijn uitgevoerd (zie hoofdstuk 4, berekening 11 en 15). De resultaten komen in grote lijnen overeen. Door gebrek aan detail in het rechthoekige model gebruikt tijdens deze oriëntatiefase was het echter nog niet mogelijk om de invloed op de stromingen in het Oostgat voldoende nauwkeurig te bepalen.

Na de verondieping van de Vlakte van de Raan (B) blijken de verhangen over het mondingsgebied toe te nemen (meer weerstand). De debieten over de Vlakte van de Raan nemen af. De debieten in de geulen nemen toe.

Door de doorbraak van de Geul van de Walvischstaart (E) nemen de debieten in dit gebied toe en neemt de stroming door de andere geulen (Wielingen en Oostgat) af.

Bij volledig afsluiten van de Oosterschelde (F) gaat er veel meer (25%) water door de noordelijke geulen van het mondingsgebied van de Westerschelde stromen. De zuidelijke geulen worden hierdoor ontlast.

Het invloedsgebied van de aanpassingen bleef bij alle berekeningen (uitgezonderd de volledig afgesloten Oosterschelde) beperkt tot 20 á 30 km vanaf de ingreep. De grens van het model ligt ongeveer 50 km vanaf het studiegebied.

Op grond van de resultaten van de oriëntatiefase is besloten om de koppeling met en uitwerking van de getijanalyse (tweede fase) uit te voeren met de kromlijnige versie van het KUSTSTROOK-model die in januari 1998 beschikbaar is gekomen. Omdat minder randeffecten optreden en de schematisatie in het Oostgat gedetailleerder is, wordt de stroming in het Oostgat in deze nieuwe versie realistischer weergegeven.

2.3 BESCHRIJVING VERSIE JANUARI 1998

De bodemligging in het gebruikte KUSTSTROOK-model (versie januari 1998) is in het studiegebied gebaseerd op lodingen van 1994 tot 1996 (zie figuur 2.2). Als randvoorwaarden waren 3 perioden van 10 dagen beschikbaar (in 1985, 1991 en 1996). Voor de getijreconstructie is de periode van 1 tot 10 januari 1996 gebruikt, omdat voor deze periode een astronomisch getij beschikbaar was. Tijdens deze periode varieert het voorspelde getijverschil bij Vlissingen van 3.00 tot 4.26 m (gemiddeld doottij, gemiddeld tij en gemiddeld springtij zijn respectievelijk 3.02, 3.86 en 4.47 m).

De gridlijnen van het kromlijnige model volgen de kustlijnen en de belangrijkste geulen. De doorstroomoppervlaktes in het model ter plaatse van meetraai 11, 12 en 14 verschillen gemiddeld minder dan 10% van gemeten profielen tijdens stroommetingen in 1991 tot 1995. Dit is acceptabel, het doorstroomoppervlak van het Oostgat bleek echter nog met 11 tot 26% af te wijken van profielen op basis van lodingen in 1992 en 1993. Daarom is besloten de diepte punten in dit gebied handmatig aan te passen.

De berekende stroombeelden zijn vergeleken met de stroomatlas. Hieruit volgen geen significante afwijkingen. Ook komen de berekende debieten in grote lijnen overeen met op basis van snelheidsmetingen berekende waarden. Verschillen hierin worden veroorzaakt door meetonnauwkeurigheden, beperkingen van het model en doordat het berekende getij (januari 1996) afwijkt van de getijsituatie tijdens de metingen.

Een analyse van historische meetgegevens bevat aanwijzingen dat de verdiepingen van de vaargeul in de Westerschelde het getijverschil en getijvolume bij Vlissingen kunnen beïnvloeden. Dit zou ook invloed kunnen hebben op de stromingen in het mondingsgebied. Om dit verschijnsel tijdens de getijreconstructie te onderzoeken dient de bodemligging in de Westerschelde te worden aangepast. Daarbij is het echter van belang dat naast de grootschalige waterbeweging in het mondingsgebied ook de grootschalige waterbeweging in de Westerschelde goed gereproduceerd wordt. De waterstanden in het mondingsgebied

verschillen slechts enkele centimeters van voorspelde waarden. De waterstanden bij Bath bleken echter meer dan 10% (ca. 20 tot 40 cm) af te wijken van voorspelde waarden. Daarom is besloten ook de modelschematisatie van de Westerschelde aan te passen.

2.4 AANPASSINGEN EN CALIBRATIE

De bodemschematisatie bij het Oostgat en Bankje van Zoutelande bleek ten opzichte van de lodingsgegevens te veel afgevlakt te zijn. Dit probleem is verholpen door de dieptepunten in dit gebied zo aan te passen dat de dieptes ter plaatse van de snelheidspunten overeenkomen met gemeten dwarsprofielen.

Het belangrijkste punt van zorg was echter de waterbeweging in de Westerschelde (bij Bath). Om de waterbeweging in de Westerschelde beter te kunnen reproduceren is besloten om een aanvullende calibratie uit te voeren. Het berekende getijverschil was in het oostelijk deel meer dan 10% groter dan de voorspelde waarde. De reden hiervoor is dat het KUSTSTROOK-model bij Doel (5 km van de grens) een constante afvoer als randvoorwaarde heeft, terwijl hier in werkelijkheid nog getijstromingen optreden. Dit probleem is aangepakt door het model uit te breiden tot Gent. Vervolgens bleek echter dat ook de ruwheid in de Westerschelde en het mondingsgebied moest worden aangepast om de waterstanden ter plaatse van de meetstations in overeenstemming te brengen met gemeten waarden.

In figuur 2.3 zijn de aanpassingen gevisualiseerd. Voor een aantal locaties en raaien (zie figuur 2.4) zijn waterstand- en debietkrommen gegeven in bijlage 1. De getijverschillen, eb- en vloedvolumina en kenteringstijdstippen zijn gegeven in bijlage 7.

Uitbreiding tot Gent (2)

Het model is uitgebreid tot Gent op basis van de het rekenrooster van SCALWEST. In plaats van grotere getijverschillen werden door het model met deze aanpassing duidelijk kleinere getijverschillen berekend. Daarnaast treedt met deze aanpassing een forse vertraging op ten opzichte van de voorspelde waarden en het niet aangepaste model. Deze verschijnselen wijzen erop dat de ruwheid in het model te hoog is. In het KUSTSTROOK-model zijn de ruwheden in de Westerschelde overal gelijk (Manningwaarde 0.030). In het SCALWEST-model zijn de ruwheden aanzienlijk lager (variërend tussen de 0.0155 en 0.0255, zie figuur 2.3).

Aanpassing ruwheid Westerschelde (3)

De ruwheid in de Westerschelde is vervolgens verlaagd op basis van het SCALWEST-model. Hiermee wordt bij Bath een aanzienlijke verbetering ten opzichte van de vorige twee berekeningen bereikt. Nu blijken echter bij Vlissingen de getijverschillen te groot te worden. In het mondingsgebied is de ruwheid waarschijnlijk te laag.

Aanpassing ruwheid mondingsgebied (4) = referentieberekening

Tenslotte is daarom de ruwheid in het mondingsgebied verhoogd. Voor de manningwaarde is het gemiddelde gekozen tussen de manningwaarde in het zeegebied en de manningwaarde in het westelijk deel van de Westerschelde. Dit is tevens een ruwheid tussen die van de tweede berekening (te klein getijverschil bij Vlissingen) en de derde berekening (te groot getijverschil bij Vlissingen). Inderdaad komen de met deze aanpassing berekende waterstanden bij Vlissingen redelijk overeen met de voorspelde waarden. Het model met de drie beschreven aanpassingen reproduceert de waterstanden zowel in het mondingsgebied als in de Westerschelde redelijk (zie ook 2.5). De laatste berekening is daarom als referentieberekening voor de getijreconstructie gebruikt.

2.5 VERIFICATIE REFERENTIEBEREKENING

De calibratie is uitgevoerd op basis van een visuele vergelijking van de waterstandskrommes, zoals die zijn gepresenteerd in bijlage 1. Hierin is duidelijk te zien dat de berekende waarden nog steeds iets afwijken van de gemeten waarden (voorspeld op basis van waarnemingen). In het oostelijk deel van de Westerschelde is een aanzienlijke verbetering ten opzichte van de oorspronkelijke versie zichtbaar. In het mondingsgebied zelf is de fase van het getij ook verbeterd. Het getijverschil is gemiddeld ongeveer 10 centimeter (3%) te groot. Dit blijkt ook uit een vergelijking van de berekende en voorspelde hoog- en laagwaterstanden voor de ochtend van 7 januari 1996 (zie onderstaande tabel). Lokale verschillen kunnen veroorzaakt zijn door de discrete berekeningsuitvoer (hoog- of laagwater kan tussen twee uitvoertijdstippen zijn opgetreden) en de situatie bij de meetstations. Verdere verhoging van de ruwheid in het mondingsgebied zou de resultaten waarschijnlijk nog iets kunnen verbeteren. Voor toepassing van het model binnen deze studie is de bereikte nauwkeurigheid echter voldoende.

	hoogwaters (m t.o.v. NAP)		laagwaters (m t.o.v. NAP)	
	berekend	voorspeld	berekend	voorspeld
Westkapelle	1.93	1.92	-1.65	-1.67
Cadzand	2.15	2.07	-1.92	-1.85
Vlissingen	2.20	2.18	-1.98	-1.91
Terneuzen	2.46	2.43	-2.15	-1.99
Bath	2.93	2.90	-2.37	-2.19

Ook de doorstroomoppervlaktes in het model en berekende getijvolumina zijn vergeleken met doorstroomoppervlaktes en getijvolumina op basis van metingen. In bijlage 2 zijn de modelresultaten voor een aantal meettraaien gepresenteerd en vergeleken met metingen uit de periode 1991 tot 1995.

Verschillen tussen berekende en gemeten getijvolumina kunnen veroorzaakt worden doordat verschillende getijden zijn vergeleken, meetonnauwkeurigheden en/of beperkingen van het gebruikte model. Om verschillende getijden onderling te enigzins te vergelijken zijn de getijvolumina lineair met het getijverschil bij Vlissingen verondersteld. In dat geval zijn de verschillen tussen berekende en gemeten getijvolumina kleiner dan 30 %. De doorstroomoppervlaktes verschillen maximaal 10 %.

Vergelijking van berekende stroombeelden met stroomatlassen laten in het mondingsgebied geen significante verschillen zien. Alleen aan de zuidwestrand van het model treedt rondstroming op. Dit geldt zowel voor de oorspronkelijke versie van het KUSTSTROOK-model (januari 1998) als voor de binnen deze studie gebruikte referentieberekening. Deze rondstroming hangt waarschijnlijk samen met de randvoorwaarden van het model en/of de ruwheden in het zeegebied. De invloed op de stroming in het studiegebied is beperkt.

Samenvattend kan worden gesteld dat het model de grootschalige waterbeweging in de Westerscheldemon en omgeving voldoende nauwkeurig reproduceert om de invloed van aanpassingen in de bodemschematisatie op de stromingen in het mondingsgebied te kunnen bepalen.

3. Getij anno 1996 (referentieberekening)

3.1 ALGEMEEN

In dit hoofdstuk wordt allereerst de grootschalige waterbeweging beschreven. Na een korte beschrijving van het getij in de Noordzee en de Westerschelde wordt het getij in het mondingsgebied tijdens een getijcyclus beschreven. Vervolgens worden de stromingen in de geulen en over de platen van het mondingsgebied gekarakteriseerd. Aan de variatie van de getijbeweging binnen de doortij-springtijcyclus wordt apart aandacht besteed.

3.2 GROOTSCHALIGE WATERBEWEGING

voortplanting getijgolf

Het getij in de Noordzee wordt bepaald door het getij op de Atlantische oceaan, de ligging van de kusten en de diepteveranderingen. Voor een beschrijving en verklaring wordt verwezen naar RIKZ, 1996. Een prinsipschets van het getij in de Noordzee is gegeven in figuur 3.1. Voor de hoofdcomponent van het getij (M2) is sprake van drie amphidromische systemen¹. Het getij langs de noordzeekust van Nederland is te karakteriseren als een lopende golf, lopend van zuid naar noord.

Bij het mondingsgebied van de Westerschelde splitst de getijgolf zich schijnbaar in tweeën. Eén tak plant zich voort naar het noordoosten langs de buitenrand van het mondingsgebied. De andere tak buigt naar het oosten en plant zich voort door de geulen en over de Vlake van de Raan, de Westerschelde en Zeeschelde in. Langs de buitenrand (de Noordzeegolf) neemt de getijamplitude naar het noorden geleidelijk af, omdat de afstand tot het amphidromisch punt kleiner wordt. In de Westerschelde neemt de getijamplitude juist toe, vanwege een gedwongen opslinging² (zie figuur 3.2 en 3.3).

¹ Sterk gesimplificeerd kan de waterstandsvariatie ten gevolge van het getij in de zuidelijke Noordzee worden vergeleken met een muntstuk dat op een tafel valt. In veel gevallen blijft het dan een tijdje in beweging, waarbij de randen van het muntstuk op en neer gaan (getijamplitude), terwijl het muntstuk in het midden op constante hoogte boven de tafel blijft (amphidromisch punt). In tegenstelling tot het muntstuk is er bij het Noordzeegetij een drijvende kracht (het oceaangegetij) die ervoor zorgt dat deze beweging voortdurend doorgaat. Als alleen een deel van de rand wordt bekeken gaat het muntstuk daar op en neer. Als meerdere delen worden bekeken, blijkt dat de op en neergaande beweging steeds iets eerder (of later) optreedt dan bij aangrenzende delen (lopende getijgolf). Als een muntstuk niet exact rond is, zullen de randen die iets verder van het midden liggen, meer op en neer gaan dan randen die dichterbij het midden liggen (variërende getijamplitude langs de kust).

² Ook de Westerschelde kent een gedwongen periodieke waterstandsvariatie ten gevolge van het getij. Deze is te vergelijken met de beweging van een springtouw dat aan één kant wordt vastgehouden en aan de andere kant op en neer wordt bewogen. Afhankelijk van de snelheid waarmee dat wordt gedaan, de lengte, de dikte en het materiaal van het touw kan er een situatie ontstaan dat het touw in het midden verder uitwijkt dan aan beide uiteinden.

het getij in het mondingsgebied

Om het getij in het mondingsgebied te beschrijven kan dit gebied worden geschematiseerd tot een driehoek begrensd door de kustlijnen van Walcheren en de Zeeuws/Vlaamse kust (zie figuur 3.4). Het verloop van de waterstanden, het verval en de stroomsnelheden zijn gegeven in figuur 3.5.

Figuur 3.6 geeft een beeld van de waterbeweging in het mondingsgebied van de Westerschelde, gedurende een getijcyclus. Hierin zijn de waterstanden ten opzichte van de waterstand bij Vlissingen en de stroomrichting weergegeven³.

De beschrijving van het getij in het mondingsgebied begint en eindigt rond laagwater, elke 2 uur is de toestand/ontwikkeling van de waterstanden en stromingen hieronder beschreven:

Laagwater, ca. 6 uur na en 6 uur voor hoogwater Vlissingen

Terwijl de Westerschelde nog uitstroomt en in de hals bij Vlissingen het water langzaam daalt tot laagwater, begint de waterstand in de zuidelijke inloop van Scheur/Wielingen bij Zeebrugge te stijgen.

Op het moment dat de waterstanden hier gelijk zijn aan de waterstanden in de hals bij Vlissingen is het ongeveer laagwater bij Westkapelle (inloop Oostgat/Deurloo). Het laagwater is hier door het kleinere getijverschil echter al enige tijd hoger dan bij Vlissingen en Zeebrugge.

Op dit moment (waterstanden Zeebrugge en Vlissingen gelijk) wordt de stroming vanuit de Westerschelde door de Wielingen alleen door wrijving vertraagd. Als de waterstanden bij Zeebrugge verder stijgen en bij Vlissingen dalen tot laagwater wordt de stroming ook door de vervalkracht vertraagd.

Door de vervalkracht wordt de zuidwaartse Noordzeestroming versneld en afgebogen. Hierdoor komt in het noordelijk deel van het gebied (Oostgat/Deurloo/Raan) een zuidoostwaartse stroming op gang die het mondingsgebied begint te vullen, terwijl door Scheur nog een zwakke zuidwestgerichte uitstroming optreedt.

Stroomkentering in Scheur/Wielingen, ca. 4 uur voor HW Vlissingen

Omdat de waterstanden in het zuiden eerder en sneller stijgen dan in het noorden is na enige tijd de waterstand in de inloop van Scheur/Wielingen hoger dan bij Westkapelle en wordt zowel de uitstroming van de Westerschelde als de zuidwaartse Noordzeestroming vertraagd. Ook bij Vlissingen stijgen de waterstanden sneller dan bij Westkapelle. Toch blijven de waterstanden in Westkapelle hoger, zodat de stroming door het Oostgat/Deurloo systeem en over de Vlakte van de Raan meer oostwaarts gericht wordt en het estuarium begint te vullen.

Hoewel de waterstanden in de inloop van Scheur/Wielingen enige tijd hoger zijn dan in de hals van het estuarium begint pas nu de vloedstroom in de Scheur/Wielingen op gang te komen.

Instroming, ca. 2 uur voor HW Vlissingen

Terwijl op de Noordzee kentering optreedt is de waterstand in de hals van het estuarium veel lager dan in de inloop van Scheur/Wielingen en iets lager dan in de inloop van Oostgat/Deurloo. In het hele mondingsgebied treedt nu stroming richting de hals van het

³De modelresultaten laten zien dat de schematisatie tot een driehoekig vlak niet geheel juist is. Vooral bij noord-zuid gerichte vervallen over het gebied is het verhang over de ondiepe delen veel groter dan over de diepere delen, bijvoorbeeld Scheur/Wielingen. Ongeveer een uur voor hoogwater en laagwater Vlissingen treden langs de noordelijke oever zelfs aan elkaar tegengestelde verhangen op. Voor hoogwater zijn de waterstanden bij Zoutelande tijdelijk hoger dan bij Westkapelle en Vlissingen, voor laagwater zijn ze tijdelijk lager.

estuarium op. De waterstanden op de Noordzee stijgen eerder en sneller dan in de hals. Met name de stroomsnelheden in Scheur/Wielingen nemen hierdoor fors toe. Over Oostgat/Deurloo zijn de verhangen kleiner dan over de diepere Scheur/Wielingen, zodat na verloop van tijd de snelheden in het noorden lager zijn dan in het zuiden. Langs de zeewaartse rand begint zich na enige tijd een noordwaartse stroming te ontwikkelen. De vloedstroming door Scheur/Wielingen wordt maximaal.

Hoogwater Vlissingen en stroomkentering in Oostgat/Deurloo

Het wordt hoogwater bij (achtereenvolgens) Zeebrugge, Westkapelle en Vlissingen. Het hoogwater bij Vlissingen is hoger dan bij Zeebrugge, waar het weer hoger is dan bij Westkapelle. Over Oostgat/Deurloo treden vrij sterke verhangen op die de vloedstroming snel doen vertragen. Rond hoogwater treedt hier stroomkentering op.

Stroomkentering in Scheur/Wielingen, ca 2 uur na HW Vlissingen

Pas ongeveer anderhalf uur na HW Vlissingen kentert in Scheur/Wielingen de stroom. Op dat moment hebben zich in Oostgat/Deurloo al forse snelheden ontwikkeld. Op de Noordzee neemt de noordwaartse stroming af. In het gehele mondingsgebied treedt nu zeewaarts gerichte uitstroming van de Westerschelde op. De waterstanden in het zuiden dalen sneller dan in het noorden. De verhangen over Scheur/Wielingen worden hierdoor even groot als over Oostgat/Deurloo.

Instroming, ca. 4 uur na HW Vlissingen

Doordat de waterstanden bij Vlissingen en Zeebrugge sneller dalen dan bij Westkapelle nemen de verhangen over Oostgat/Deurloo sterk af, terwijl de verhangen over Scheur/Wielingen vrij groot blijven. De maximale ebsnelheden door Scheur/Wielingen worden vrij snel groter dan die door Oostgat/Deurloo. In Oostgat/Deurloo vertraagt de stroom, in Scheur/Wielingen versnelt de stroom.

Laagwater, ca. 6 uur na en 6 uur voor hoogwater Vlissingen

Herhaling bovenstaande.

eb- en vloedperioden

Omdat de getijgolf van zuid naar noord loopt lijkt het paradoxaal dat in de noordelijke geul Oostgat eerder kentering optreedt dan in de zuidelijk gelegen geulen Scheur en Wielingen. De reden is dat van zuid naar noord de getijamplitude afneemt. Hoewel het water langs de zeerland in het noorden pas later gaat stijgen dan in het zuiden, werkt er rond laagwater ten gevolge van het kleinere getijverschil al een vervalkracht richting het estuarium. Rond hoogwater treedt een vergelijkbaar verschijnsel op, namelijk een vervalkracht zeewaarts ten gevolge van het kleinere getijverschil.

Door het kleinere getijverschil *lijkt* het getij bij Westkapelle ten opzicht van Vlissingen vroeger te zijn dan bij Zeebrugge. Enkele uren na begin van eb en vloed zijn de vervallen over Oostgat/Deurloo kleiner dan rond hoog- en laagwater en vertraagt de stroom in dit gebied. De vervallen over Scheur/Wielingen zijn dan veel groter dan over Oostgat/Deurloo door het *echte* faseverschil tussen zeerland en hals. Het gevolg hiervan is dat in de noordelijke geulen de maximale snelheden optreden tijdens de beginfase van eb en vloed, in de zuidelijke geulen treden deze op tijdens de eindfasen.

Ondanks het feit dat de overgang tussen eb en vloed alleen lokaal zijn aan te geven, kan een globale indeling in eb- en vloedperioden voor het gehele gebied worden gehanteerd. Vloedstroom (instroming estuarium) treedt ongeveer op van laagwater tot hoogwater, ebstroom (uitstroming) van hoogwater tot laagwater. Er is dus een faseverschil tussen vertikaal en horizontaal getij van ongeveer 90°. Vooral rond hoogwater is er in Scheur/Wielingen echter nog een duidelijke vloedstroom, rond laagwater is er in dit gebied nog een ebstroom (zie figuur 3.5 en figuur 5.2).

3.3 STROMINGEN IN HET MONDINGSGBIED

De grootschalige stromingen in het mondingsgebied tijdens een getij zijn reeds beschreven in paragraaf 3.2. In deze paragraaf worden vooral voor morfologische ontwikkelingen relevante stromingseigenschappen beschreven. Allereerst wordt aangegeven welke parameters dit zijn. Op een aantal (richtingsspreiding, maximale stroming) wordt verder ingegaan.

In de Westerschelde wordt bij de koppeling van hydraulica en geulparameters veel gebruik gemaakt van de begrippen eb- en vloedgeulen, eb- en vloeddominantie (bijvoorbeeld een relatie tussen dominant getijvolume en geuldoorsnede). Om een aantal redenen is bij deze studie het gebruik van deze begrippen en relaties vermeden:

- Het mondingsgebied bestaat uit ondiepe en diepe gebieden. Platen, schorren en slikken komen hier niet voor. Geulbegrenzingsen zijn dan ook veel minder eenduidig dan in de Westerschelde.
- Alleen in de geulen langs de oevers: Oostgat, Sardijngeul en Wielingen is de stroming duidelijk één dimensionaal. In de andere geulen wisselt de stroming zeer geleidelijk van richting, zodat er geen duidelijke eb- en vloedrichting te onderscheiden is (zie figuur 3.9). Door de richtingsspreiding is er ook geen duidelijk onderscheid tussen vloed- en ebvolumina.
- In het mondingsgebied zijn in tegenstelling tot in de Westerschelde slechts in enkele raaien één of tweemaal debietmetingen uitgevoerd. Empirische relaties tussen dominant getijvolume en geuloppervlak zijn daarom niet voorhanden. Een recente studie (Gerritsen, 1998) wijst erop dat ook golven een belangrijke rol spelen.
- Hoewel er duidelijke verschillen tussen de eb- en vloedstroom zijn, is door het faseverschil tussen verticaal en horizontaal getij niet direct duidelijk welke getijfase het meest van belang is voor morfologische ontwikkelingen. Maximale eb- en vloedstroomsnelheden treden namelijk op bij verschillende waterdiepten en bij het berekenen van zandtransporten (morfologische veranderingen) zijn zowel de diepte als de snelheid van belang. Om deze reden zijn ook schuifspanningen berekend en gepresenteerd in bijlage 6.

Om toch de interactie tussen getij en morfologie te kunnen beschrijven zijn voor de geulen in het mondingsgebied⁴ een aantal andere kwalitatieve relaties verondersteld:

- De richtingsspreiding is een indicatie voor het karakter van een geul. Hoe meer de stroomrichting wisselt, des te ondieper en breder zal de geul zijn⁵. De richtingsspreiding is weergegeven als stroomrozen (figuur 3.9), en 'gestapelde'

⁴ Ondiepe gebieden (banken) kunnen bij deze studie worden gezien als de afwezigheid van getijgeulen. Bij de zandhuishouding van banken (en geulen) kunnen naast het getij ook windgolven en deining een belangrijke rol spelen.

⁵ Deze relatie is wederzijds:

- Bij ronddraaiende stroming, zullen er altijd getijfasen zijn met een stroming dwars over de geul. De geul zal dan als zandvang werken.
- Als een geul diep is ten opzichte van de omliggende gebieden zullen de snelheden dwars over de geul kleiner zijn dan in dwarsrichting. In langsrichting kunnen de snelheden zich namelijk ongestoord ontwikkelen. De snelheden dwars over de geul worden echter beperkt door de snelheden in de omliggende gebieden, omdat het debiet dwars over de geul gelijk is aan het debiet over het aangrenzende ondiepe gebied, maar de diepte groter is.

- schuifspanningsrozen⁶ (bijlage 6.1).
 - De richting van de getijmaximale snelheden⁷ (bijlage 4.1) is een indicatie voor de oriëntatie van een geul.
 - De absolute grootte van de getijmaximale snelheden (bijlage 4.1) en/of getijgemiddelde schuifspanningen (bijlage 6.2) zijn een indicatie voor de diepte (geulomvang).
- Deze relaties zijn in hoofdstuk 4 gebruikt om berekende veranderingen in de waterbeweging te interpreteren.

stroomrichtingsspreiding

In de westelijke geulen langs de kustlijnen Wielingen, Oostgat Zuid en Sardijngeul is de richting van de stroming zowel tijdens eb als vloed gelijk aan de geulrichting (één dimensionaal, zie figuur 3.9).

De stroming langs de zeerand wordt bepaald door de getijgolf in de Noordzee. De hoofdrichting van de stroming in dit deel van de Noordzee is zuid-noord. Tijdens kentering van de stroming op de Noordzee wordt de stroming door de lokale oost-westgerichte vervallen (in- en uitstroming Westerschelde en monding) bepaald. Hierdoor ontstaat op de overgang van zee- en mondingsgebied een tegen de klok in draaiende stroming (ronde stroomrozen, zie figuur 3.9). In de ondiepe gebieden langs de zeerand (Rassen, Vlakte van de Raan en Schooneveld) zijn de stroomrozen het meest rond, maar ook in de Geulen langs de zeerand (van noord naar zuid: Oostgat Noord, Deurloo West en Scheur is er een duidelijke stroomrichtingsspreiding.

Hoewel in het voorgaande veel is gesproken over het geulensysteem langs de zuidelijke oever (Scheur/Wielingen) en het geulensysteem langs de noordelijke oever (Oostgat/Deurloo) is in het oostelijk deel van het middengebied het onderscheid tussen deze twee systemen niet zo duidelijk. In dit gebied zijn geulen aanwezig die tijdens bepaalde getijfasen een duidelijke verbinding tussen beide systemen tot stand brengen (zie figuur 1.2 voor de lokatie): Geul van de Rassen, Deurloo Oost, Deurloo West en Geul van de Walvischstaart. Al deze geulen staan niet alleen met de 'in het verlengde' gelegen geulen in verbinding (ééndimensionaal). De stroomrichting laat verbindingen met verschillende geulen zien (zie figuur 3.9).

Deurloo Oost vormt zowel verbinding met Geul van de Rassen en Deurloo West enerzijds en Sardijngeul en Geul van de Walvischstaart anderzijds. Deurloo West staat in verbinding met de Noordzee enerzijds en Deurloo West en Geul van de Walvischstaart anderzijds. De Geul van de Walvischstaart vormt een verbinding tussen Wielingen enerzijds en Geul van de Rassen, Deurloo en Vlakte van de Raan anderzijds. De Geul van de Rassen heeft een verbinding met de zeerand (Oostgat Noord) enerzijds en Deurloo West en Geul van de Walvischstaart anderzijds. Bij al deze geulen zijn er ook (zwakke) stromingen dwars over de geul.

maximale stroming

In de geul langs de kust van Walcheren (Oostgat) treden de kenteringen en tijdstippen van maximale eb- en vloodsnelheden eerder op dan in de zuidelijke geul langs de kust van Zeeuws Vlaanderen (Wielingen). De reden hiervoor is het verschil in getijamplitude langs

⁶Per getijfase (stappen van een uur) is de schuifspanning berekend en toegekend aan een bepaalde richtingssector. Per richtingssector zijn de schuifspanningen gestapeld weergegeven.

⁷Naast de absolute waarde en richting van de getijmaximale snelheden is het tijdstip van optreden weergegeven om de relatie met de grootschalige waterbeweging (getijfase beschreven in paragraaf 3.2 aan te geven).

de zeerland van het gebied (zie paragraaf 3.2).

Verder is er ook een duidelijk verschil tussen eb en vloed, wat de ontwikkeling van de stromingen in het gebied (snelheidsverloop) betreft. De reden hiervoor is het faseverschil tussen vertikaal en horizontaal getij van ongeveer 90°. Hierdoor is sprake van een duidelijke getijasymmetrie in de stroming⁸. Het gevolg hiervan is dat in de zuidelijke geulen (Scheur en Wielingen) de getijmaximale snelheden optreden tijdens vloed en in de noordelijke geulen (Oostgat/Deurloo) de getijmaximale snelheden over het algemeen optreden tijdens eb (zie figuur 3.7).

Naast de maximale eb- en vloodsnelheden spelen natuurlijk ook de lengte van eb en vloed een rol. De getijresiduele debieten (netto waterverplaatsingen) zijn berekend om de verhouding tussen eb- en vloodstromingen te bepalen. De getijresiduele debieten (van 7 januari 1996) laten op het eerste gezicht een sterk noordwaartse oriëntatie zien (figuur 3.8). Dit algemene beeld komt vrij sterk overeen met dat van 3 oktober 1992 berekend tijdens de oriëntatiefase. Op kleinschaliger niveau zijn er vrij veel afwijkingen in zowel grootte als richting. Het model en de representativiteit van het berekende getij zijn onvoldoende geverifieerd om meer conclusies aan deze figuur te verbinden.

In Scheur, Wielingen en over de Vlakte van de Raan treden de maximale snelheden vlak voor hoogwater op richting de hals van de Westerschelde. In de geulen langs de noordelijke oever (Oostgat en Sardijngeul) en in het middengebied (Geul van de Rassen, Deurloo Oost, Deurloo West en Geul van de Walvischstaart) is niet duidelijk aan te geven wanneer de maximale stroming optreedt.

Een uitzondering vormt de Geul van de Walvischstaart. Hier treden de maximale snelheden

⁸Locaal wordt de stroming beïnvloedt door verschillen in waterstanden (vervalkracht) en de wrijvingskracht (hoe groter de bodemsnelheden, des te sterker de vertraging). Omdat het verticale getij (waterstanden, diepte) en horizontale getij (stromingen) niet in fase zijn (zie figuur 3.5), is de ontwikkeling van de stroming (snelheidskromme) tijdens eb anders dan tijdens vloed (getijasymmetrie). Zowel de vervalkrachten als de wrijvingskrachten spelen hierin een rol.

getijasymmetrie in vervalkrachten

De getijgolf is als het ware opgebouwd uit een hoogwatertop en een laagwatertop (zie figuur 3.3). De hoogwatertop (grotere diepte) plant zich over het algemeen sneller voort dan de laagwatertop. Het gevolg hiervan is dat het water voor hoogwater vrij snel stijgt (steil golffront, zie figuur 3.5).

Hoewel de hoogwatertop zich op de Noordzee sneller voortplant dan de laagwatertop is deze snellere voortplanting in het mondingsgebied niet waarneembaar, integendeel juist de laagwatertop plant zich sneller voort (zie figuur 3.3, de afstand tussen de LW-faselijnen is minder dan bij de HW-faselijnen). Een verklaring hiervoor is dat de hoogwatertop in het mondingsgebied meer gedempt wordt dan de laagwatertop, omdat de stroomsnelheden rond hoogwater groter zijn dan rond laagwater.

Omdat het water op de Noordzee sneller stijgt dan bij Vlissingen zijn tijdens de maximale vloodsnelheden (ca. 2 uur voor HW Vlissingen) de waterstandsverschillen over Scheur/Wielingen groter dan tijdens de vergelijkbare fase tijdens eb (ca. 4 uur na HW Vlissingen). Over Oostgat/Deurloo zijn de waterstandsverschillen 2 uur voor hoogwater (vloed) door de snelle waterstandsstijging juist klein ten opzichte van de vergelijkbare ebfase (zie figuur 3.5).

getijasymmetrie in wrijvingskrachten

De maximale snelheden treden in het zuidelijke geulensysteem (Scheur/Wielingen) op tijdens het laatste gedeelte van de vloed (vlak voor hoogwater). Hoewel de verhangen over de geulen dan afnemen, neemt de waterdiepte toe en de wrijving dus af. De snelheden worden dan hoger dan tijdens eb, wanneer bij het afnemen van de verhangen de waterdiepte juist afneemt. In het noordelijke geulensysteem (Oostgat/Deurloo) treden de maximale snelheden vooral op tijdens het begin van de eb. De waterdiepten zijn dan (vlak na hoogwater) groter dan tijdens het begin van de vloed (vlak na laagwater). De bodemwrijving in dit gebied is tijdens eb dus minder sterk dan tijdens vloed.

op tijdens eb, 1 á 2 uur voor laagwater. De stroomsnelheden blijven hoog ondanks de afnemende diepte (door toename van de vervalkracht) tot laagwater. Opmerkelijk is verder dat vlak voor hoogwater een vrij sterke noordoostwaartse stroming dwars over het noordelijk deel van het Bankje van Zoutelande kan ontstaan.

3.4 DOODTIJ-SPRINGTIJ CYCLUS

Een belangrijke variatie in de getijbeweging is de doodtij/springtij cyclus. De getijverschillen tijdens doodtij zijn ca. 2/3 van de getijverschillen tijdens springtij. De verhouding traagheid/weerstand is tijdens springtij anders dan tijdens doodtij. Het bekende schouderpiek verloop van de vloedkromme tijdens springtij ontstaat doordat na het begin van de instroming het verval en weerstand al snel in balans zijn en geen versnelling meer optreedt. Tegen hoogwater neemt het verval toch weer toe en krijgt de overhand over de afnemende bodemwrijving.

De referentie berekening zoals die bij deze studie wordt gehanteerd is een reproductie van het getij van 7 januari 1996. Het berekende getijverschil bij Vlissingen is in deze berekening 4.18 m. Dit is een getij tussen gemiddeld getij (3.86 m) en gemiddeld springtij (4.47 m). Dit getij is gekozen omdat springtij relatief meer invloed zullen hebben op morfologische ontwikkelingen⁹. Om de gevoeligheid van de modelberekeningen voor variatie binnen de doodtij-springtij cyclus te onderzoeken is naast de referentieberekening ook een gemiddeld springtij gereconstrueerd. Binnen de beschikbare randvoorwaardenset is het grootste getijverschil 4.31 m. De randvoorwaarden zijn met een factor 1.037 versterkt om een getijverschil bij Vlissingen van ongeveer 4.47 m te krijgen.

Springtij (5)

aanpassing: de randvoorwaarden van het model zijn vergroot met een factor 1.037, de resultaten zijn vooral bekeken voor de dag in de tijdreeks met het grootste getijverschil (inclusief factor: gemiddeld springtij)

Uiteraard nemen de getijverschillen, getijvolumina en snelheden in deze berekening toe t.o.v. de referentieberekening (bijlage 7). Aan de zeewaartse rand vervroegt het getij. Door de toegenomen damping (hogere snelheden) wordt het getij naar binnen toe vertraagt ten opzichte van de referentieberekening.

De ebvolumina in het mondingsgebied nemen in het gehele studiegebied toe. De getijvolumina in de hals zijn min of meer lineair met het getijverschil bij Vlissingen. Dit was ook de verwachting omdat dit de belangrijkste geul in de hals van de Westerschelde is. Het is duidelijk dat er een verband zal zijn tussen getijvolume en getijprisma van het estuarium (getijverschil x bergend oppervlak).

Langs de zeerand is er geen duidelijke lineariteit tussen getijvolume en getijverschil¹⁰.

⁹De zandtransporten tijdens springtij kunnen veel groter zijn dan tijdens doodtij ($S = u^n$ resulteert bijvoorbeeld is $S_{\text{springtij}} = 1.5^5 = 7.5$ en $S_{\text{doodtij}} = 1^5 = 1$). Daarom zijn de getijden die sterker zijn dan gemiddeld getij maatgevend.

¹⁰Dit beeld wordt gedeeltelijk bevestigd door metingen. Uit bewerkingen van een stroomatlas (De Looft, 1986) blijkt dat de ebsnelheden tijdens doodtij en springtij ongeveer gelijk zijn. In het zuidelijk deel van het Oostgat zijn de stroomsnelheden aan het begin van de vloed voor doodtij en springtij ook ongeveer gelijk, maar aan het eind van de vloed en tijdens de eb zijn de snelheden wel ca. 2/3 kleiner. Het beeld gaat echter niet op voor de vloedsnelheden in Oostgat Noord. Die zijn tijdens doodtij juist ongeveer de helft van de vloedsnelheden tijdens springtij. De ebsnelheden in Oostgat Noord zijn wel ongeveer gelijk voor doodtij en springtij.

Bijlage 6.7 laat zien dat tijdens springtij de stroming door Scheur en over de Vlake van de Raan relatief sterker is dan door het Oostgat. In het westelijk deel van het mondingsgebied is het vergelijken van verschillende getijsituaties door het herleiden naar gemiddeld getij met behulp van de getijfactor van het verticale getij dus niet juist. Binnen deze studie speelt dit echter alleen bij de verificatie (paragraaf 2.5). Verder zijn alle berekeningen voor dezelfde getijsituatie uitgevoerd.

De verschillen referentieberekening en springtij zijn beperkt (zie bijlage 6.4 en bijlage 4.1 en 4.2). Omdat binnen deze studie vooral kwalitatieve verbanden worden gelegd kan de referentieberekening binnen deze studie als voldoende representatief worden geacht voor de getijden binnen een doottij-springtij cyclus. Bij eventuele kwantitatieve beschouwingen dient echter wel aandacht aan de gevonden variatie te worden besteed.

4. Veranderingen in getij (gevoeligheidsberekeningen)

4.1 ALGEMEEN

In dit hoofdstuk worden de achtergronden, opzet en resultaten van een aantal berekeningen beschreven, waarbij aanpassingen in het model zijn aangebracht. De modelresultaten worden waar mogelijk geconfronteerd met waargenomen ontwikkelingen in waterbeweging en morfologie.

De modelresultaten worden in de bijlagen op diverse wijzen gepresenteerd. Bij de beschrijvingen is ten behoeve van de leesbaarheid slechts summier verwezen naar deze bijlagen. Bij het beschrijven van de invloed van de aanpassingen op de waterbeweging is over het algemeen eerst de invloed op de voortplanting van de getijgolf beschreven (getijverschillen, kenteringstijdstippen en getijvolumina Westerschelde, bijlage 7) en vervolgens meer in detail de invloed op de stromingen in het mondingsgebied (stroombeelden, bijlage 3; getijmaximale snelheden, bijlage 4; getijgemiddelde schuifspanningen, bijlage 6; kenteringstijdstippen en getijvolumina, bijlage 7).

4.2 AANGEPAST GEULENSTELSEL IN DE MONDING

De gangbare opvatting is dat de oriëntatie en afmetingen van de belangrijkste geulen in het mondingsgebied van de Westerschelde mede bepaald worden door de getijstromen. De geulconfiguratie heeft echter weer invloed op de getijbeweging. Om de invloed van de getijbeweging op de oriëntatie en omvang van geulen onafhankelijk van de bestaande geulconfiguratie te onderzoeken zijn de geulen in het model verwijderd. De resultaten van deze berekeningen zijn geïnterpreteerd op basis van de hypothese dat in gebieden waar zich hogere snelheden ontwikkelen dan in omliggende gebieden geulen zullen ontstaan (willen bestaan, voorkeursligging). Na deze initiële verdieping zijn de diepere delen in het 'voordeel'. Omdat de wrijvingskracht in de diepere delen relatief minder invloed heeft, kunnen zich grotere snelheden ontwikkelen dan in ondiepere delen. Dit verschijnsel is één van de mogelijke verklaringen dat de ligging van een geul (vanwege de historie van het gebied) af kan wijken van de voorkeursligging.

De volgende berekeningen zijn uitgevoerd (zie figuur 4.1):

- afgevlakt mondingsgebied (6)
- afgevlakt Oostgat/Deurloo systeem (7)
- aangepast afgevlakt Oostgat/Deurloo systeem (8)

Afgevlakt mondingsgebied (6)

aanpassing: het gehele mondingsgebied tussen de zeerand en de raai Vlissingen-Breskens is geschematiseerd tot een van west naar oost geleidelijk oplopend gebied.
De dieptes in noord-zuid richting zijn gemiddeld op basis van de bodemschematisatie van de referentieberekening

Door deze aanpassing nemen de getijverschillen in het mondingsgebied bij Westkapelle en Cadzand licht toe. In de Westerschelde nemen de getijverschillen af met 5 á 6 cm. Ook de getijvolumina nemen iets af (1%).

In grote lijnen is de waterbeweging gelijk aan die van de referentieberekening. Voor het gemak worden voor gebiedsaanduidingen de huidige geul- en bankbenamingen gehanteerd. Lokaal treedt het voorspelde effect op: waar de geulen zijn weggehaald worden de

stromingen zwakker, waar de banken zijn weggehaald worden de stromingen sterker. Verder verdwijnen er een aantal details, bijvoorbeeld ter plaatse van de Spleet (maximale snelheden tijdens eb in plaats van vloed, zoals bij omliggende gebieden). Ook de verhouding tussen maximale eb- en vloodsnelheden in het noordoostelijk deel is op verschillende plaatsen veranderd. Kentering treedt in het zuidelijk deel eerder op en in het middendeel en noordelijk deel later. Anders gezegd: kentering treedt ten opzichte van de referentieberekening eerder op in de verondiepte delen en later in de verdiepte delen. Vooral over de Vlakte van de Raan en door de Deurloo (middendeel) is de vloedperiode langer geworden en de ebperiode dus korter (10 á 15 minuten).

De maximale snelheden treden op in het zuidelijk deel van het mondingsgebied (huidige geulen Scheur/Wielingen). Ter plaatse van de Vlakte van de Raan zijn de maximale snelheden laag. Opmerkelijk zijn de relatief lage maximale snelheden bij Schoonevelt. Net als bij de referentieberekening treden de maximale snelheden in het zuiden op tijdens vloed en in het noorden tijdens eb. Opvallend is verder de contractie bij de havendammen van Zeebrugge, tussen Vlissingen en Breskens en bij de uitstekende kop bij Westkapelle. Ter plaatse van het Oostgat treden relatief lage snelheden op. Bij de beschrijving van de volgende berekening wordt daar verder op ingegaan. Direct ten westen van de hals (bij Breskens) zijn de maximale snelheden langs de oevers het hoogst.

Conclusies zijn geformuleerd onder het kopje discussie en in paragraaf 5.1.

Afgevlakt Oostgat/Deurloo systeem (7)

aanpassing: het gebied tussen Scheur/Wielingen, Domburger Rassen en zeerand is geschematiseerd tot een gebied met constante diepte (NAP -8 m).

Door deze aanpassing nemen de getijverschillen toe met 0 tot 4 cm. Ook de getijvolumina in de Westerschelde nemen iets toe (0.5%).

In het mondingsgebied zelf zijn de stroombeelden uiteraard verschillend van de referentieberekening. Afgezien van de verschillen in het gebied met aangepaste diepte is opvallend dat de Wielingen meer stroom trekt en de Scheur tijdens eb iets minder. Doordat het gehele gebied op constante diepte is gezet, is het oostelijk deel ten opzichte van de referentieberekening blijkbaar iets te ondiep en het westelijk deel blijkbaar iets te diep. Achteraf gezien kan dus beter een bak met een hellende bodem worden toegepast (dieper bij de hals en ondieper bij de zeerand). Bij de hiervoor beschreven berekening (6), die later is uitgevoerd is dit principe toegepast.

Ook bij deze berekening zijn de effecten van de contractie bij Westkapelle en Vlissingen duidelijk zichtbaar. Ter hoogte van Zoutelande treden lokaal lage stroomsnelheden op. Uit de stroombeelden in combinatie met isolijnen van de waterstanden (bijlage 3) blijkt dat tijdens de hoge stroomsnelheden bij Westkapelle en Vlissingen grote verhangen rond de 'koppen' ontstaan. Over het tussen deze 'koppen' gelegen gebied (bij Zoutelande) zijn de verhangen daardoor klein. Het tegenovergestelde kan ontstaan als bij de 'koppen' diepere geuldelen ontstaan/bestaan. De verhangen zullen over de diepe geuldelen kleiner en over het tussenliggende gebied groter zijn. De lage snelheden ter hoogte van Zoutelande in de 'initiële run' hebben dus geen directe betekenis.

Om te kijken of het ontstaan van de diepe gebieden te reconstrueren is de bodemschematisatie op basis van de resultaten van de berekening aangepast. De daarbij toegepaste hypothese is dat waar grotere snelheden optreden na verloop van tijd geulen zullen ontstaan. De gebieden waar lagere snelheden ontstaan zijn verondiept om de totale weerstand van het gebied ongeveer gelijk te houden.

Aangepast afgevlakt Oostgat/Deurloo systeem (8)

aanpassing: Het gebied tussen Scheur/Wielingen, Domburger Rassen en zeerand is aangepast op basis van de berekende getijgemiddelde snelheden (u_o) met een constante diepte van NAP -8m. Er is verdiept waar relatief hoge snelheden optraden en verondiept waar relatief lage snelheden optraden.

$$(h_1 = (u_o \times h_o)/u_{o, \text{gem}} \text{ met } h_o = 8\text{m en } u_{o, \text{gem}} = 0.53\text{m/s}).$$

Door deze aanpassing nemen de getijverschillen ten opzichte van de vorige berekening (7) bij Westkapelle met bijna 3 cm toe en bij Vlissingen iets af (0.5 cm). De getijvolumina in de Westerschelde blijven ongeveer gelijk.

In de vorige berekening bleek de Scheur iets te weinig stroom te trekken en de Wielingen iets meer. Uit de ebvolumina blijkt dat dit effect in de Scheur iets is afgenomen. In de Wielingen is dit effect voor beide getijfasen iets toegenomen. In het aangepaste gebied zelf is te zien dat de gebieden waar lagere snelheden optreden en nu dus opgehoogd zijn ook minder water trekken. In de gebieden waar hogere snelheden optreden en dus verdiept zijn is het effect (meer water trekken) veel minder zichtbaar. De reden hiervoor is dat de tussenliggende gebieden verondiept zijn, waardoor de weg naar de geulen in meer of mindere mate is afgesneden. Omdat er geen 'goede verbindingen' tussen de verschillende diepe geuldelen bestaan, worden deze diepe geuldelen zelf ook niet meer stroomvoerend. Zouden de tussenliggende gebieden niet verondiept zijn, dan zal dit verschijnsel uiteraard niet optreden. De verhangen over de diepe geulen blijken namelijk inderdaad minder te worden, terwijl ze over de ondiepe gebieden groter worden.

Samenvattend: hoewel indirect het voorspelde indirecte effect (minder grote verhangen over de diepe geulen en dus grotere verhangen over de tussen de verdiepte delen gelegen verondiepte delen) inderdaad optreedt, blijkt het directe effect van de verondieping zelf (meer wrijving dus lage snelheden) ook een grote rol te spelen. Herhalen van de uitgevoerde procedure zal waarschijnlijk tot sterke verondieping langs de kust van Walcheren leiden. Gezien de historie van het gebied (sinds waarnemingen beschikbaar zijn een geul langs deze kust, die min of meer stabiel is) is dit een onrealistisch perspectief.

Discussie

De berekeningen waarin de geulen zijn verwijderd zijn bijzonder illustratief voor de beschrijving van de grootschalige waterbeweging. Hierdoor is namelijk goed aan te geven welke aspecten van de stromingen in het mondingsgebied direct uit de 'getijrandvoorwaarden' en geometrie (ligging kustlijnen) enerzijds en de geulconfiguratie anderzijds volgen.

Als zich geulen ontwikkelen waar in de afgevlakte situatie grotere getijgemiddelde snelheden optreden dan in omliggende gebieden, laten de berekeningsresultaten een duidelijke voorkeursligging voor een geul in het zuiden en geuldelen langs de kust bij Westkapelle en de kust bij Vlissingen zien (zie bijlage 4.1).

De berekening waarin een poging wordt gedaan om op basis van de berekende waterbeweging geulen te construeren is minder duidelijk interpreteerbaar. Met de toegepaste aanpassingsformulering (verdieping en verondieping op basis van getijgemiddelde snelheden) is het waarschijnlijk niet mogelijk om geulontwikkelingen op juiste wijze te construeren. Mogelijke oorzaken zijn:

- De hypothese dat in gebieden waar hogere snelheden optreden dan in omliggende gebieden verdieping op zal treden (uitschuring) is onjuist.

Gezien het succes van de berekening met het afgevlakte mondingsgebied (hogere snelheden bij delen waar ook in de huidige situatie duidelijk diepere delen bestaan) lijkt dit niet de reden te zijn.

- De modelaanpassingen geven de hypothese niet goed weer.

De toegepaste formulering veroorzaakt zowel verdieping bij hoge snelheden (uitschuring) als verondieping bij lage snelheden (bezinking). In werkelijkheid zou deze verondieping verwaarloosbaar kunnen zijn ten opzichte van de verdieping. Een alternatief is om alleen verdieping toe te passen. Om de zandbalans gesloten te houden zou het 'verwijderde zand' weer kunnen worden aangebracht door het volledige gebied (ook de verdiepte delen) met een laag van constante dikte te verondiepen. Fysisch gezien wordt dan alleen het lokale erosieproces door hoge snelheden gereproduceerd en niet het meer globale sedimentatieproces door lage snelheden.

- Het gebied waarop de aanpassingsformulering is toegepast is niet goed gekozen. Vooral bij de randen van het toepassingsgebied wordt naar een gedeelte van de "omliggende gebieden" niet gekeken. Dit geldt zowel voor de "relatief hoge snelheden" als voor de zandbalans. De aanpassing kan misschien beter op het gehele mondingsgebied worden toegepast dan alleen op het Oostgat/Deurloo systeem om de herverdeling met Scheur/Wielingen in het aanpassingsproces zelf te betrekken.

In verband met de ontwikkeling van de zuidwestkust van Walcheren worden vooral de functies van het Oostgat het alternatieve traject Geul van de Rassen/Deurloo Oost en het bankje van Zoutelande van belang geacht. In de berekeningen met afgevlakte geulenstelsels in de mond is er op basis van de getijbeweging geen onderscheid tussen deze gebieden. Mogelijke oorzaken van het bestaan van deze gebieden zijn:

- Op deze lokaties ontstaan pas hoge snelheden bij een bepaalde diepte van omliggende gebieden (bijvoorbeeld een diep gebied voor de kust bij Westkapelle).
- Naast de getijbeweging spelen ook windgolven en deining een belangrijke rol in de zandhuishouding en morfologische ontwikkeling van deze gebieden.

4.3 OPGELEGDE STROOMRICHTING IN EN UIT DE WESTERSCHELDE

In verband met de oriëntatie en omvang van de geulen in het mondingsgebied (met name de ontwikkelingen van Deurloo en de Geul van de Walvischstaart) wordt in een aantal beschouwingen de richting van de ebstroming vanuit de Westerschelde (ten gevolge van geulontwikkelingen in de Westerschelde, o.a. Honte en Schaar van Spijkerplaat) als belangrijke parameter genoemd (zie Svašek, 1995 en Dunsbergen, 1998). Om deze invloed te onderzoeken is de stroomrichting in de hals (raai Vlissingen-Breskens) geforceerd opgelegd door in het model de ruwheden lokaal aan te passen.

De volgende berekeningen zijn uitgevoerd:

- huidige situatie met opgelegde stroomrichting in de hals (9)
- afgevlakt mondingsgebied met opgelegde stroomrichting in de hals (10)

Huidige situatie met opgelegde stroomrichting in de hals (9)

aanpassing: De ruwheid in noord-zuidrichting is tussen Vlissingen en Breskens lokaal verhoogd, zodat de stroomrichting evenwijdig met de gridlijnen wordt.

Door deze aanpassing nemen de getijverschillen en de getijvolumina licht af (0-0.5%). De gemiddelde bodemschuifspanningen aan weerszijden van de aanpassing laten ten opzichte van de referentieberekening binnen een afstand van ongeveer 10 kilometer duidelijke verschillen zien (bijlage 6.5). In het mondingsgebied worden de gemiddelde schuifspanningen in het noordoosten tot 10% hoger en in het zuidoosten tot 10% lager. De zandhuishouding kan dus plaatselijk fors veranderen en morfologische aanpassingen tot gevolg hebben.

Afgevlakt mondingsgebied met opgelegde stroomrichting in de hals (10)

aanpassing: Het gehele mondingsgebied tussen de zeerand en de raai Vlissingen-Breskens is geschematiseerd tot een van west naar oost geleidelijk oplopend gebied. De dieptes in noord-zuid richting zijn gemiddeld op basis van de bodemschematisatie van de referentieberekening. De ruwheid in noord-zuidrichting is tussen Vlissingen en Breskens lokaal verhoogd, zodat de stroomrichting evenwijdig met de gridlijnen wordt. Combinatie run 6 en 9.

Ook in dit geval nemen de getijverschillen en getijvolumina licht af ten opzichte van de berekening met alleen een afgevlakt mondingsgebied. Opvallend is wel dat deze afname over het algemeen meer dan de helft kleiner is dan bij de vorige berekening (9). Een combinatie van aanpassingen werkt dus anders door dan de gesuperponeerde effecten van de afzonderlijke aanpassingen.

Discussie

Het opleggen van de stroomrichting in de hals blijkt alleen binnen een straal van ongeveer 10 kilometer invloed te hebben op de stromingen. Dit betekent zowel voor de Geul van de Walvischstaart als voor de kust van Zeeuws-Vlaanderen dat het directe effect van een wisseling tussen Honte en Schaar van Spijkerplaat beperkt zal zijn. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat als de Honte afneemt ten gunste van de Schaar van Spijkerplaat niet alleen de stroomrichting, maar ook de snelheidsverdeling over de raai in het mondingsgebied zal veranderen. Verder kunnen indirecte gevolgen een rol spelen. Als de aanzet van de Geul van de Walvischstaart verdiept, zullen de verhangen over dit gebied afnemen en over de verbinding met Deurloo en Geul van de Rassen toenemen. Hier kan vervolgens ook uitschuring plaatsvinden. Een soortgelijk proces zou ook langs de oever van Zeeuws-Vlaanderen op termijn het invloedsgebied kunnen uitbreiden. Deze indirecte gevolgen zijn tijdens deze studie niet onderzocht.

4.4 BODEMLIGGING SCHEUR/WIELINGEN EN WESTERSCHELDE

De laatste decennia zijn ten behoeve van de scheepvaart een aantal geuldelen in de Westerschelde en het mondingsgebied kunstmatig verdiept. Ook de bodemligging in andere delen van de Westerschelde is veranderd. Om de invloed van deze veranderingen op de waterbeweging in het mondingsgebied te onderzoeken is de bodemschematisatie in deze gebieden op basis van lodingen uit 1971 en 1972 aangepast. Dit is zowel voor Scheur/Wielingen, het westelijk deel en het midden/oostelijk deel van de Westerschelde afzonderlijk als voor een combinatie van deze aanpassingen gedaan.

De volgende berekeningen zijn uitgevoerd (zie figuur 4.2):

- Scheur/Wielingen 1971 (11)
- westelijk deel Westerschelde 1972 (12)
- midden/oostelijk deel Westerschelde 1971 (13)
- Scheur/Wielingen en Westerschelde 1971/1972 (14)

Scheur/Wielingen 1971 (11)

aanpassing: de dieptes gemeten in lodingsvakken 15 en 16 in 1971 zijn geïnterpoleerd naar de roosterpunten, noordelijke begrenzing aangepaste gebied: NAP -8m

Door de toename van de wrijving wordt de getijgolf gedempt. Hierdoor nemen de getijverschillen af. Dit is het sterkst bij Vlissingen en Terneuzen (ca. 25 cm). De vertraging van de getijgolf is beperkt tot ongeveer anderhalve minuut bij Vlissingen en Terneuzen. Door het kleinere getijverschil neemt de voortplantingssnelheid landinwaarts weer iets toe.

Door de afname van de getijverschillen (interne berging) nemen de getijvolumina/snelheden in de Westerschelde en Scheur/Wielingen iets af. In Scheur/Wielingen nemen de getijvolumina ook af door afname van het doorstroomprofiel. Vooral tijdens vloed nemen de getijvolumina/snelheden over de Vlakte van de Raan en (in mindere mate)

Oostgat/Deurloo toe. Deze herverdeling van stroom vindt die als volgt plaats:

- Scheur/Wielingen is krapper, de stroming ondervindt meer weerstand,
- de vervallen over Scheur/Wielingen en dus ook over Vlakte van de Raan en Oostgat/Deurloo nemen toe,
- Door de grotere vervalkracht nemen de snelheden over de Vlakte van de Raan en over Oostgat/Deurloo toe.

Door de afname van het traagheidseffect treedt kentering van de stroom in Scheur enkele minuten eerder op. In de andere delen van het mondingsgebied treedt de kentering later op (meer weerstand, tragere voortplanting getijgolf).

Westelijk deel Westerschelde 1972 (12)

aanpassing: de dieptes gemeten in de lodingsvakken 5 en 6 in 1972 zijn geïnterpoleerd naar de roosterpunten, het gehele gebied is aangepast, zowel de geulen als overige gebieden

De invloed van deze aanpassing op de voortplanting van de getijgolf is zeer klein. Een verlating van minder dan een minuut en getijvoluminaveranderingen van enkele promillen. De gemiddelde schuifspanningen laten een lichte herverdeling in het mondingsgebied zien. In het zuidelijk deel zijn de schuifspanningen iets hoger en in het noordelijk deel iets lager ten opzichte van de basisrun.

Midden/oostelijk deel Westerschelde 1971 (13)

aanpassing: de dieptes gemeten in de lodingsvakken 1 t/m 4 in 1971 zijn geïnterpoleerd naar de roosterpunten, het gehele gebied is aangepast, zowel de geulen als overige gebieden

De getijgolf wordt in het aangepaste gebied gedempt, hierdoor nemen de getijverschillen af (bij Bath en bij de grens zelfs met meer dan 30 cm) en vertraagt het getij in dit gebied met ruim 10 minuten. De getijvolumina zeewaarts van de aanpassing nemen af, waardoor de getijgolf iets vervroegd.

In het mondingsgebied nemen de ebvolumina door de Wielingen relatief het meest af. De vloedvolumina nemen zowel in de Wielingen als in het westelijk deel van Oostgat/Deurloo relatief het sterkst af. Kentering van vloed naar eb treedt eerder op, behalve in het noordwestelijke deel. Kentering van eb naar vloed treedt overal later op. De ebperiode wordt dus langer, de vloedperiode korter. Een uitzondering hierop is het noordwestelijke deel van het mondingsgebied.

Scheur/Wielingen en Westerschelde 1971/1972 (14)

aanpassing: De dieptes gemeten in lodingsvakken 15 en 16 in 1971 zijn geïnterpoleerd naar de roosterpunten, noordelijke begrenzing aangepaste gebied: NAP -8m. De dieptes gemeten in de lodingsvakken 1 t/m 6 in 1971/1972 zijn geïnterpoleerd naar de roosterpunten, het gehele gebied is aangepast, zowel de geulen als overige gebieden. Combinatie van run 11, 12 en 13.

In grote lijnen is het effect van de combinatie van de aanpassingen in de vorige berekeningen (11, 12 en 13) gelijk aan de som van de effecten van de afzonderlijke aanpassingen: demping van de getijgolf, afname getijvolumina Scheur/Wielingen en Westerschelde en toename van de getijvolumina over de Vlakte van de Raan. De getijvolumina door Oostgat/Deurloo nemen iets af. Kentering treedt in Scheur eerder op. In

de overige delen van het mondingsgebied later.

Discussie

combinaties van ingrepen

Deze berekeningen laten zien dat de effecten van een combinatie van aanpassingen anders kunnen zijn dan de gesuperponeerde effecten van de afzonderlijke aanpassingen. Bij Bath is de som van de afname van het getijverschil bij Bath bijvoorbeeld 37 cm, terwijl het bij de berekening van alle effecten samen slecht 31 cm is. Dit is zelfs minder dan de afname ten gevolge van het midden/oostelijk deel apart. Bij Vlissingen echter is het effect van de som van de aanpassingen wel gelijk aan de doorwerking van de aanpassingen samen (4 cm). Bij Westkapelle en Cadzand en Terneuzen zit er weer een centimeter verschil tussen (meer afname).

verticaal getij

De berekeningen bevestigen het algemene beeld dat ook uit analyse van het gemeten getij volgt (Svašek, 1997a):

- een vervroeging van het getij bij Vlissingen van 25 seconden per 10 jaar, voornamelijk ten gevolge van de verdieping van Scheur/Wielingen.
- een toename van de amplitude van de hoofdcomponent van het getij bij Vlissingen van 5 cm tussen 1910 en 1996, waarvan het merendeel sinds 1970.

Bij de toename van de getijverschillen bij Vlissingen blijken de morfologische veranderingen in Scheur/Wielingen meer invloed te hebben gehad dan de morfologische veranderingen in de Westerschelde.

Uit door Dillingh en Heinen (1994) gepresenteerde getijverschillen blijkt bij Bath het getijverschil sinds 1970 ongeveer 25 cm te zijn toegenomen. De berekeningen laten zelfs een grotere toename zien. Deze getijslagtoename blijkt vooral veroorzaakt te zijn door morfologische veranderingen in het midden/oostelijk deel van de Westerschelde.

Uit de uitgevoerde berekeningen wordt dus duidelijk dat de morfologische veranderingen die tussen 1971 en 1996 zijn opgetreden in het mondingsgebied en de Westerschelde de belangrijkste bijdrage zijn geweest aan de waargenomen getijslagtoename en vervroeging van het getij.

horizontaal getij

Het effect van de verdiepingen in Scheur/Wielingen en de verdiepingen in de Westerschelde lijken elkaar wat de stromingen in Oostgat/Deurloo en Geul van de Walvischstaart betreft gecompenseerd te hebben (zie bijlage 5.3b, bijlage 5.4b, bijlage 7 en figuur 5.3).

4.5 STORMVLOEDKERING OOSTERSCHELDE

De invloed van de stormvloedkering in de Oosterschelde op de waterbeweging wordt gesimuleerd door een barriërmulering (lokaal verhoogde ruwheid). Om de directe invloed van de bouw van de stormvloedkering op de waterbeweging in het mondingsgebied van de Westerschelde te onderzoeken is de stormvloedkering in de Oosterschelde uit het model verwijderd. De indirecte invloed via morfologische aanpassingen in het mondingsgebied van de Oosterschelde is niet onderzocht.

aanpassing: verwijderen barriers stormvloedkering Oosterschelde (15)

In het mondingsgebied van de Oosterschelde nemen de getijvolumina door de Oosterscheldemon met ca. 20% toe. Kentering van vloed naar eb treedt in de Oosterschelde ca. 20 min. eerder op, kentering van eb naar vloed ca. 50 minuten. De vloedperiode wordt dus ca. 30 minuten langer en de ebperiode evenredig korter. Uiteraard worden ook de getijverschillen in de Oosterschelde groter.

De getijvolumina in de Westerschelde worden nauwelijks beïnvloed. In het mondingsgebied vindt wel een herverdeling plaats: de getijvolumina in Oostgat/Deurloo nemen licht af ten opzichte van de huidige situatie en de getijvolumina door Scheur, Wielingen en over de Vlake van de Raan nemen iets toe. Over het algemeen zijn de snelheidsveranderingen klein. Vooral tijdens eb (2 tot 4 uur na HW) en het begin van de vloed (6 tot 4 uur voor HW) nemen de snelheden rond de kop van Walcheren af (zie figuur 5.4).

Discussie

Deze berekening laat zien dat het directe effect van de bouw van de stormvloedkering op het mondingsgebied van de Westerschelde slechts zeer beperkte invloed heeft gehad. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat de invloed van de bouw van de stormvloedkering op het mondingsgebied van de Oosterschelde wel aanzienlijk is en indirect op termijn dus ook het mondingsgebied van de Westerschelde kan beïnvloeden. Dit aspect is tijdens deze studie niet onderzocht.

5. Conclusies en aanbevelingen

5.1 HET GETIJ

Het getij langs de zuidwestkust van Nederland is te karakteriseren als een lopende golf van zuid naar noord. Bij het mondingsgebied van de Westerschelde splitst de vanuit het zuidwesten aankomende getijgolf zich schijnbaar in tweeën. Eén tak plant zich met afnemende amplitude langs de kust voort. De andere tak plant zich met toenemende amplitude oostwaarts voort, de Westerschelde in. De getijgolf veroorzaakt waterstandsverschillen die vervolgens stromingen opwekken.

Figuur 5.2 laat zien dat de waterstandsverschillen over de geulen langs de kust van Vlaanderen (Scheur/Wielingen) veroorzaakt worden door faseverschillen tussen het getij bij Zeebrugge en Vlissingen. Dit komt overeen met een beschrijving van het getij in zeegaten door Van Veen (1936), die schematisch is weergegeven in figuur 5.1. Sha en Van den Berg (1993) benadrukken dat voor het getij in de zeegaten in zuidwest Nederland naast het faseverschil ook de noordwaartse afname van getijamplitude van belang is. Uit figuur 5.2 blijkt dat de waterstandsverschillen over de geul langs de kust van Walcheren (Oostgat) inderdaad niet alleen door het (kleine) faseverschil, maar ook door het verschil in getijamplitude bepaald worden. Het model van Van Veen blijkt dus niet geschikt te zijn voor een beschrijving van het getij in het mondingsgebied van de Westerschelde.

De maximale waterstandsverschillen langs de kust van Walcheren treden op rond stroomkentering. De stroom kentert langs de noordelijke oever dan ook eerder dan langs de zuidelijke oever. Als gevolg hiervan zijn de stroomsnelheden door het Oostgat tijdens het begin van eb en vloed het hoogst, terwijl de stroomsnelheden in Scheur/Wielingen tijdens het eind van eb en vloed het hoogst zijn. Ruimtelijk gezien treden de hoogste snelheden op in de diepste geulen (zie bijlage 4.1), waar de stroomvertragende wrijvingskrachten het kleinst zijn.

Asymmetrie van het Noordzeegetij en het faseverschil tussen verticaal en horizontaal getij van ongeveer 90° blijken vooral tijdens springtij een duidelijke eb-vloedasymmetrie in de stroomsnelheden te veroorzaken.

Een onderverdeling in eb- en vloedgeulen kan voor grote delen van het mondingsgebied niet gemaakt worden. Een ebfunctie vanuit de Westerschelde kan bijvoorbeeld een vloedfunctie inhouden voor het Noordzeegetij. Dit is bijvoorbeeld het geval in Oostgat en Deurloo 1 à 2 uur voor laagwater Vlissingen.

5.2 MORFOLOGISCHE STRUCTUUR

conclusies

De modelberekening waarbij de geulen in het mondingsgebied uit het model zijn verwijderd is ingezet om de belangrijkste morfologische elementen te kunnen onderscheiden. Het idee was dat als de geulen uit het model verwijderd werden, er in de stroming aanzetten te zien zouden zijn voor een evolutie naar de voorkeursligging van de geulen. Inderdaad bleken duidelijk aanzetten zichtbaar te zijn (zie bijlage 4.3): een diepe hoofdgeul in het zuiden en diepe geuldelen bij Westkapelle en Vlissingen.

Deze hoofdelementen zijn ook in de huidige situatie goed herkenbaar. Dit wijst erop dat de huidige hoofdstructuur stabiel is.

De stromingen door de zuidelijke hoofdgeul worden voornamelijk opgewekt door waterstandsverschillen, die veroorzaakt worden door faseverschillen tussen het getij op zee (bij Zeebrugge) en het getij in de hals (bij Vlissingen).

De stromingen door de geul langs de noordelijke oever, de verbinding tussen de diepe geuldelen bij Westkapelle en Vlissingen worden opgewekt door waterstandsverschillen over de geul, die niet alleen door faseverschillen veroorzaakt worden, maar ook door verschil in getijamplitude. Bij Westkapelle en Vlissingen speelt daarnaast ook de kustlijn geometrie een grote rol (contractie, zie bijlage 3.3).

De stromingen in het tussenliggende gebied (de huidige Vlakte van de Raan) hebben een rondgaand karakter. Geulvorming in dit gebied ligt niet voor de hand.

Voor een duidelijk verschillende functie van Oostgat enerzijds en Geul van de Rassen en Deurloo Oost anderzijds zijn vanuit de getijbeweging geen duidelijke aanwijzingen gevonden. Ook het bestaan van het Bankje van Zoutelande is niet direct uit de getijbeweging te verklaren. De inzet van een meer gedetailleerd model, met name rond het Bankje van Zoutelande, Oostgat, Geul van de Rassen en Deurloo is gewenst.

aanbevelingen

Voor de verklaring van de ligging, diepte en omvang van de geulen en banken in het mondingsgebied van de Westerschelde dient naast de invloed van het getij ook de invloed van windgolven en deining te worden onderzocht.

5.3 MORFOLOGISCHE ONTWIKKELINGEN

conclusies

De belangrijkste waargenomen ontwikkelingen van het getij in de laatste decennia zijn een vervroeging en een toename van de amplitude van de getijgolf. Deze ontwikkelingen zijn voornamelijk veroorzaakt door morfologische veranderingen in Westerschelde en mondingsgebied.

Ook voor de stromingen in het mondingsgebied zijn zowel de morfologische veranderingen in Scheur/Wielingen als de morfologische veranderingen in de Westerschelde van belang. De effecten van de ontwikkelingen tussen 1971 en 1996 op de stromingen in het mondingsgebied zijn:

- toename van de stromingen door Scheur/Wielingen;
- afname van de stromingen over de Vlakte van de Raan;
- Wat Oostgat en Deurloo betreft hebben de gevolgen van de verdieping van Scheur/Wielingen (afname stromingen door Oostgat en Deurloo) en Westerschelde (toename stromingen door Oostgat en Deurloo) elkaar voor een groot deel gecompenseerd. Het netto effect varieert per gebied en getijfase.

Veranderende stroomrichting in de hals van de Westerschelde (bijvoorbeeld tengevolge van een afname van de Honte ten gunste van de Schaar van Spijkerplaat) heeft slechts een beperkte invloed op de stromingen in het mondingsgebied. Indirecte verbanden (erosie geulwand, kortere afstand tussen waterstandsverschillen over ondiep gebied, dus grotere verhangen over bijvoorbeeld de Geul van de Walvischstaart) zijn hiermee echter niet uitgesloten. Figuur 5.3 laat zien dat voor de initiële stromingsveranderingen in de Geul van de Walvischstaart de invloed van de stroomrichting in de hals klein is ten opzichte van de invloed van morfologische veranderingen tussen 1971 en 1996 in Scheur/Wielingen. De afname van de stroomsnelheden door de verdieping van Scheur/Wielingen wordt gedeeltelijk gecompenseerd door de ontwikkelingen in het midden en oostelijk deel van de Westerschelde. Het netto effect is min of meer neutraal. Alleen de richting van de ebstroming is iets verschoven naar westelijke richting. Dit komt overeen met de morfologische ontwikkeling van de Geul van de Walvischstaart tussen 1970 en 1996.

Modelberekeningen geven aan dat hoewel het getijvolume door de Oosterschelde-kering met ca. 25% is afgenomen, de invloed op de stromingen in Oostgat en Deurloo beperkt is (de getijvolumina variëren minder dan 1%). Dit wijst erop dat Oostgat en Deurloo geen kortsluitfunctie tussen Westerschelde en Oosterschelde vervullen.

Ook voor (de afname van) de erosie van de zuidwestkust van Walcheren zijn tijdens deze studie geen aanwijzingen gevonden. De snelheden in het Oostgat zijn volgens de modelberekeningen na de bouw van de stormvloedkering iets toegenomen (zie figuur 5.4).

aanbevelingen

Omvangrijke grootschalige veranderingen in het mondingsgebied sinds 1800 zijn de afname en opdeling van de Deurloo en het ontstaan van de Geul van de Walvischstaart en de Geul van de Rassen. Ook deze ontwikkelingen zouden kunnen worden onderzocht met behulp van het KUSTSTROOK-model. Dit zal het inzicht in de morfologische ontwikkeling van het mondingsgebied doen toenemen. Het reconstrueren van de situatie voor de inpolderingen en afsluitingen van verbindingen tussen Oosterschelde en Westerschelde zal echter vrij veel inspanning vereisen. Een aantal recente ontwikkelingen die mogelijk invloed hebben gehad (en vrij eenvoudig zijn te modelleren) zijn nog niet uitgewerkt: de invloed van zeespiegelrijzing en de invloed van morfologische veranderingen in de Oosterscheldemonding.

Voor het bepalen van de invloedsfactoren en stuurparameters inzake de erosie van de zuidwestkust van Walcheren dient naast de invloed van het getij ook de invloed van windgolven en deining te worden bepaald.

5.4 METHODIEK EN MIDDELEN

conclusies

Het analyseren van waargenomen ontwikkelingen in morfologie en getij, ondersteund met getijmodelberekeningen is een waardevolle methodiek gebleken bij het beschrijven van de invloed van het getij op de morfologie van de Westerschelde. Onder andere is aangetoond dat morfologische veranderingen in de Westerschelde even grote invloed kunnen hebben op de stromingen in het mondingsgebied als morfologische veranderingen in het mondingsgebied zelf.

De analyse van historische ontwikkelingen is gebruikt bij het bepalen van belangrijke factoren in de morfologische ontwikkelingen van het gebied en het formuleren van hypothesen over de rol van het getij in deze ontwikkelingen. Het KUSTSTROOK-model is ingezet bij het beschrijven van de grootschalige waterbeweging in het gebied en het kwantificeren van de interactie tussen ontwikkelingen in getij en morfologie.

Onvolledigheid en onnauwkeurigheid van historische bodem- en getijmeetgegevens is een belangrijke beperking bij het verklaren van historische ontwikkelingen. De veranderingen in grootschalige waterbeweging door veranderingen in de bodemligging zijn met behulp van het KUSTSTROOK-model goed te bepalen.

aanbevelingen

Voor het bepalen van de morfologische aanpassingen aan veranderingen in de waterbeweging dient de zandbeweging in het mondingsgebied en de koppeling tussen water- en zandbeweging te worden uitgewerkt. Een alternatief voor de trits waterbeweging $\Rightarrow$ zandbeweging $\Rightarrow$ morfologie kan zijn om een directe relatie tussen waterbeweging en morfologie toe te passen.

Het rekenrooster van het KUSTSTROOK-model heeft vrij grote gridcellen in vergelijking tot de geulafmetingen in het mondingsgebied van de Westerschelde. Voor het berekenen van locale stromingen en zandtransporten dient afhankelijk van de onderzoeksvraag een gedetailleerder waterbewegingsmodel te worden ontwikkeld. Hierbij moet gedacht worden aan een gridmaat van 10% van de horizontale afmetingen van de te onderzoeken morfologische vormen.

Tijdens deze studie lag de nadruk vooral op de causale verbanden tussen veranderingen in getij en morfologie. Ook als het getij niet verandert speelt ze via de zandhuishouding wel een rol in morfologische ontwikkelingen. Veel recente ontwikkelingen (zie Slikke, 1997) duiden bijvoorbeeld op zandverplaatsingen in de richting van de maximale stroomsnelheden (figuur 3.7) en het getijresiduele debiet (figuur 3.8). Bij vervolgstudies verdient dit aandacht.

Referenties

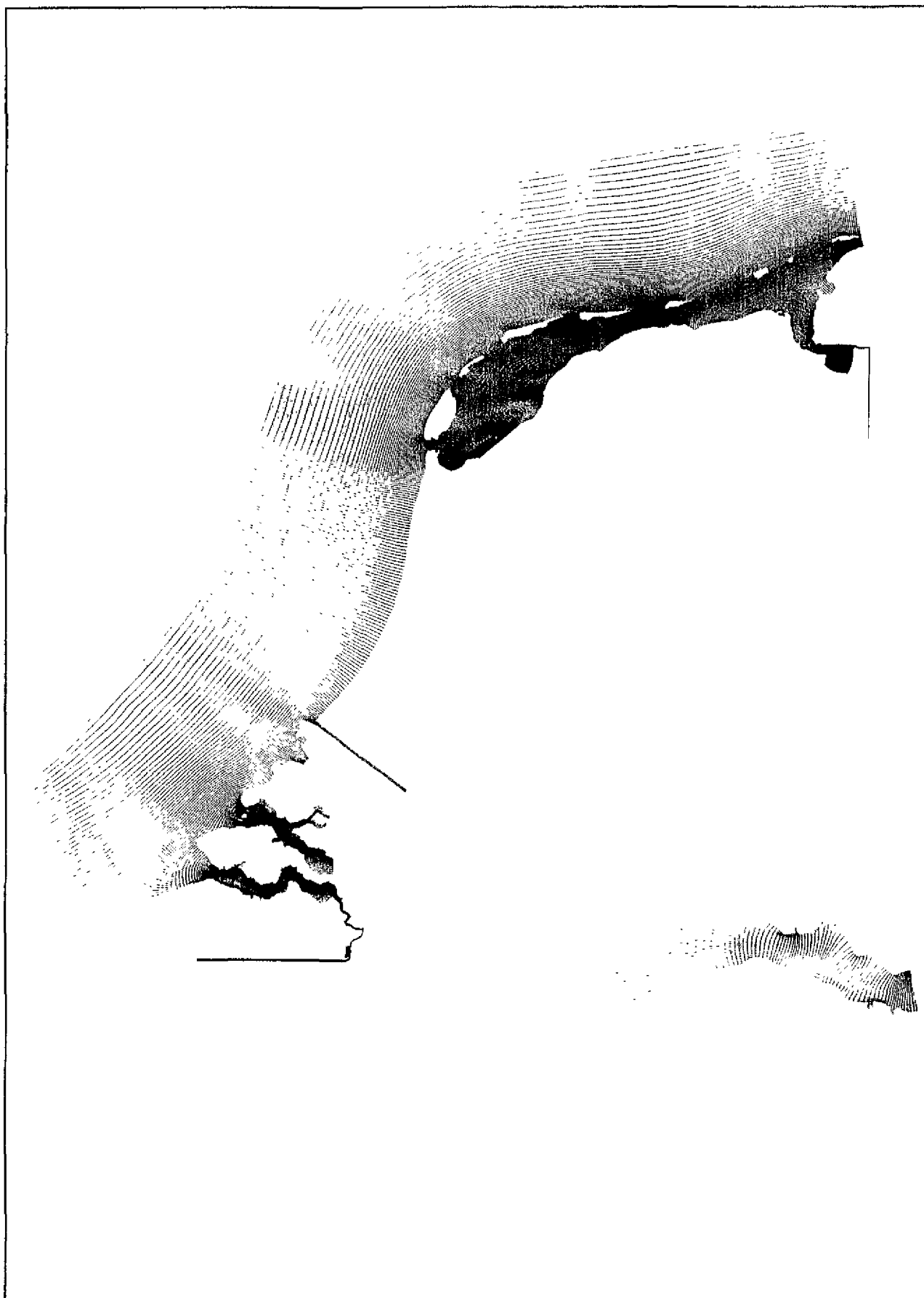
- Dillingh en Heinen, 1994 Dillingh, D. en Heinen, P.F., Zeespiegelrijzing, Getijverandering en Deltaveiligheid, RIKZ-94.026
- Dunsbergen, 1998 Dunsbergen, D.W. en De Gelder, A; Lange termijn gedrag Westerscheldemon, workshops 21/04/97 en 09/01/98, werkdocument RIKZ/OS-98.107x
- Looff, 1986 Looff, A.P. de; Mondingsgebied van de Westerschelde; getijstromingen, golfklimaatgegevens, bodemligging en morfologische processen, GWWS-86.404.
- RIKZ, 1996 Het Getij & Wij, honderd jaar getijtafels voor Nederland, ISBN 90 12 08409 1.
- Sha, 1993 Sha, L.P. and Van den Berg, J.H.; Variation in Ebb-tidal Delta Geometry along the Coast of the Netherlands and the German Bight, Journal of Coastal Research, 9(3), 730-749
- Slikke, 1997 Slikke, M.J. van der; Grootschalige zandbalans van de Westerscheldemon (1969-1993); Een inventarisatie van de dieptegegevens (1800-1996), IMAU rapport R7-18
- Svašek, 1995 Ingenieursbureau Svašek B.V.; Definitiestudie Westerscheldemon, RWS nota RKZ-256
- Svašek, 1997a Ingenieursbureau Svašek B.V.; Getijanalyse Westerscheldemon, rapport 97462/1029
- Svašek, 1997b Ingenieursbureau Svašek B.V.; Oriëntatiefase getijreconstructie Westerscheldemon, rapport 97467/1034
- Van Veen, 1936 Van Veen, J; Onderzoekingen in de hoofden in verband met de gesteldheid der Nederlandschen kust

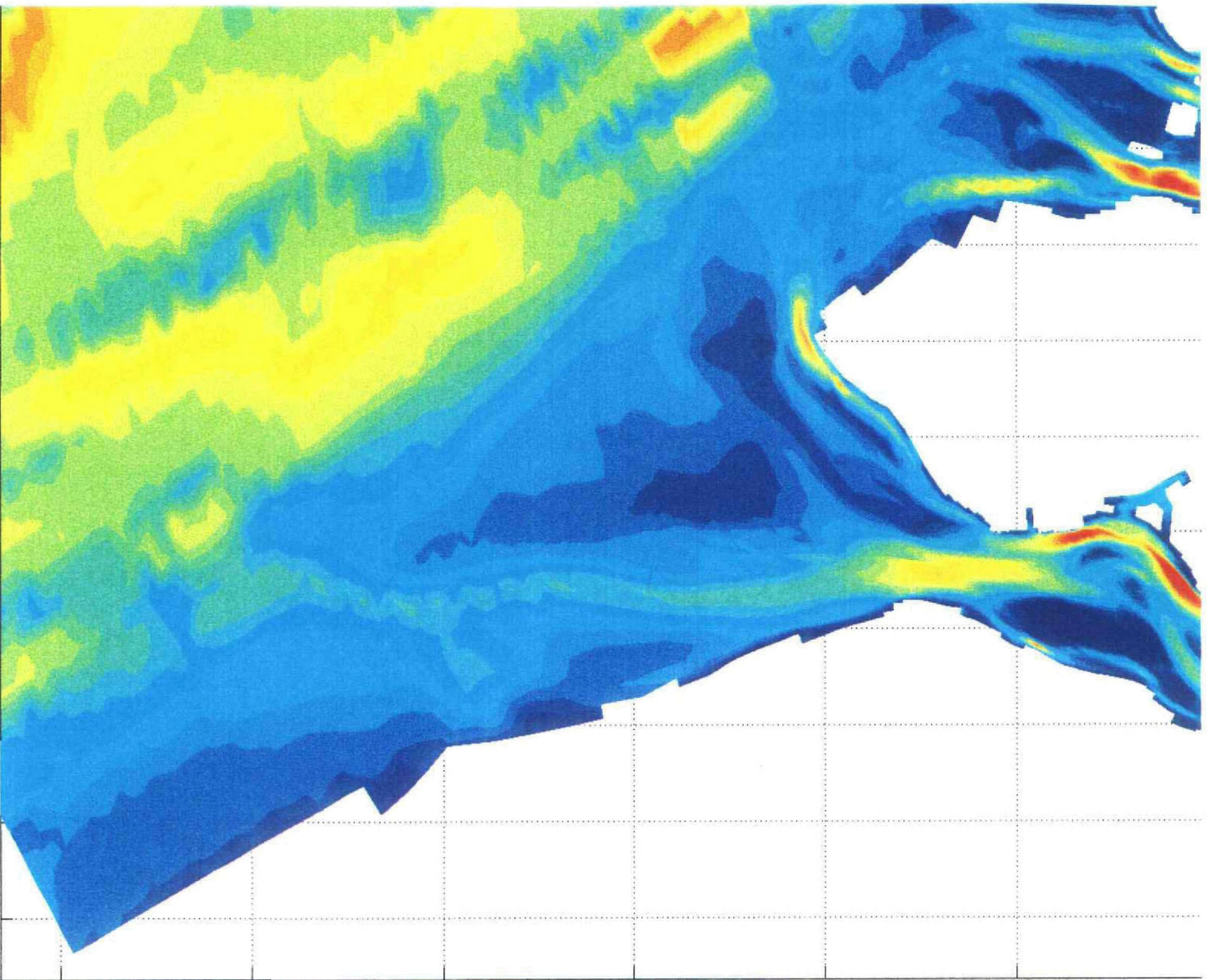
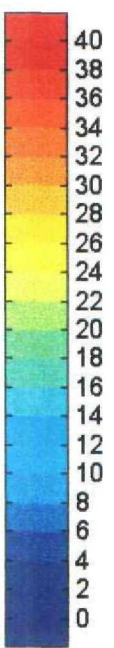
Lijst van figuren

- 1.1 Westerscheldemon en omgeving (bij tekst opgenomen)
- 1.2 Geulen en banken in de Westerscheldemon (bij tekst opgenomen)
- 2.1 Rekenrooster KUSTSTROOK-model
- 2.2 Bodemschematisatie KUSTSTROOK-model (kleur)
- 2.3 Aanpassingen KUSTSTROOK-model
- 2.4 Locatie waterstandstations en debietraaien
- 3.1 Principeschets hoofdcomponent (M2) van het Noordzeegetij
- 3.2 Getijverschillen Westerscheldemon en omgeving
- 3.3 Hoog- en laagwater Westerscheldemon
- 3.4 Definitieschets getijrandvoorwaarden Westerscheldemon
- 3.5 Tijdreeksen waterstanden en snelheden Westerscheldemon
- 3.6 Principeschets getijfasen waterbeweging Westerscheldemon
- 3.7 Maximale snelheden Westerscheldemon
- 3.8 Getijresiduele debieten Westerscheldemon
- 3.9 Stroomrozen Westerscheldemon (kleur)
- 4.1 Aangepaste geulenstelsels Westerscheldemon (kleur)
- 4.2 Bodemligging Scheur/Wielingen en Westerschelde anno 1971-1972 (kleur)
- 5.1 Schema van de getijvoortplanting in een dubbelmon (Van Veen)
- 5.2 Getijvoortplanting Westerscheldemon
- 5.3 Gevoeligheid stromingen in Geul van de Walvischstaart voor morfologische ontwikkelingen in mondingsgebied en Westerschelde
- 5.4 Invloed stormvloedkering Oosterschelde op stromingen in en rond het Oostgat

Lijst van bijlagen

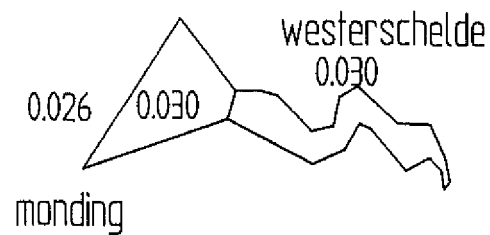
- Bijlage 1 Tijdreeksen waterstanden en debieten calibratieberekeningen
- Bijlage 2 *Getijvolumina door meetraaien*
- Bijlage 3 Stroomsnelheden en waterstanden tijdens een getijperiode
- Bijlage 4 Getijmaximale stroomsnelheden
- Bijlage 5 Tijdreeksen stroomsnelheden en waterstanden
- Bijlage 6 Schuifspanningen
- Bijlage 7 Getijverschillen, getijvolumina en kenteringstijdstippen



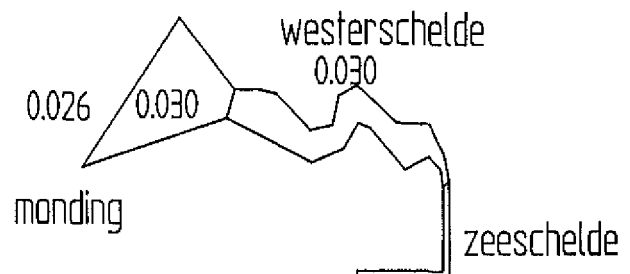


ruwheidswaarde (manning):

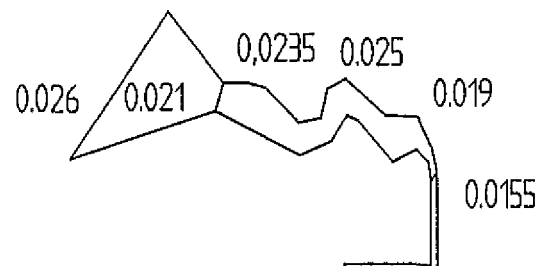
1. KUSTSTROOK versie januari 1998



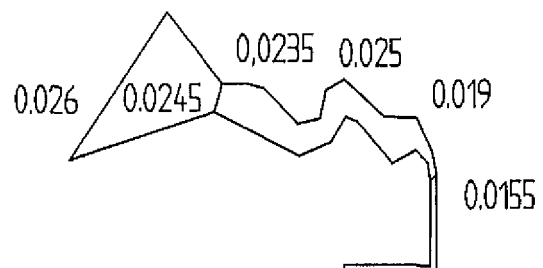
2. uitbreiding tot Gent

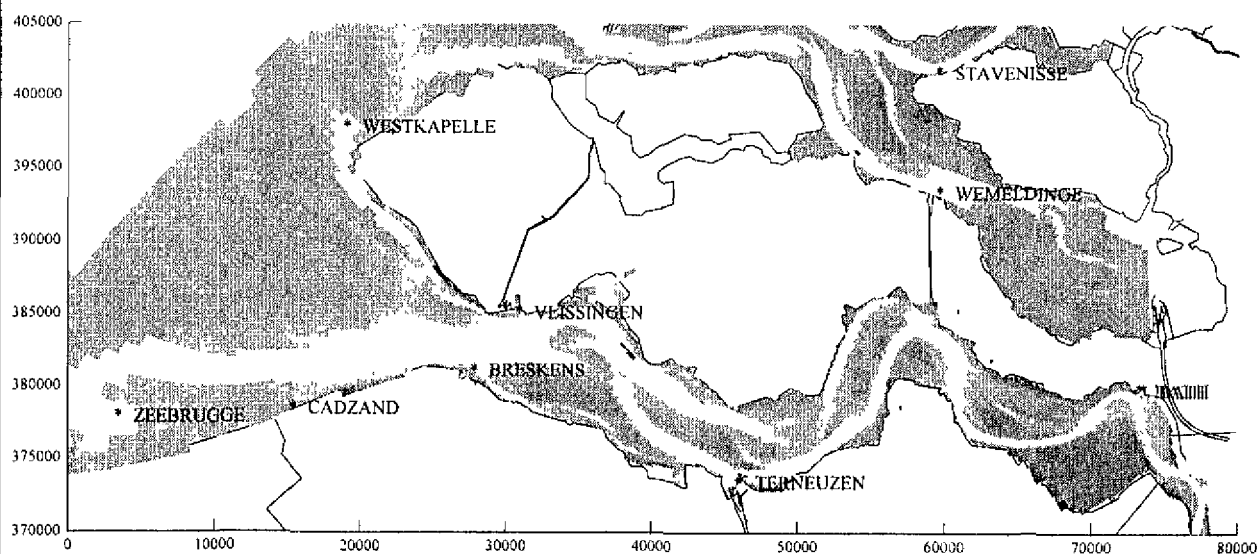
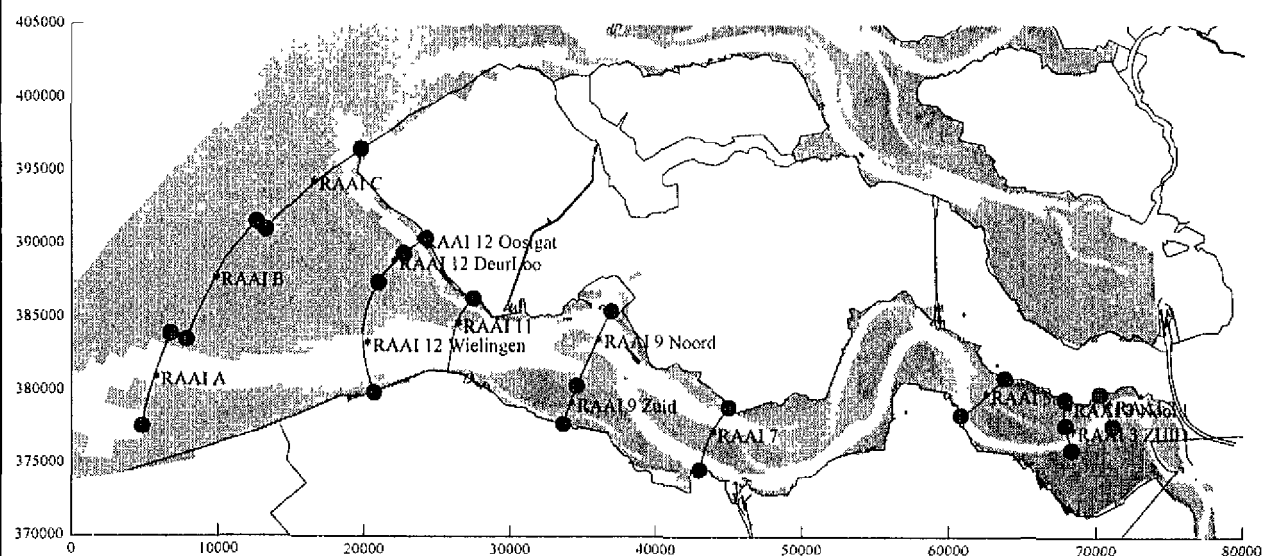


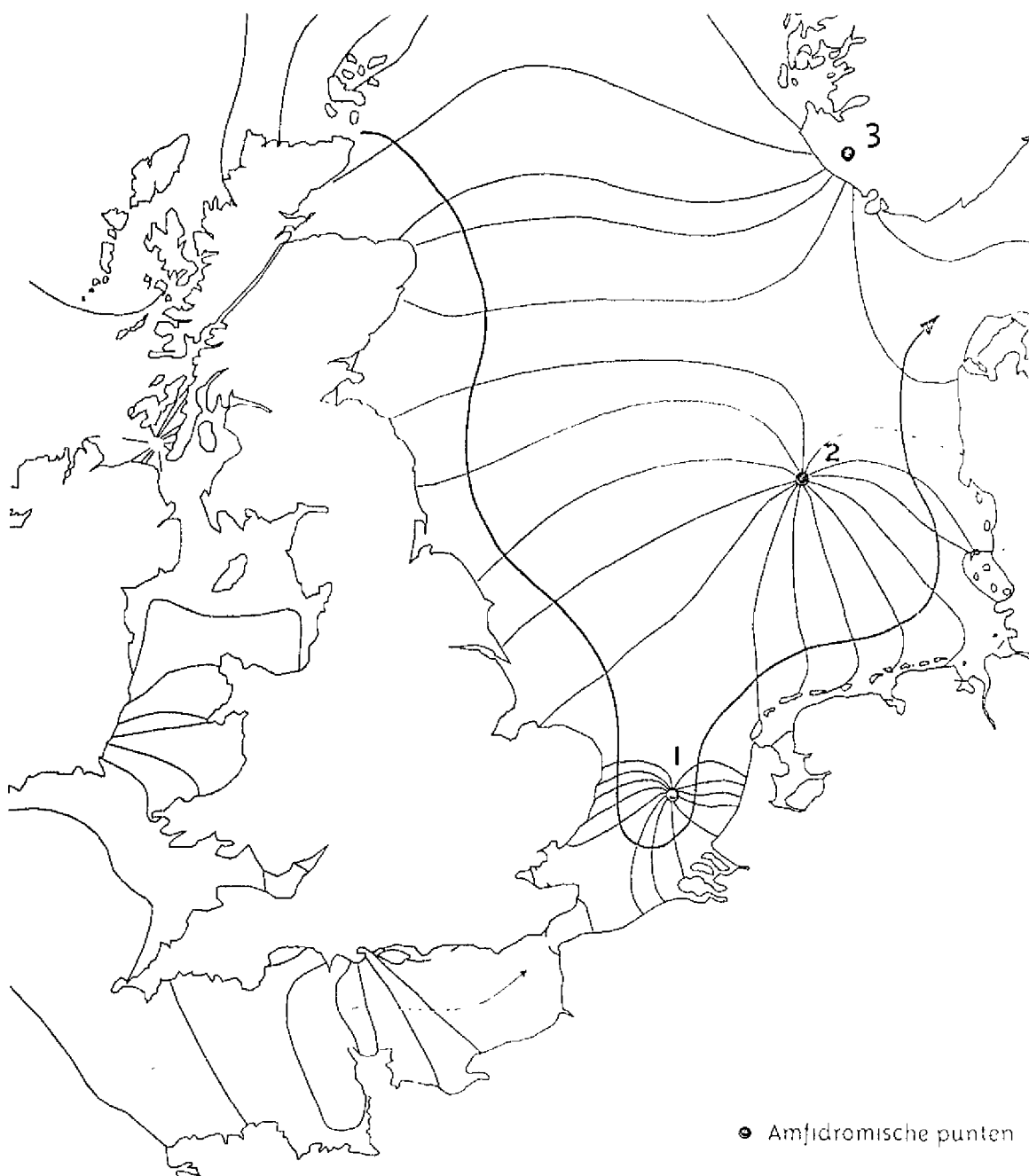
3. aanpassing ruwheid Westerschelde

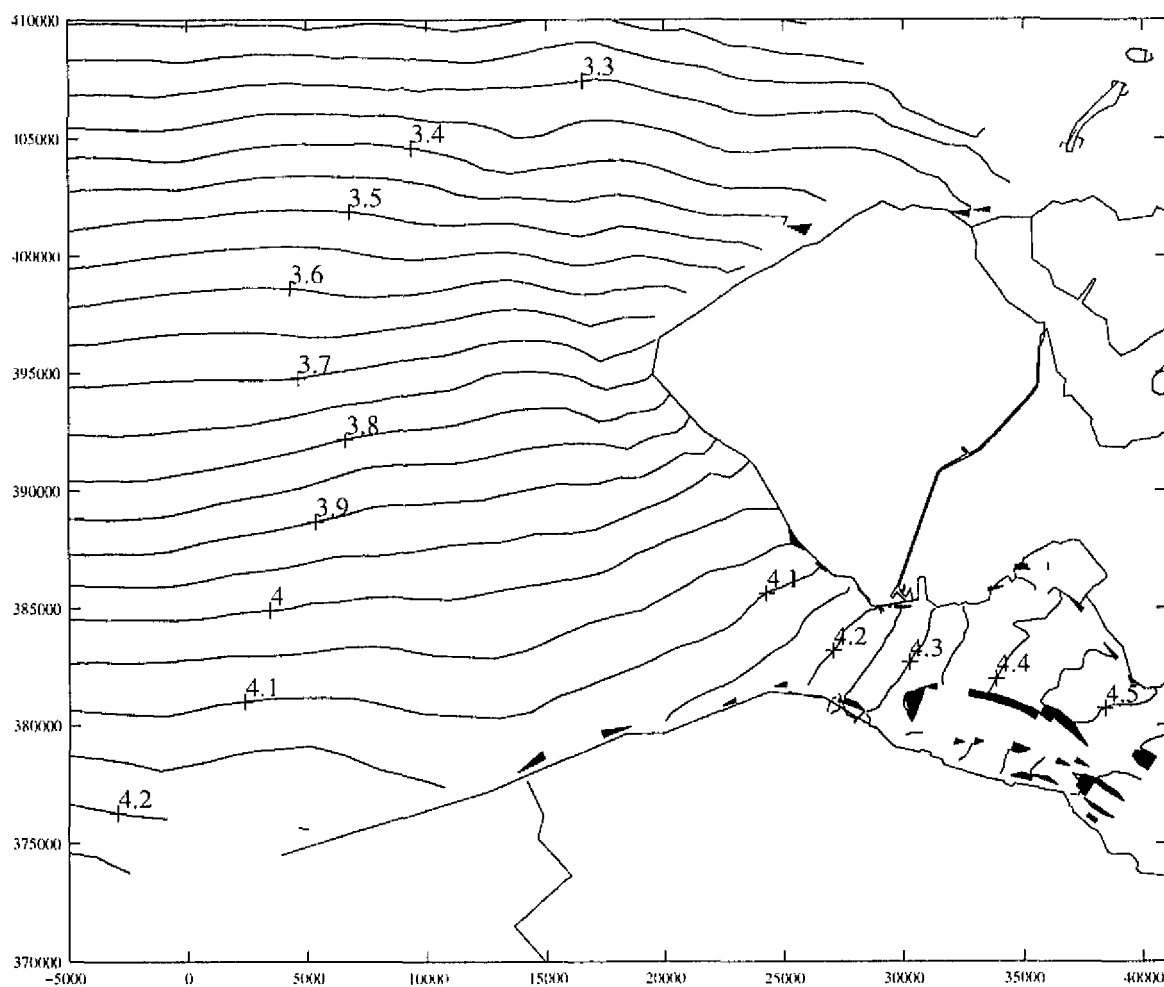


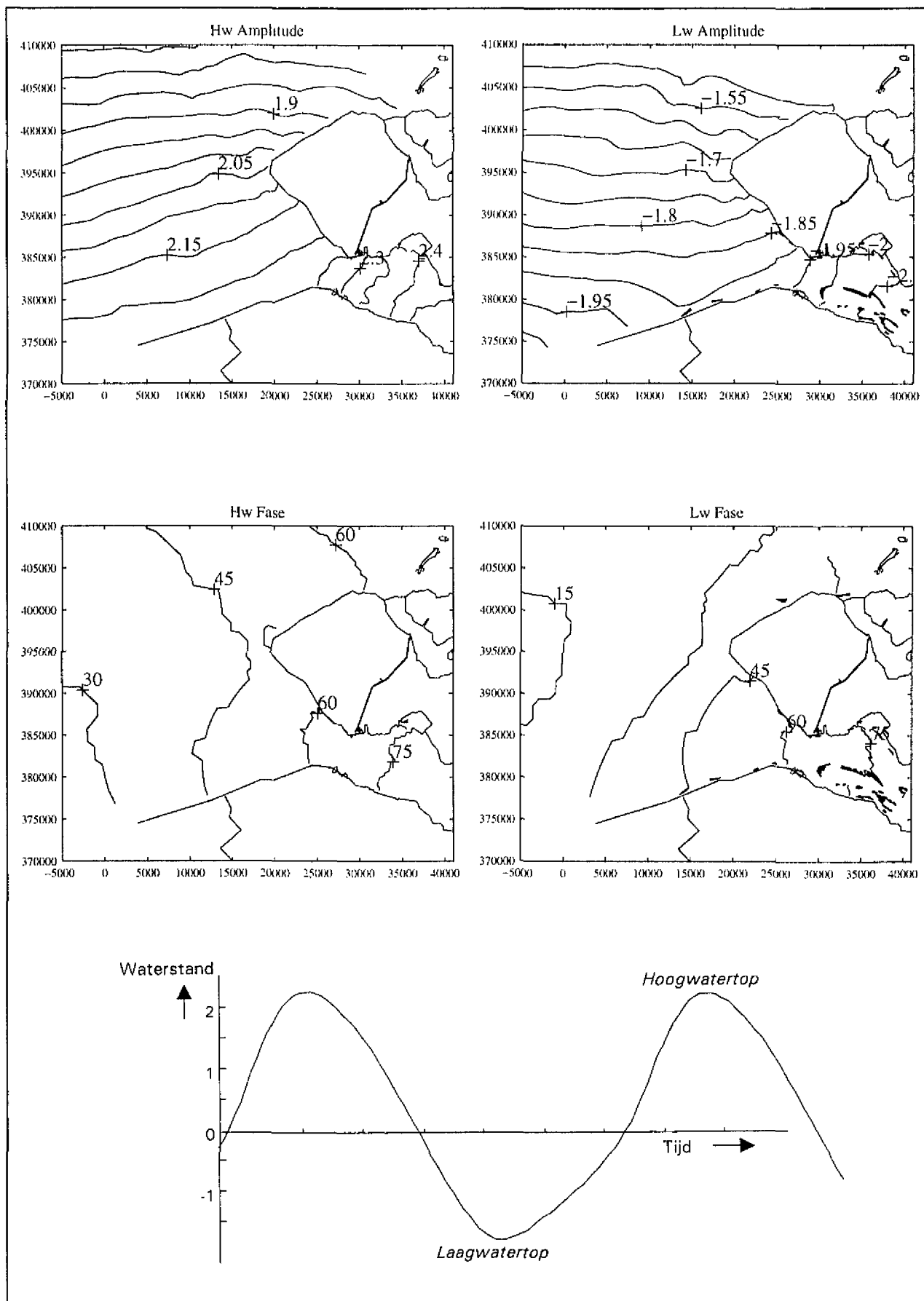
4. aanpassing ruwheid mondingsgebied
= referentieberekening

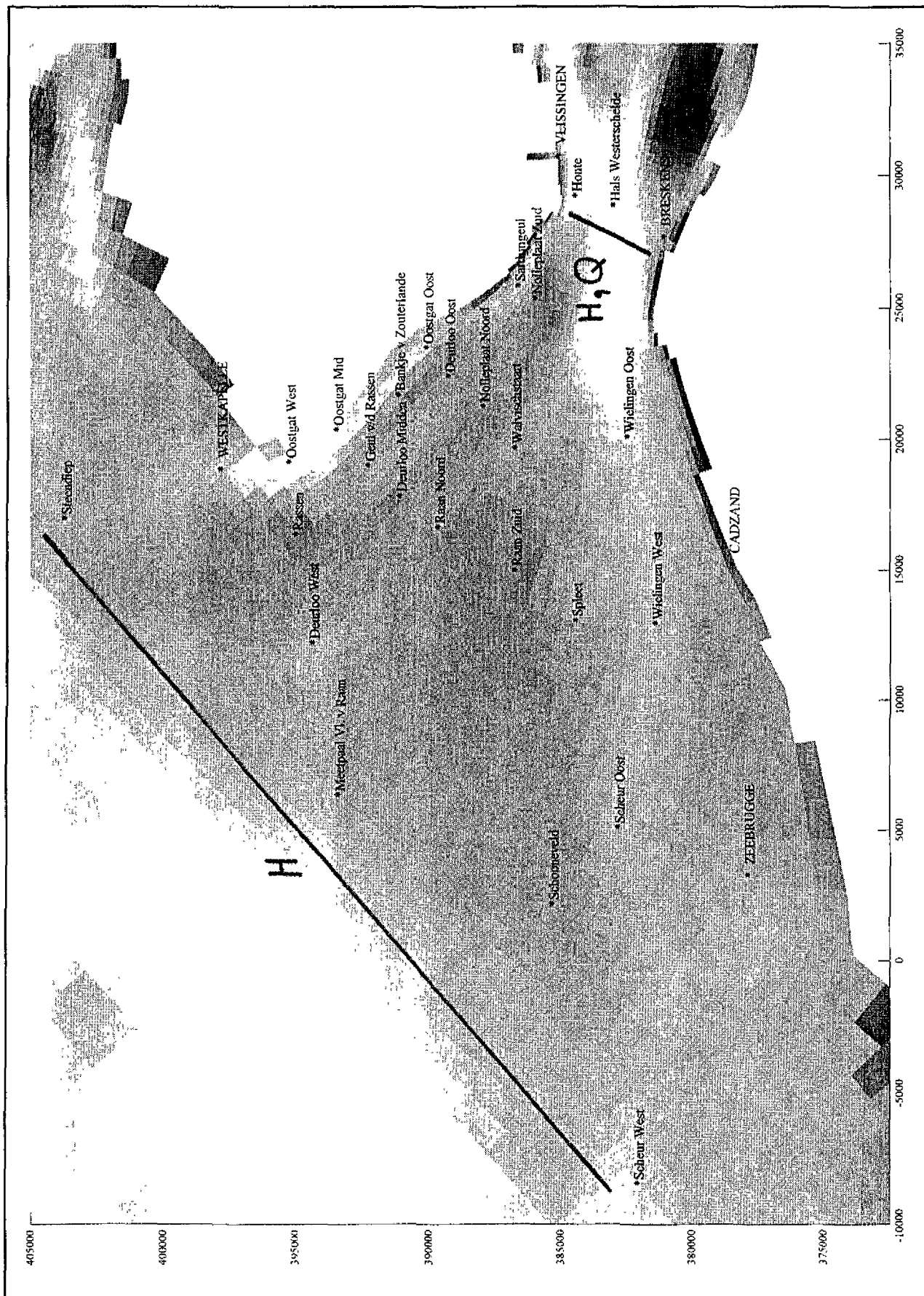


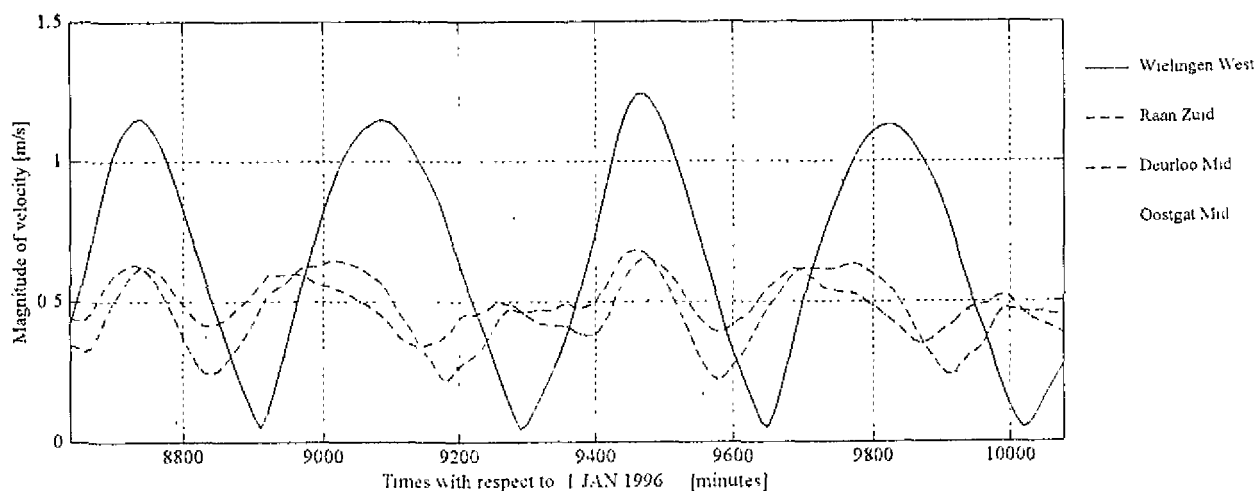
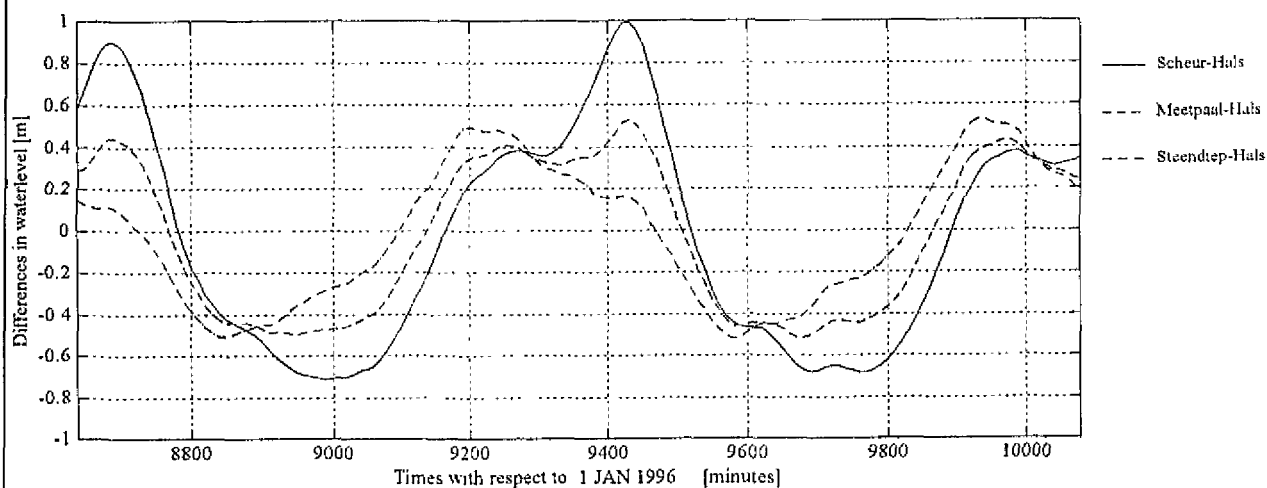
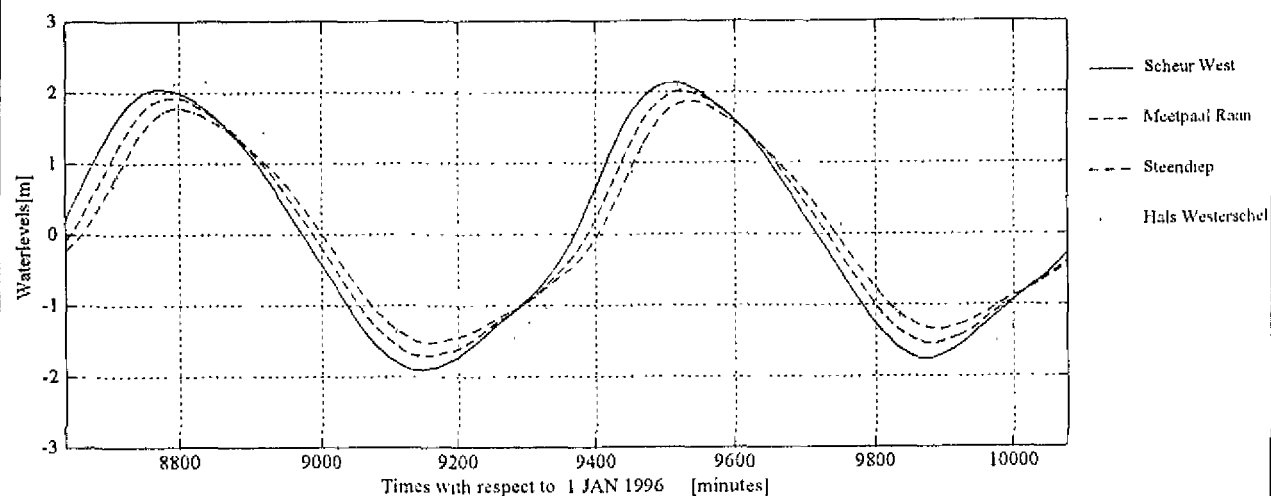


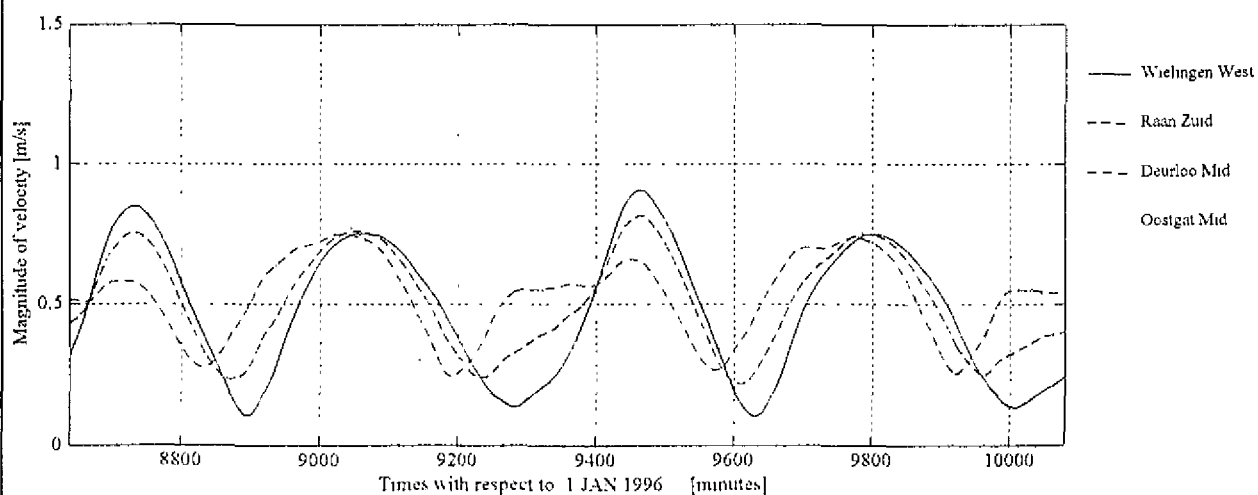
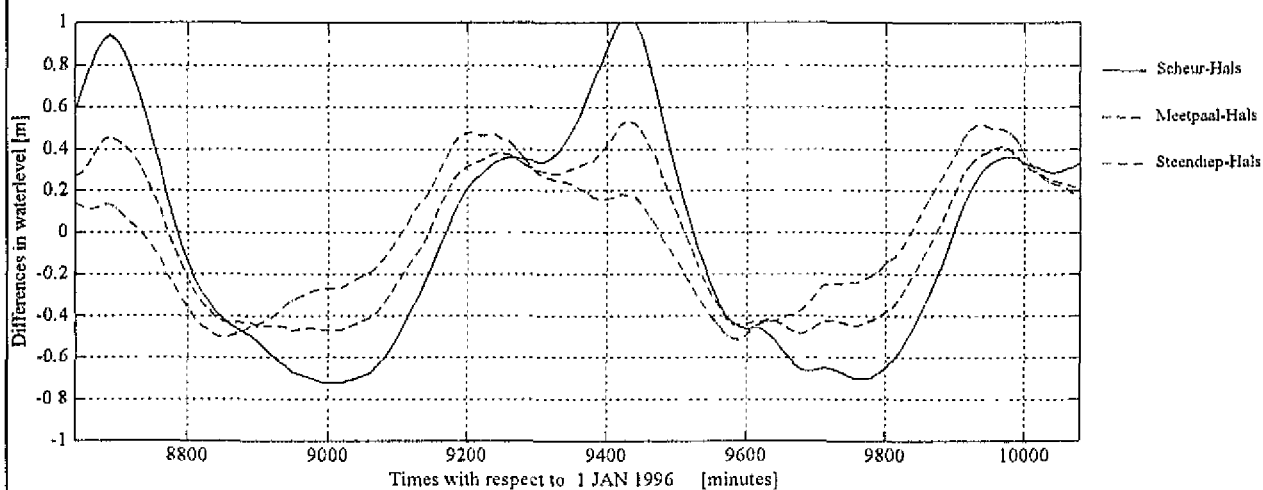
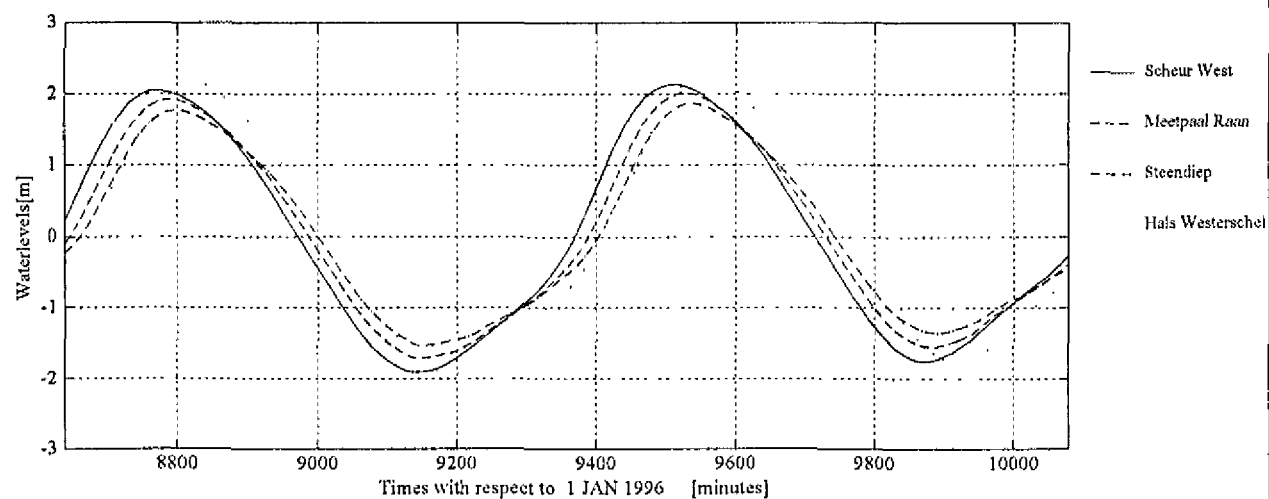




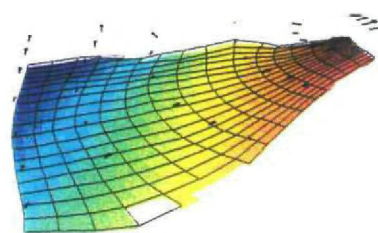
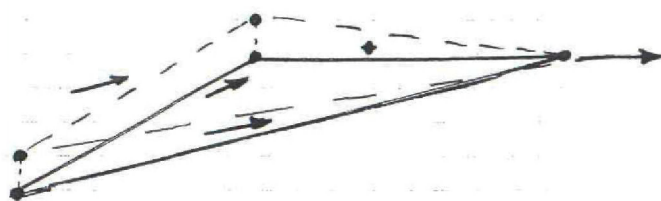








HOOGWATER

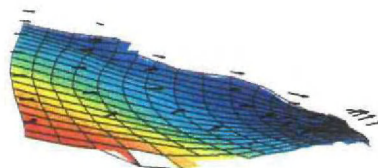
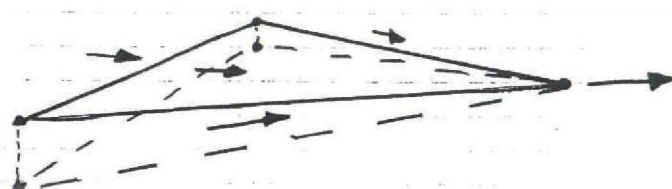


ca. HW Vlissingen

— waterstand t.o.v.
waterstand Vlissingen

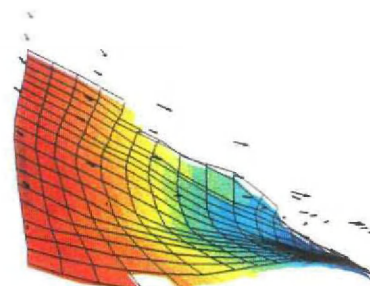
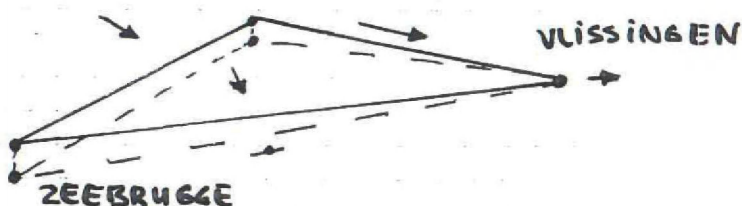
- - - waterstand Vlissingen

➔ stroomrichting



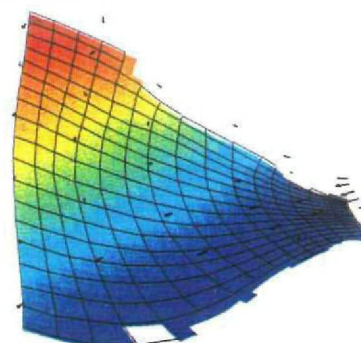
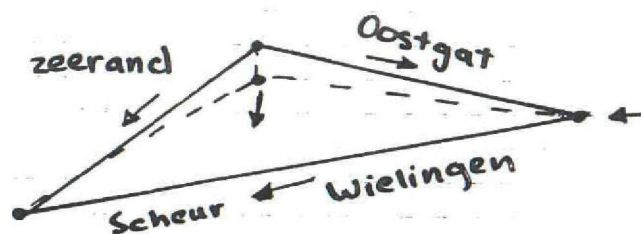
ca. 2 uur voor HW Vlissingen

WESTKAPELLE



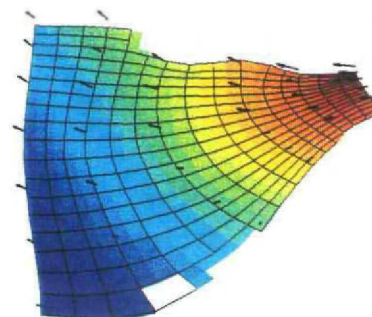
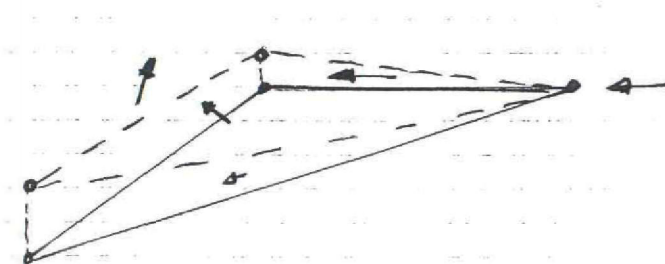
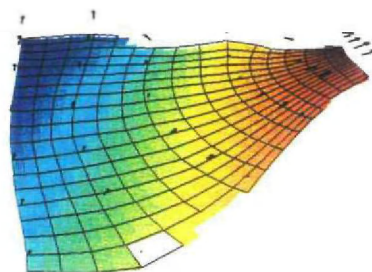
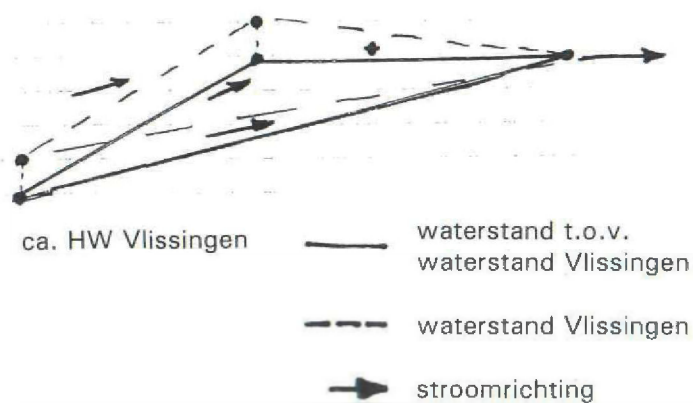
ca. 4 uur voor HW Vlissingen

LAAGWATER

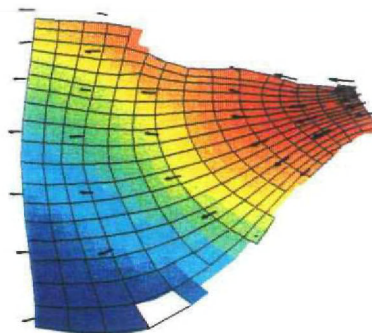
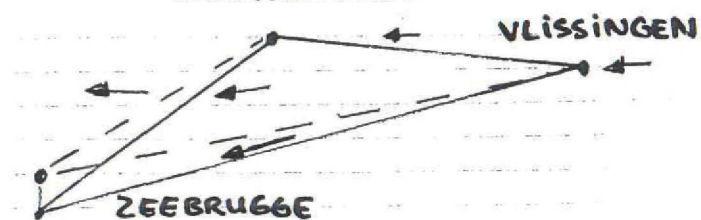


ca. 6 uur voor HW Vlissingen

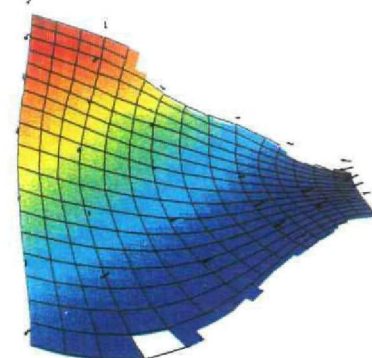
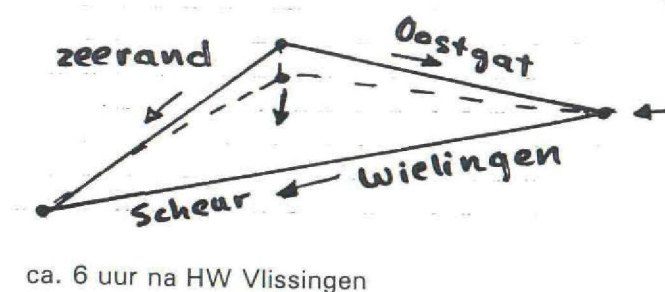
HOOGWATER

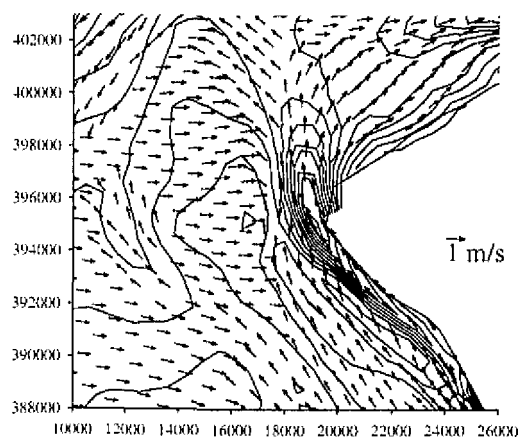
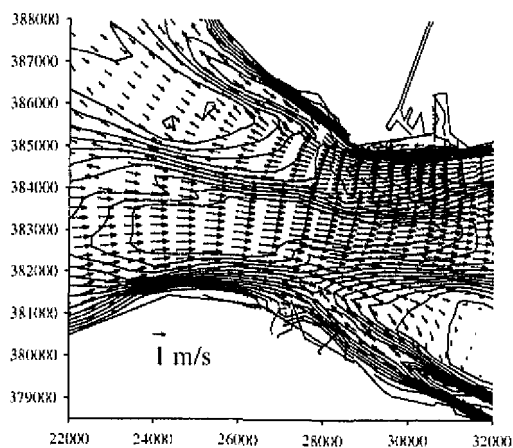
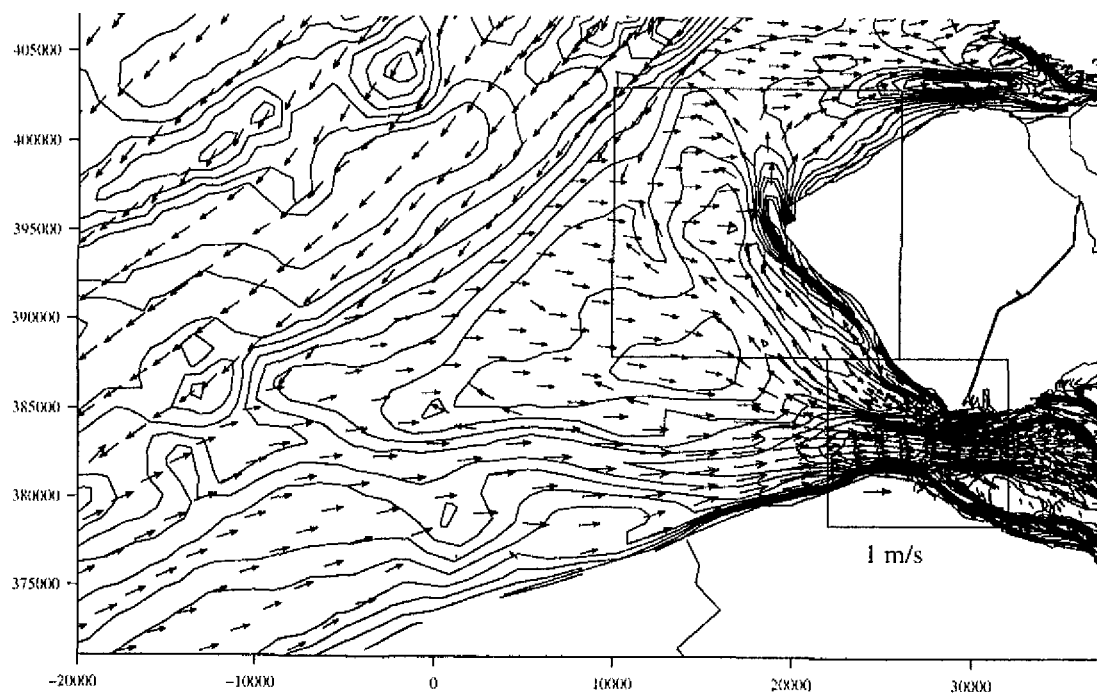


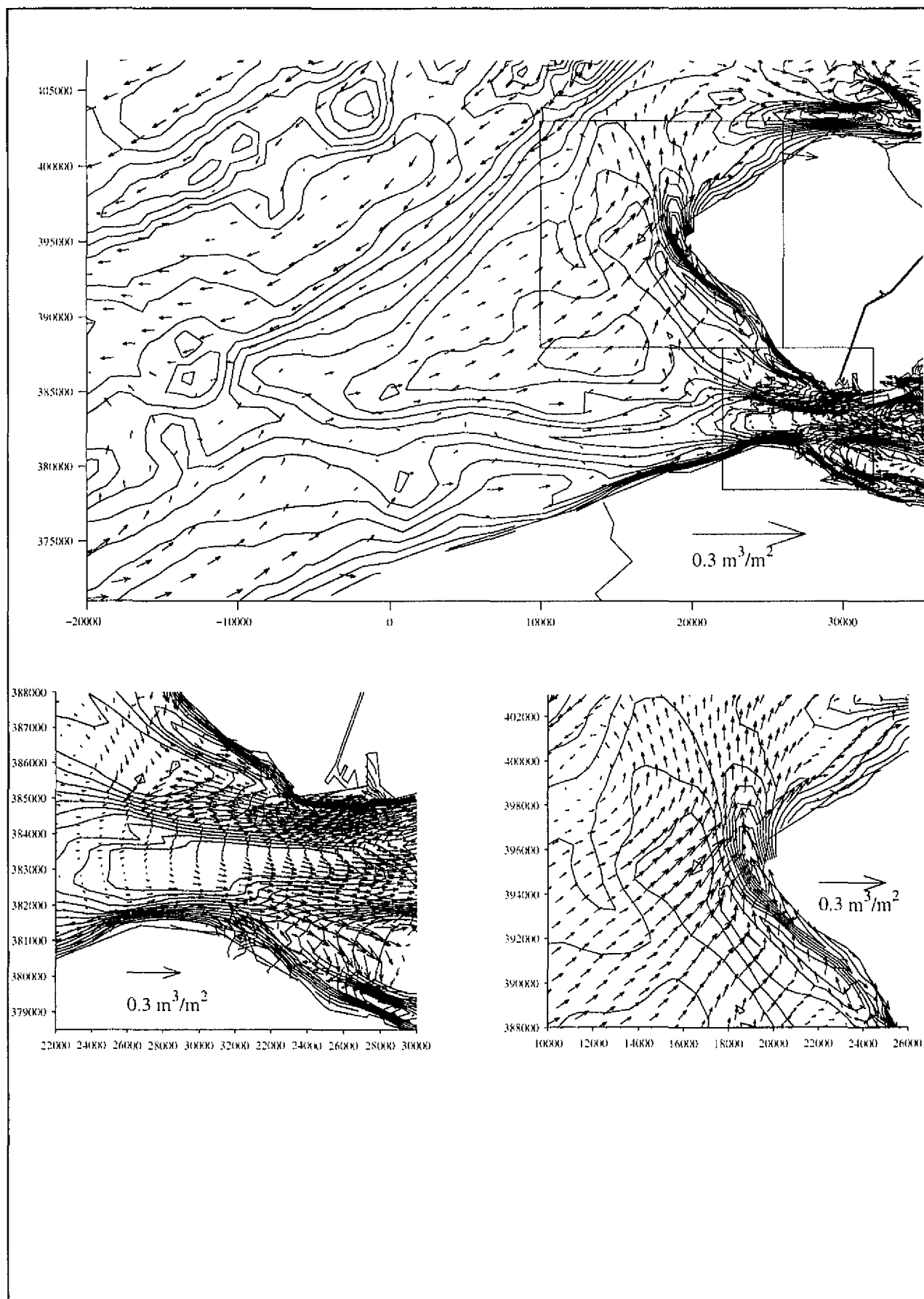
WESTKAPELLE

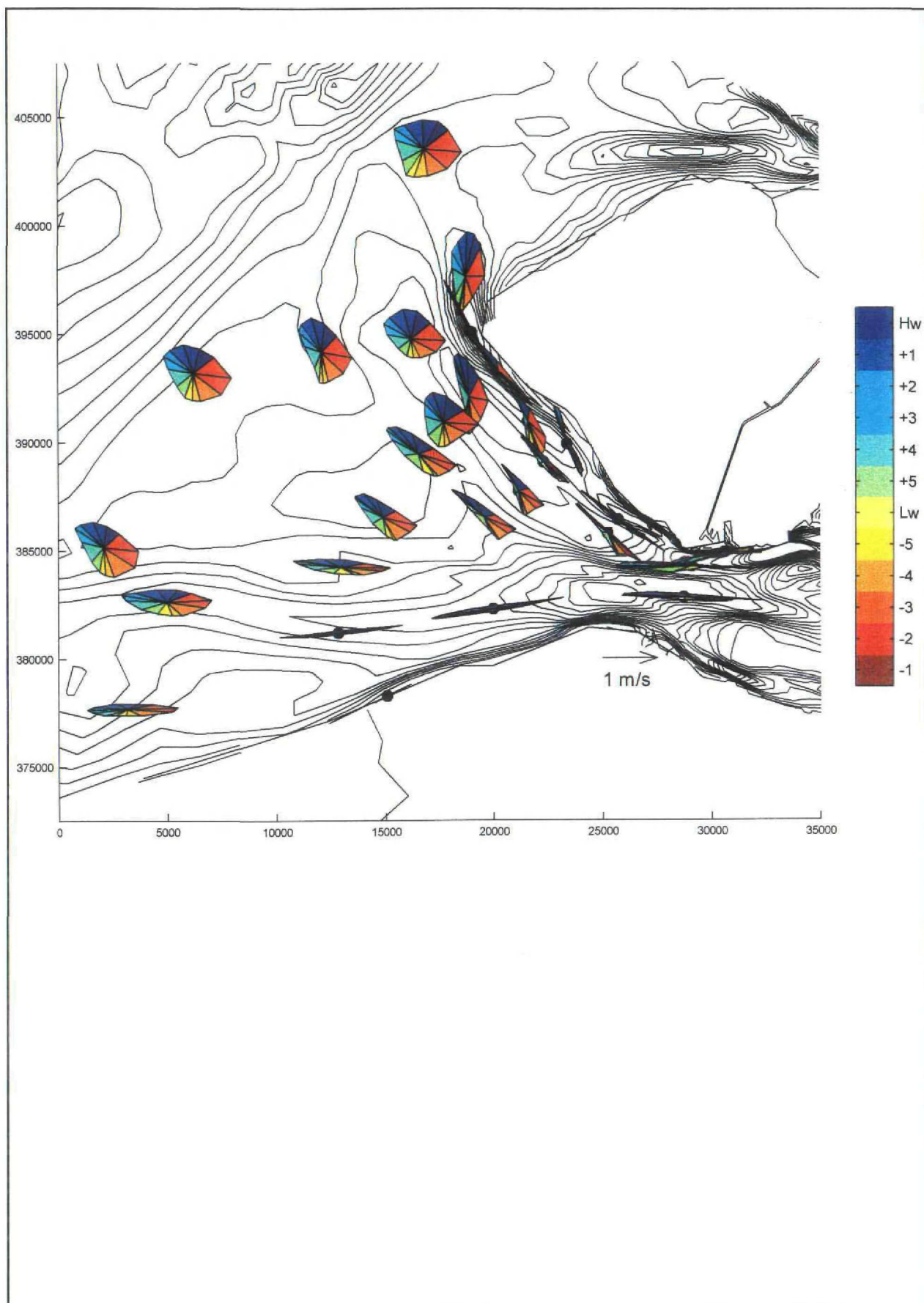


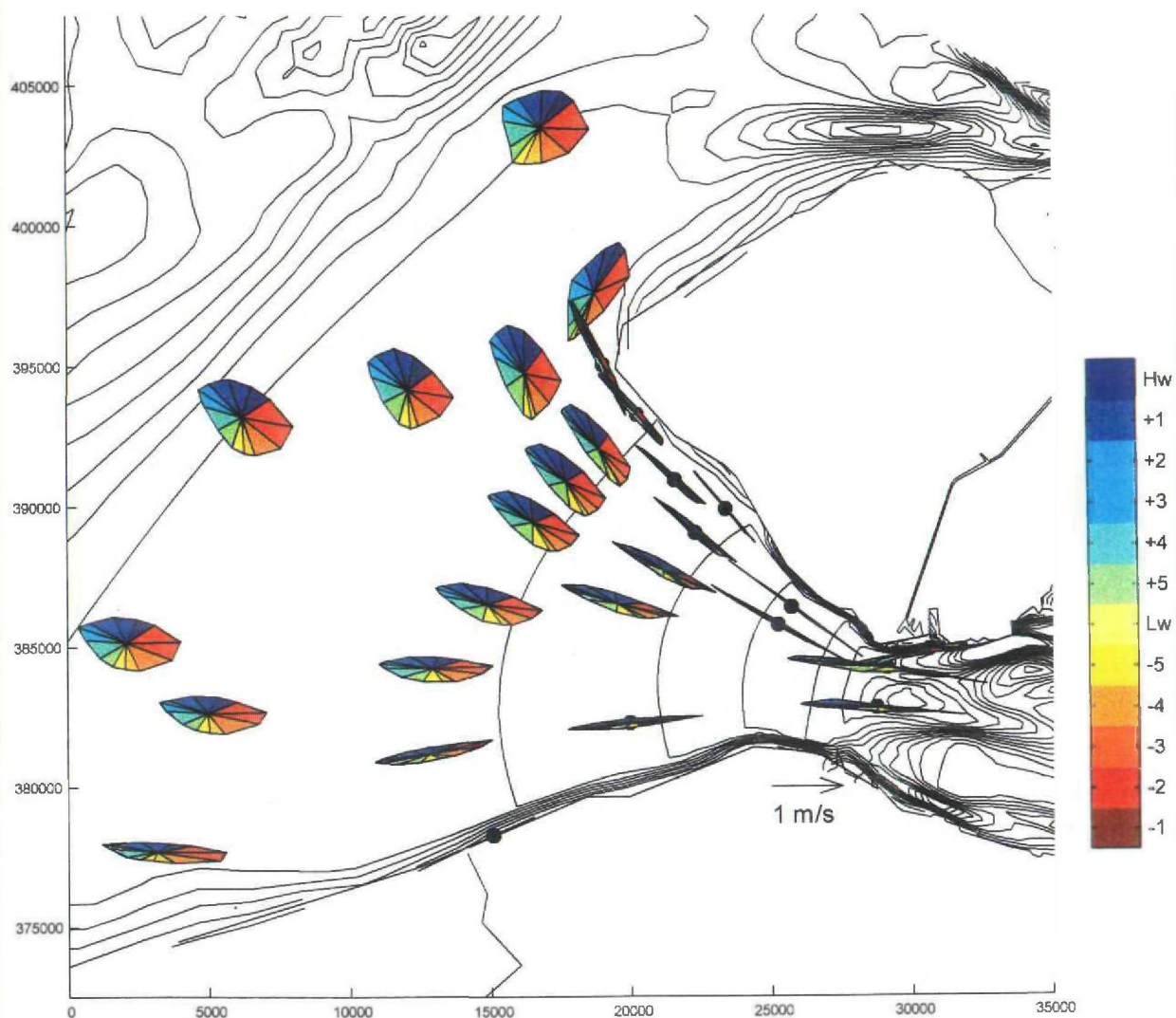
LAAGWATER



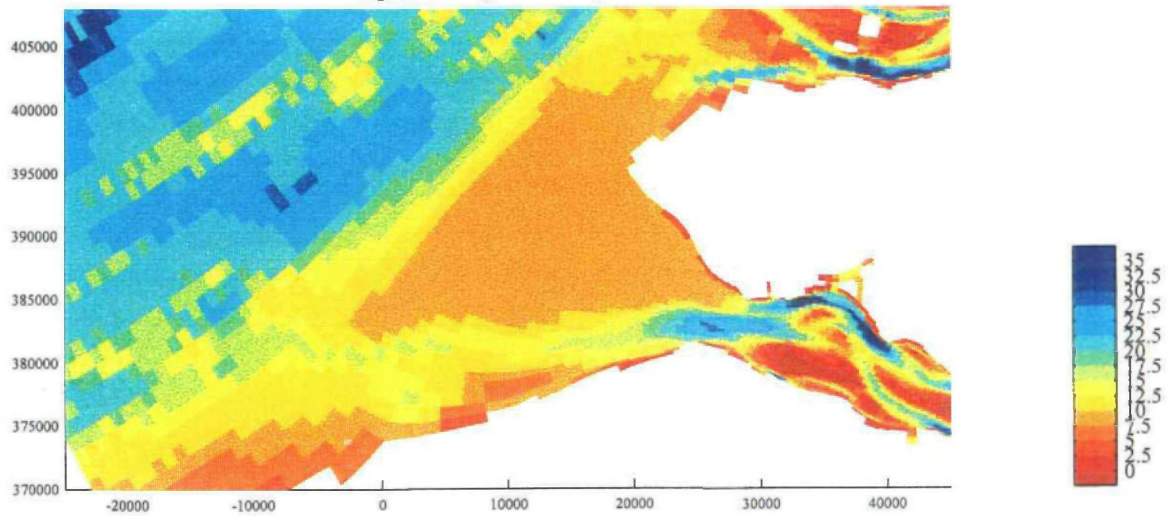




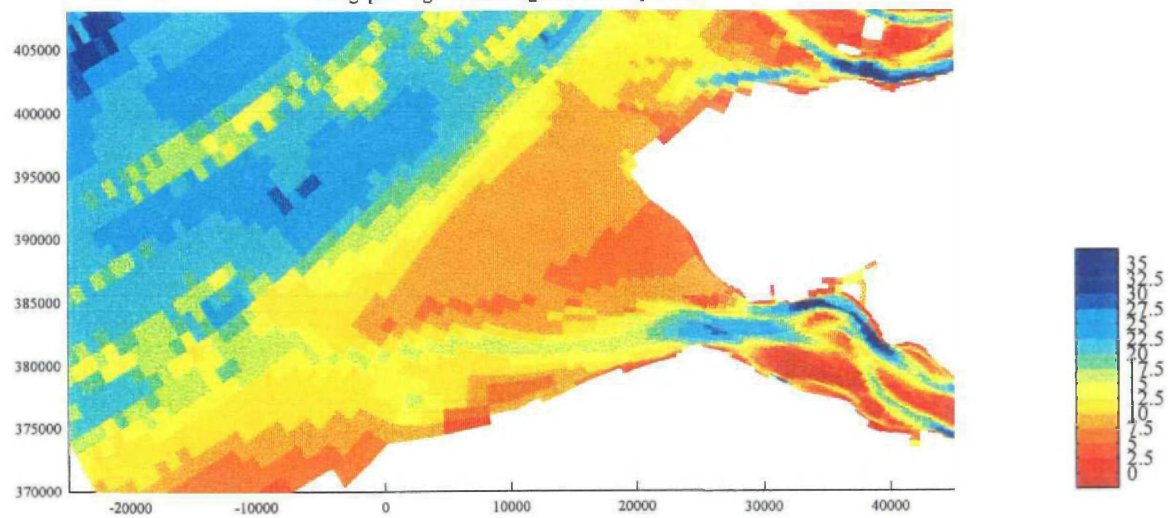




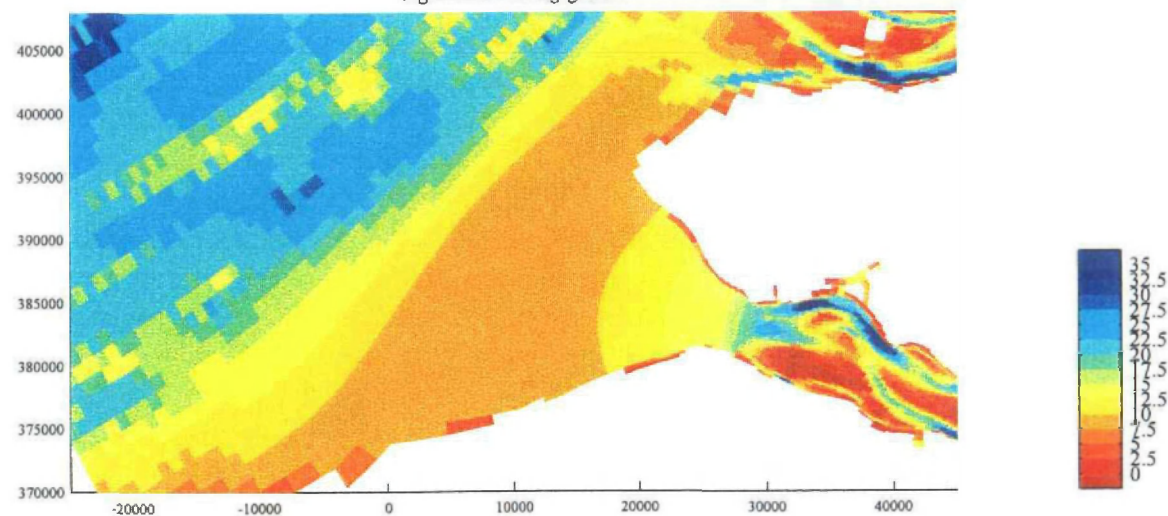
afgevlakt Oostgat/Deurloo systeem

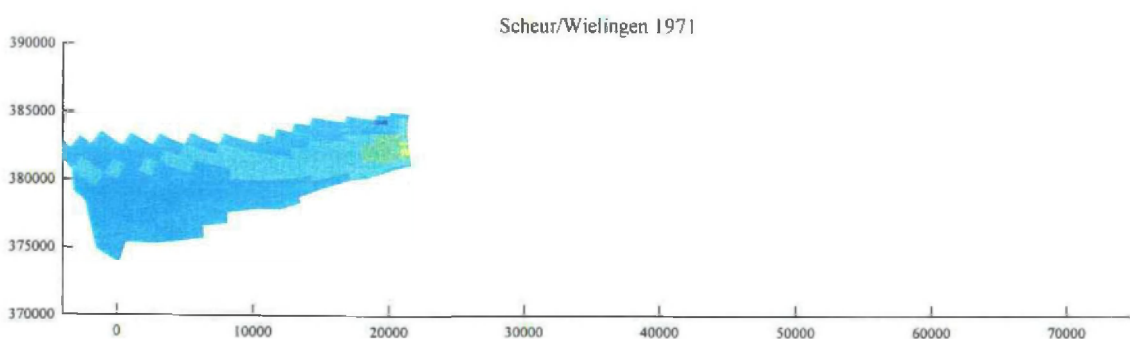
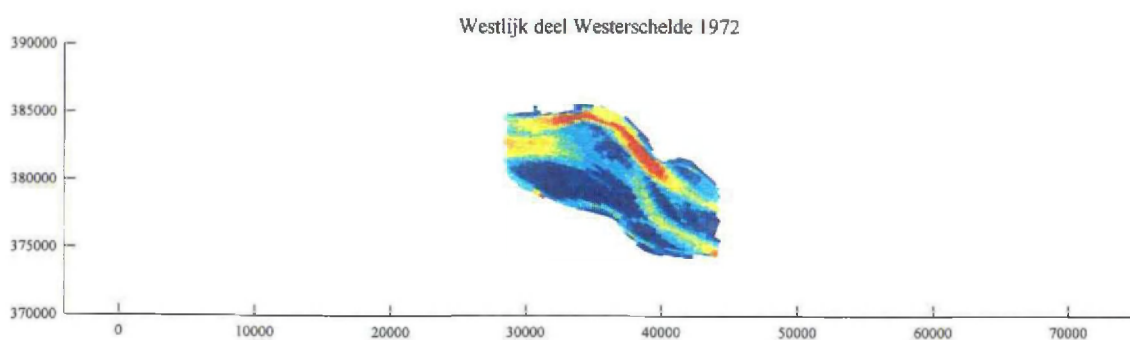
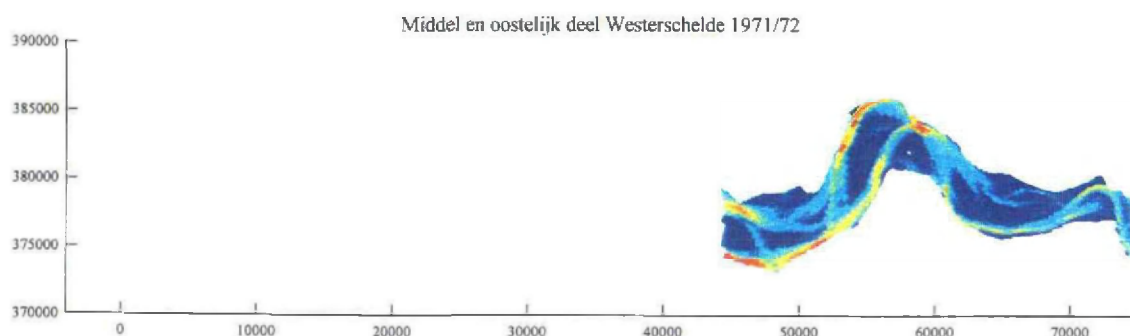
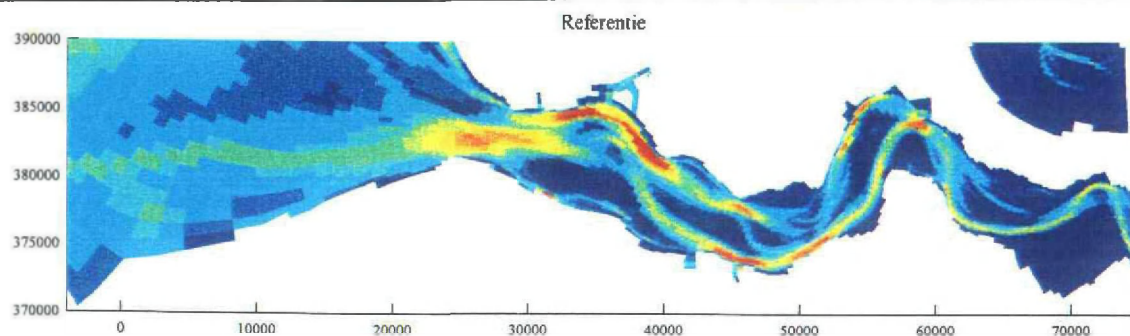


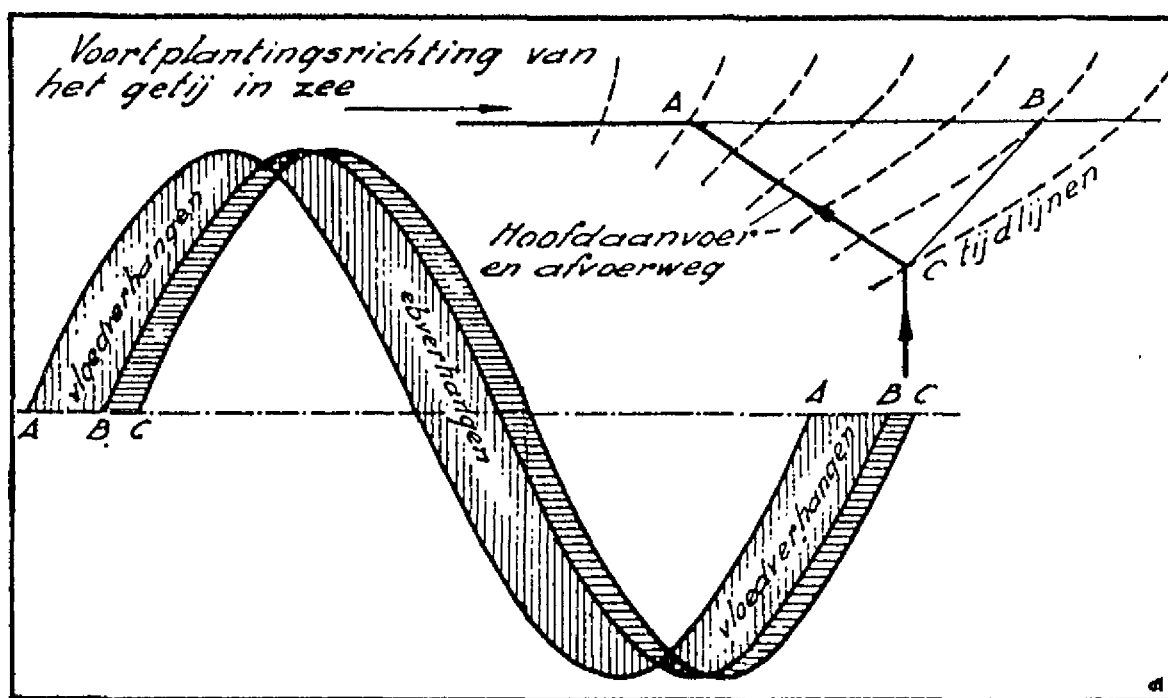
aangepast afgevlakt Oostgat/Deurloo systeem

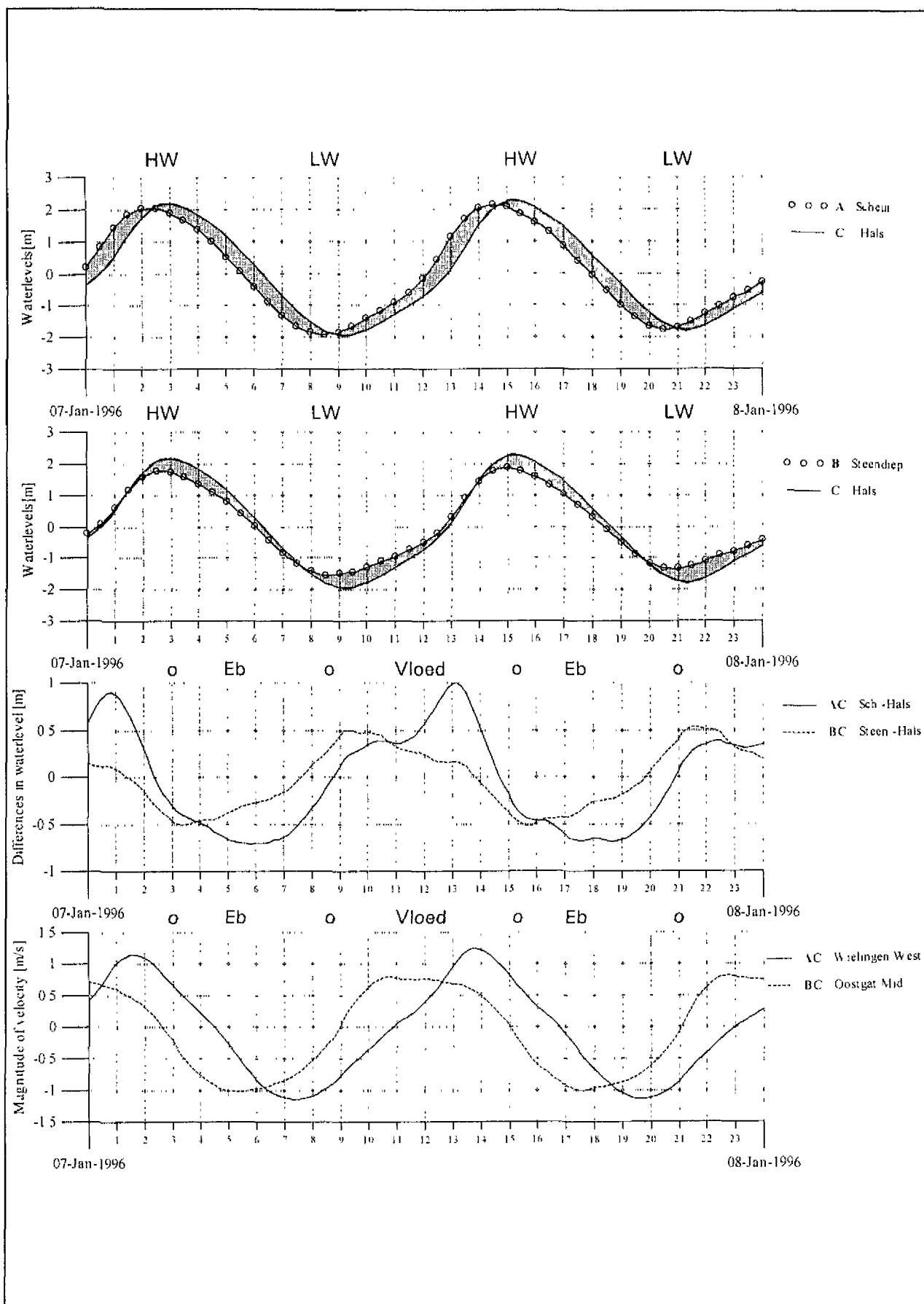


afgevlakt Mondingsgebied

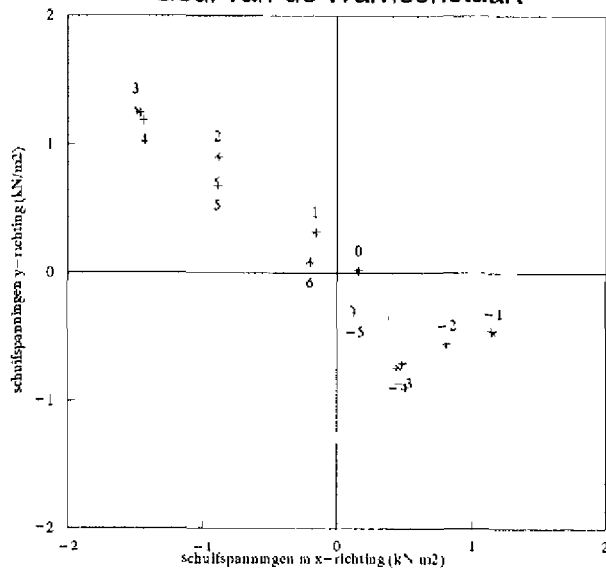






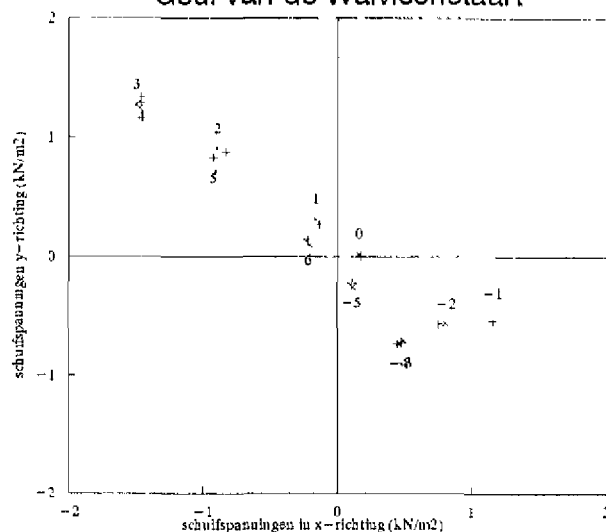


Geul van de Walvischstaart



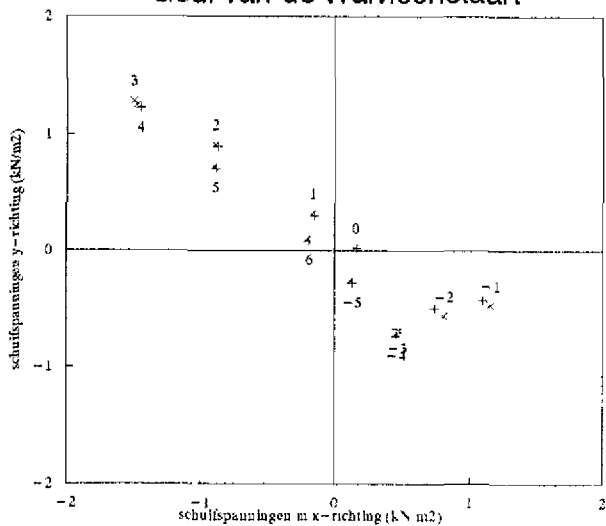
x referentieberekening + opgelegde stroomrichting in de baai
cijfers geven tijdstip t.o.v. HW Vlissingen aan (in uren)

Geul van de Walvischstaart



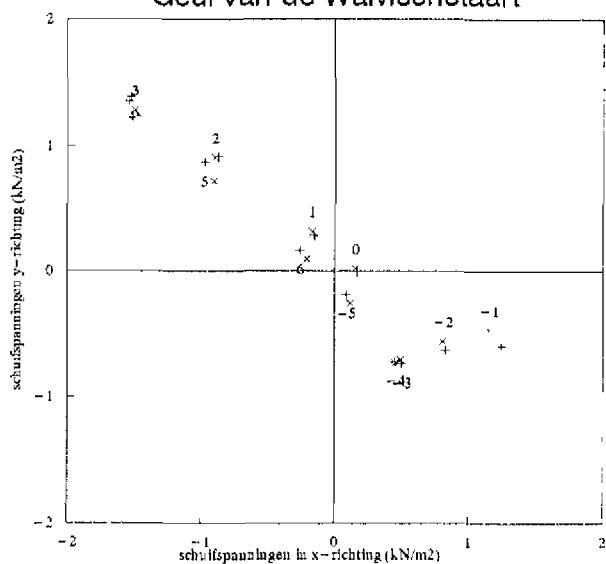
x referentieberekening + Scheur/Wielingen en Westerschelde 1971/1972
cijfers geven tijdstip t.o.v. HW Vlissingen aan (in uren)

Geul van de Walvischstaart

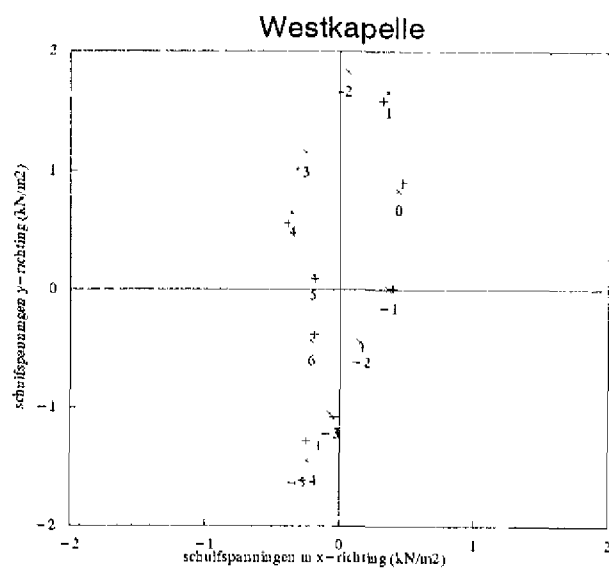


x referentieberekening + midden/oostelijk deel Westerschelde 1971
cijfers geven tijdstip t.o.v. HW Vlissingen aan (in uren)

Geul van de Walvischstaart



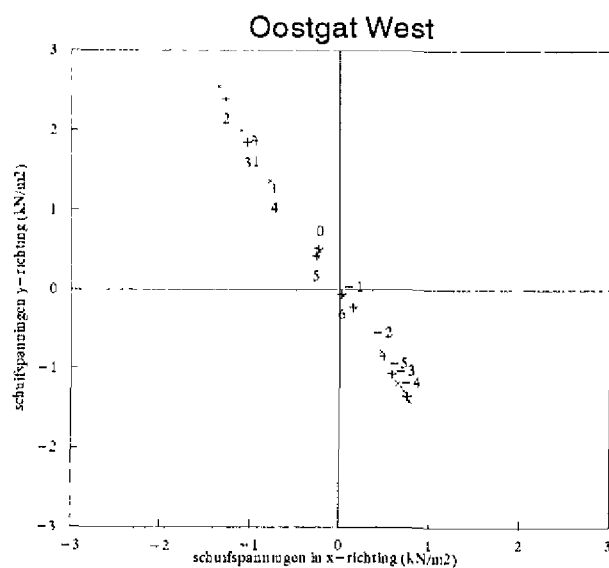
x referentieberekening + Scheur/Wielingen 1971
cijfers geven tijdstip t.o.v. HW Vlissingen aan (in uren)



× referentieberekening

+ zonder stormvloedkering Oosterschelde

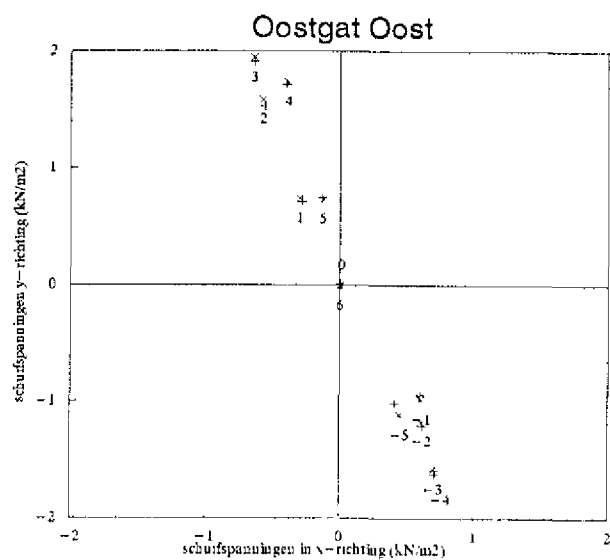
cijfers geven tijdstip t.o.v. HW Vlissingen aan (in uren)



× referentieberekening

+ zonder stormvloedkering Oosterschelde

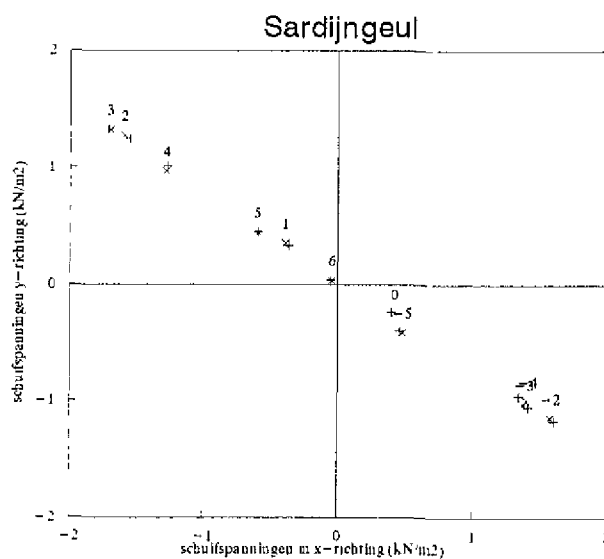
cijfers geven tijdstip t.o.v. HW Vlissingen aan (in uren); afwijkende schaal



× referentieberekening

+ zonder stormvloedkering Oosterschelde

cijfers geven tijdstip t.o.v. HW Vlissingen aan (in uren)



× referentieberekening

+ zonder stormvloedkering Oosterschelde

cijfers geven tijdstip t.o.v. HW Vlissingen aan (in uren)

Bijlage 1 Tijdreeksen waterstanden en debieten calibratieberekeningen

In deze bijlage worden de resultaten van de calibratieberekeningen gepresenteerd. Op basis van de uitkomsten van elke berekening is de modelschematisatie aangepast. De volgende berekeningen zijn uitgevoerd:

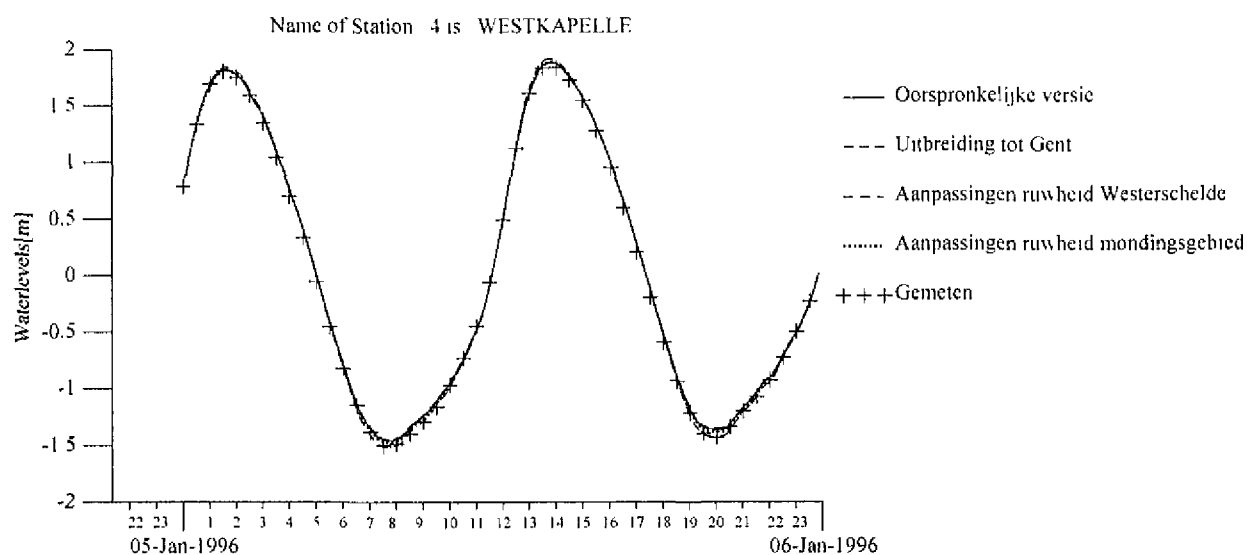
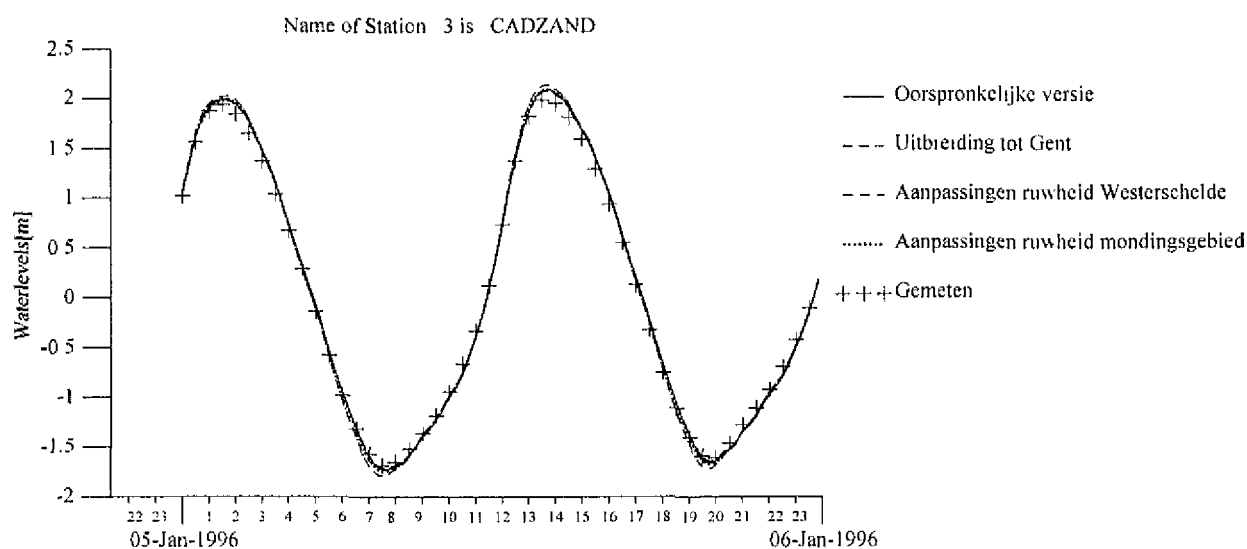
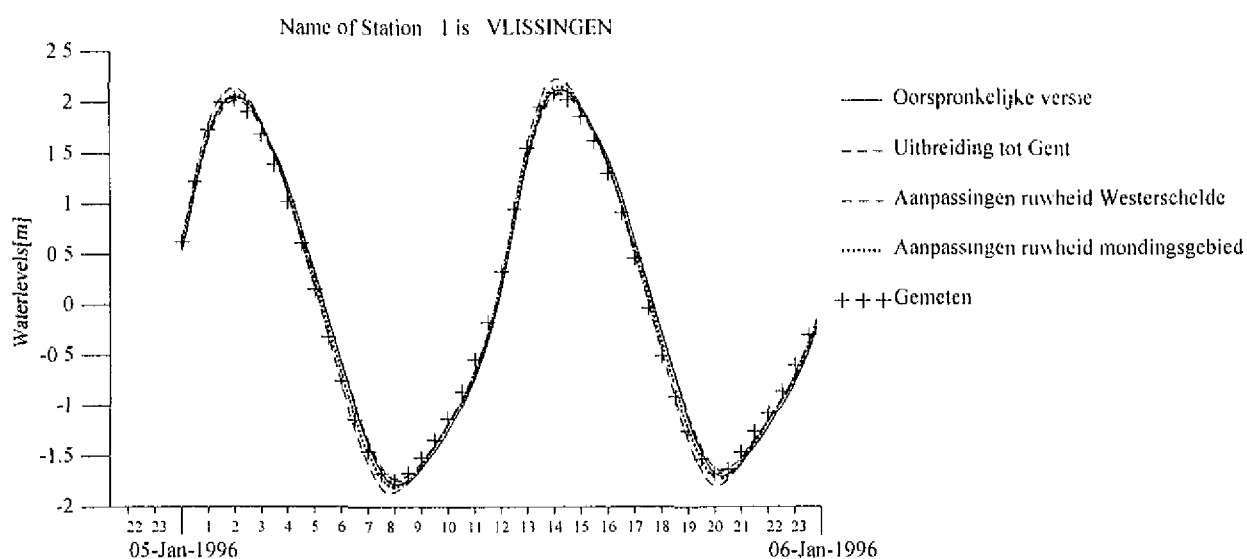
- oorspronkelijke versie
- uitbreiding tot Gent (op basis van SCALWEST-schematisatie)
- aanpassing ruwheid Westerschelde (op basis van ruwheden SCALWEST)
- aanpassing ruwheid mondingsgebied (gelijkmatige overgang met omliggende gebieden)

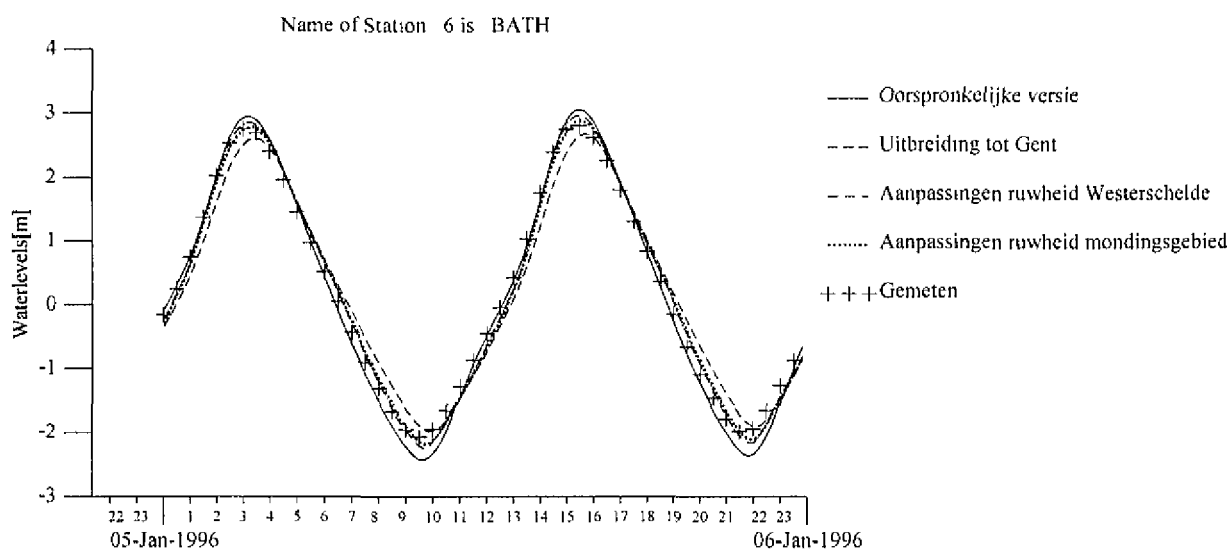
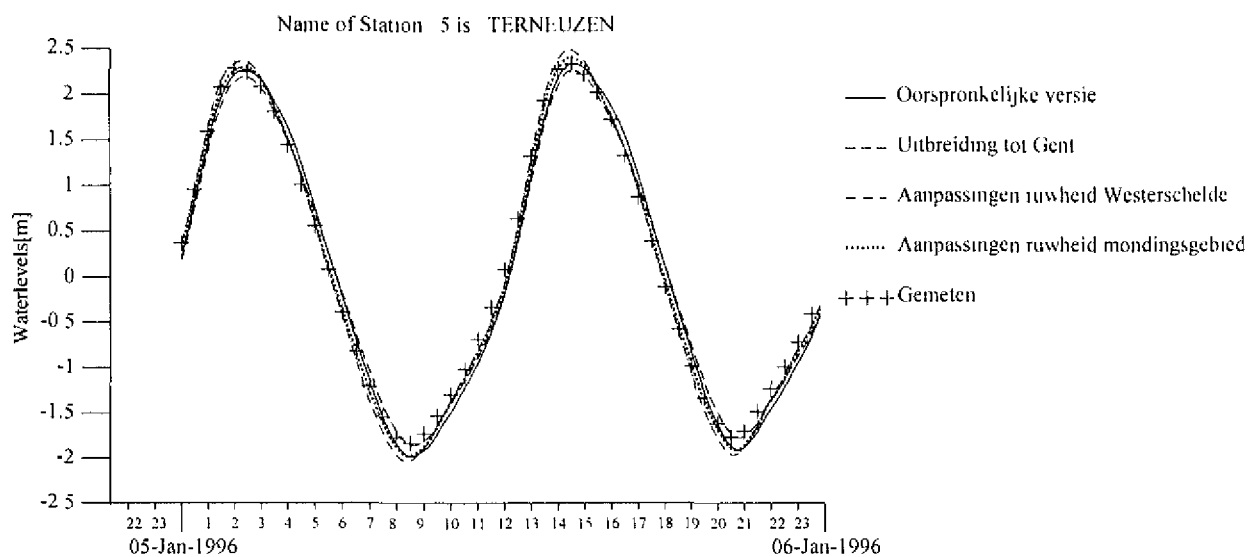
De laatste berekening is tevens de basisberekening.

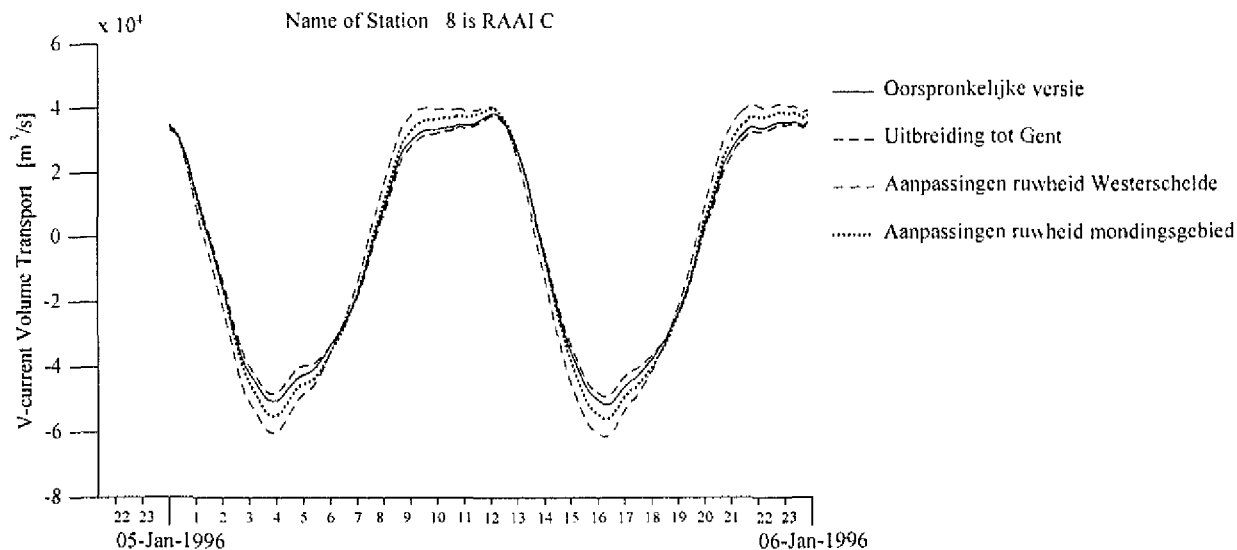
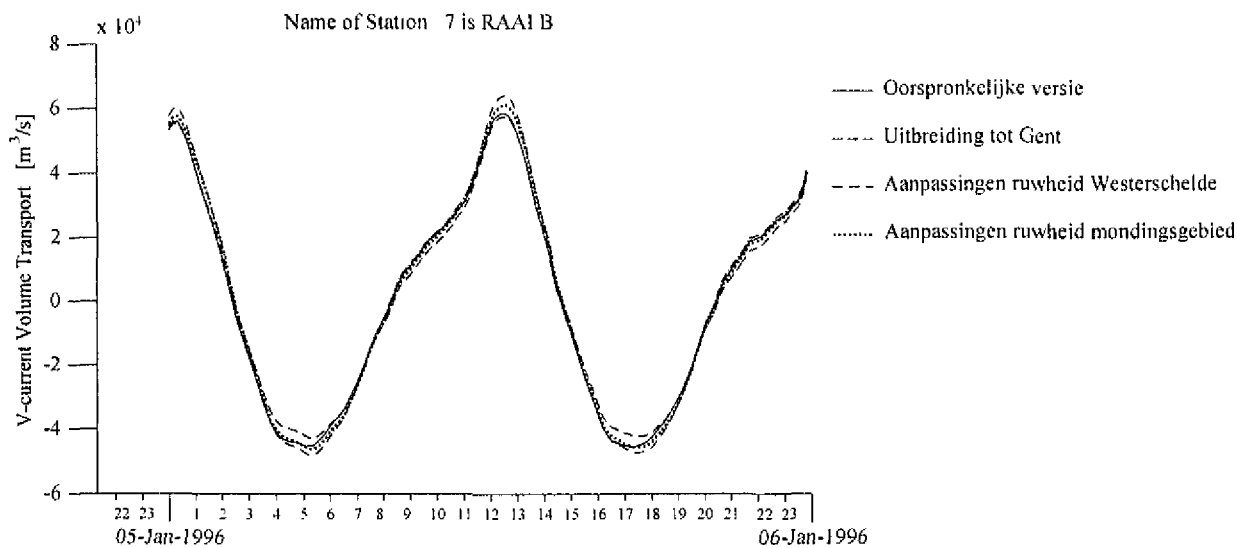
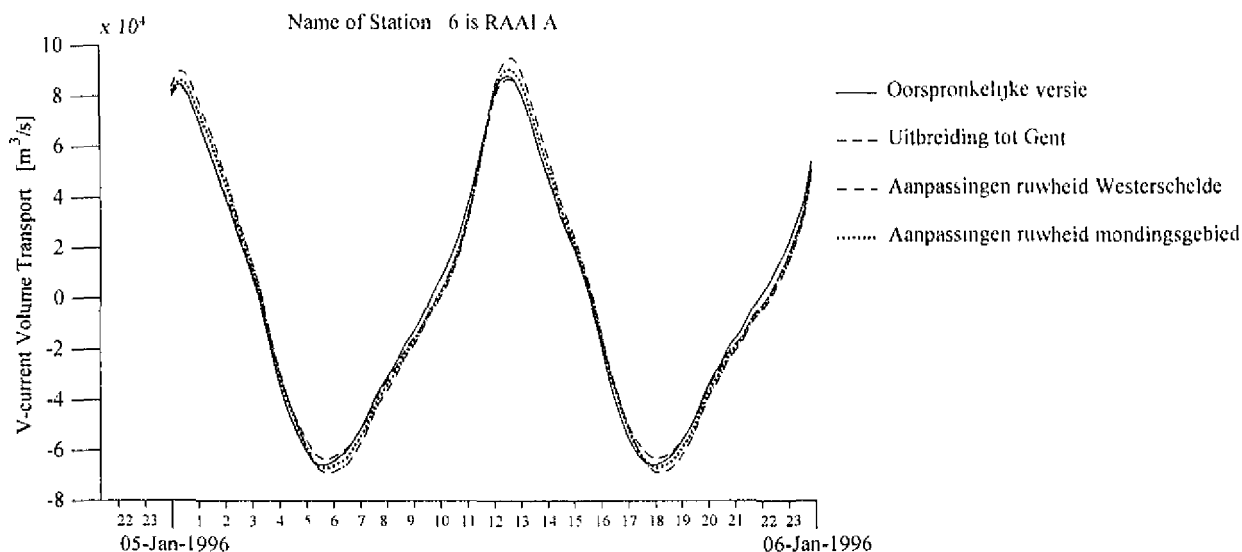
De bijlage is als volgt opgebouwd:

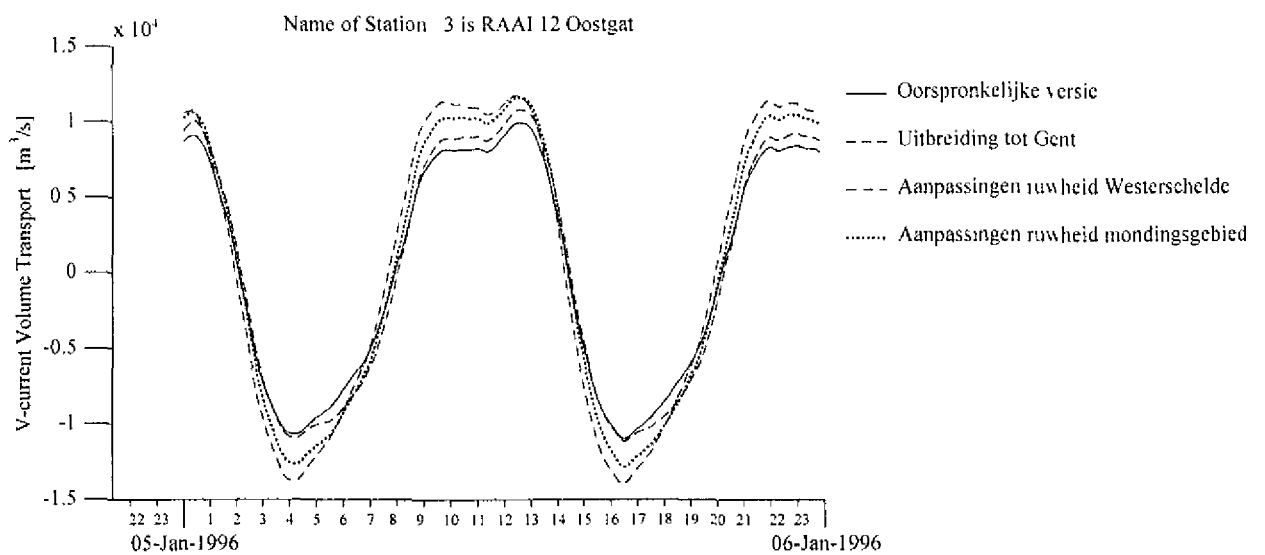
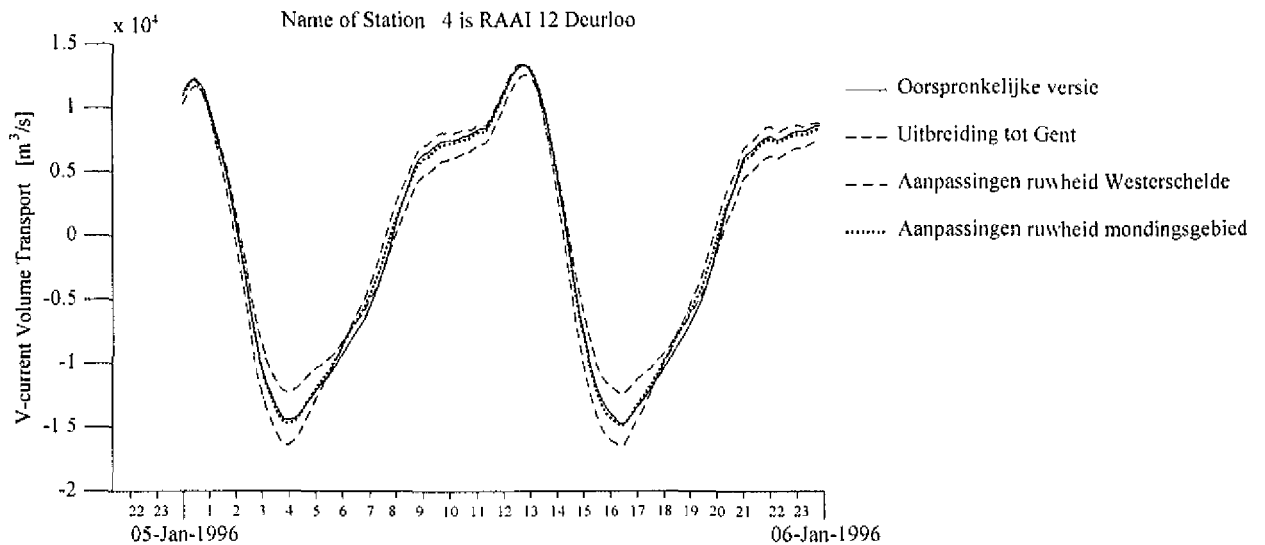
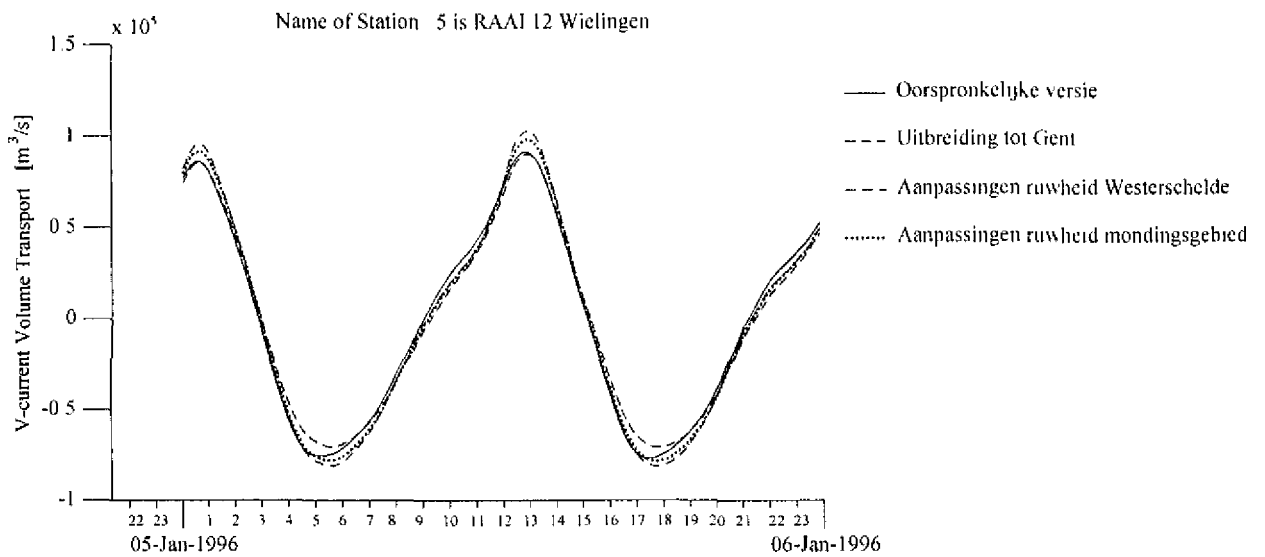
- Bijlage 1.1 waterstanden Vlissingen, Cadzand en Westkapelle
Bijlage 1.2 waterstanden Terneuzen en Bath
Bijlage 1.3 debieten raai 14: A-Scheur, B-Vlakte van de Raan en C-Deurloo/Oostgat
Bijlage 1.4 debieten raai 12: Wielingen, Deurloo en Oostgat
Bijlage 1.5 debieten raai 11 (Vlissingen-Breskens), raai 7 (Terneuzen) en raai 2 (Bath)

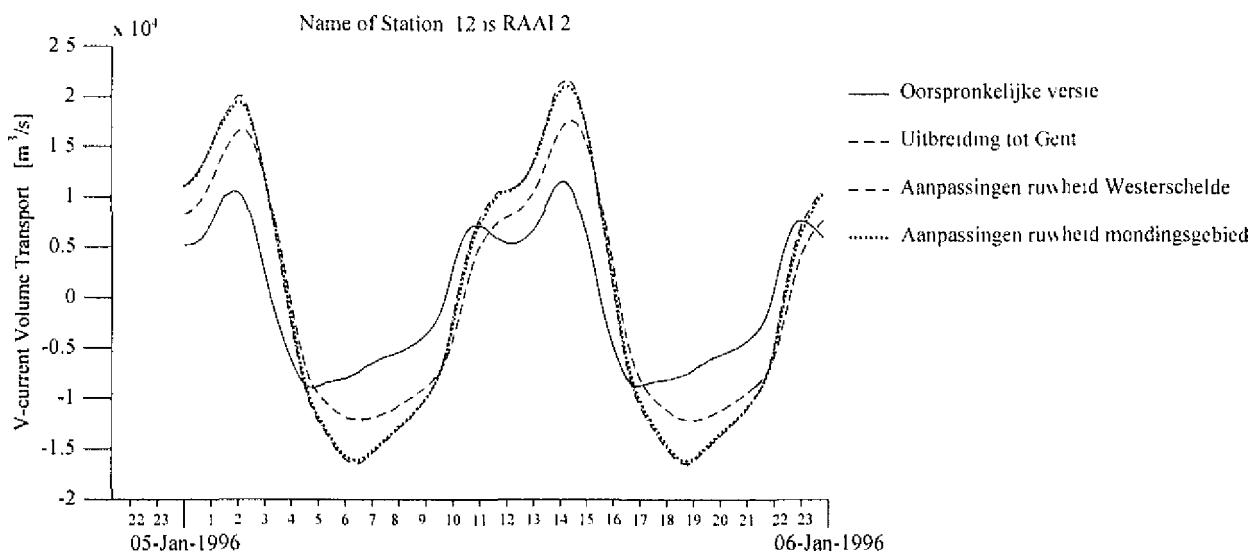
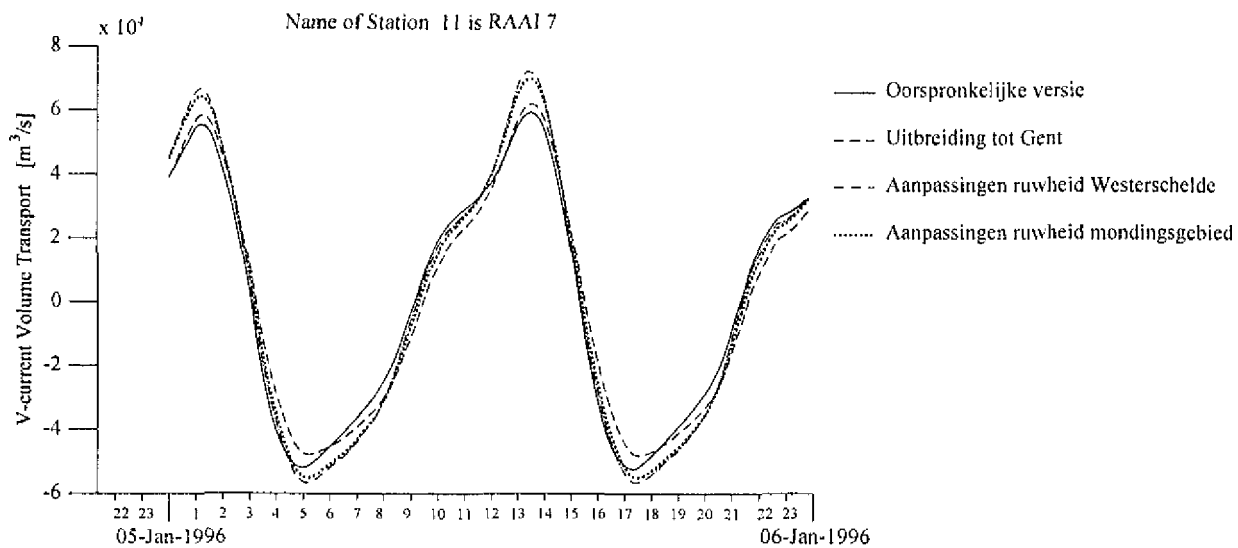
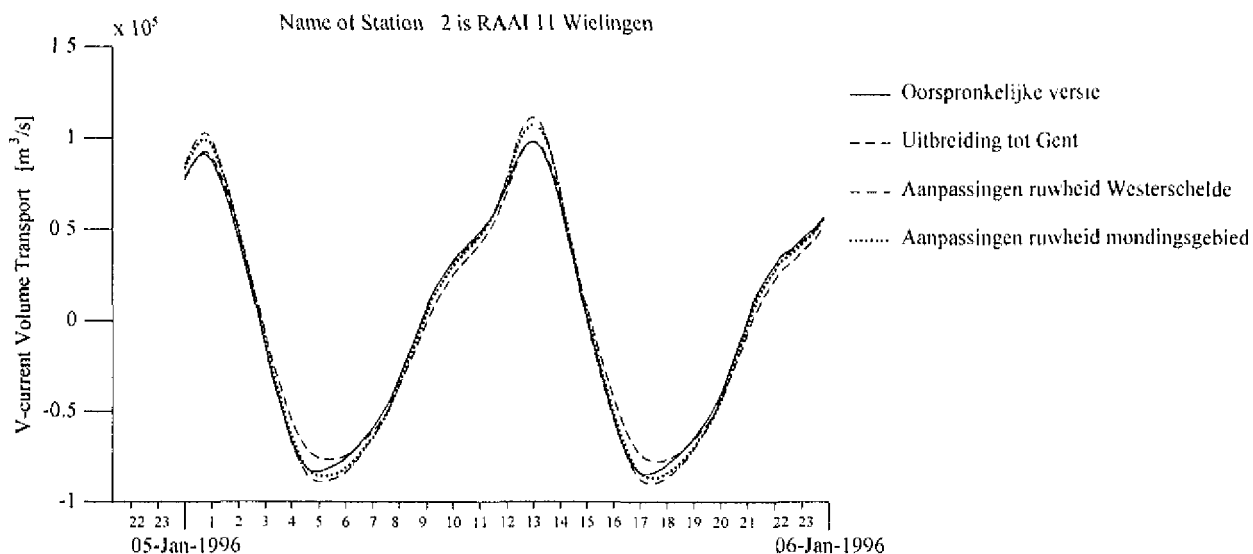
NB. De locaties van de waterstandstations en debietraaien zijn weergegeven in figuur 2.4. De meetraaien wijken hiervan af (zie bijlage 2). De consequenties hiervan zijn besproken in paragraaf 2.3.











Bijlage 2 Getijvolumina door meetraaien

De debietraaien die worden gebruikt om de modelresultaten te presenteren wijken enigszins af van de in werkelijkheid gemeten raaien. Voor de verificatie van de basisberekening met meetgegevens zijn wel de gemeten raaien aangehouden. Het berekenen van getijvolumina in meetraaien vereist een zeer omvangrijke modeluitvoer (elk roosterpunt om de 15 minuten) en tijdrovende interpolatie. Bij het vergelijken van verschillende berekeningen zijn daarom getijvolumina door raaien langs gridlijnen aangehouden.

Deze bijlage is als volgt opgebouwd:

- Bijlage 2.1 raai 11 Wielingen
- Bijlage 2.2 raai 11 Sardijngeul
- Bijlage 2.3 raai 12 Wielingen
- Bijlage 2.4 raai 12 Deurloo
- Bijlage 2.5 raai 12 Oostgat
- Bijlage 2.6 raai 14A Scheur
- Bijlage 2.7 raai 14B Vlakte van de Raan
- Bijlage 2.8 raai 14C Deurloo/Oostgat

De doorstroomoppervlaktes in het model en de berekende eb- en vloedvolumina zijn vergeleken met metingen in de periode 1991 tot 1995. Zie onderstaande tabellen. De getijfactor is de factor tussen opgetreden getijverschil bij Vlissingen en gemiddeld getijverschil (3.86 m).

	doorstroomoppervlakte (m ²)	
	berekend	gemeten
raai 11 Wielingen	70.910	70.300
raai 11 Sardijngeul	8848/9.635	9.810
raai 12 Wielingen	86.280	85.800
raai 12 Deurloo	22.970	23.500
raai 12 Oostgat	12.080	12.600
raai 14A Scheur	76.370	83.100
raai 14B Vlakte van de Raan	105.800	113.000
raai 14C Deurloo/Oostgat	74.960	80.000

	berekend ebvolume (Mm ³)	getijfactor berekend getij	gemeten ebvolume (Mm ³)	getijfactor gemeten getij
raai 11 Wielingen	1137	1.08	1210	1.18
raai 11 Sardijngeul	40/143	1.08	109	1.18
raai 12 Wielingen	1138	1.08	1019	1.17
raai 12 Deurloo	207	1.08	187	1.17
raai 12 Oostgat	141	1.08	138	1.17
raai 14A Scheur	666	1.08	813	1.10
raai 14B Vlake van de Raan	538	1.08	913	1.05
raai 14C Deurloo/Oostgat	388	1.08	766	1.07

	berekend vloedvolume (Mm ³)	getijfactor berekend getij	gemeten vloedvolume (Mm ³)	getijfactor gemeten getij
raai 11 Wielingen	1135	1.11	1144	1.17
raai 11 Sardijngeul	50/158	1.11	132	1.17
raai 12 Wielingen	1134	1.11	995	1.15
raai 12 Deurloo	208	1.11	160	1.15
raai 12 Oostgat	161	1.11	157	1.15
raai 14A Scheur	748	1.11	954	1.10
raai 14B Vlake van de Raan	-	1.11	1045	1.12
raai 14C Deurloo/Oostgat	-	1.11	629	1.08

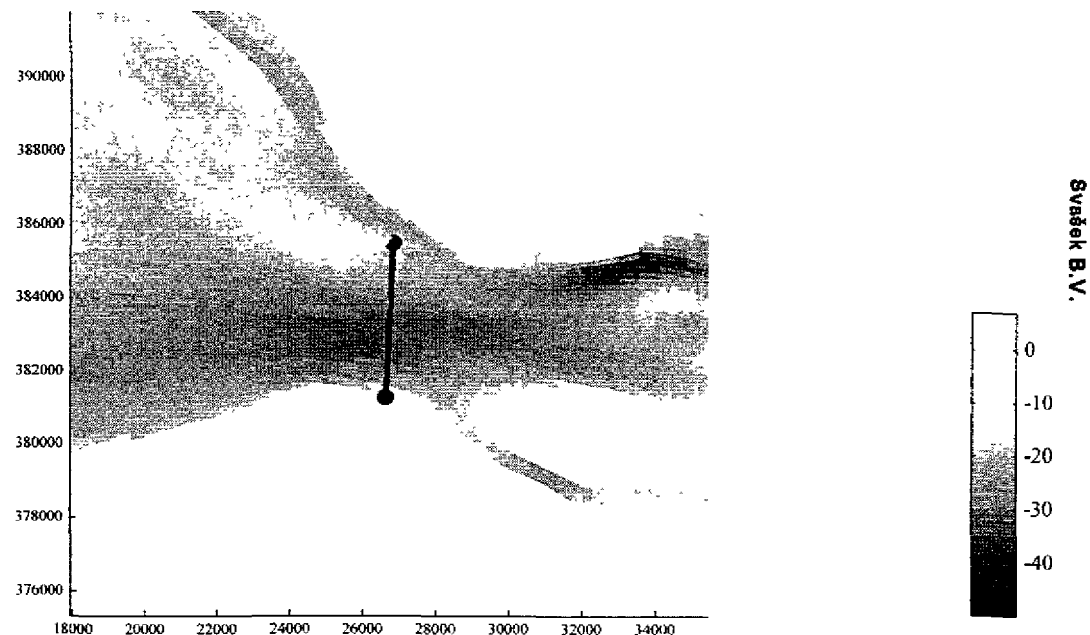
98154/1034

Beginpunt (x,y) [m] = (26630,381250)

Eindpunt (x,y) [m] = (26838,385452)

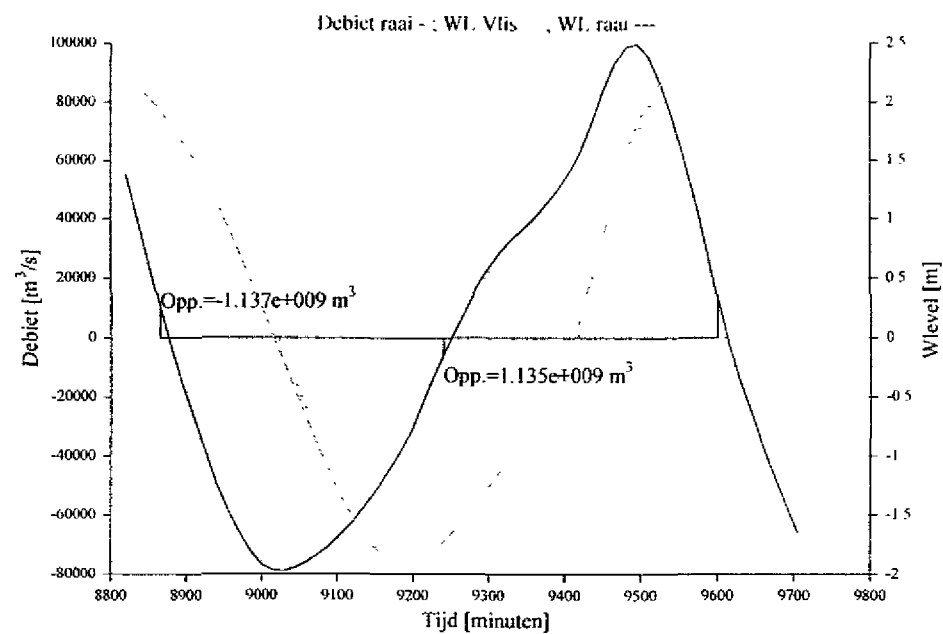
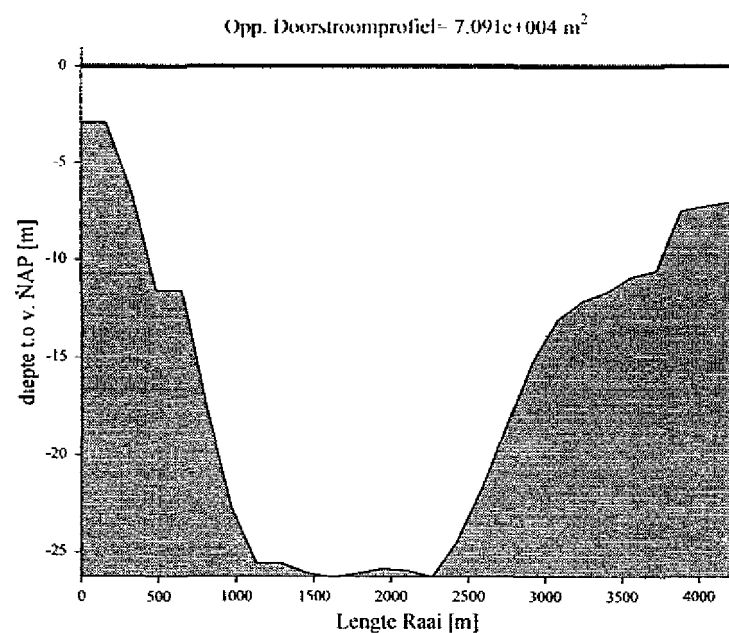
Lengte Raai= 4207 m

Getijverschil Vlissingen= 4.27 m



Bijlage 2.1

20 april 1998



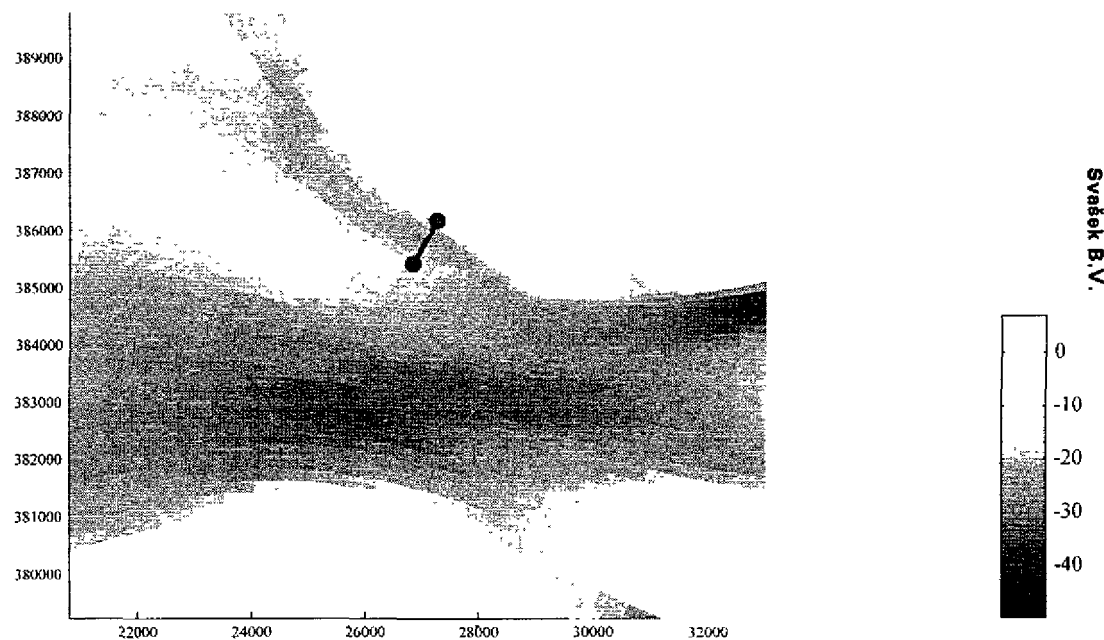
Appendix bij eindrapport getijreconstructie Westerscheldemond

98154/1034

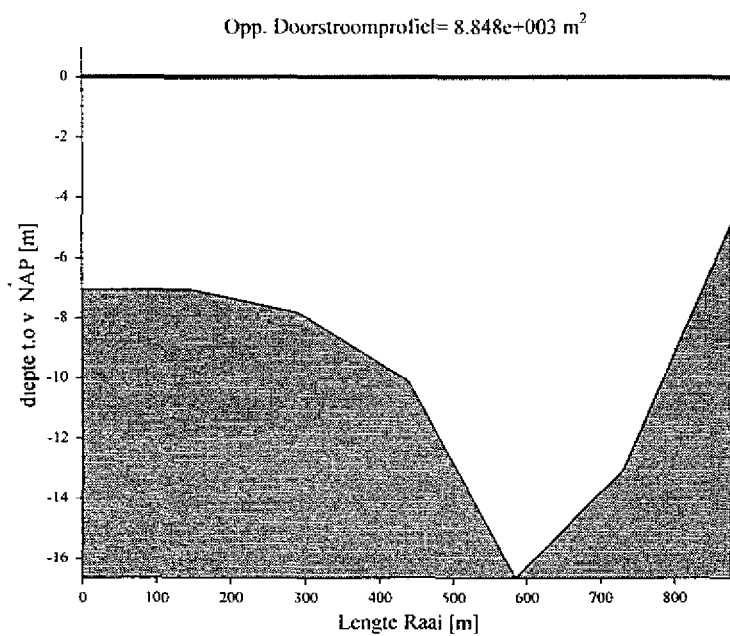
Beginpunt (x,y) [m] = (26838,385452)

Eindpunt (x,y) [m] = (27275,386212)

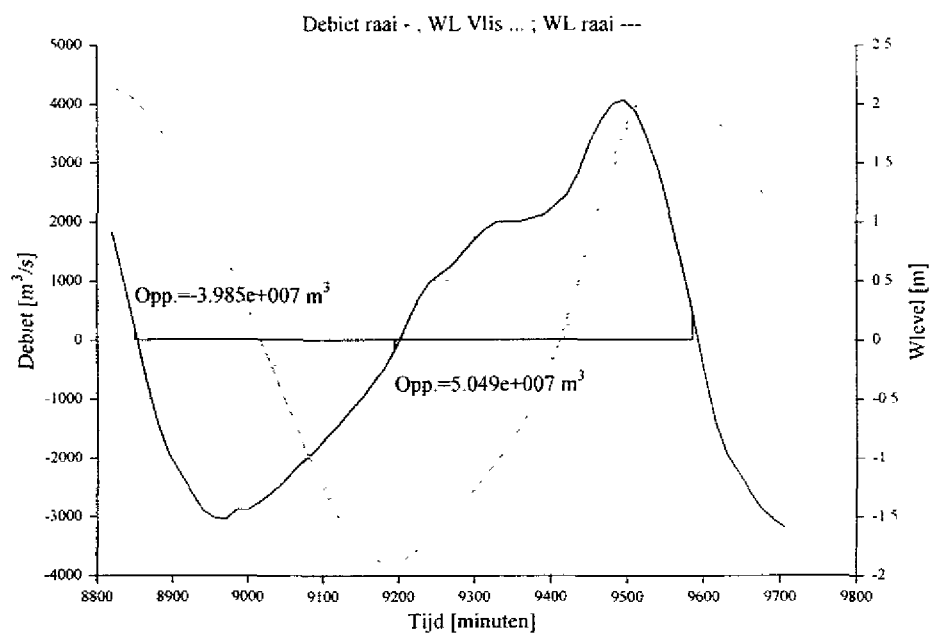
Lengte Raai= 877 m



Bijlage 2.2A



20 april 1998



Appendix bij eindrapport getijreconstructie Westerscheldemond

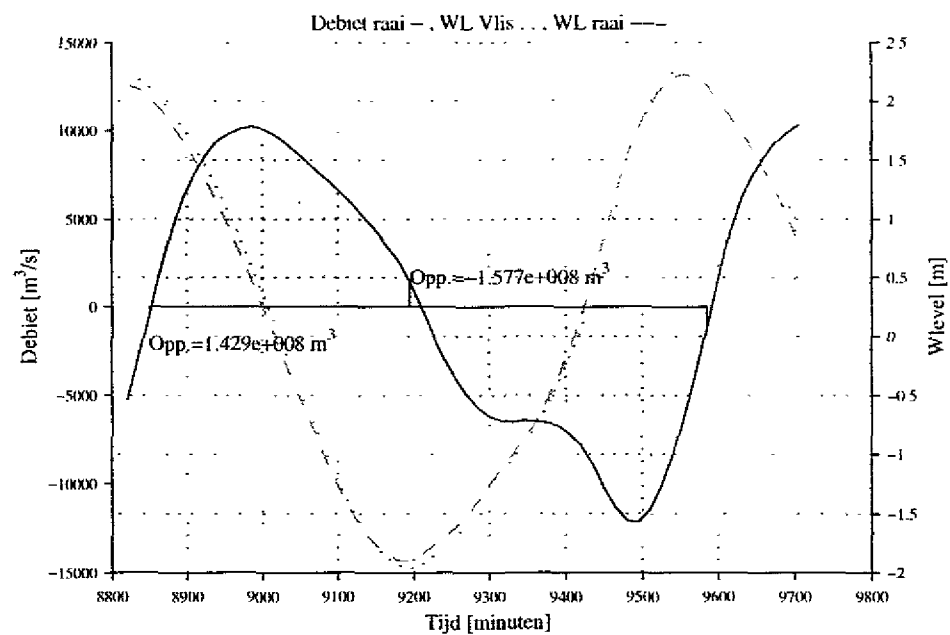
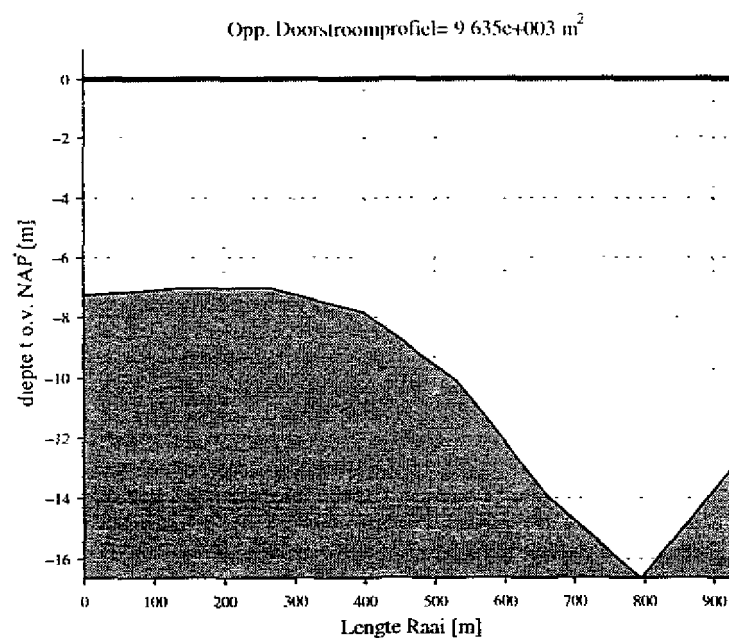
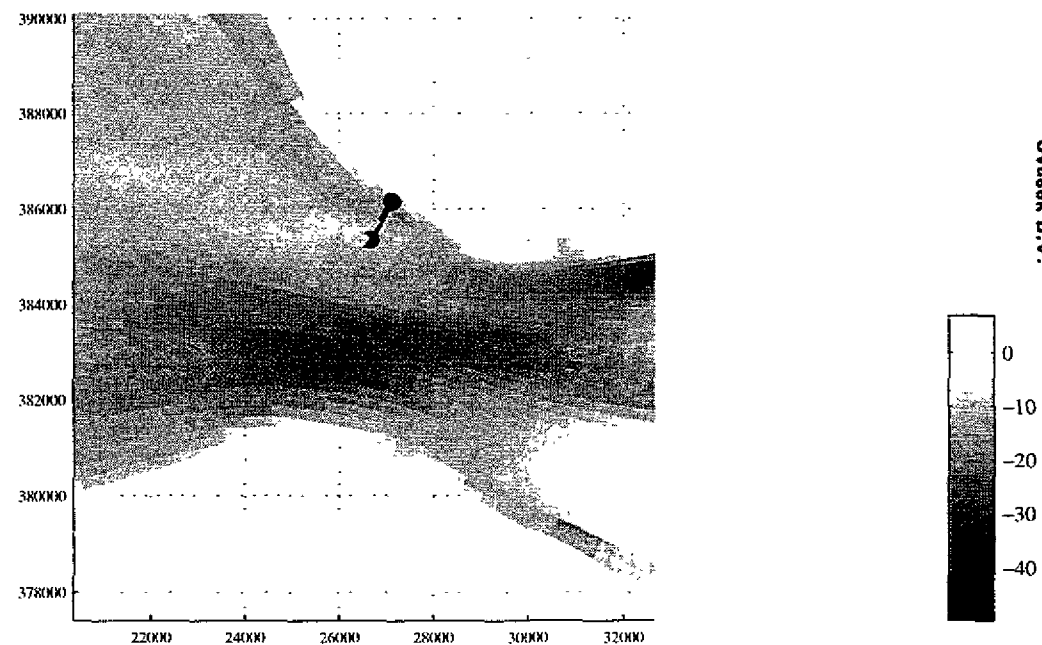
Swaab B.V.

Beginpunt (x,y) [m] = (27134,386155)

Eindpunt (x,y) [m] = (26670,385352)

Lengte Raai= 927 m

Getijverschil Vlissingen= 4.27 m

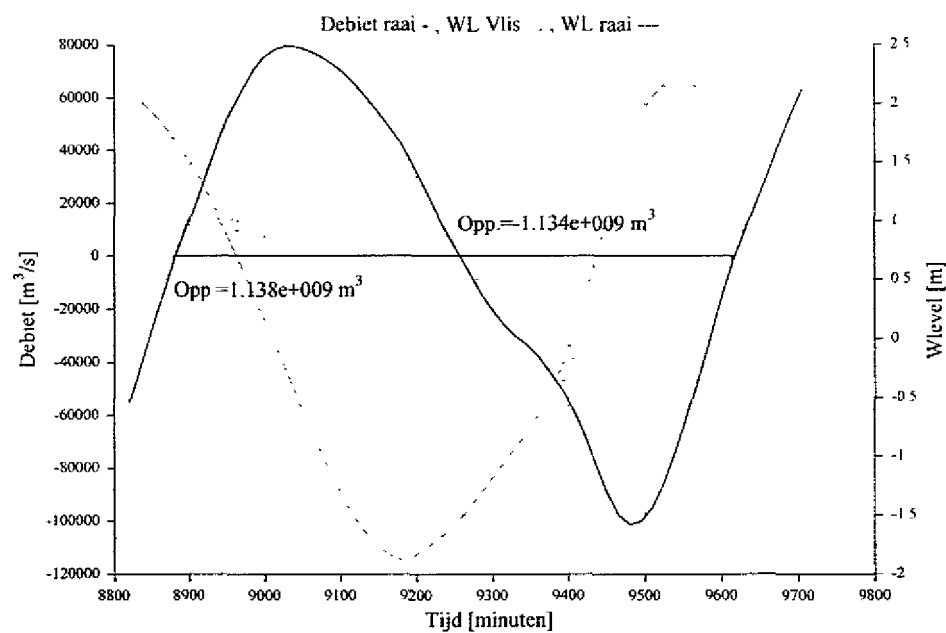
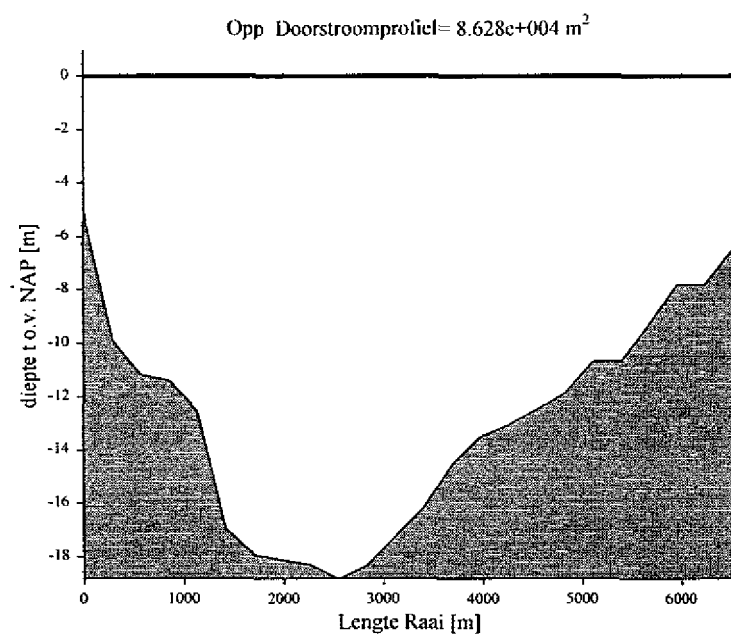
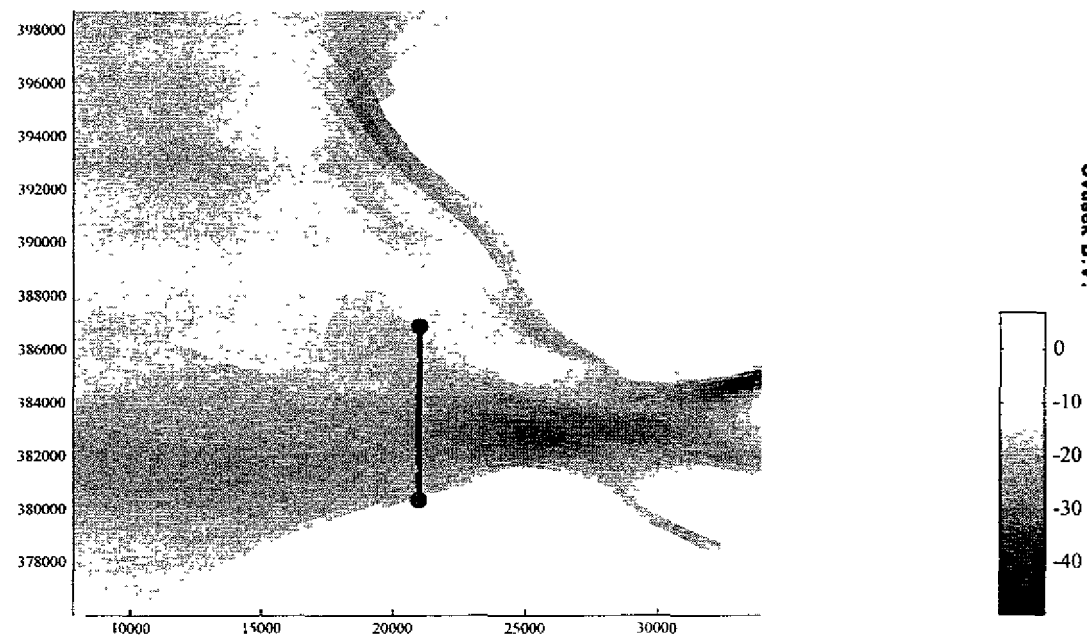


Beginpunt (x,y) [m] = (21000,386900)

Eindpunt (x,y) [m] = (20975,380378)

Lengte Raai= 6522 m

Getijverschil Vlissingen= 4.27 m

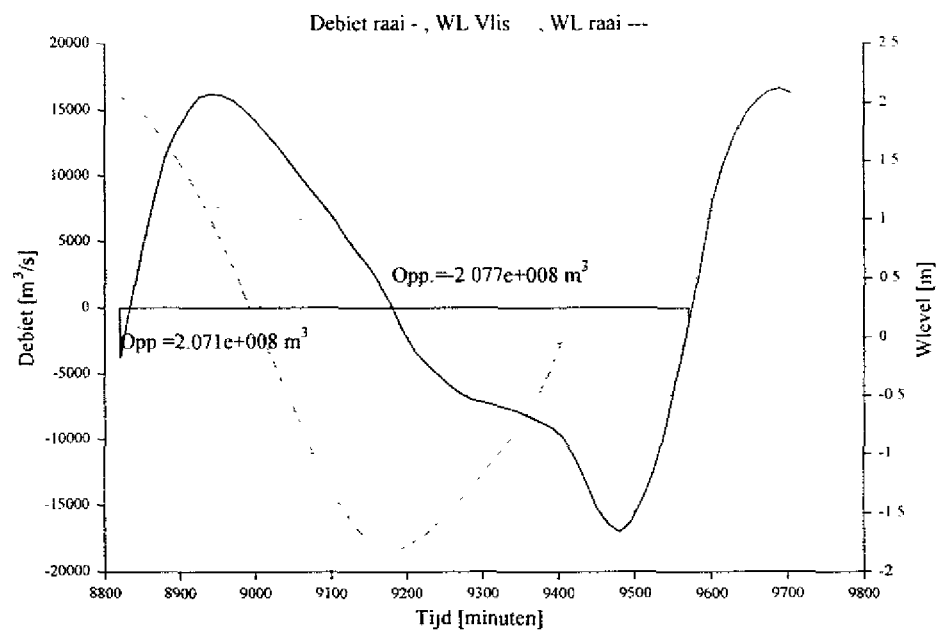
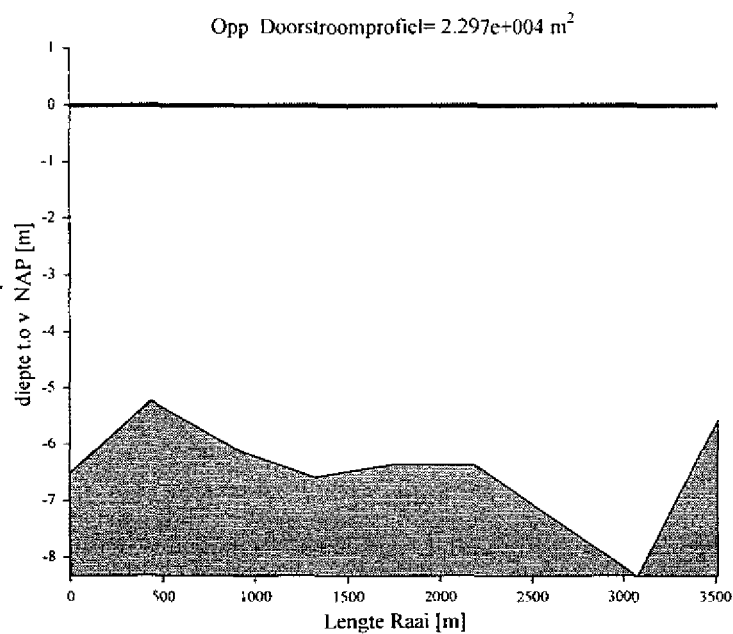
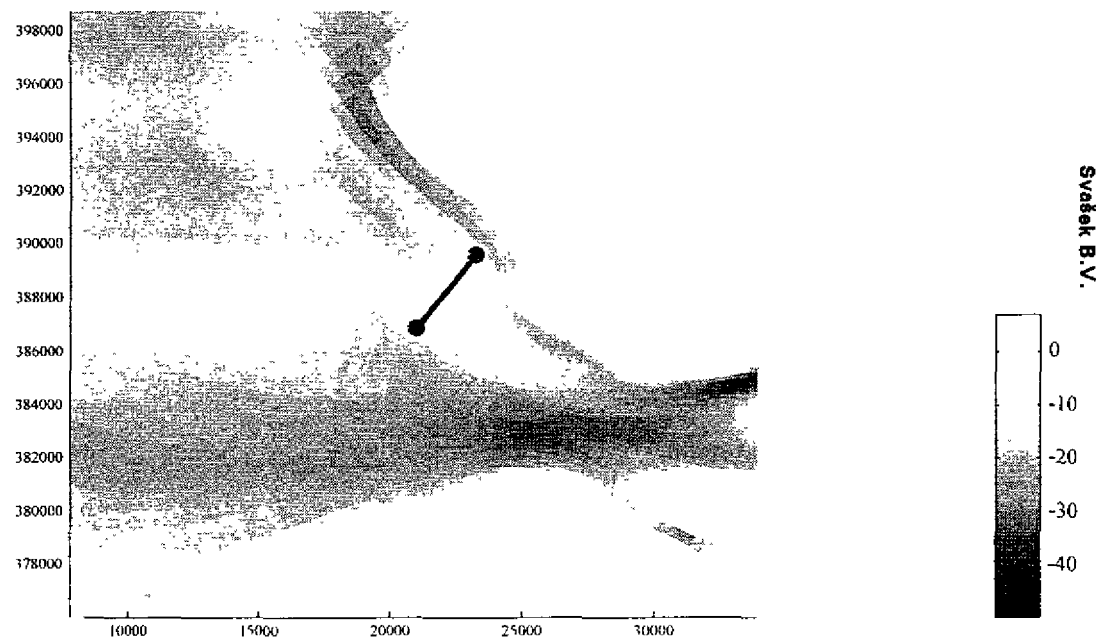


Beginpunt (x,y) [m] = (23250,389600)

Eindpunt (x,y) [m] = (21000,386900)

Lengte Raai= 3515 m

Getijverschil Vlissingen= 4.27 m

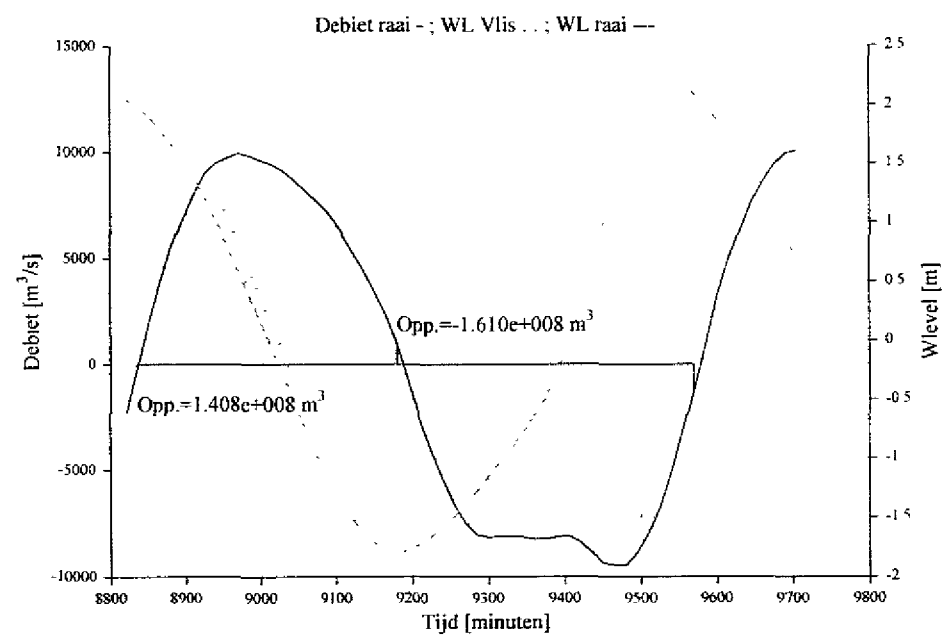
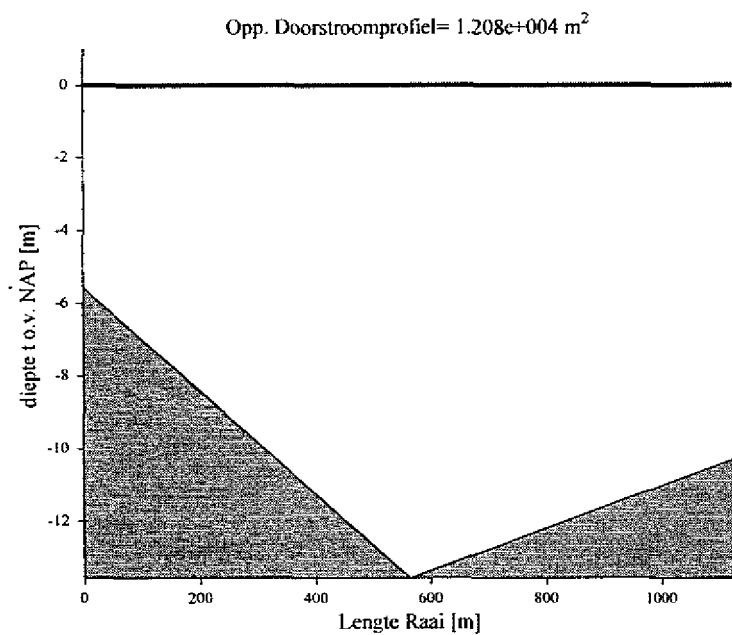
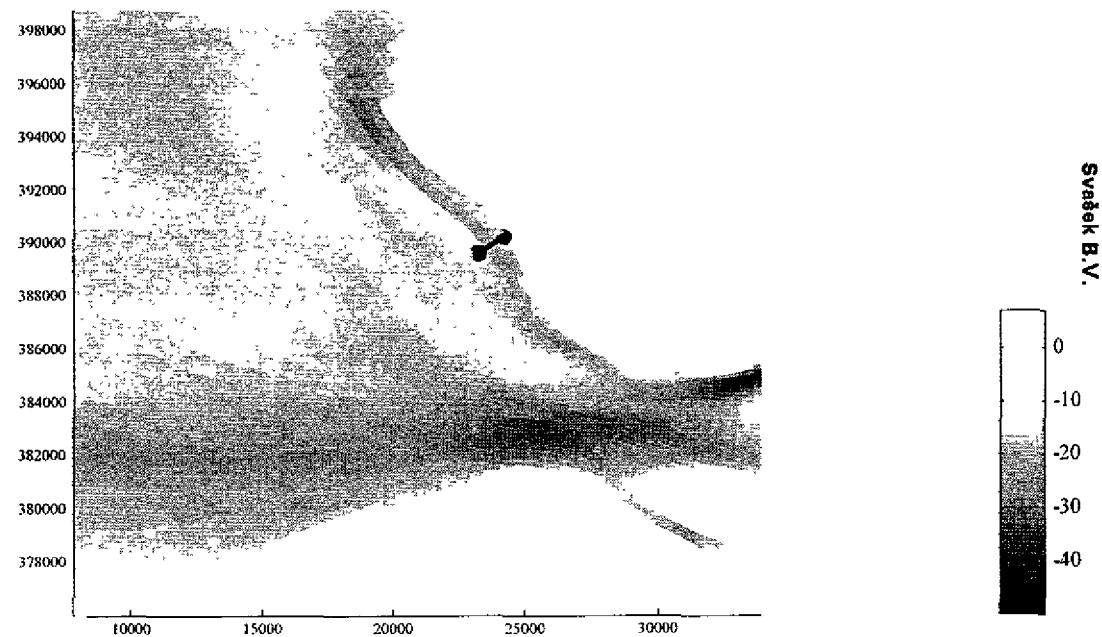


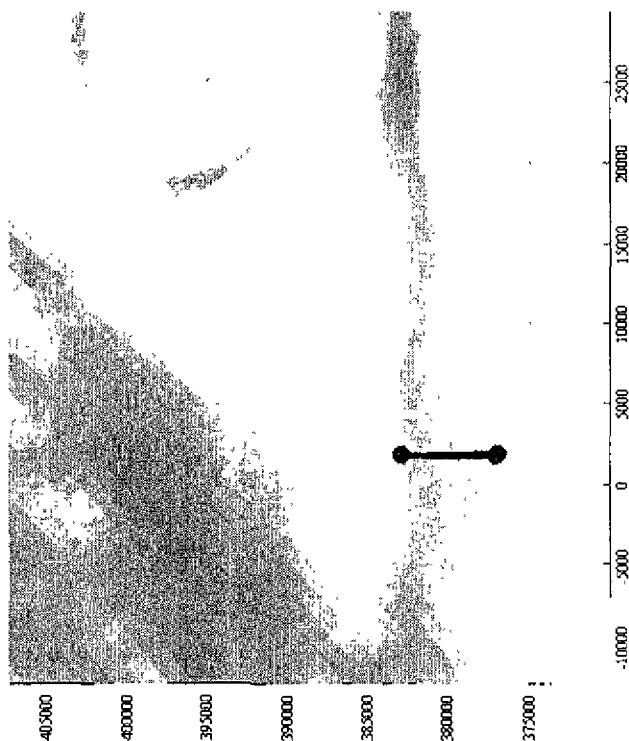
Beginpunt (x,y) [m] = (24185,390227)

Eindpunt (x,y) [m] = (23250,389600)

Lengte Raai= 1126 m

Getijverschil Vlissingen= 4.27 m





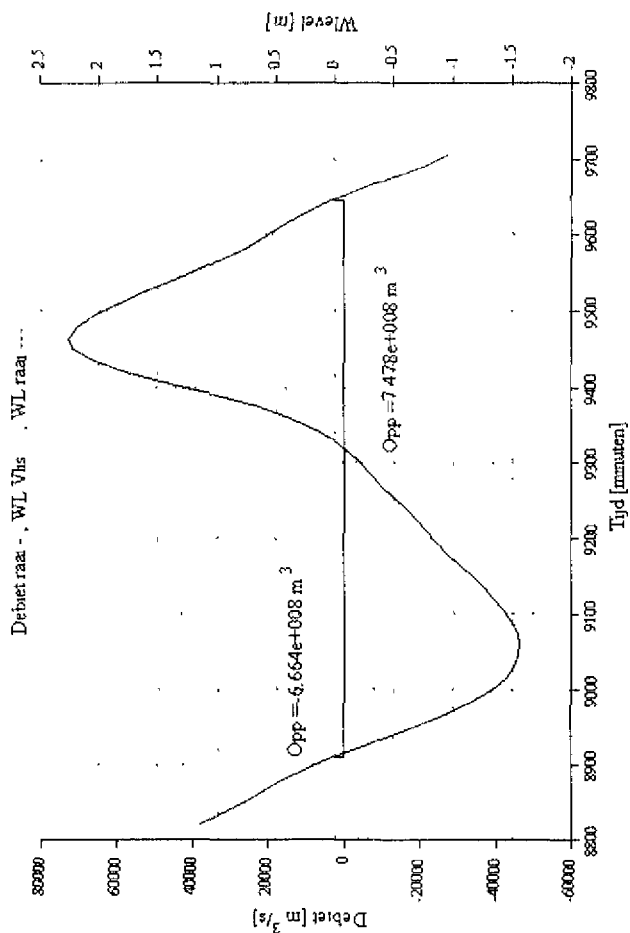
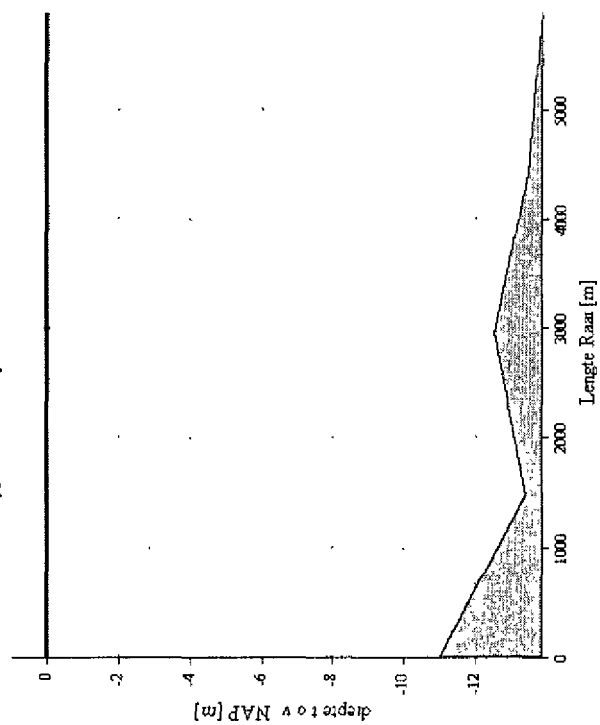
Beginpunt (x,y) [m] = (1834,376970)

Eindpunt (x,y) [m] = (1744,382863)

Lengte Raai= 5894 m

Getijverschil Vliissingen= 4.27 m

Opp. Doorsroonprofiel= 7 657e+004 m²



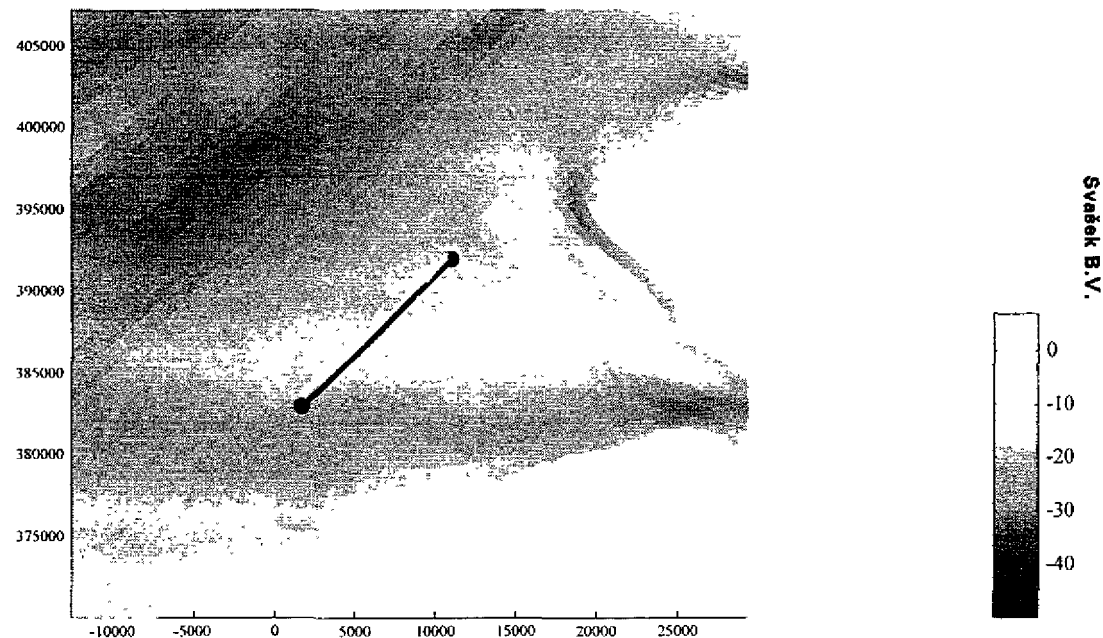
98154/1034

Beginpunt (x,y) [m] = (1731,383000)

Eindpunt (x,y) [m] = (11000,392000)

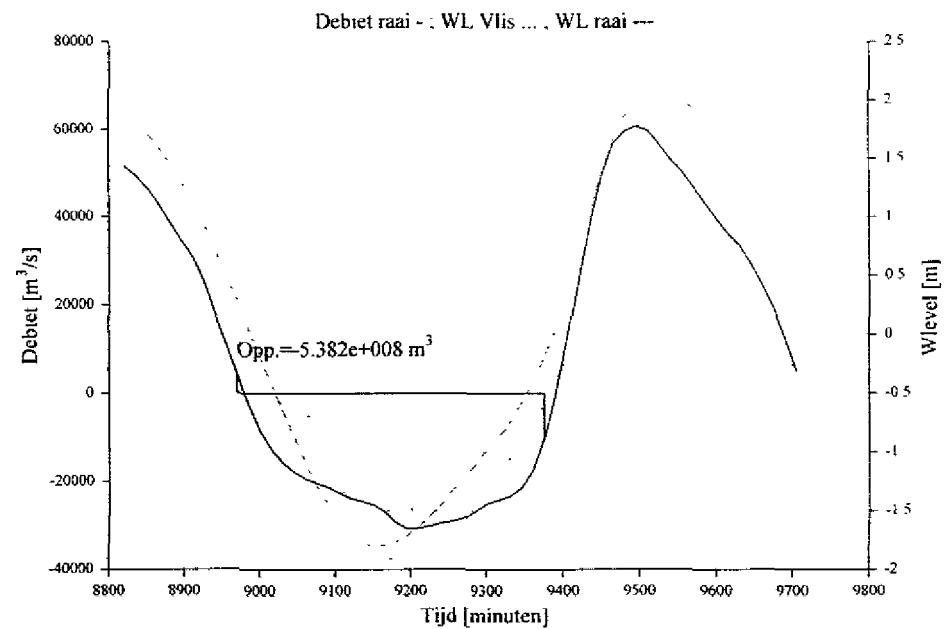
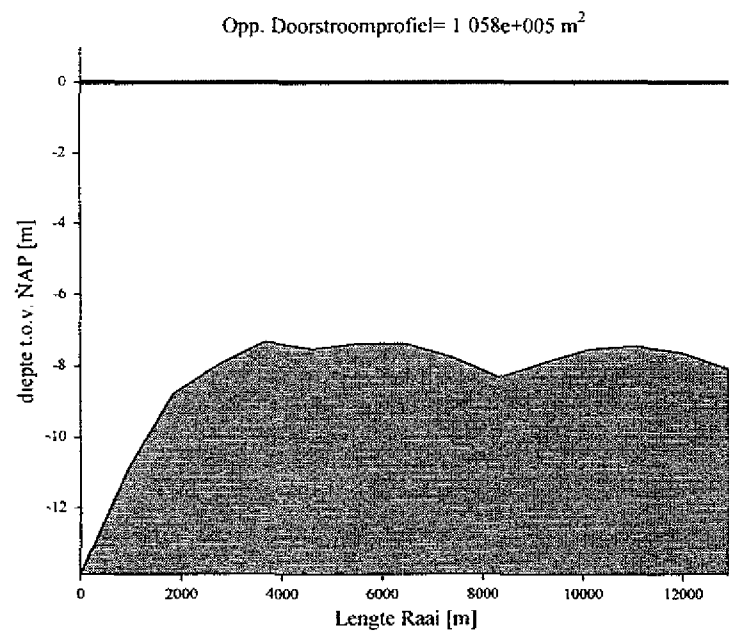
Lengte Raai= 12920 m

Getijverschil Vlissingen= 4.27 m



Bijlage 2.7

20 april 1998



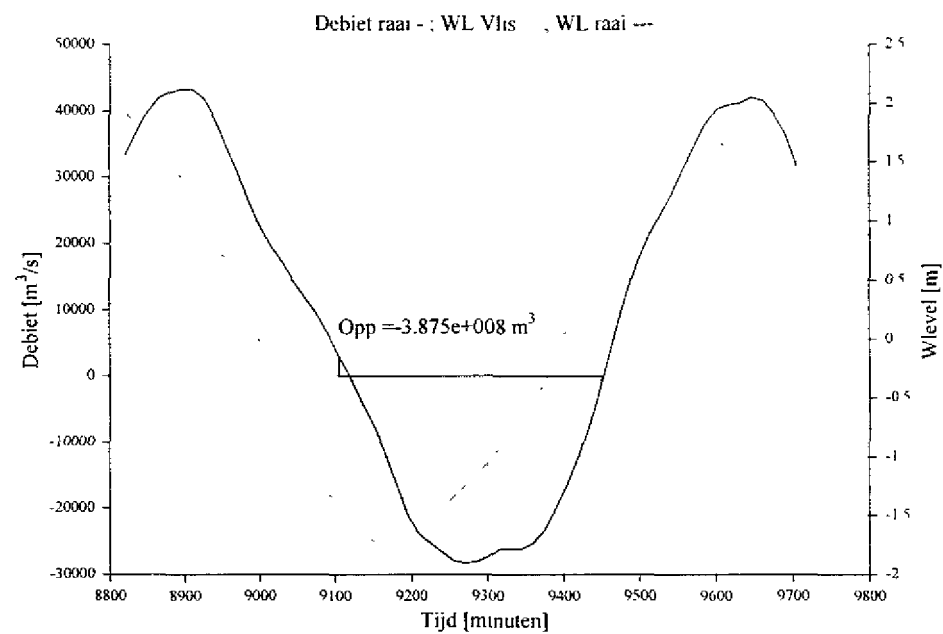
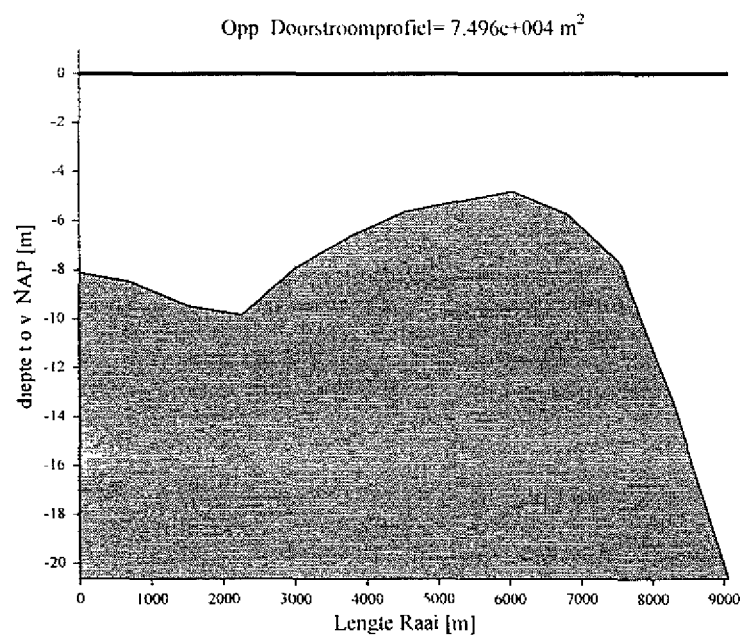
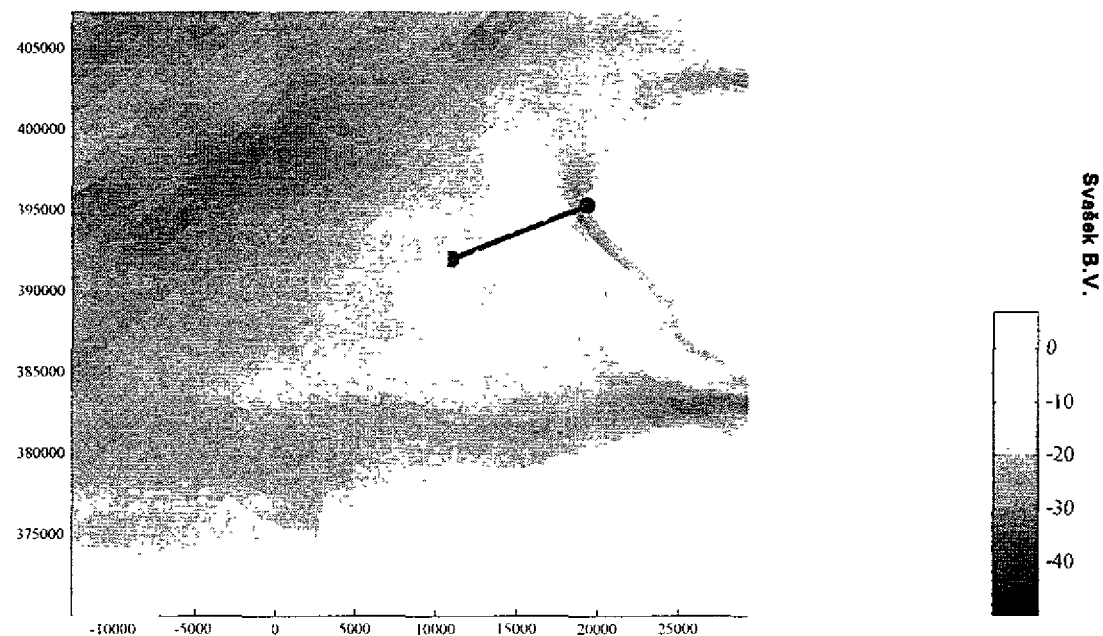
Appendix bij eindrapport getijreconstructie Westerscheldemonnd

Beginpunt (x,y) [m] = (11000,392000)

Eindpunt (x,y) [m] = (19437,395317)

Lengte Raai= 9066 m

Getijverschil Vlissingen= 4.27 m

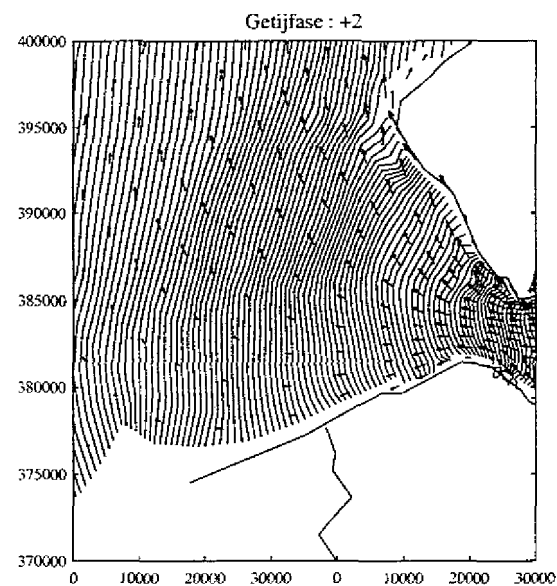
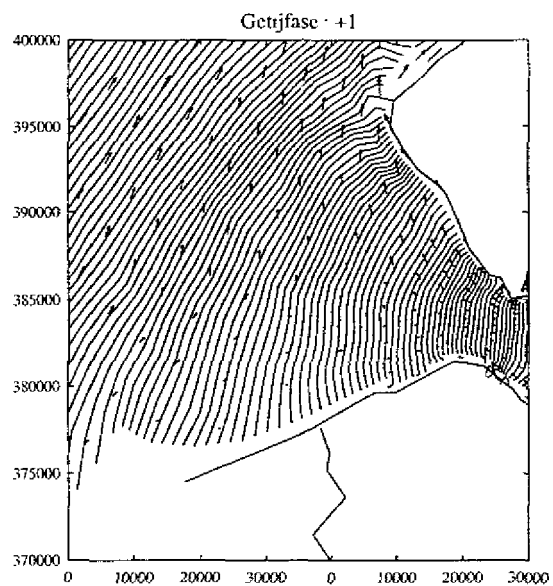
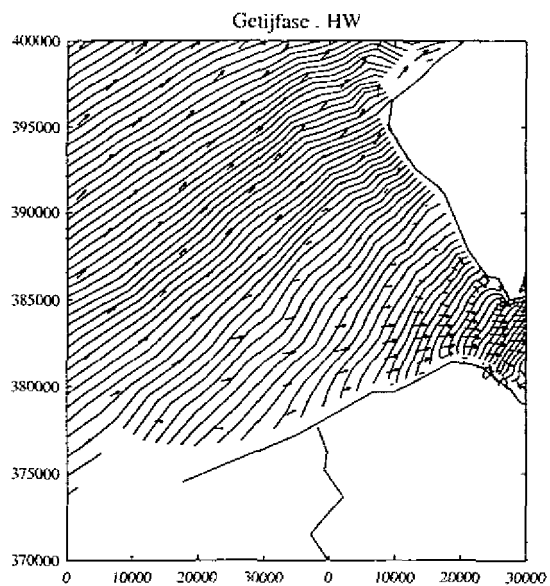


Bijlage 3 Stroomsnelheden en waterstanden tijdens een getijperiode

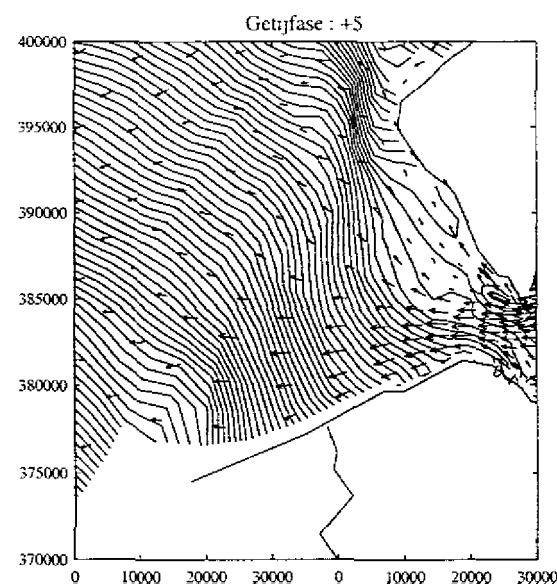
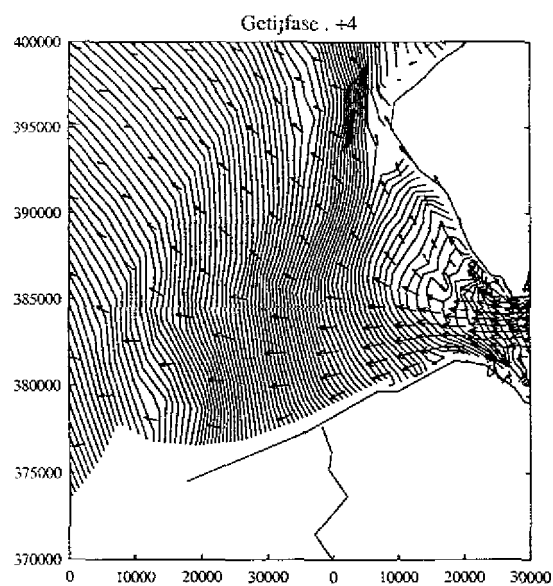
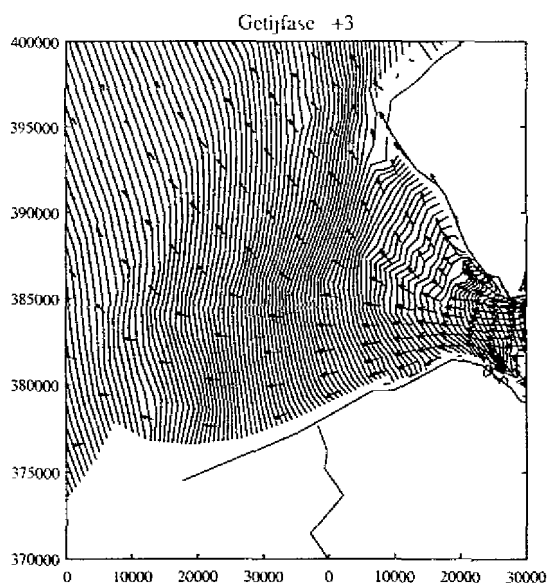
In deze bijlage worden voor een aantal berekeningen de snelheden en isolijnen van waterstanden gepresenteerd voor een gehele getijperiode met tijdstappen van een uur. Voor de niet gepresenteerde berekeningen waren de verschillen met de basisberekening over het algemeen te klein om waar te kunnen nemen.

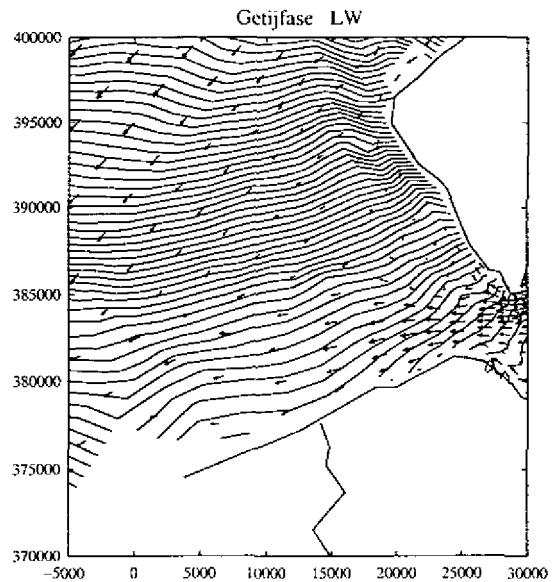
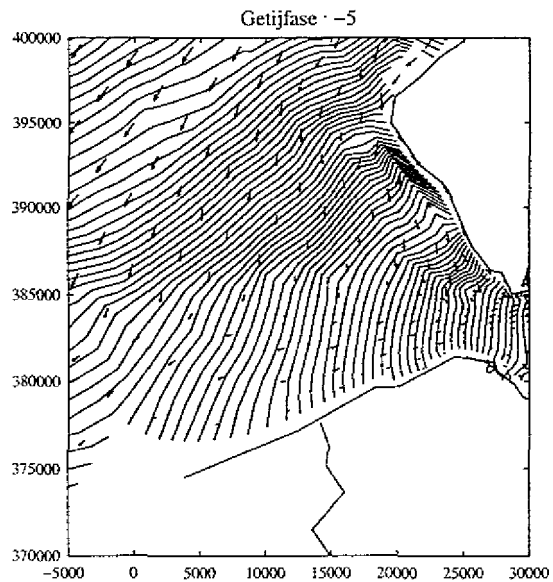
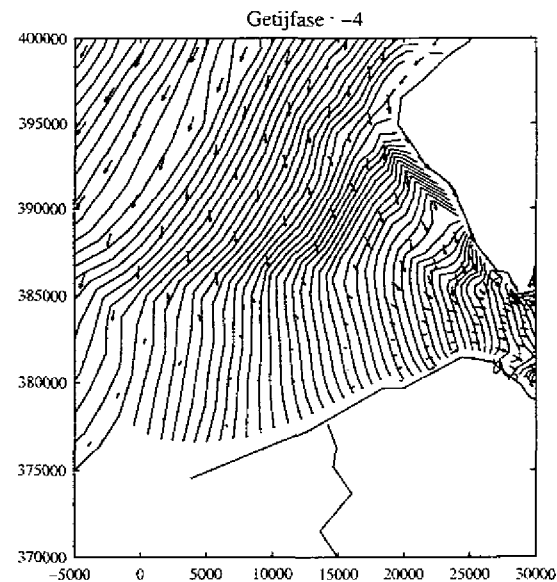
Deze bijlage is als volgt opgebouwd:

- Bijlage 3.1 referentie berekening
- Bijlage 3.2 variant: springtij
- Bijlage 3.3 variant: afgevlakt mondingsgebied
- Bijlage 3.4 variant: afgevlakt Oostgat/Deurloo
- Bijlage 3.5 variant: gecorrigeerd op snelheden afgevlakt Oostgat/Deurloo
- Bijlage 3.6 variant: opgelegde stroomrichting in de hals
- Bijlage 3.7 variant: afgevlakt mondingsgebied en opgelegde stroomrichting in de hals

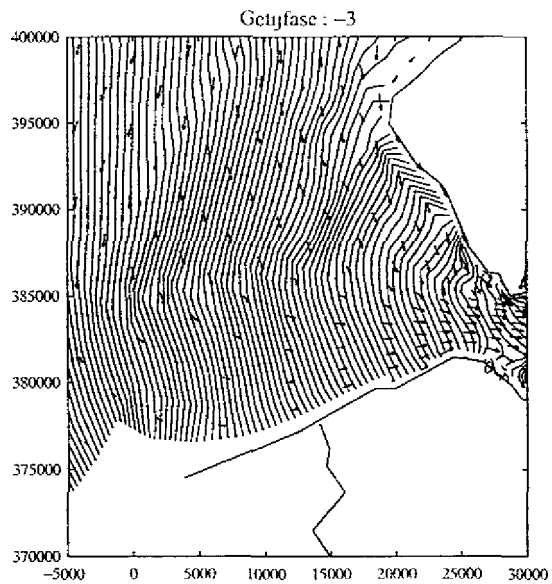
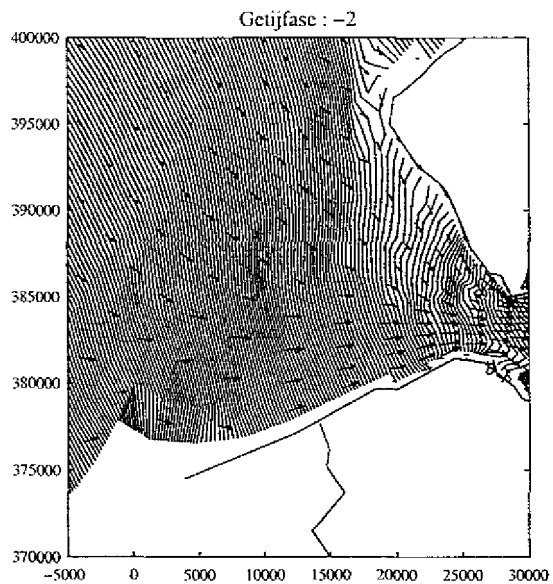
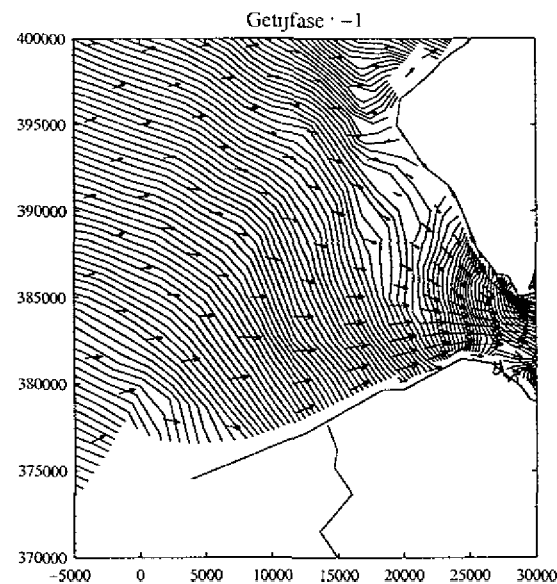


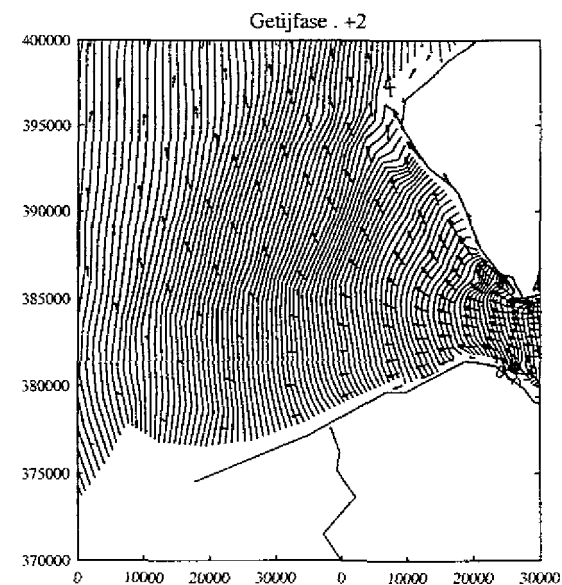
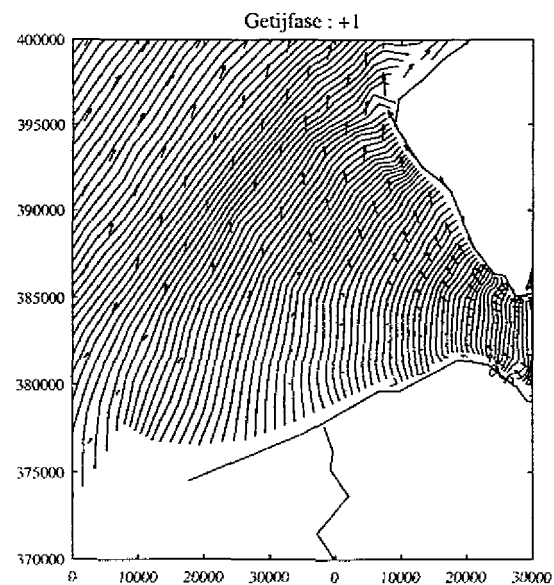
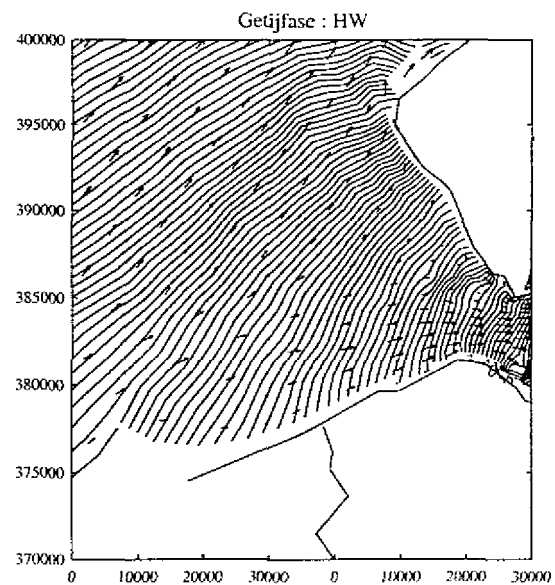
Referentie berekening, Ebperiode



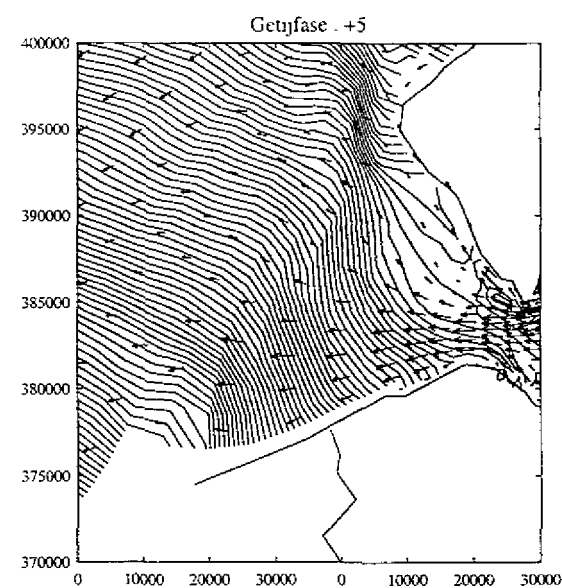
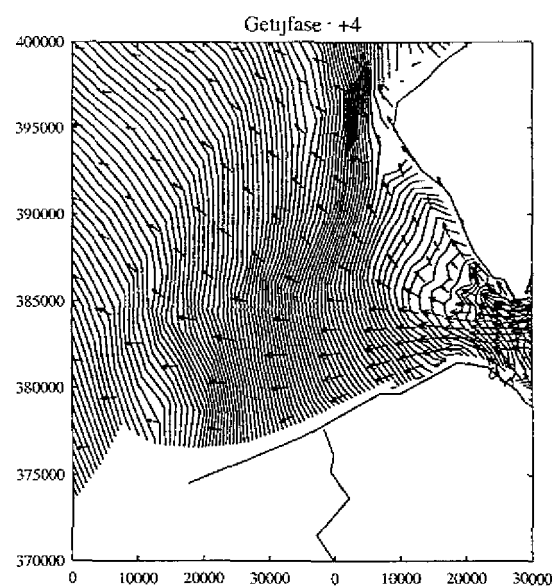
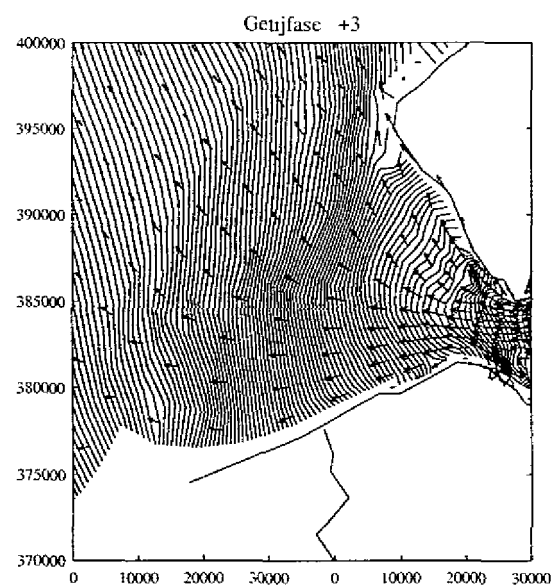


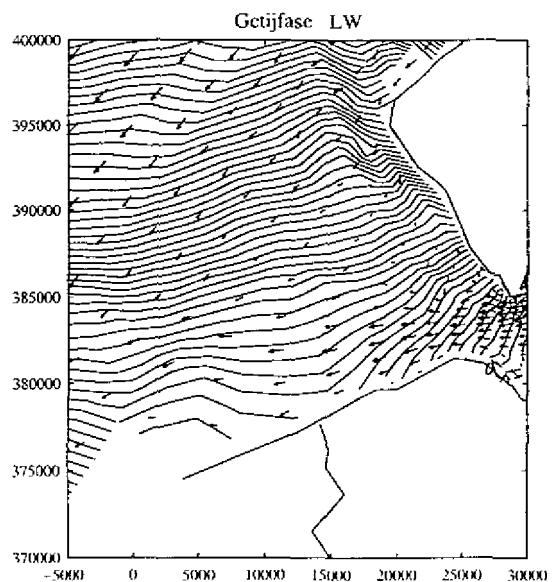
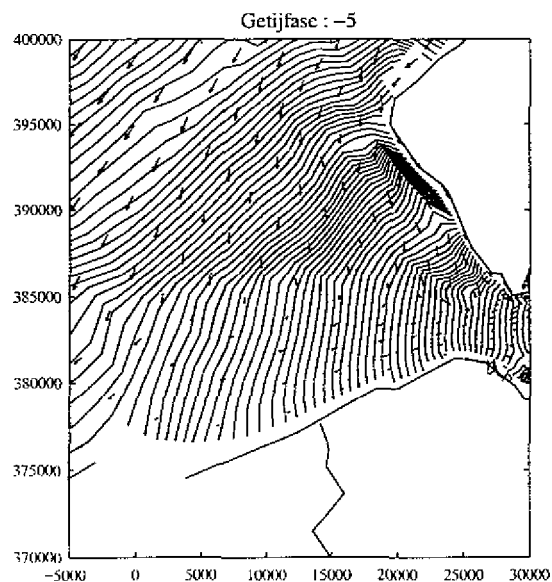
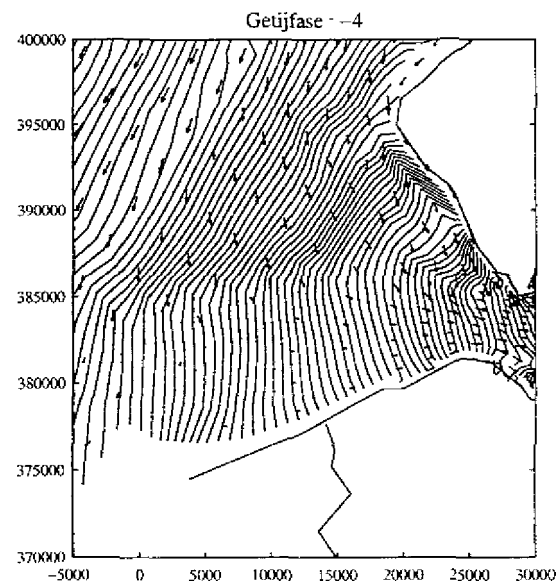
Referentie berekening, vloedperiode



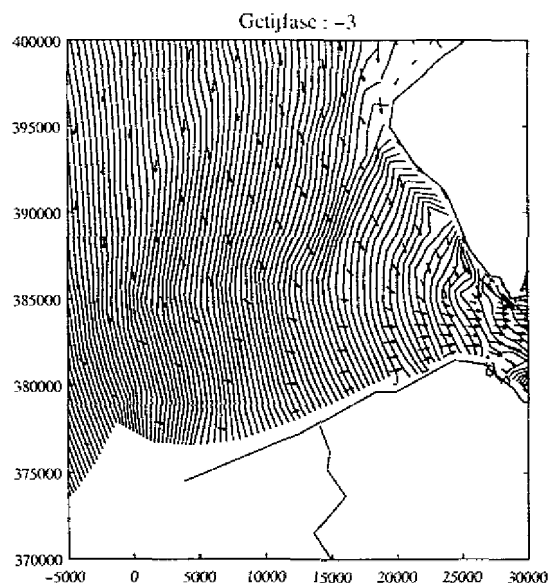
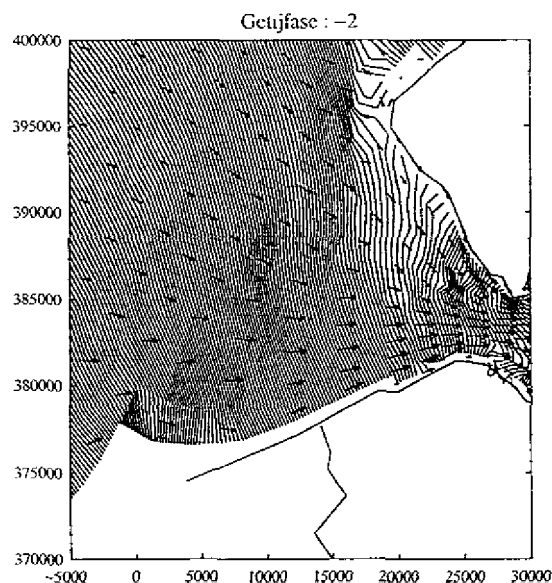
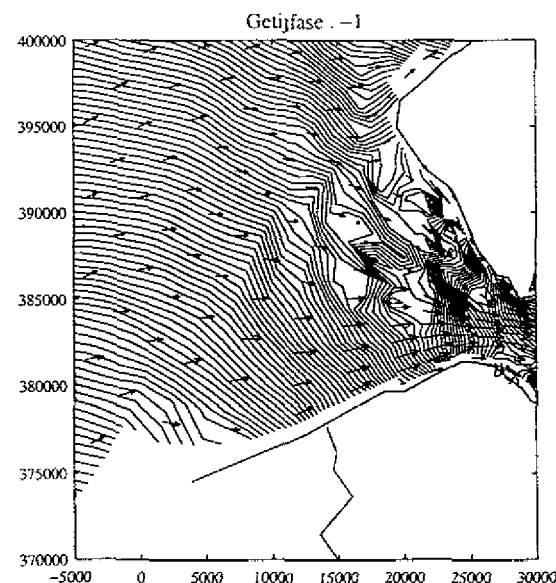


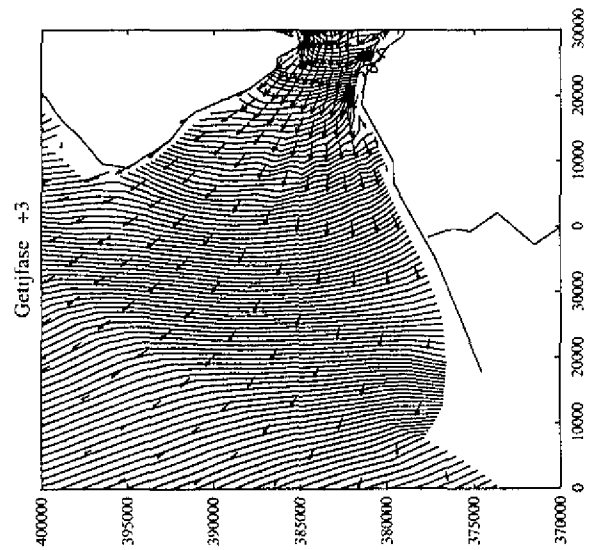
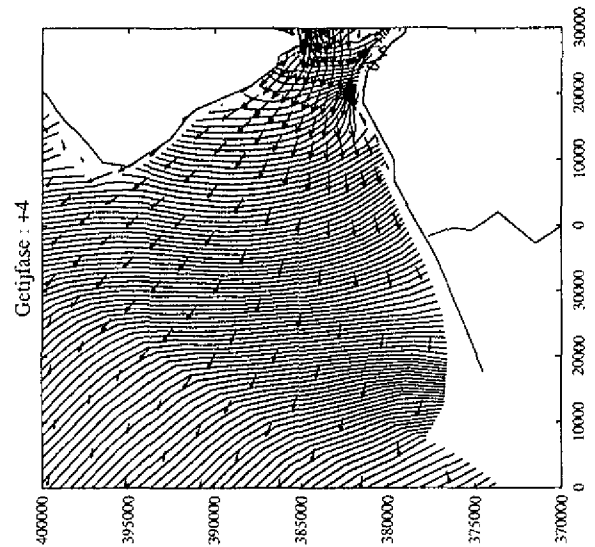
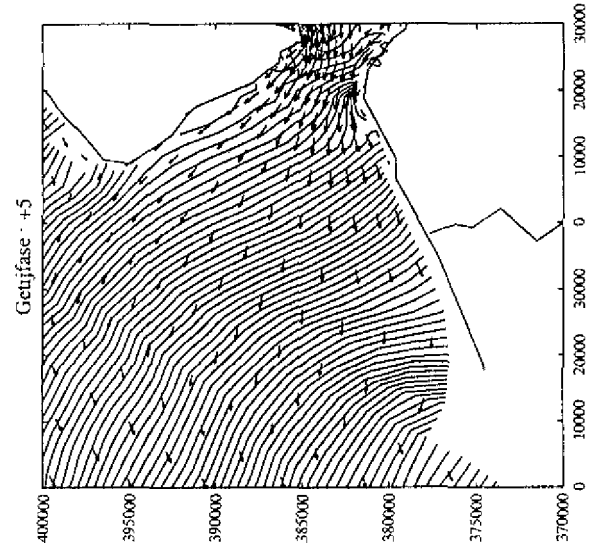
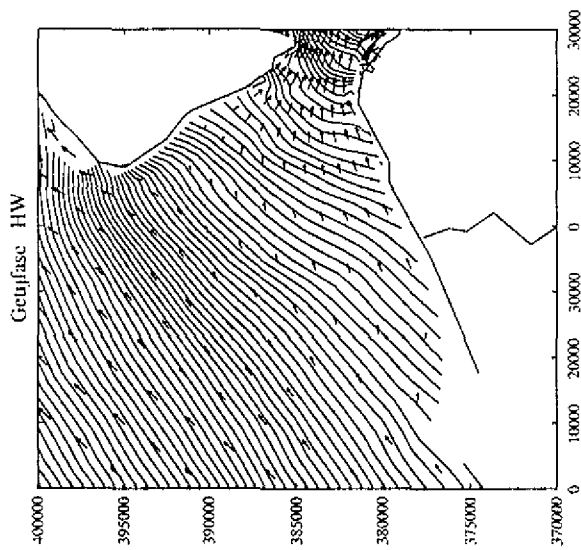
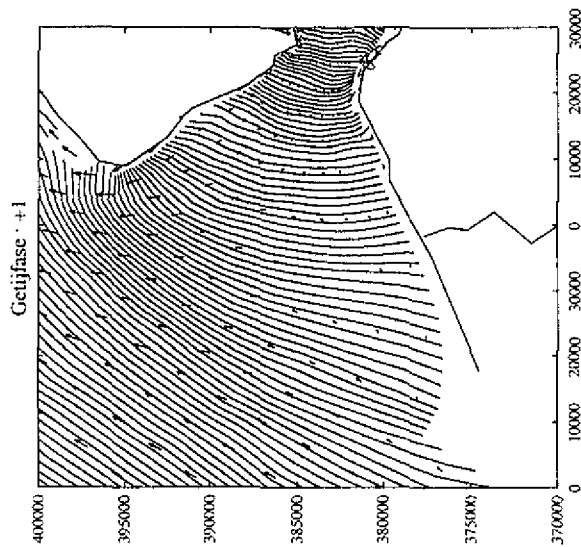
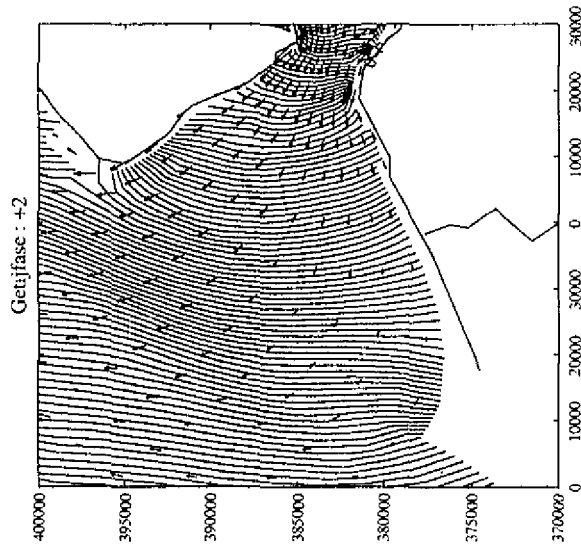
Variant: Springtij, Ebperiode



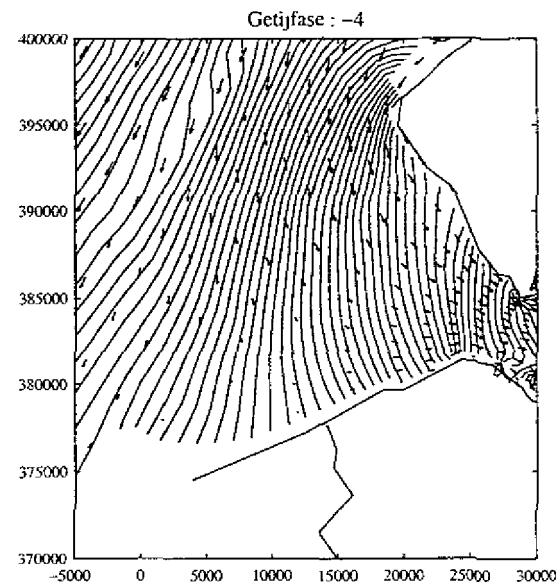
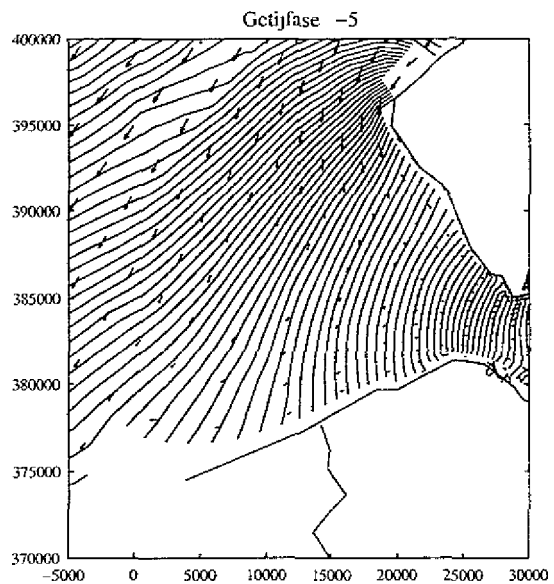
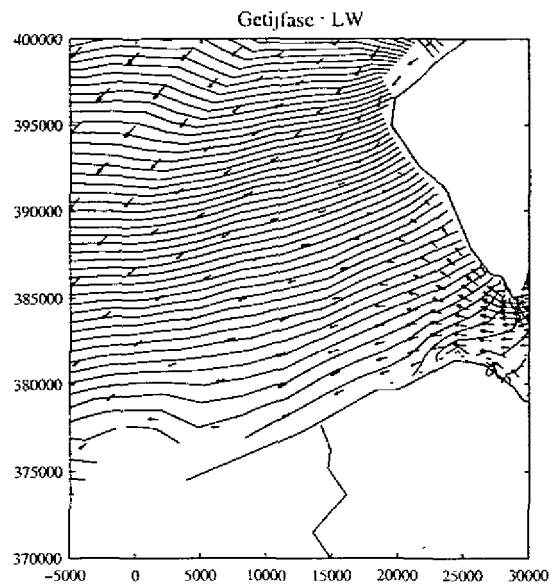


Variant: Springtij, vloedperiode

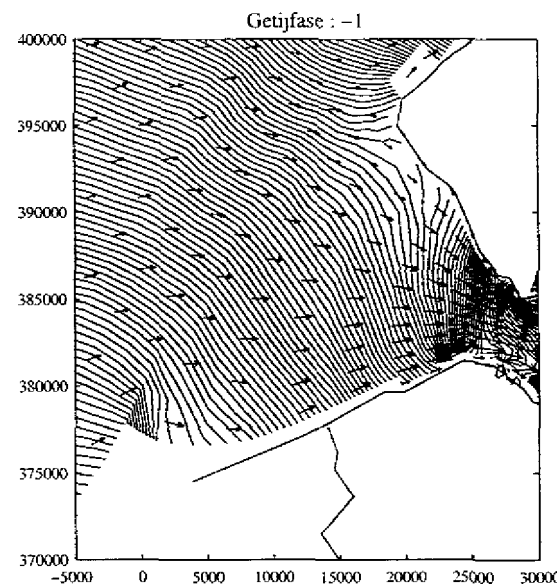
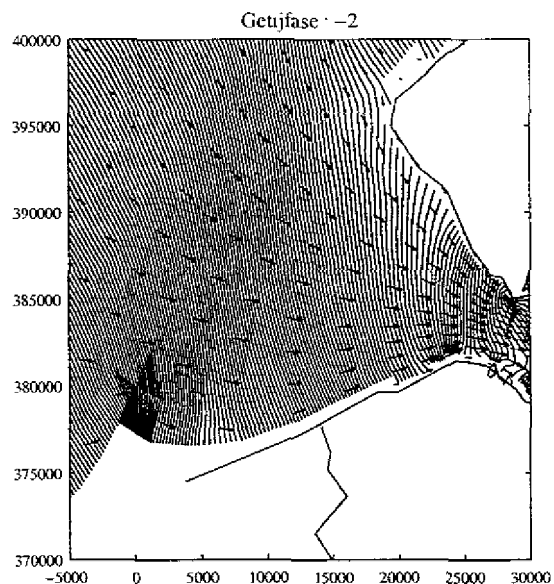
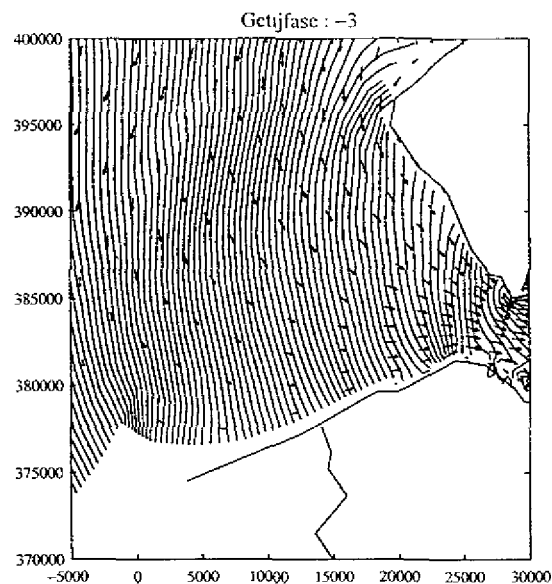


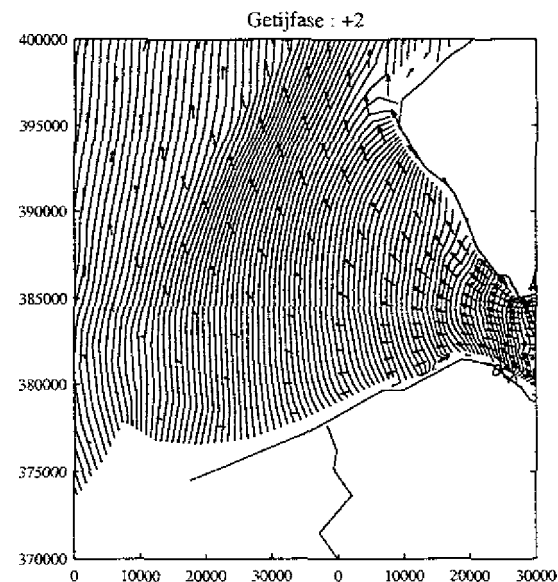
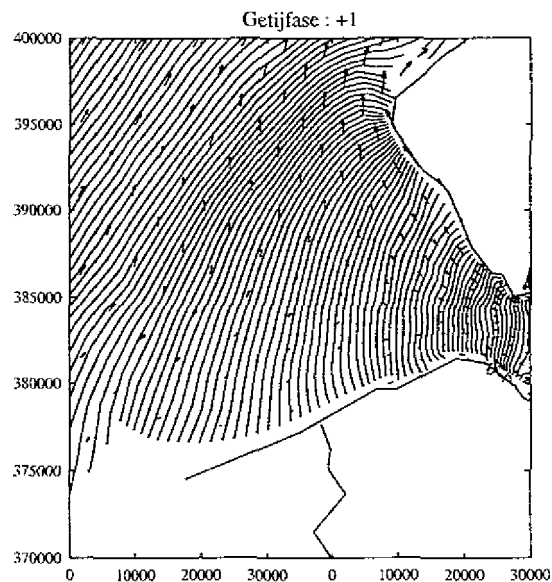
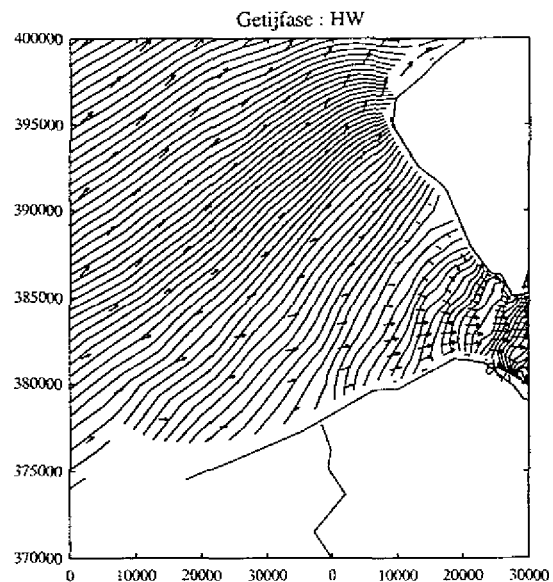


Variant: Afgevlakt Mondingsgebied, Ebperiode

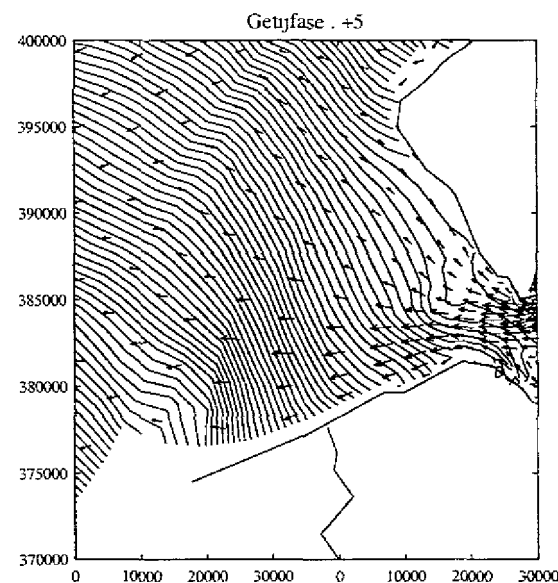
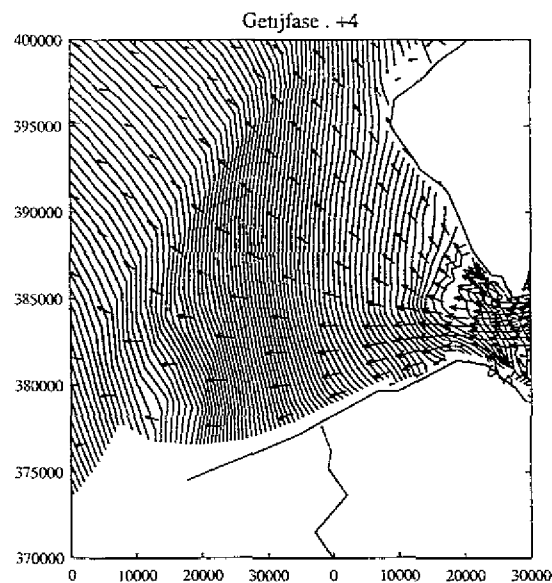
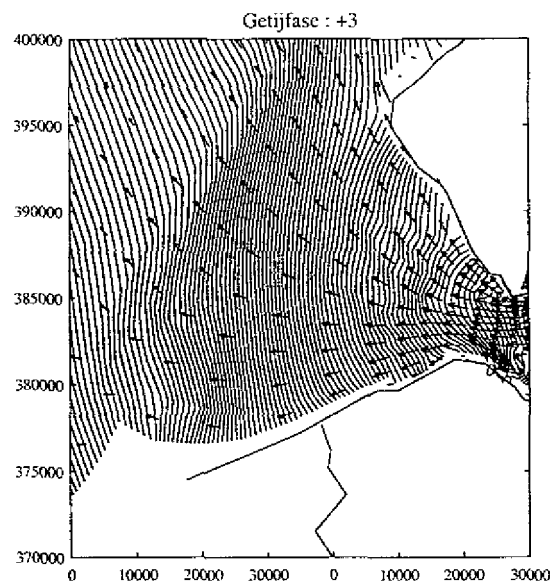


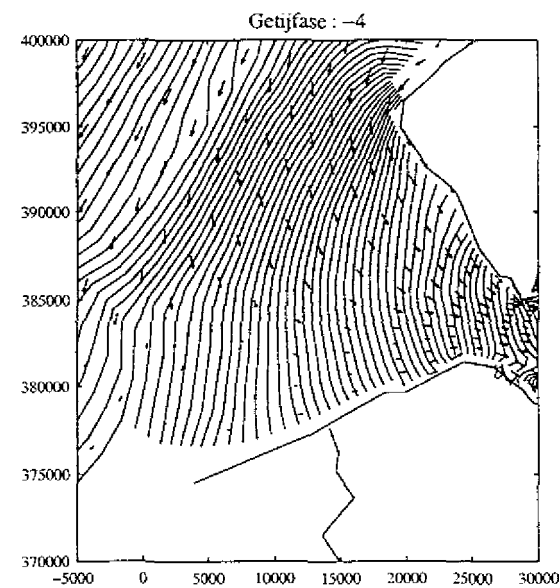
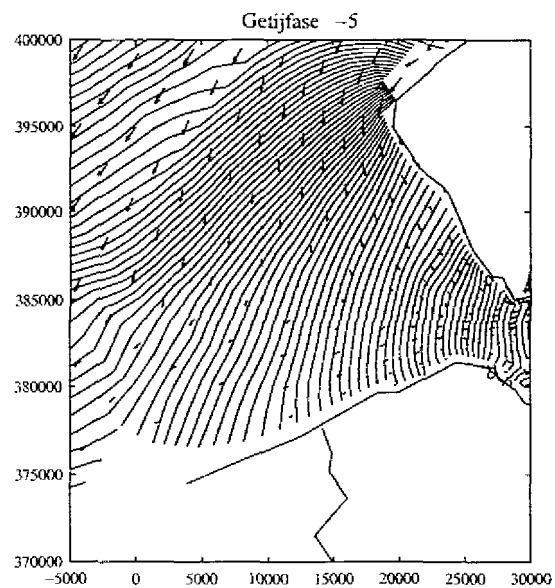
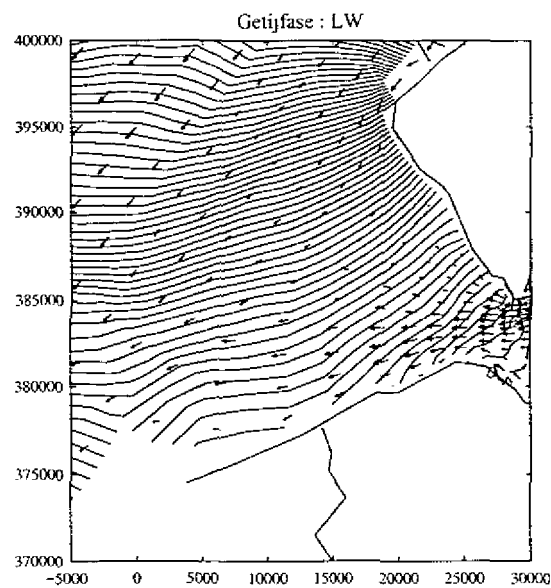
Variant: Afgevlakt Mondingsgebied, vloedperiode



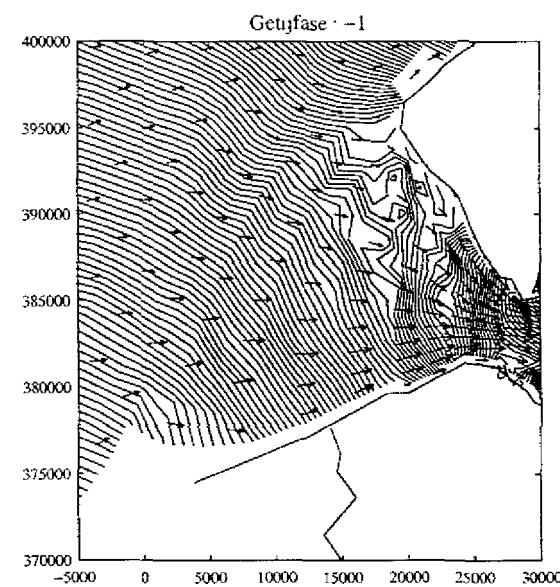
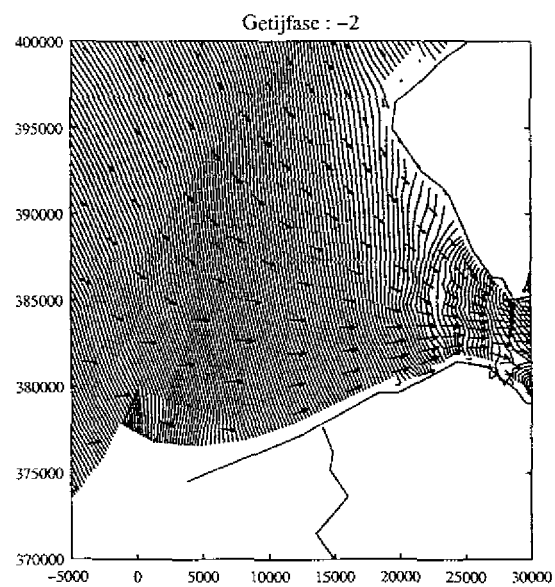
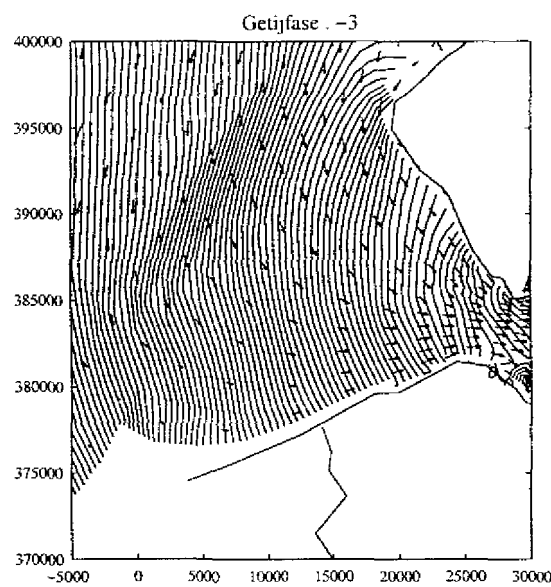


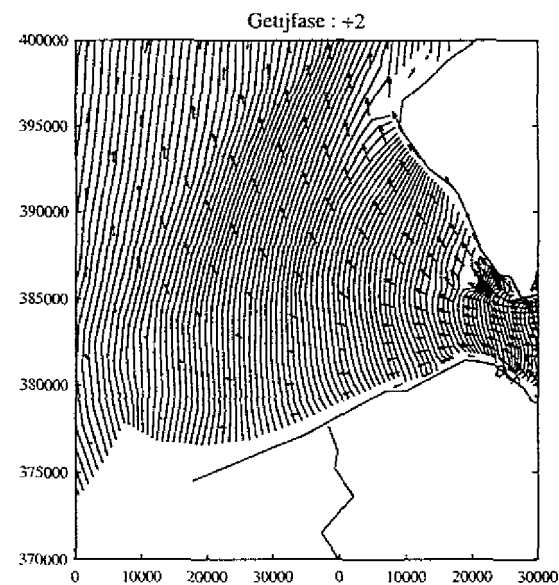
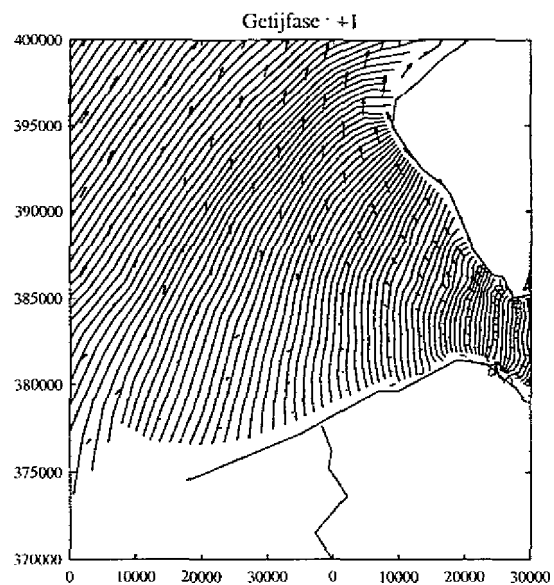
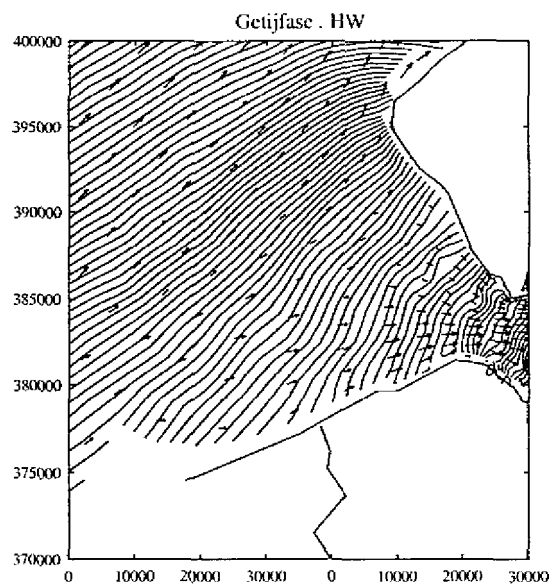
Variant: Afgevlakt Oostgat/Deurloo, Ebperiode



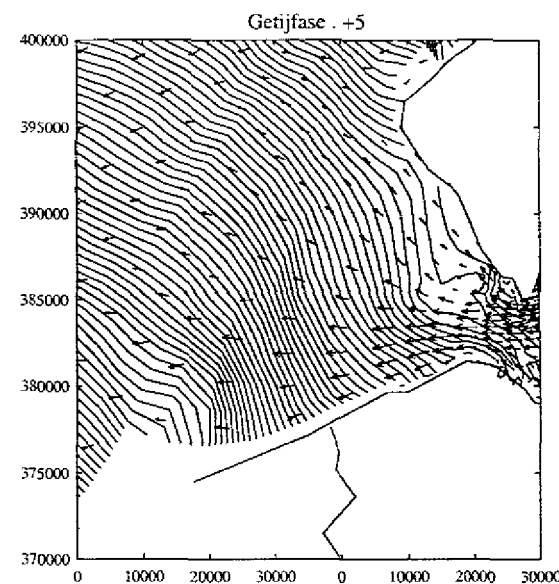
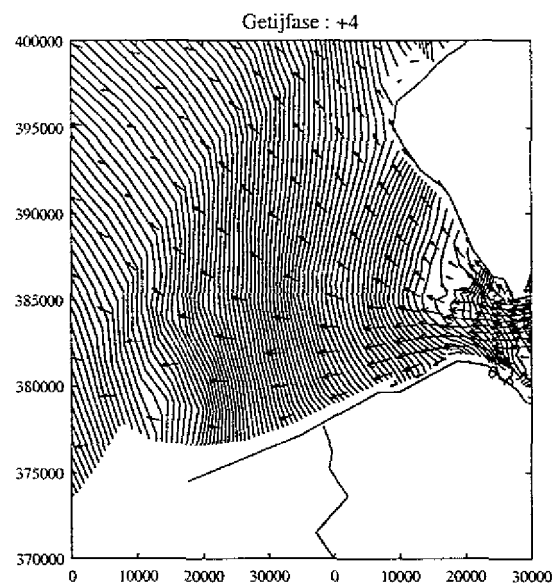
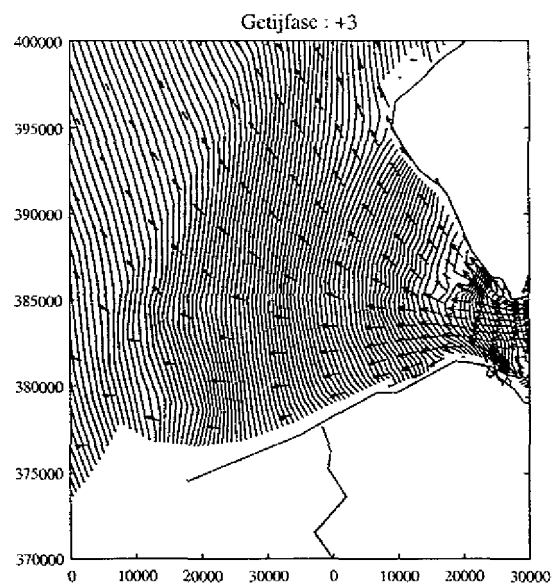


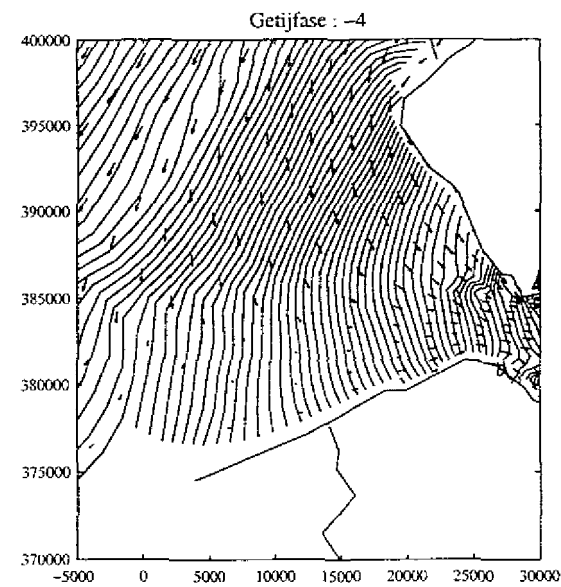
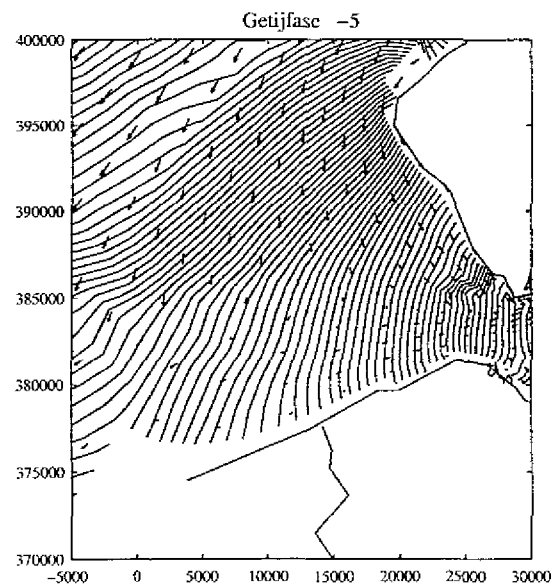
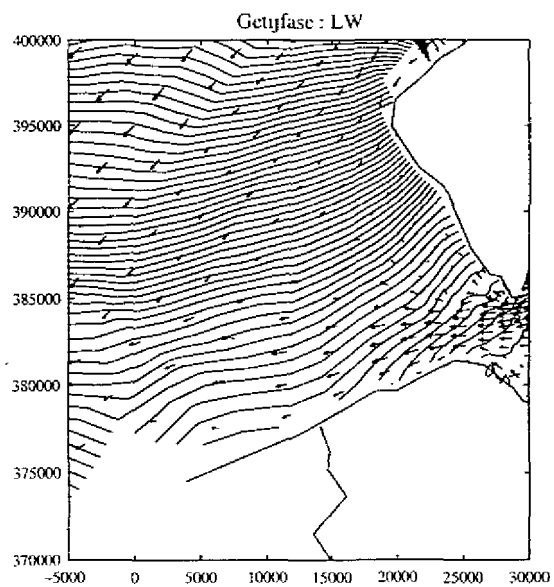
Variant: Afgevlakt Oostgat/Deurloo, vloedperiode



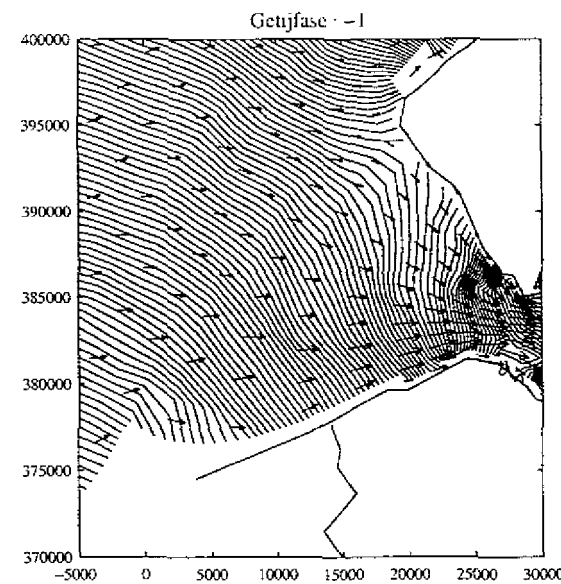
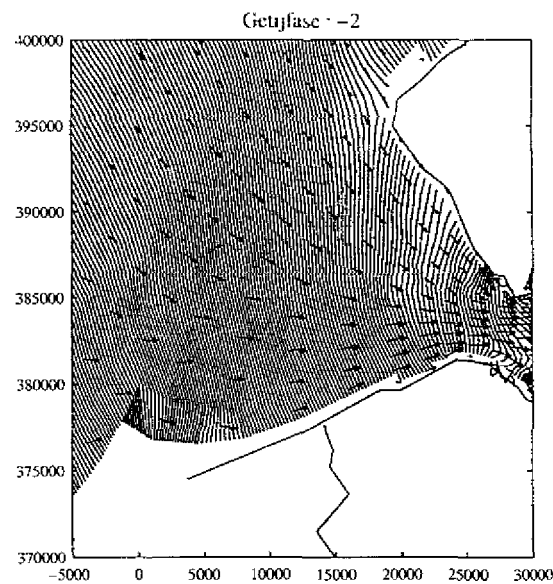
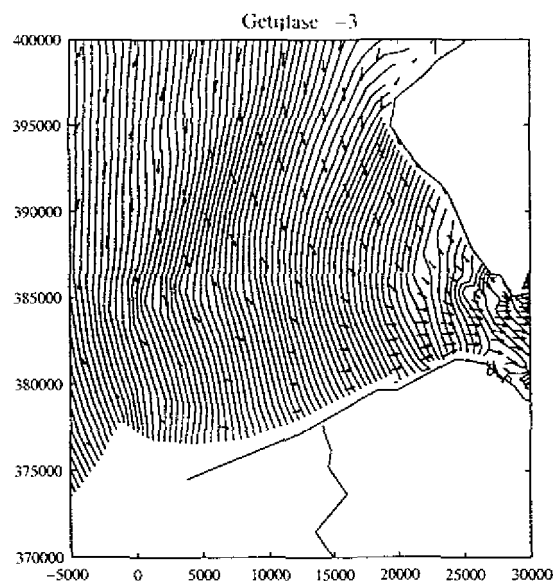


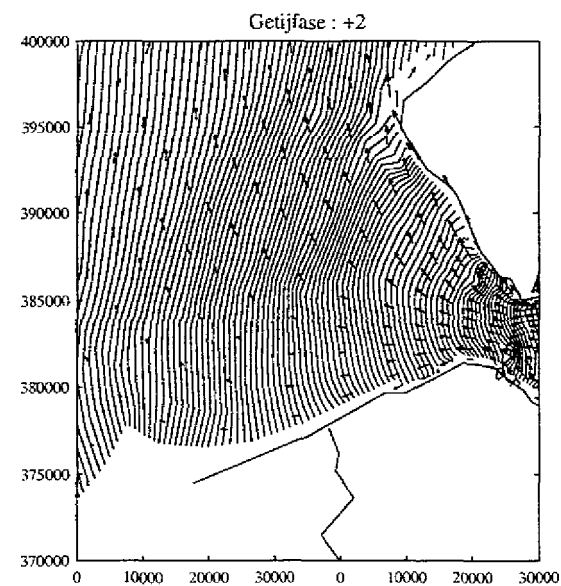
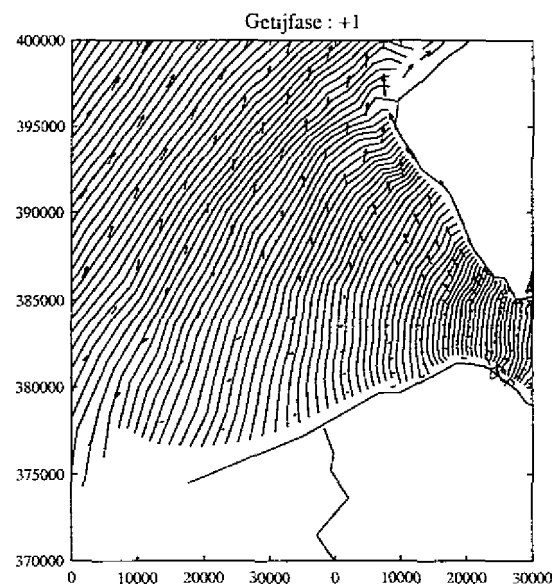
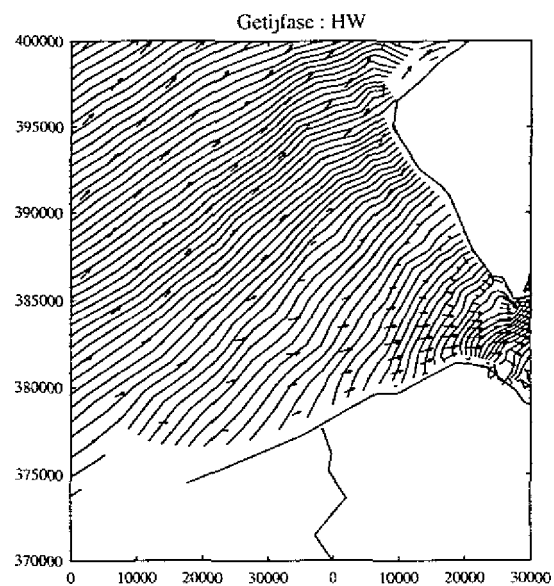
Variant: Gecorr. op snelh Afgvl. Oostgat/Deurloo, Ebperiode



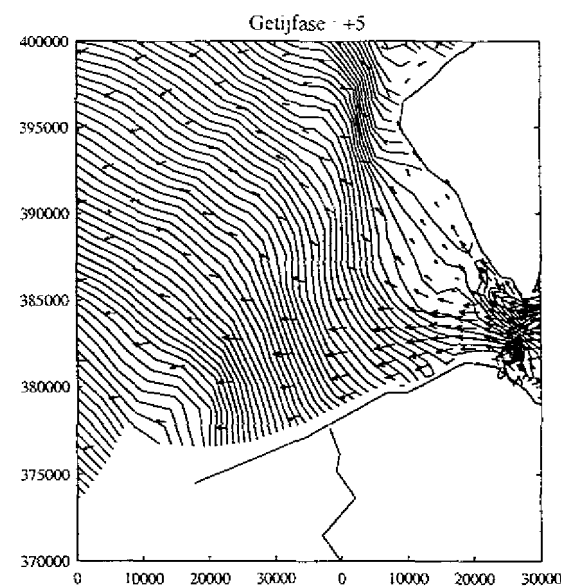
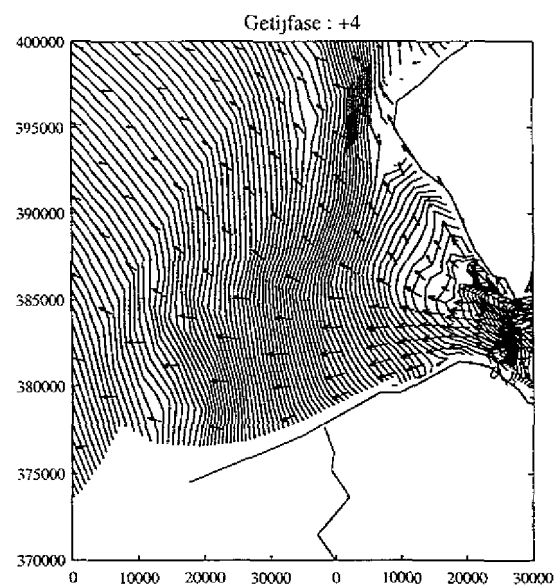
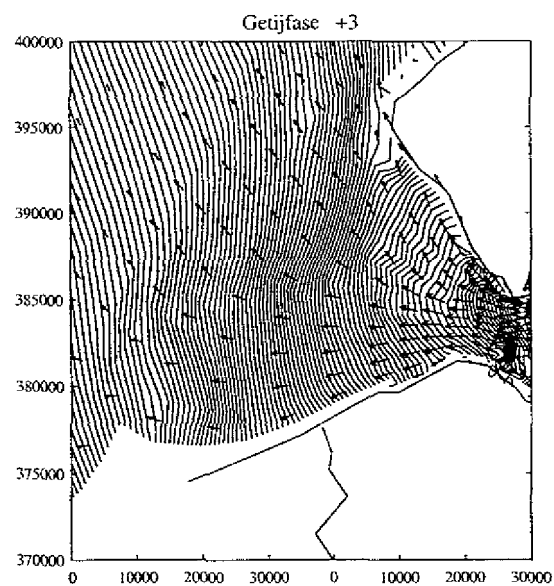


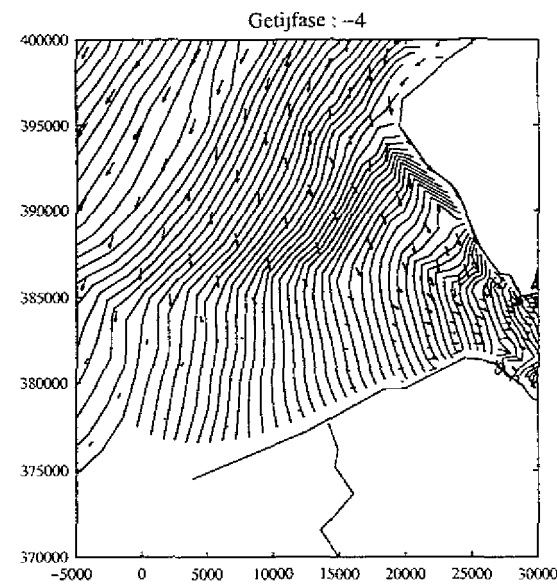
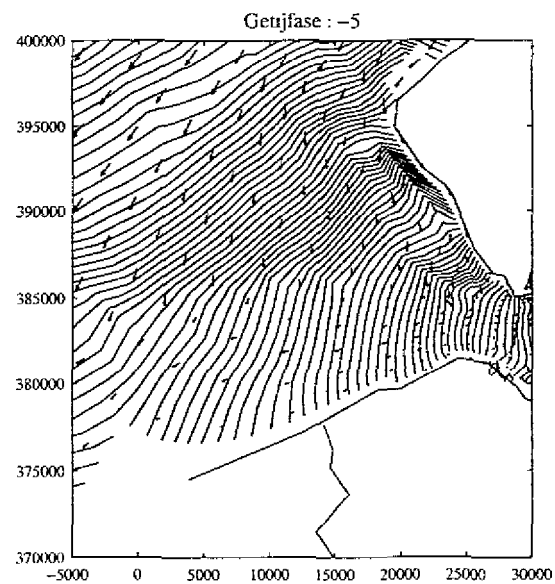
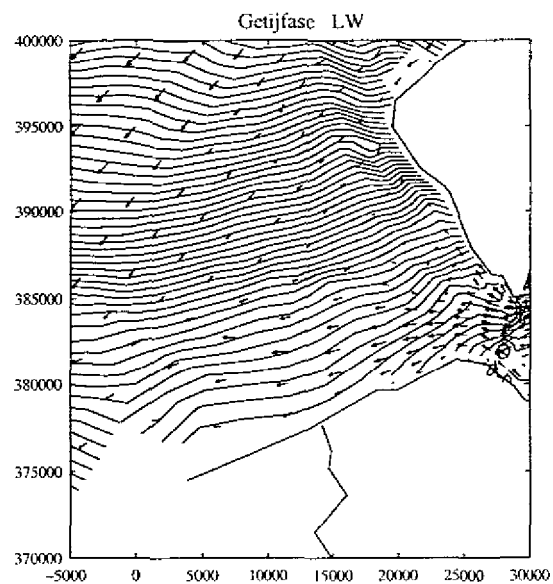
Variant: Gecorr. op snelh Afgvl. Oostgat/Deurloo, vloedperiode



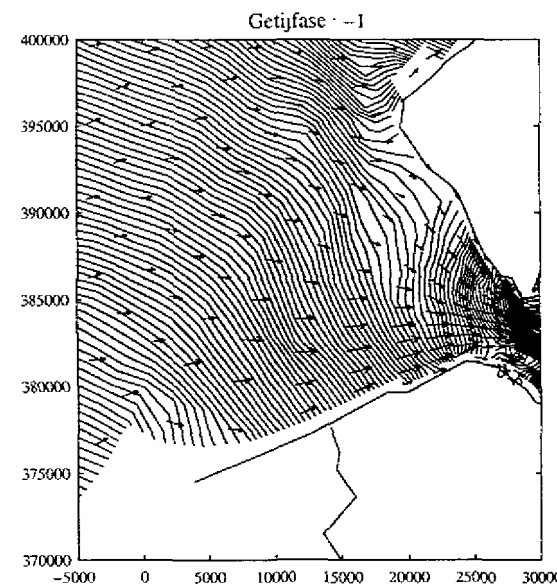
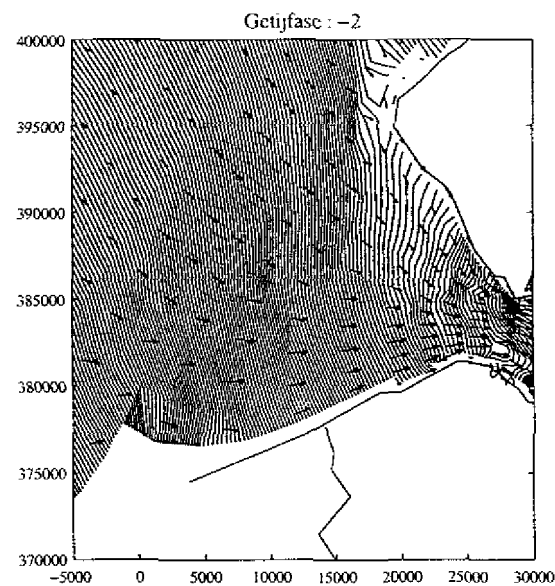
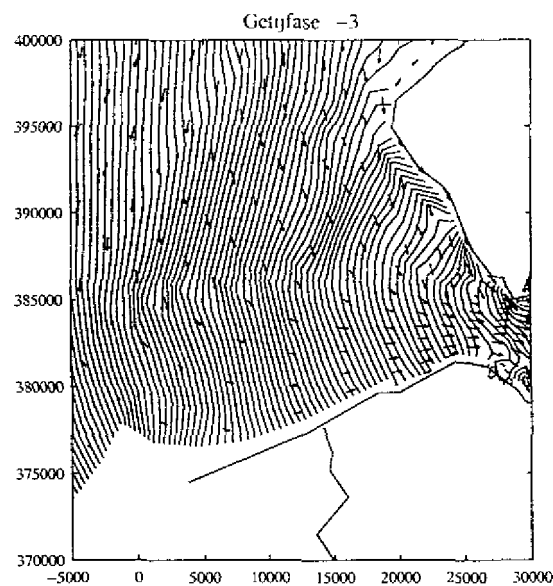


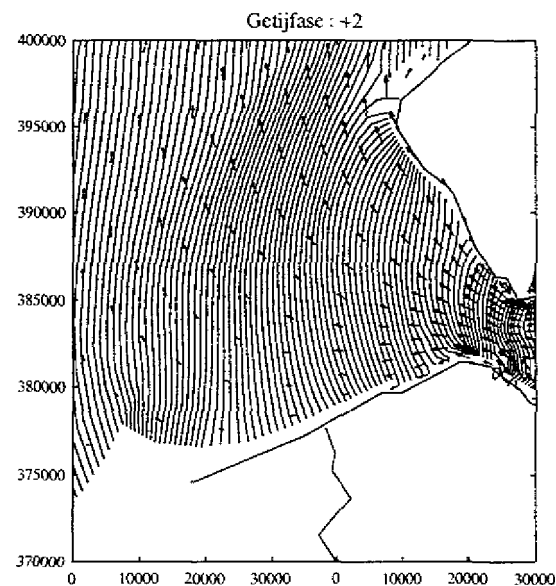
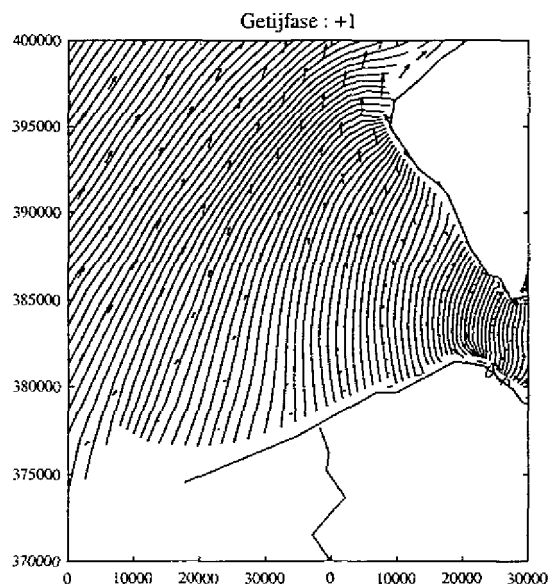
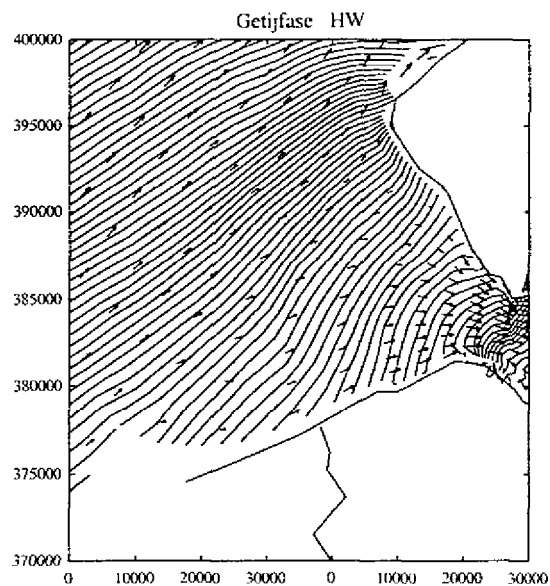
Variant: Opgelegde stroomrichting in de hals, Ebperiode



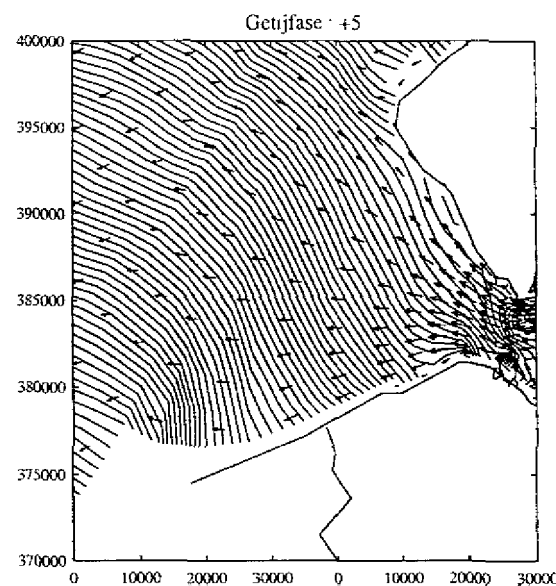
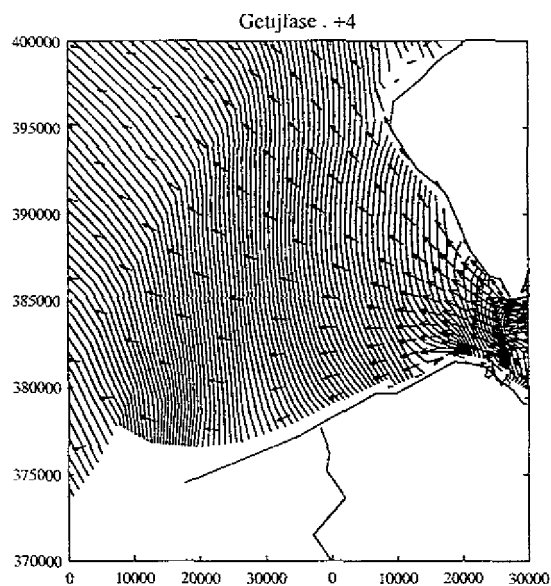
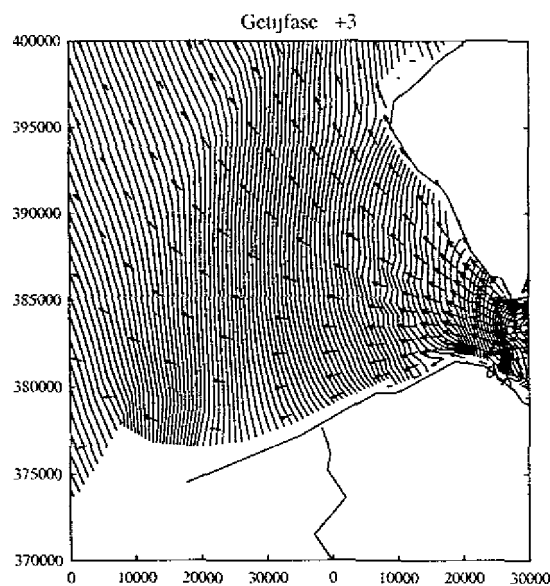


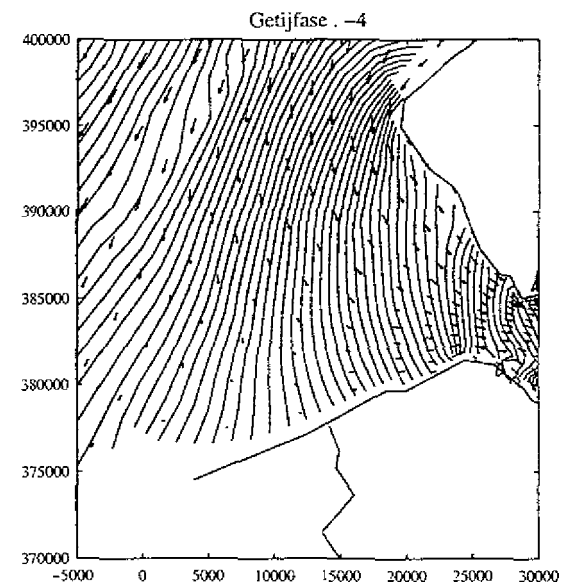
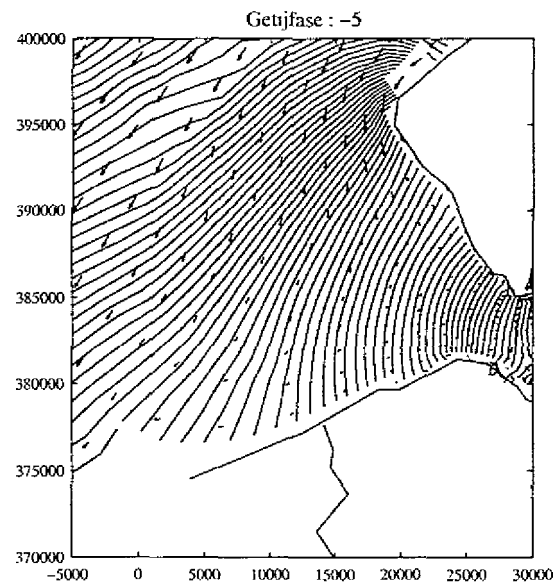
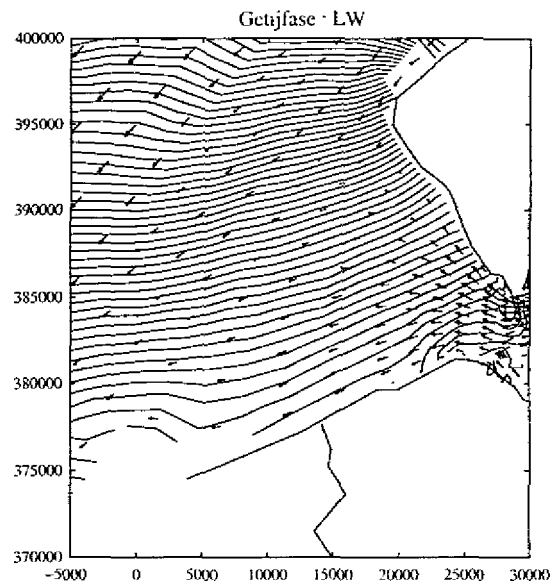
Variant: Opgelegde stroomrichting in de hals, vloedperiode



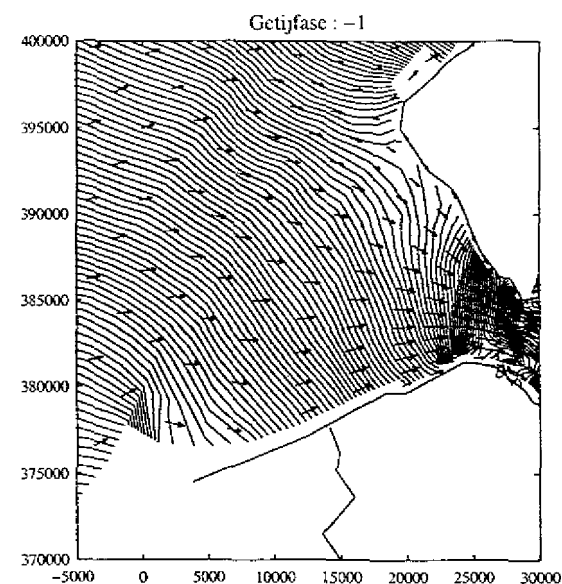
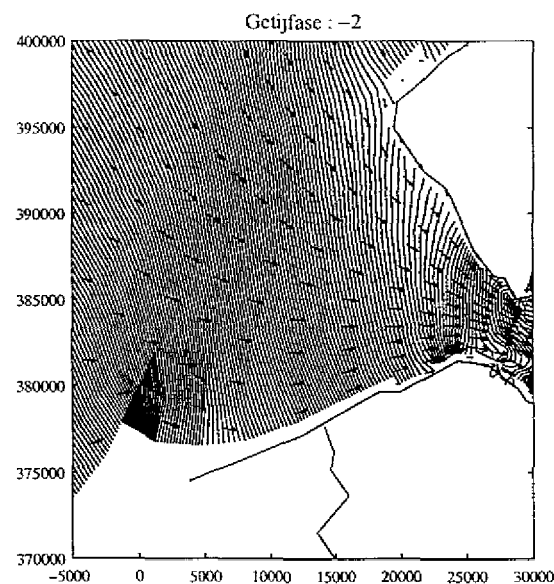
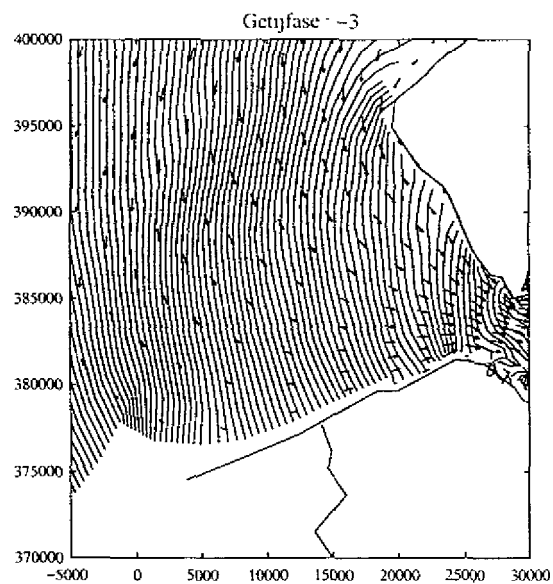


Variant: Afgevlakt Mondingsgebied + opg. str. in hals, Ebperiode





Variant: Afgevlakt Mondingsgebied + opg. str. in hals, vloedperiode



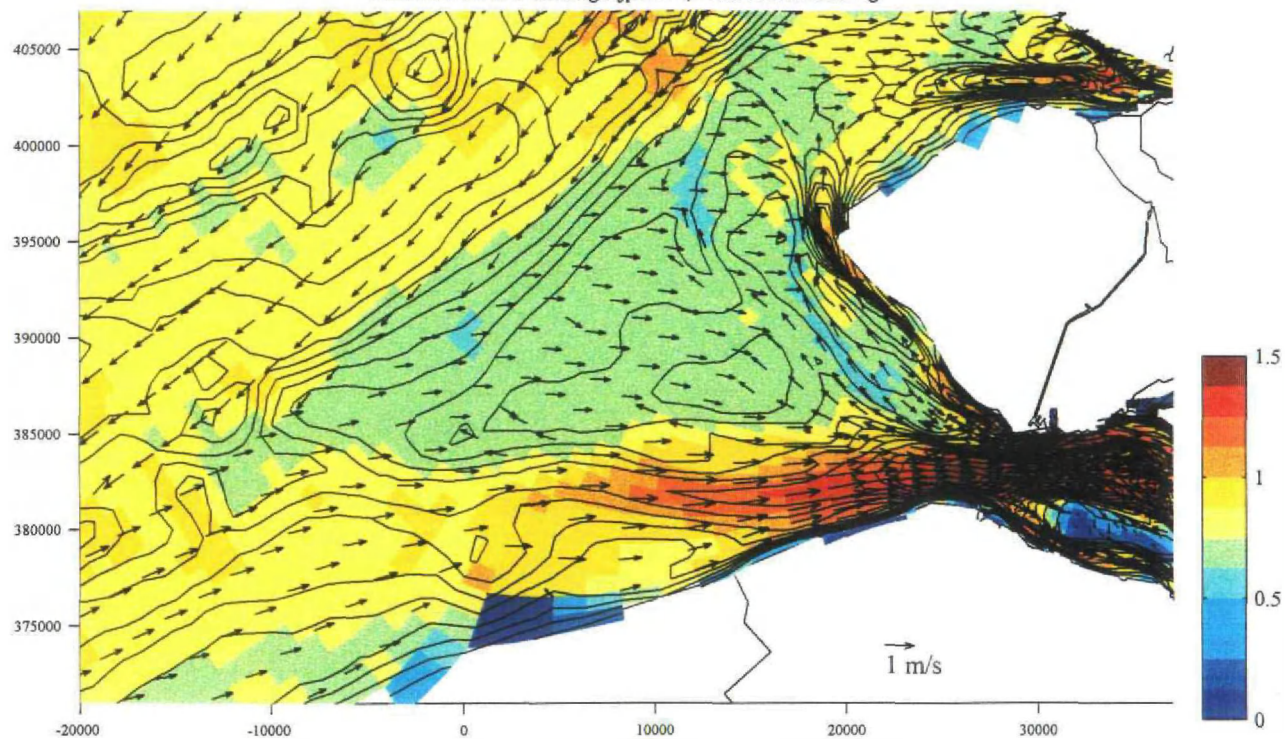
Bijlage 4 Getijmaximale stroomsnelheden

In deze bijlagen worden de voor elk roosterpunt tijdens het berekende getij opgetreden maximale snelheden gepresenteerd. In de bovenste figuur is de waarde en richting van deze snelheid aangegeven, in de onderste figuur het tijdstip van optreden. Voor deze presentatie zijn alleen uurswaarden gebruikt, voor meer gedetailleerde gegevens wordt verwezen naar bijlage 5.

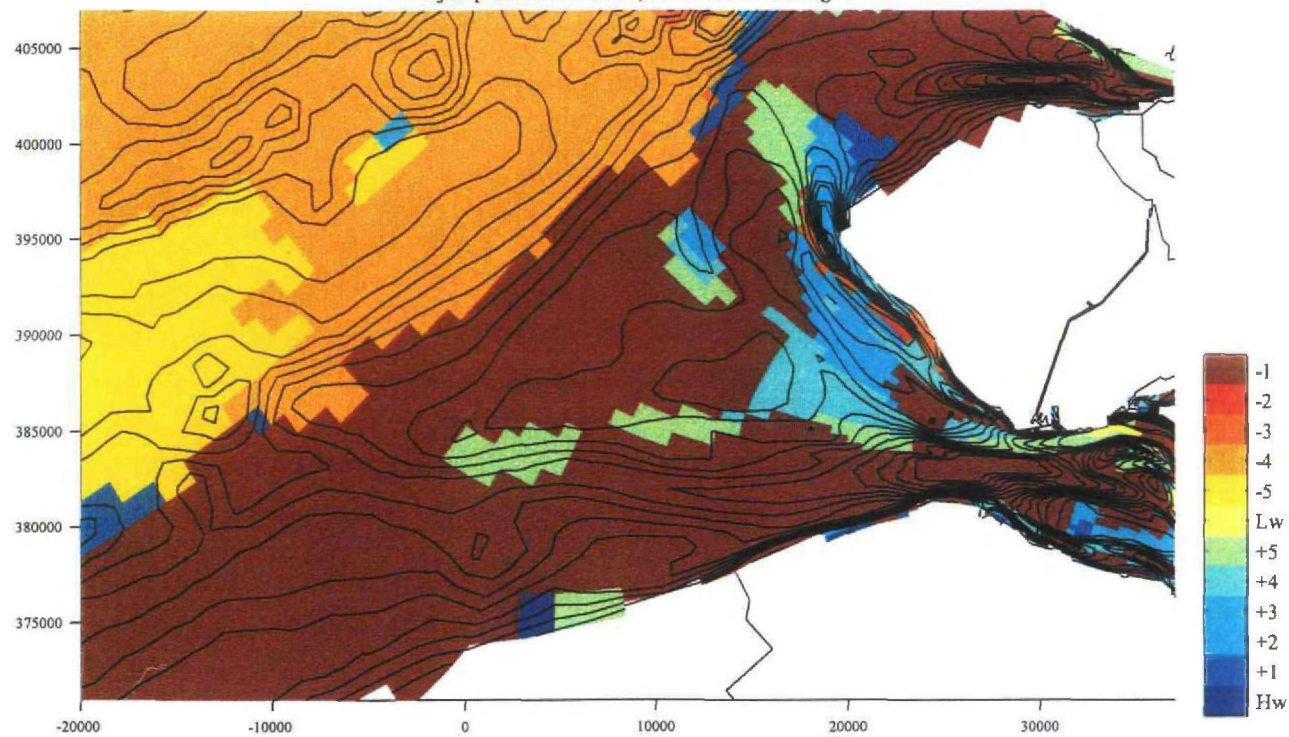
Deze bijlage is als volgt opgebouwd

- Bijlage 4.1 referentieberekening
- Bijlage 4.2 berekening voor springtij
- Bijlage 4.3 berekening met afgevlakt mondingsgebied
- Bijlage 4.4 berekening met afgevlakt Oostgat/Deurloo systeem
- Bijlage 4.5 berekening met aangepast afgevlakt Oostgat/Deurloo systeem
- Bijlage 4.6 berekening met opgelegde stroomrichting in de hals*
- Bijlage 4.7 berekening afgevlakt mondingsgebied en opgelegde stroomrichting in de hals
- Bijlage 4.8 berekening met Scheur/Wielingen 1971
- Bijlage 4.9 berekening met westelijk deel Westerschelde 1972
- Bijlage 4.10 berekening met midden/oostelijk deel Westerschelde 1971
- Bijlage 4.11 berekening met Scheur/Wielingen en Westerschelde 1971/1972
- Bijlage 4.12 berekening zonder stormvloedkering Oosterschelde

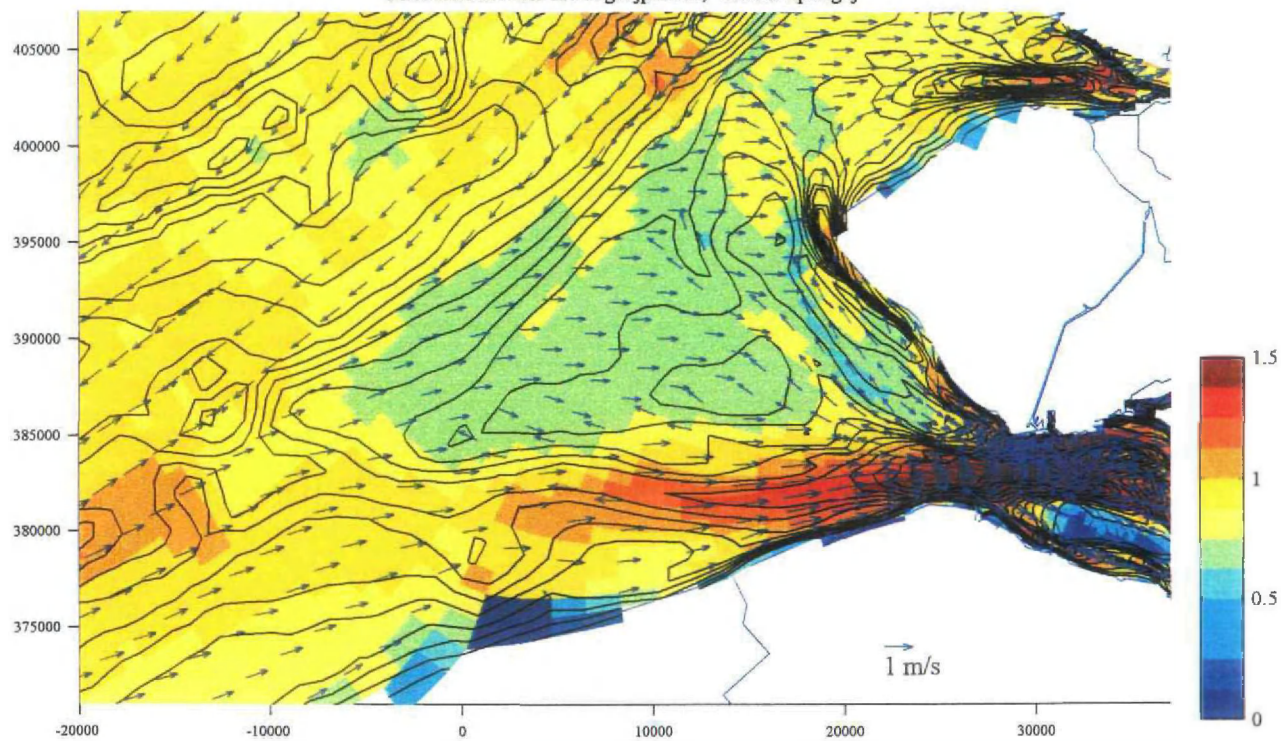
Maximale snelheid in één getijperiode, Referentie berekening



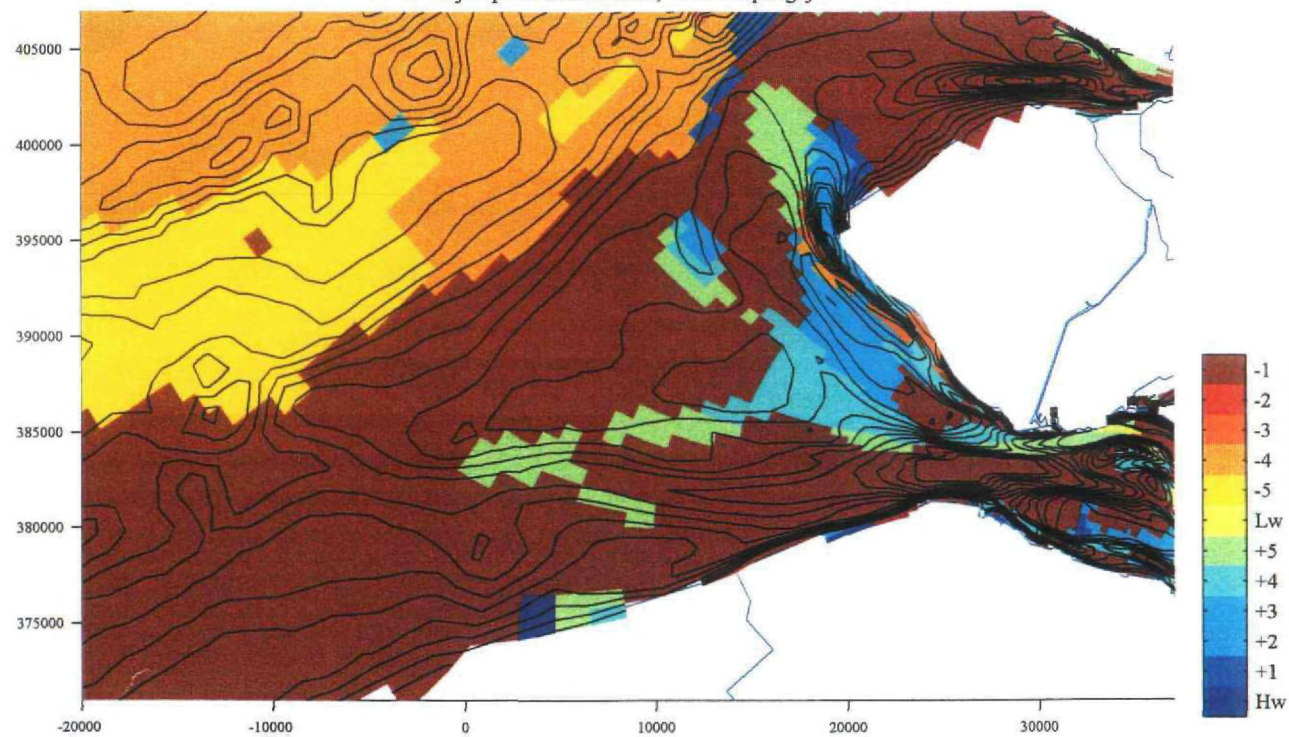
Tijdstip van max. snelheid, Referentie berekening



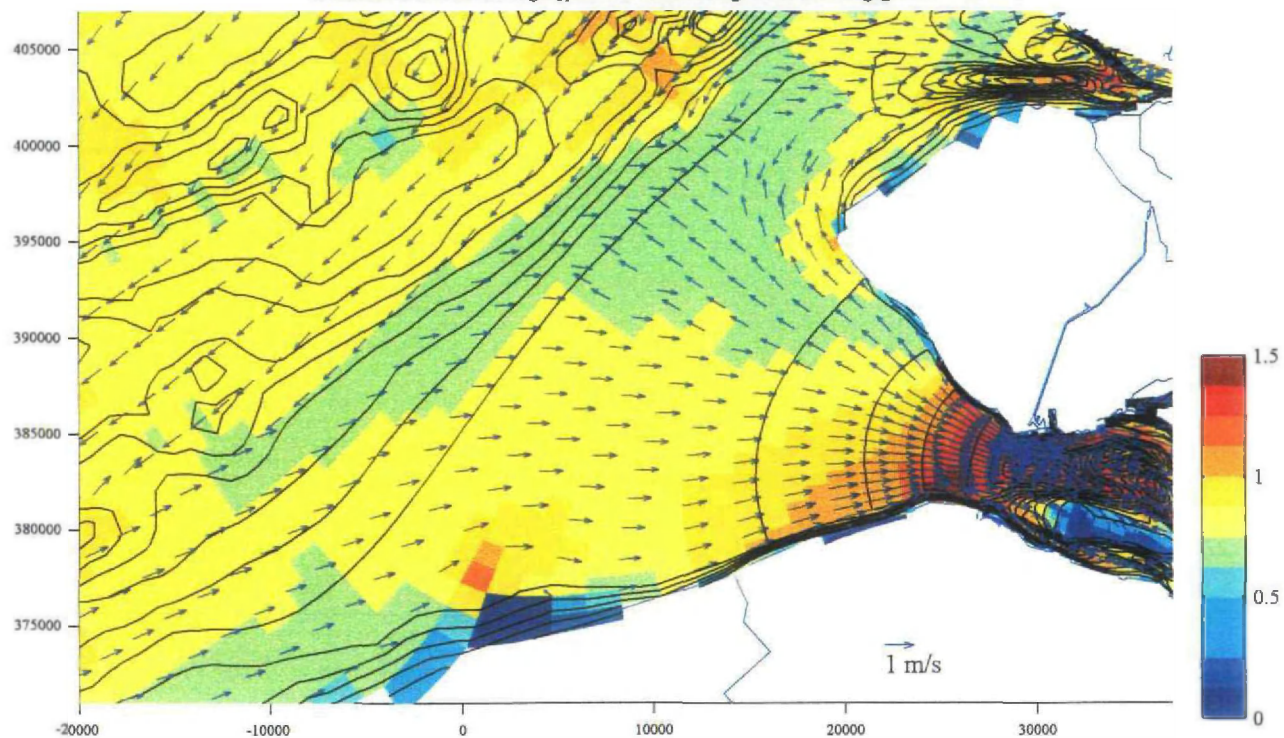
Maximale snelheid in één getijperiode, Variant: Springtij



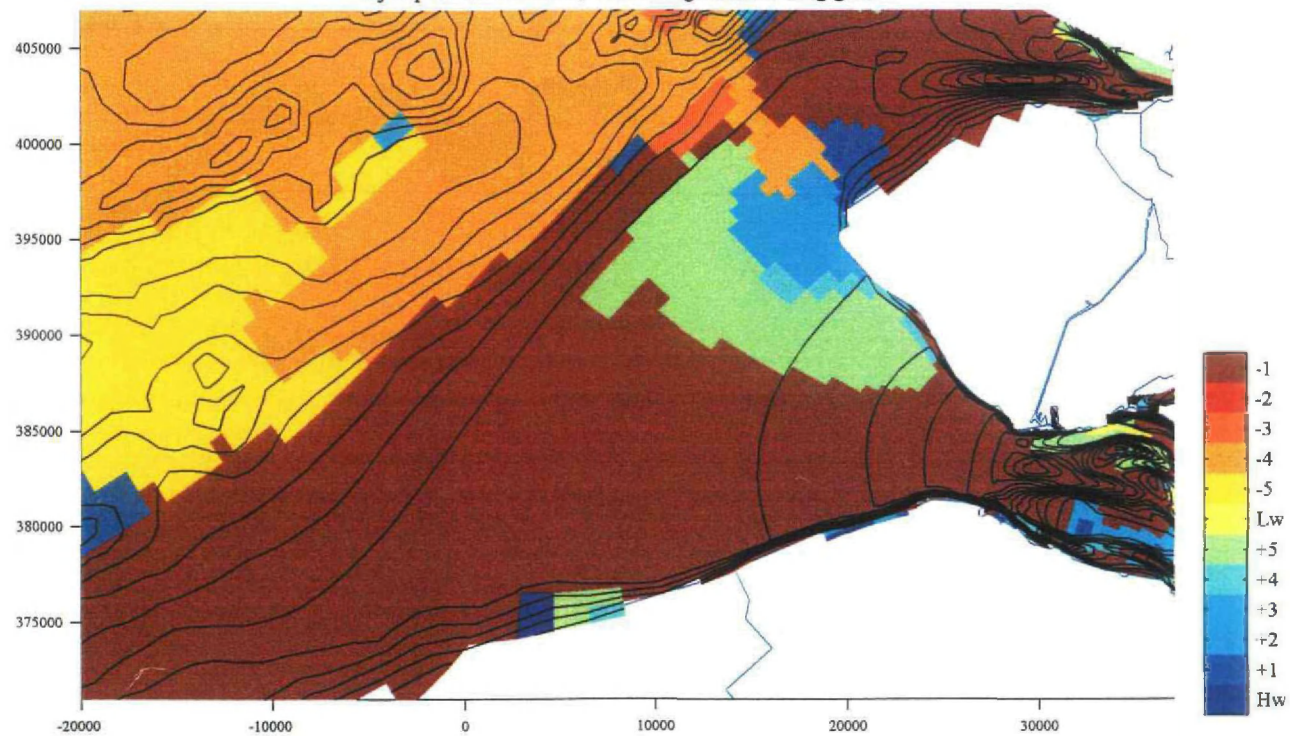
Tijdstip van max. snelheid, Variant: Springtij



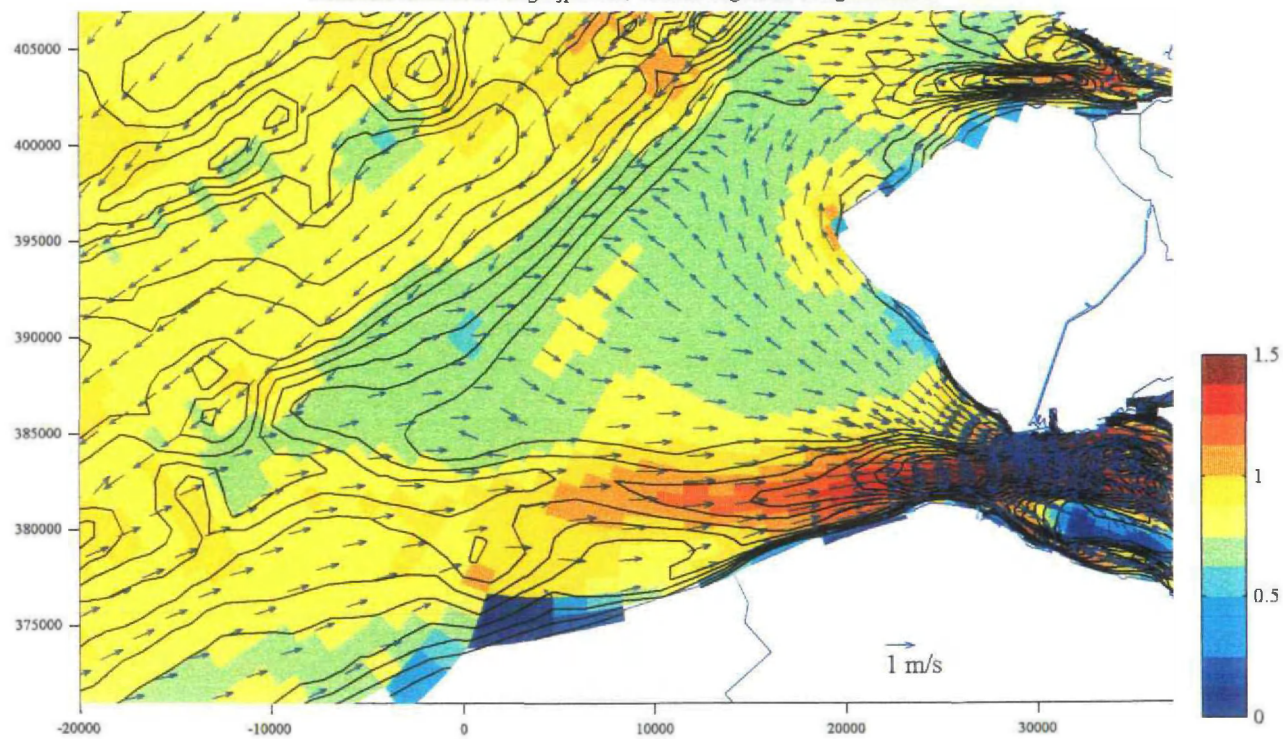
Maximale snelheid in één getijperiode, Variant: Afgevlakt Mondingsgebied



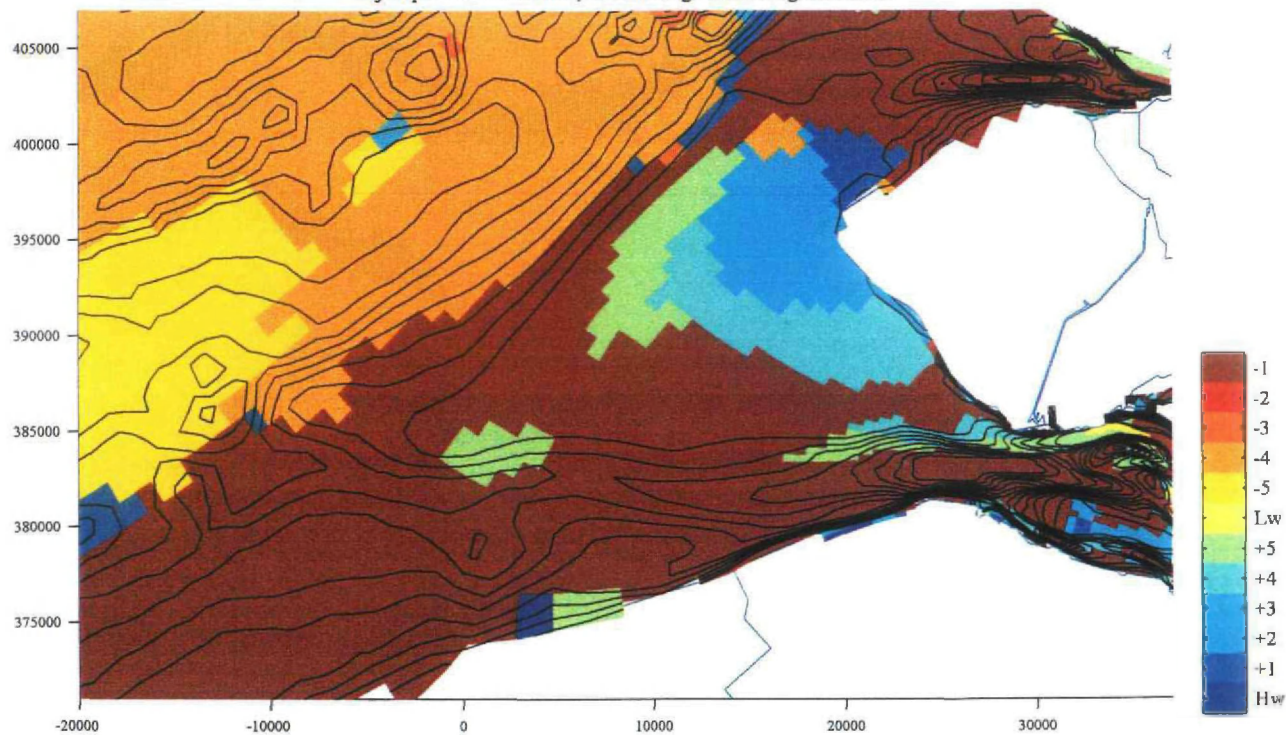
Tijdstip van max. snelheid, Variant: Afgevlakt Mondingsgebied



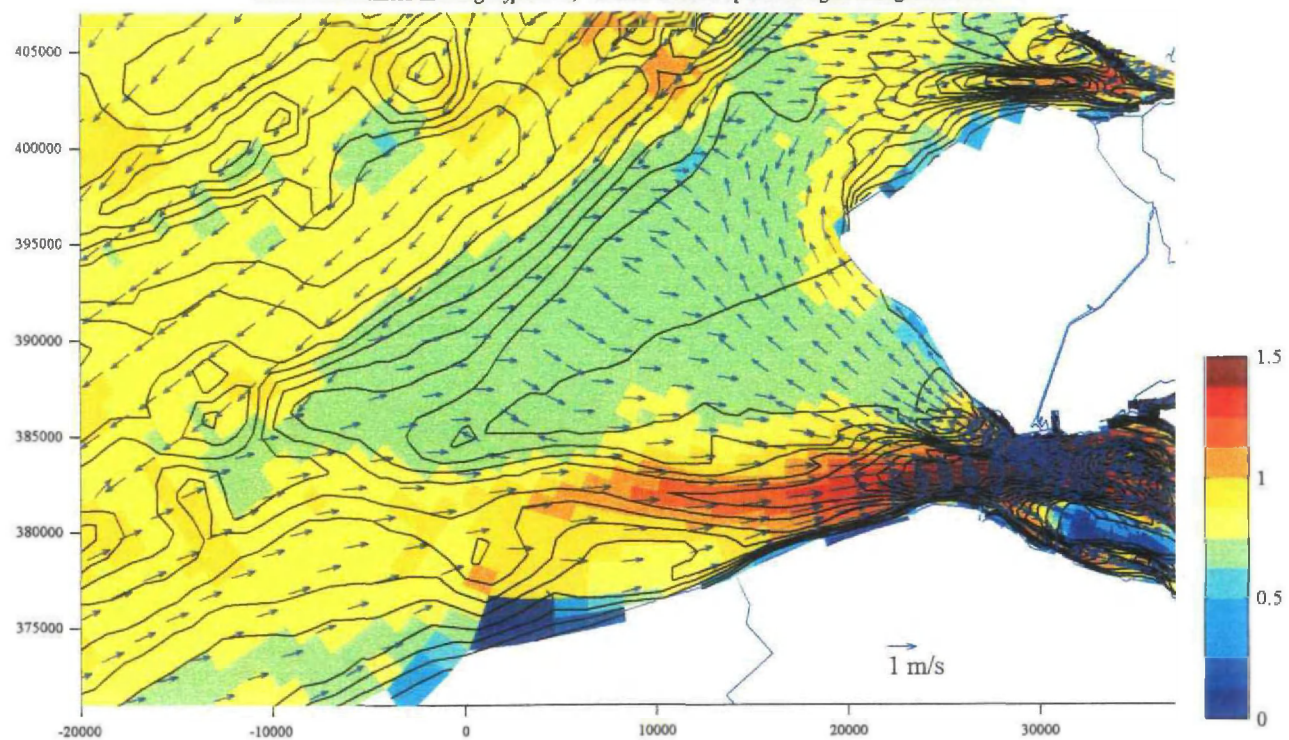
Maximale snelheid in één getijperiode, Variant: Afgevlakt Oostgat/Deurloo



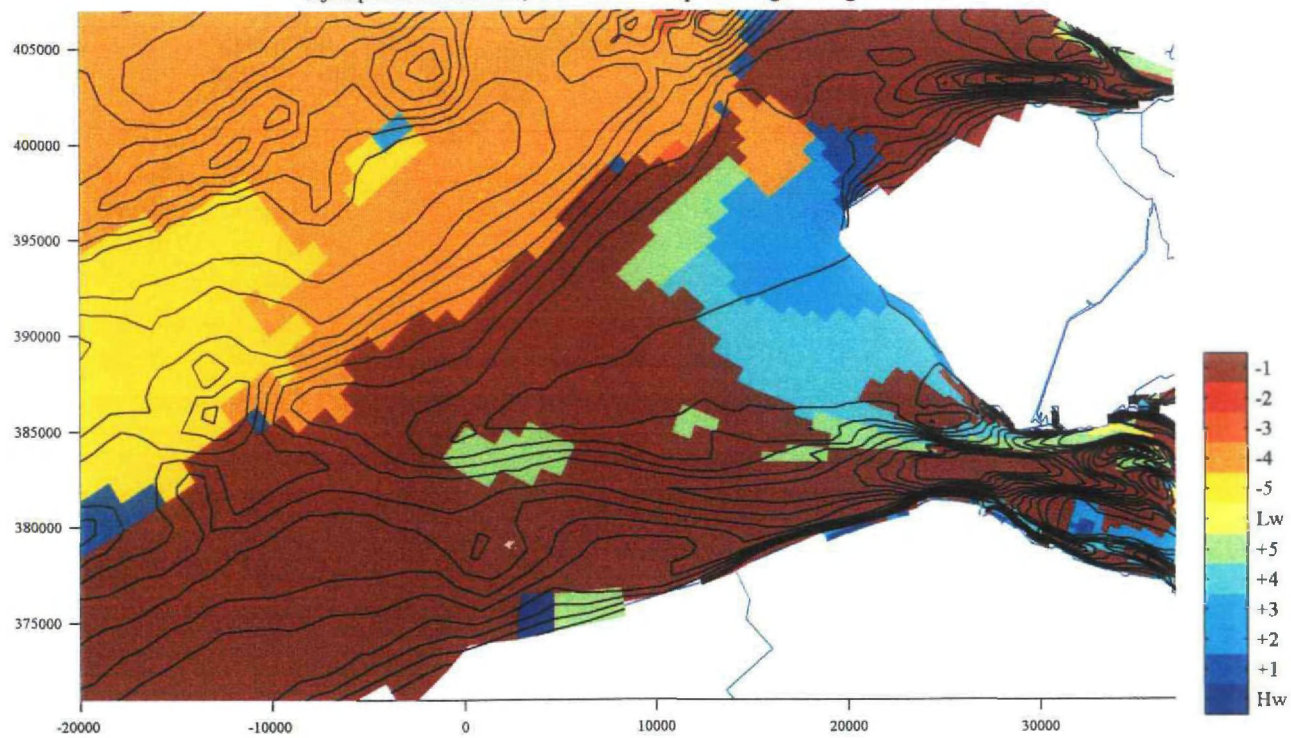
Tijdstip van max. snelheid, Variant: Afgevlakt Oostgat/Deurloo



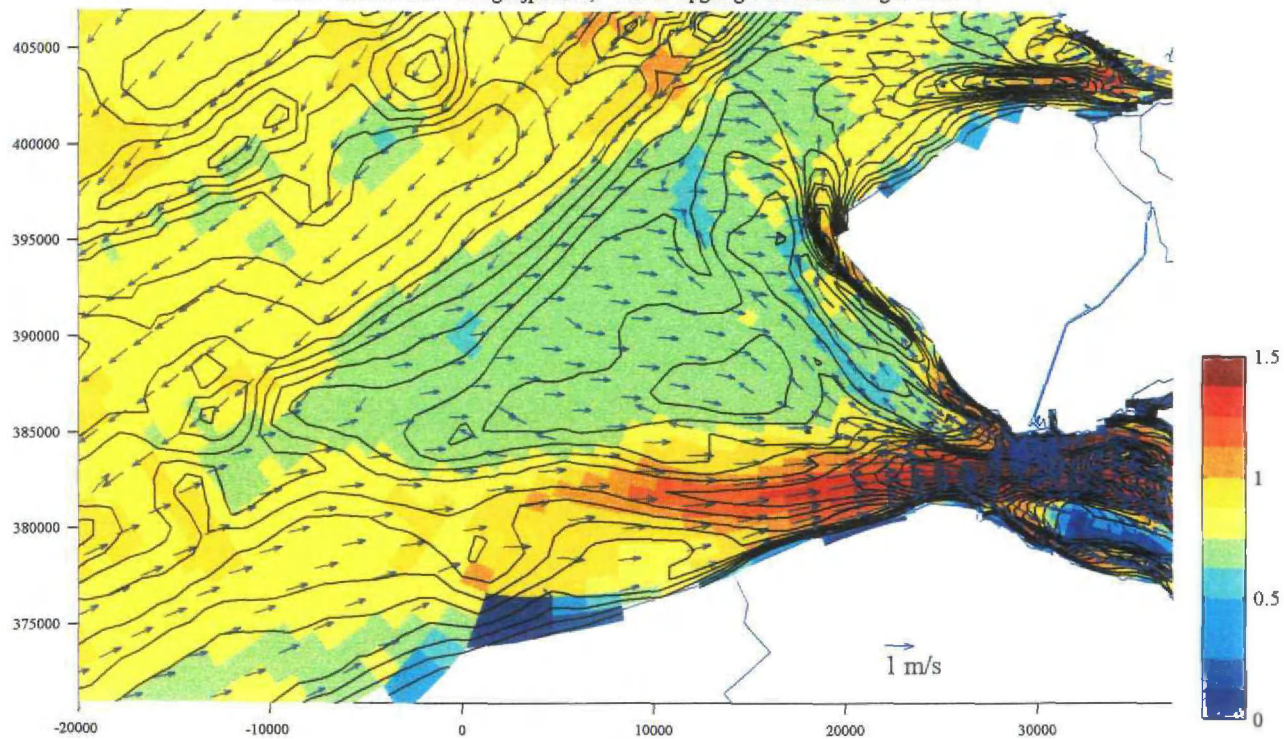
Maximale snelheid in één getijperiode, Variant: Gecorr. op snelh Afgvl. Oostgat/Deurloo



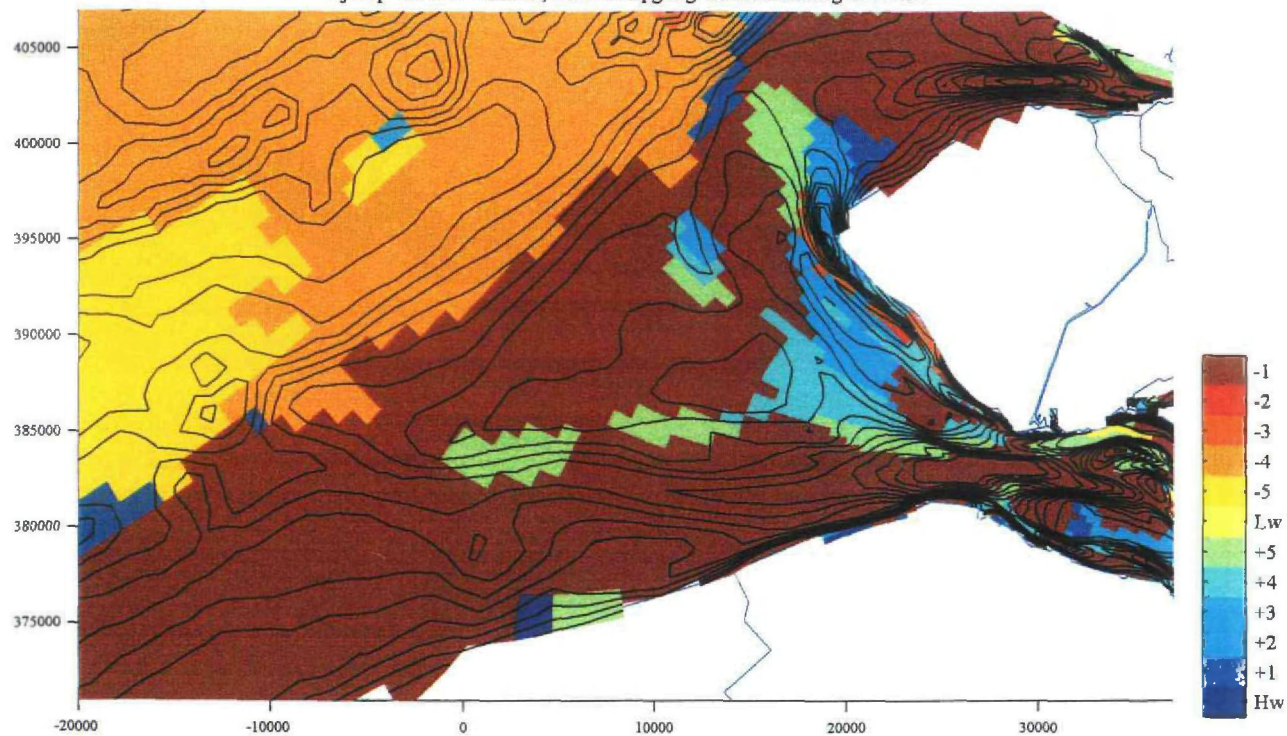
Tijdstip van max. snelheid, Variant: Gecorr. op snelh Afgvl. Oostgat/Deurloo



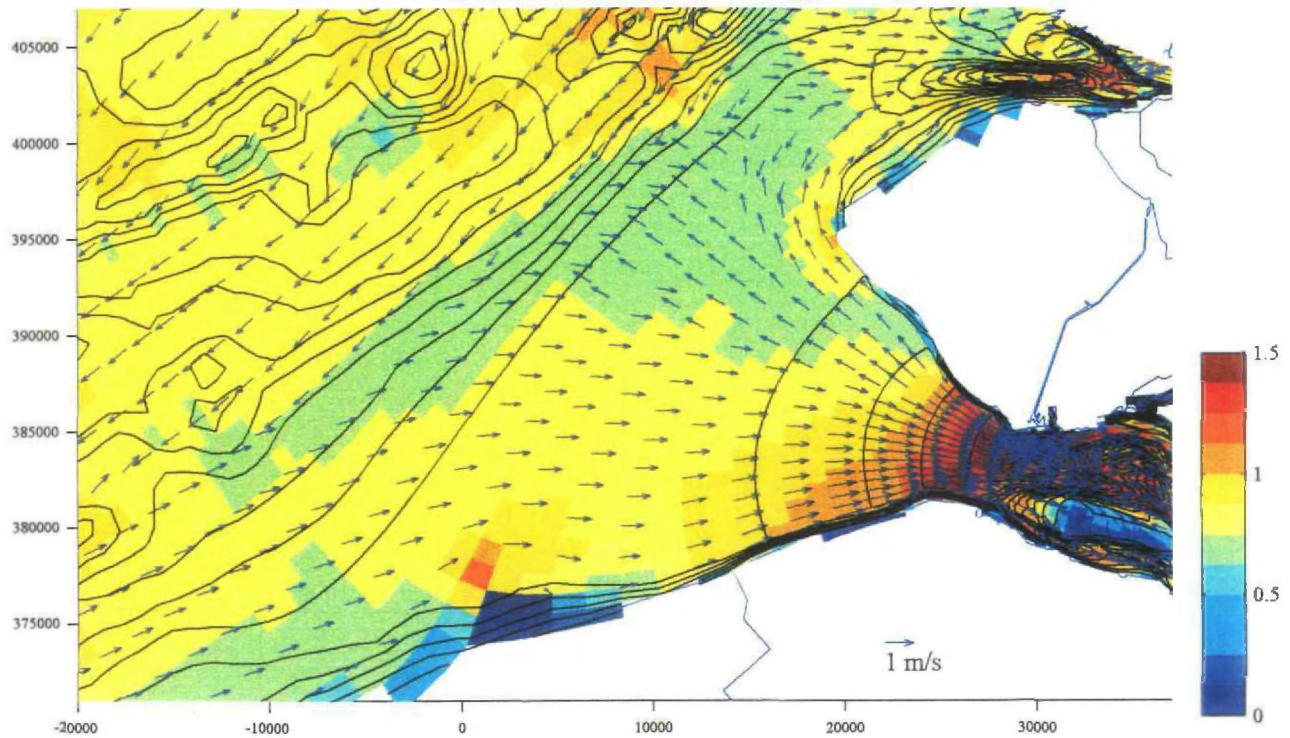
Maximale snelheid in één getijperiode, Variant: Opgelegde stroomrichting in de hals



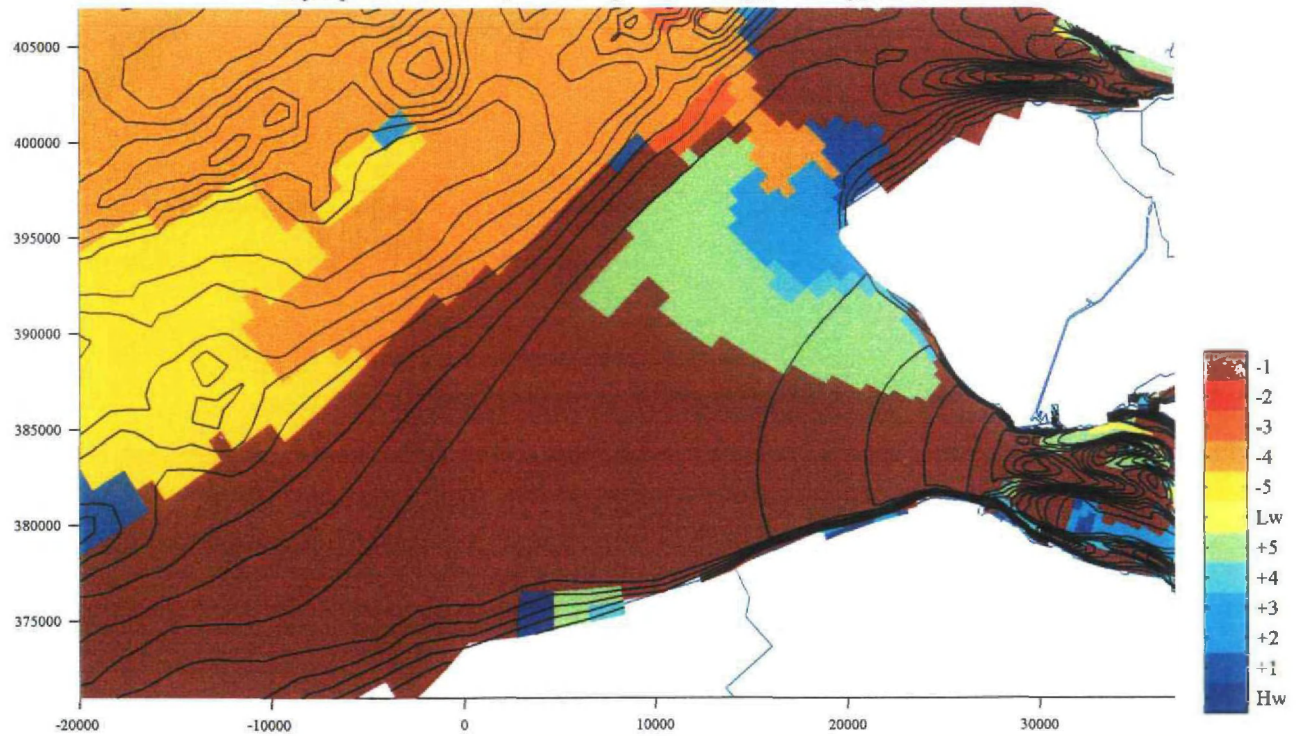
Tijdstip van max. snelheid, Variant: Opgelegde stroomrichting in de hals



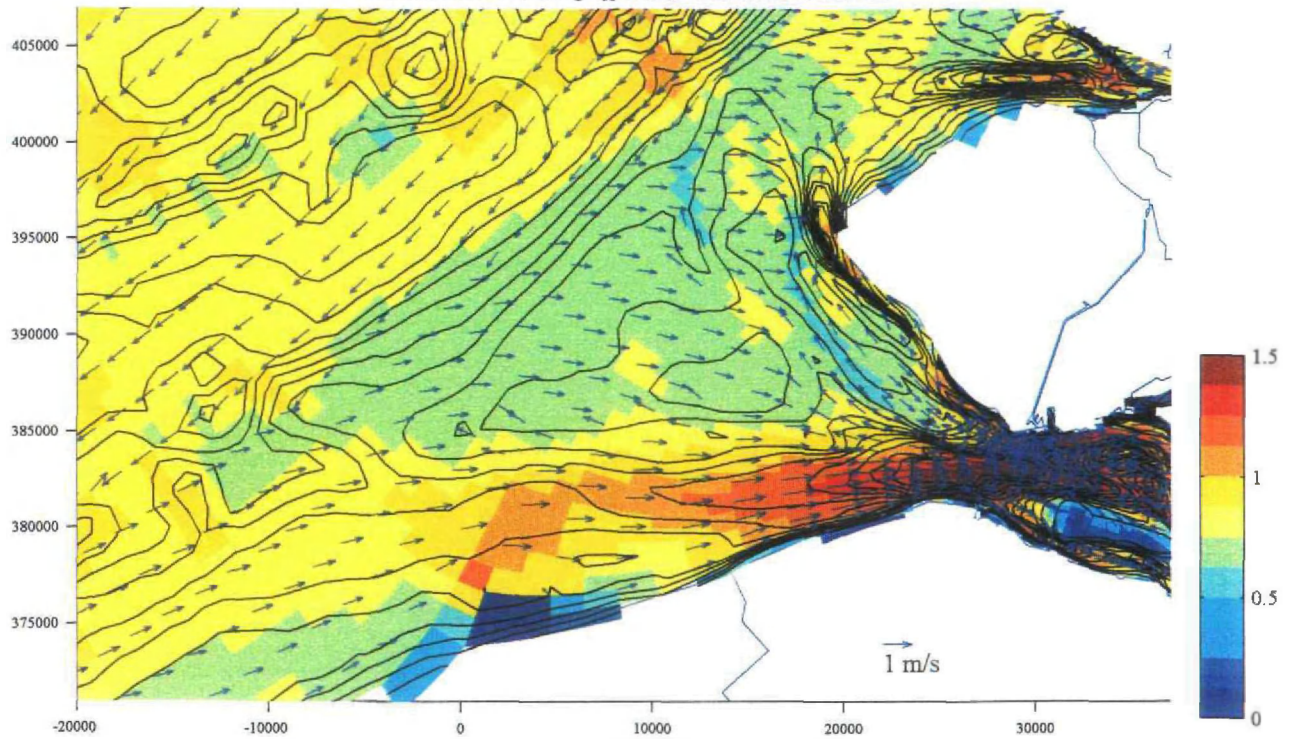
Maximale snelheid in één getijperiode, Variant: Afgevlakt Mondingsgebied + opg. str. in hals



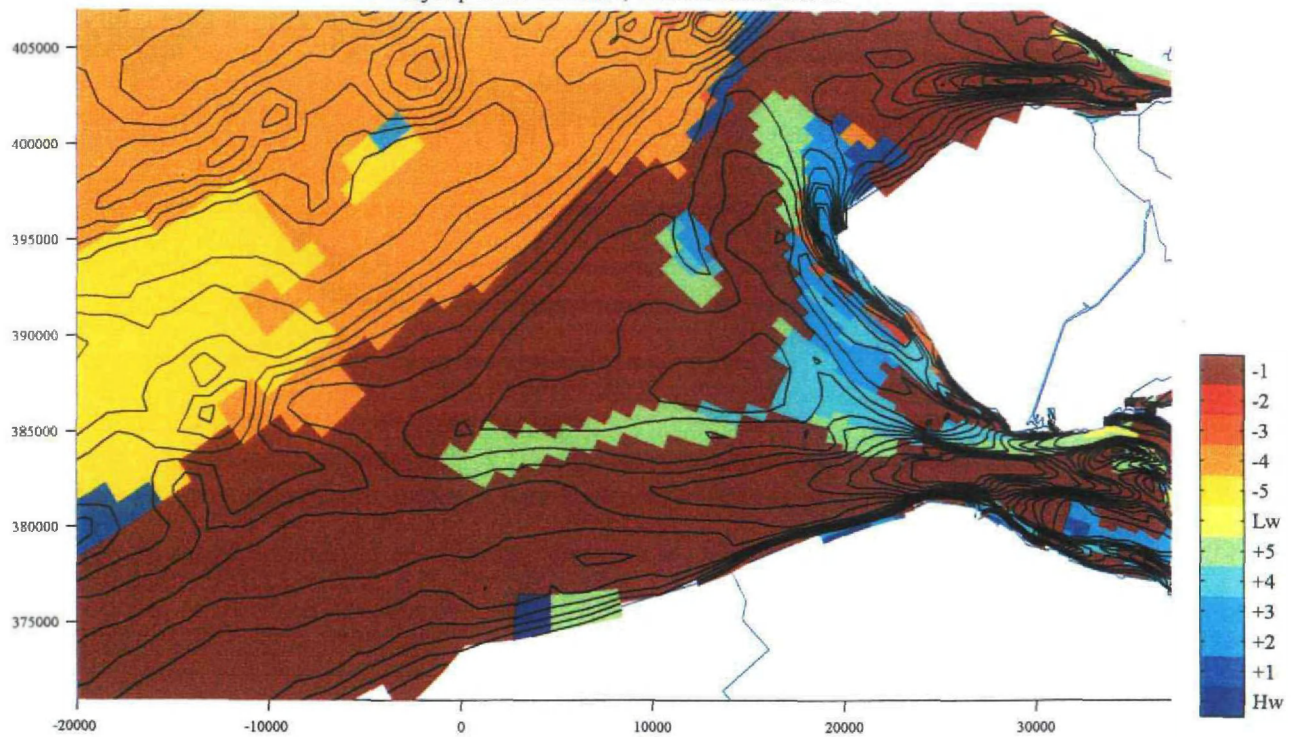
Tijdstip van max. snelheid, Variant: Afgevlakt Mondingsgebied + opg. str. in hals



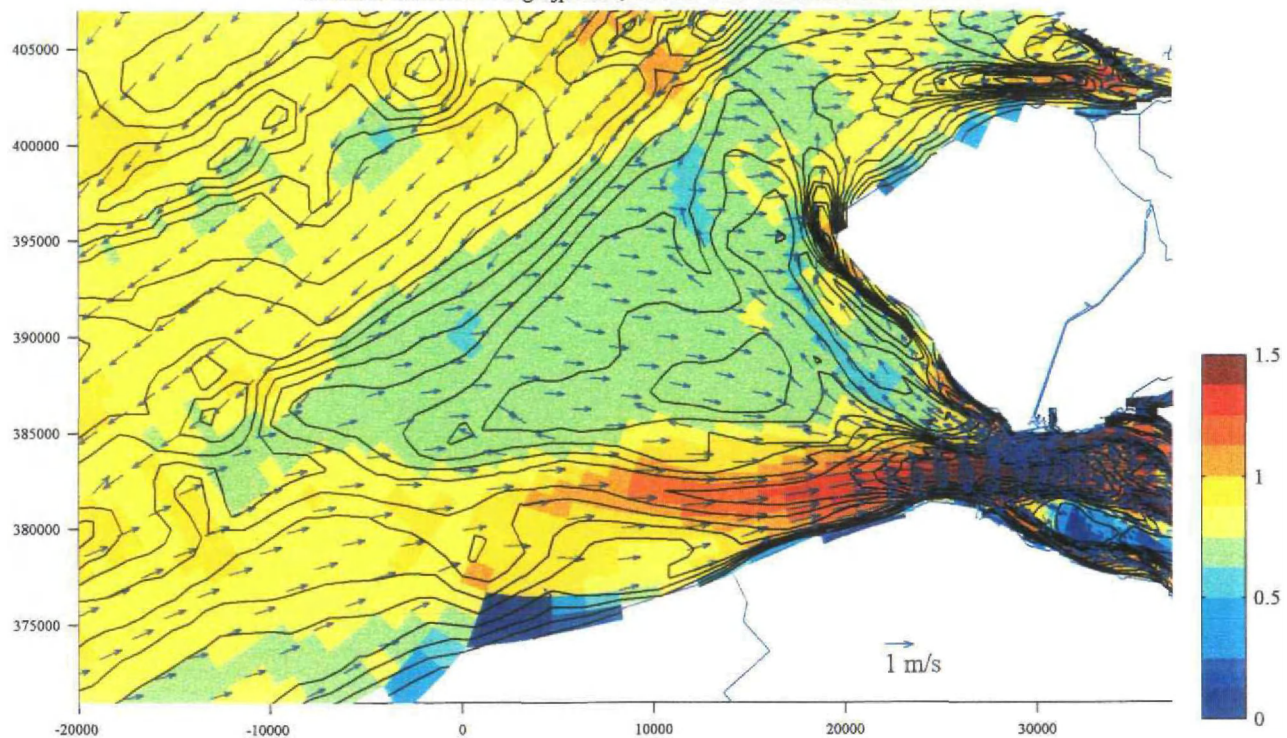
Maximale snelheid in één getijperiode, Variant: Scheur/Wiel.'71



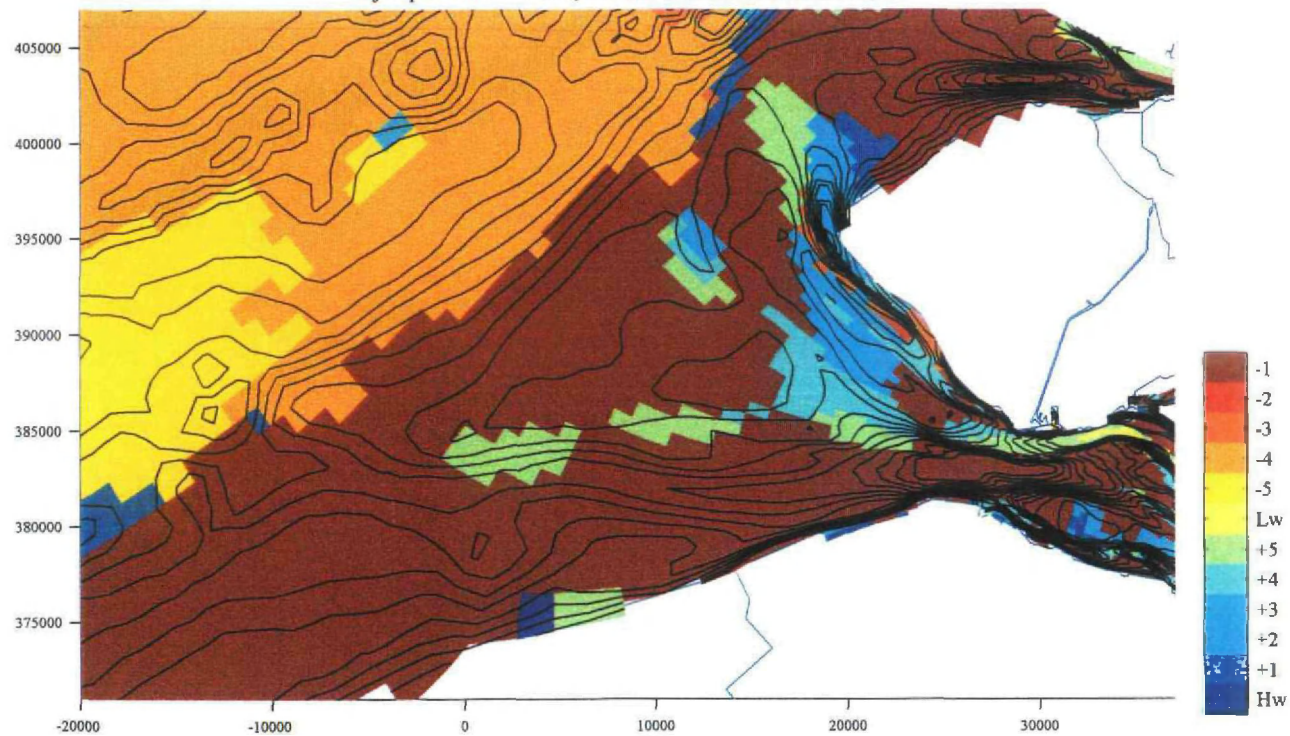
Tijdstip van max. snelheid, Variant: Scheur/Wiel.'71



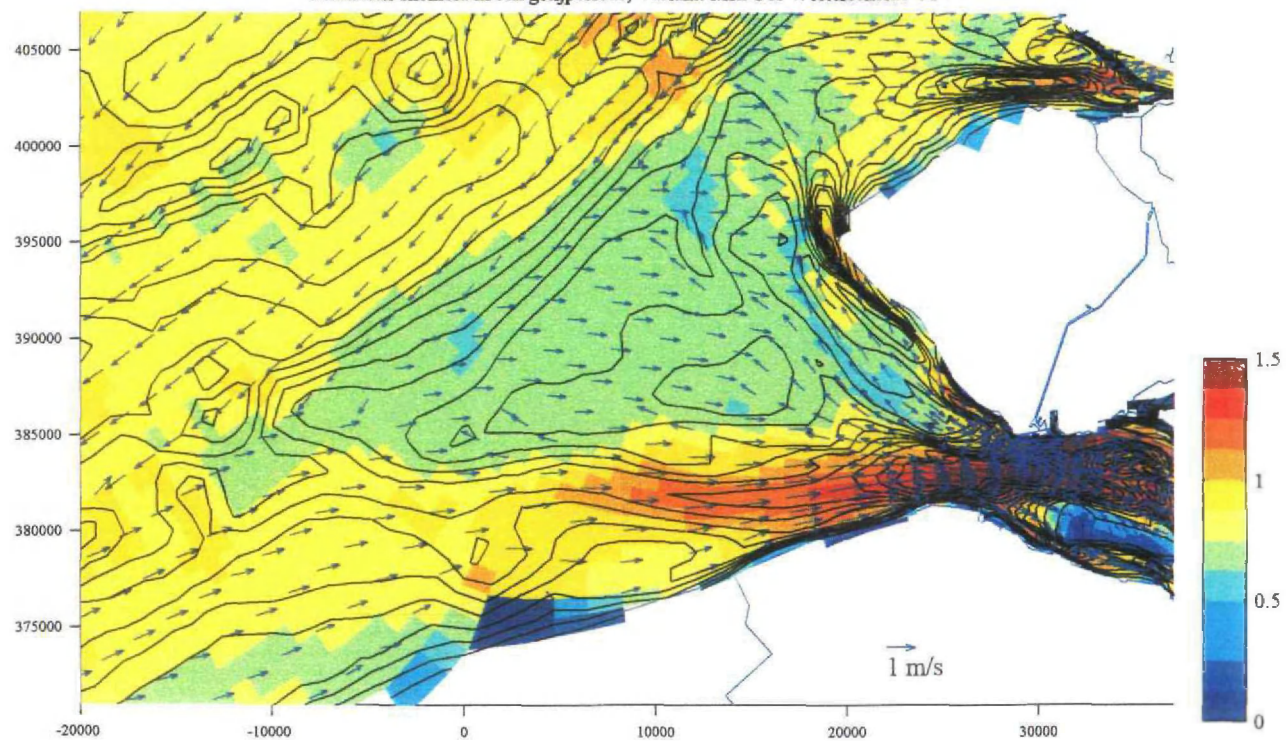
Maximale snelheid in één getijperiode, Variant: West deel Westerschelde '72



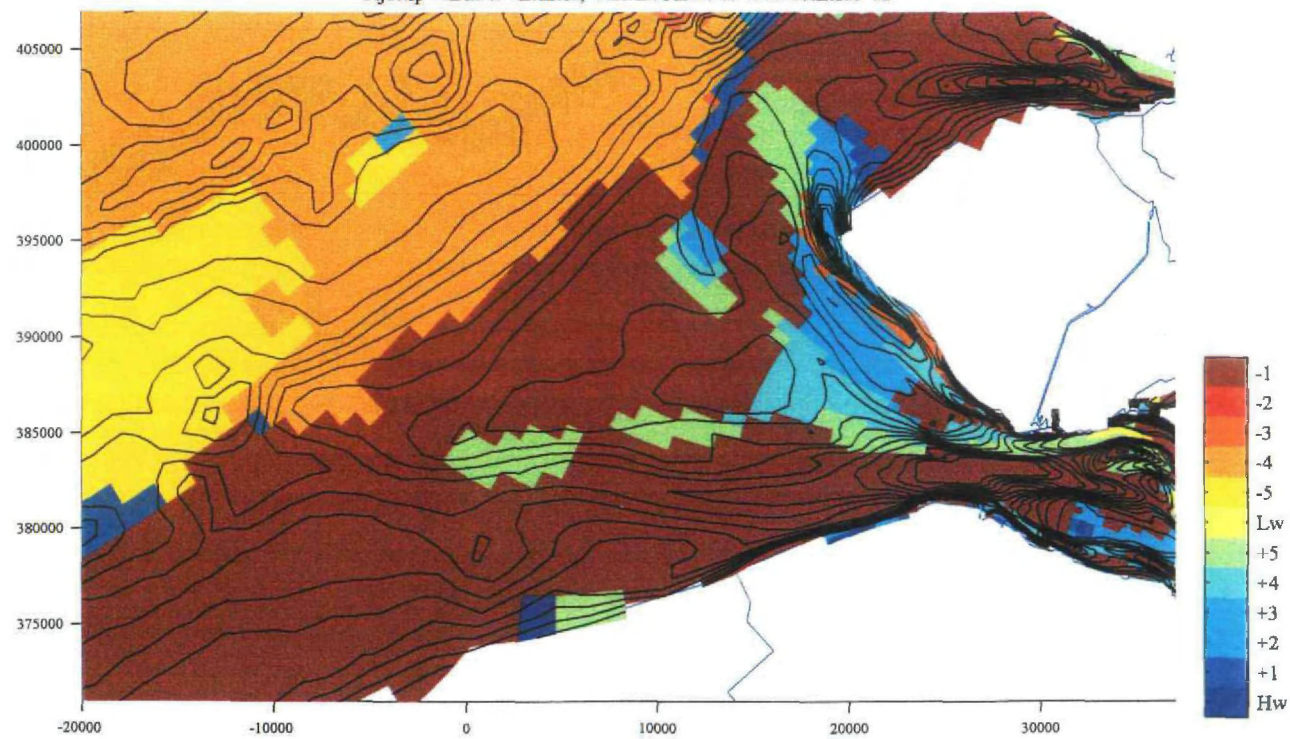
Tijdstip van max. snelheid, Variant: West deel Westerschelde '72



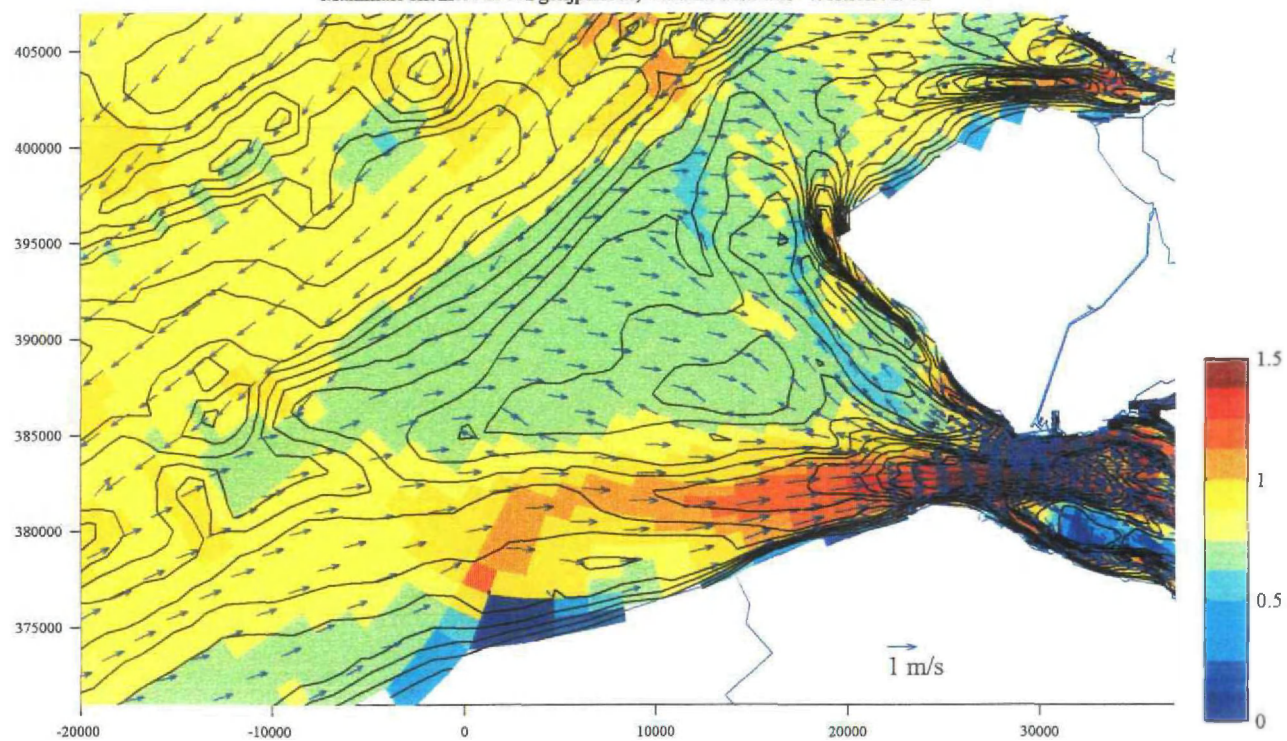
Maximale snelheid in één getijperiode, Variant: Mid/Oos Westerschelde '71



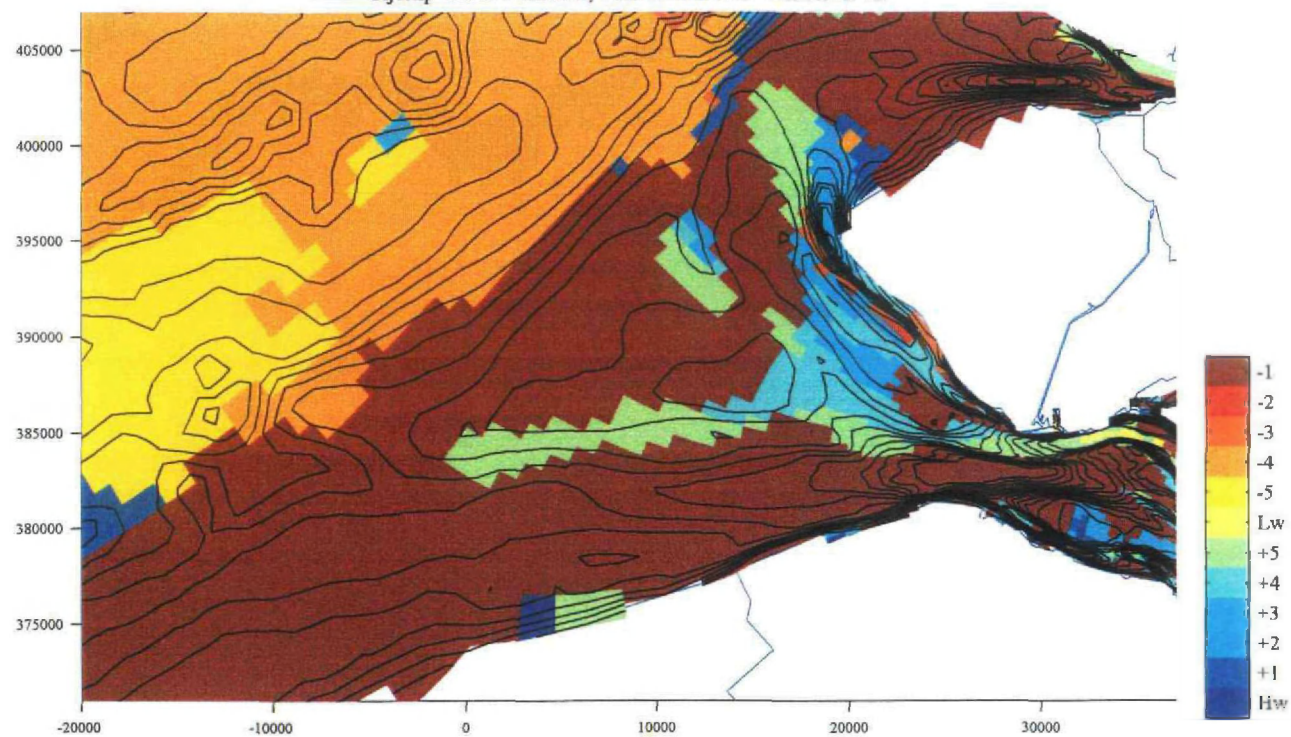
Tijdstip van max. snelheid, Variant: Mid/Oos Westerschelde '71



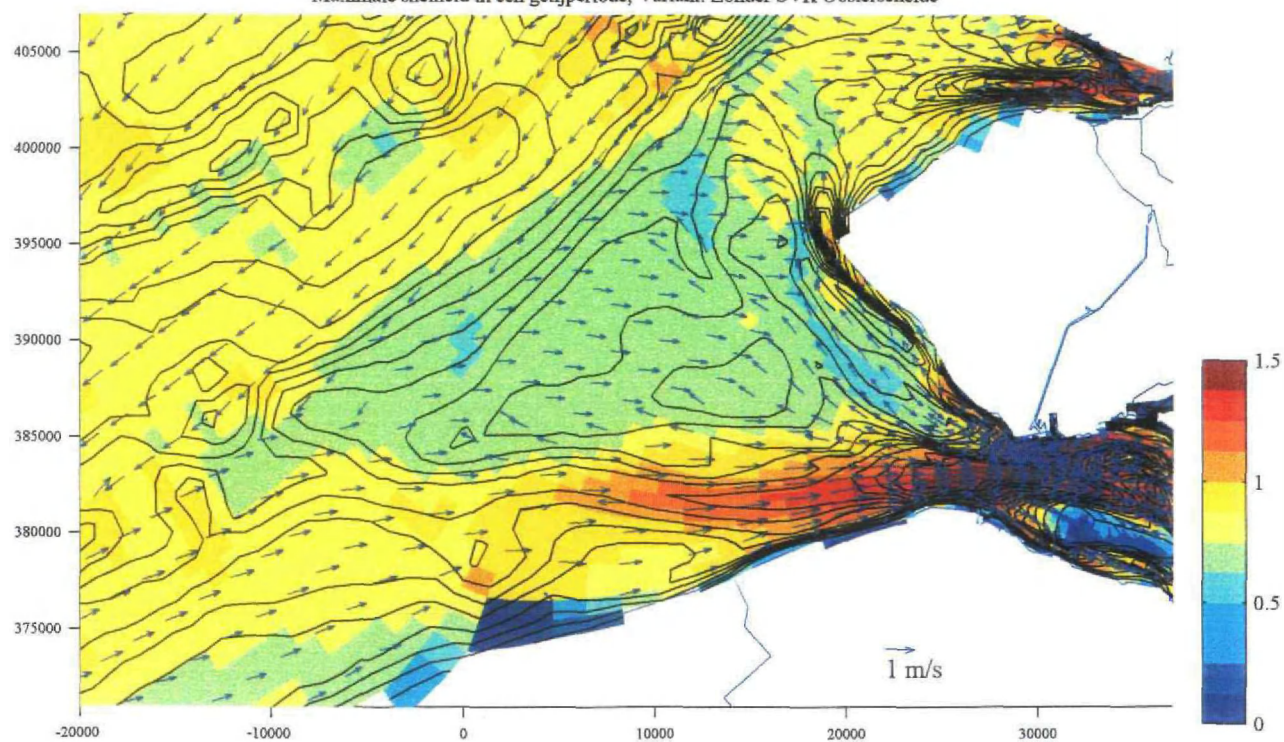
Maximale snelheid in één getijperiode, Variant: Mid/Oos+Westsch'71/'72



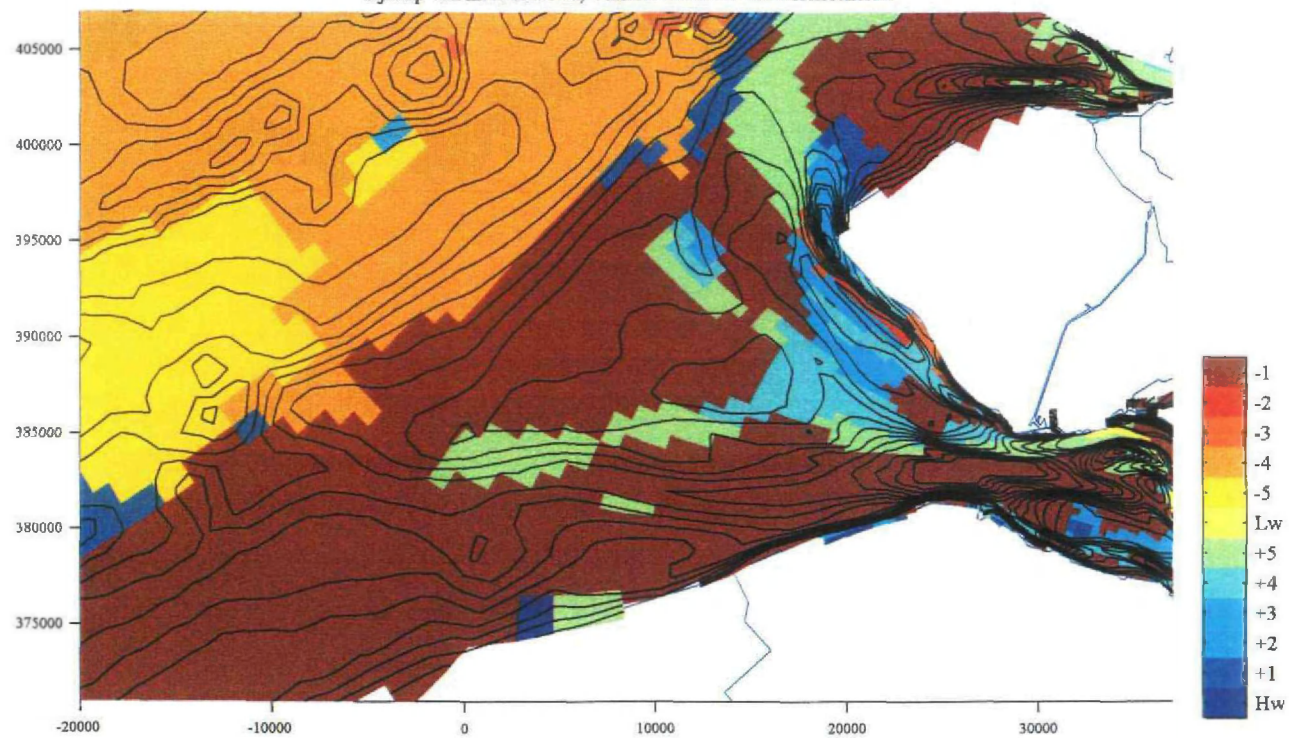
Tijdstip van max. snelheid, Variant: Mid/Oos+Westsch'71/'72



Maximale snelheid in één getijperiode, Variant: Zonder SVK Oosterschelde



Tijdstip van max. snelheid, Variant: Zonder SVK Oosterschelde



Bijlage 5 Tijdreeksen stroomsnelheden en waterstanden

In deze bijlage worden de tijdreeksen van stroomsnelheden en waterstanden voor een aantal locaties gepresenteerd. Deze locaties zijn zo gekozen dat ze representatief kunnen worden geacht voor een bepaald geuldeel of ondiep gebied (zie figuur 3.4)

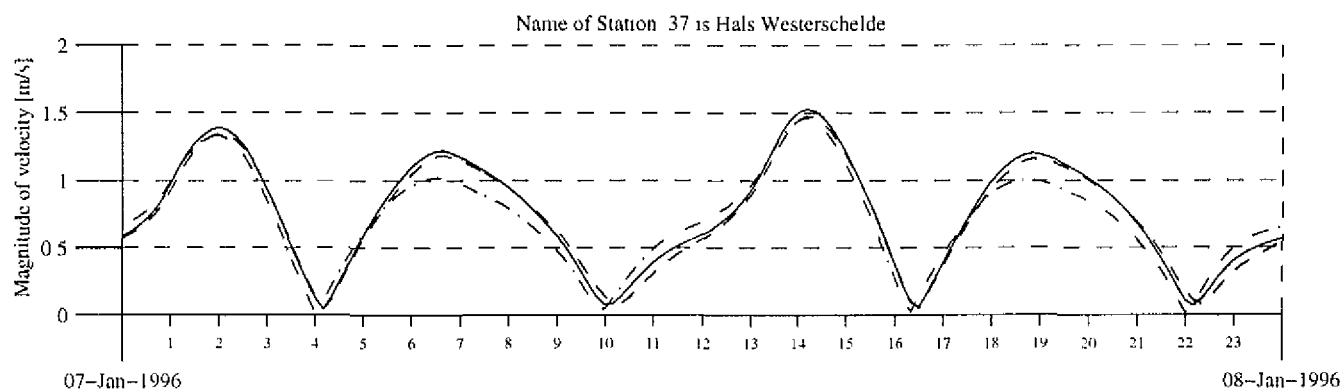
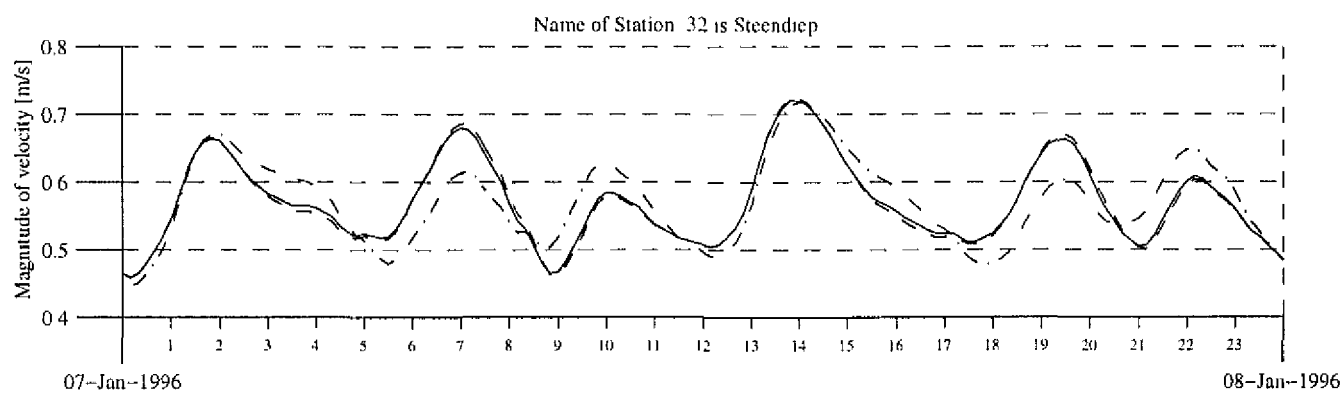
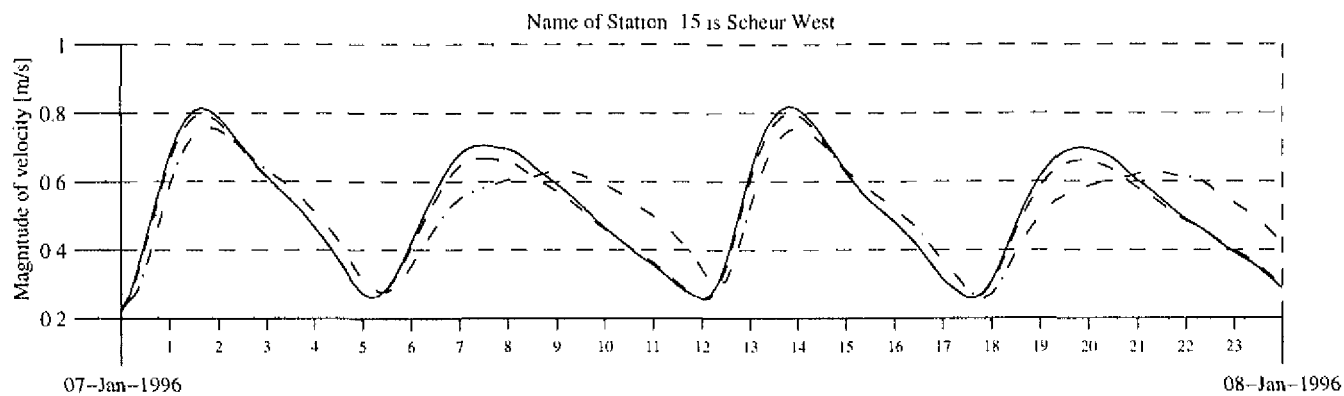
Deze bijlage is als volgt opgebouwd:

- Bijlage 5.1 Scheur West, Steendiep en Hals
- Bijlage 5.2 Scheur Oost, Wielingen West en Wielingen Oost
- Bijlage 5.3 Deurloo West, Deurloo Midden en Deurloo Oost
- Bijlage 5.4 Oostgat West, Oostgat Midden en Oostgat Oost
- Bijlage 5.5 Raan Zuid, Walvischstaart en Nolleplaat Zuid

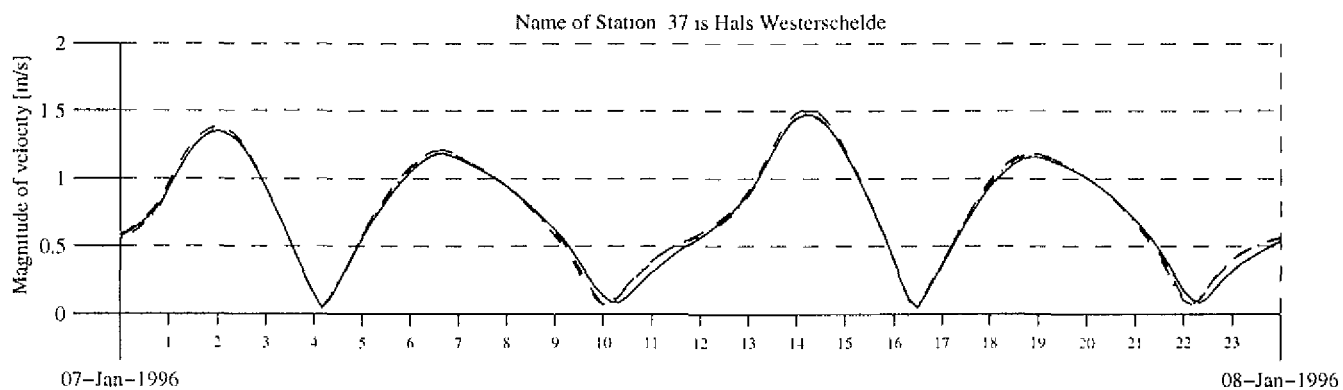
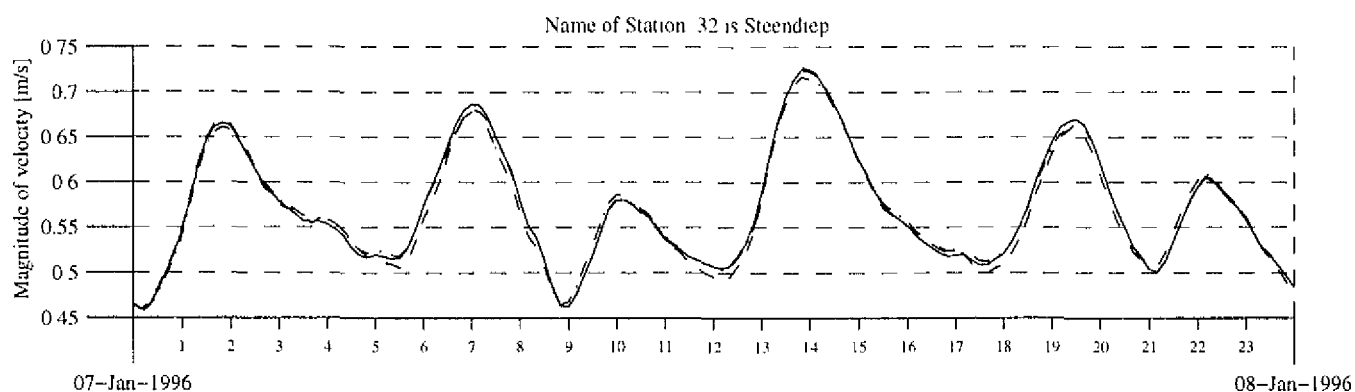
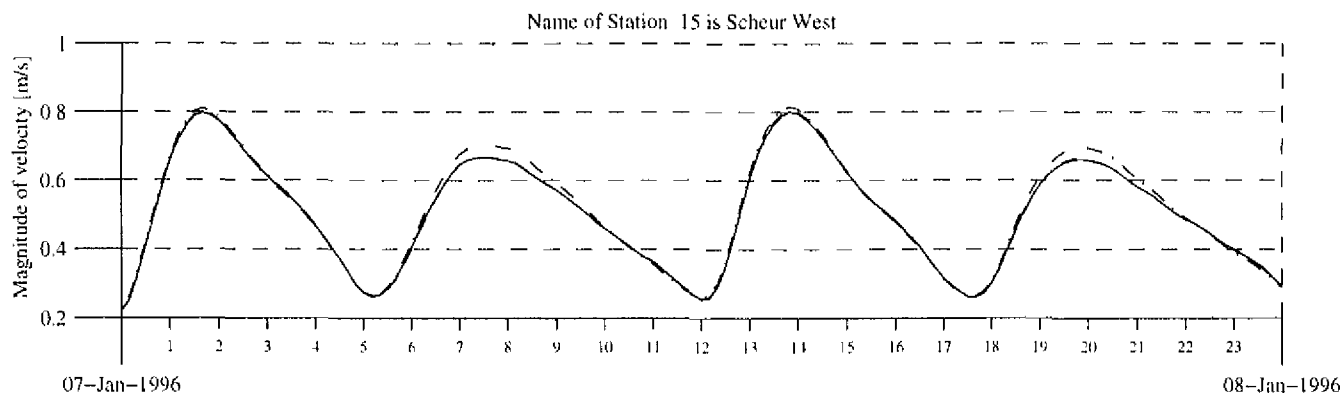
De A-versies geven een overzicht van de meest belangrijke berekeningen, de huidige situatie met en zonder geulgeometrie en de situatie rond 1970. De invloed van de verschillende deelgebieden is voor de situatie in 1970 weergegeven in de B-versies.

Per locatie is het snelheidsverloop berekend voor 7 januari 1996 gegeven. De resultaten van de volgende berekeningen zijn gepresenteerd:

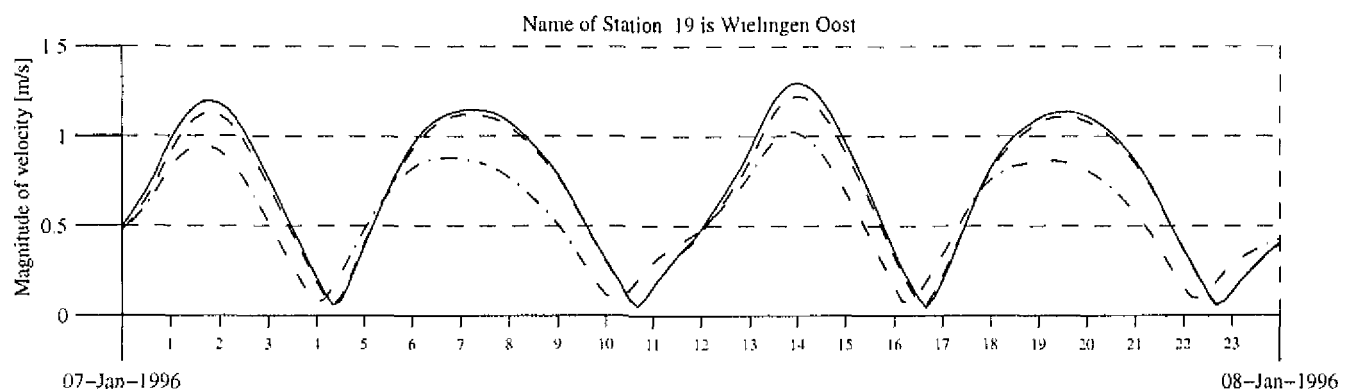
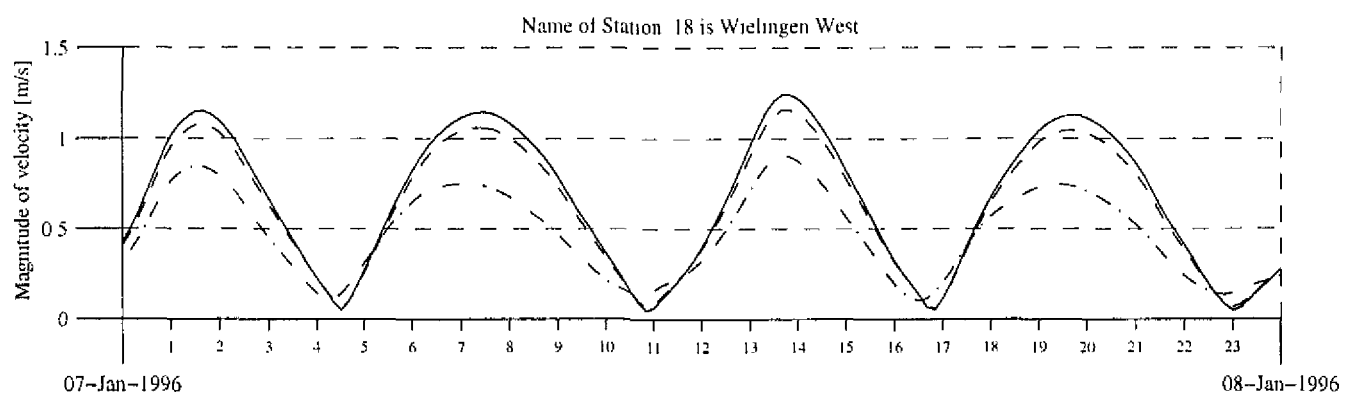
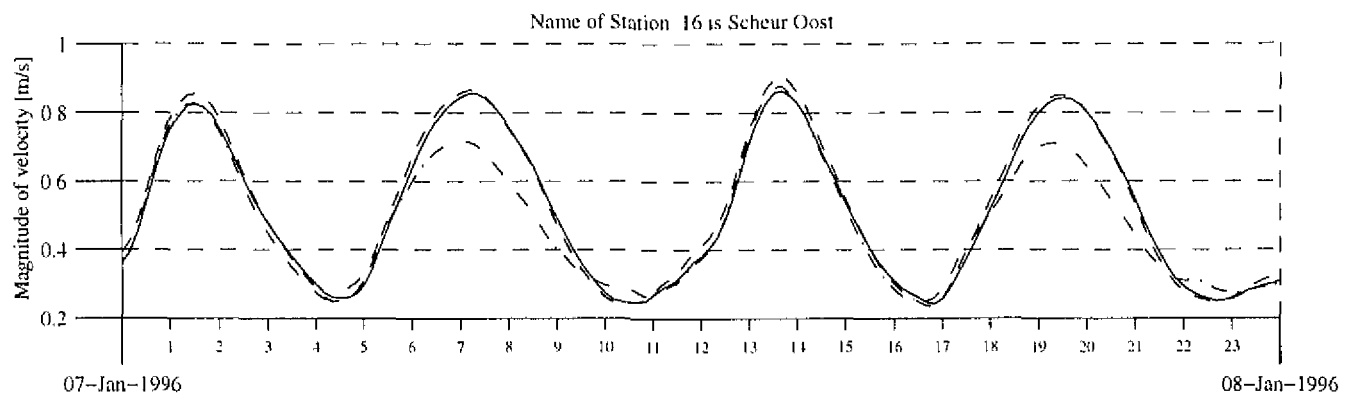
- referentieberekening (4), A
- Scheur/Wielingen en Westerschelde 1971/1974 (14), A en B
- Afgevlakt mondingsgebied en opgelegdestroomrichting in de hals (10), A
- Scheur Wielingen 1971 (11), B
- midden/oostelijk deel Westerschelde 1971 (13), B



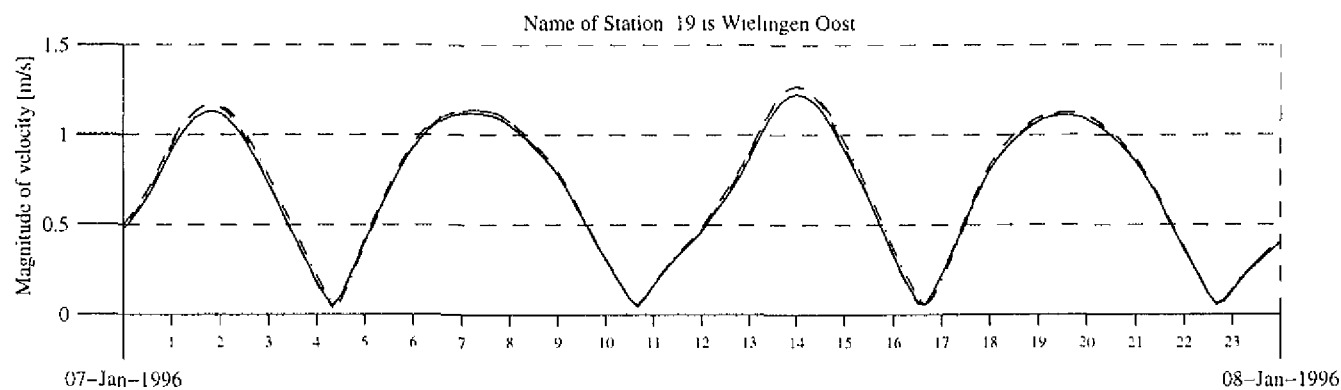
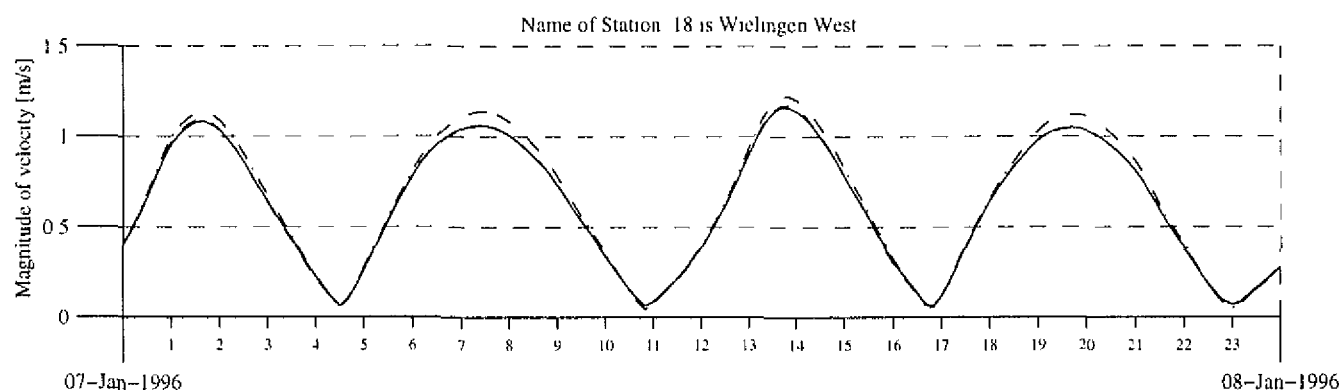
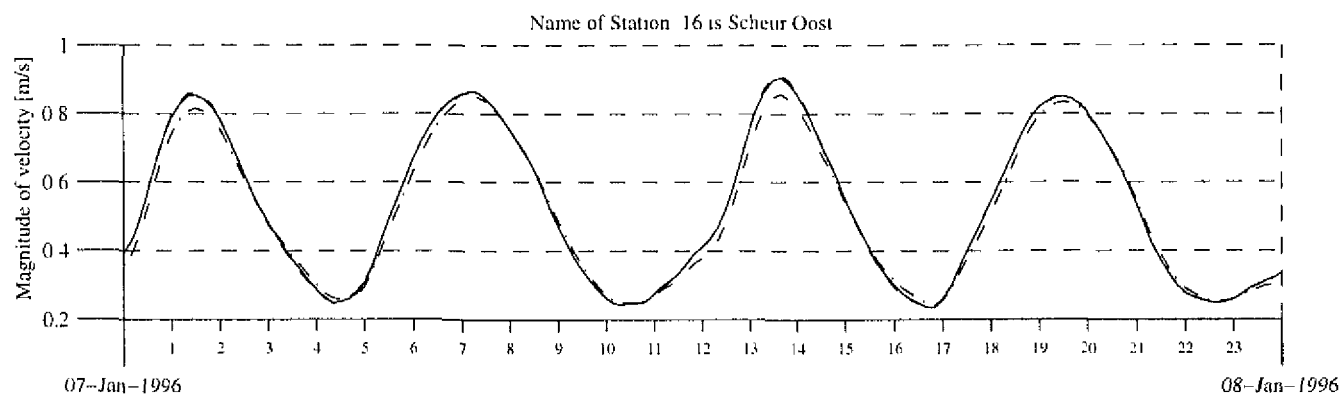
..... Referentie berekening
 - - - Variant: Mid/Oos+Westsch '71/'72
 - . - Variant: Afg.Mond.+opg.str. hals



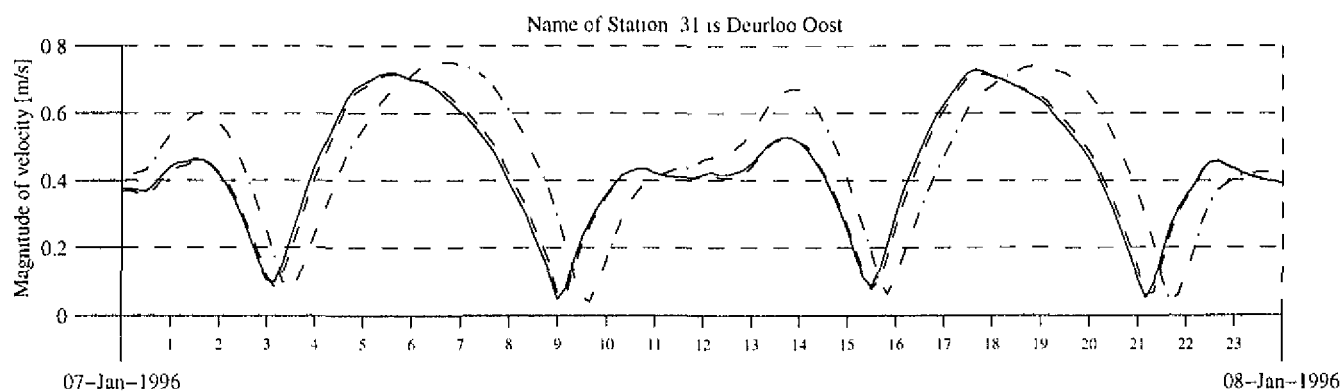
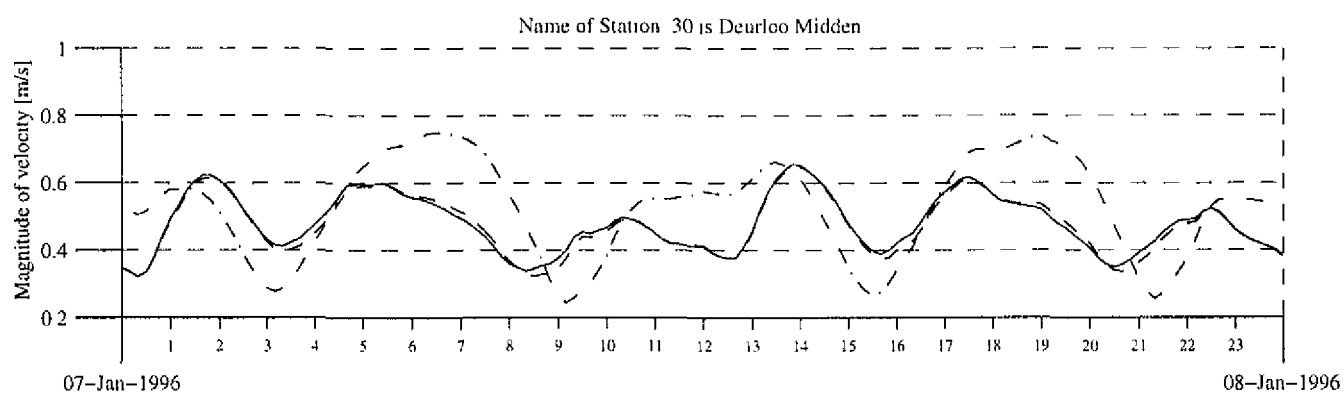
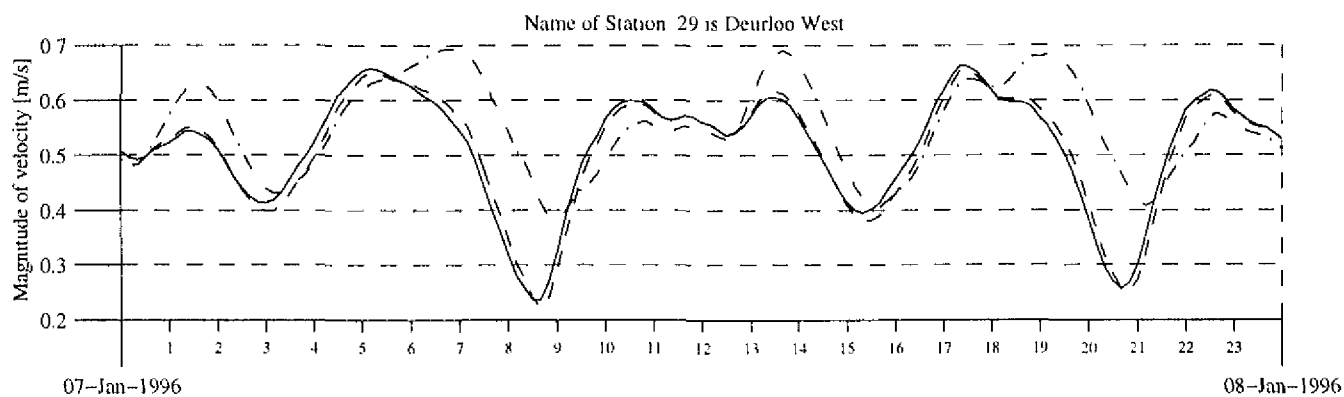
- - - Variant: Mid/Oos+Westersch '71/'72
 - - - Variant Scheur/Wiel '71
 - - - Variant: Mid/Oos Westerschelde '71



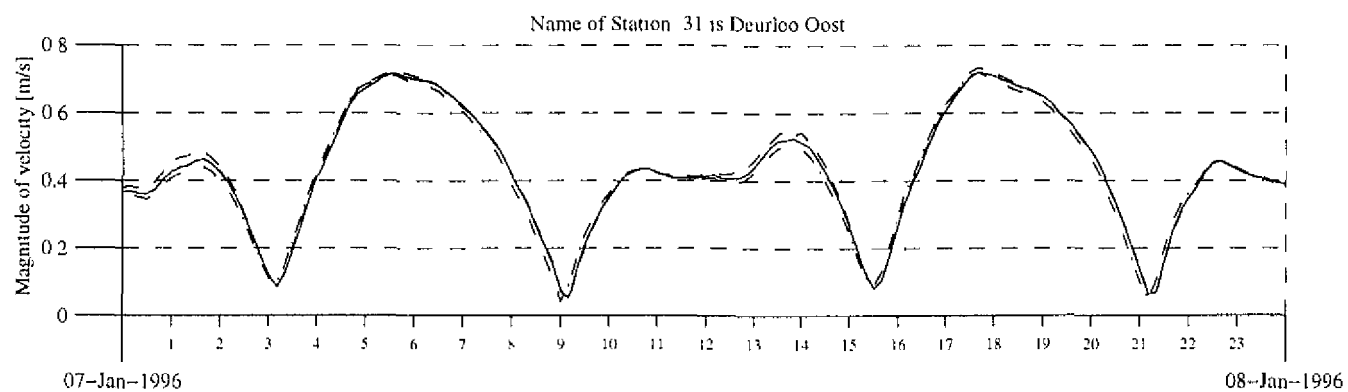
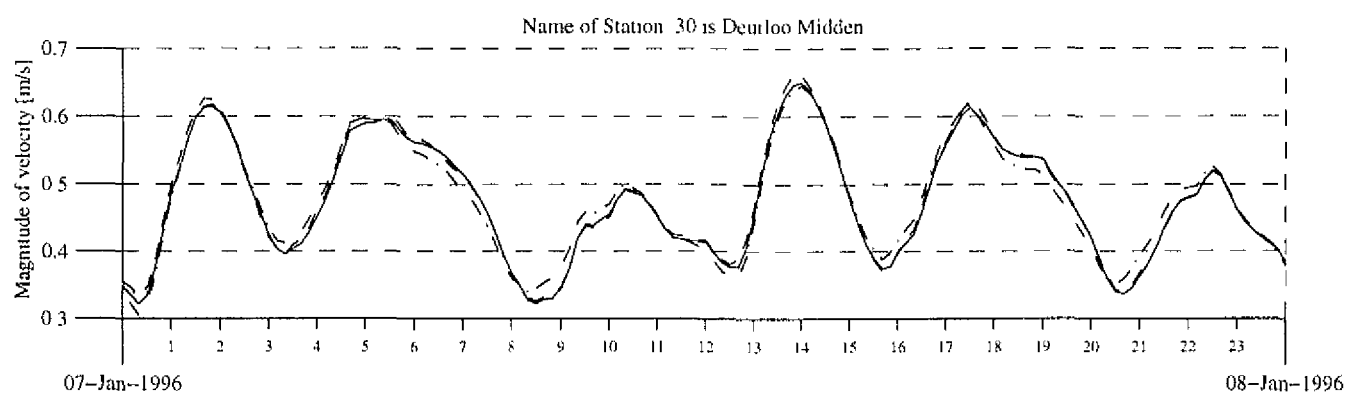
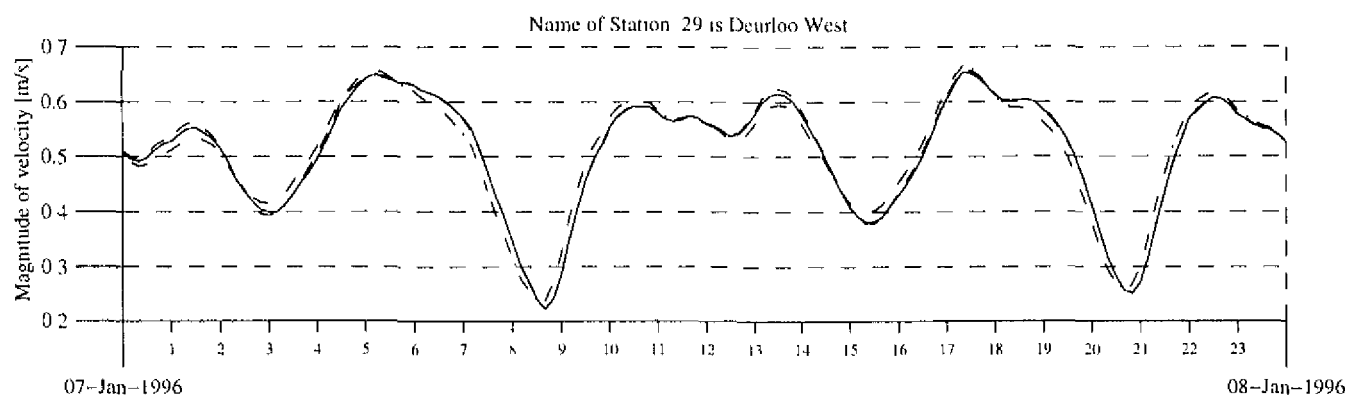
- Referentie berekening
- - - Variant: Mid/Oos+Westsch'71/'72
- . - Variant: Afg.Mond +opg str' hals



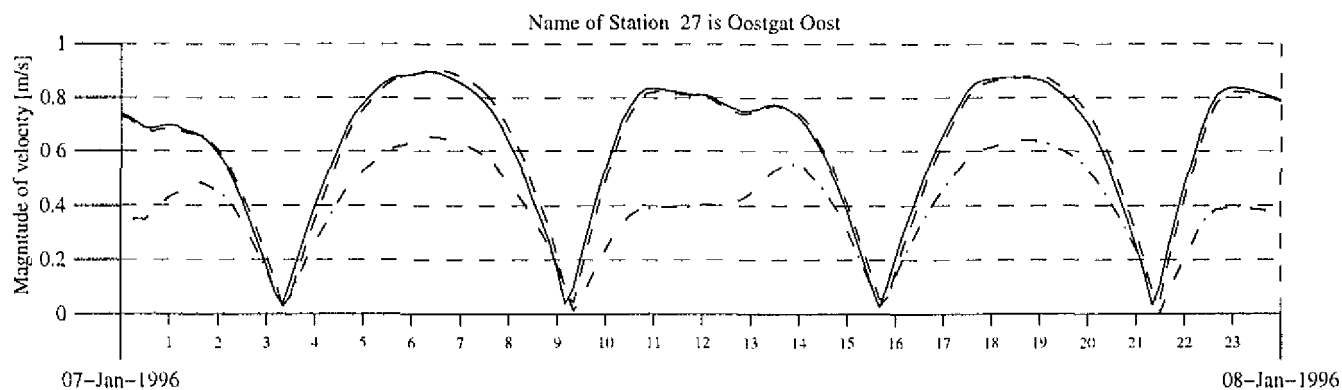
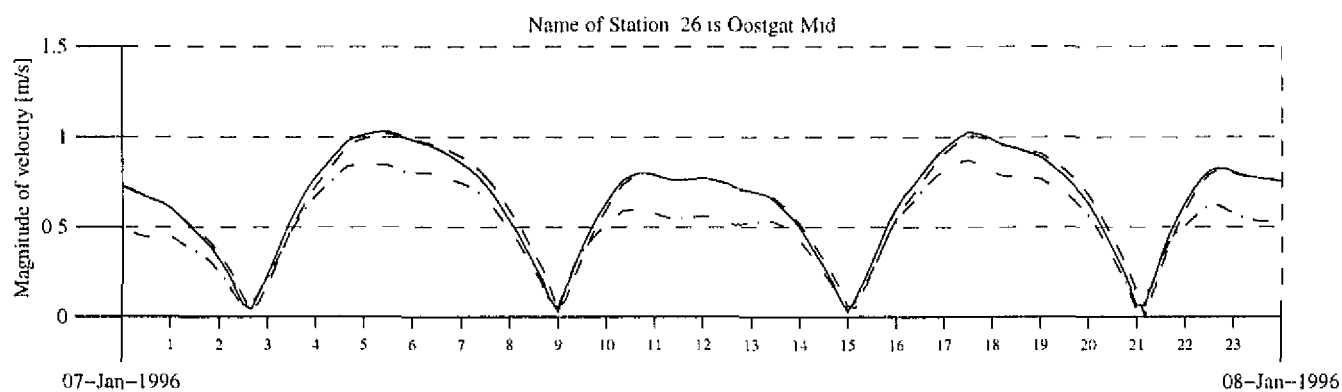
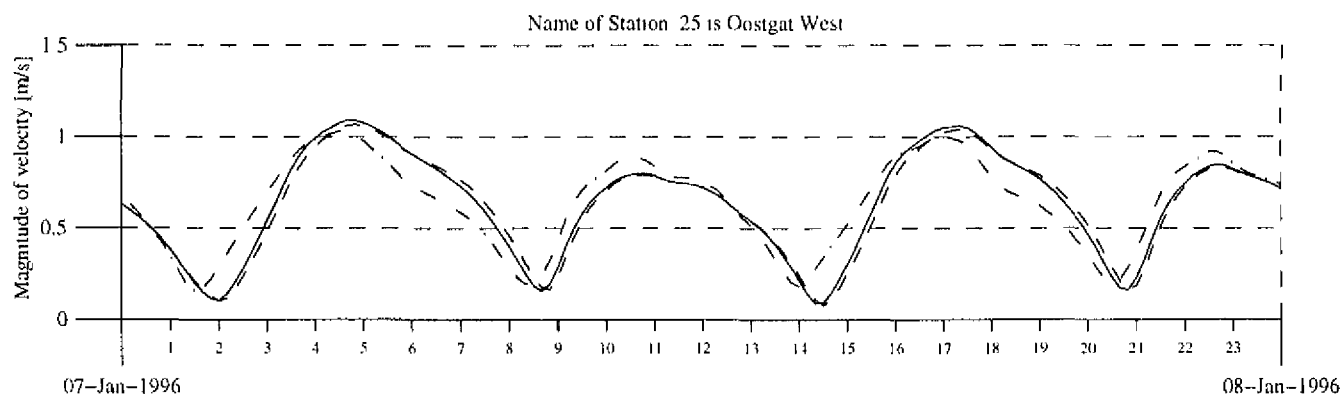
— Variant: Mid/Oos+Westersch'71/'72
 - - - Variant: Scheur/Wiel.'71
 - - - Variant: Mid/Oos Westerschelde '71



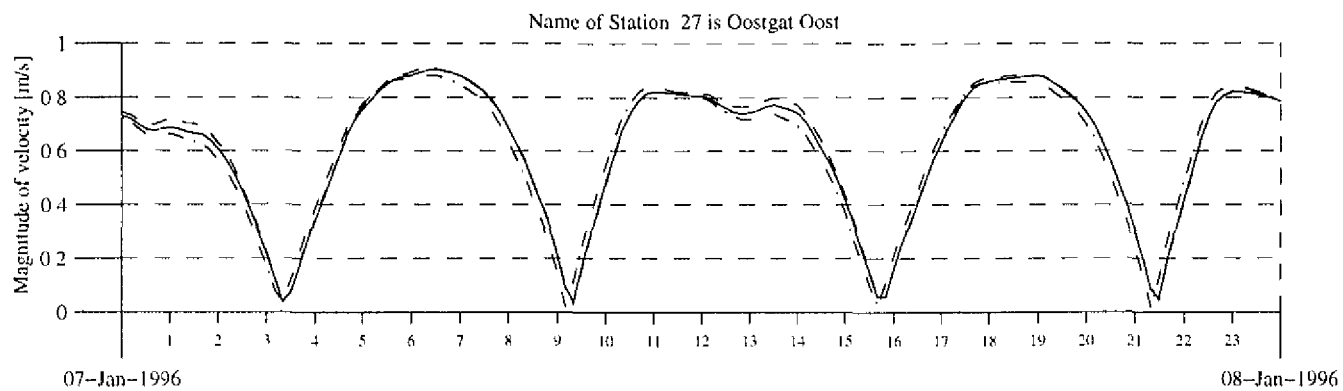
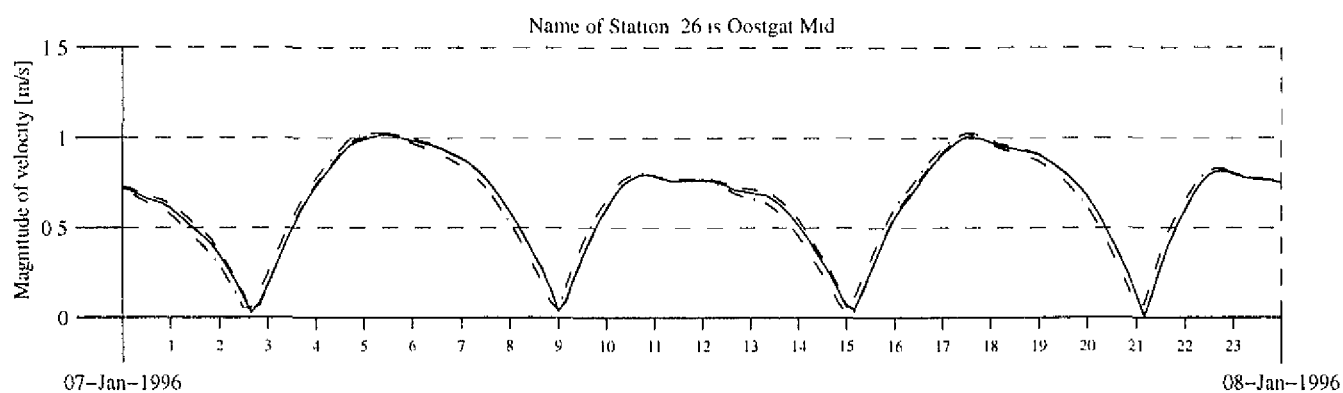
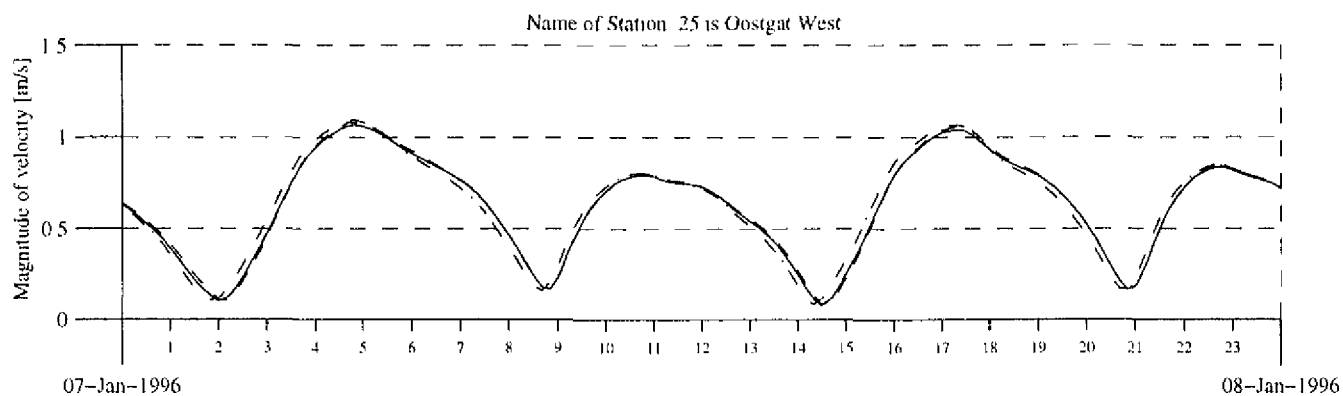
- Referentie berekening
- - - Variant: Mid/Oos+Westsch '71/'72
- . - Variant: Afg.Mond +opg.str. hals



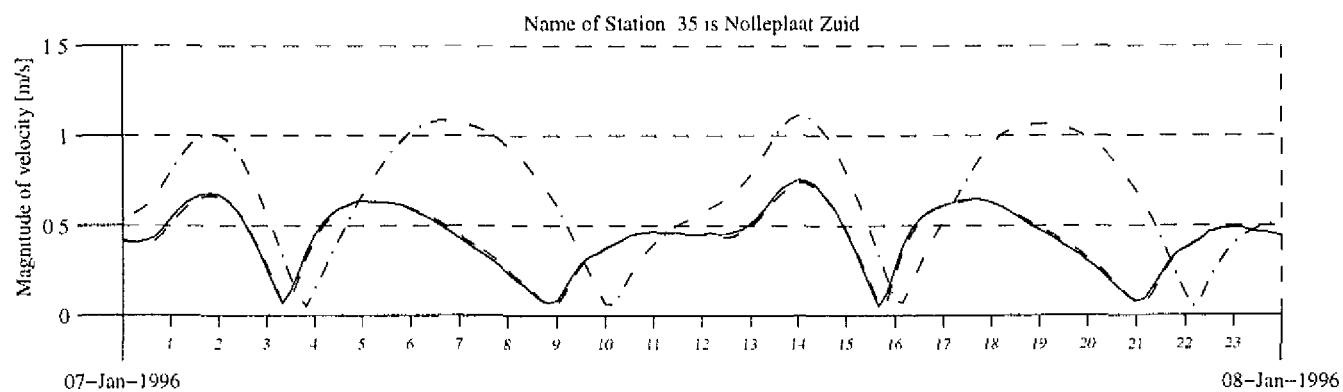
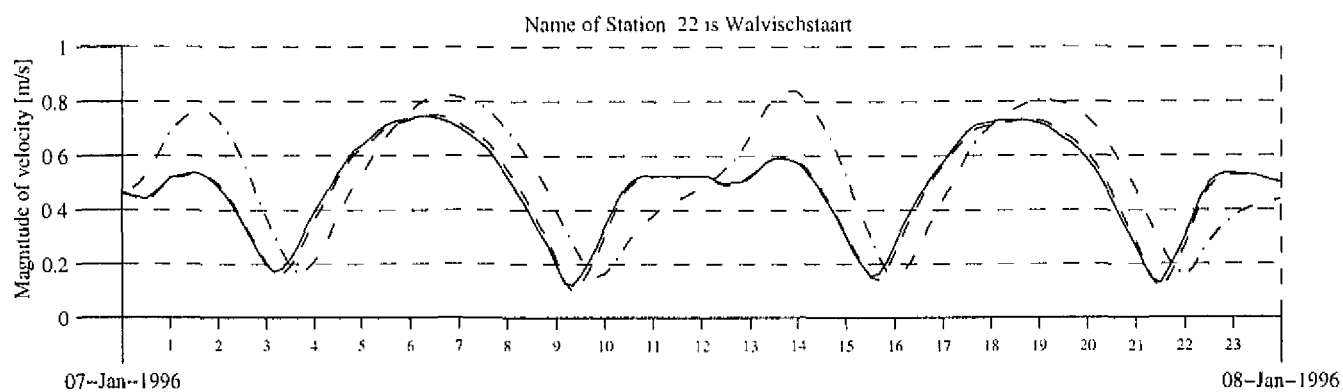
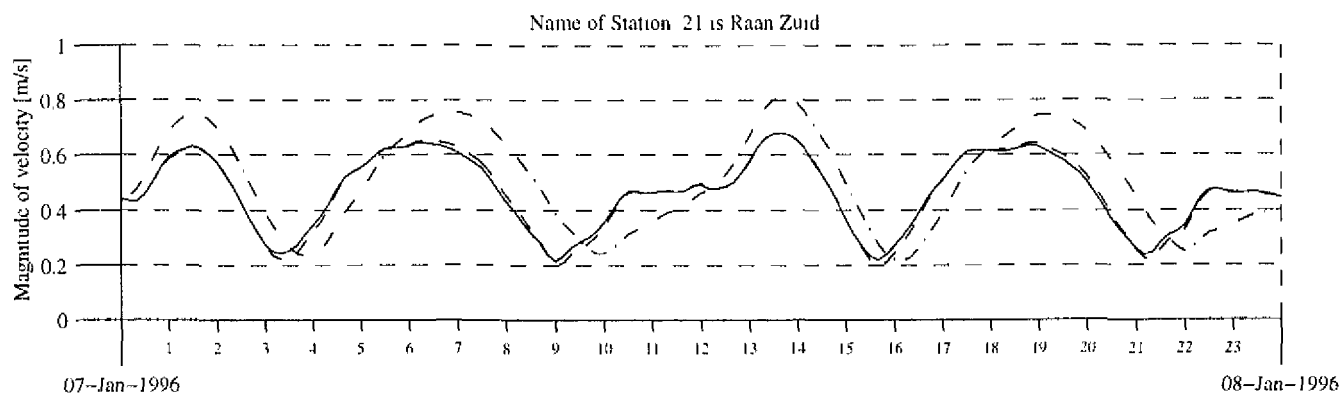
— Variant Mid/Oos+Westsch '71/'72
 - - Variant: Scheur/Wiel '71
 - - Variant: Mid/Oos Westerschelde '71



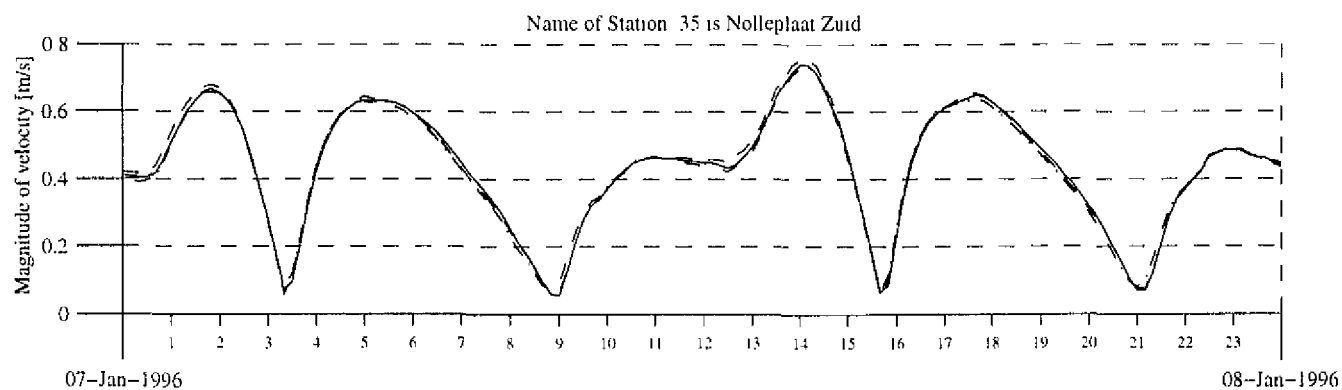
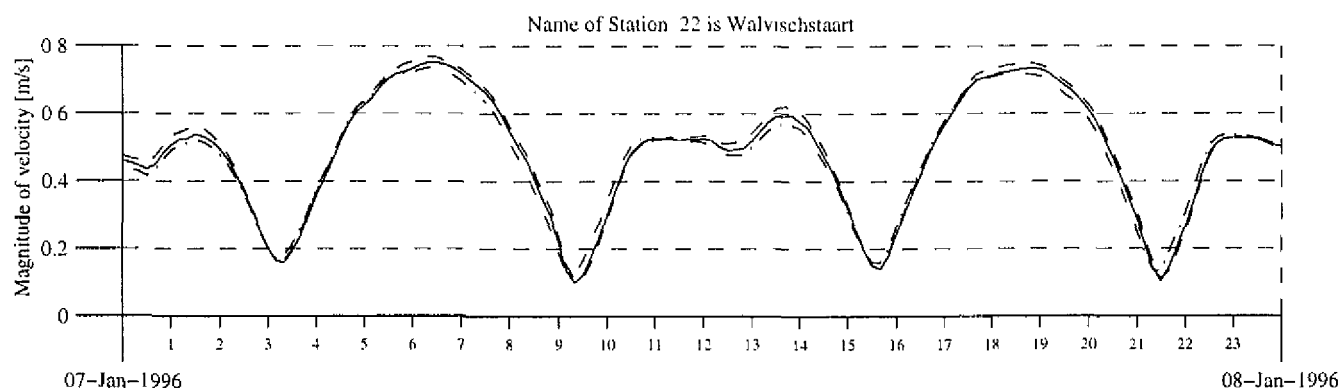
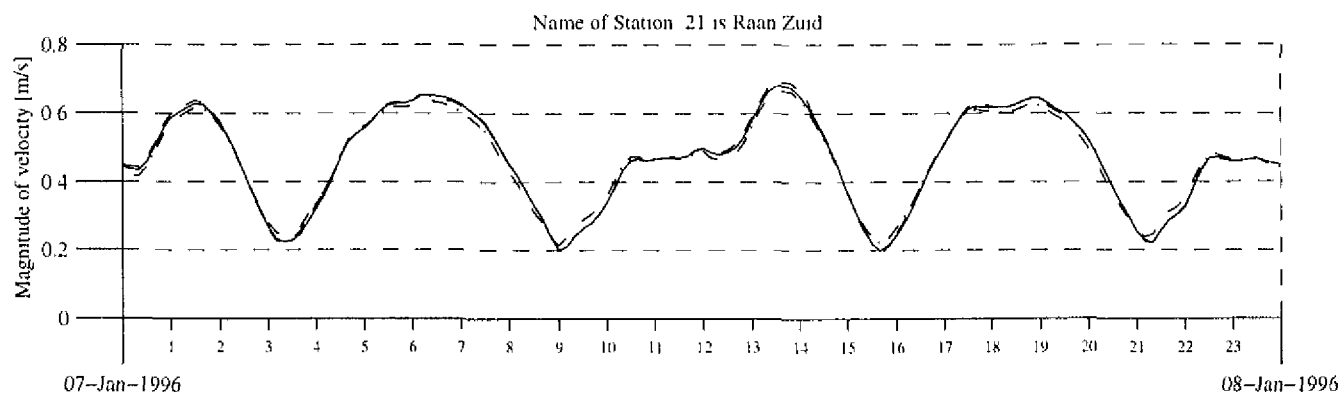
— Referentie berekening
 - - - Variant: Mid/Oos+ Westsch '71/'72
 - . - Variant: Afg.Mond.+opg.str. hals



— Variant. Mid/Oos+Westsch '71/'72
 - - - Variant. Scheur/Wiel. '71
 - . - Variant. Mid/Oos Westerschelde '71



— Referentie berekening
 - - - Variant: Mid/Oos+Westsch'71/'72
 . . . Variant: Afg Mond.+opg.str. bals



— Variant: Mid/Oos+Westsch '71/'72
 - - -Variant: Scheur/Wiel '71
 - . - Variant. Mid/Oos Westerschelde '71

Bijlage 6 Schuifspanningen

Voor de zandbeweging ten gevolge van de waterbeweging zijn vooral de stroomsnelheden aan de bodem van belang. Hier wordt sediment opgewoeld en het overgrote deel van sediment verplaatst. Om meer inzicht te krijgen in de waterbeweging bij de bodem zijn de schuifspanningen ten gevolge van stroming berekend en op diverse wijzen gepresenteerd.

Belangrijk neveneffect van deze exercitie is dat berekende stromingsveranderingen veel duidelijker zichtbaar zijn in de modelresultaten. Schuifspanningen (zandtransporten) reageren namelijk veel sterker dan snelheden.

Voor het berekenen van schuifspanningen zijn de volgende formuleringen toegepast:

$$\tau = \rho \cdot g \cdot \frac{u^2}{C^2}$$

$$C = \frac{h^{\frac{1}{6}}}{m}$$

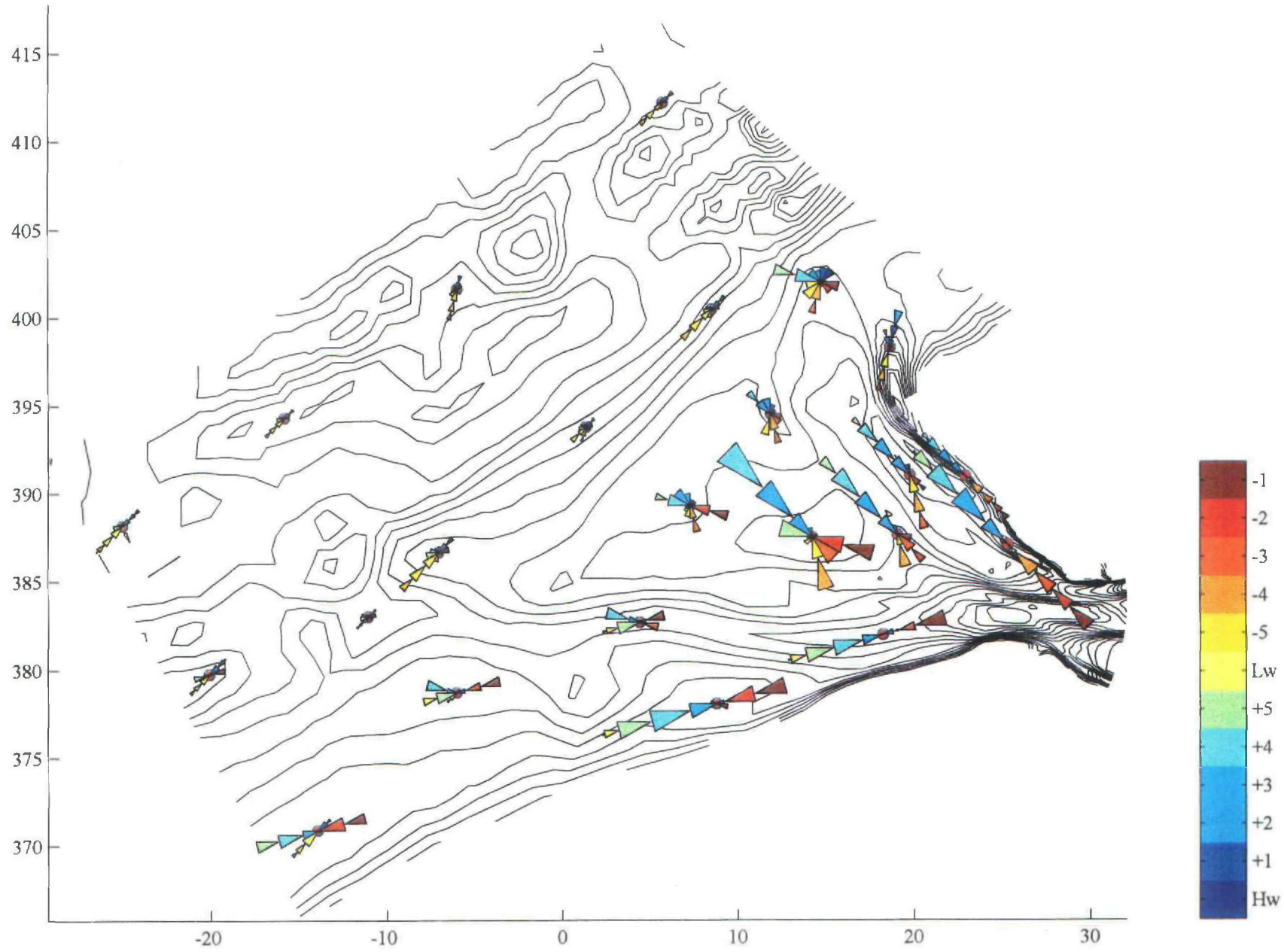
Deze bijlage is als volgt opgebouwd:

- Bijlage 6.1 overzicht schuifspanningsrozen referentieberekening (kleur)
- Bijlage 6.2 Getijgemiddelde bodemschuifspanningen, berekening 6, 7, 8 en 10
- Bijlage 6.3 Getijgemiddelde bodemschuifspanningen, berekening 11, 12, 13, 14
- Bijlage 6.4 Getijgemiddelde bodemschuifspanningen, berekening 5, 9 en 15
- Bijlage 6.5 Verschillen getijgemiddelde bodemschuifspanningen, ber. 6, 7, 8 en 10
- Bijlage 6.6 Verschillen getijgemiddelde bodemschuifspanningen, ber. 11, 12, 13, 14
- Bijlage 6.7 Verschillen getijgemiddelde bodemschuifspanningen, ber. 5, 9 en 15
- Bijlage 6.8 Verschillen getijgemiddelde bodemschuifspanningen, ber. 10 - 6

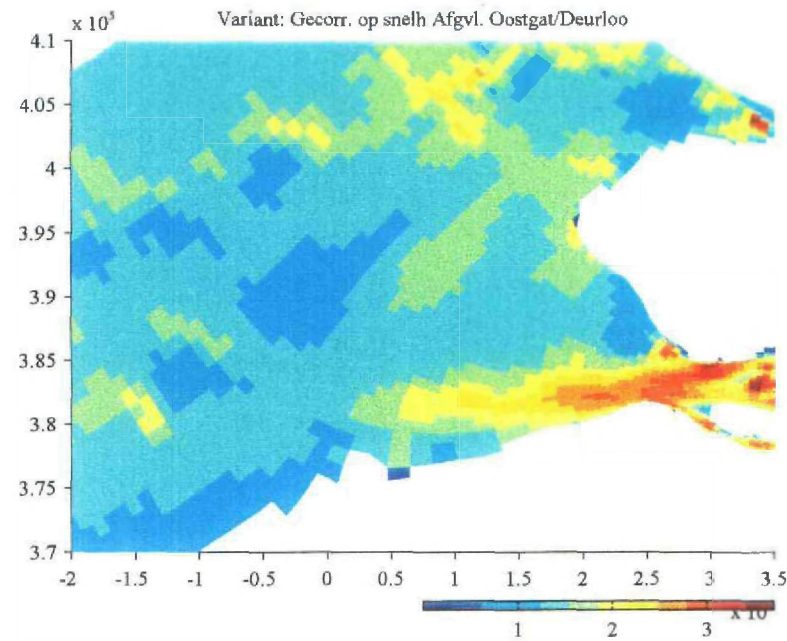
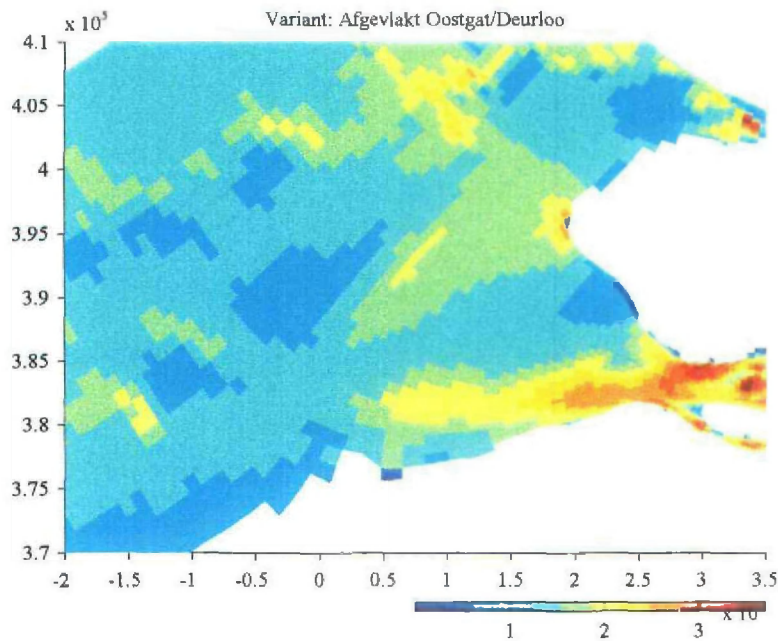
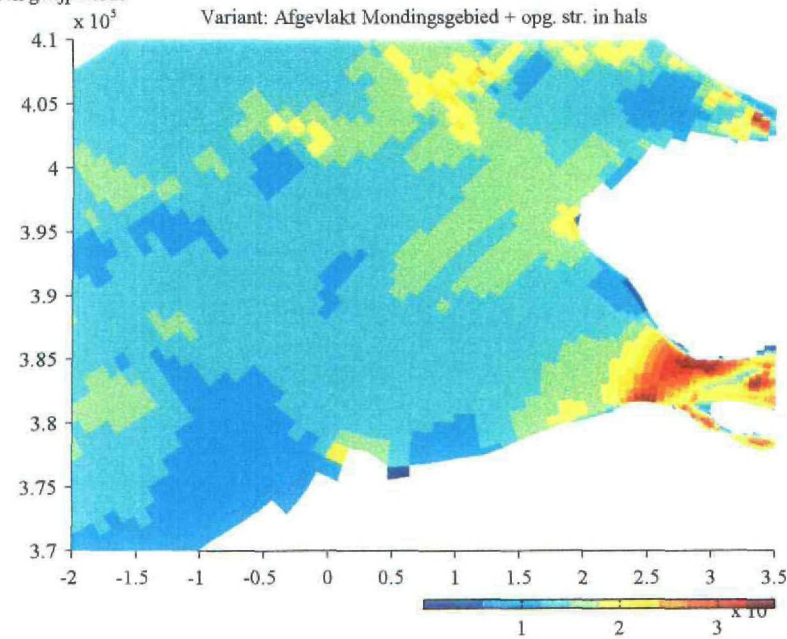
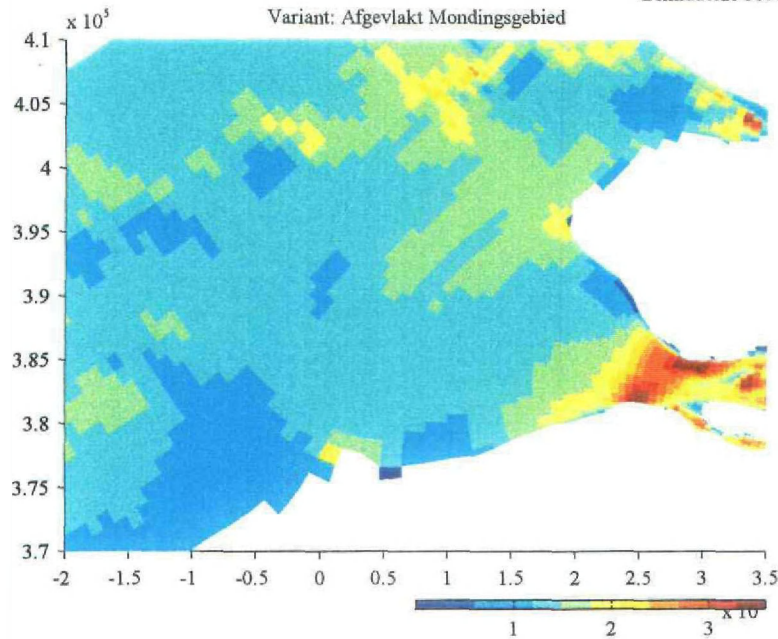
De toegepaste nummering is:

1. KUSTSTROOK versie januari 1998
2. uitbreiding tot Gent
3. aanpassing ruwheid Westerschelde
4. aanpassing ruwheid mondingsgebied = referentieberekening
5. springtij
6. afgevlakt mondingsgebied
7. afgevlakt Oostgat/Deurloo systeem
8. aangepast afgevlakt Oostgat/Deurloo systeem
9. opgelegde stroomrichting in de hals
10. afgevlakt mondingsgebied en opgelegde stroomrichting in de hals
11. Scheur/Wielingen 1971
12. westelijk deel Westerschelde 1972
13. midden/oostelijk deel Westerschelde 1971
14. Scheur/Wielingen en Westerschelde 1971/1972
15. zonder stormvloedkering Oosterschelde

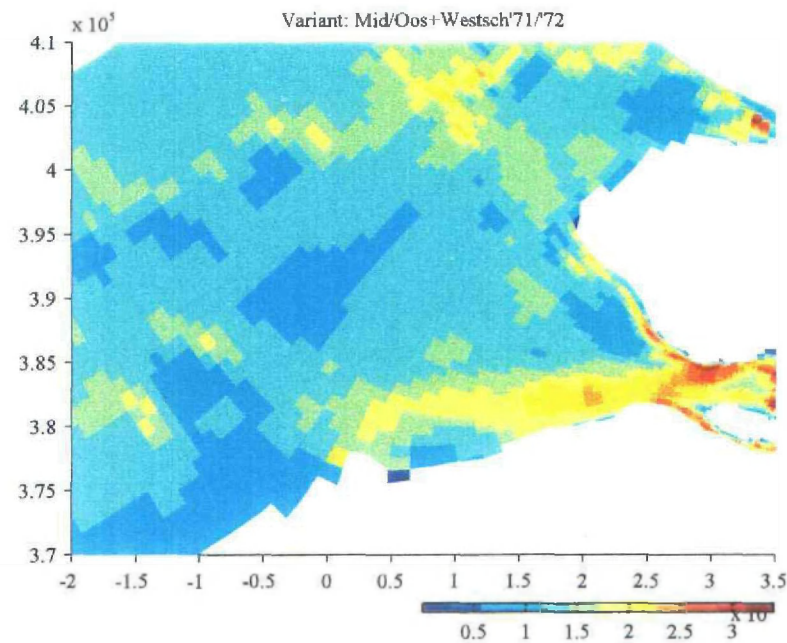
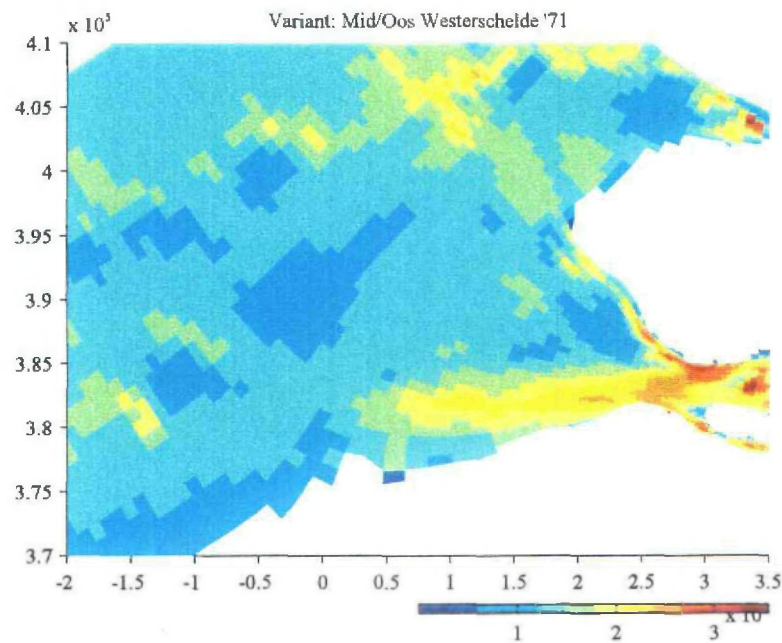
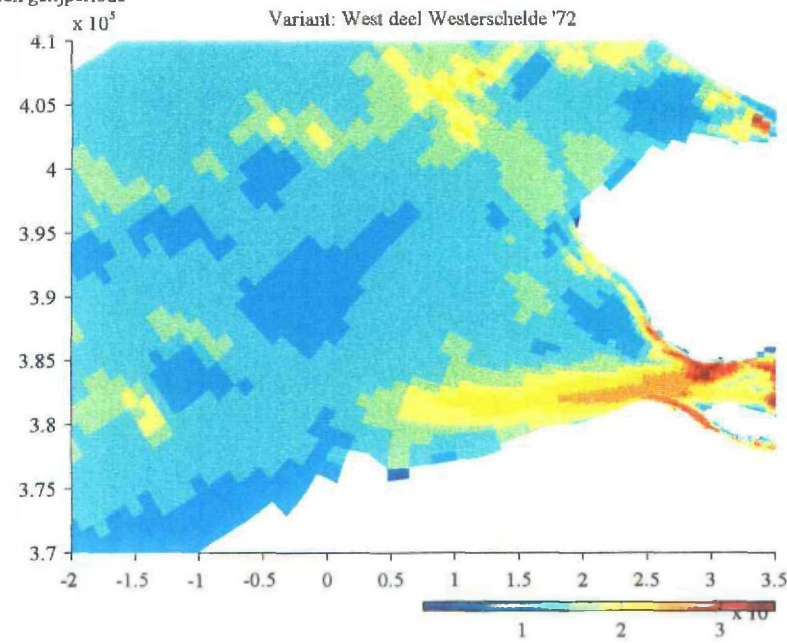
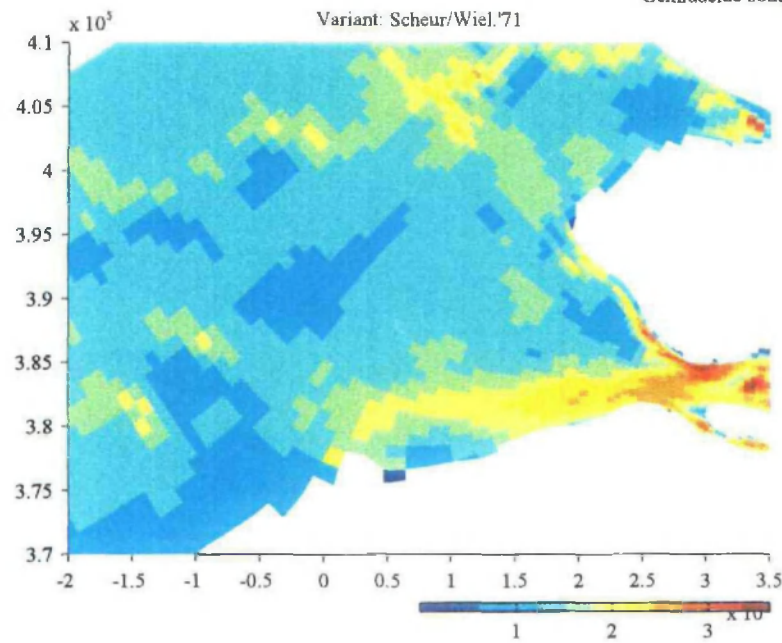
Bodemschuifspanning over een getijperiode : Referentie berekening Basis



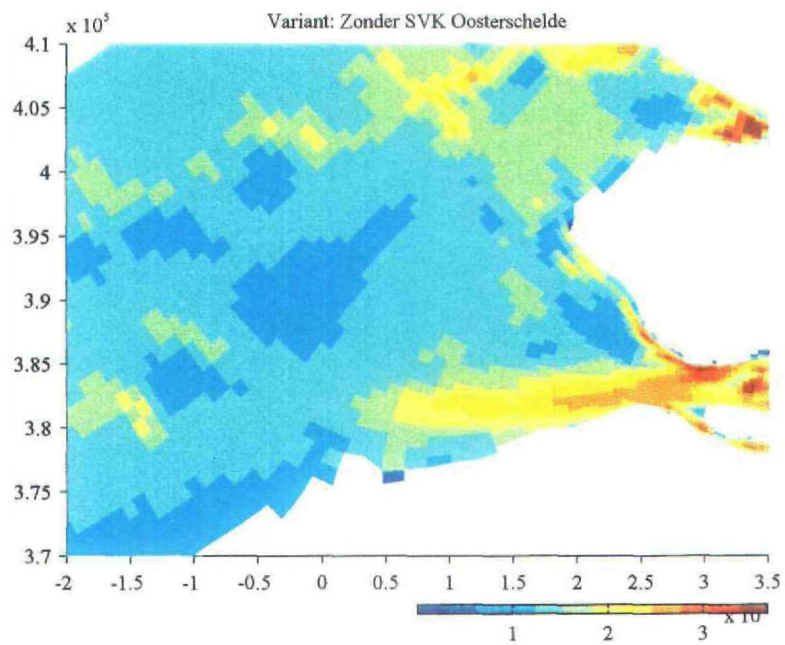
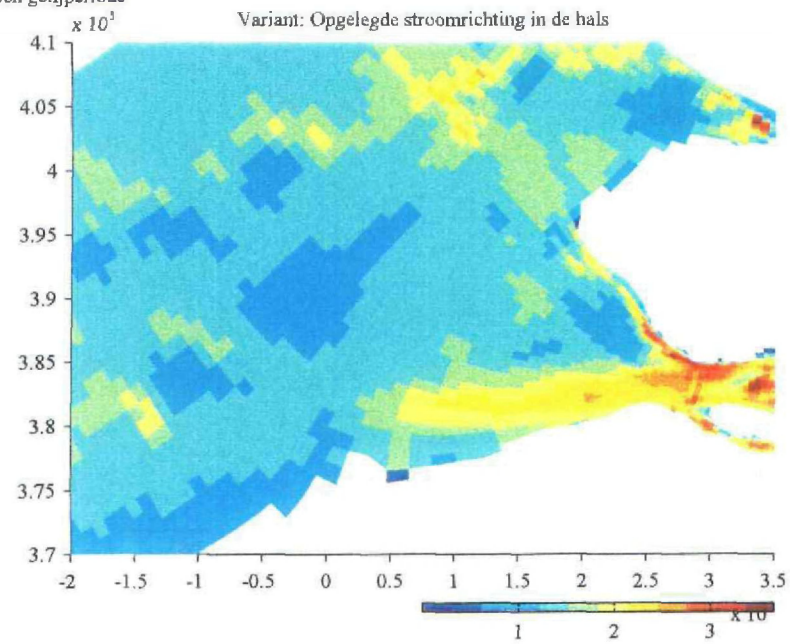
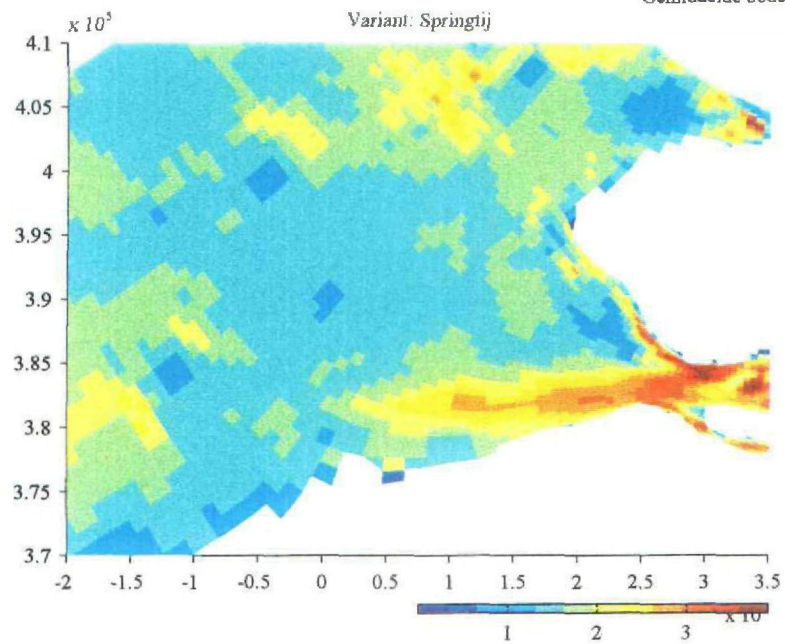
Gemiddelde bodemschuifspanning in een getijperiode



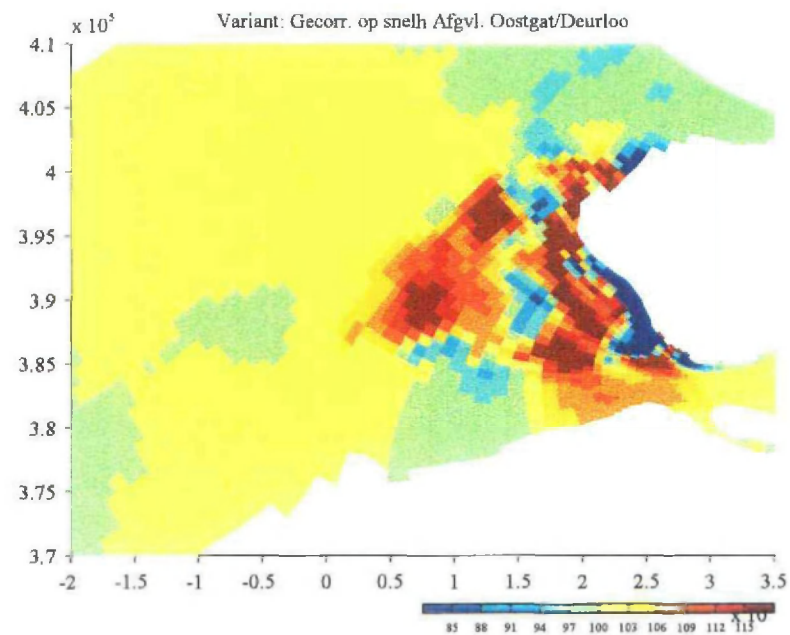
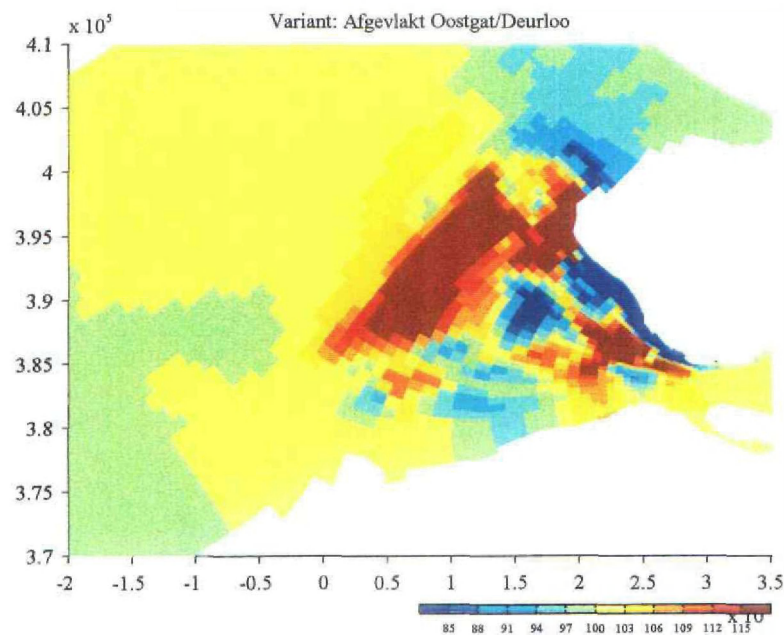
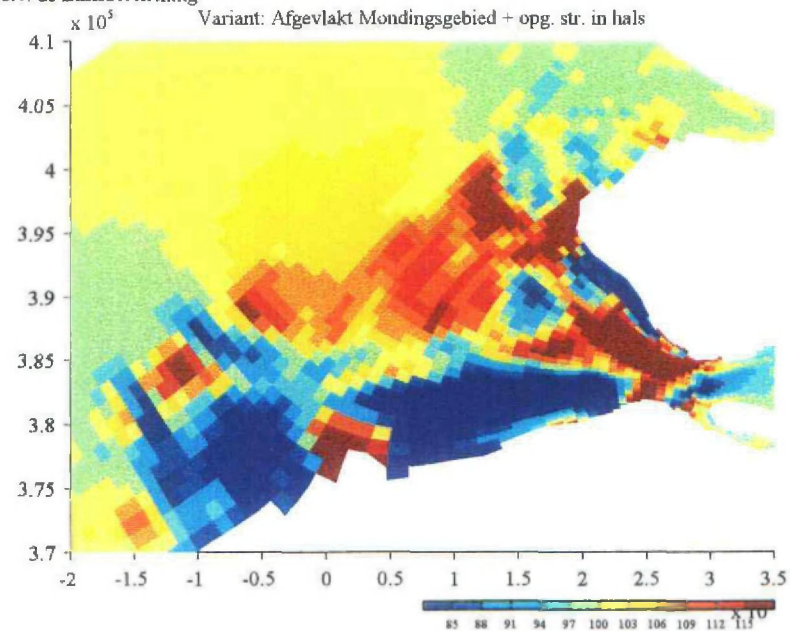
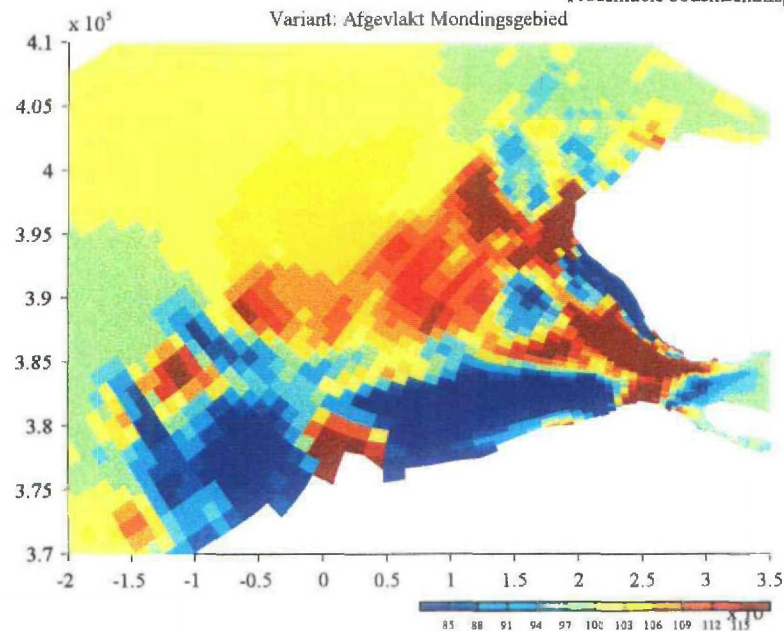
Gemiddelde bodemschuifspanning in een getijperiode



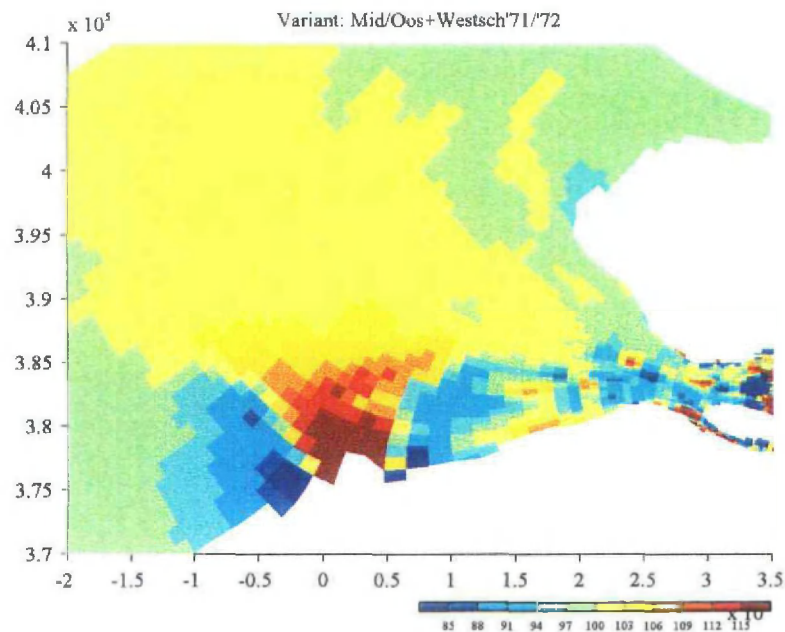
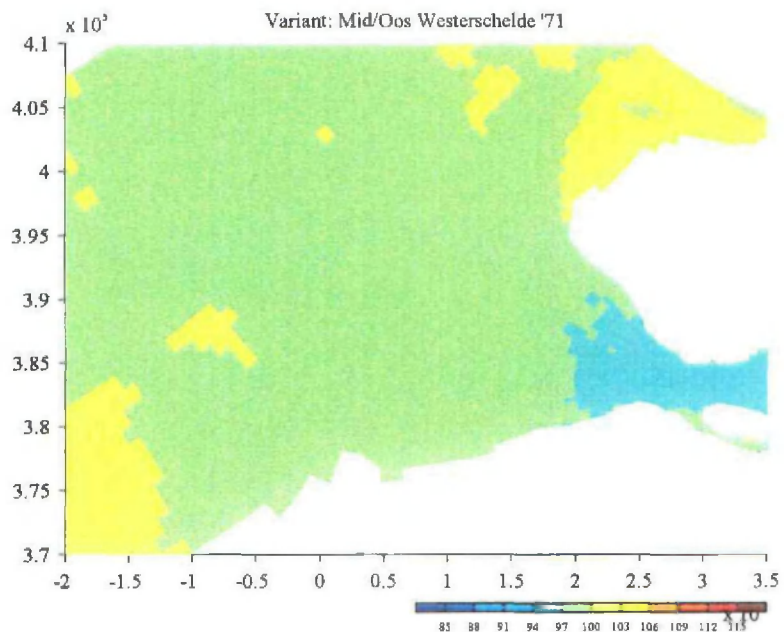
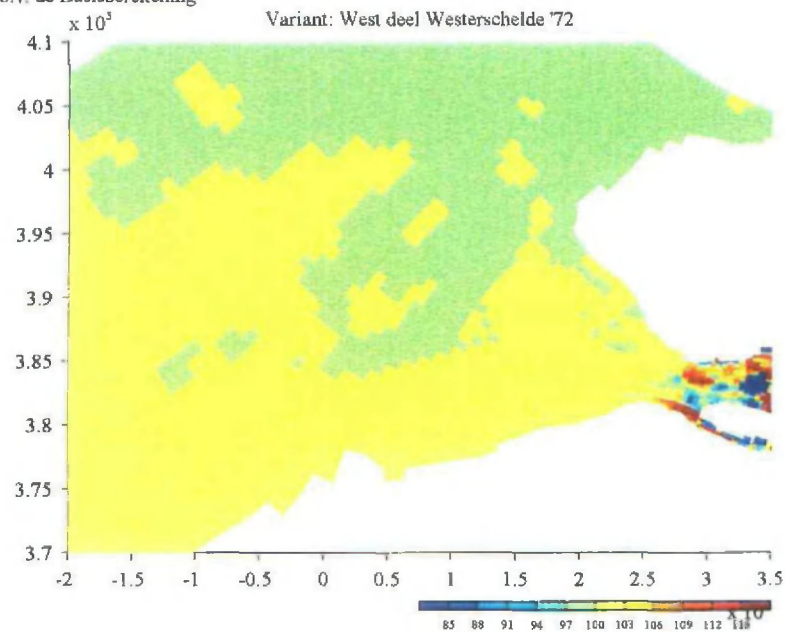
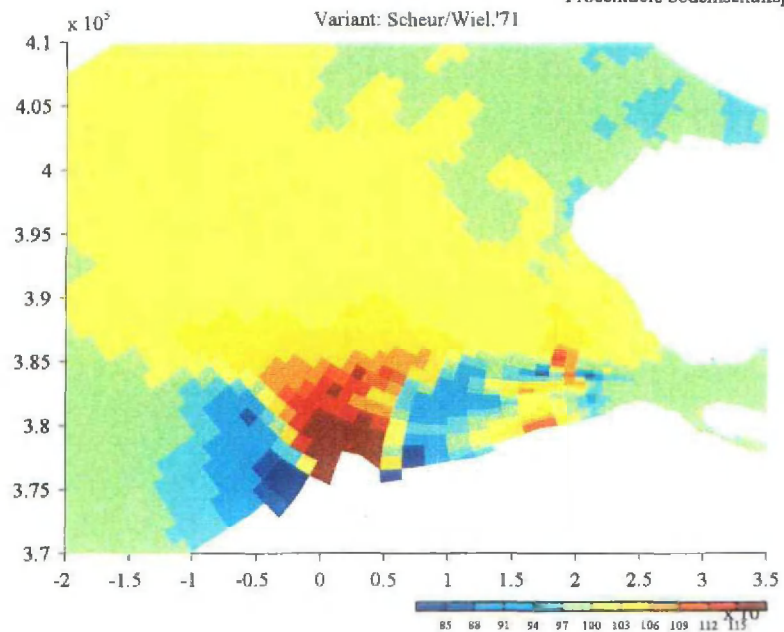
Gemiddelde bodemschuifspanning in een getijperiode



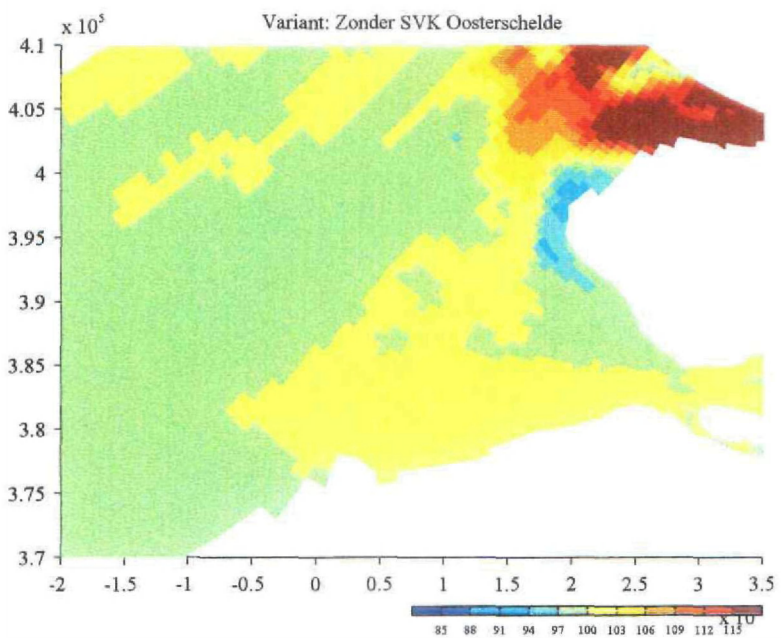
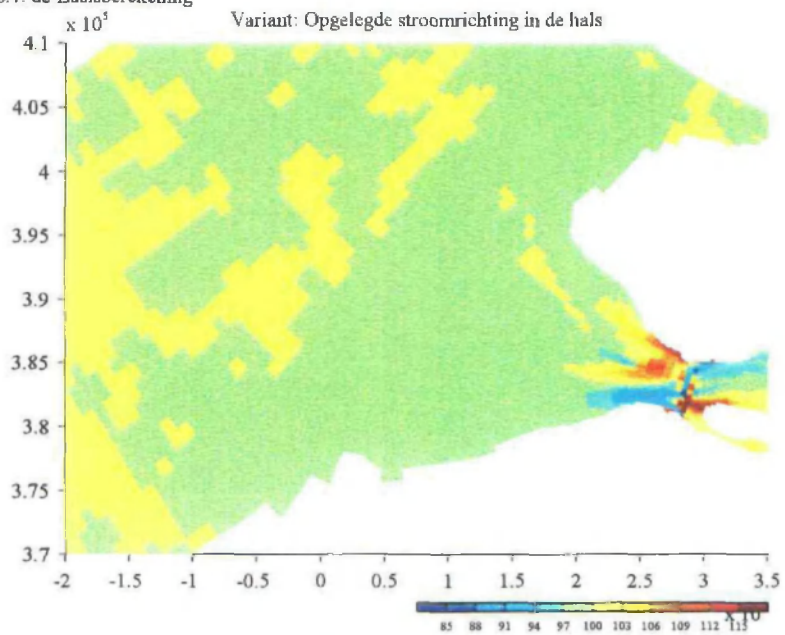
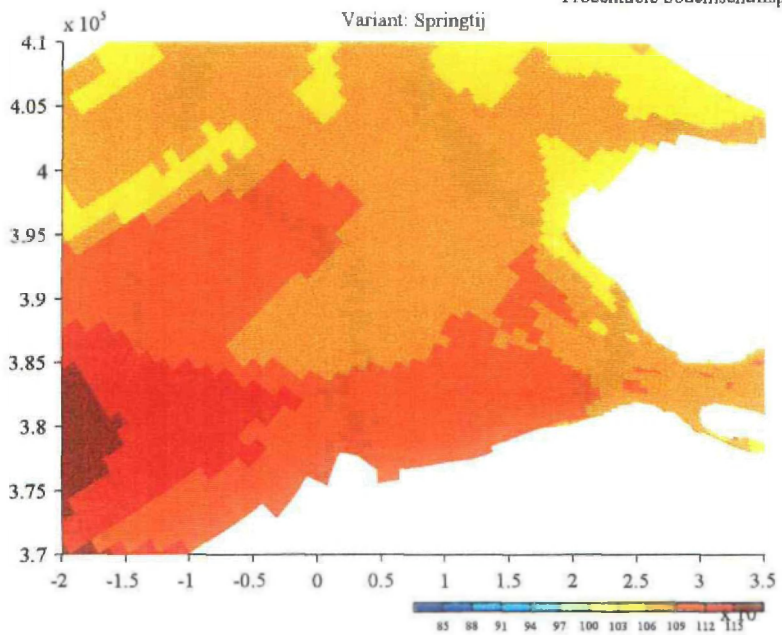
Procentuele bodemschuifspanning-verschillen t.o.v. de Basisberekening



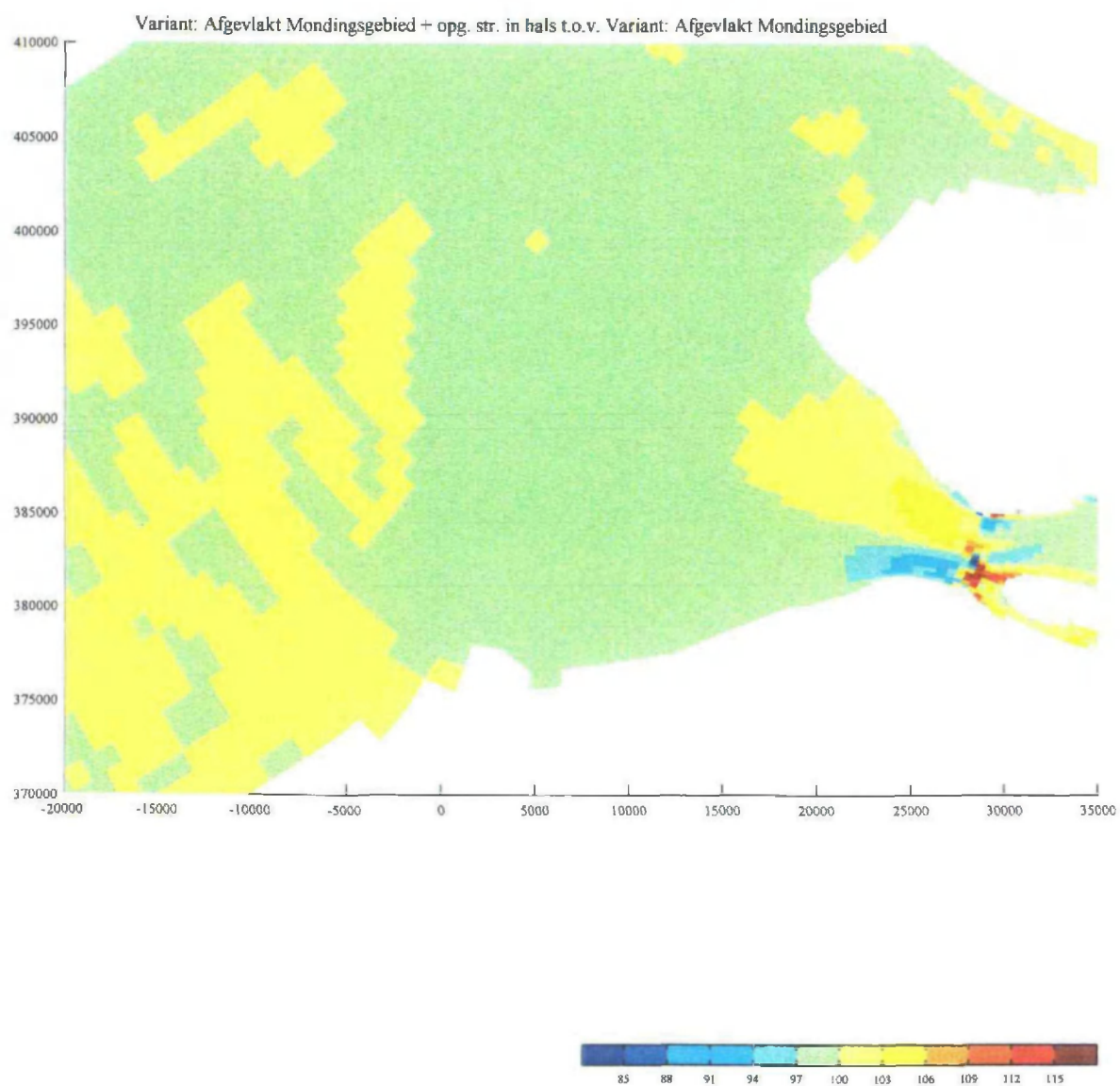
Procentuele bodemschuifspanning-verschillen t.o.v. de Basisberekening



Procentuele bodemschuifspanning-verschillen t.o.v. de Basisberekening



Procentuele bodemschuifspanning-verschillen



Bijlage 7 Getijverschillen, getijvolumina en kenteringstijdstippen

In deze bijlage wordt een overzicht gegeven van de getijverschillen ter plaatse van enkele waterstandstations en de getijvolumina en tijdstippen van kentering in enkele debietraaien. De locaties van de waterstandstations en debietraaien zijn weergegeven in figuur 2.4. De meetraaien wijken hiervan af (zie bijlage 2) en paragraaf 2.3.

In verband met de beperkte ruimte voor tekst in de tabellen zijn de berekeningen genummerd. De toegepaste nummering is:

1. KUSTSTROOK versie januari 1998
2. uitbreiding tot Gent
3. aanpassing ruwheid Westerschelde
4. aanpassing ruwheid mondingsgebied = referentieberekening
5. springtij
6. afgevlakt mondingsgebied
7. afgevlakt Oostgat/Deurloo systeem
8. aangepast afgevlakt Oostgat/Deurloo systeem
9. opgelegde stroomrichting in de hals
10. afgevlakt mondingsgebied en opgelegde stroomrichting in de hals
11. Scheur/Wielingen 1971
12. westelijk deel Westerschelde 1972
13. midden/oostelijk deel Westerschelde 1971
14. Scheur/Wielingen en Westerschelde 1971/1972
15. zonder stormvloedkering Oosterschelde

Deze bijlage is als volgt opgebouwd:

- | | |
|-------------|--------------------------------------|
| Bijlage 7.1 | Getijverschillen |
| Bijlage 7.2 | Ebvolumina |
| Bijlage 7.3 | Vloedvolumina |
| Bijlage 7.4 | Tijdstip kentering van vloed naar eb |
| Bijlage 7.5 | Tijdstip kentering van eb naar vloed |

	getijverschil referentie- berekening (m + NAP)	toename getijverschillen t.o.v. referentieberekening (mm)									
		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Westkapelle	3.58	16	1	29	-2	15	-6	-1	-4	-18	1
Zeebrugge	4.08	0	3	20	-0	1	-6	-1	-4	-13	-5
Cadzand	4.07	6	10	12	-3	7	-15	-1	-0	-26	-5
Vlissingen	4.18	-55	30	25	-4	-61	-26	-5	-10	-41	-4
Terneuzen	4.61	-64	14	30	-22	-64	-26	1	-17	-51	-4
Bath	5.29	-58	2	5	-25	-57	-21	-16	-336	-309	-3

6. afgevlakt mondingsgebied
7. afgevlakt Oostgat/Deurloo systeem
8. aangepast afgevlakt Oostgat/Deurloo systeem
9. opgelegde stroomrichting in de hals
10. afgevlakt mondingsgebied en opgelegde stroomrichting in de hals
11. Scheur/Wielingen 1971
12. westelijk deel Westerschelde 1972
13. midden/oostelijk deel Westerschelde 1971
14. Scheur/Wielingen en Westerschelde 1971/1972
15. zonder stormvloedkering Oosterschelde

	vloed referentie- berekening (m + NAP)	toename vloedvolume t.o.v. referentieberekening (Mm ³)									
		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
raai 14 Scheur	1010	-268	1	2	-1	-269	-75	0	-4	-74	6
raai 14 Vlakte van de Raan	750	201	109	63	-2	200	23	0	-7	20	4
raai 14 Oostgat/Deurloo	690	6	-92	-68	-5	4	12	0	-13	2	-9
raai 12 Wielingen	1160	-89	70	102	-3	-90	-18	2	-17	-23	4
raai 12 Deurloo	200	162	55	31	-4	160	5	1	-5	0	-1
raai 12 Oostgat	200	-50	-97	-111	-3	-50	3	0	-4	-1	-4
raai 11 (bij Vlissingen)	1320	-11	7	6	-5	-13	-5	3	-25	-20	0
raai 7 (bij Terneuzen)	860	-8	4	4	-3	-9	-3	0	-27	-23	0

6. afgevlakt mondingsgebied
7. afgevlakt Oostgat/Deurloo systeem
8. aangepast afgevlakt Oostgat/Deurloo systeem
9. opgelegde stroomrichting in de hals
10. afgevlakt mondingsgebied en opgelegde stroomrichting in de hals
11. Scheur/Wielingen 1971
12. westelijk deel Westerschelde 1972
13. midden/oostelijk deel Westerschelde 1971
14. Scheur/Wielingen en Westerschelde 1971/1972
15. zonder stormvloedkering Oosterschelde

	ebvolume referentie- berekening (m + NAP)	toename ebvolume t.o.v. referentieberekening (Mm ³)									
		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
raai 14 Scheur	860	-321	-23	-6	-4	-322	-83	1	-8	-74	6
raai 14 Vlake van de Raan	670	221	127	84	-3	220	21	0	-7	20	5
raai 14 Oostgat/Deurloo	810	24	-82	-78	-1	23	4	0	-8	2	-8
raai 12 Wielingen	1150	-148	45	76	-13	-153	-13	3	-18	-23	1
raai 12 Deurloo	190	187	48	22	2	190	1	0	-3	0	-1
raai 12 Oostgat	180	-14	-72	-83	2	-13	2	0	-2	-1	-1
raai 11 (bij Vlissingen)	1290	-11	7	7	-5	13	-6	3	-23	-20	0
raai 7 (bij Terneuzen)	840	-8	4	4	-3	-9	-3	0	-24	-23	0

6. afgevlakt mondingsgebied
7. afgevlakt Oostgat/Deurloo systeem
8. aangepast afgevlakt Oostgat/Deurloo systeem
9. opgelegde stroomrichting in de hals
10. afgevlakt mondingsgebied en opgelegde stroomrichting in de hals
11. Scheur/Wielingen 1971
12. westelijk deel Westerschelde 1972
13. midden/oostelijk deel Westerschelde 1971
14. Scheur/Wielingen en Westerschelde 1971/1972
15. zonder stormvloedkering Oosterschelde

	tijdstip kentering van vloed naar eb t.o.v. referentieberekening (min)									
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
raai 14 Scheur	-6.0	-2.1	-0.9	0.3	-5.9	-1.9	0.1	0.8	-0.9	0.5
raai 14 Vlake van de Raan	11.0	2.7	0.2	0.2	11.2	2.3	0.1	1.7	4.1	1.3
raai 14 Oostgat/Deurloo	5.2	-6.1	-3.4	-0.6	5.2	6.2	0.3	-1.4	5.0	-2.0
raai 12 Wielingen	-5.3	-4.1	-3.7	0.3	-5.0	0	0.2	1.2	1.6	1.0
raai 12 Deurloo	23.6	9.6	7.5	-0.1	23.9	3.5	0.1	1.3	3.7	-0.4
raai 12 Oostgat	11.4	0.4	-1.9	0.1	11.8	4.2	0.3	0.5	4.3	-1.3
raai 11 (bij Vlissingen)	0.6	0	0.1	0.4	0.9	1.0	0.3	1.2	2.5	0.6
raai 7 (bij Terneuzen)	0.8	0.2	0.2	0.4	1.0	1.1	0.4	0.5	2.1	0.4

6. afgevlakt mondingsgebied
7. afgevlakt Oostgat/Deurloo systeem
8. aangepast afgevlakt Oostgat/Deurloo systeem
9. opgelegde stroomrichting in de hals
10. afgevlakt mondingsgebied en opgelegde stroomrichting in de hals
11. Scheur/Wielingen 1971
12. westelijk deel Westerschelde 1972
13. midden/oostelijk deel Westerschelde 1971
14. Scheur/Wielingen en Westerschelde 1971/1972
15. zonder stormvloedkering Oosterschelde

	tijdstip kentering van eb naar vloed t.o.v. referentieberekening (min)									
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
raai 14 Scheur	-8.8	-3.3	-0.5	0.1	-8.5	-3.6	0.9	-1.7	-4.3	-3.2
raai 14 Vlake van de Raan	22.0	8.8	4.5	0.1	22.2	5.6	0.7	-1.3	5.1	-0.6
raai 14 Oostgat/Deurloo	8.2	-3.4	-2.8	0.5	8.4	5.1	0.4	-0.8	4.6	1.3
raai 12 Wielingen	-10.7	-6.8	-7.3	-0.4	-11	0.6	0.8	-1.6	-0.2	-0.5
raai 12 Deurloo	39.7	10.3	4.8	3.8	41.6	2.9	0.6	-1.1	2.3	1.2
raai 12 Oostgat	19.6	-0.2	-5.2	2.8	20.7	4.7	0.6	-1.2	4.1	1.4
raai 11 (bij Vlissingen)	-0.2	1.0	1.4	0.7	0.2	1.7	0.9	-1.6	1.0	0.4
raai 7 (bij Terneuzen)	0.7	1.3	1.5	0.8	0.8	1.9	1.0	-1.2	1.2	0.6

6. afgevlakt mondingsgebied
7. afgevlakt Oostgat/Deurloo systeem
8. aangepast afgevlakt Oostgat/Deurloo systeem
9. opgelegde stroomrichting in de hals
10. afgevlakt mondingsgebied en opgelegde stroomrichting in de hals
11. Scheur/Wielingen 1971
12. westelijk deel Westerschelde 1972
13. midden/oostelijk deel Westerschelde 1971
14. Scheur/Wielingen en Westerschelde 1971/1972
15. zonder stormvloedkering Oosterschelde