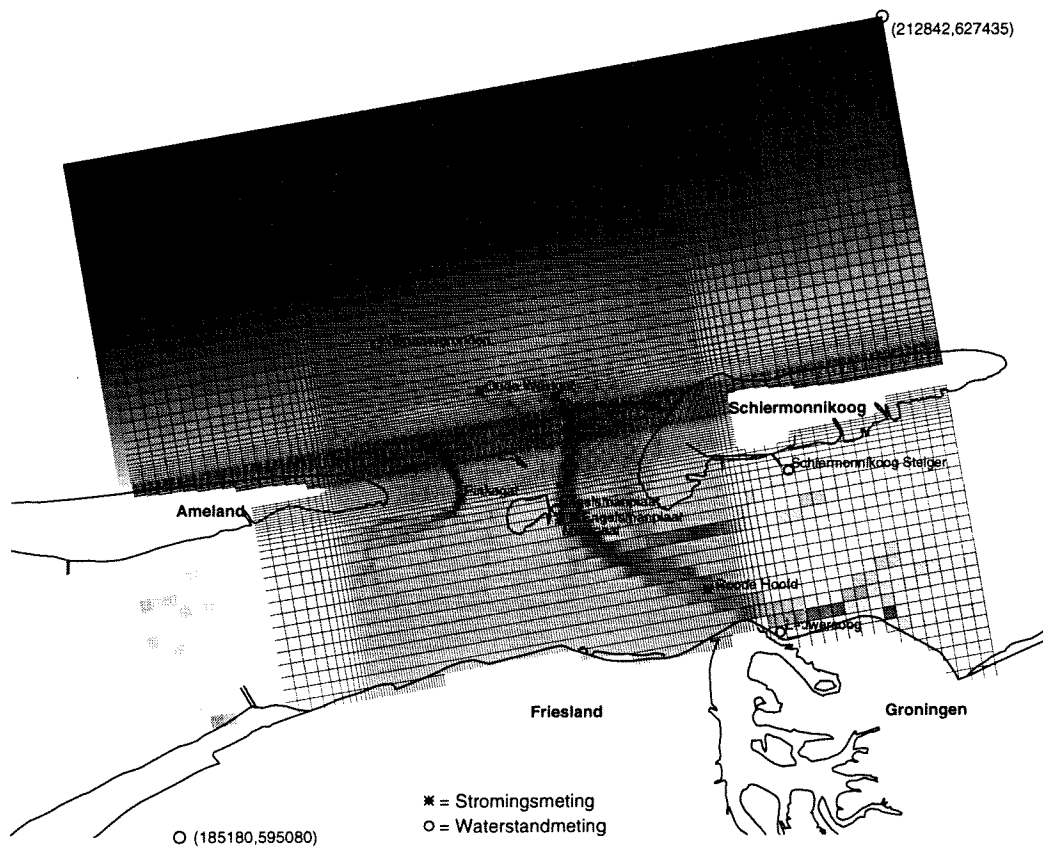


# Stromingsberekeningen in het Friesche Zeegat



Werkdocument RIKZ/OS-97.005

**TU Delft**

Technische Universiteit Delft

Rijks Instituut voor Kust en Zee



# Stromingsberekeningen in Het Friesche Zeegat

B.A.J. Les

Afstudeerverslag  
januari 1996

## **Afstudeercommissie**

Prof. dr. ir. G.S. Stelling  
ir. J.G. de Ronde  
dr. Ir. N. Booij  
ir. R.C. Ris  
Prof. dr. ir. J.A. Battjes

**Sectie Vloeistofmechanica  
Faculteit Civiele Techniek  
Technische Universiteit Delft**

&

**Rijks Instituut voor Kust en Zee**

## Samenvatting

Het Friesche Zeegat ligt in het noordoosten van Nederland en is een onderdeel van de Nederlandse Waddenzee. Het Friesche Zeegat bestaat uit de barrière eilanden Ameland en Schiermonnikoog en het achterliggende Waddenzee gedeelte. Het gebied wordt opgevuld en gelegeerd door getijdegeulen die via zeegaten uitmonden in de Noordzee. Zeewaarts van deze zeegaten ligt de buitendelta, ook wel de ebdelta genoemd. De buitendelta, de aangrenzende eilandpunten, het zeegat, de geulen en de platen van het Friesche Zeegat vormen één geheel. De ontwikkelingen van de verschillende onderdelen ervan zijn in sterke mate onderling gekoppeld en worden vooral bepaald door het getijdevolume ofwel de komberging. Ten gevolge van de afsluiting van de Lauwerszee in 1969 nam de komberging van het gebied met éénderde af. Daardoor was de buitendelta plotseling te groot waardoor daar erosie optrad. Daarnaast werden, door de verkleining van het getijdevolume, de getijdegeulen relatief te diep en hadden een te groot stroomvoerend oppervlak voor de afgenomen komberging. Dit systeem is tot op heden nog niet in evenwicht. Door de reductie van de komberging is de invloed van de golven op de veranderingen in de buitendelta van het Friesche Zeegat groter geworden ten opzichte van de invloed van de getijstromingen.

In dit afstudeerverslag worden stromingen en waterstanden gesimuleerd met behulp van het numerieke waterbewegingsmodel WAQUA voor de noordwesten storm van 9 oktober 1992. De stromingsvelden en waterstanden dienen voor invoer in het golfmodel SWAN [Holthuijsen et al, 1994] voor de tijdstippen 6.00, 9.00 en 12.00 uur tijdens de hoogwater periode. De simulaties worden vergeleken met gemeten waterstanden en stromingen. Het Friesche Zeegat Model is afgeregeld en een gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd voor de parameters die de waterbeweging beïnvloeden. Het simulatiepakket WAQUA is ontwikkeld door Rijkswaterstaat en berekent de waterbeweging in twee horizontale dimensies.

De meetgegevens zijn in ruwe vorm (sinds 1992 niet gecontroleerd en uitgewerkt) aangeleverd door het Rijks Instituut voor Kust en Zee (RIKZ). Deze meetgegevens zijn voor deze studie verwerkt en vergeleken met de berekende stromingen in de meetpunten. De stroommetingen zijn tevens beschikbaar gemaakt voor de opslag in DONAR (Data Opslag NAtte Rijkswaterstaat) en zijn binnenkort beschikbaar voor andere gebruikers.

De gevoeligheidsanalyse van Het Friesche Zeegat Model toont vooral de dominante invloed aan van de randvoorwaarden (Noordzee-randen) op de waterbeweging in het hele gebied. Een nieuwe gedigitaliseerde bodem voor het Friesche Zeegat is gemaakt om de stromingen in de periode oktober 1992 beter te modelleren nadat bleek dat de initieel gebruikte DTM (Digital Terrain Model), uit lodingsgegevens van 1987 bestond. In de periode tussen 1987 en 1991 zijn enkele getijdegeulen en droogvallende platen honderden meters verplaatst. Berekeningen hebben aangetoond dat de

bodemtopografie van het gebied een belangrijke invloed heeft op het stroombeeld in de ebdelta en in de zeegaten.

Vele gebieden in het Waddenzee gedeelte van het model vallen tijdens laagwater droog. Het WAQUA simulatiepakket bleek het droogzetten en het weer laten onderlopen van enkele punten in het rekenrooster niet goed te kunnen simuleren. Een oplossing voor dit probleem is gevonden door een gewijzigde rekenroutine in het WAQUA pakket te gebruiken.

De stroommetingen van de meetcampagne van 1992 bleken niet voldoende te zijn om de globale stromingen in de ebdelta van het gebied goed te kunnen verifiëren. Aangenomen wordt dat het gebruik van de vernieuwde gedigitaliseerde bodem met lodingsdata van de ebdelta uit 1991 een significante verbetering geeft van het globale stromingsbeeld voor de datum 9 oktober 1992 ten opzichte van de gedigitaliseerde bodem die bestaat uit lodingen van het jaar 1987.

## Abstract

The Friesche Zeegat area is situated in the northeast of the Netherlands and is a part of the Dutch Waddensea. The Friesche Zeegat area consists of the barrier Islands Ameland and Schiermonnikoog and a part of the Waddensea. Drainage occurs through tidal channels and the major tidal inlets. Seawards of the inlet, an ebb-tidal delta occurs. The ebb-tidal delta, the tidal inlet, the adjacent parts of the islands and the channels and shoals of the inlet system represent one dynamic entity. Developments in different parts are strongly related and are largely defined by the tidal prism. By the artificial closure of the Lauwersea in 1969, the tidal prism decreased with a third. Due to the closure, the ebb-tide delta was suddenly too large and started to erode. Also the main tidal channels were too deep relative to the decreased tidal prism. This system hasn't found an equilibrium until now. The main inlet system has greatly changed in these years. This reduction has made the wave influence much bigger on the morphology of the whole area.

In this master thesis, current and waterlevels in the Friesche Zeegat area for the nothwest storm of October 9, 1992 are simulated with the numerical model WAQUA. The simulations are validated with measured currents and waterlevels. The calculated currents and waterlevels are used as input in the wave model SWAN on 6:00, 9:00 and 12:00 am around high water. The Friesche Zeegat Model is being calibrated and a sensitivity analysis has been carried out for several parameters, which influence the water motion. The simulation model WAQUA is developed by Rijkswaterstaat, and is able to perform two-dimensional (horizontal) computations

The field measurements are delivered by the RIKZ (National Institute for Coastal & Marine Management) in a very preliminary format. These field measurements are sorted, checked and compared with the calculations. The current measurements are also sorted for the database system DONAR of Rijkswaterstaat and in this format these measurements will be available for future users.

The sensitivity study of the Friesche Zeegat Model demonstrates a dominant influence of the boundary conditions on the water movement in the whole area (especially Northsea boundaries). An new (more recent for the year 1992) digital elevation model has been constructed for the Friesche Zeegat Model to make more accurate calculations for the current fields.

Many tidal flats appear in the Waddensea area of the model. The WAQUA model seem not able to simulate the flooding and drying procedure of several gridpoints in the process of the calculations. A solution has been found in using an altered calculation routine of solving the continuity equation. This altered calculation routine increased the simulation time of the calculations with 30 percent.

The current measurements of five different locations in the Friesche Zeegat turn out to be insufficient to estimate the field currents of the area. The new digital terrain model which contains depth measurements of the tidal inlet from 1991 calculates a significant more accurate current field in respect to the digital elevation model with data from 1987.

# Inhoudsopgave

<b>SAMENVATTING</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	iii
<b>INHOUDSOPGAVE</b> .....	v
<b>LIJST VAN BIJLAGEN</b> .....	vii
<b>VOORWOORD</b> .....	ix
<b>1 INLEIDING EN DOELSTELLING</b> .....	1
<b>2 GEOMETRIE EN INVENTARISATIE VAN DE METINGEN</b> .....	3
2.1 Geografische ligging en geometrie van het Friesche Zeegat .....	3
2.2 De gedigitaliseerde bodems van het Friesche Zeegat.....	4
2.3 Inventarisatie van de metingen van de meetcampagne van 1992 .....	6
2.3.1 Inleiding .....	6
2.3.2 Meetopstelling en instrumentaria .....	7
2.3.3 Waterstands metingen .....	8
2.3.4 Stromingsmetingen .....	8
<b>3 BESCHRIJVING VAN DE INVOERGEGEVENS</b> .....	10
3.1 Inleiding .....	10
3.2 Numerieke parameters .....	10
3.2.1 Rekenrooster.....	10
3.2.2 Rekestijdstap van het model .....	12
3.3 Fysische parameters .....	14
3.3.1 Horizontale randvoorwaarden.....	14

3.3.2 Vertikale randvoorwaarden.....	15
3.3.3 Droogvallen en onderlopen.....	18
3.3.4 Turbulente viscositeit .....	20
<b>4 AFREGELING EN GEVOELIGHEIDSONDERZOEK.....</b>	<b>21</b>
4.1 Inleiding .....	21
4.2 Initiële berekeningen.....	21
4.3 Gevoeligheidsanalyse .....	24
4.3.1 Verschillende strategieën om gevoeligheden te analyseren .....	24
4.3.2 Numerieke gevoeligheden .....	26
4.3.3 Afregelbare gevoeligheden .....	28
<b>5 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN.....</b>	<b>35</b>
5.1 Conclusies .....	35
5.2 Aanbevelingen .....	37
<b>LITERATUURLIJST.....</b>	<b>40</b>

## APPENDICES

- A Wiskundige formuleringen van WAQUA
  - A-1 Inleiding
  - A-2 Structuur van WAQUA
  - A-3 Discretisaties van WAQUA
  - A-4 Gewijzigde discretisaties van de continuïteitsvergelijking
- B Meetcampagne van 1992 in het Friesche Zeegat
- C De bodemschematisatie van Het Friesche Zeegat Model
  - C-1 Inleiding
  - C-2 Uitgebreide beschrijving van de fzwaqua.bot
  - C-3 Uitgebreide beschrijving van de fz8791ri.waq



## Lijst van Bijlagen

- 1a Vergelijking berekende waterstanden van Wierumergronden en Engelsmanplaat met metingen voor (1) randvoorwaarden Kuststrook-model en (2) aangepaste randvoorwaarden Kuststrook-model met waterstanden van Wierumergronden
- 1b Vergelijking berekende waterstanden van Schiermonnikoog en Lauwersoog met metingen voor (1) randvoorwaarden Kuststrook-model en (2) aangepaste randvoorwaarden Kuststrook-model met waterstanden van Wierumergronden
- 2 Vergelijking stroomsnelheden van Engelsmanplaat en Meetpaal na verschuiving van de vergelijkingspunt in het rooster, op 9 oktober 1992
- 3 Vergelijking van de stroomtijdreeksen van 2D-berekening WAQUA en 3D-berekening TRIWAQ met 10 lagen, voor Roode Hoofd, Engelsmanplaat, Oude Westgat, Meetpaal, en Pinkegat met de bodemfile fzwaqua.bot.
- 4a Termanalyse van een uitsnede van de ebdelta van Het Friesche Zeegat voor 9 oktober 1992 6:00
- 4b Termanalyse van een uitsnede van de ebdelta van Het Friesche Zeegat voor 9 oktober 1992 6:00
- 5a Termanalyse van een uitsnede van de ebdelta van Het Friesche Zeegat voor 9 oktober 1992 9:00
- 5b Termanalyse van een uitsnede van de ebdelta van Het Friesche Zeegat voor 9 oktober 1992 9:00
- 6a Vergelijking van de globale stromingen in ebdelta van het Friesche Zeegat op 9 oktober 06:00 van de DTM fzwaqua.bot en fz8791ri.waq
- 6b Vergelijking van de globale stromingen in ebdelta van het Friesche Zeegat op 9 oktober 12:00 van de DTM fzwaqua.bot en fz8791ri.waq
- 7a Verschillen van de stroomsnelheden van de berekeningen met de fzwaqua.bot DTM en de fz8791ri.waq op 9 oktober 6:00
- 7b Verschillen van de stroomsnelheden van de berekeningen met de fzwaqua.bot DTM en de fz8791ri.waq op 9 oktober 9:00
- 7c Verschillen van de stroomsnelheden van de berekeningen met de fzwaqua.bot DTM en de fz8791ri.waq op 9 oktober 12:00
- 8a Vergelijking van de stroomtijdreeksen van de twee DTM's fzwaqua.bot en fz8791ri.waq met de metingen voor Oude Westgat en Nieuwe Westgat
- 8b Vergelijking van de stroomtijdreeksen van de DTM's fzwaqua.bot en fz8791ri.waq met de metingen voor Engelsmanplaat en de Meetpaal
- 8c Vergelijking van de stroomtijdreeksen van de DTM's fzwaqua.bot en fz8791ri.waq met de metingen voor Pinkegat en Roode Hoofd
- 9 Vergelijking van de globale stroming in het hele gebied van de bodems fzwaqua.bot en fz8791ri.waq op 9 oktober 3:00
- 10 Globaal overzicht van de hoeveelheid droogvalschothjes door Minimale Maximale, Gemiddelde, O-optie droogvalprocedure geplaatst op 9 oktober 3:00

- 11a Vergelijking van de waterstanden van Engelsmanplaat en Lauwersoog voor weerstandsverschil  $n=0.018$  en  $n=0.026$  voor fzwaqua.bot op 9 oktober
- 11b Vergelijking van de stromingen van Engelsmanplaat en de Meetpaal voor weerstandsverschil  $n=0.018$  en  $n=0.026$  voor fzwaqua.bot op 9 oktober
- 12 Vergelijking waterstanden van de metingen en de berekeningen waarbij de windschuifspannings coëfficiënt met een factor 4 is vermenigvuldigd
- 13 Vergelijking stromingen van de metingen en de berekeningen waarbij de windschuifspannings coëfficiënt met een factor 4 is vermenigvuldigd
- 14a Stromingsbeeld van het hele Friesche Zeegat Model met de bodem fz8791ri.waq op 9 oktober 6:00
- 14b Stromingsbeeld van het hele Friesche Zeegat Model met de bodem fz8791ri.waq op 9 oktober 9:00
- 14c Stromingsbeeld van het hele Friesche Zeegat Model met de bodem fz8791ri.waq op 9 oktober 12:00
- 15a Tijdreeksen meetdata Engelsmanplaat en Roode Hoofd in u en v richting van de gehele meetperiode (zie appendix C)
- 15b Tijdreeksen meetdata Oude Westgat en Pinkegat in u en v richting van de gehele meetperiode (zie appendix C)
- 15c Tijdreeksen meetdata Meetpaal sonde (1), Meetpaal sonde (2) in u en v richting van de gehele meetperiode (zie appendix C)

# Voorwoord

Mijn grote dank gaat uit naar mijn afstudeerbegeleiders Prof. dr. ir. G.S. Stelling, ir. J.C. de Ronde (RIKZ) en dr. ir. N. Booij voor hun adviezen en kritieken.

Speciaal wil ik ook dr. ir. N. Booij (TU-Delft), ir. Miriam van Endt (RIKZ) en ir. Roeland Ris (TU-Delft) bedanken voor de prettige samenwerking bij het samenstellen van de nieuwe bodem.

Hierbij zou ik ook iedereen willen bedanken van de afdeling OSF van het RIKZ omdat ik hier de gelegenheid gekregen heb om mijn afstudeeropdracht uit te voeren.

Op alle 11 plaatsen waar ik in het afgelopen half jaar een bureau bezet heb gehouden (waarbij ik met 14 verschillende mensen een kamer gedeeld heb), heb ik met zeer groot plezier gewerkt !

Bastiaan Les

Den Haag, oktober 1996

# 1 Inleiding en doelstelling

Het Friesche Zeegat is een onderdeel van het Nederlandse Waddenzee gebied en ligt tussen de Waddeneilanden Ameland en Schiermonnikoog. Vele studies zijn in de afgelopen jaren naar dit gebied verricht om de morfologische processen te bestuderen na de afsluiting van de Lauwerszee in 1969. Deze studies hebben er mede toe geleid dat in 1992 een meetcampagne is opgezet om de morfologische veranderingen in het gebied te bestuderen. Tijdens deze meetcampagne zijn op verschillende plaatsen metingen verricht naar sedimenttransporten, golven en stromingen. Sinds 1992 is echter nog geen gedegen actie ondernomen om de meetgegevens te analyseren. Alleen de golfmetingen zijn uitgewerkt [Dunsbergen,1995a].

In een verificatiestudie van het golfmodel SWAN met de golfmetingen [Dunsbergen, 1995b], bleek dat stromingen een significante bijdrage leveren aan het golfbeeld in de ebdelta (stromingsrefractie). Hierop is besloten vervolgberekeningen met afgeregelde waterstanden en stroomvelden in SWAN uit te voeren. Deze verificatiestudie wordt door de TU-Delft uitgevoerd en vergelijkt de golfhoogten in het Friesche Zeegat met golfmetingen op de datum 9 oktober 1992. Op deze dag vond een noordwesten storm plaats met golven van  $\pm 3.5$  m op de Noordzee ter hoogte van Schiermonnikoog (golfmeetboei, Schiermonnikoog Noord). Voor de vergelijking van de golfmetingen in het gebied met het golfmodel SWAN zijn de stromingsvelden van het Friesche Zeegat nodig op de tijdstippen 6.00, 9.00 en 12.00 uur.

Dit afstudeerwerk heeft als doel de waterstanden en stromingen af te regelen voor 9 oktober 1992. Hierbij wordt gebruik gemaakt van uitgewerkte stroommetingen van de meetcampagne uit 1992.

In tweede instantie zouden de simulaties met het drie dimensionale simulatiepakket TRIWAQ uitgebreid kunnen worden. Door een tekort aan meetgegevens bleken de simulaties met TRIWAQ geen toegevoegde waarde te geven aan het onderzoek naar de globale stromingen die tijdens de storm van 9 oktober 1992 plaatsgevonden hebben.

In hoofdstuk 2 wordt de geometrie van het Friesche Zeegat, de gebruikte gedigitaliseerde bodem en de inventarisatie van de meetgegevens beschreven.

Hoofdstuk 3 geeft een beschrijving van Het Friesche Zeegat Model. De simulaties met het WAQUA pakket, die in hoofdstuk 4 worden beschreven, hebben als doel de gevoeligheid van de fysische grootheden op de getijstroming in Het Friesche Zeegat te onderzoeken. In hoofdstuk 5 worden aan de berekeningen conclusies verbonden.

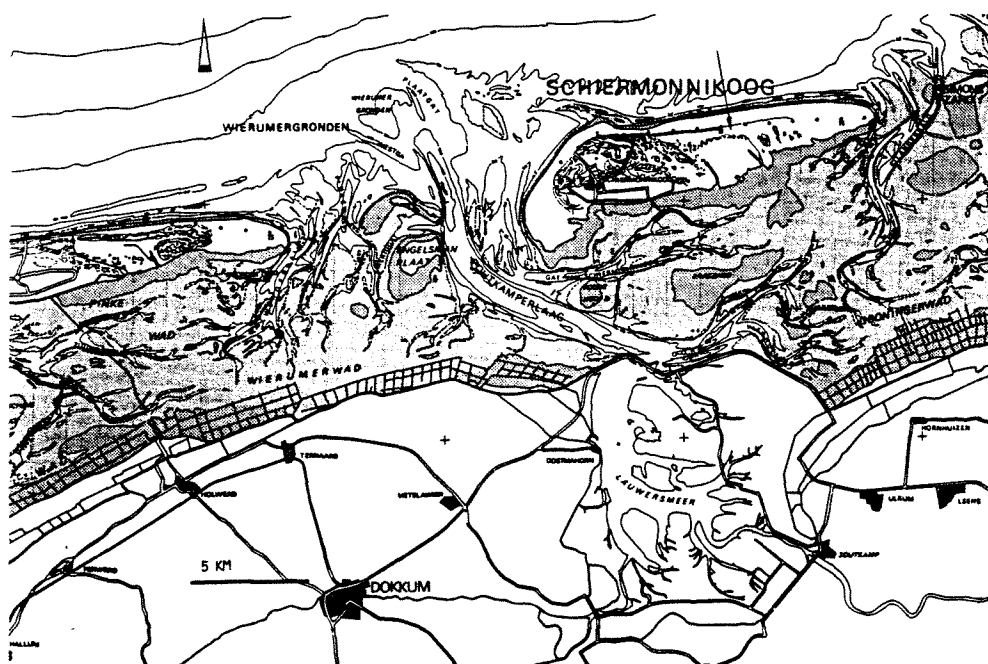
De berekeningen met golfmodel SWAN met de berekende stroomvelden en waterstanden worden gebruikt in het kader van het HYDRA project van het RIKZ (Rijks Instituut voor Kust en Zee). Dit project heeft als doel om een uniforme aanpak te ontwikkelen om hydraulische randvoorwaarden te leveren. Deze hydraulische randvoorwaarden zijn bijvoorbeeld golfrandvoorwaarden aan de teen van de dijk waarmee dijkhoogtes langs de hele Nederlandse kust om de 5 jaar gecontroleerd kunnen worden.

Het waterbewegingsmodel WAQUA is een simulatiepakket ontwikkeld door Rijkswaterstaat waarmee de waterbeweging in twee horizontale dimensies kan worden berekend. De horizontale snelheden worden dieptegemiddeld berekend. Het pakket kan ondermeer voor getijberekeningen in zeeën en estuaria, voor rivierberekeningen, voor waterkwaliteitsberekeningen en voor berekeningen van stroombeelden gebruikt worden. TRIWAQ is een drie dimensionaal waterbewegingspakket waarbij het mogelijk is om de verticaal in een aantal lagen te verdelen.

## 2 Geometrie en inventarisatie van de metingen

### 2.1 Geografische ligging en geometrie van het Friesche Zeegat

Het Friesche Zeegat is een onderdeel van het Nederlandse Wadden gebied. Het ligt tussen de waddeneilanden Ameland en Schiermonnikoog in het noordoosten van Nederland. Het zeegat tussen de beide eilanden heeft een breedte van ongeveer elf kilometer en wordt door de zandplaat Engelsmanplaat verdeeld in een oostelijke getijgeul, de Zoutkamperlaag, en een westelijke getijgeul, het Pinkegat. Het wantij ten zuiden van Ameland ligt oostelijk van het midden van het eiland omdat het getij zich van west naar oost verplaatst en daarom een half uur eerder door het westelijk zeegat van Ameland stroomt dan door het oostelijke zeegat. Hetzelfde geldt voor het wantij onder Schiermonnikoog. Het Friesche Zeegat kan gezien worden als twee onafhankelijke getijde systemen die gescheiden worden door Engelsmanplaat. De enige significante verbinding tussen de Zoutkamperlaag en het Pinkegat vormt het Smeriggat. Voor een overzicht van het gebied, zie figuur (2-1).



figuur 2-1 Ligging van het Friesche Zeegat

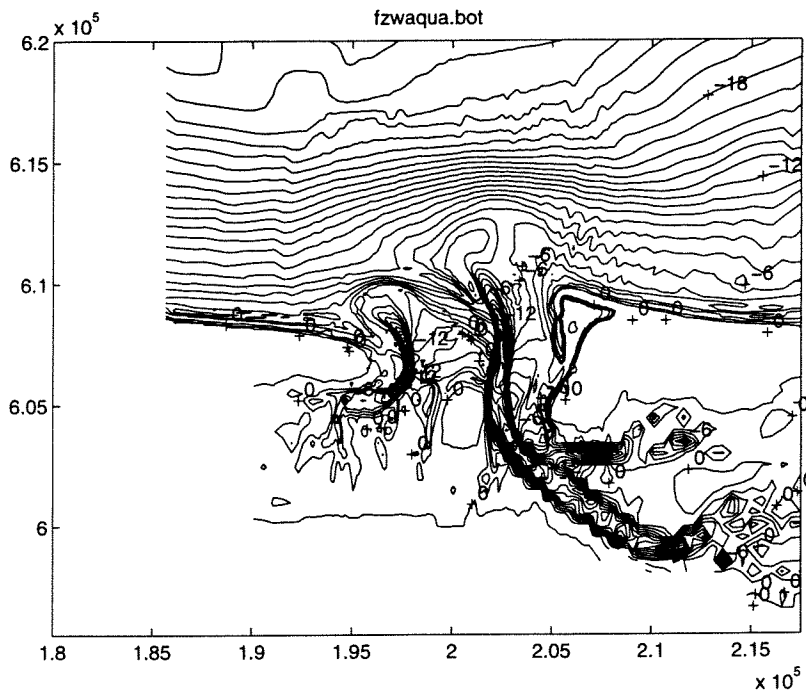
De Zoutkamperlaag-geul heeft een breedte van  $\pm 1.5$  km en een diepte van  $\pm 14$  m in het midden van de geul; voor het Pinkegat zijn deze waarden  $\pm 600$  m en respectievelijk  $\pm 13$  m. Aan de noordelijke uiteinde van de Zoutkamperlaag-geul bevindt zich een vloedschaar (Oude Westgat) en een ebschaar (Nieuwe Westgat). In de Zoutkamperlaag bevindt zich één belangrijke vertakking in de richting naar Schiermonnikoog. Buiten de geulen vallen veel zandplaten droog tijdens laagwater.

## 2.2 De gedigitaliseerde bodems van het Friesche Zeegat

Er bestaan heden verschillende gedigitaliseerde bodemfiles van het Friesche Zeegat met bodemdieptes ten opzichte van NAP. De bodemdieptes in de Waddenzee worden ongeveer eens in de drie- vier jaar gemeten door regionale meetdiensten. Deze lodingsgegevens worden door de vestiging van het RIKZ in Haren bewerkt en gedigitaliseerd in GIS (Geographical Information System) opmaak. Deze GIS-bodemfiles worden door verschillende gebruikers bewerkt en heropgemaakt en ingevoerd in verschillende programmapakketten die allemaal weer een andere opmaak eisen. Van het Friesche Zeegat bestaan hierdoor zogenaamde "stromingbodems" en "golvenbodems" die gebruikt worden voor bijvoorbeeld WAQUA respectievelijk SWAN berekeningen.

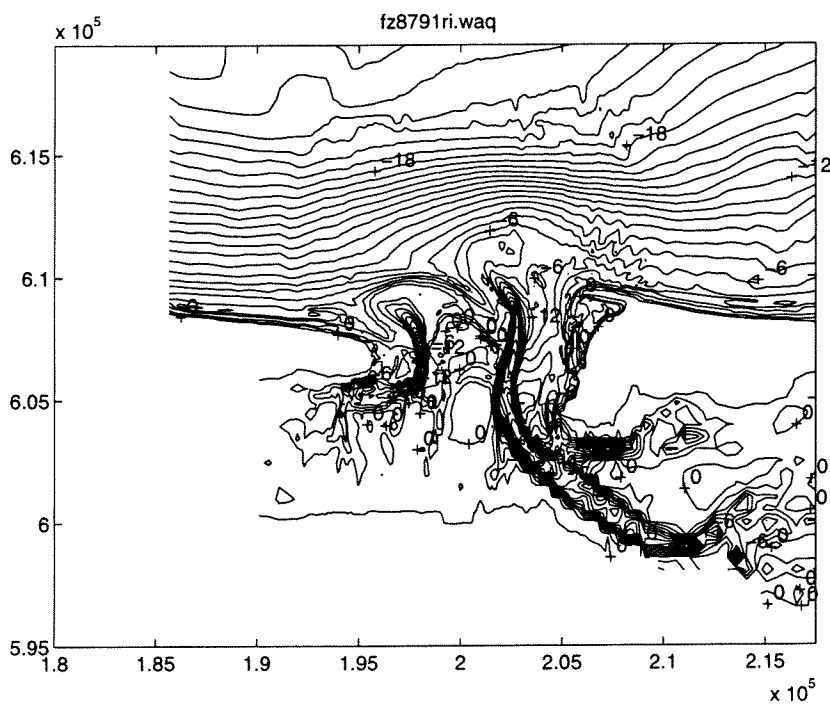
De benaming "bodem" kan tot verwarring leiden omdat verschillende vakgebieden andere voorstellingen hebben indien zij over een bodem praten (een bioloog bijvoorbeeld bedoeld met een bodem de 10 cm dikke toplaag waarin allerlei vormen van leven voorkomt). Daarom wordt voorgesteld om in plaats van "bodem" of "gedigitaliseerde bodem" de afkorting **DTM** te gebruiken, deze afkorting staat voor **Digital Terrain Model**.

De eerste berekeningen met het Friesche Zeegat Model zijn met een minder recente DTM gemaakt ten opzichte van de meetcampagne dan tijdens de eerste berekeningen met WAQUA werd aangenomen. Deze minder recente bodem (fzwaqua.bot, zie figuur 2-2) is samengesteld uit lodingsgegevens van 1987.



figuur 2-2 Contourlijnen ( $\Delta 1$  meter), fzwaqua.bot

Tijdens de initiële berekeningen werd duidelijk dat de fzwaqua.bot te grote verschillen in de bodemdieptes vertoonde. Een nieuwe DTM (fz8791ri.waq, zie figuur 2-3) is voor deze studie gemaakt uit lodingen van 1991 van een groot stuk ebdelta tot aan Engelsmanplaat, zie ook figuur (C-2) in appendix C.



figuur 2-3 contourlijnen ( $\Delta 1$  meter), fz8791ri.waq

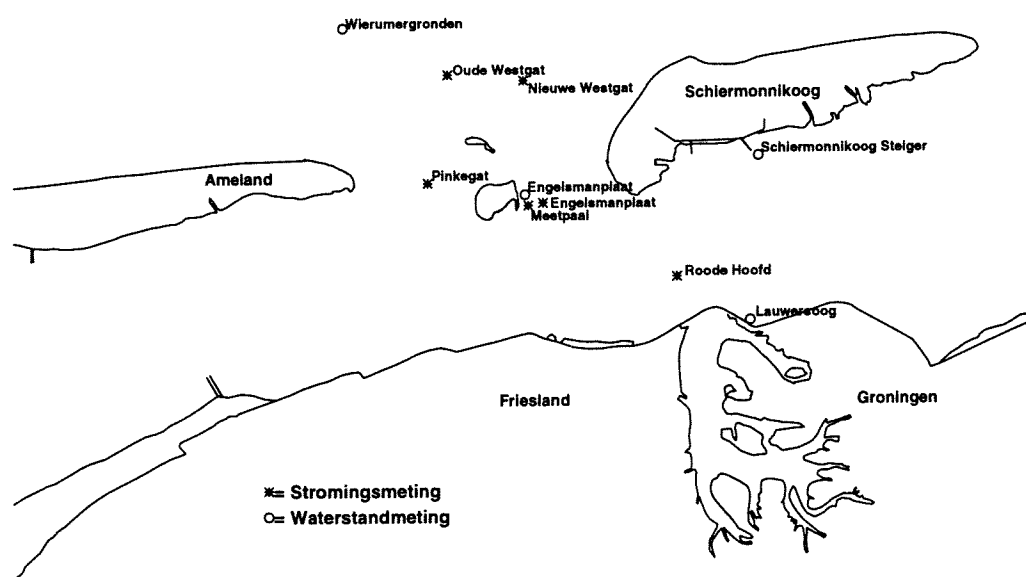


In appendix C wordt de initieel gebruikte DTM (fzwaqua.bot) samen en de nieuw samengestelde DTM (fz8791ri.waq) uitvoerig beschreven samen met de herkomst van de overige beschikbare DTM's van het Friesche Zeegat.

## 2.3 Inventarisatie van de metingen van de meetcampagne van 1992

### 2.3.1 Inleiding

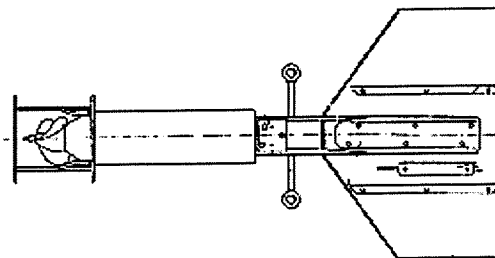
De meetcampagne is opgezet in 1992 door het DGW (Dienst Getijde Wateren, het huidige RIKZ). Het doel van de meetcampagne bestond uit de bestudering van de morfologische veranderingen in het Friesche Zeegat sinds de afsluiting van de Lauwerszee in 1969. Tijdens de meetcampagne van september tot november 1992 zijn er op vijf verschillende plaatsen in het Friesche Zeegat stromingen gemeten (De stroommeting ter plaatse van het Nieuwe Westgat is mislukt). De waterstanden worden op vier verschillende plaatsen gemeten, zie figuur (2-4). In dit hoofdstuk worden de meetgegevens van de waterstanden en de stromingen voor deze periode beschreven.



figuur 2-4 Ligging van de meetplaatsen

### 2.3.2 Meetopstelling en instrumentaria

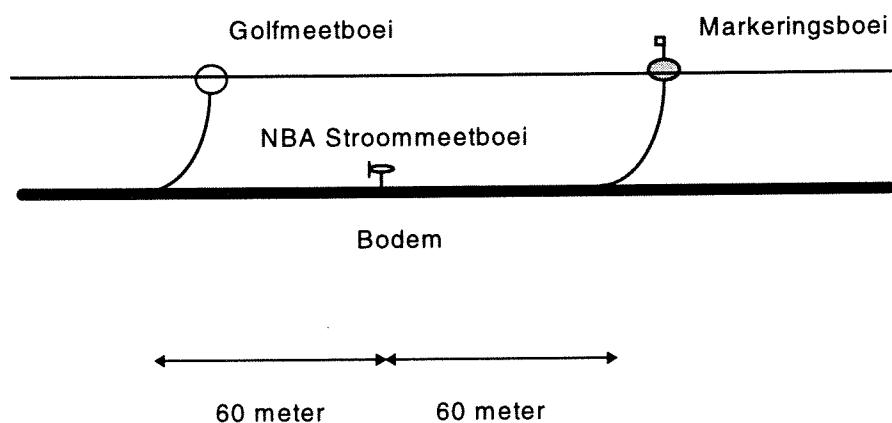
Er is met twee typen stroommeters gemeten; met NBA-boeien en met elektromagnetische stroommeters (EMS-stroommeters). NBA-boeien zijn drijfbare boeien die aan de bodem vastgeketend zijn, zie figuur (2-5). Aan de voorkant zit een propeller waarvan het aantal omwentelingen een maat is van de snelheid van het rondstromende water. Binnenin zit een kompas die elk tijdsinterval een richting wegschrijft.



figuur 2-5 Zijaanzicht van een NBA boei

In alle gevallen zijn de NBA-boeien in het midden van de geul, op anderhalve meter boven de bodem geplaatst. De kans dat schepen de boeien onderwater aanvaren en beschadigen is hierdoor klein. De tijdsintervallen waarin de meetdata wordt weggeschreven zijn verschillend voor de NBA-boeien. Daar is geen reden voor gevonden. Het betreft een middeling van de stroming over het gehele meetinterval. De meetopstelling voor de NBA-boeien is te zien in figuur (2-6). Twee EMS-stroommeters zijn bevestigd aan een meetframe op de meetpaal dichtbij Engelsmanplaat en meten de snelheid in twee horizontale richtingen. De meetwaarden worden elke twee minuten gemiddeld en weggeschreven.

Voor de waterstandmetingen is op alle plaatsen met een conventionele vlotter nivo meter (type DNM) gemeten met als referentieniveau NAP. De golfmetingen zijn uitgewerkt en beschreven in [Dunsbergen,1995a].



figuur 2-6 Meetopstelling ter plaatse van NBA boeien

### 2.3.3 Waterstands metingen

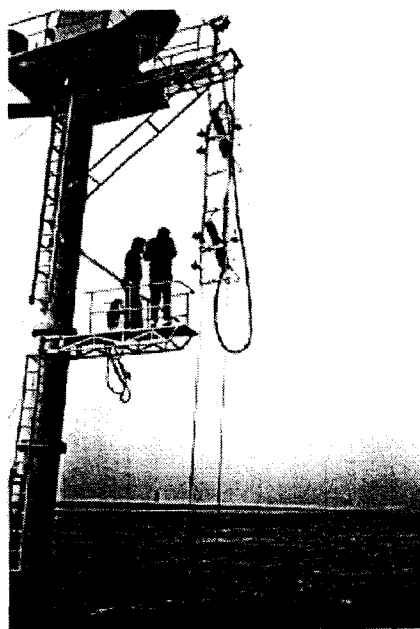
Waterstanden worden langs de hele Nederlandse kust continu gemeten en opgeslagen in het database systeem DONAR. Van deze waterstandmeetstations liggen er drie in het Friesche Zeegat, te weten Wierumergronden, Schiermonnikoog-steiger en Lauwersoog, zie figuur (2-2). De waterstanden die in de buurt van Engelsmanplaat gemeten worden zijn nog niet beschikbaar in DONAR. Deze metingen worden door de meetdienst in Delfzijl beheerd. De meetopstelling in de buurt van Engelsmanplaat wordt tijdens ijsgang weggehaald om deze te beschermen waardoor de plaats elk jaar kan variëren. In de volgende tabel (2-1) worden de waterstandmeetstations gegeven:

tabel 2-1 Waterstands meetplaatsen in het Friesche Zeegat

Waterstands meetplaatsen	Periode Meting	Meetinstrument
Wierumergronden	gehele simulatieperiode	Vlotter niveau meter (DNM)
Engelsmanplaat	gehele simulatieperiode	Vlotter niveau meter (DNM)
Schiermonnikoog-steiger	gehele simulatieperiode	Vlotter niveau meter (DNM)
Lauwersoog	gehele simulatieperiode	Vlotter niveau meter (DNM)

### 2.3.4 Stromingsmetingen

De stromingsgegevens zijn in ruwe vorm aangeleverd door het RIKZ. Deze waren sinds 1992 nog niet uitgewerkt en bestonden uit enkele diskettes zonder bijgeleverde meetrapportage. Rapportage van de opzet van de meetcampagne was wel aanwezig. Hieruit was op te maken dat het de intentie was om op zes strategische plaatsen in het Friesche Zeegat de stromingen en de richtingen te meten, te weten in het Nieuwe Westgat, in het Oude Westgat, in het Pinkegat, ten oosten van Engelsmanplaat in de zoutkamperlaag-geul (2x), en ter hoogte van het Rode Hoofd. De metingen zouden van september tot en met november 1992 plaats gaan vinden. Uit de diskettes bleek dat er stroomgegevens aanwezig zijn van vier NBA-boeien. Van de stroomboei die in het Nieuwe Westgat gelegen zou hebben zijn geen stromingsgegevens gevonden. Van deze plaats is niet bekend of er ooit een stroomboei heeft gelegen of dat hij van het begin af aan



figuur 2-7 De Meetpaal tijdens de meetcampagne, op het meetframe zitten de EMS-stroommeters.

al verkeerd geïnstalleerd is. De twee EMS-meters zijn alleen gebruikt op de Meetpaal ter hoogte van Engelsmanplaat, zie figuur (2-7). Deze EMS-meters waren samen met sedimentmeters aan een meetframe bevestigd. Op deze plaats is op twee punten in de verticaal de stroom gemeten, te weten op 0.26 m van de bodem en op 2.36 m van de bodem (totale diepte is hier zeven meter ten opzichte van NAP). De meetperiodes van de stromingsmetingen zijn in de volgende tabel (2-2) samengevat:

tabel 2-2 Stroming meetplaatsen in Het Friesche Zeegat 1992.

Stroommeetplaatsen	Periode Meting	Meetinstrument
Roode Hoofd	17/9/1992 15:40 tot 8/10/1992 02:16	NBA-boei (propeller)
Engelsmanplaat	17/9/1992 14:40 tot 26/10/1992 00:16	NBA-boei (propeller)
Oude Westgat	17/9/1992 00:00 tot 7/10/1992 23:50	NBA-boei (propeller)
Meetpaal(Engelsmanplaat)	24/9/1992 14:00 tot 18/11/1992 02:58	2xEMS (elektromagnetisch)
Pinkegat	17/9/1992 00:00 tot 5/10/1992 00:00	NBA-boei (propeller)

Uit deze tabel (2-2) blijkt dat twee stroommetingen op 9 oktober overgebleven zijn. Deze twee stromingsboeien liggen 584 m van elkaar af in een dwarsdoorsnede van de Zoutkamperlaag-geul ter hoogte van Engelsmanplaat, zie figuur (2-4).

## 3 Beschrijving van de invoergegevens

### 3.1 Inleiding

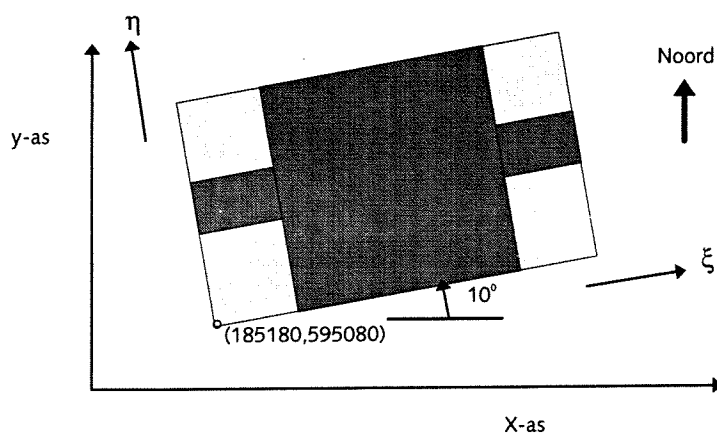
In dit hoofdstuk worden de invoerparameters van het Friesche Zeegat Model beschreven. De invoerparameters zijn opgedeeld in numerieke parameters en fysische parameters. In paragraaf 3.2 worden de numerieke parameters beschreven en in paragraaf 3.3 de relevante fysische parameters. Numerieke parameters zijn parameters die invloed hebben op het rekenproces in WAQUA, hieronder valt het rekenrooster, de gekozen tijdstap en de droogvalprocedure. Onder fysische parameters wordt de bodemtopografie, de randvoorwaarden, de bodemwrijving, de windschuifspanning en de turbulente viscositeit verstaan.

### 3.2 Numerieke parameters

#### 3.2.1 Rekenrooster

Het rekenrooster is opgezet om in de omgeving van de toegangsgeulen en in de ebdelta de stromingen nauwkeurig te berekenen. Dit resulteerde in een lokaal verdicht rooster. Het is een niet-equidistant rooster waarbij de maasgrootte van het rooster varieert. Alle mazen in het rekenrooster zijn rechthoekig. De randen van het model bestaan uit de Noordzee, de wantijen onder Ameland en Schiermonnikoog, de kusten van Ameland en Schiermonnikoog en het vaste land van Friesland. Onder Ameland is het rooster afgekapt op het wantij, zie figuur (3-2).

De oorsprong van het model ligt op  $(x, y) = (185180, 595080)$  waarbij de coördinaten zijn gegeven in meters in de Rijksdriehoek ten opzichte van Parijs zie figuur (3-1).



figuur 3-1 Oriëntatie van het rekenrooster

Het aantal rooster punten in de  $\xi$  (x) richting is: 196.

Het aantal rooster punten in de  $\eta$  (y) richting is: 106.

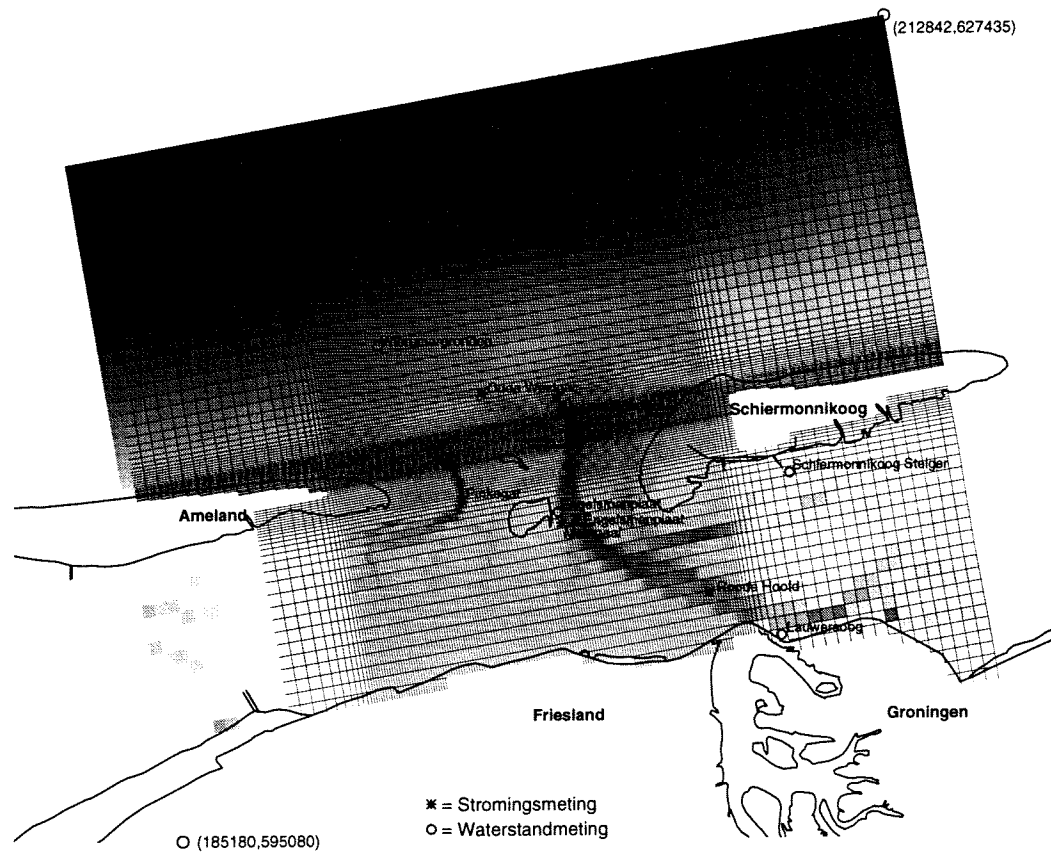
Het totaal aantal roosterpunten is 20776, waarvan er 17435 actief zijn.

Het verloop van de assen is:

x-as :            12 x 500 m,  
                       overgang 500 m → 100 m in 8 stappen,  
                       150 x 100 m,  
                       overgang 100 m → 500 m in 8 stappen,  
                       18 x 500 m.

y-as :            10 x 500 m,  
                       overgang 500 m → 100 m in 8 stappen,  
                       9 x 100 m,  
                       overgang 100 m → 50 m in 4 stappen,  
                       28 x 50 m,  
                       overgang 50 m → 100 m in 4 stappen,  
                       3 x 100 m,  
                       overgang 100 m → 500 m in 8 stappen,  
                       32 x 500 m.

Bij de overgang van 100 naar 500 m en van 100 naar 50 m is gekozen voor een minimaal aantal stappen waarbij per maas met 20% wordt gevarieerd [Kuijper, 1993a].



figuur 3-2 Actieve roosterpunten van het Friesche Zeegat Model

### 3.2.2 Rekentijdstep van het model

Het numerieke schema in WAQUA is gebaseerd op de A.D.I. (Alternating Direction Implicit) methode. Deze aanpak heeft als voordeel dat het rekenschema onvoorwaardelijk stabiel is, zie appendix A voor een uitvoerige beschrijving van de A.D.I methode. Een dimensieloze grootte die de verhouding aangeeft tussen de afgelegde afstand per tijdsstep van een verstoring en de roosterafstand is het Courant getal. Dit wordt als volgt gedefinieerd:

$$C_f = 2dt\sqrt{gH} \sqrt{\frac{1}{(dx)^2} + \frac{1}{(dy)^2}}$$

met:  $C_f$  = Courant getal [-],  
 $g$  = gravitatieversnelling [ $m/s^2$ ],  
 $dx, dy$  = rooster afstand in x, y richting in [m],  
 $H$  = waterdiepte in [m],  
 $dt$  = tijdstap [sec].

De toegepaste rekestijdstap van het model beïnvloedt de nauwkeurigheid van de berekening. Een minimale waarde van twee voor het Courant getal wordt aanbevolen om de rekestijd te minimaliseren. Voor trapjesranden bij landgrenzen, bij stromingen rond drooggevallen platen en bij kanalen die schuin door het rekenrooster lopen wordt het snelheidsveld onnauwkeurig berekend bij te hoge Courantgetallen door het zogenaamde A.D.I.-effect [Stelling,1984]. In de schematisatie van de Zoutkamperlaaggeul van het Roode Hoofd naar Lauwersoog kan dit effect optreden bij Courant getallen groter dan  $4\sqrt{2}$  [Stelling,1986]. Bij de gekozen rekestijdstap van één minuut blijft het Courant getal onder deze waarde in dit gedeelte van de Zoutkamperlaaggeul.

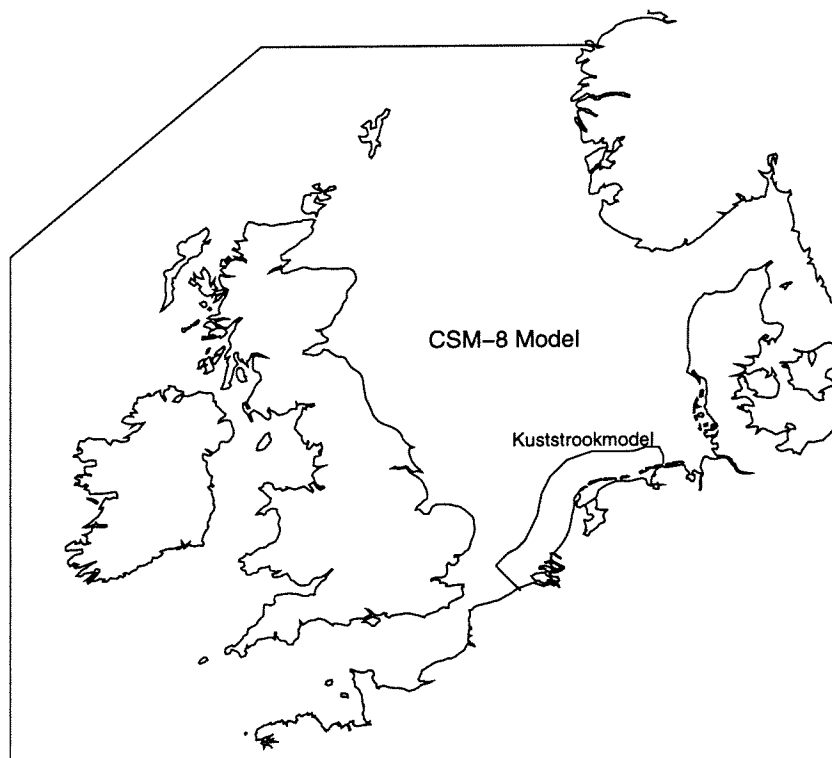


### 3.3 Fysische parameters

#### 3.3.1 Horizontale randvoorwaarden

Voor de horizontale randvoorwaarden op de randen van het model kan gekozen worden uit gesloten randen, waterstandsranden, snelheidsranden, debietranden of voor zwak reflecterende randen. Voor de Noordzeeranden van het model zijn waterstandsranden gebruikt en in de Waddenzee (op de wantijen) zijn debietranden gebruikt. De debietranden zijn gebruikt omdat gedurende de storm van 9 oktober, tijdens eb nog grote hoeveelheden water over het wantij stromen en omdat de bodemschematisatie (maaswijdten 500 m) snelheidsranden niet toelaat, zie Bijlage (6b).

De randvoorwaarden voor het Friesche Zeegat zijn gegenereerd door het Kuststrookmodel. De randvoorwaarden van het Kuststrookmodel zijn door het Continental Shelf model (CSM8-model) gemaakt. Voor de randvoorwaarden van het CSM8-model zijn astronomische getijcomponenten gebruikt. De meteorologische omstandigheden van de periode 3 oktober tot 11 oktober 1992 zijn via een drie uurlijkse wind- en drukveld van het KNMI ingevoerd in het CSM8-model. Hiervan is de periode van 3 tot 6 oktober lineair geëxtrapoleerd om de beschikbare inspeeltijd van het model te vergroten.



figuur 3-3 De Moedermodellen CSM8- en het Kuststrook-model

### 3.3.2 Vertikale randvoorwaarden

Bij de bodem en het waterniveau zijn de verticale randvoorwaarden voor de impulsvergelijking:

	Bodem	Waterniveau
x - richting	$\nu_v \left. \frac{\partial u}{\partial z} \right _{z=-h} = \frac{\tau_{bx}}{\rho},$	$\nu_v \left. \frac{\partial u}{\partial z} \right _{z=\zeta} = \frac{\tau_s}{\rho} \cos(\theta)$
y - richting	$\nu_v \left. \frac{\partial v}{\partial z} \right _{z=-h} = \frac{\tau_{by}}{\rho},$	$\nu_v \left. \frac{\partial v}{\partial z} \right _{z=\zeta} = \frac{\tau_s}{\rho} \sin(\theta)$

met:

- $\nu_v$  = verticale eddy viscositeit [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
- $H$  = momentane waterdiepte [m]
- $\tau_{bx,y}$  = componenten bodemschuifspanning in x- en y-richting [ $\text{N}/\text{m}^2$ ]
- $\tau_s$  = windschuifspanning [ $\text{N}/\text{m}^2$ ]
- $\rho$  = dichtheid van water [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
- $\theta$  = hoek tussen de windschuifspanningsvector en de lokale richting van het rooster

Voor WAQUA (2DH) stromingsberekeningen wordt de bodemwrijving berekend met de volgende kwadratische relatie:

$$\vec{\tau}_b = \rho_w \frac{g}{C_{2D}^2} \|U\| (u, v)^T$$

met:

- $\tau_b$  = bodemschuifspanning [ $\text{N}/\text{m}^2$ ],
- $g$  = gravitatieversnelling [ $\text{m}/\text{s}^2$ ],
- $C_{2D}$  = Chézy coëfficiënt [ $\text{m}^{1/2}/\text{s}$ ],
- $\|U\|$  =  $\sqrt{u^2 + v^2}$ , horizontale dieptegemiddelde stroming [ $\text{m}/\text{s}$ ],
- $\rho_w$  = dichtheid water [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].

Voor het bepalen van de bodemwrijving wordt de Manning formulering gebruikt:

$$C_{2D} = \frac{H^{\frac{1}{6}}}{n}$$

met:  $n$  = Manning coëfficiënt in  $[s/m^{0.33}]$ ,  
 $H$  =  $(h + \zeta)$ , momentane waterdiepte [m],  
 $h$  = waterniveau onder referentievlak [m],  
 $\zeta$  = waterniveau boven referentievlak [m].

De bodemwrijving is afhankelijk van de waterdiepte (H) en daardoor afhankelijk van de tijd. In tabel (3-1) staan de waarden voor de Manning coëfficiënt die ingevoerd zijn in het Friesche Zeegat Model. Er is in het buitengebied en in de geulen minder wrijving en dus in verhouding minder verlies van snelheid dan in de ondiepe gedeelten van het waddegebied.

tabel 3-1 Waarden van Manning en Chézy in het model.

Diepte	Manning parameter (n)	Chézy waarde ( $C_{2D}$ )
$h < 5$ meter	0.024	$< 54.5$
$5 < h < 10$ meter	0.022	$54.5 < d < 61.2$
$h > 10$ meter	0.020	$> 61.2$

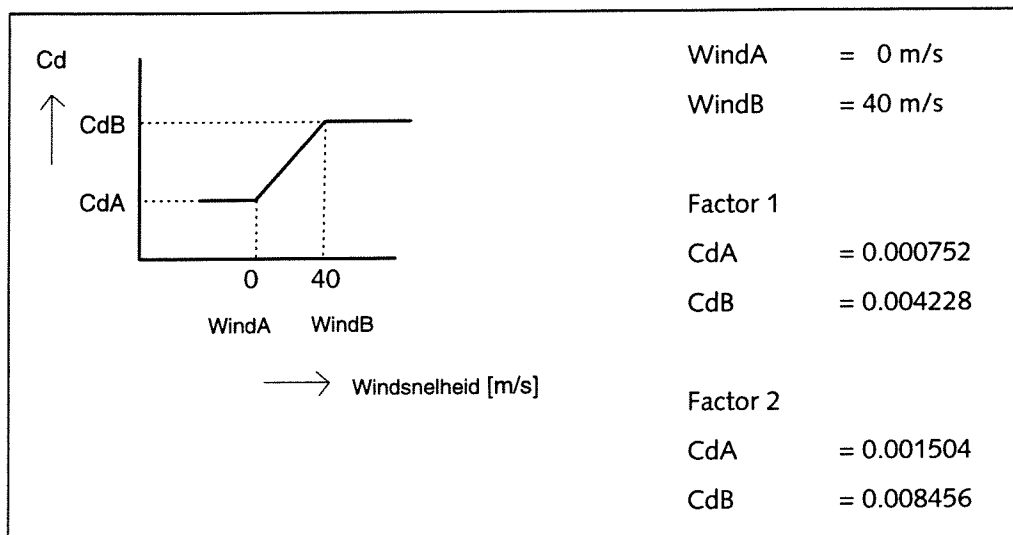
h = waterdiepte ten opzichte van NAP

Voor de grootte van de windschuifspanning wordt de volgende empirische relatie gebruikt:

$$\tau_s = \rho_a C_d U_{10}^2$$

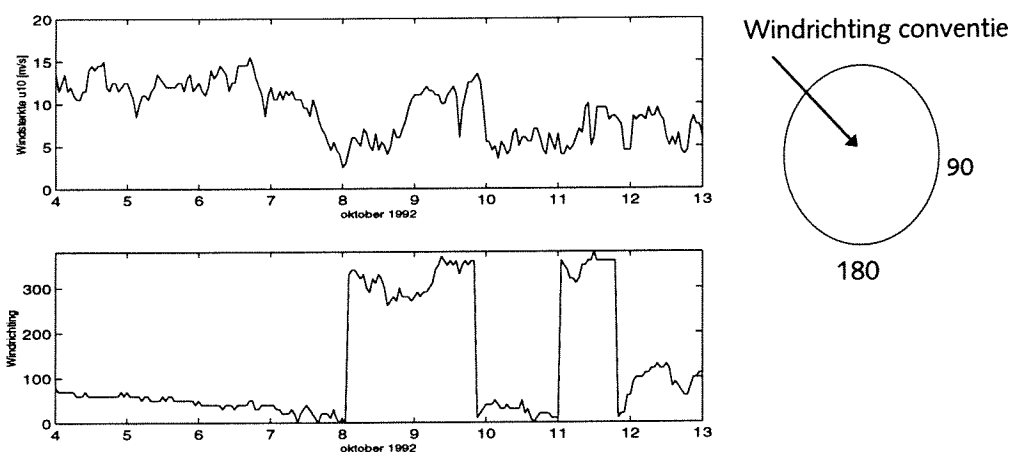
met:  $\tau_s$  = Windschuifspanning  $[N/m^2]$ ,  
 $\rho_a$  = Dichtheid van de lucht  $[kg/m^3]$ ,  
 $U_{10}$  = Ensemble gemiddelde van de windsnelheid op 10 meter  
 boven het maaiveld  $[m/s]$ ,  
 $C_d$  = Windschuifspannings coëfficiënt [-].

De relatie tussen de schuifspannings coëfficiënt en de windsnelheid op tien meter boven het maaiveld wordt gegeven door een relatie die in WAQUA met een knik-kromme is geschematiseerd, zie figuur (3-4).



figuur 3-4 Een relatie tussen Windsnelheid en  $C_d$  coëfficiënt

De snelheden en richtingen van de wind in de periode van 4 t/m 13 oktober, gemeten op een landstation op Terschelling staan in figuur (3-5). Deze windsnelheden en richtingen zijn als een uniform windveld ingevoerd in het Friesche Zeegat Model.



figuur 3-5 Gemeten windsterkte en windrichting ter plaatse van Terschelling landstation

### 3.3.3 Droogvallen en onderlopen

Het Waddenzee gedeelte van het Friesche Zeegat Model, van het vasteland tot aan de Waddeneilanden Ameland en Schiermonnikoog, bestaat uit vele gebieden die onder invloed van het getij droogvallen en onderlopen. De schematisatie hiervan in WAQUA is te splitsen in een droogval en een onderloop procedure.

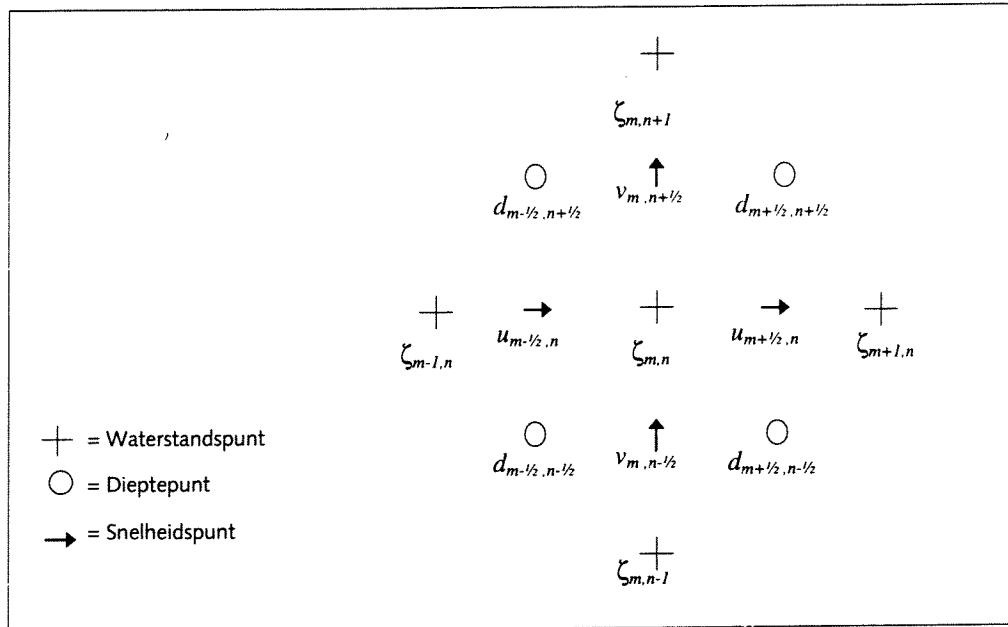
Het droogvallen van punten in het rekenrooster betreft een tweetal controles; op snelheidspunten ( $u, v$  punten) en op waterstandspunten ( $\zeta$  punten), zie figuur (3-6). Voor het droogvallen op een snelheidspunt gebruikt WAQUA het volgende algoritme;

```
if (  $H_{m+1/2,n} < 1/2 \delta$  ) while point is wet (  $u_{m+1/2,n} \neq 0$  ) then
    point becomes dry (  $u_{m+1/2,n} = 0$  )
```

```
else status of point does not change
endif
```

met:  $H_{m+1/2,n} = 1/2 (d_{m+1/2,n+1/2} + d_{m+1/2,n-1/2} + \zeta_{m,n} + \zeta_{m+1,n} )$   
 $\delta$  = uniforme drempelwaarde

Met andere woorden, als de totale waterdiepte in een snelheidspunt onder een halve drempelwaarde daalt, wordt het snelheidspunt droog gezet. Als de waterstand stijgt en de totale waterdiepte groter wordt dan de drempelwaarde, wordt het snelheidspunt weer nat gezet. Indien deze controle niet wordt uitgevoerd bestaat de mogelijkheid dat de berekeningen instabiel worden wanneer de waterdiepte negatief wordt op het snelheidspunt. Deze procedure voorkomt tevens dat een snelheidspunt die in de eerste halve tijdstap is drooggezeten weer in de tweede halve tijdstap onderloopt.



figuur 3-6 Uitsnede van het rekenrooster van WAQUA met de locaties van de waterstands-, snelheids- en dieptepunten

Een tweede controle bepaalt de status op de waterstandspunten. Deze controle voorkomt dat de waterstand in een waterstandspunt onder de bodem daalt. Negatieve volumes kunnen bij transportberekeningen tot massaverlies en instabiliteiten leiden. Voor het droogvallen op een waterstandspunt gebruikt WAQUA het volgende algoritme:

if  $(\zeta_{m,n} + d_{\zeta}) < 0$  while point is wet then

$$(u_{m+1/2,n} = 0), (v_{m,n+1/2} = 0), (u_{m-1/2,n} = 0), (v_{m,n-1/2} = 0)$$

Else status of point does not change

Endif

De diepte in het waterstandspunt ( $d_{\zeta}$ ) kan op drie verschillende manieren in WAQUA bepaald worden:

- 1)  $d_{\zeta, \text{Maximum}} = \frac{1}{2} ( \text{Max}( d_{m+1/2,n+1/2}, d_{m-1/2,n-1/2} ) + \text{Max}( d_{m+1/2,n-1/2}, d_{m-1/2,n+1/2} ) )$
- 2)  $d_{\zeta, \text{Gemiddeld}} = \frac{1}{4} ( ( d_{m+1/2,n+1/2} + d_{m+1/2,n-1/2} + d_{m-1/2,n+1/2} + d_{m-1/2,n-1/2} ) )$
- 3)  $d_{\zeta, \text{Minimum}} = \frac{1}{2} ( \text{Min}( d_{m+1/2,n+1/2}, d_{m-1/2,n-1/2} ) + \text{Min}( d_{m+1/2,n-1/2}, d_{m-1/2,n+1/2} ) )$

Het bovenstaande betekent dat als de waterstand beneden de bodem ligt, een heel blok uit de berekening verwijderd wordt. De waterstand binnen dat blok kan niet meer veranderen en wordt gelijk gesteld aan de voorlaatste waterstand die nog boven de bodem lag. Het is ook mogelijk de controle op de waterstandspunten uit te schakelen. Het geheel achterwege laten van deze controle geeft de gladst mogelijke resultaten echter een koppeling met stoftransportroutines is dan niet mogelijk.

Het onderlopen vindt alleen plaats op snelheidspunten. Voordat de vergelijkingen worden opgelost, zoals in appendix A beschreven, wordt de status van elk snelheidspunt bepaald en indien nodig aangepast op de volgende wijze:

if point is dry ( $u_{m+1/2,n} = 0$ ) and ( $H_{m+1/2,n} > \delta$ )

point becomes wet ( $u_{m+1/2,n} \neq 0$ )

Else status of point does not change

Endif

Voor het Friesche Zeegat Model is een drempelwaarde van 0.1 m gekozen voor de controle op de snelheidspunten en het "gemiddelde" criterium voor de controle op de waterstandspunten om toekomstige stoftransportberekeningen met het afgeregelde model mogelijk te maken.

### 3.3.4 Turbulente viscositeit

De turbulente viscositeit heeft bij de eerste berekening een waarde van  $10 \text{ m}^2/\text{s}$  uniform over het hele gebied (waarde overgenomen van het Kuststrook-model). In de initiële berekeningen bleek een waarde van  $1 \text{ m}^2/\text{s}$  beter te voldoen om de amplitude van de stroomsnelheden te verhogen. De viscositeit heeft echter een beperkte invloed ten opzichte van bijvoorbeeld de bodemwrijving.

## 4 Afregeling en gevoeligheidsonderzoek

### 4.1 Inleiding

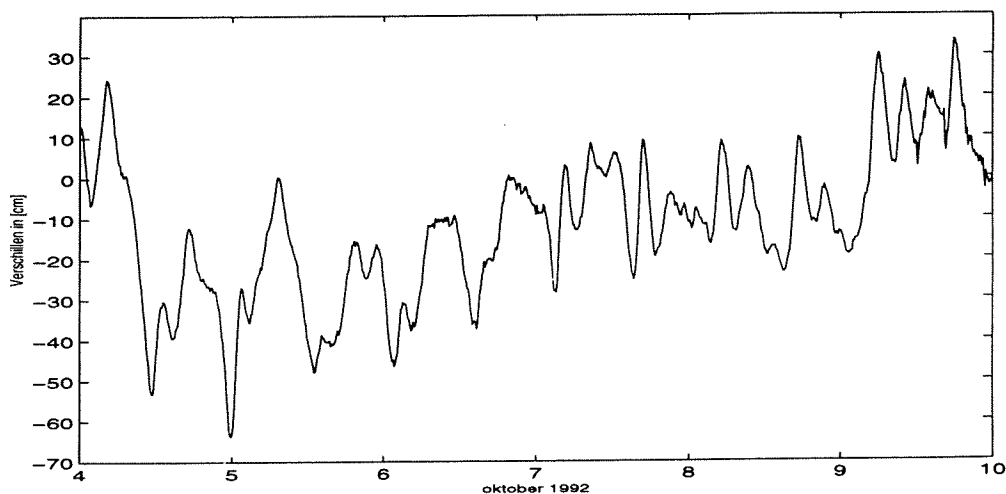
Het primaire doel van de simulaties is het afregelen van het Friesche Zeegat Model. De afgeregelde waterstanden en stromingen worden in eerste instantie door de TU-Delft gebruikt voor invoer in het golfmodel SWAN. Omdat de golfmeetpunten voornamelijk in de buitendelta en in de toegangseulen van het Friesche Zeegat gelegen hebben, is dit gebied vooral van belang voor de golfsimulaties met het model SWAN. Tevens zijn de stromingen in de Zoutkamperlaag-geul tot aan de dijk van belang voor eventuele stromingsberekeningen met extreme storm omstandigheden. Voor de berekeningen met de extreme storm omstandigheden is verdere kennis van de gevoeligheden van de invoerparameters van belang om de stromingen onder deze omstandigheden te modelleren (belangrijk in het kader van het HYDRA-project). De meetgegevens van de waterstanden en de stromingen zijn als eerste vergeleken met de berekeningen waarna een gevoeligheidsanalyse van de parameters gestart is. De resultaten van de gevoeligheidsanalyse zijn gebruikt voor de afregeling van het model. Bij de vergelijking van de beschikbare meetgegevens met de berekende gegevens is het belangrijk gebleken om de berekende globale stromingen te verifiëren.

### 4.2 Initiële berekeningen

#### Aanpassing van de randvoorwaarden

Uit de eerste berekeningen van het model bleek dat de verschillen tussen de metingen en de berekeningen van de waterstanden veel te groot waren om een gevoeligheidsonderzoek van waterstanden en stromingen uit te voeren. In figuur (4-1) is het verschil te zien tussen de gemeten waterstanden ter plaatse van Wierumergronden en de berekende waterstanden op dezelfde plaats. Omdat de opgelegde randvoorwaarde (waterstandsranden) op de Noordzee van het model grote invloed heeft op de waterstanden en de waterbeweging in het gehele gebied, is deze als eerste aangepast.





figuur 4-1 Verschilfunctie = Gemeten waterstanden - Berekende waterstanden ter plaatse van Wierumergronden.

Deze aanpassing is uitgevoerd door het verschil tussen de gemeten waterstanden en de berekende waterstanden van Wierumergronden bij de oude waterstandsranden op te tellen. Het waterstandmeetstation Wierumergronden is gekozen omdat dit station het dichtste bij de randen van het Friesche Zeegat model ligt. Dit betekent voor de 27 randvoorwaarden op de Noordzee  $i = 1..27$  en de modelperiode  $t = 0..T$ ;

$$H_{rand}^{nieuw}(i, t) = H_{meting}^{Wiergnd}(t) - H_{berekening}^{Wiergnd}(t) + H_{rand}^{oud}(i, t)$$

met:  $H_{rand}^{nieuw}(i, t)$  = nieuwe waterstandrandpunten

$H_{meting}^{Wiergnd}(t)$  = meting Wierumergronden

$H_{berekening}^{Wiergnd}(t)$  = berekening Wierumergronden

$H_{rand}^{oud}(i, t)$  = oude waterstandrandpunten

De resultaten voor de waterstanden zijn gegeven in Bijlage (1a t/m b). Bij deze figuren valt op dat ter plaatse van Schiermonnikoog-steiger de eb waterstanden veel te hoog berekend worden. De oorzaak ligt in de beperkte hoeveelheid mazen waarmee de geul, die water naar de steiger transporteert, wordt geschematiseerd, zie figuur (3-2).

### Verschuiving vergelijkingspunten in het rooster

Er bleken grote verschillen te bestaan tussen de gemeten diepten op de

stroommeetpunten en de diepten van de bodemfile (fzwaqua.bot, zie appendix D). Omdat tijdens de initiële berekeningen algemeen aangenomen werd dat de gebruikte bodem (fzwaqua.bot) de meest recente was voor berekeningen van 9 oktober 1992 zijn de vergelijkingspunten verschoven in het rekenrooster om toch een vergelijking te kunnen maken met de gemeten stromingen. De resultaten van deze verschuiving voor de stroomsnelheden is gegeven in Bijlage (2). Hierin is duidelijk te zien dat punten aan de rand van de geul (de Meetpaal) het gevoeligst zijn voor deze verschuivingen. Grote verschillen in de gedigitaliseerde bodemfiles kunnen grote verschillen in de stromingsberekeningen veroorzaken.

### **Constructie nieuwe bodemfile fz8791ri.waq**

De verschillen tussen de meetdiepten en de gedigitaliseerde WAQUA bodem waren in enkele gevallen zo groot dat gezocht is naar een verklaring hiervoor. Uit literatuur zoals [Oost en de Haas, 1993] bleek, dat de gebruikte DTM uit lodingsgegevens van 1987 bestond. Het zoeken naar een meer recente DTM heeft lodingen uit 1991 opgeleverd. Daarvan is een nieuwe DTM gemaakt. De lodingen beslaan een groot gedeelte van de buitendelta en het gebied van de toegangsgeulen (in appendix C staat de constructie van deze DTM beschreven onder de naam fz8791ri.waq).

### **Drooggevallen punten in WAQUA**

In de berekeningen bleken dat sommige punten in het rooster, na drooggevallen te zijn tijdens de inspeeltijd van de berekening, niet meer natgezet konden worden door de rekenroutines van WAQUA. Tijdens de vloedperiode ontstond een verschil van meer dan een meter tussen deze punten en de omliggende roosterpunten. De oplossing van dit probleem is gevonden door een andere oplossing van de rekenroutine SUV in WAQUA te gebruiken. Het verschil tussen de standaard en de gewijzigde oplossing van de SUV routine in WAQUA wordt uitvoerig in appendix A beschreven. De gewijzigde rekenroutine heeft er voor gezorgd dat alle punten volgens de gemiddelde procedure, zoals in paragraaf 3.2.3 beschreven, drooggevallen en onderlopen.

## 4.3 Gevoeligheidsanalyse

### 4.3.1 Verschillende strategieën om gevoeligheden te analyseren

Voor de globale stromingen in het gebied is het van belang om een beeld te krijgen van de mate waarin de parameters de waterbeweging beïnvloeden. In een grootschalig simulatie model, zoals het CSM8-model, is een vergelijking van de stroming op een lokaal punt voldoende omdat er rondom het stroompunt weinig snelheidsgradiënten voorkomen. Rondom de toegangseulen in het Friesche Zeegat zijn de stromingen echter zeer veranderlijk, zie Bijlage (6a/b). Deze stromingen blijken in het Friesche Zeegat veel gevoeliger te zijn voor veranderingen van fysische parameters dan de stromingen in het midden van de geul, waar de stromingen zijn gemeten tijdens de meetcampagne van 1992. Dit gegeven vereist een andere aanpak van de vergelijking van de berekeningen met de metingen en van berekeningen onderling. Hieronder volgt een opsomming van verschillende strategieën om deze gevoeligheden te analyseren:

- Conventionele visuele vergelijking

Deze veel gebruikte methode vergelijkt op een aantal punten in het rooster de waterstandstijdreeksen en stroomtijdreeksen van de verschillende berekeningen zodat op vaste punten in het model een snelle visuele vergelijking gemaakt kan worden. Voor grootschalige gebieden zoals het CSM8-model (Continental Shelf Model) en het Kuststrook-model is deze wijze van vergelijking zeer handig. In deze modellen verschillen de waterstanden in de uithoeken van het model significant en is de stroomsnelheid van groter belang dan de richting omdat de snelheidsgradiënten rondom het roosterpunt gering zijn. Door stroomrichtingen met elkaar te vergelijken wordt vooral het faseverschil duidelijk tijdens de kentering van het getij. De correlatie van de waterstanden en de stromingen is niet afhankelijk van droogvallende platen en kleine circulaties in de buurt van de meetpunten. Indien echter de gevoeligheden van veel parameters in veel punten vergeleken worden, kan het overzicht gemakkelijk verloren worden door het grote aantal grafieken.

- Vergelijking met een foutnorm ( $F_n$ )

Een foutnorm is een numerieke waarde die op enkele punten, verdeeld over het model, of op een deelgebied toegepast kan worden. De lokale en globale foutnorm geeft een enkele numerieke (positieve) indicatie van het verschil in de berekeningen in het een gebied of de gevoeligheid in een lokaal punt. De snelheden van twee simulaties (bijvoorbeeld  $sim_1$  en  $sim_2$ ) kunnen in de volgende formules vergeleken worden:

$$F_{n,pl,sim_{1,2}} = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T (u_{pl,sim_1}(t) - u_{pl,sim_2}(t))^2$$

$$F_{n,t,dgeb,sim_{1,2}} = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (u_{t,sim_1}(m, n) - u_{t,m,n,sim_2}(m, n))^2$$

Met:

$F_{n,pl,sim_{1,2}}$  = foutnorm voor één enkel punt in het rooster voor het verschil tussen simulatie 1 en simulatie 2 voor een bepaalde berekende periode

$F_{n,dgeb,sim_{1,2}}$  = foutnorm voor een deelgebied voor het verschil tussen simulatie 1 en 2 voor één tijdstip van de berekening

$u_{pl,sim_{1,2}}(t)$  = stroomsnelheid op tijdstip (t) in meetpunt of vergelijkingspunt

$u_{t,sim_{1,2}}(m, n)$  = stroomsnelheid op roosterpunt (m,n) op één tijdstip van de berekening

De lokale en globale foutnorm geeft een enkele numerieke (positieve) indicatie van het verschil in de berekeningen in het hele gebied of de gevoeligheid in een lokaal gebied van het rekenrooster. De lokale foutnorm wordt veelvuldig gebruikt om de berekeningen met de metingen te toetsen. Voor de richting van de stroming geeft deze foutnorm geen informatie. Een groot voordeel van deze vergelijking is dat bij veel gevoeligheids berekeningen de hoeveelheid data beperkt blijft en het is (eenmaal geprogrammeerd) snel uit te voeren. Echter indien geen visuele of numerieke controle van de faseverschillen plaatsvindt kan de gevoeligheid makkelijk verkeerd geïnterpreteerd worden.

- Stroombeeld vergelijking

Een plaatje van het gebied met daarin stroomvectoren geeft een goed beeld van circulaties van stromingen in een gebied met veel stroomsnelheids gradiënten in de geulen en rondom drooggevallen platen zoals in het Friesche Zeegat. Vectorplaatjes gecombineerd met conventionele waterstand grafieken geven een goed beeld van bijvoorbeeld de gevoeligheid van de bodemweerstand.

### Strategie gevoeligheidsonderzoek van het Friesche Zeegat Model

De conventionele vergelijking van de waterstanden en stroomsnelheden heeft in het Friesche Zeegat Model niet genoeg inzicht in de gevoeligheid van de parameters gegeven. De veranderingen waren niet significant om een duidelijk effect te zien. De hoeveelheid grafieken die op deze manier gemaakt zijn, hebben er toe geleid om de foutnorm te hanteren. In de loop van het gevoeligheidsonderzoek werd duidelijk dat de stromingen rondom de gemeten stromingen in het midden van de geul veel significanter veranderden. De bodemtopografie bleek een zeer belangrijke parameter te zijn in het globale stromingsbeeld. De stromingen in het midden van de geul (waar voornamelijk gemeten is) worden voornamelijk gestuurd door de randen van het model op de Noordzee. Er wordt in de volgende paragrafen vooral gebruik gemaakt van de conventionele methode in combinatie met de vergelijking van de stromingsbeelden. Hiermee wordt de gevoeligheid van de bodemtopografie en de dominante invloed van de randvoorwaarden duidelijk. Voor een gedetailleerder onderzoek naar gevoeligheden zou de foutnorm in deelgebieden gebruikt moeten worden en als deze eenmaal op een verantwoorde wijze geprogrammeerd is, kan hiermee de hoeveelheid data verantwoord gereduceerd worden zonder dat de veranderingen in het globale stroombeeld buiten beeld blijven.

#### 4.3.2 Numerieke gevoeligheden

##### Tijdstap

De tijdstap is vooral belangrijk voor de nauwkeurigheid van het model. Uit de berekening met een tijdstap van een halve minuut blijkt dat er geen grote verschillen optreden in vergelijking tot de berekeningen met een tijdstap van één minuut. De vergroting van de tijdstap naar twee minuten leidt wel tot een zichtbare verlaging van de nauwkeurigheid. Uit rekestijdoverweging is de tijdstap één minuut gehouden voor alle berekeningen.

## Berekeningen met drie dimensionaal simulatie pakket TRIWAQ

TRIWAQ is een drie dimensionaal waterbewegings simulatie pakket en is geïmplementeerd zoals beschreven in [Lander, J.W.M, P.A. Blokland, J.M. de Kok, 1994]. In TRIWAQ worden in tegenstelling tot WAQUA ook verticale snelheden tussen gedefinieerde lagen berekend. Voor het Friesche Zeegat Model zijn drie simulaties met TRIWAQ uitgevoerd namelijk met één, vier en tien lagen. De berekeningen met TRIWAQ leverden een nauwelijks gewijzigd stromingsbeeld aan de oppervlakte op. Door het tekort aan meetgegevens en de extensieve rekentijd verhoging is geen gevoeligheidsonderzoek gestart met drie dimensionale berekeningen. Tevens was het niet mogelijk berekeningen met meerdere lagen uit te voeren. Het geheugen van de huidige rekenmachines (HP, type 9000/735), gebruikt door het RIKZ) is hiervoor te klein. In Bijlage (3) zijn de stroomsnelheden op de stroommeetpunten van de WAQUA en de tien lagen berekening van TRIWAQ met elkaar vergeleken. Een duidelijke verhoging van de stroomsnelheden is te zien tijdens de vloed stroming van 4.00 tot 6.00 uur op 9 oktober. De noordwesten windschuifspanning die op dat moment met de stroom mee werkt is hier van invloed op de bovenste laag.

tabel 4-1 Vergelijking rekentijd van WAQUA en TRIWAQ met het Friesche Zeegat Model

Berekening	Hoeveelheid gesimuleerde minuten per CPU rekenminuten
WAQUA originele versie	68
TRIWAQ 1 laag	24
TRIWAQ 4 lagen	6.9
TRIWAQ 10 lagen	2.3

### 4.3.3 Afregelbare gevoeligheden

#### Analyse van de termen in de bewegingsvergelijkingen

De termen in de impulsvergelijkingen in de x- en de y-richting, zoals die in appendix A beschreven zijn, zijn met behulp van centrale differenties berekend om een schatting te maken van de grootte orde van deze termen. Het betreft de advectieterm, het verhang, Coriolis kracht, de weerstandsterm, viscositeit, de windterm en de versnellingsterm. De analyse is voor de tijdstippen 6.00 en 9.00 uur op 9 oktober uitgevoerd. De resultaten zijn te zien in de Bijlagen (4a/b) en (5a/b). In deze figuren geven de kleuren de absolute waarde per punt aan voor de specifieke term en de vectoren geven hieraan een globale richting. De vectoren geven voor elk afzonderlijk plaatje een idee van de globale variaties in het gebied. Voor de twee tijdstippen zijn in twee figuren de termen opgeteld in de x- en de y-richting en daarna gekwadeerd om de fout van de toegepaste discretisaties te vinden, deze blijkt in de buurt van 0.01 te liggen (zie figuren TOTAAL met een schaal  $\rightarrow 10^{-5}$ !). De aanzienlijke fout op 9.00 uur in de buurt van Engelsmanplaat komt door de lage waterstand aldaar. Uit deze analyse blijkt dat vooral de weerstand en de verhangterm de grootste invloed uitoefenen op de waterbeweging in het gebied en elkaar in grote mate tegenwerken.

#### Verskil stromingsbeeld t.g.v. bodemtopografie

De stroomvelden van een berekening met de nieuwe DTM (fr8791ri.waq) en de oude (fzwaqua.bot) zijn met elkaar vergeleken in Bijlage (6a/b) op de tijdstippen 9 oktober 6.00 uur (ebstroom) en 12.00 uur (vloedstroom). In deze bijlage zijn significante verschillen in het stroombeeld te zien in de buitendelta van de twee DTM's van 1987 en 1991 (vooral in de buitendelta en in de buurt van de toegangseuven zijn de bodemgegevens aangepast). In de Bijlagen (7a/c) zijn de stromingen in de u-richting en de v-richting van elkaar afgetrokken voor dezelfde tijdstippen en het verschil is met vectoren in de roosterpunten gevisualiseerd. De vectoren geven vooral kwantitatieve verschillen in snelheden aan.

#### Verskil stroomtijdreeksen ter plaatse van de meetpunten ten gevolgen van de bodemtopografie

In Bijlage (8a/c) worden de stroomtijdreeksen van dezelfde twee berekeningen met de (fzwaqua.bot) en de (fz8791ri.waq) uitgezet ten opzichte van de meetwaarden. In deze vergelijking is goed te zien dat voor de metingen in het midden van de geul de vergelijking van de berekeningen met de twee DTM's weinig verschil oplevert (zie Oude

Westgat, Engelsmanplaat, en Roode Hoofd), voor de plaatsen aan de rand van de geul is een veel groter verschil merkbaar (Meetpaal). Het roosterpunt ter plaatse van het Nieuwe Westgat (tijdens de meetcampagne heeft op deze plaats de stroommeetboei waarschijnlijk niet gefunctioneerd) laat ook grote verschillen zien. Het is daarom vooral spijtig dat hier geen metingen voorradig zijn. In Bijlage (9) is het verschil van het aantal drooggevallen platen te zien tussen de twee berekeningen met de verschillende bodems tijdens laagwater op 9 oktober 3.00 uur. Omdat de bodemgegevens in het Waddenzee gebied, waar grote delen droogvallen tijdens laagwater, grotendeels identiek aan elkaar zijn (Iodigen 1987), zijn er veel overeenkomsten te zien, echter verschillen in het aantal drooggevallen platen zijn zichtbaar tot in de uiteinden van het model. Het kombergingsvolume is echter niet significant gewijzigd door het verschil van de bodemtopografie in de buitendelta en de toeganggeulen.

### Droogvalprocedure

De vier opties voor het bepalen van de waterdiepte op het waterstandspunt ( $d_{\zeta, \text{MAXIMUM}}$ ,  $d_{\zeta, \text{GEMIDDELD}}$ ,  $d_{\zeta, \text{MINIMUM}}$ , en geen controle op waterstands punten, zie paragraaf 3.3.4) zijn uitgetest voor het model, nadat bleek dat tijdens de berekeningen roosterpunten constant droog bleven staan. Vier berekeningen zijn uitgevoerd met de gewijzigde rekenroutine SUV in WAQUA. In Bijlage (10) is te zien dat berekeningen met waterdiepten bepaald door  $d_{\zeta, \text{GEMIDDELD}}$  en  $d_{\zeta, \text{MINIMUM}}$  geen groot kwantitatief verschil vertonen. De waterdiepte bepaald door  $d_{\zeta, \text{MAXIMUM}}$  laat zien dat de controle op de waterstandspunten grote invloed krijgt op de komberging van het hele gebied. De geulen worden smaller en grote gebieden kunnen afgesloten worden van de hoofdgeulen. De waterdiepte bepaald door het gemiddelde van de omliggende dieptepunten is voor de vervolgberekeningen gebruikt om het model af te regelen. Het afgeregelde model is hierdoor makkelijk aan te passen voor berekeningen met stoftransporten.



## Gevoeligheid van de weerstand

In het Friesche Zeegat Model kunnen lokale weerstandsveranderingen tot grote verschillen leiden in het hele stromingsbeeld van de geul. Een variatie van de lokale weerstand in het model kan het globale stromingsbeeld verslechteren in plaats van verbeteren. Deze variatie kan wel tot gevolg hebben dat op de plaats van het meetpunt de berekende absolute stroming, de stroommeting wel beter benadert. Omdat er geen stroombeeldwaarnemingen van de berekende periode beschikbaar zijn, is het veranderen van de lokale bodemweerstanden in het model niet uitgevoerd.

Een globale verandering beïnvloedt vooral de komberging van het gebied, de gevoeligheid hiervan is te zien in de Bijlagen (11a/b). In deze bijlagen zijn van twee berekeningen de waterstanden en de stromingen uitgezet. De eerste berekening is uitgevoerd met een globale Manning-coëfficiënt  $n=0.018$ , de tweede berekening is uitgevoerd met een globale Manning-coëfficiënt van  $n=0.026$  (deze waarden zijn beiden grenswaarden waartussen de weerstand verhoogd of verlaagd worden).

tabel 4-1 gevoeligheid weerstand

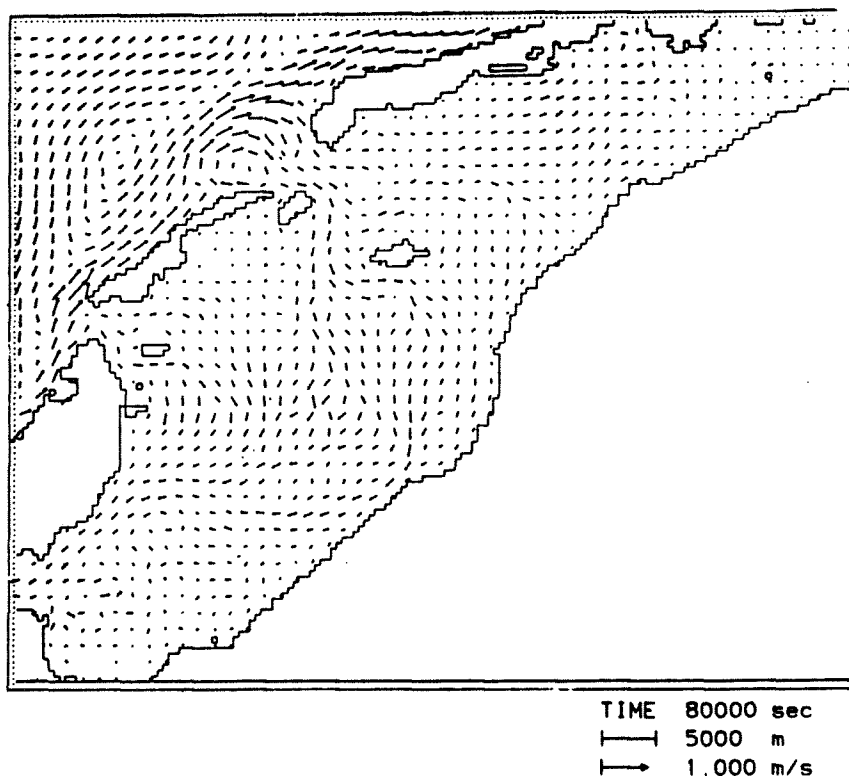
Run	Manning-coëfficiënt	Omgerekend Chézy, met $H=5\text{m}$
f18	$n=0.018$	$72 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$
f26	$n=0.026$	$50 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$

In de uiteindelijke berekening zijn de oorspronkelijke Manning-coëfficiënten niet gewijzigd. De reden hiervoor is dat indien er geen aanvullende meetgegevens aanwezig zijn die meer inzicht geven in het kombergingsvolume. De oorspronkelijke waarden voor de Manning-coëfficiënten zijn verkregen uit andere afgeregelde Waddenzee modellen. Uit ervaring is dus gebleken dat deze waarden voldoen voor de Waddenzee en het Noordzee gedeelte van het model.

## Gevoeligheid van de windschuifspanning

In de randvoorwaarden van het Friesche Zeegat is de opzet door de storm van 9 oktober verdisconteerd. De windschuifspanning heeft weinig invloed in een klein model zoals het Friesche Zeegat op de waterstanden indien de gebruikelijke windcoëfficiënten gebruikt worden, zoals in paragraaf 3.3.3 beschreven. In de berekeningen zijn de windcoëfficiënten met een factor twee vermenigvuldigd. Deze verhoogde windschuifspanning verhoogde enigszins de amplitude van de stromingen. Door de windschuifspanning met een factor vier te vermenigvuldigen wordt de invloed van de wind op de waterstanden merkbaar. In Bijlage (12) is een duidelijke ongewenste verhoging te zien op hoog- en laagwater op 9 oktober ten opzichte van de metingen.

Interessant is de stroming ter plaatse van Oude Westgat in Bijlage (13) op 6 oktober 1992. Op deze datum waait er een forse oostenwind die een grote invloed heeft op de stroming in deze geul. Ter plaatse van Oude Westgat draait de uitgaande ebstroom niet meer om naar binnen, tijdens vloed. De oostenwind heeft hier grote invloed op de waterbeweging in deze geul, echter de absolute stroming die volgens de stroommeetboei plaatsgevonden heeft, wordt nog niet benaderd bij een verdubbeling van de windsterkte. De windschuifspanning kan dus een significante invloed op de waterbeweging geven, echter de stroming wordt naar alle waarschijnlijkheid ook door andere invloeden gestuurd. Golfgedreven stroming kan hier een rol spelen. In [Botelho Machado, 1995] is de golfgedreven stroming in de zuidelijke Waddenzee berekend. In deze studie is te zien dat in de ebdelta's in de zuidelijke gedeelten van de Waddenzee de golfgedreven stromingen significant aanwezig kunnen zijn tijdens een forse oostenwind, zie figuur (4-2).



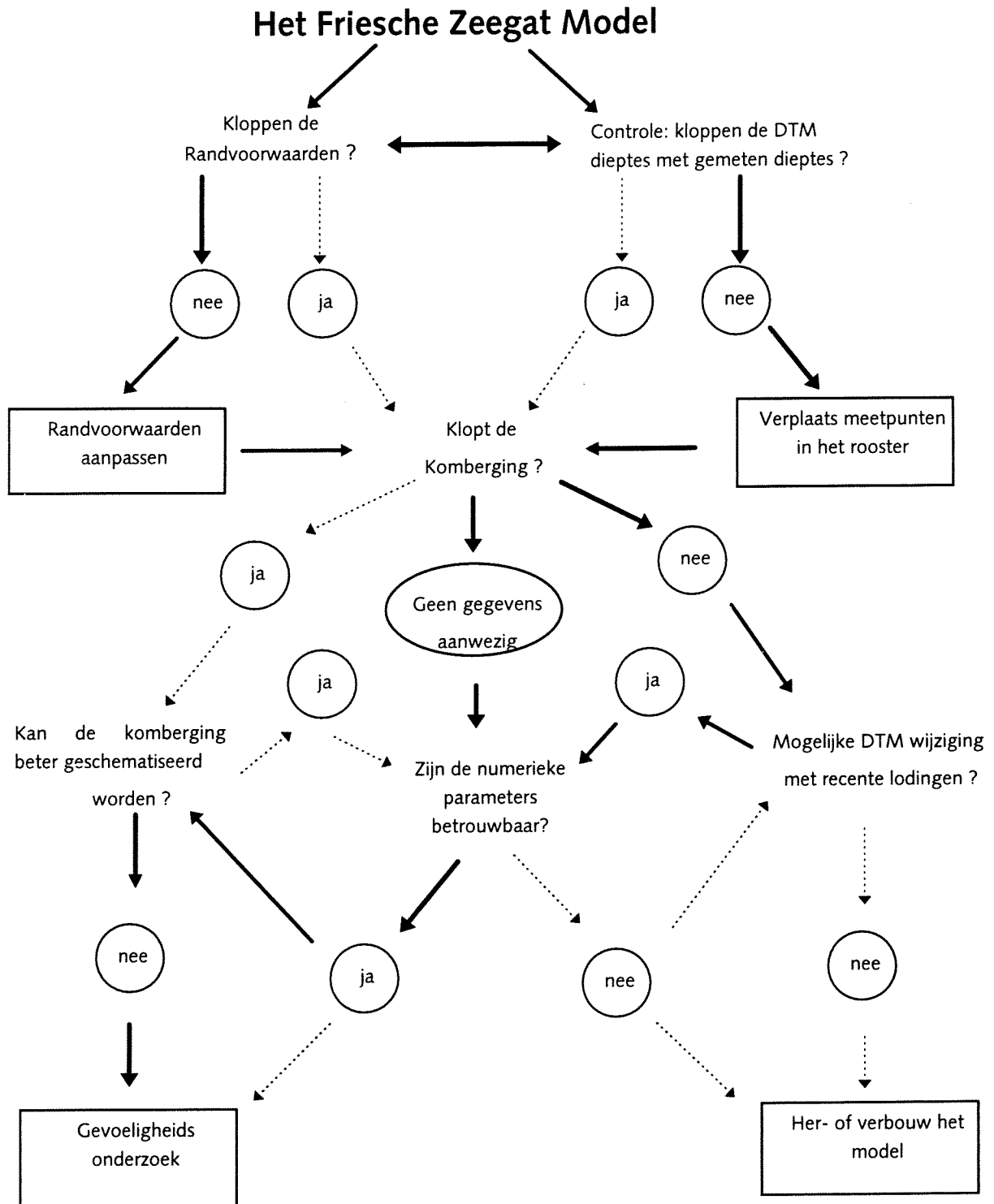
figuur 4-2 Golf aangedreven stromingen tijdens oostenwind ( $-90^\circ$ ) in de zuidelijke Waddenzee, uit [Botelho Machado, 1995]

### Resultaten van de berekeningen

In Bijlage (14a/c) zijn de stromingsvelden gegeven, zoals die uiteindelijk gesimuleerd zijn met WAQUA. Deze stromingsvelden worden gebruikt in het golf simulatie model SWAN om de golfmetingen met de golfberekeningen te vergelijken.

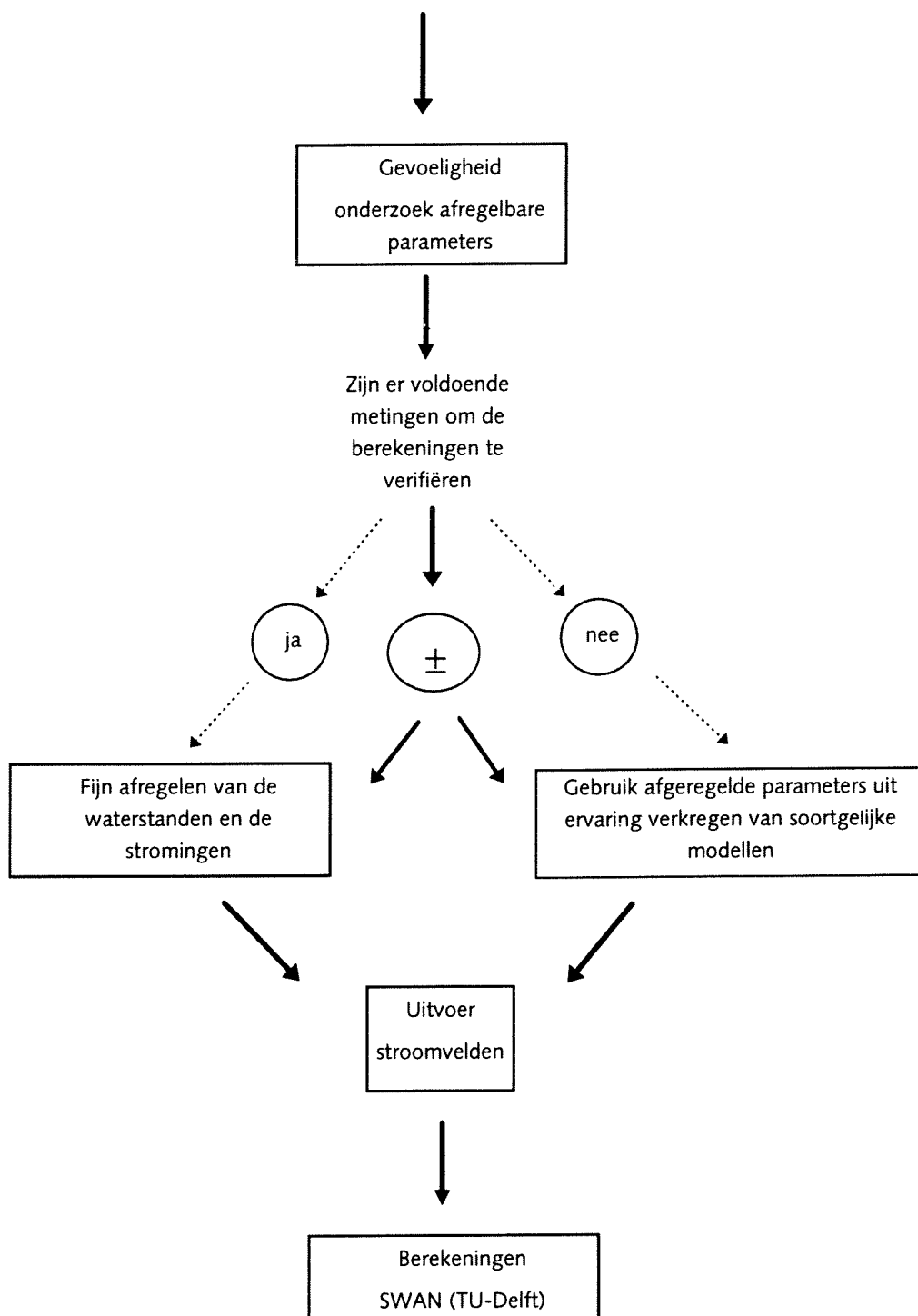
Simulatiemodel	WAQUA
Tijdstap	1 minuut
Stromingsrooster	niet-equidistant
Afmetingen van het rekenrooster	196 x106
Aantal actieve roosterpunten	17435
Weerstand Manning-coëfficiënt met op:	
$h < 5$ m	0.024
$5 < h < 10$ m	0.022
$h > 10$ m	0.020
Windcoëfficiënt	2
Viscositeit	$1 \text{ m}^2/\text{s}$
Droogvalprocedure	Gemiddeld

In de volgende stroomschema's wordt de werkwijze die gevolgd is samengevat. De dikke pijlen volgen de acties die uitgevoerd zijn. In figuur (4-3) en figuur (4-4) wordt duidelijk hoe de initiële berekeningen opgezet zijn en hoe het gevoeligheidsonderzoek opgezet is.



figuur 4-3 Stroomschema voor de initiële simulaties van het Friesche Zeegat Model

## Gevoeligheids studie



Figuur 4-4 Stroomschema gevoeligheidsonderzoek

## 5 Conclusies en Aanbevelingen

### 5.1 Conclusies

- De globale stromingen die plaatsvonden op 9 oktober in het Friesche Zeegat kunnen onvoldoende geverifieerd worden. Er is een tekort aan stroommetingen en er is onvoldoende bekend van het globale stroombeeld in de buitendelta. Aan de hand van de beschikbare meetgegevens is het voorspellend vermogen van het Friesche Zeegat Model van de stromingen aanzienlijk te noemen, indien recente gedigitaliseerde bodemgegevens aanwezig zijn.
- Gedigitaliseerde bodemfiles worden dikwijls aangepast. Dit heeft diverse redenen, bijvoorbeeld afregeling of aanpassing met meer recente meetgegevens. Deze aanpassingen worden meestal niet gedocumenteerd of zijn slecht leesbaar. Dit kan die bodemfile onbruikbaar maken.
- De randvoorwaarden van het Friesche Zeegat Model, die oorspronkelijk door het CSM8-model en daaropvolgend door het Kuststrook-model gegenereerd zijn, hebben niet voldaan. Alleen het verhang op de Noordzee randen is voor de uiteindelijke simulaties gebruikt.
- De randvoorwaarden van het Friesche Zeegat Model zijn zeer belangrijk voor de waterbeweging in het gehele model. De stromingen in de hoofdgeulen worden voornamelijk door deze randvoorwaarden gestuurd. De verhangterm wordt voornamelijk door de weerstand tegengewerkt. Tevens wordt de advectieve term in de ebdelta van belang.
- In het Waddenzee gedeelte, waar vele gebieden droogvallen tijdens laagwater, is de schematisatie van het rekenrooster dubieus. Veel geulen worden in dit gedeelte van het model met te grote maaswijdten geschematiseerd, hierdoor kunnen drooggevallen platen moeilijk van water voorzien worden, waardoor fouten optreden. Enkele punten die aan de randen van de geulen liggen kunnen hele gebieden afsluiten. Vooral de maximum droogvalprocedure sluit vele gebieden af tijdens laagwater.

- De heden gebruikte oplossing van de continuïteitsvergelijking in WAQUA is niet massa-behoudend tijdens de iteratie, dit kan problemen geven bij berekeningen met stoftransporten en in gebieden met een complexe geometrie en veel droogvallende platen tijdens eb. Daarom moeten alle initieel drooggevallen punten worden gecontroleerd of zij natgezet worden volgens de gekozen droogvalprocedure tijdens hoogwater.
- De conventionele manier om de stroommetingen met de berekeningen te vergelijken voldoet niet in een gebied zoals het Friesche Zeegat. De lokale gevoeligheid op het meetpunt kan een te strenge eis voor het afregelen van het model worden.
- De driedimensionale berekening met TRIWAQ heeft niet geleid tot grote veranderingen in het stromingsbeeld en in de stroomtijdreeksen ter plaatse van de stroommeetpunten. Zonder aanvullende meetgegevens zijn driedimensionale berekeningen met TRIWAQ niet zinvol om de stromingen met grotere zekerheid te modelleren voor de datum 9 oktober 1992.

## 5.2 Aanbevelingen

- Voor een beter gefundeerd gevoeligheidsonderzoek is een nieuw kromlijng bodemrooster nodig om de komberging in het gebied beter te schematiseren. De hoofdgeulen kunnen met een kromlijng rooster beter gevolgd worden. Zo kan de dijk van de afsluitdam van het Lauwersmeer beter gevolgd worden, wat belangrijk zou kunnen zijn bij de aanlevering van de hydraulische randvoorwaarden voor het HYDRA-project. Tevens zal het rekenrooster fijnmaziger moeten worden.
- De gewijzigde discretisatie van de continuïteitsvergelijking is een goed alternatief gebleken, echter deze methode verhoogde de rekentijd met een factor 1,3. Een reden van de verhoging van de rekentijd is dat deze methode minder snel convergeert. Een groot voordeel van deze methode is dat deze bij elke iteratiestap massa-behoudend is. Daardoor hoeft de convergentie-eis minder scherp te zijn en er zijn minder iteraties nodig. De convergentie-eis wordt in de originele WAQUA rekenroutine gekoppeld aan snelheden, er zou met de gewijzigde rekenroutine een koppeling aan waterstanden gemaakt kunnen worden om de snelheid te verhogen.
- Voor een goede verificatie van stromingen zijn onder andere de volgende gegevens nodig:
  - Overzichtsfoto's van het gebied ten tijde van de metingen
  - Waterstanden
  - Snelheidsmetingen
  - Debietmetingen
  - Stroombeelden

### Overzichtsfoto's

Een overzicht van het gebied is te verkrijgen door satellietfoto's die in de meetperiode gemaakt zouden kunnen worden. Deze foto's kunnen in een vroeg stadium (tijdens de modelbouw) in een complex gebied als het Friesche Zeegat, de beschikbare gedigitaliseerde bodemfiles kwalificeren. Deze foto's kunnen ook dienen om een inzicht te krijgen in het aantal drooggevallen platen in het gebied. Foto's tijdens hoog- en laagwater zijn erg nuttig. Met deze twee foto's is wellicht een schatting te maken van de komberging van het gebied.

### Waterstanden

De waterstanden in het buitengebied zijn erg belangrijk voor de stromingen in het



binnengebied. Het is van groot belang om de waterstanden op de buitenrand van het model (vooral tijdens een storm met forse waterstandsopzet) nauwkeurig op te kunnen geven. Waterstanden dienen in het buitengebied gemeten te zijn (zo dicht mogelijk aan de rand van het model) en in de geulen .

### **Snelheidsmetingen**

Snelheidsmetingen zouden in het Friesche Zeegat bij voorkeur in het midden van de geul moeten plaatsvinden. Dit om twee redenen:

- Reduceren van zeer lokale gevoeligheden
- De bodemtopografie in het midden van de geul is vrij uniform

Voor meerdere metingen in de verticaal is het moeilijk om midden in de geul te meten gedurende een langere periode in verband met de scheepvaart. Voor één meting in de verticaal is het juist aan te bevelen om in het midden te meten omdat in het diepste gedeelte van de geul de kans op aanvaring van de onderwaterboei het minst groot is. Stroommetingen aan de rand van de geul (ter plaatse van de grootste snelheidsgradiënten) hebben twee nadelen:

- De bodemtopografie zal erg goed bekend moeten zijn aan de rand van een geul om de stroomsnelheden te kunnen meten
- De lokale stroming zal in vergelijking met de berekende waarden een te hoge prioriteit krijgen ten opzichte van de globale stroming.

### **Debietmetingen**

Debietmetingen zijn essentieel voor morfologische studies in zeegaten zoals het Friesche Zeegat. De debieten zijn belangrijk voor de verificatie van de in- en uitstroom per getijperiode. Vooral ter hoogte van de toegangseulen in het zeegat is het waardevol te weten hoeveel water er bijvoorbeeld tijdens een eb periode naar buiten stroomt. Dit gegeven in combinatie met een overzicht van de hoeveelheid drooggevalen platen is nuttig voor de eerste verificatie van het model.

### **Stromingsbeeld**

Het globale stromingsbeeld in een zeegat is zeer complex. De extra schuifspanning die een storm op het wateroppervlak uitoefent maakt het stromingsbeeld nog veel complexer. De stroombeelden in een gebied zijn te meten door:

- balletjes of speciaal daarvoor gemaakte boeien in het water te gooien en met foto opnames te volgen.
- Grote circulaties in de geulen door de meetdienst te laten waarnemen en te laten rapporteren op het tijdstip van de stromingen.

De laatste mogelijkheid is een simpele manier die toch een belangrijk houvast kan bieden in een meetcampagne. Het is relatief goedkoop (de mensen op de boot die de metingen controleren zijn al ter plekke) en weinig arbeidsintensief. De vraag is of deze waarnemingen genoeg accurate gegevens opleveren in vergelijking met de moeite die het uitwerken van de gegevens kost. Een heldere documentatie is hiervoor van groot belang (b.v. door de circulaties in kaarten te laten tekenen). Het kan ook erg nuttig zijn de berekeningen aan de meetdienst te laten zien, en mede om basis hiervan een nieuw meetprogramma op te stellen.

## Literatuurlijst

- Abbott, M.B., D.R. Basco, 1989  
Computational Fluid Dynamics
- Booij, N., L.H. Holthuijsen, R.C. Ris, G. Ph.van Vledder, 1996  
Spectra in an estuary during a superstorm  
eindrapportage Superstorm, Delft Hydraulics H 2368
- Booij, R., 1992  
Turbulentie in de waterloopkunde  
TU Delft, collegedictaat b82
- Botelho Machado, U.E., 1995  
Wave induced currents  
Report 7-95, TU-Delft Group of Fluid Mechanics,
- Dunsbergen D.W., 1995a  
Verification set Friesche Zeegat  
RIKZ-95.035
- Dunsbergen D.W., 1995b  
Verification of SWAN 20.51 against field measurements in the Friesche  
Zeegat  
RIKZ-95.051
- Gebruik en Toepassing van WAQUA, 1987  
RWS,WL
- Huijs, S.W.E., 1993  
Geulmigratie op de Buitendelta  
eindrapport, Kustgenese Werkgroep 3
- Holthuijsen, L.H., N. Booij, R.C. Ris, 1996  
User manual for the program SWAN Cycle 1  
Simulation of Waves in the Nearshore  
TU-Delft Group of Fluid Mechanics,
- Kester, van J.A.Th.M., 1989  
Uniformeringen WAQUA-formuleringen  
rapport WL/Z266
- Kester, van J.A.Th.M., R.E. Uitenboogaard, G.S. Stelling, 1994  
Gevoeligheidsonderzoek 3D-Noordwijkraai-Model  
rapport WL/Z691
- Kuijper, E.V.L., 1993a  
Bouw en afregeling van het 2D(H) Kuststrook-model  
RWS, Dienst Getijdewateren, GWAO-93.123x
- Kuijper, E.V.L., 1993b  
Het 3D-KUSTSTROOK-model gebaseerd op TRIWAQ-in-SIMONA  
(Gevoeligheidsonderzoek)  
rapport DGW 93.044

- Lander, J.W.M., P.A. Blokland, J.M. de Kok, 1994  
The three-dimensional shallow water model TRIWAQ with a flexible vertical grid definition.  
werkdokument RIKZ/OS-96.104x
- Oost, A.P., H. de Haas, 1993a  
Het Friesche Zeegat, Morfologische-Sedimenttologische veranderingen in de periode 1927-1970  
KUSTGENESE, DGW-RWS
- Oost, A.P., H. de Haas, 1993b  
Het Friesche Zeegat, Morfologische-Sedimenttologische veranderingen in de periode 1970-1987  
KUSTGENESE, DGW-RWS
- Oost, A.P., 1995  
Dynamics and sedimentary development of the Dutch Wadden Sea with Emphasis on the Frisian Inlet  
Proefschrift, RUU
- Otta, A.K., G. Ph. van Vledder, L.H. Holthuijsen, R.C. Ris, 1995  
Validation of SWAN against field and experimental data  
rapport WL/H2117
- Philippart, M.E., D. Dillingh, S.T. Pwa, 1995  
De Basispeilen langs de Nederlandse kust  
rapport RIKZ/95.008
- Ronde, de J.C., et al, 1995  
Golfrandvoorwaarden langs de Nederlandse kust op relatief diep water  
rapport RIKZ/95.024
- Ridderinkhof, H, 1990  
Residual Currents and Mixing in the Wadden Sea  
Proefschrift, RUU
- Stelling, G.S., 1984  
On the construction of computational methods for shallow water flow problems  
RWS Communications no. 35
- Stelling, G.S., A.K. Wiersma, J.B.T.M. Willemse, 1986  
Practical Aspects of Accurate Tidal Computations  
Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 112, No. 9
- Stelling, G.S., 1991  
Uniformeringen van WAQUA rekenroutines inclusief droogvallen en weer onderlopen  
WL/Z166
- Vledder, G.Ph. van, 1994  
Verification of PHIDIAS against shallow water wave data  
Delft Hydraulics H1914
- Wang, Z.B., 1993  
Morphodynamic Modelling for a Tidal Inlet in the Wadden Sea  
Progress Report, WL/H850-50, Part III

# Appendix A

## Wiskundige formuleringen WAQUA

### A1-Inleiding

WAQUA is een numeriek waterbewegingssimulatie programma waarmee de beweging van oppervlaktewater in twee horizontale dimensies kan worden berekend. Het pakket wordt ondermeer gebruikt voor getijberekeningen in zeeën en estuaria en voor de berekening van gedetailleerde stromingen in gebieden van beperkte afmetingen. Het pakket kan verder gebruikt worden voor de berekening van hoogwaterstanden in rivieren. In WAQUA is het ook mogelijk stoftransporten in zeeën en rivieren te berekenen. In WAQUA worden de balansvergelijkingen opgelost onder de zogenaamde ondiepwater aanname:

Horizontale lengteschaal (getijgolf) >> Verticale lengteschaal (waterdiepte)

Deze appendix beschrijft het verschil tussen de originele discretisatie van de continuïteitsvergelijking zoals die heden in WAQUA gebruikt wordt en een gewijzigde discretisatie van de continuïteitsvergelijking zoals die in het drie dimensionale pakket TRIWAQ gebruikt wordt. De oorspronkelijke discretisatie van de continuïteitsvergelijking in WAQUA, beschreven in [Stelling,1984], heeft als nadeel dat de tussen oplossingen tijdens de iteraties niet compleet massabehoudend zijn. De uiteindelijke oplossing is dat bij benadering. Bij stoftransportberekeningen kan het niet-massabehoudend zijn van de eindoplossing tot verlies of generatie van stoffen leiden. Een ander nadeel van de oorspronkelijke discretisatie van de continuïteitsvergelijking is dat enige punten in het rooster, na drooggevallen te zijn tijdens de inspeeltijd van de berekening, niet meer natgezet kunnen worden. Dit probleem doet zich vaker voor bij punten in een rooster, gekenmerkt door grote bodemgradiënten of grote snelheidsgradiënten. In het Friesche Zeegat Model heeft dit probleem zich ook voorgedaan. Door de gewijzigde discretisatie te gebruiken worden deze punten wel weer natgezet in de inspeeltijd van de berekening. De gewijzigde discretisatie van de continuïteitsvergelijking is tevens massabehoudend tijdens alle iteratiestappen.

De oorspronkelijke discretisatie van de continuïteitsvergelijking heeft als voordeel dat deze bijna altijd convergeert en sneller is ten opzichte van de gewijzigde discretisatie.

Het volgende stelsel gekoppelde balansvergelijkingen worden opgelost:

Bewegingsvergelijkingen in de u en v richting:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gu\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 H} = \frac{\rho_a C_d W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2}}{\rho_w H} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (\text{A-1})$$

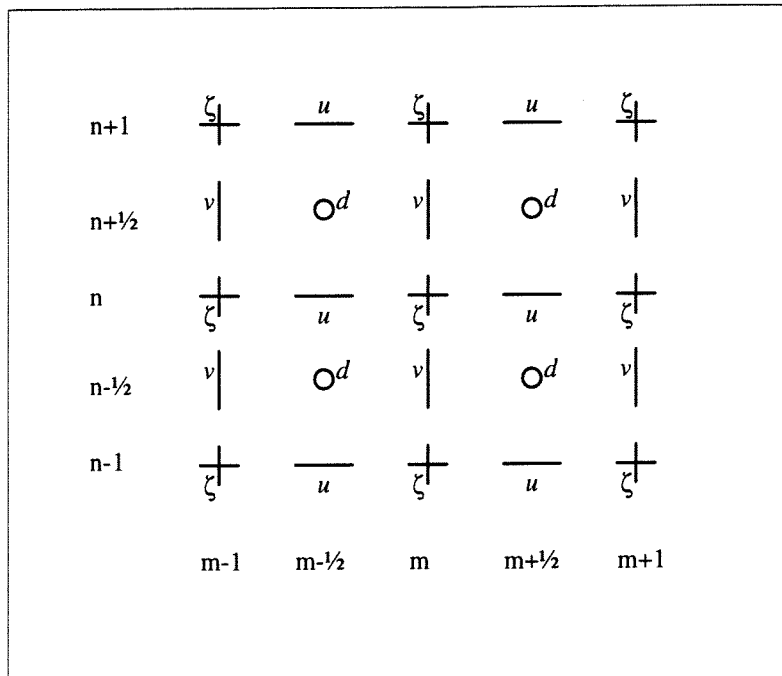
$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gv\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 H} = \frac{\rho_a C_d W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2}}{\rho_w H} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (\text{A-2})$$

continuïteitsvergelijking:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (Hu) + \frac{\partial}{\partial y} (Hv) = 0 \quad (\text{A-3})$$

met :	$u$	= diepte gemiddelde snelheid in de x-richting [m/s]
	$v$	= diepte gemiddelde snelheid in de y-richting [m/s]
	$\zeta$	= waterniveau boven referentievlak [m]
	$H = d + \zeta$	= totale waterdiepte [m]
	$d$	= waterniveau onder referentievlak [m]
	$f$	= Coriolis parameter [-]
	$g$	= zwaartekracht versnelling [m/s <sup>2</sup> ]
	$C$	= Chézy coëfficiënt [m <sup>1/2</sup> /s]
	$W_x, W_y$	= componenten van de windsnelheid [m/s]
	$\rho_a, \rho_w$	= dichtheid van lucht en water [kg/m <sup>3</sup> ]
	$C_d$	= windschuifspannings coëfficiënt [m <sup>2</sup> /s]
	$\nu$	= turbulente viscositeit [m <sup>2</sup> /s]

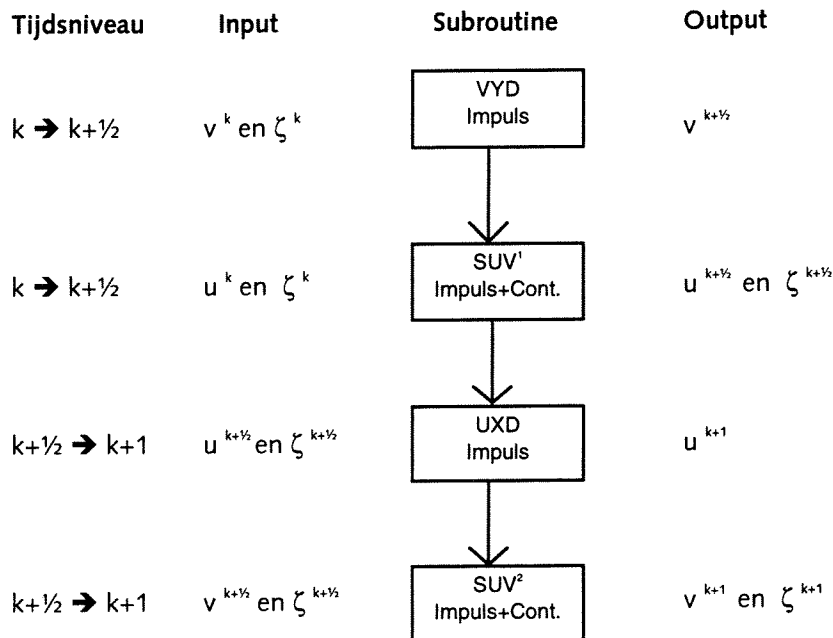
In het WAQUA-pakket wordt gebruik gemaakt van een volledig gestaggerd grid (Figuur A-1). De voordelen van het gebruik van een gestaggerd grid worden beschreven in [Stelling,1984]. Voor de oplossing van de balansvergelijkingen op dit gestaggerde rooster gebruikt WAQUA de A.D.I. (Alternating Direction Implicit) methode. Het voordeel van deze methode is dat onvoorwaardelijke stabiliteit gehandhaafd blijft, terwijl de hoeveelheid rekenwerk per punt sterk vermindert t.o.v. een volledig impliciet schema.



figuur A-1 Uitsnede van het gestaggerde rooster van WAQUA

## A-2 Structuur van WAQUA

Het rekenhart voor het berekenen van de waterbeweging in WAQUA bestaat uit vier rekenroutines. Deze vier routines berekenen tezamen de waterstanden en snelheden op het volgende tijdsniveau ( $k+1$ ). In de onderstaande figuur wordt de input en de output van de subroutines UXD,  $SUV^1$ , VYD en  $SUV^2$  zichtbaar gemaakt.



De subroutines UXD en  $SUV^1$  zijn, op het teken van de Coriolis-term na, volledig symmetrisch met de routines VYD en  $SUV^2$ . In de subroutine  $SUV^1$  wordt de continuïteitsvergelijking samen met de impulsvergelijking in de y-richting opgelost. Hieronder wordt de discretisaties beschreven zoals die in WAQUA gebruikt worden. Vanwege de symmetrie van de rekenroutines wordt alleen de discretisatie van de eerste halve tijdstap uitgewerkt.



### A-3 Discretisaties van WAQUA

Het ADI-schema voor de balansvergelijkingen:

stap 1:

$$u^0 = u^k, v^0 = v^k, \zeta^0 = \zeta^k$$

voor  $p=1,2, q=1,2,\dots,Q$

Bewegingsvergelijking op  $m+\frac{1}{2},n$ :

$$\frac{u_{m+\frac{1}{2},n}^q - u_{m+\frac{1}{2},n}^k}{\frac{1}{2} \Delta t} + u_{m+\frac{1}{2},n}^k \frac{(u_+^k - u_-^k)}{\Delta x} + S_{0,y}^{=k+\frac{1}{2}}(v^{=k+\frac{1}{2}}, u^k) + g \frac{(\zeta_{m+1,n}^q - \zeta_{m,n}^q)}{\Delta x} + R_u = 0 \quad (\text{A-4})$$

Bewegingsvergelijking op  $m,n+\frac{1}{2}$ :

$$\frac{v_{m,n+\frac{1}{2}}^p - v_{m,n+\frac{1}{2}}^k}{\frac{1}{2} \Delta t} + v_{m,n+\frac{1}{2}}^k \frac{(v_+^p - v_-^p)}{\Delta y} + S_{+x}^{=k}(u^{=k}, v^p, \delta) + g \frac{(\zeta_{m,n+1}^k - \zeta_{m,n}^k)}{\Delta y} + R_v = 0 \quad (\text{A-5})$$

met:

$$S_{0,y}^{=k}(v^{=k}, u^k) = v^{=k} \frac{(u_{m+\frac{1}{2},n+2}^k + 4u_{m+\frac{1}{2},n+1}^k - 4u_{m+\frac{1}{2},n-1}^k - u_{m+\frac{1}{2},n-2}^k)}{12\Delta y}$$

$$S_{+x}^{=k}(u^{=k}, v^p, \delta) = \begin{cases} u_{m,n+\frac{1}{2}}^{=k} \frac{(3v_{m,n+\frac{1}{2}}^{p-\delta} - 4v_{m-1,n+\frac{1}{2}}^{p-\delta} + v_{m-2,n+\frac{1}{2}}^{p-\delta})}{2\Delta x}, & \text{indien } u_{m,n+\frac{1}{2}}^{=k} > 0 \\ u_{m,n+\frac{1}{2}}^{=k} \frac{(-3v_{m,n+\frac{1}{2}}^{p-\delta} + 4v_{m+1,n+\frac{1}{2}}^{p-\delta} - v_{m+2,n+\frac{1}{2}}^{p-\delta})}{2\Delta x}, & \text{indien } u_{m,n+\frac{1}{2}}^{=k} < 0 \end{cases}$$

en  $\delta$  = correctie factor

Continuïteitsvergelijking op m,n:

$$\begin{aligned} & \frac{\zeta_{m,n}^q - \zeta_{m,n}^k}{\frac{1}{2} \Delta t} + \frac{\left( \overline{h}_+^y u_{m+\frac{1}{2},n}^q - \overline{h}_-^y u_{m-\frac{1}{2},n}^q \right)}{\Delta x} + \zeta_{m,n}^{q-1} \frac{\left( u_{m+\frac{1}{2},n}^q - u_{m-\frac{1}{2},n}^q \right)}{\Delta x} + \frac{1}{2} u_{m+\frac{1}{2},n}^{q-1} \frac{\left( \zeta_{m+1,n}^q - \zeta_{m,n}^q \right)}{\Delta x} \\ & + \frac{1}{2} u_{m-\frac{1}{2},n}^{q-1} \frac{\left( \zeta_{m,n}^q - \zeta_{m-1,n}^q \right)}{\Delta x} + \frac{\left[ v_{m,n+\frac{1}{2}}^k \left( \overline{\zeta}_+^k + \overline{h}_+^x \right) - v_{m,n-\frac{1}{2}}^k \left( \overline{\zeta}_-^k + \overline{h}_-^x \right) \right]}{\Delta y} = 0 \end{aligned} \quad (\text{A-6})$$

met;

$$\begin{aligned} \overline{h}_+^y &= \frac{\left( h_{m+\frac{1}{2},n+\frac{1}{2}} + h_{m+\frac{1}{2},n-\frac{1}{2}} \right)}{2}, \quad \overline{h}_-^y = \frac{\left( h_{m-\frac{1}{2},n+\frac{1}{2}} + h_{m-\frac{1}{2},n-\frac{1}{2}} \right)}{2} \\ \overline{h}_+^x &= \frac{\left( h_{m+\frac{1}{2},n+\frac{1}{2}} + h_{m-\frac{1}{2},n+\frac{1}{2}} \right)}{2}, \quad \overline{h}_-^x = \frac{\left( h_{m+\frac{1}{2},n-\frac{1}{2}} + h_{m-\frac{1}{2},n-\frac{1}{2}} \right)}{2} \\ \overline{u}^x &= \frac{\left( u_{m+\frac{1}{2},n} + u_{m-\frac{1}{2},n} \right)}{2} \\ \overline{\zeta}_+^x &= \frac{\left( \zeta_{m+1,n} + \zeta_{m,n} \right)}{2}, \quad \overline{\zeta}_-^x = \frac{\left( \zeta_{m,n} + \zeta_{m-1,n} \right)}{2} \\ \overline{\zeta}_+^y &= \frac{\left( \zeta_{m,n+1} + \zeta_{m,n} \right)}{2}, \quad \overline{\zeta}_-^y = \frac{\left( \zeta_{m,n} + \zeta_{m,n-1} \right)}{2} \end{aligned}$$

Vergelijking (A-5) wordt eerst impliciet opgelost. De matrix structuur voor de impliciete oplossing van  $v_{m,n+\frac{1}{2}}^p$  is afhankelijk van de dominante stroomrichting van  $\overline{u}_{m,n+\frac{1}{2}}^k$ . Indien het teken constant is in de rekenrichting kan voldaan worden met 1 iteratiestap. Indien het teken wijzigt wordt de structuur van de matrix tri-diagonaal en is uit ervaring gebleken dat twee iteratie stappen voldoende is. Een uitvoerige uitleg van deze methode staat in [Stelling,1984]. Het opwind schema voor de advectieve term reduceert ook 'wiggles' in gebieden waar grote snelheidsgradiënten voorkomen, zie [Abbot en Basco, 1989].

Vervolgens worden de vergelijking (A-4) en (A-6) opgelost, de onbekenden in dit stelsel zijn:

$$\zeta_{m,n}^q, \zeta_{m+1,n}^q, \zeta_{m-1,n}^q, u_{m+\frac{1}{2},n}^q, u_{m-\frac{1}{2},n}^q$$

Door de impulsvergelijking in de continuïteitsvergelijking te substitueren blijven alleen waterstanden over. Deze waterstanden worden per rij in een tridiagonale matrix iteratief opgelost. Een nadeel van de hier beschreven iteratiemethode is dat de tussenoplossingen niet massabehoudend zijn. Het iteratie proces wordt herhaald voor  $q=1,2,\dots$  totdat geldt:

$$|u^q - u^{q-1}| < \varepsilon$$

$$\text{Dan geldt; } u^{k+\frac{1}{2}} = u^q, \zeta^{k+\frac{1}{2}} = \zeta^q$$

De snelheden worden per iteratiestap gecontroleerd omdat bij snelheden de convergentie-eis groter is dan bij waterstanden en de snelheden van het vorige iteratieniveau toch opgelost dienen te worden.

## A-4 Gewijzigde discretisatie voor de oplossing van de continuïteitsvergelijking

Een gewijzigde oplossing voor de continuïteitsvergelijking wordt gebruikt in het 3D-pakket TRIWAQ. In TRIWAQ wordt de verticale snelheid meegenomen en wordt per iteratiestap de hele matrix berekend totdat er convergentie optreedt. In WAQUA gebeurt dit voor telkens 3 rijen. Het grote verschil tussen deze oplossingen is dat er bij deze oplossing gerekend wordt met debieten die exact overeenkomen met de debieten in de continuïteitsvergelijking in plaats van snelheden. Hieronder volgt een uitleg van de oplossing van de continuïteitsvergelijking waarbij gerekend wordt met debieten. Deze oplossing is volledig massabehoudend tijdens alle iteratiestappen. In [Stelling,1991] wordt deze gewijzigde oplossing van de continuïteitsvergelijking voorgesteld en wordt een concept gegeven voor de gewijzigde SUV rekenroutine.

De discretisatie van de continuïteitsvergelijking wordt nu op  $m,n$ ;

$$\frac{\zeta_{m,n}^q - \zeta_{m,n}^k}{\frac{1}{2} \Delta t} + \frac{\left[ u_{m+\frac{1}{2},n}^q (\zeta_{+}^{q,x} + \bar{h}_{+}^y) - u_{m-\frac{1}{2},n}^q (\zeta_{-}^{q,x} + \bar{h}_{-}^y) \right]}{\Delta x} + \frac{\left[ v_{m,n+\frac{1}{2}}^k (\zeta_{+}^{k,y} + \bar{h}_{+}^x) - v_{m,n-\frac{1}{2}}^k (\zeta_{-}^{k,y} + \bar{h}_{-}^x) \right]}{\Delta y} = 0 \quad (\text{A-7})$$

De discretisatie van de impulsvergelijking op  $m+\frac{1}{2},n$ ;

$$\frac{u_{m+\frac{1}{2},n}^q - u_{m+\frac{1}{2},n}^k}{\frac{1}{2} \Delta t} + \text{advec}(v_{m+\frac{1}{2},n}^{=k+\frac{1}{2}}, u^k) + g \frac{\zeta_{+}^{q-1,x} + \bar{h}_{+}^y}{\zeta_{+}^{q,x} + \bar{h}_{+}^y} \frac{(\zeta_{m+1,n}^q - \zeta_{m,n}^q)}{\Delta x} + R_u = 0 \quad (\text{A-8})$$

$$\text{met: } \text{advec}(v_{m+\frac{1}{2},n}^{=k+\frac{1}{2}}, u^k) = u_{m+\frac{1}{2},n}^k \frac{(u_{+}^k - u_{-}^k)}{\Delta x} + S_{0y}(v_{m+\frac{1}{2},n}^{=k+\frac{1}{2}}, u^k)$$

Door vermenigvuldiging van de impulsvergelijking met  $\bar{\zeta}_+^q + \bar{h}_+^y$ :

$$\begin{aligned} & (\bar{\zeta}_+^q + \bar{h}_+^y) \frac{u_{m+\frac{1}{2},n}^q - u_{m-\frac{1}{2},n}^k}{\frac{1}{2} \Delta t} + (\bar{\zeta}_+^q + \bar{h}_+^y) \text{advec}(v^{k+\frac{1}{2}}, u^k) + \\ & g(\bar{\zeta}_+^{q-1} + \bar{h}_+^y) \frac{(\zeta_{m+1,n}^q - \zeta_{m,n}^q)}{\Delta x} + R_u(\bar{\zeta}_+^q + \bar{h}_+^y) = 0 \end{aligned} \quad (\text{A-9})$$

met;

$$\begin{aligned} u_{m+\frac{1}{2},n}^q (\bar{\zeta}_+^q + \bar{h}_+^y) &= Q_{m+\frac{1}{2}}^q \\ u_{m-\frac{1}{2},n}^q (\bar{\zeta}_+^q + \bar{h}_+^y) &= Q_{m-\frac{1}{2}}^q \end{aligned}$$

Het stelsel is nu lineair en oplosbaar in een tridiagonale matrix;

Voor  $q = 1, 2, \dots, Q$

$$\frac{\zeta^q - \zeta^k}{\frac{1}{2} \Delta t} + \frac{\left[ Q_{m+\frac{1}{2}}^q + Q_{m-\frac{1}{2}}^q \right]}{\Delta x} + \frac{\left[ v_{m,n+\frac{1}{2}}^k (\bar{\zeta}_+^k + \bar{h}_+^y) - v_{m,n-\frac{1}{2}}^k (\bar{\zeta}_-^k + \bar{h}_-^y) \right]}{\Delta y} = 0 \quad (\text{A-10})$$

$$\begin{aligned} & \frac{Q_{m+\frac{1}{2}}^q - u_{m+\frac{1}{2}}^k (\bar{\zeta}_+^q + \bar{h}_+^y)}{\frac{1}{2} \Delta t} + g(\bar{\zeta}_+^q + \bar{h}_+^y) \text{advec}(\bar{v}^{k+\frac{1}{2}}, u^k) + \\ & g(\bar{\zeta}_+^{q-1} + \bar{h}_+^y) \frac{(\bar{\zeta}_+^q - \bar{\zeta}_-^q)}{\Delta x} + R_u(\bar{\zeta}_+^q + \bar{h}_+^y) = 0 \end{aligned} \quad (\text{A-11})$$

Onbekenden in dit stelsel zijn  $\zeta_m^q, \zeta_{m+1}^q, \zeta_{m-1}^q, Q_{m+\frac{1}{2}}^q, Q_{m-\frac{1}{2}}^q$

Door het invullen van de impulsvergelijking in de continuïteitsvergelijking blijven alleen waterstanden over. De waterstanden worden per iteratiestap in een tridiagonale matrix opgelost. Vervolgens worden  $u_{m+\frac{1}{2},n}^q$  en  $u_{m-\frac{1}{2},n}^q$  opgelost en iteratie stopt als aan volgende voorwaarde wordt voldaan;

$$|u^q - u^{q-1}| < \varepsilon$$

$$\text{Dan geldt; } u^{k+\frac{1}{2}} = u^Q, \zeta^{k+\frac{1}{2}} = \zeta^Q$$

In de onderstaande tabel (A-1) is de factor  $f_{b-o}$  gegeven. Deze factor geeft het verschil in rekentijd tussen de berekeningen weer als volgt:

$$f_{b-o} = \frac{\text{duur van de berekening}}{\text{duur originele WAQUA berekening}}$$

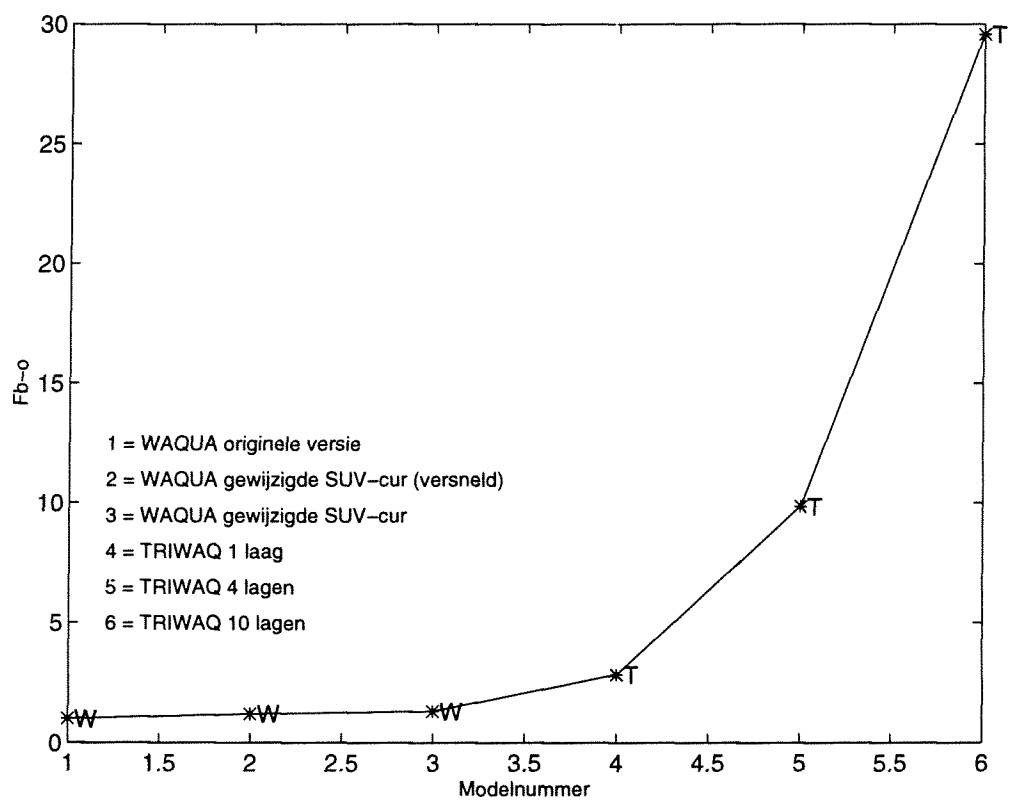
De verschillen in rekentijd zijn ook uitgezet in figuur (A-2). In deze figuur wordt vooral het verschil duidelijk tussen de berekeningen met WAQUA en TRIWAQ. Indien de gewijzigde rekenroutine wordt gebruikt verhoogt de rekentijd met dertig procent. De berekening met een minder strenge convergentie-eis en met maximaal twee iteraties (in plaats van maximaal zestien iteraties) versneld de berekening aanzienlijk. Het verschil tussen de waterstanden en de stromingen van deze twee berekeningen is zeer klein. De versnelde berekening is in ieder geval nauwkeuriger dan de berekening met de originele WAQUA-versie omdat er geen punten continu droogstaan. De verhoging van de rekentijd is bij de berekeningen met het Friesche Zeegat Model zeer groot ten opzichte van andere modellen die door Rijkswaterstaat gebruikt worden. Bij deze modellen ligt de verhoging van de rekentijd rond de vijftien procent.

De verhoging van de rekentijd wordt in eerste instantie veroorzaakt doordat de gewijzigde rekenroutine minder snel convergeert aangezien de hoofddiagonaal van de tri-diagonale matrix minder dominant is. Het grote voordeel van de gewijzigde rekenroutine is dat deze tijdens elke iteratiestap massa-behoudend is. In de originele WAQUA is de convergentie-eis gekoppeld aan de snelheden. Omdat de convergentie-eis minder scherp hoeft te zijn kan in de gewijzigde rekenroutine de convergentie-eis gekoppeld worden aan de waterstanden. Dit heeft twee redenen:

- Een controle met waterstanden is minder streng dan op snelheden
- In de gewijzigde rekenroutine moeten de snelheden elke iteratiestap apart berekend worden. In de originele WAQUA rekenroutine zijn de snelheden bij elke iteratie gelijk beschikbaar.

tabel A-1 Vergelijking rekentijd van WAQUA en TRIWAQ

Berekeningen	$f_{b-o}$	Max iteraties continuïteitsvergelijking.	Convergentie-eis ( $\epsilon$ )
WAQUA origineel	1	16	$0.5 \cdot 10^{-3}$
WAQUA nieuwe SUV-Cur (versneld)	1.2	2	$0.5 \cdot 10^{-2}$
WAQUA nieuwe SUV-Cur	1.3	16	$0.5 \cdot 10^{-3}$
TRIWAQ 1 laag	2.8	16	$0.5 \cdot 10^{-3}$
TRIWAQ 4 lagen	9.8	16	$0.5 \cdot 10^{-3}$
TRIWAQ 10 lagen	29.6	16	$0.5 \cdot 10^{-3}$

figuur A-2  $f_{b-o}$  uitgezet per model





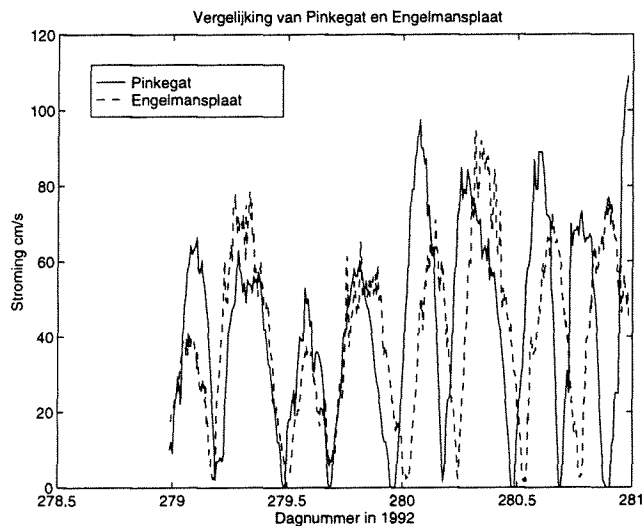
## Appendix B

### Stroommeetgegevens van de meetcampagne 1992

#### Uitgewerkte stroommeetdata per stroommeetpunt

##### Pinkegat NBA 658

De metingen zijn vanaf 6 oktober 1992 onbetrouwbaar, zie figuur (B-1), oorzaak zou een lege batterij kunnen zijn. De meetgegevens stoppen tegelijk met de metingen van het Oude Westgat op 7 oktober 23:50 uur. Het vreemde is dat de meetboeien van Oude Westgat en Pinkegat allebei op dezelfde tijd geen stromingsdata meer wegschrijven. De meting van het Pinkegat betreft een eb-dominante plaats in de geul. Tezamen met het feit dat de metingen na 6 oktober



figuur B-1 Vergelijking van de metingen van Pinkegat en Engelmansplaat (dagnummer 280) geen betrouwbare stromingsdata weergeven, maakt dat deze meting niet bruikbaar is voor verificatie van het Friesche Zeegat model voor de datum 9 oktober.

##### Meetpaal in Zoutkamperlaag

De stromingen zijn gemeten met EMS-meters (elektromagnetische sensoren) die geïnstalleerd waren op een meetframe, waarop tevens instrumenten voor sedimentmetingen geïnstalleerd waren. De stromingsdata van de meetpaal is niet gedocumenteerd, wel zijn de handelingen zoals het schoonmaken en controleren van het meetframe gedocumenteerd in het verslag Kustgenese\*Morf Friesche Zeegat 1992. De stroomgegevens zijn uiteindelijk bij het RIKZ gevonden in het bestand "fzeegat". De tijdstippen waarop handelingen in het verslag Kustgenese\*Morf staan beschreven komen overeen met de stromingsdata in het bestand "fzeegat". Dit bestand werd zonder documentatie of kopregels gevonden. In combinatie met het verslag is op te maken dat de tijdschaal in MET is.

**Oude westgat NBA 677**

Het abrupte einde van de gemeten waarden van Oude Westgat en Pinkegat heeft er toe geleid dat de ponskaarten nog eens onderzocht zijn. Uit deze actie zijn stromingsdata van 14 oktober 1992 tot en met 30 oktober 1992 teruggehaald uit ponsdata.

**Nieuwe Westgat NBA ?**

Het enige wat te achterhalen is van deze NBA-boei, dat men van plan was deze te plaatsen. Deze NBA-boei is waarschijnlijk vanaf het begin verkeerd geïnstalleerd.

**Engelsmanplaat NBA 137**

Deze meting is nagenoeg geheel aanwezig over de gehele meetcampagne. De meting vond plaats in het midden van de geul op een niet vloed of eb gedomineerde plaats.

In de volgende tabel (B-1) staan de plaatscoördinaten van de waterstandsmetpunten. In de tabellen (B-2/3) staan de ruwe stromingsdata beschreven zoals die zijn uitgewerkt voor de invoer in WAQUA. De stroomgegevens komen in de nabije toekomst in DONAR beschikbaar. De harmonische componenten van de stromingsdata van deze files zijn zeer recent uitgewerkt in [Kreeke, J van de en T. Louters, 1996].

tabel B-1 Waterstands meetpunten

Waterstandmetingen	plaats Code	Meetinstrument	Parijse coördinaten	
			X	Y
Wierumergronden	WIERMGDN	Vlotter nivo meter	192882	614562
Engelsmanplaat	ENGEMPT	Vlotter nivo meter	200031	608014
Schiermonnikoog Steiger	SCHIERMNOG	Vlotter nivo meter	209170	609500
Lauwersoog	LAUWOG	Vlotter nivo meter	208850	602790

tabel B-2 Stroom meetgegevens meetcampagne 1992 in het Friesche zeegat

	Pinkegat	Oude Westgat	Engelsmanplaat	Roode Hoofd	Meetpaal
Filenaam:	EQ0004.acs	EQ0005.acs	nbal137.asc	nbal161.asc	fzeegat
Format (zie tabel B-3)	2	2	1	1	3
Tijdsoort	MET	MET	MET	MET	MET
Start meting	920917 00:00	920917 00:00	920917 14:40	19920917 15:40	19920924 14:00
Eind meting	921007 23:50	921007 23:50	921026 00:16	19921008 02:16	19921118 02:58
X coördinaat	196215	196992	200739	205996	200163
Y coördinaat	608476	612714	607693	604802	607592
Diepte bodem t.o.v. NAP	-14.50 m	-15.00 m	-14.50 m	-9.5 m	-6.30 m
Diepte meetpunt t.o.v. NAP	-13.00 m	-13.50 m	-13.0 m	-8.0 m	-6.74 & -4.64 m
Tijdstap	10.00 min	10.00 min	4.00 min	4.00 min	2.00 min

tabel B-3 Opmaak van de files (format).

Format 1	Format 2	Format 3
Kolom 1:instrument nummer	Kolom 1:datum	Kolom 1:datum
Kolom 2:volgnummer registratie	Kolom 2:tijd	Kolom 2:tijd
Kolom 3:dagnummer	Kolom 3:dagnummer	Kolom 3: $\sqrt{(u^2+v^2)}$
Kolom 4:tijd in MET	Kolom 4:u	Kolom 4:u
Kolom 5:gem. Snelheid [cm/s]	Kolom 5:v	Kolom 5:v
Kolom 6:gem. Richting	Kolom 6: $\sqrt{(u^2+v^2)}$	Kolom 6: $\sqrt{(u^2+v^2)}$
Kolom 7:instant. Richting	Kolom 7:richting	Kolom 7:u
Kolom 8:druk		Kolom 8:v
Kolom 9:temperatuur [Celsius]		
Kolom 10:saliniteit [promille]		
Kolom 11:batterij spanning [volt]		

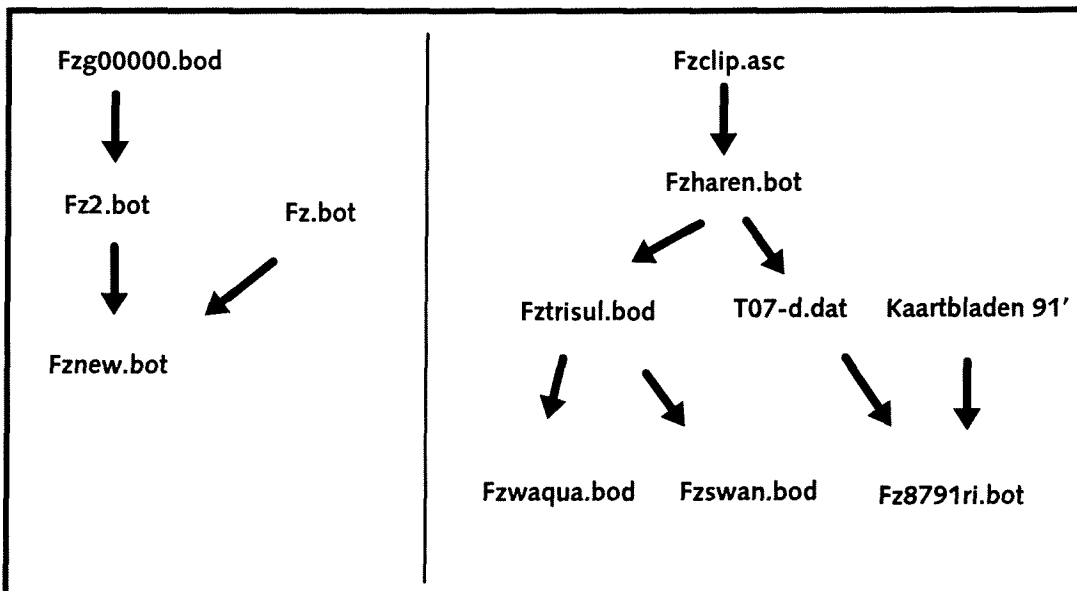


## Appendix C

### De DTM-files van het Friesche Zeegat

#### C-1 Inleiding

In de afgelopen jaren zijn veel aanpassingen aan bestaande DTM-files uitgevoerd. Deze aanpassingen zijn het gevolg van de diverse eisen die programmapakketten stellen aan de opmaak van de files en van de eisen die de berekeningen vergen aan de DTM. Omdat deze aanpassingen niet uniform worden beschreven of omdat de beschrijvingen van de aanpassingen zoekraken is de herkomst van de DTM's vaak moeilijk te achterhalen. In deze appendix wordt alleen de herkomst van de twee in deze validatiestudie gebruikte DTM's (**fzwaqua.bot** en **fz8791ri.waq**) beschreven. De oorsprong van de overige DTM's van het Friesche zeegat zijn samengevat in figuur (C-1). Deze worden uitgebreid beschreven in de RIKZ memo "De bodem van het Friesche Zeegat" [Les, B.A.J., M.J. v Endt, R.C. Ris].



figuur C-1 Overzicht van de oorsprong van de diverse DTM's.

In figuur (C-5) is het Friesche Zeegat gebied onderverdeeld in zeven verschillende gebieden waarvan combinaties van lodingen in verschillende DTM's zijn gebruikt. Uit verschillende morfologische rapporten zijn contouren van DTM's uit verschillende jaren vergeleken met de beschikbare DTM's die door verschillende stromings en golfberekeningen zijn gebruikt bij het RIKZ. Figuur (C-3) toont de nieuw gemaakte Friesche Zeegat DTM, die tijdens deze studie samengesteld is (**fz8791ri.waq**).

In tabel (C-1) in combinatie met figuur (C-5) is de samenstelling van de DTMs te vinden. Het blijft echter moeilijk kleinere aanpassingen te traceren, zoals aanpassingen van de Pinkegat-geul die in de DTM **fzg00000.bod** gebeurd zijn (zie Bodem Memo).

De bestaande Friesche Zeegat "stromingbodems" zijn non-equidistante DTM's, met fijne mazen (50 tot 100m) in de ebdelta en grove mazen (500 m) op diep water, aan de wantijen en aan de Friese kust. Dit vindt zijn oorsprong tijdens de opzet van het Friesche Zeegat model. Deze is in eerste instantie gemaakt om de stromingen in de ebdelta en in de buurt van de toegangseulen te schematiseren. Om het aantal roosterpunten te reduceren is de maaswijdte naar de randen toe vergroot tot 500 m. De bestaande Friesche Zeegat "golvenbodems" zijn rechtlijnig en equidistant met een maaswijdte van 100 m. Over het algemeen zijn de DTMs gedefinieerd op een rooster dat tien graden tegen de klok in is gedraaid ten opzichte van het noorden.

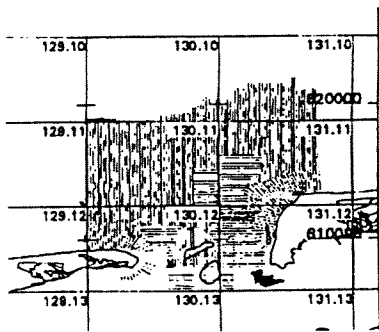
## C-2 Uitgebreide beschrijving van de Fzwaqua.bot

De Fzwaqua.bot is een DTM die geconverteerd is naar een stromingsrooster en is in eerste instantie gebaseerd op de **fzharen.bot**. De **fzharen.bot** is bestaat uit lodingen van 1987 en is gemaakt om stromingen tijdens superstorm-condities te berekenen. Het Waterloopkundig Laboratorium heeft in de **fzharen.bot** een aantal dingen aangepast aan deze DTM, zoals het stuk aan de dijk. In het Superstorm-project is gekozen om de **fzharen.bot** als basis te gebruiken voor de conversie naar een stromingsrooster aangezien de data tot aan de dijk doorlopen. Uit deze conversie is de **fzwaqua.bot** ontstaan. In juni 1996 bleek tijdens SWAN-berekeningen (TU-Delft), waarbij deze DTM geconverteerd is naar een equidistant rooster, dat de Fzwaqua.bot afkomstig was van de **fzharen.bot** ("Superstormbodems"). In eerste instantie zou de **fzg00000.bod** voor de verificatie studie gebruikt zou worden. Er is toch besloten in juli 1996 om een nieuwe DTM van het Friesche Zeegat te maken omdat de roostercoördinaten van de **fzg00000.bod** niet overeenkwamen met die van het rooster van de Fzwaqua. Tevens bleek dat de aansluiting van de lodingen uit 1991 van de Pinkegat geul op de lodingen van 1987 dubieus is.

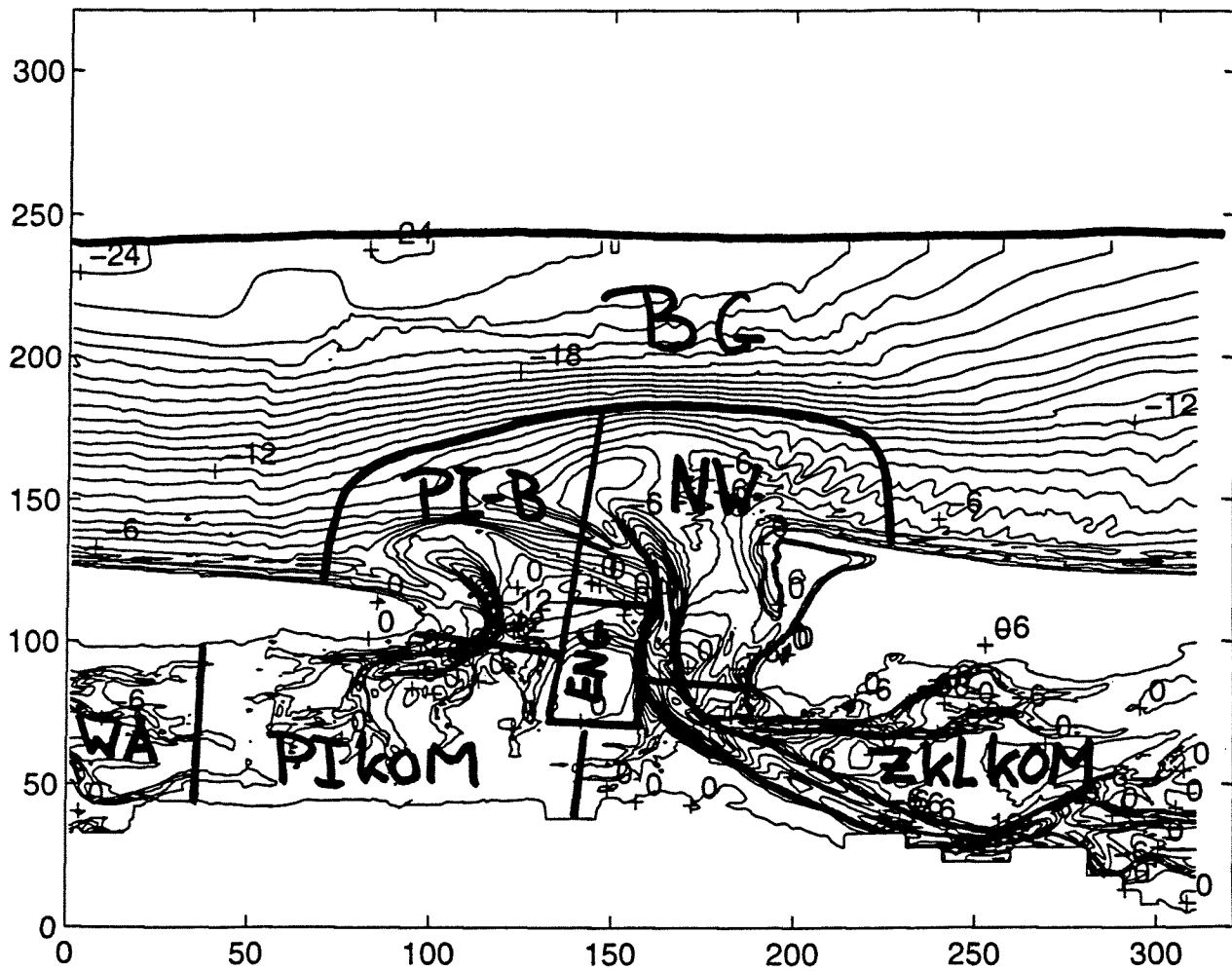
### C-3 Uitgebreide beschrijving van de Fz8791ri.waq

Deze DTM (gemaakt met het GIS-pakket ARC/INFO) is gebaseerd op de **t07-d.dat** die grotendeels bestaat uit lodingen van 1987. Deze is overschreven met gedigitaliseerde lodinggegevens uit '91 van het RIKZ (Haren), die de gehele ebdelta en een gedeelte van de toegangseulen omvatten, zie figuur (C-2). Tevens zijn enkele handmatige aanpassingen gedaan in ARC/INFO om de overgangsranden tussen de kaartbladen en de **t07-d.dat** af te vlakken. Tevens zijn enkele punten aan de dijk bij Lauwersoog op onregelmatigheden gecorrigeerd.

In de tabellen (C-1) wordt de herkomst van alle DTM's van het Friesche Zeegat duidelijk. Deze tabel moet in combinatie met figuur (C-3) gelezen worden. In tabel (C-2) en (C-3) staan de verschillende conversies en formaten van de files. Het is essentieel deze gegevens te bezitten indien een keuze voor een DTM gemaakt moet worden voor allerlei berekeningen.



figuur C-2 Kaartbladen Lodingsdata 1991



tabel C-1 Oorsprong van lodingen in de DTM's

Friesche Zeegat DTM	Buiten gebied	Pinkegat buiten	Engel- mansplaat	NW-gat +haak	Pinkegat Komb	ZKL Komb	Lv Wantij Ameland	Tot aan kust
Fzg00000.bod	?	91 (!)	91	91	87 (grof)	87 (grof)	afwezig	ja
Fz.bot	?	87	87	91	87 (fijn)	87 (fijn)	? (grof)	nee
Fz2.bot	?	91 (!)	91	91	87 (grof)	87 (grof)	afwezig	nee
Fznew.bot	?	91 (!)	91	91	87 (grof)	87 (grof)	uit fz.bot	nee
Fzclip.asc	91/87	87	87	87	87 (fijn)	87 (fijn)	91 (fijn)	ja
Fzharen.bot	91/87	87	87	87	87 (fijn)	87 (fijn)	91 (fijn)	ja
Fztrisul.bod	91/87	87	87	87	87 (grof)	87 (grof)	87 (grof)	ja
Fzswan.bod	91/87	87	87	87	87 (grof)	87 (grof)	87 (grof)	ja
T07d.dat	91/87	87	87	87	87 (fijn)	87 (fijn)	91 (fijn)	ja
fz8791ri.asc	91/87	91	87	91	87 (fijn)	87 (fijn)	91 (fijn)	ja

(!) =de overgang van het Pinkegat van '91 en het Pinkegat van '87 heeft een dubieuze aansluiting



tabel C-2 Kenmerken van de DTM's

File naam	dx,dy	Rooster	gridgrootte	x coördinaat	y coördinaat	Datum file	File grootte (Bytes)
fz.bot	100X100	RH, eq.	200X313	181646	619619	12-5-95	971957
fz2.bot	100X100	RH, eq.	314X201	185119	599923	16-5-95	2019648
fzclip.asc	50X50	RH, eq.	1090X510	170671	593321	29-3-95	2912300
fzg00000.bod	Zebra 100=>500	RH, non. eq.	192X99	185789	595949	7-4-95	684514
fzharen.bot	100X100	RH, eq.	240X314	181646	619619	23-5-95	2411520
fznew.bot	100X100	RH, eq.	201X314	181646	619619	16-5-95	971956
fzswan.bod	100X100	RH, eq.	261X321	181646	619619	17-1-96	1031373
fzwaqua.bot	Zebra 100=>500	RH, non. eq.	196X106	185180	595080	feb. 96	--
fztrisol.bod	Zebra 100=>500	RH, non. eq.	195X105	185180	595080	17-1-96	778200
t07-d.dat	100X100	RH, eq.	240X310	182000	620000	27-3-96	615165
fz8791ri.asc	100x100	RH, eq.	291x347	182000	596364	20-8-96	1035196

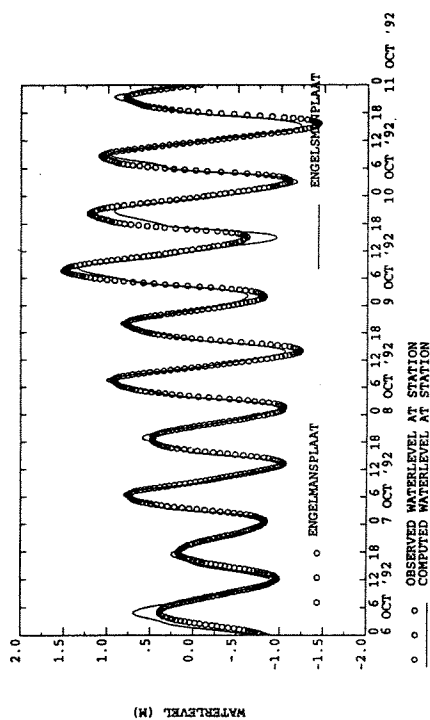
(non). eq. = (non) equidistant

RH = rechthoekig

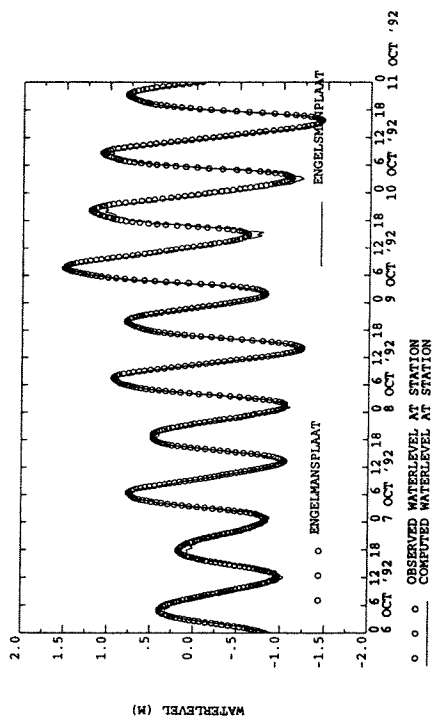
tabel C-3 Opmaak van de DTM's

File naam	format
fz.bot	Matrix 12622x5 + laatste regel 4 waarden
fz2.bot	x y z 63114 x 3
fzclip.bot	Matrix 1090x510
fzg00000.bod	x y z 19008x3
fzharen.bot	x y z 75360x3
fznew.bot	Matrix 12622x5 + laatste regel 4 waarden
fzswan.bod	Matrix
fzwaqua.bot	WAQUA rooster 196x106 +rgf-file
fztrisol.bod	x y z 20475x3
t07-d.dat	Matrix
fz8791ri.asc	Matrix ARC/INFO

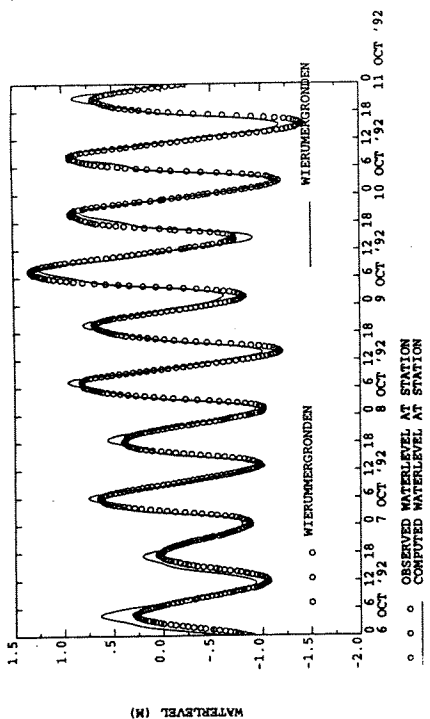




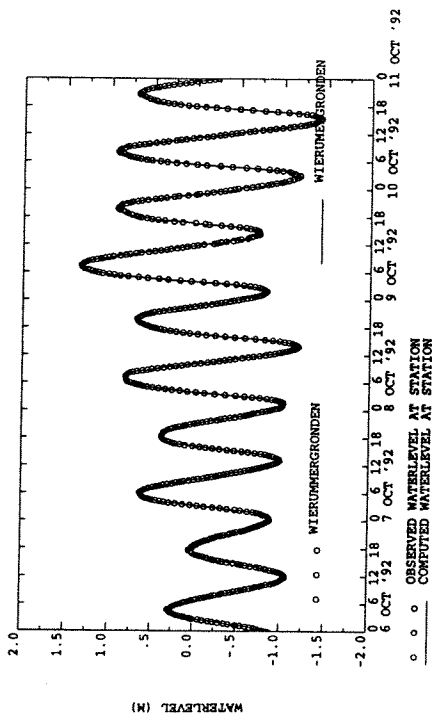
Randvoorwaarden Kuststrookmodel



Randvoorwaarden Wierumergronden



Randvoorwaarden Kuststrookmodel

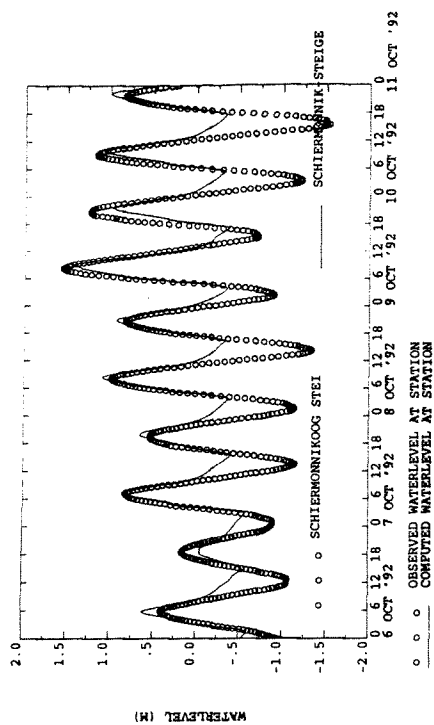


Randvoorwaarden Wierumergronden

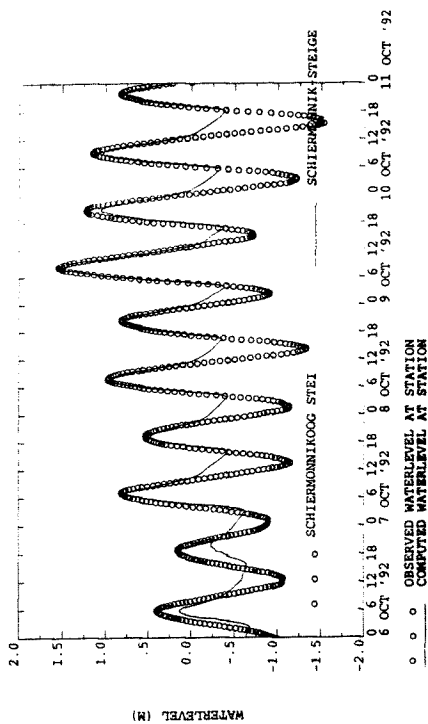
Vergelijking berekende waterstanden van Wierumergronden en Engelsmanplaat met metingen voor (1) randvoorwaarden Kuststrookmodel en (2) aangepaste randvoorwaarden Kuststrookmodel met waterstanden van Wierumergronden

Rijks Instituut voor Kust en Zee

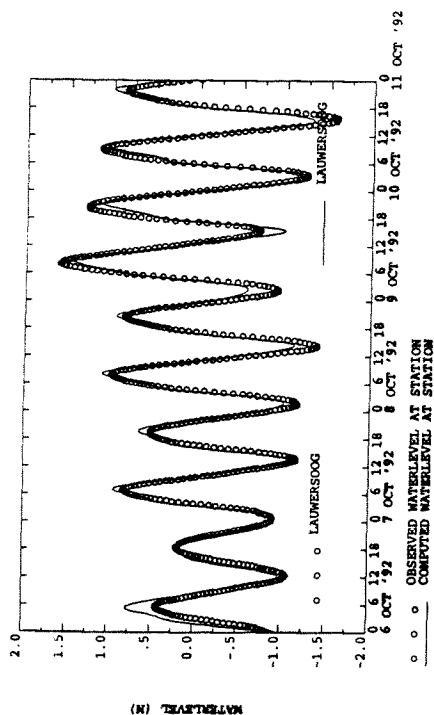




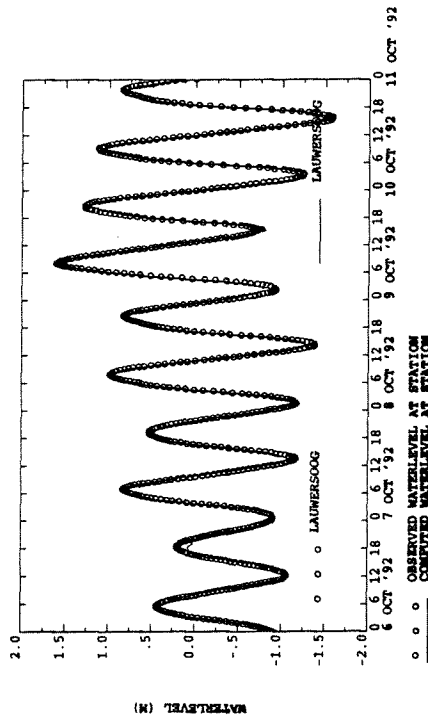
Randvoorwaarden Kuststrookmodel



Randvoorwaarden Wierumergronden



Randvoorwaarden Kuststrookmodel

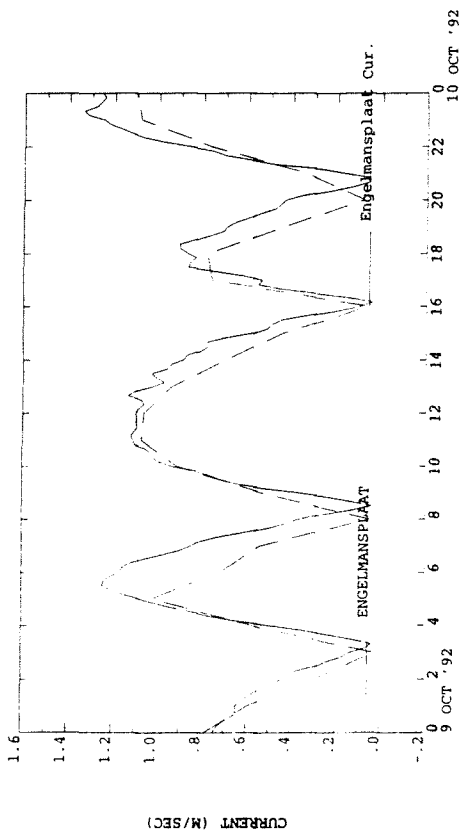


Randvoorwaarden Wierumergronden

Vergelijking berekende waterstanden van Schiermonnikoog en Lauwersoog met metingen voor (1) randvoorwaarden Kuststrookmodel en (2) aangepaste randvoorwaarden Kuststrookmodel met waterstanden van Wierumergronden

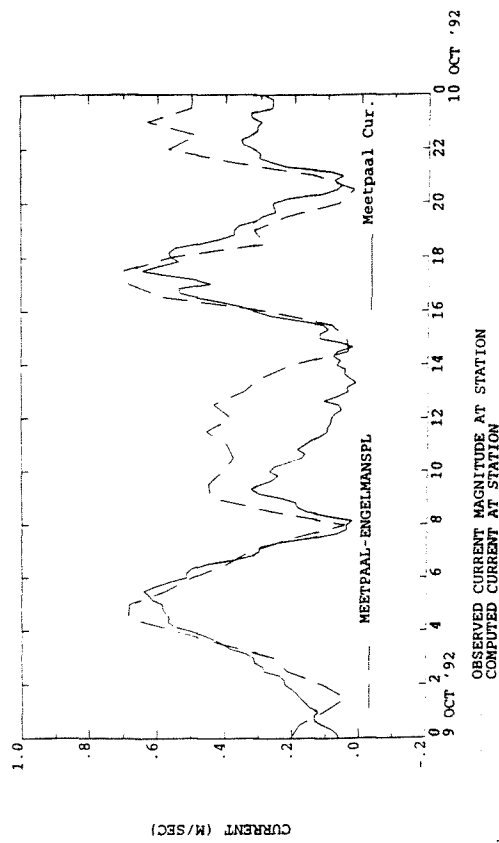
Rijks Instituut voor Kust en Zee





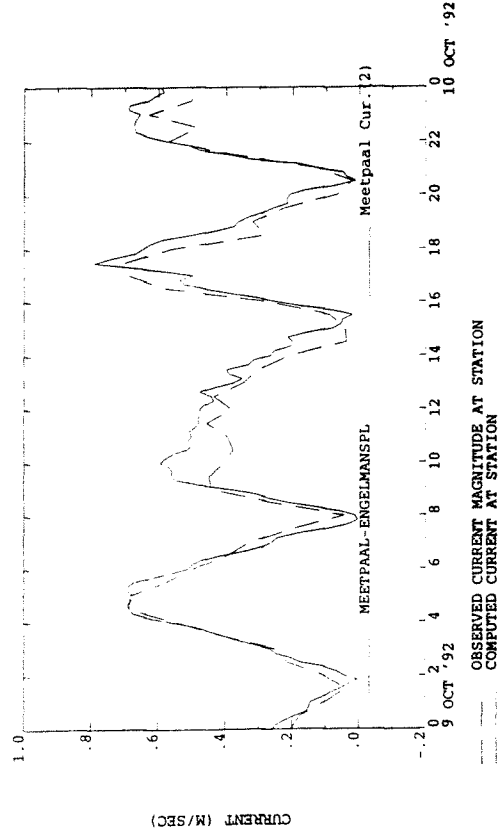
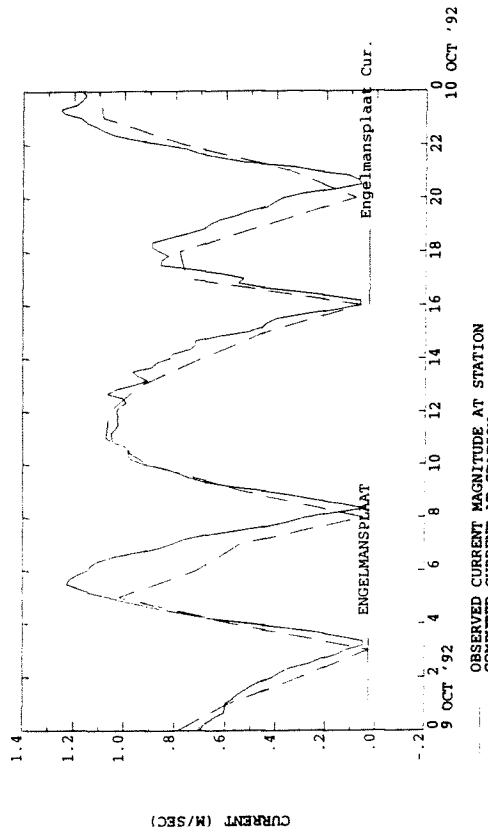
Exacte plaats vergelijking

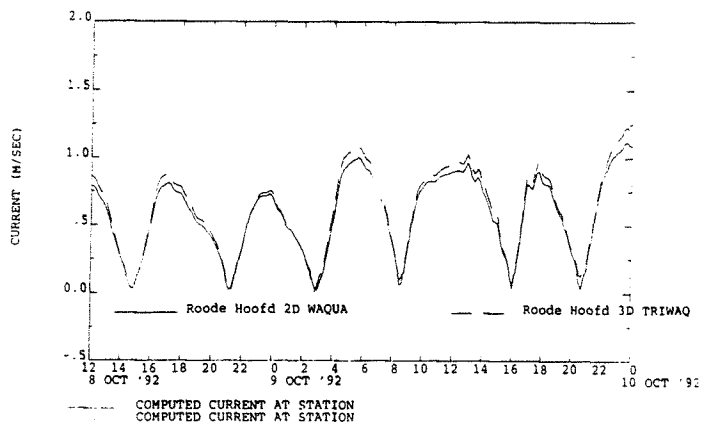
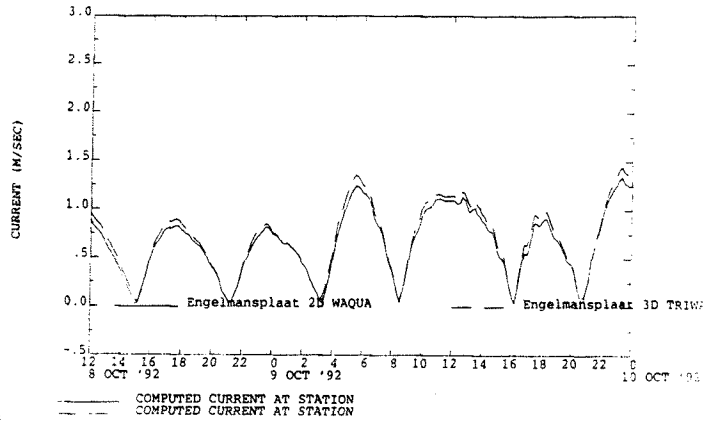
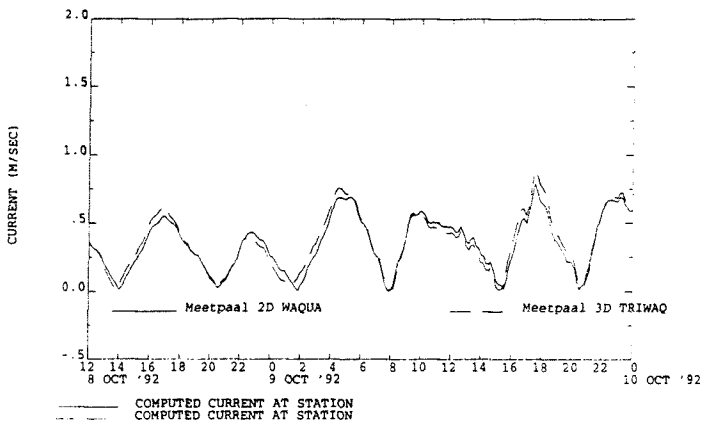
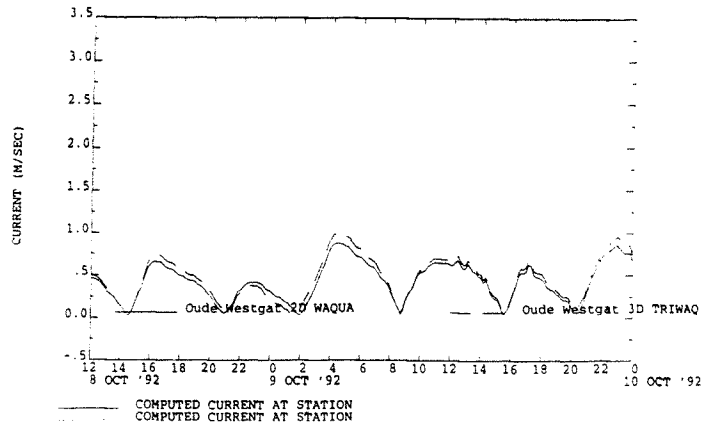
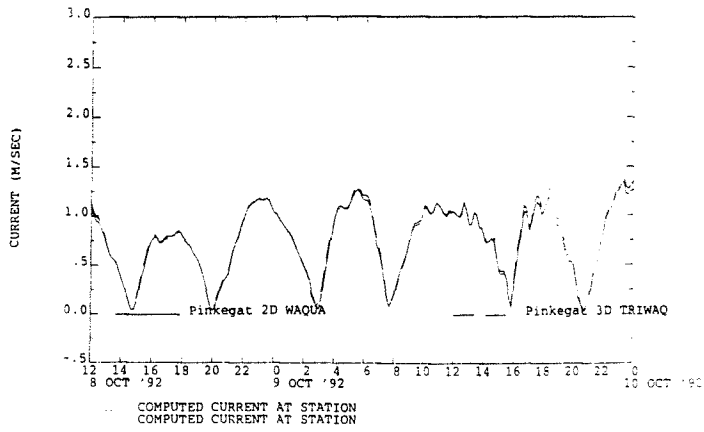
Verschoven plaats vergelijking



Exacte plaats vergelijking

Verschoven plaats vergelijking

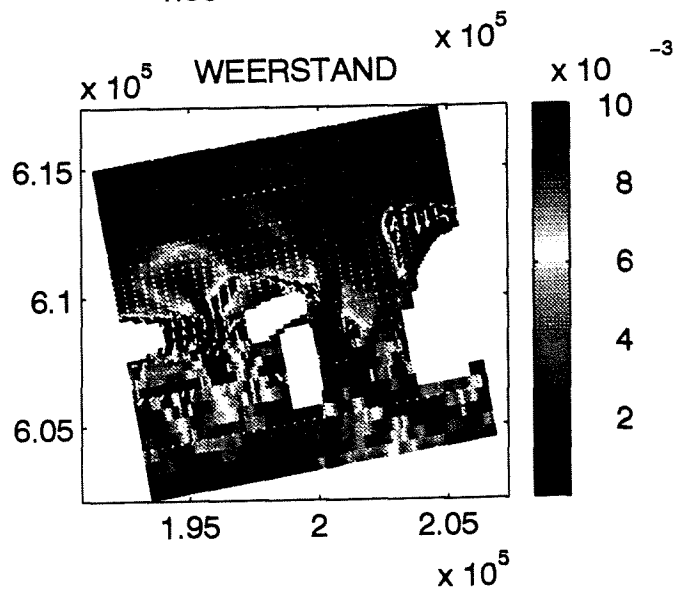
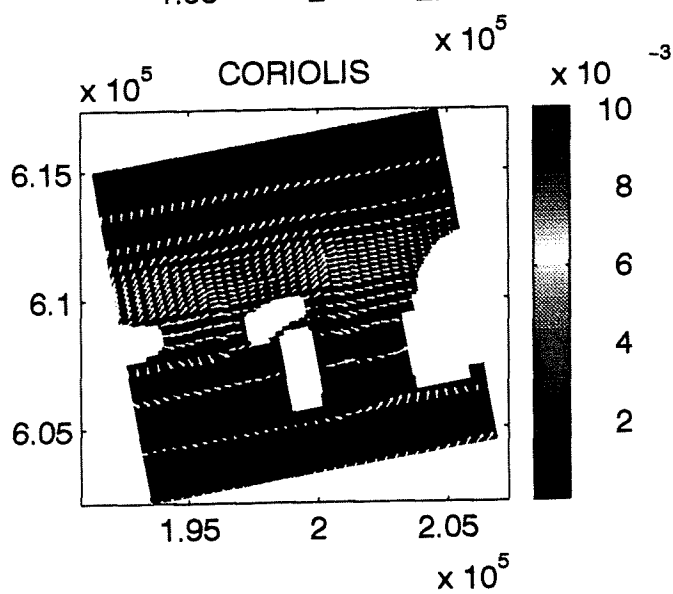
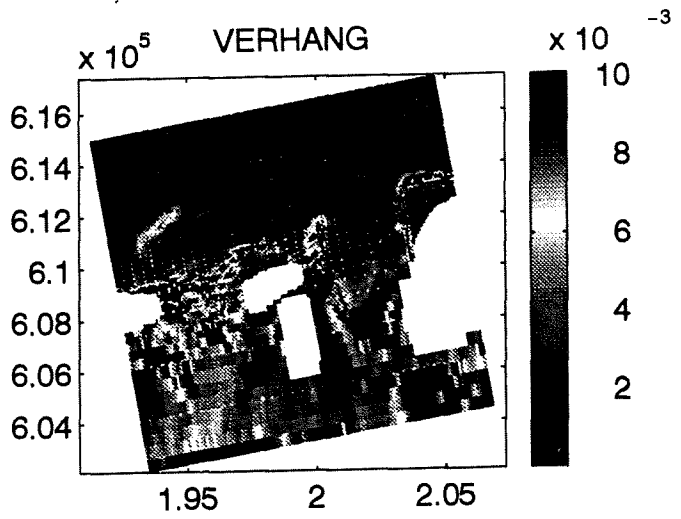
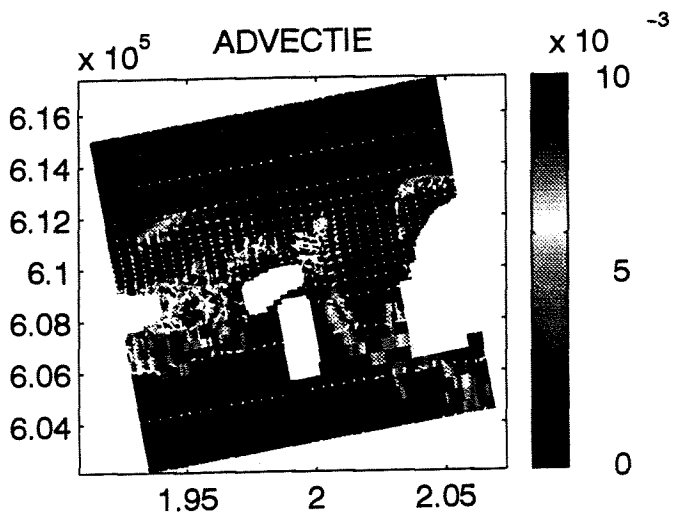




Vergelijking van de stroomtijdsreeksen van 2D-berekening WAQUA en 3D-berekening TRIWAQ met 10 lagen, voor Roode Hoofd, Engelsmanplaat, Oude Westgat, Meetpaal, en Pinkegat met de bodemfile Fzwaqua.bot.

Rijks Instituut voor Kust en Zee





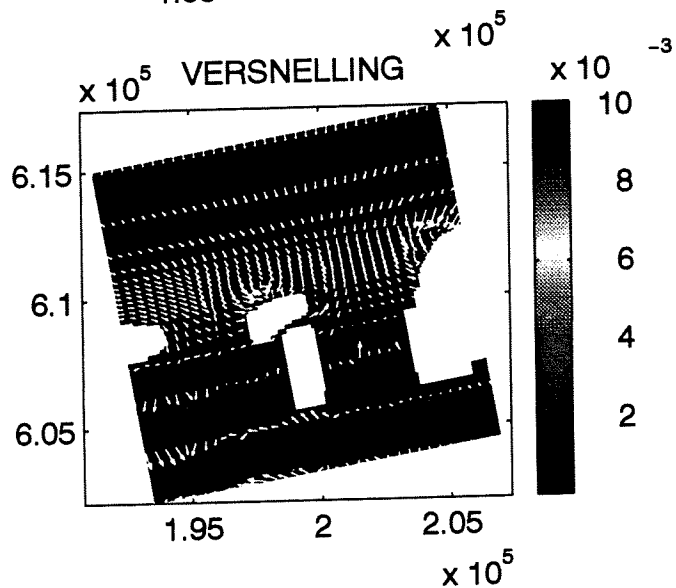
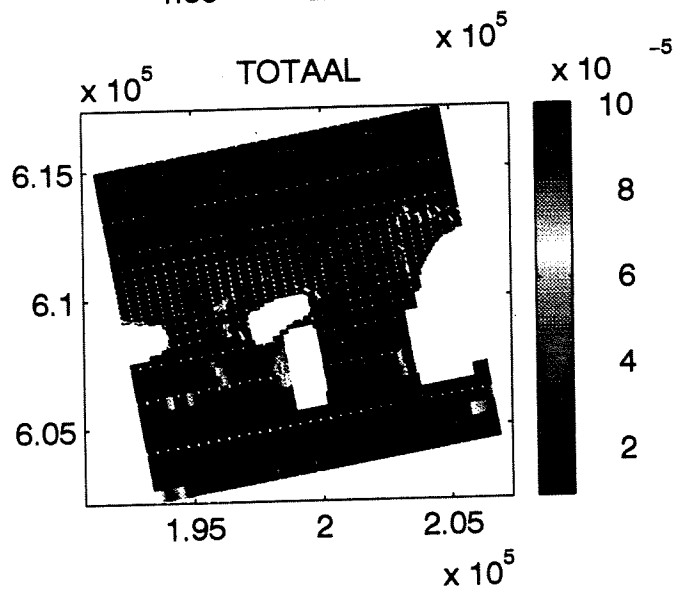
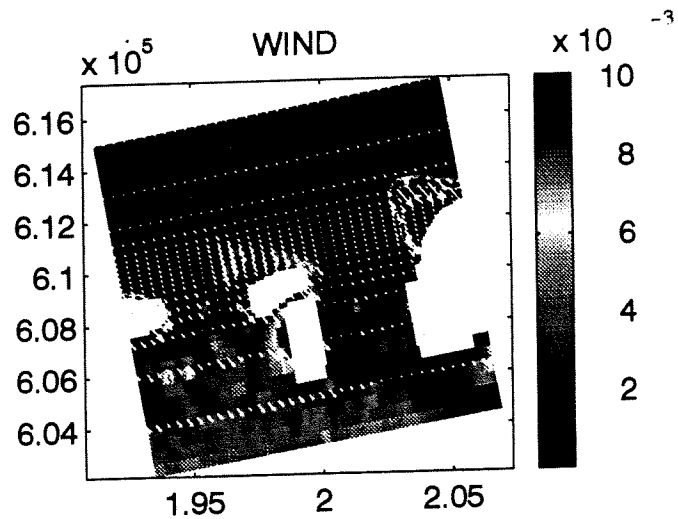
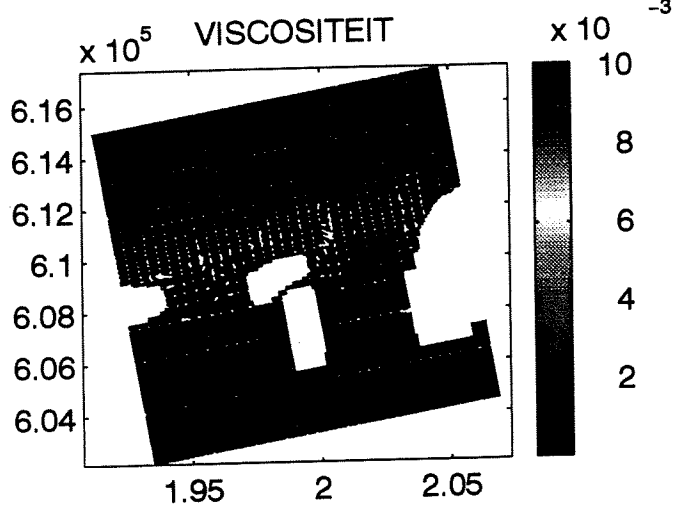
Termanalyse van een uitsnede van de ebdelta van Het Friesche zeegat voor 9 oktober 1992 6:00 am

Rijks Instituut voor Kust en Zee



Verificatie stromingen in Het Friesche Zeegat

Bijlage 4a



Termanalyse van een uitsnede van de ebdelta van Het Friesche zeevat voor 9 oktober 1992 6:00 am

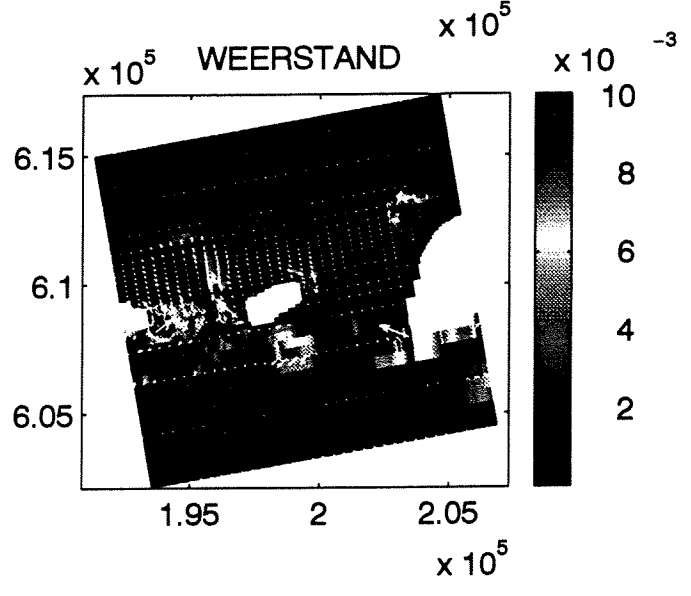
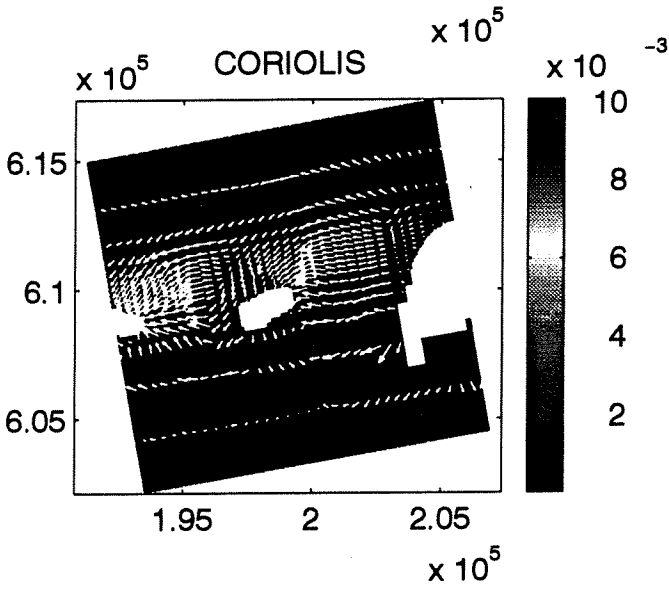
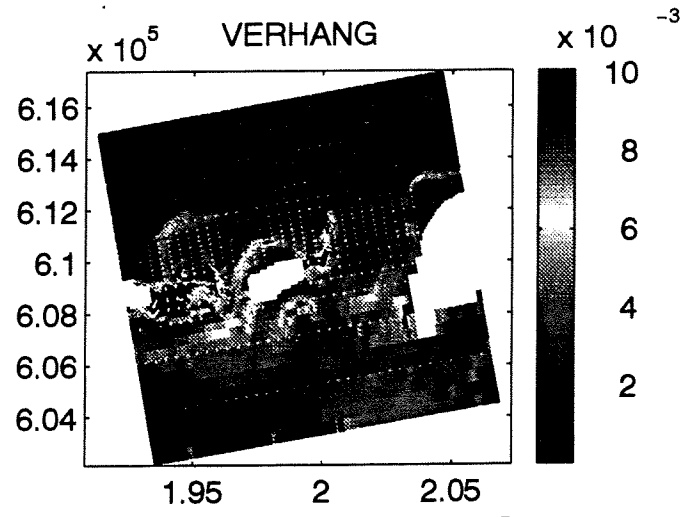
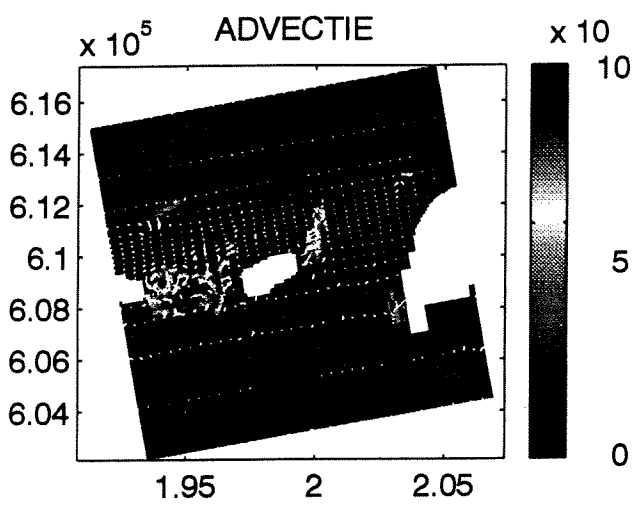
Rijks Instituut voor Kust en Zee



Verificatie stromingen in Het Friesche Zeevat

Bijlage 4b



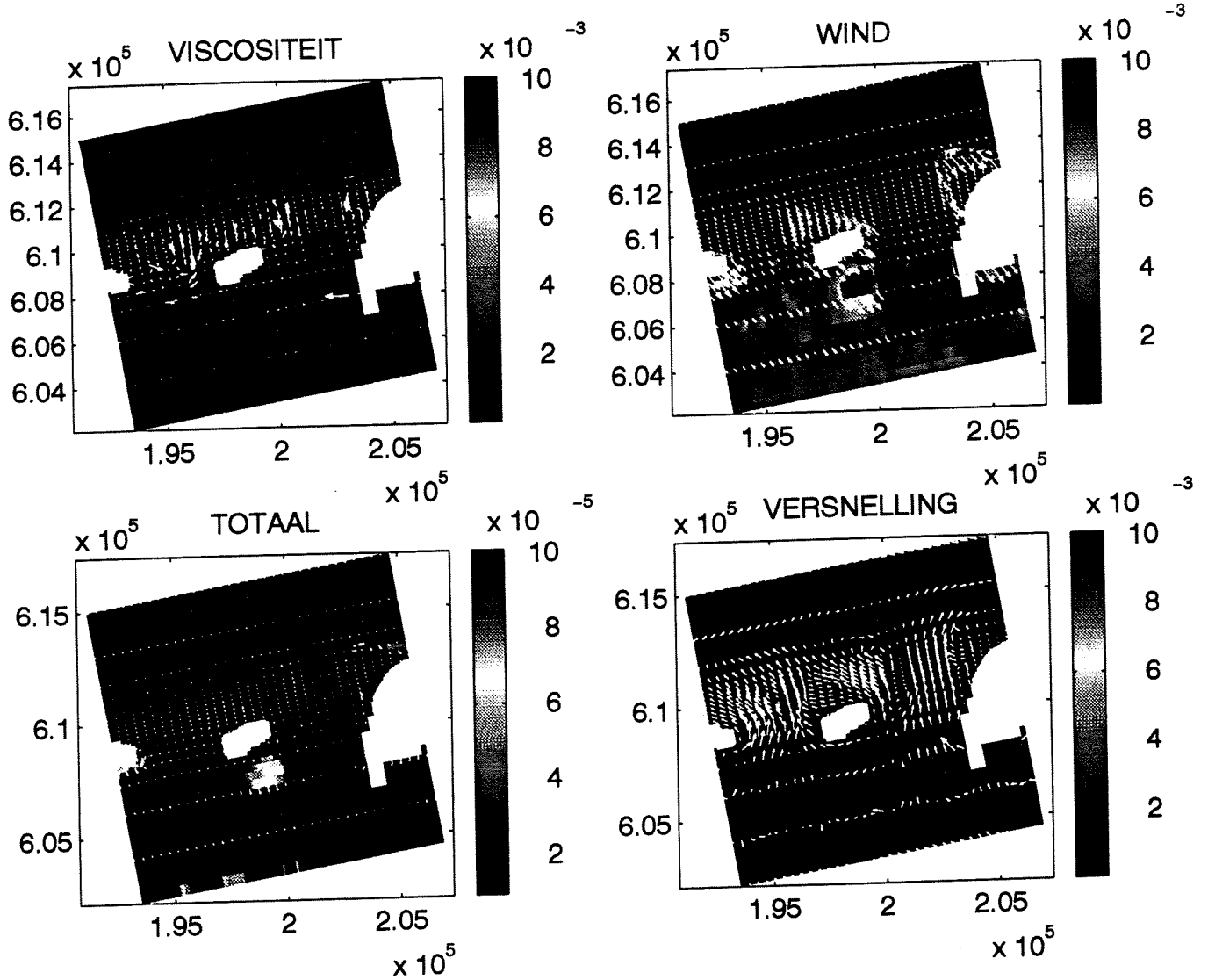


Termanalyse van een uitsnede van de ebdelta van Het Friesche zeegat voor 9 oktober 1992 9:00 am

Rijks Instituut voor Kust en Zee 

Verificatie stromingen in Het Friesche Zeegat

Bijlage 5a



Termanalyse van een uitsnede van de ebdelta van Het Friesche zeegat voor 9 oktober 1992 9:00 am

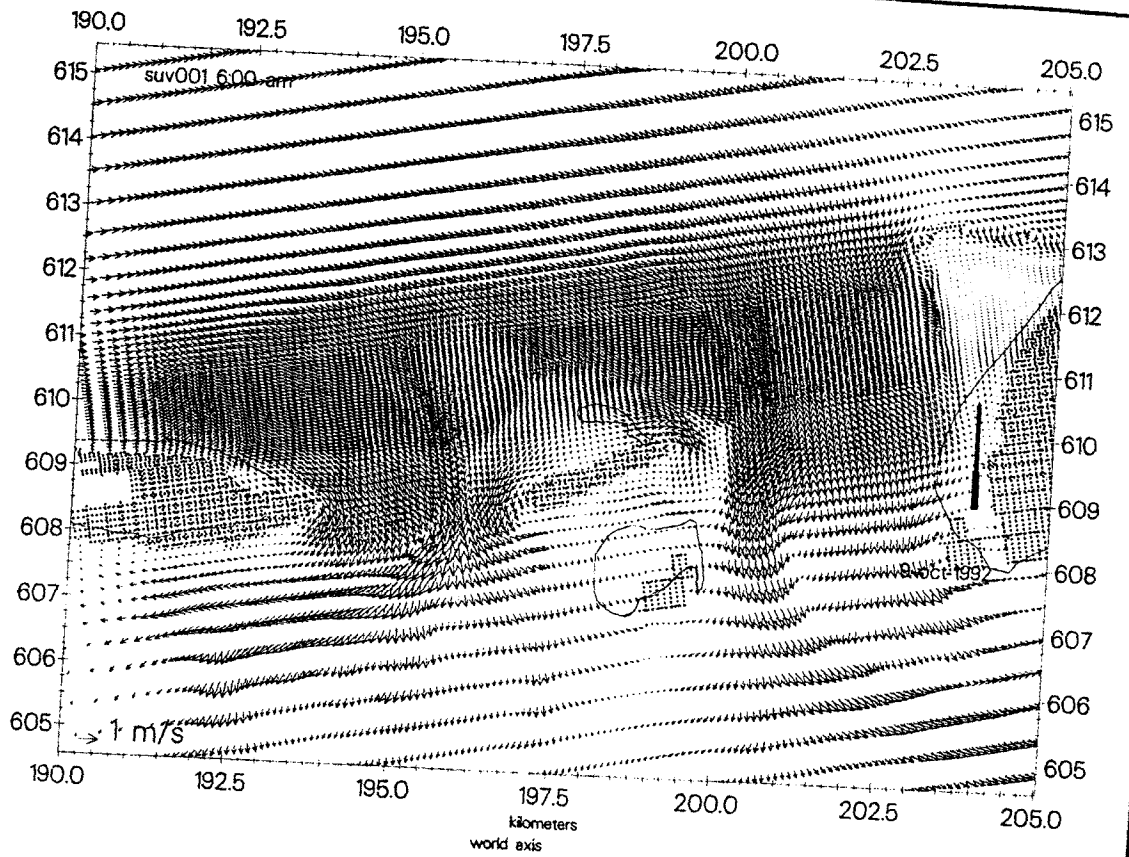
Rijks Instituut voor Kust en Zee



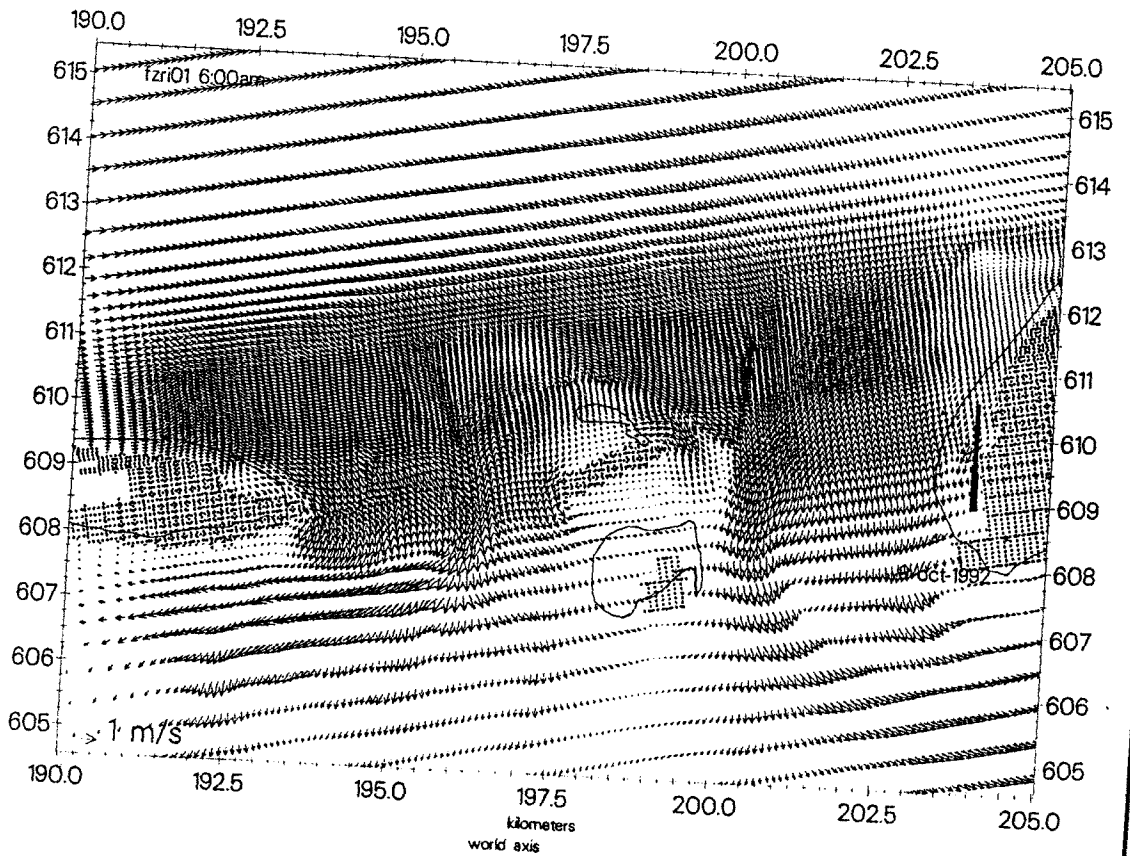
Verificatie stromingen in Het Friesche Zeegat

Bijlage 5b

Fzwaqua



Fz8791ri.asc



Vergelijking van de globale stromingen in ebdelta van het Friesche Zeegat op 9 oktober 6:00 am van de bodem Fzwaqua.bot en Fz8791ri.waq

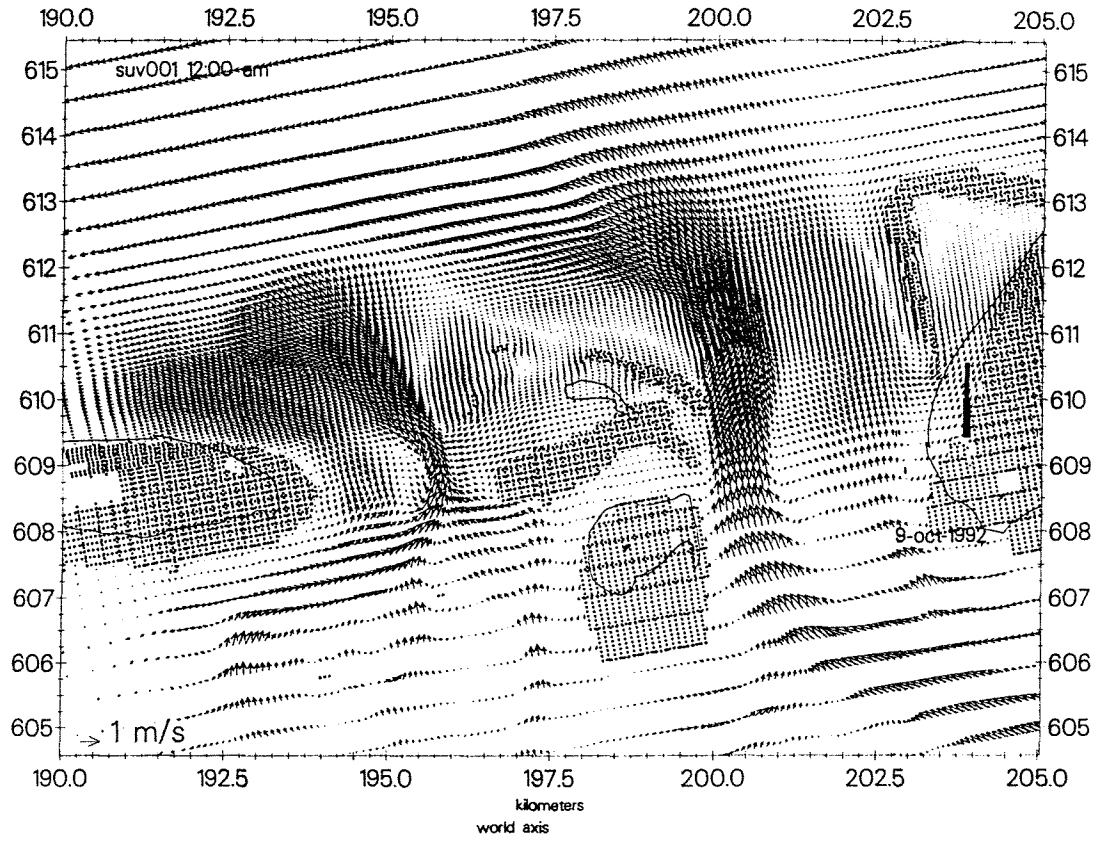
Rijks Instituut voor Kust en Zee



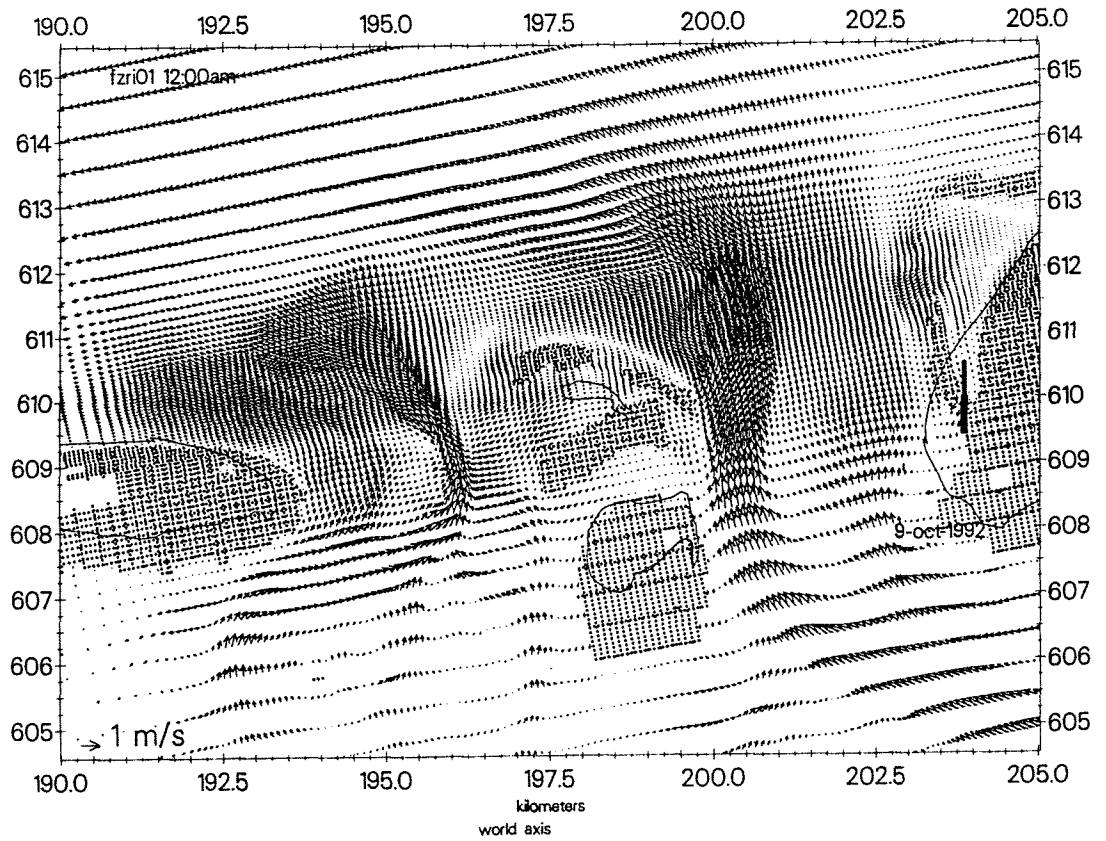
Verificatie stromingen in Het Friesche Zeegat

Bijlage 6a

Fzwaqua



Fz8791ri.asc



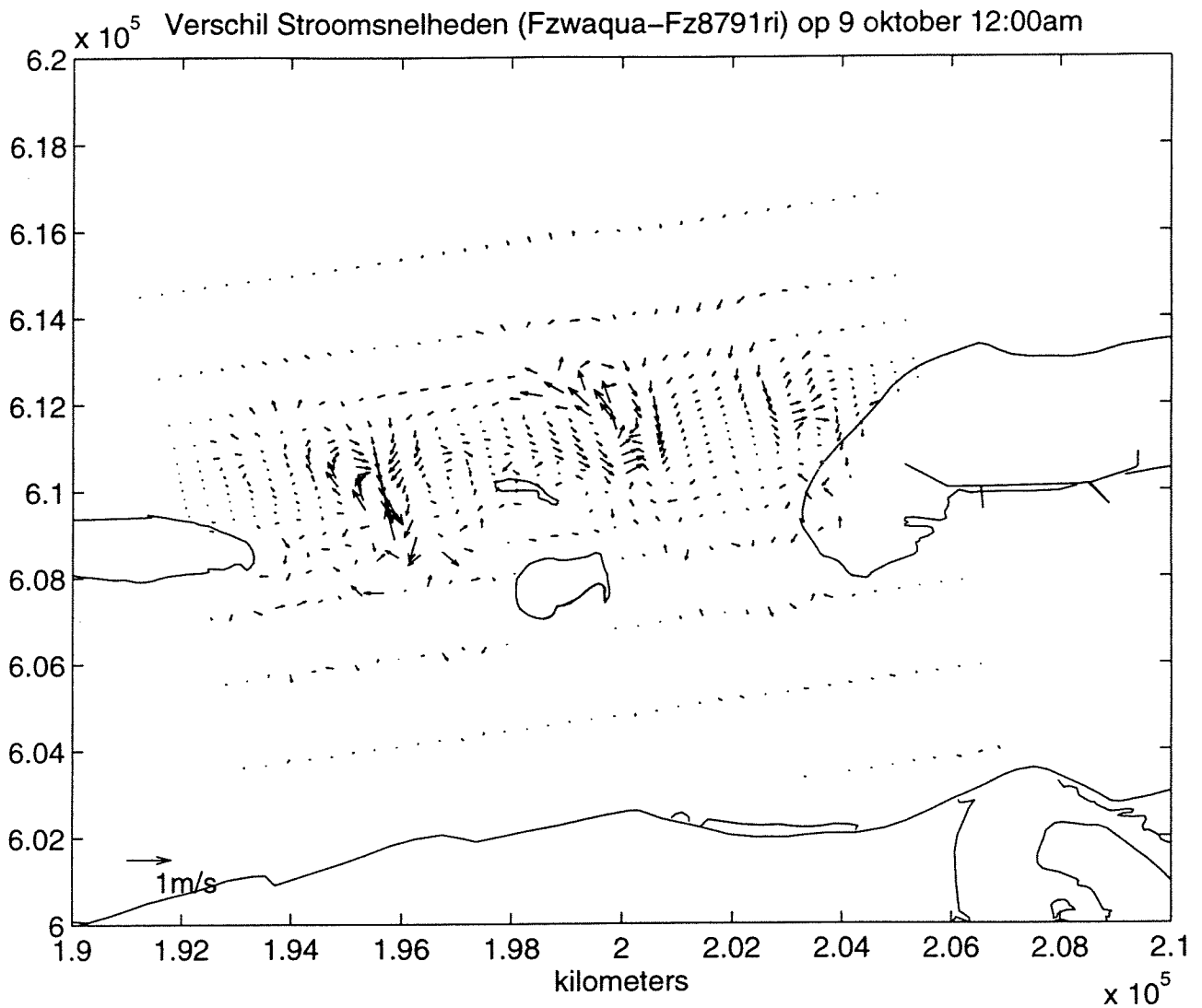
Vergelijking van de globale stromingen in ebdelta van het Friesche Zeegat op 9 oktober 12:00 am van de bodem Fzwaqua.bot en Fz8791ri.waq

Rijks Instituut voor Kust en Zee



Verificatie stromingen in Het Friesche Zeegat

Bijlage 6b



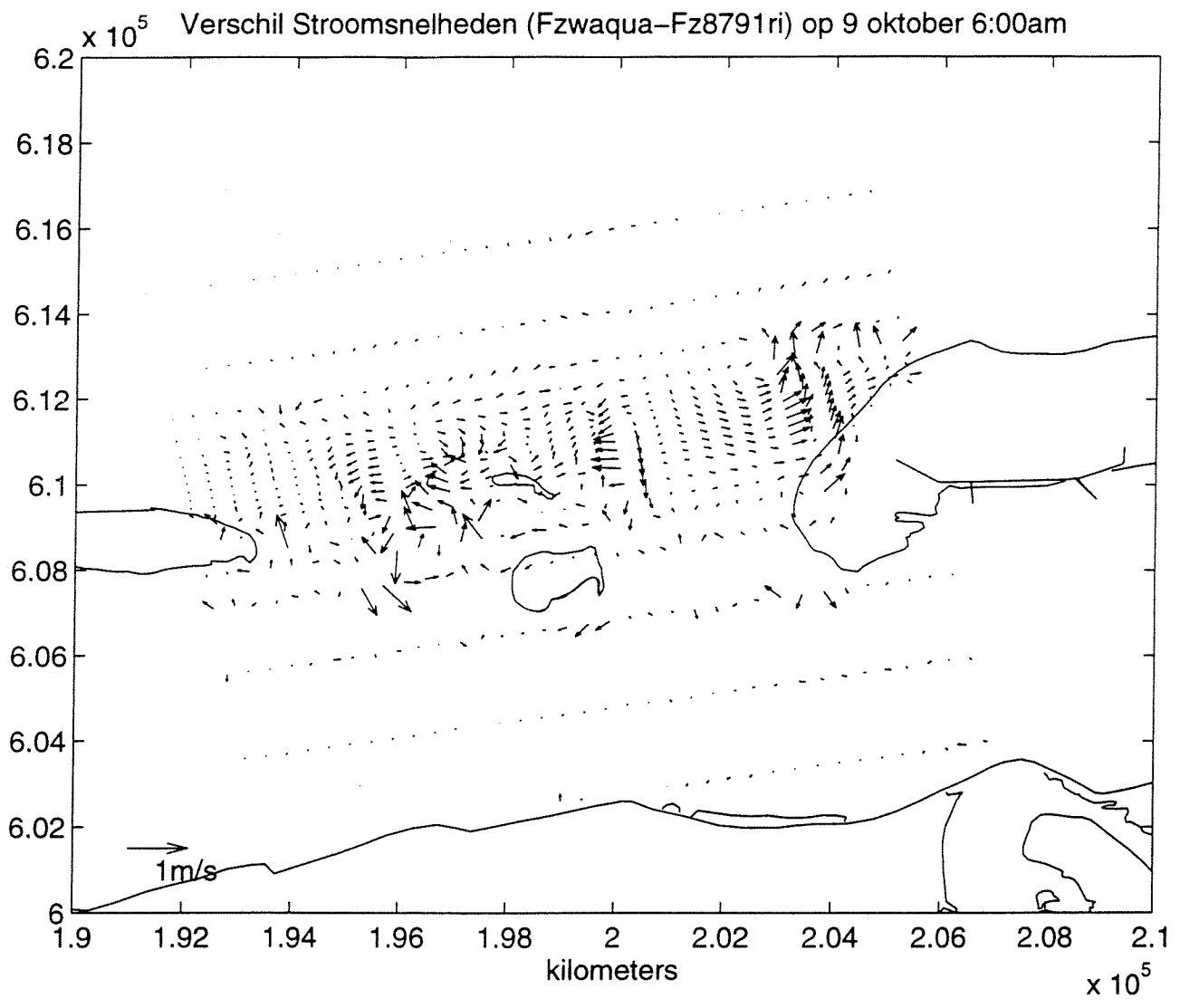
Verschillen van de stroomsnelheden van de berekeningen met de Fzwaqua.bot bodem en de Fz8791ri.waq op 9 oktober 12:00 am

Rijks Instituut voor Kust en Zee



Verificatie stromingen in Het Friesche Zeegat

Bijlage 7c



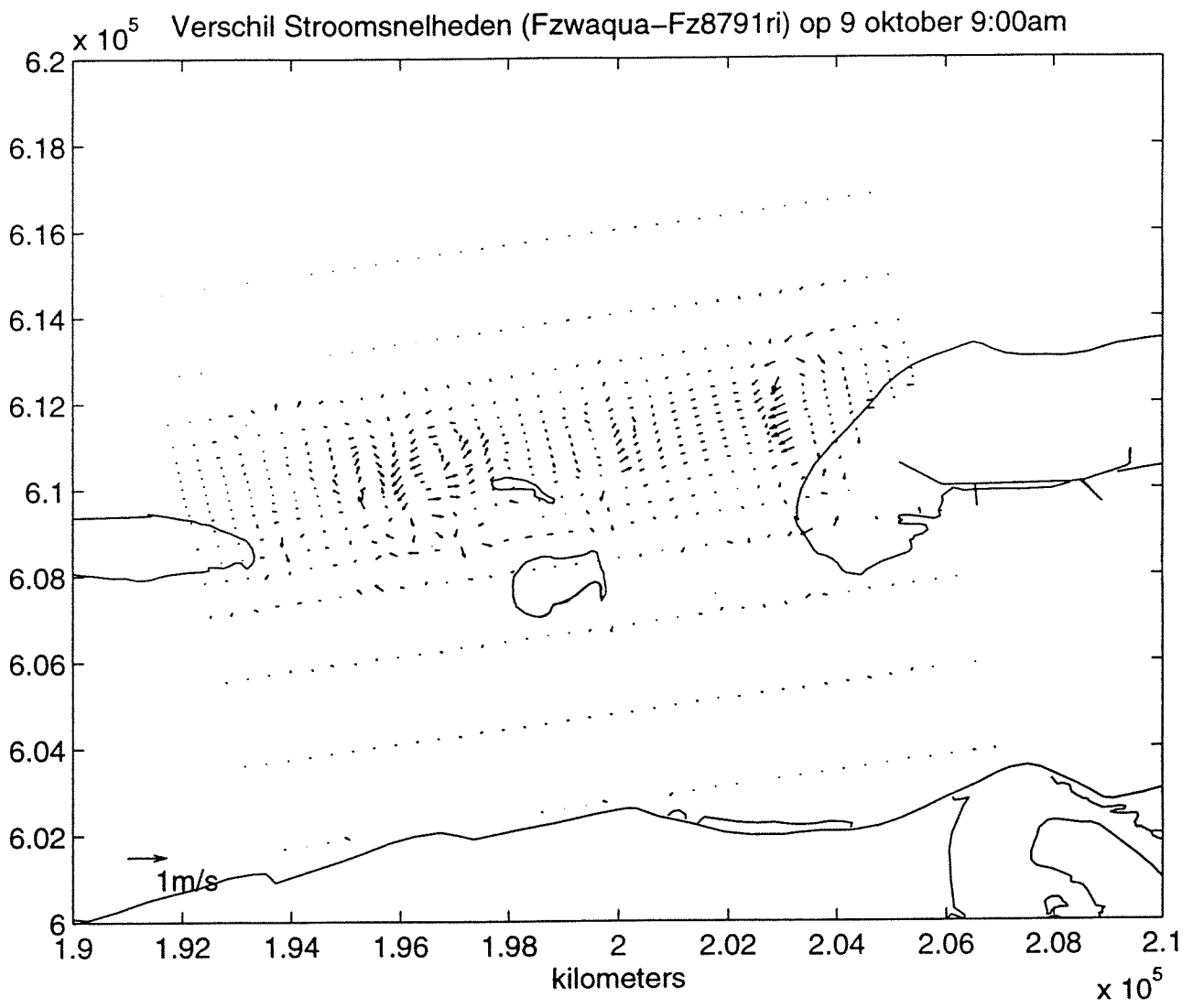
Verschillen van de stroomsnelheden van de berekeningen met de Fzwaqua.bot bodem en de Fz8791ri.waq op 9 oktober 6:00 am

Rijks Instituut voor Kust en Zee



Verificatie stromingen in Het Friesche Zeegat

Bijlage 7a



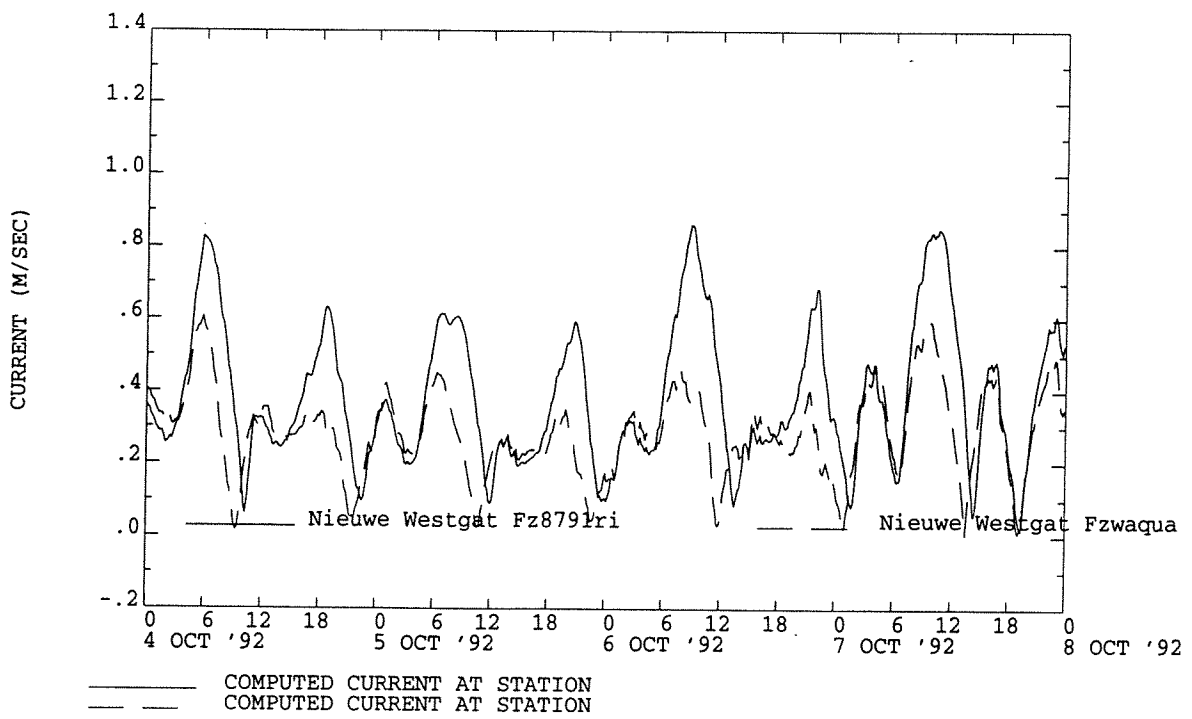
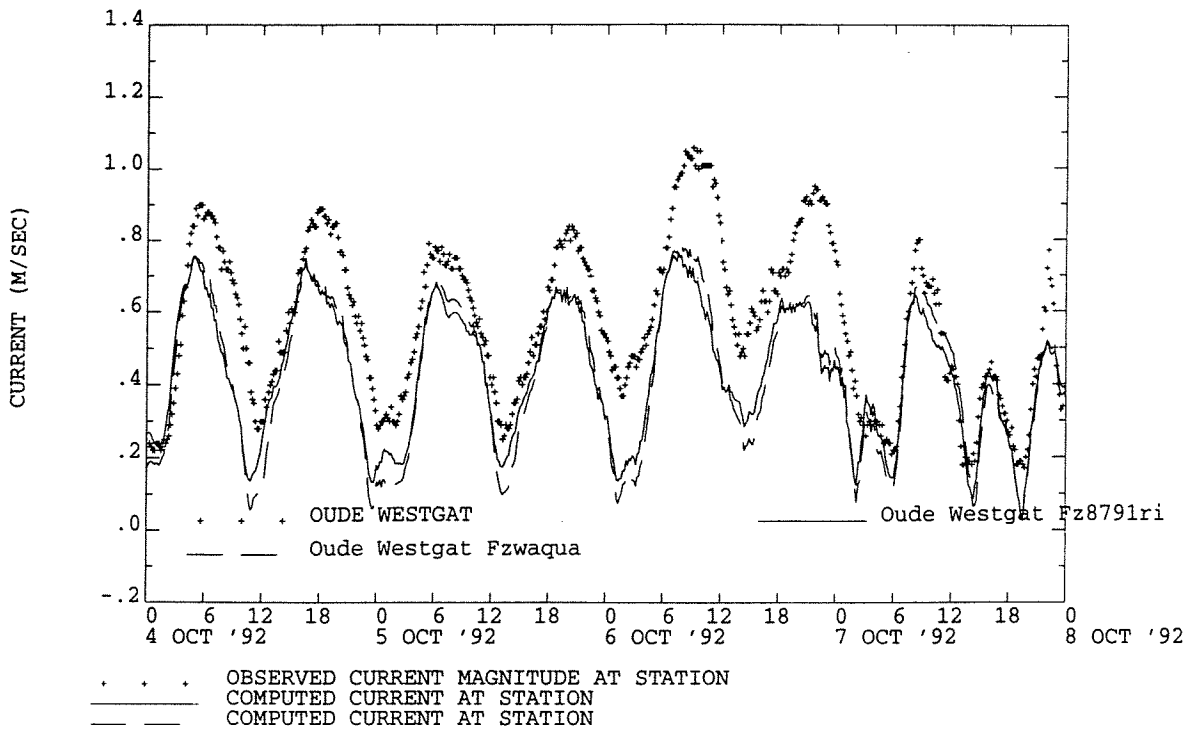
Verschillen van de stroomsnelheden van de berekeningen met de Fzwaqua.bot bodem en de Fz8791ri.waq op 9 oktober 9:00 am

Rijks Instituut voor Kust en Zee



Verificatie stromingen in Het Friesche Zeegat

Bijlage 7b

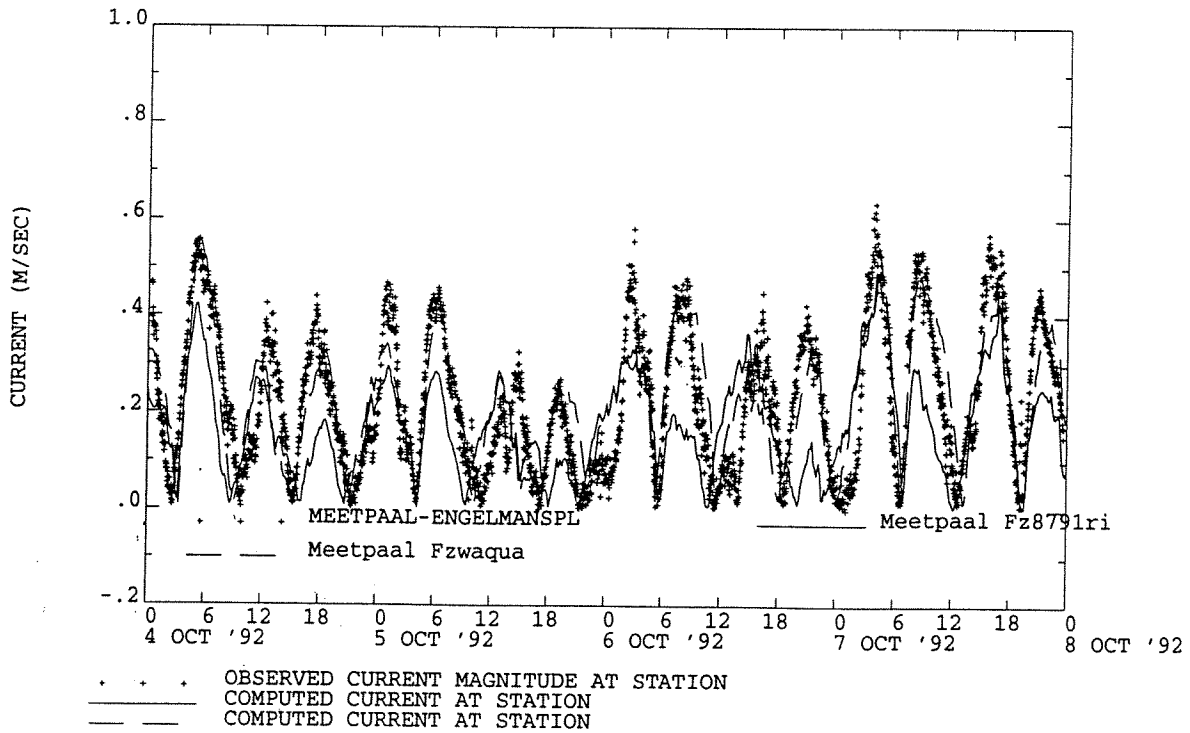
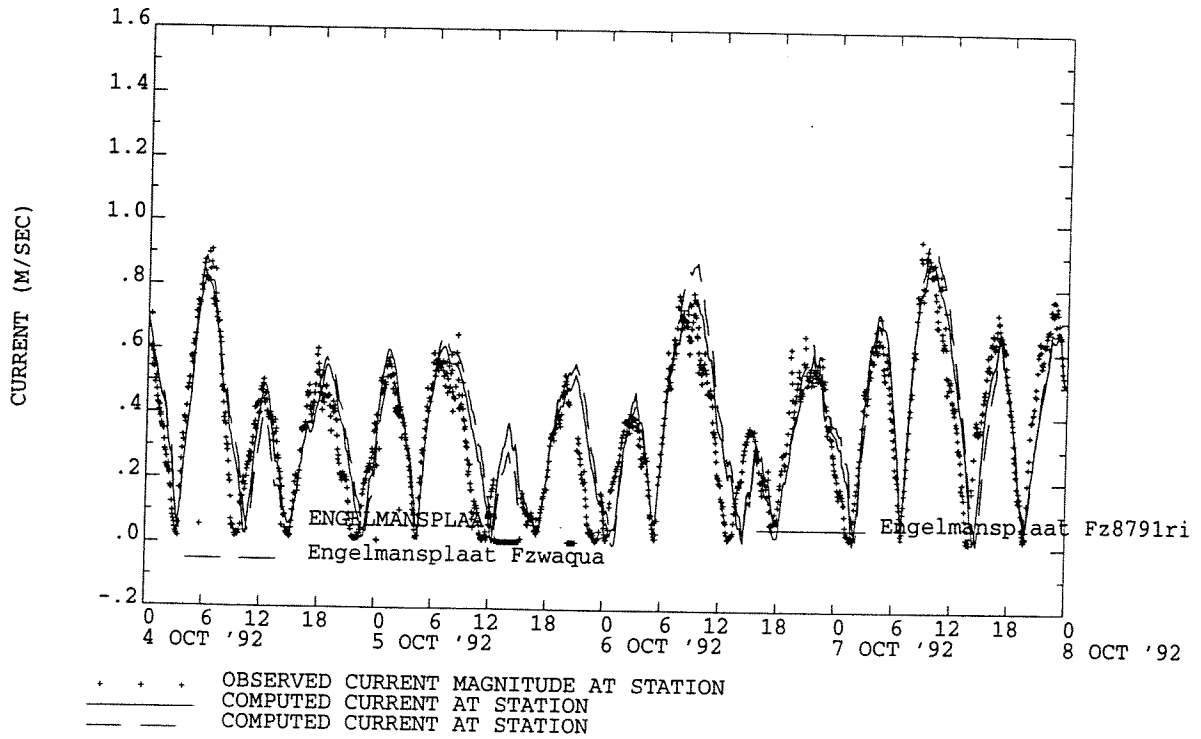


Vergelijking van de stroomtijdreksen van de bodems Fzwaqua.bot en Fz8791ri.bot met de metingen voor Oude Westgat en Nieuwe Westgat

Rijks Instituut voor Kust en Zee



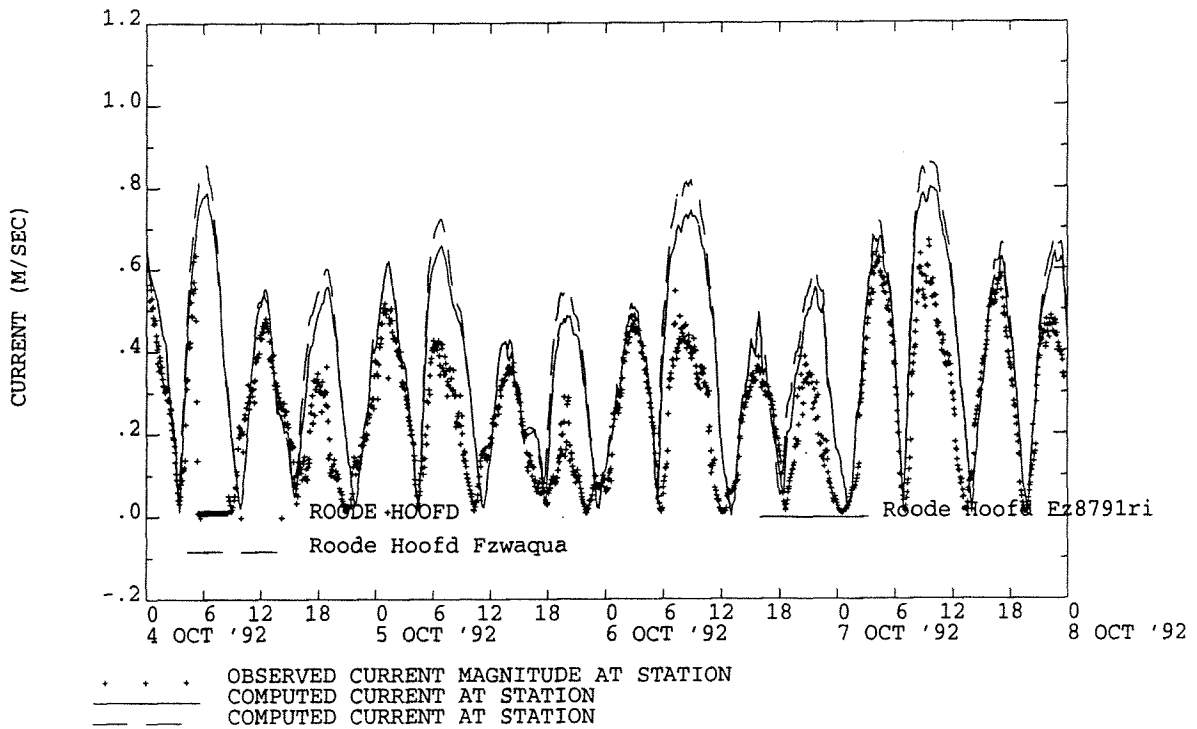
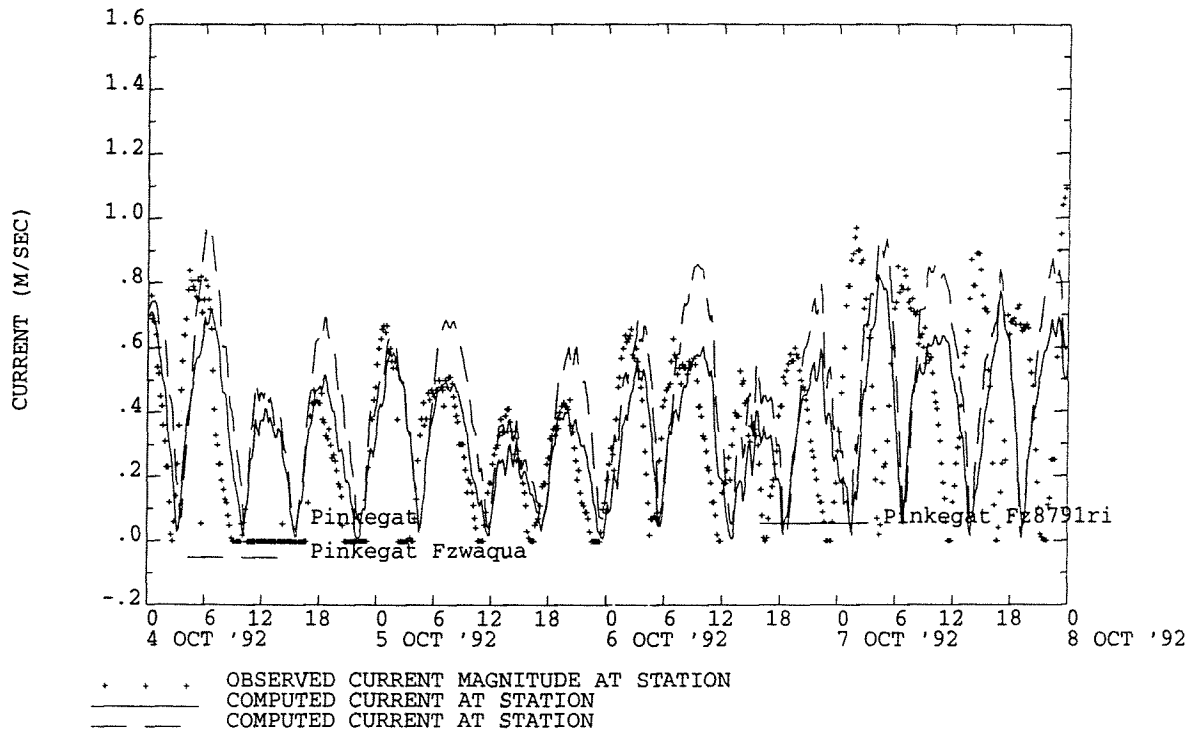




Vergelijking van de stroomtjeddreksen van de bodems Fzwaqua.bot en Fz8791ri.bot met de metingen voor Engelmanplaat en de Meetpaal

Rijks Instituut voor Kust en Zee





Vergelijking van de stroomtijdsreeksen van de bodems Fzwaqua.bot en Fz8791ri.bot met de metingen voor Pinkegat en Roode Hoofd

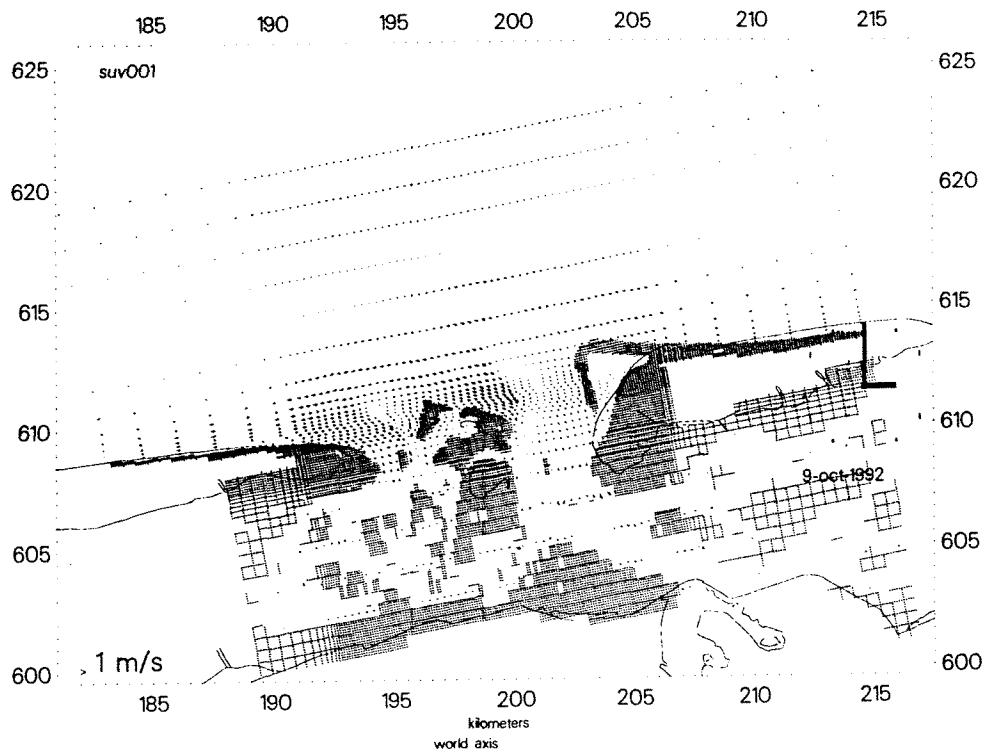
Rijks Instituut voor Kust en Zee



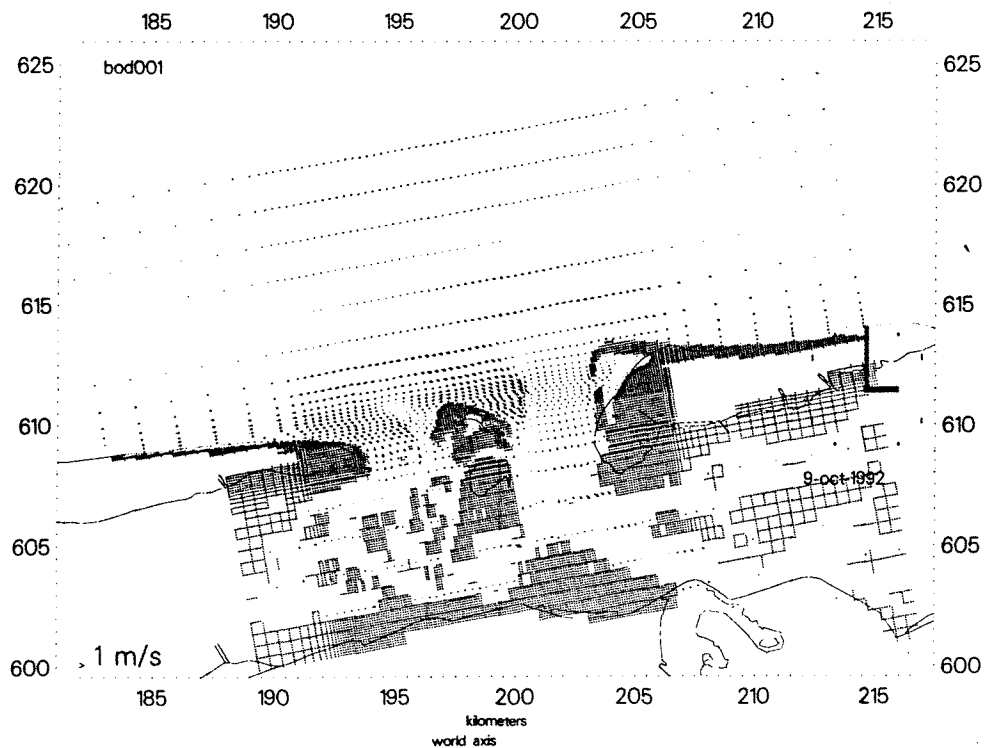
Verificatie stromingen in Het Friesche Zeegat

Bijlage 8c

Fzwaqua



Fz8791ri



Vergelijking van de globale stroming in het hele gebied van de bodems Fzwaqua.bot en Fz8791ri.bot op 9 oktober 3:00 am

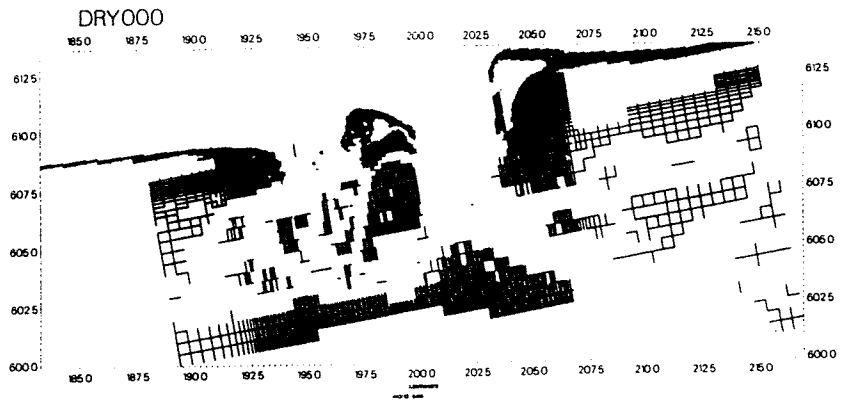
Rijks Instituut voor Kust en Zee



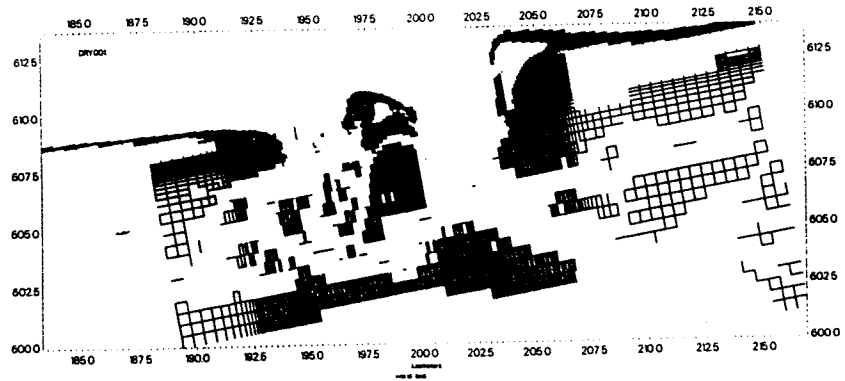
Verificatie stromingen in Het Friesche Zeegat

Bijlage 9

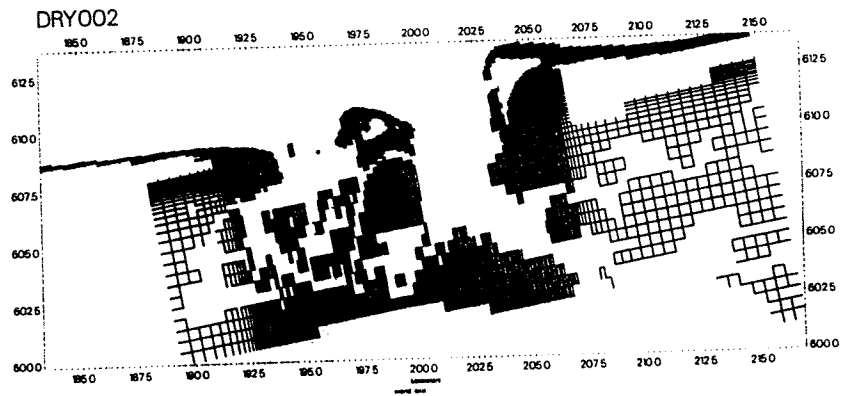
MAXimum



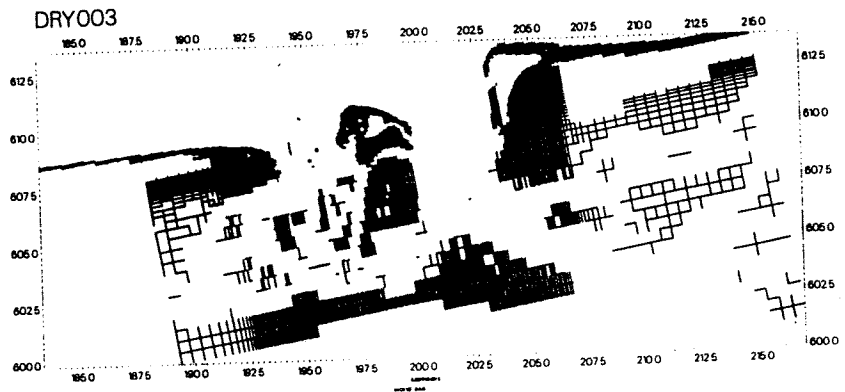
GEMiddeld



MINimum



O optie



Globaal overzicht van de hoeveelheid droogvalschootjes door MINimale Maximale, Gemiddelde, O optie droogvalprocedure geplaatst op 9 oktober 3:00 am

Rijks Instituut voor Kust en Zee

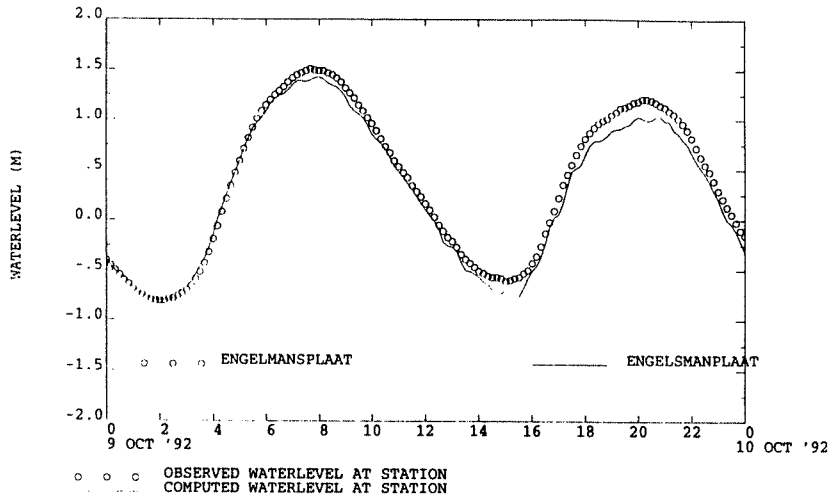


Verificatie stromingen in Het Friesche Zeegat

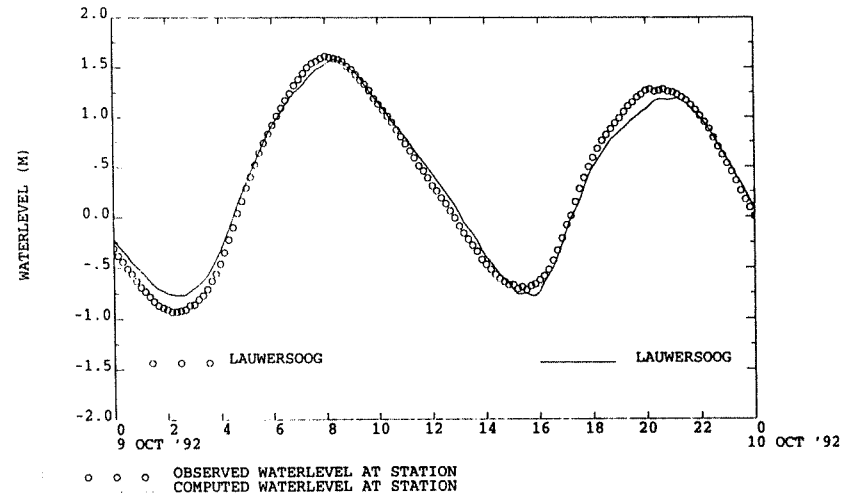
Bijlage 10

Vergelijking van de waterstanden van Engelsmanplaat en Lauwersoog voor weerstandsverschil  $n=0.018$  en  $n=0.026$  voor Fzwaqua.bot op 9 oktober

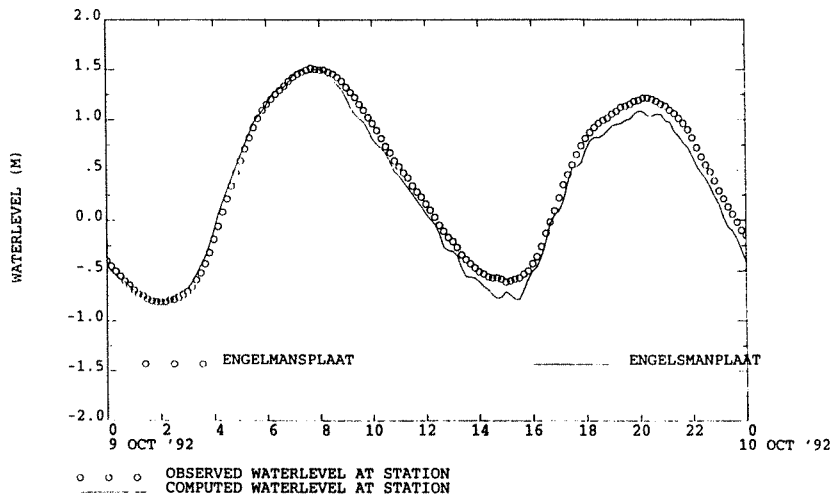
Rijks Instituut voor Kust en Zee



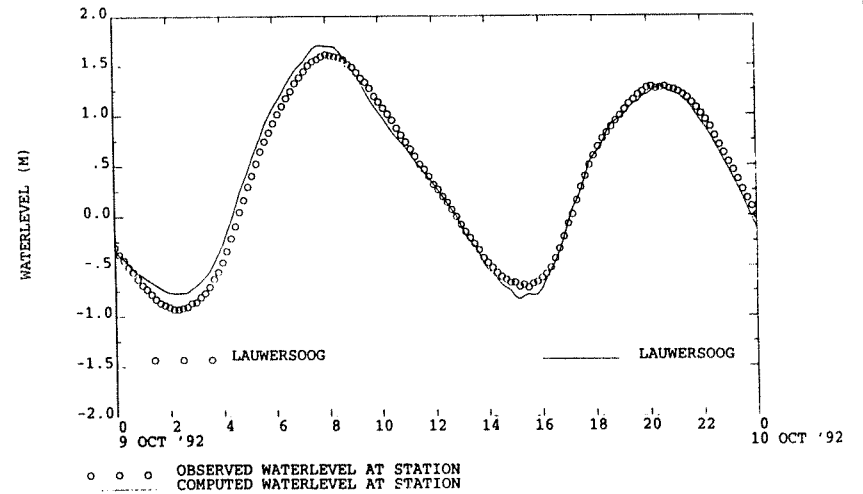
$n=0.026$



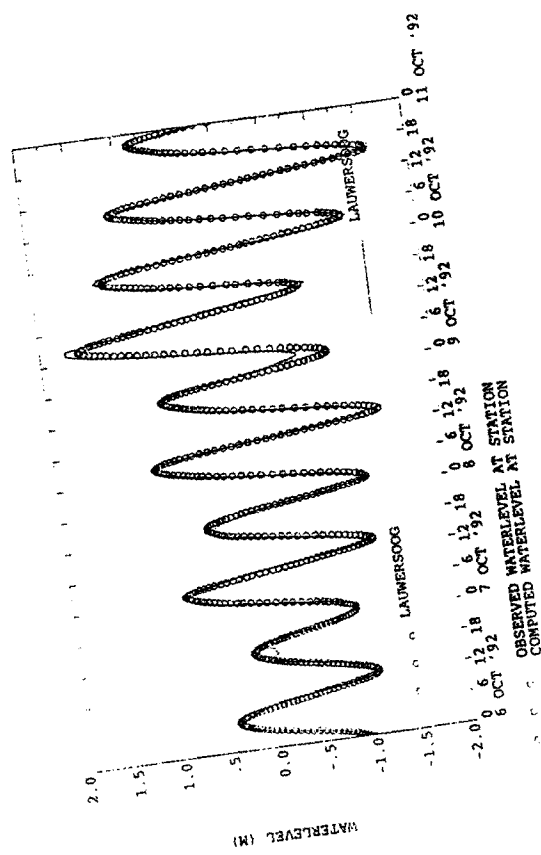
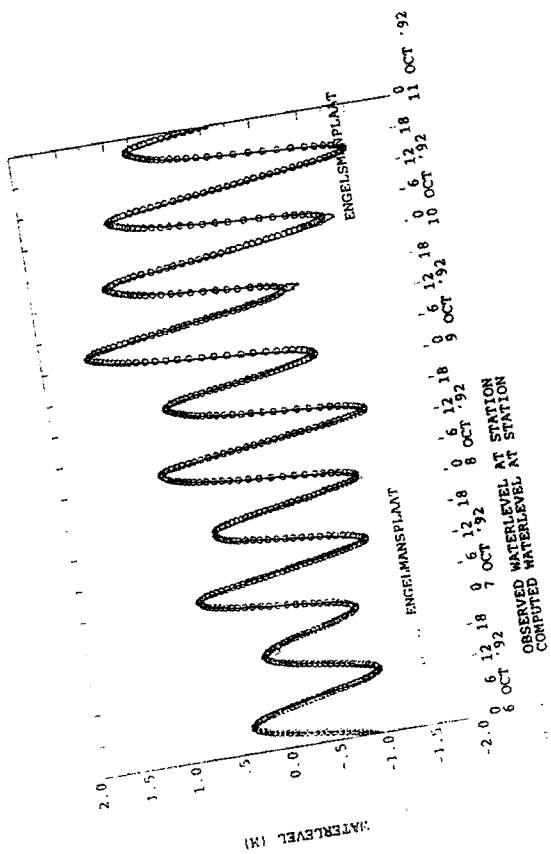
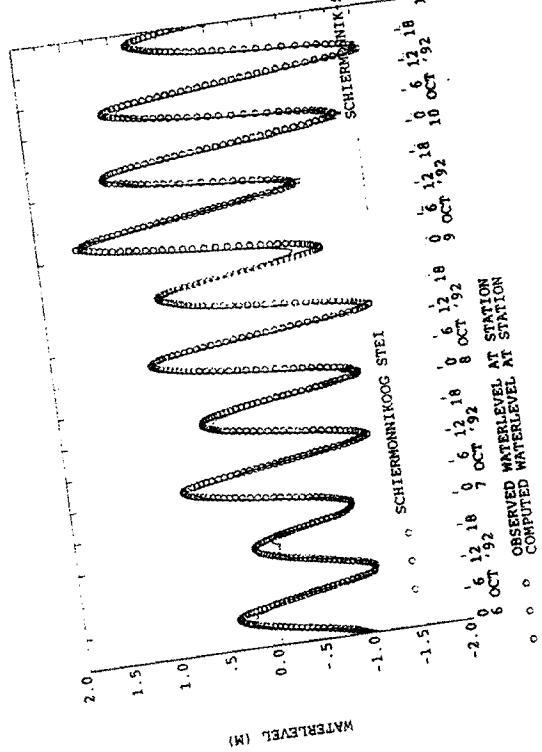
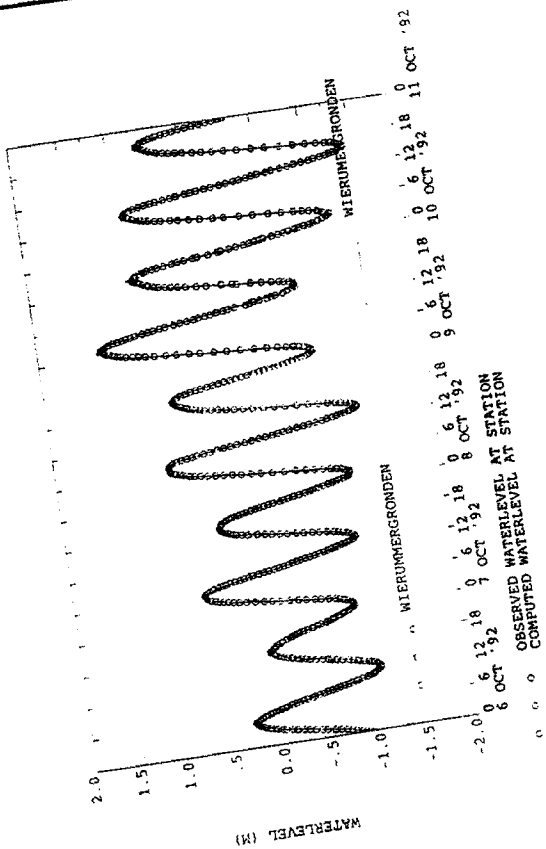
$n=0.026$



$n=0.018$



$n=0.018$

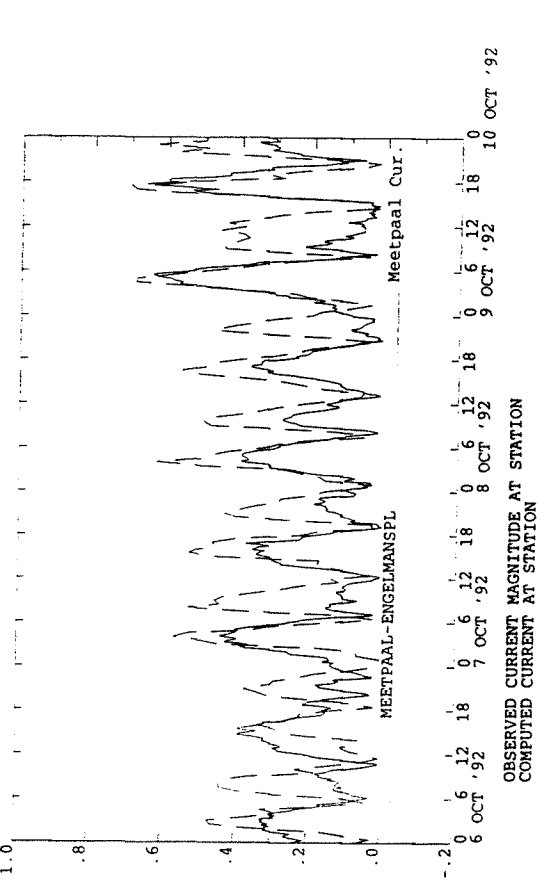
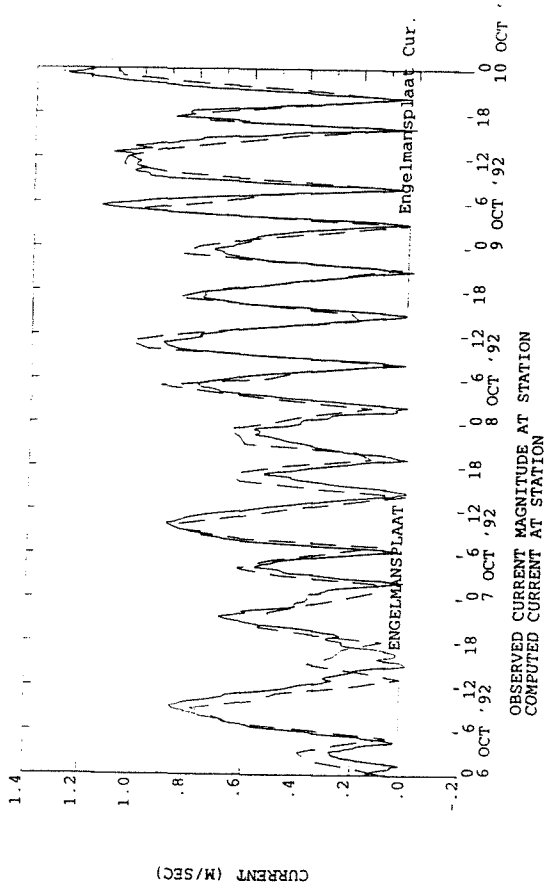
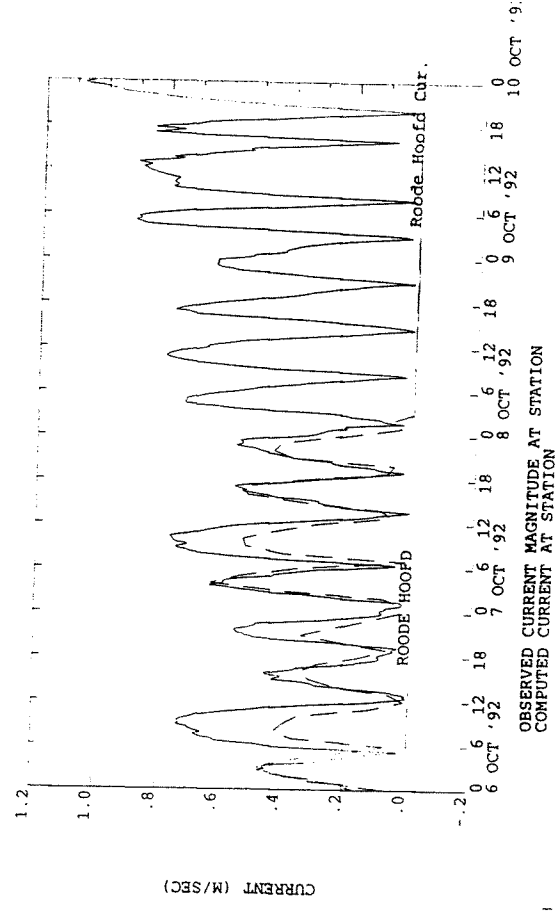
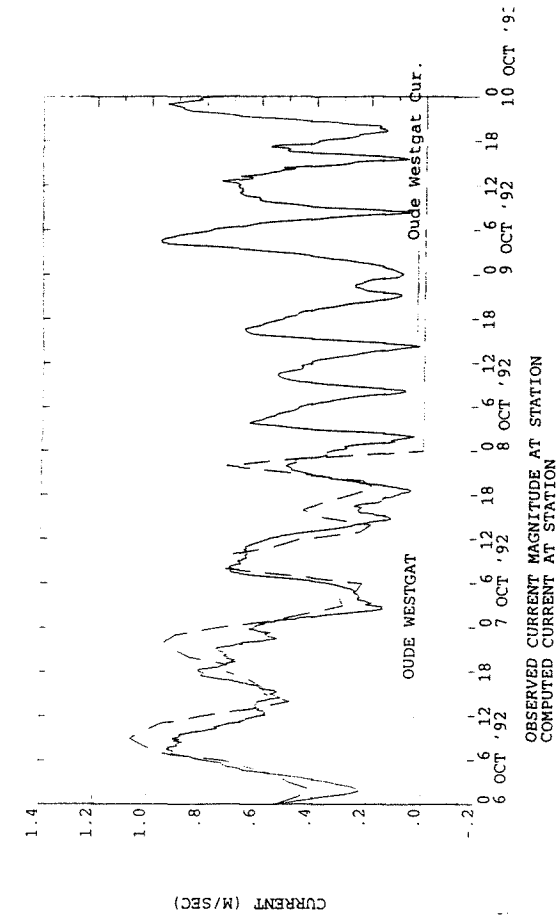


Vergelijking waterstanden van de metingen en de berekeningen waarbij de windschuifspannings coëfficiënt met een factor 4 is vermenigvuldigd

Verificatie stromingen in Het Friesche Zeegat

Rijks Instituut voor Kust en Zee

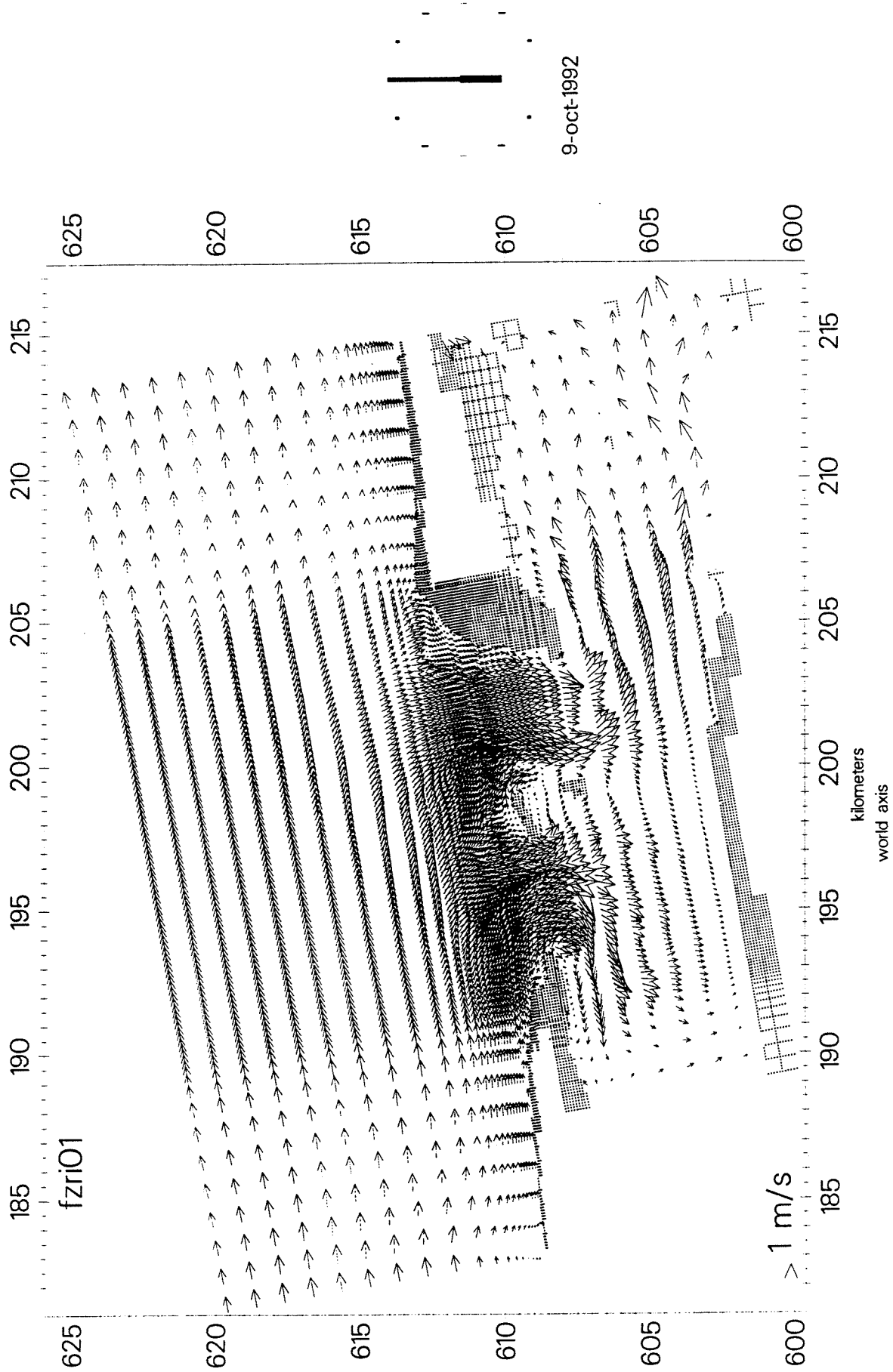
Bijlage 12



Vergelijking stromingen van de metingen en de berekeningen waarbij de windschuifspannings coëfficiënt met een factor 4 is vermenigvuldigd

Rijks Instituut voor Kust en Zee





Stromingsbeeld van het hele Friesche Zeegat Model met de bodem  
Fz8791ri.waq op 9 oktober 6:00 am

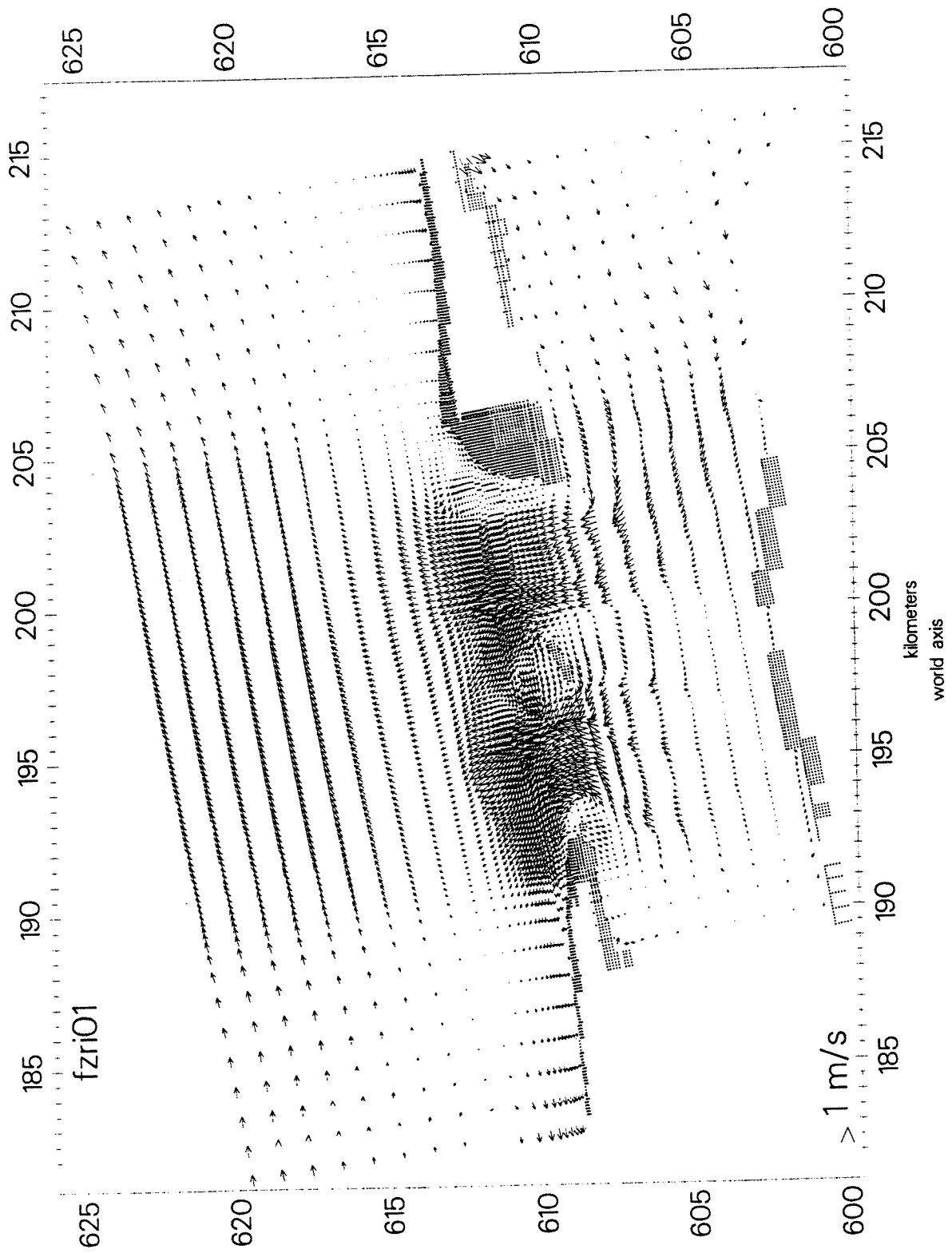
Rijks Instituut voor Kust en Zee



Verificatie stromingen in Het Friesche Zeegat

Bijlage 14a





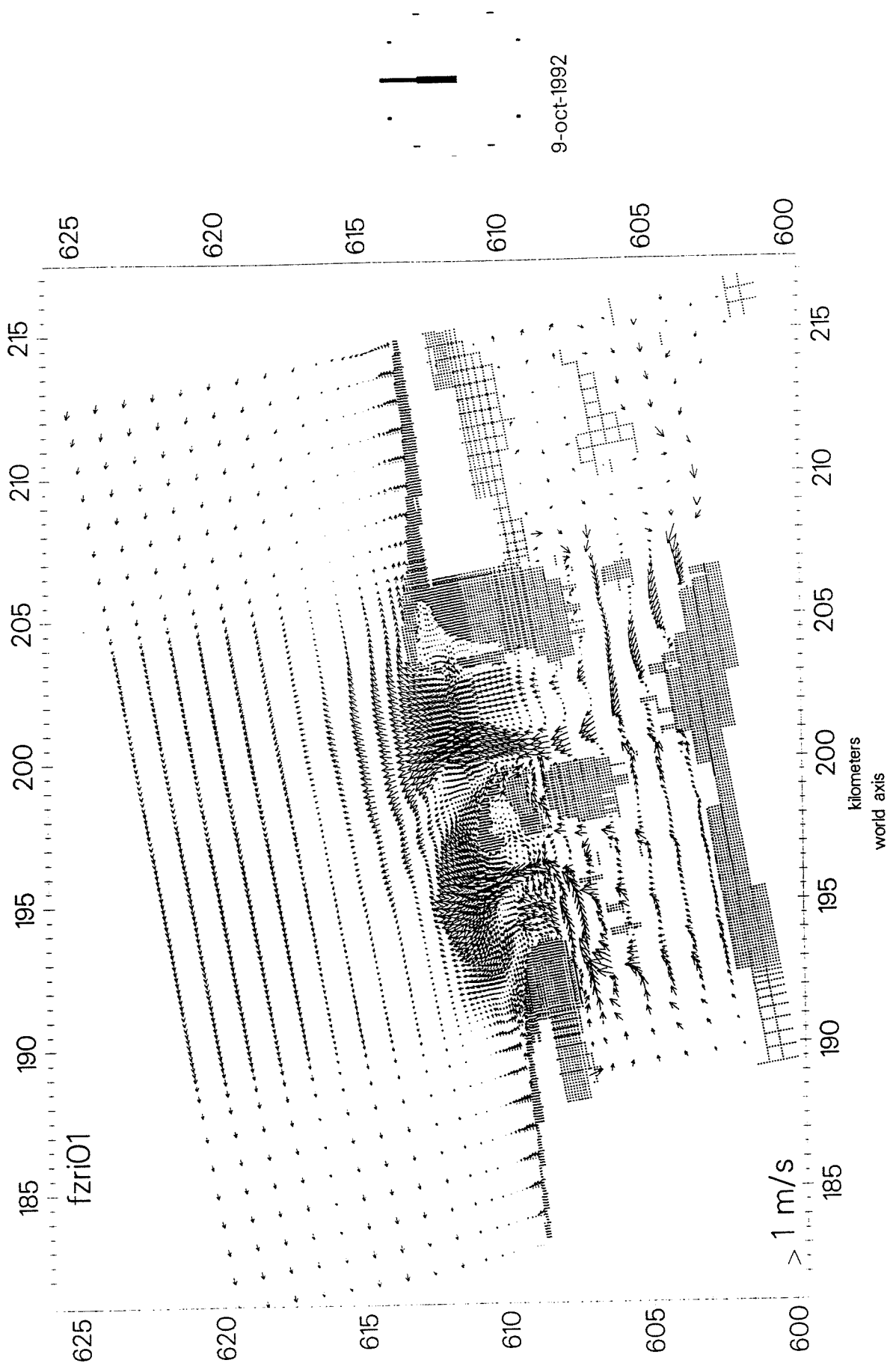
Stromingsbeeld van het hele Friesche Zeegat Model met de bodem Fz8791ri.waq op 9 oktober 9:00 am

Rijks Instituut voor Kust en Zee



Verificatie stromingen in Het Friesche Zeegat

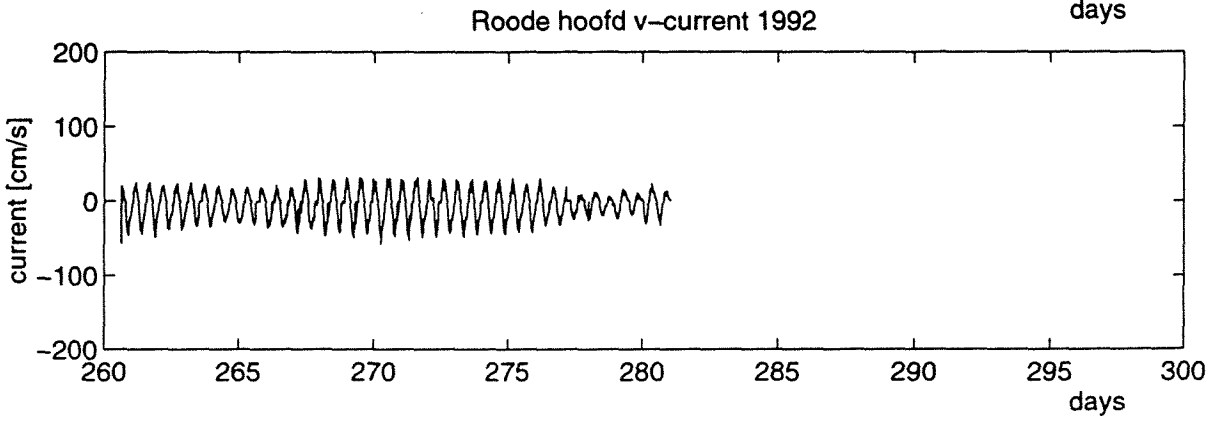
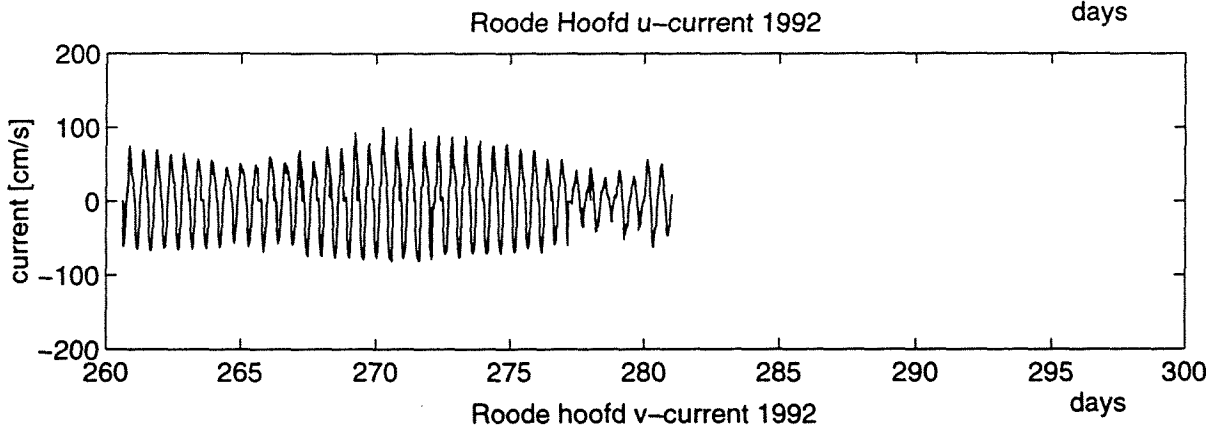
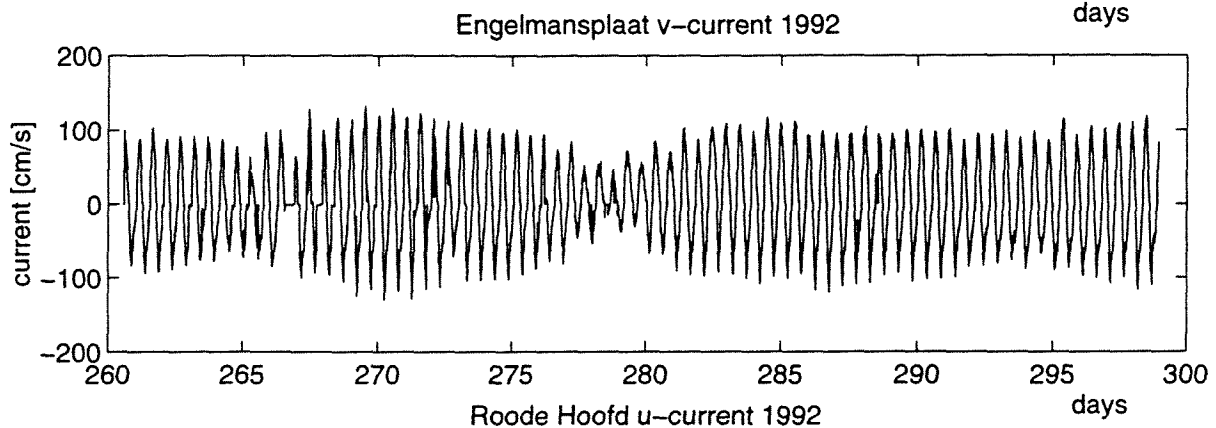
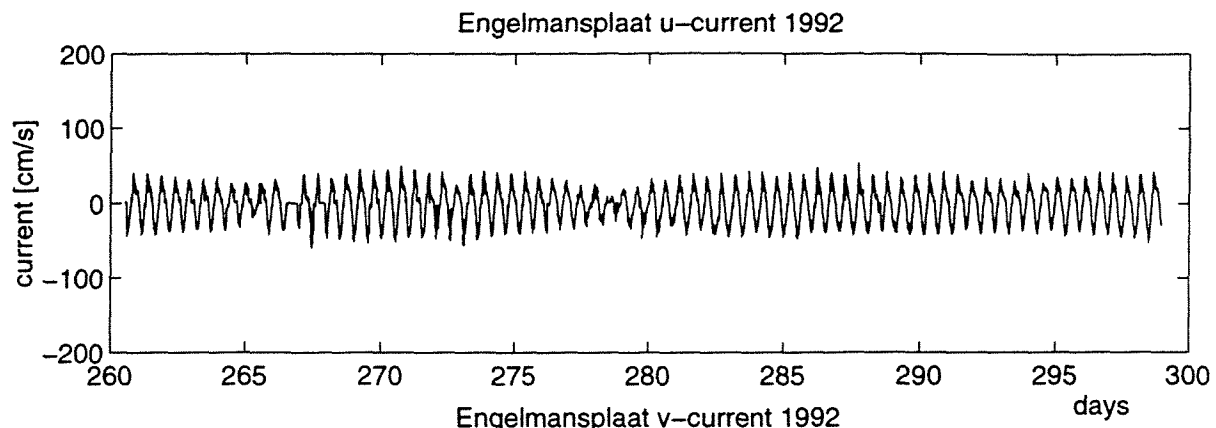
Bijlage 14b



Stromingsbeeld van het hele Friesche Zeegat Model met de bodem  
 Fz8791ri.waq op 9 oktober 12:00 am

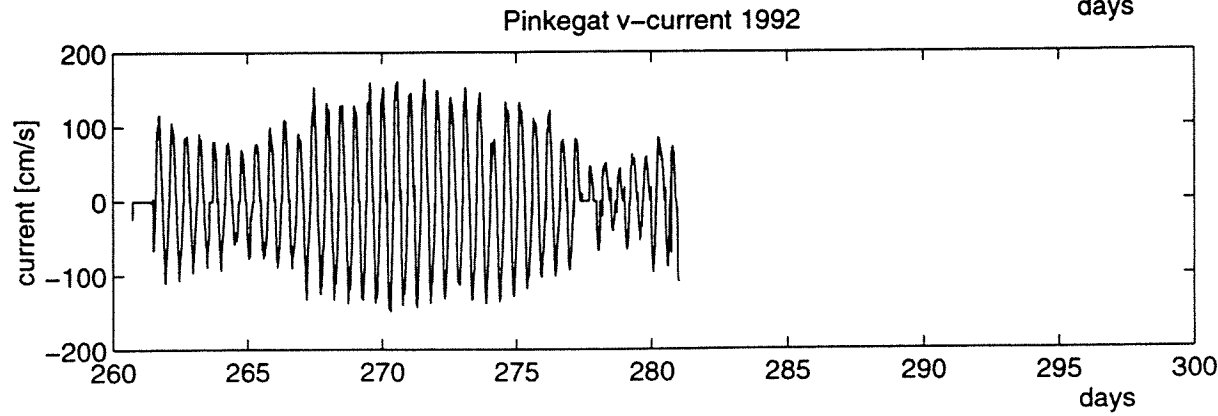
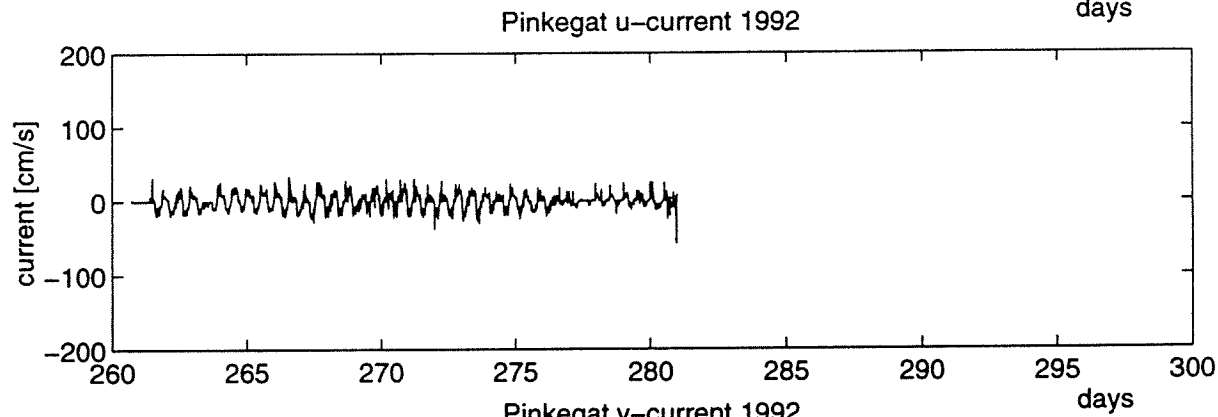
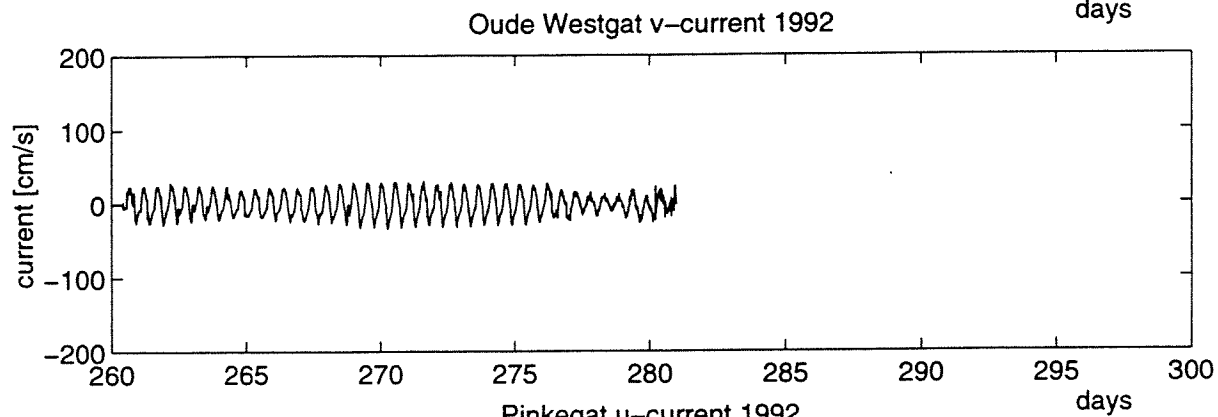
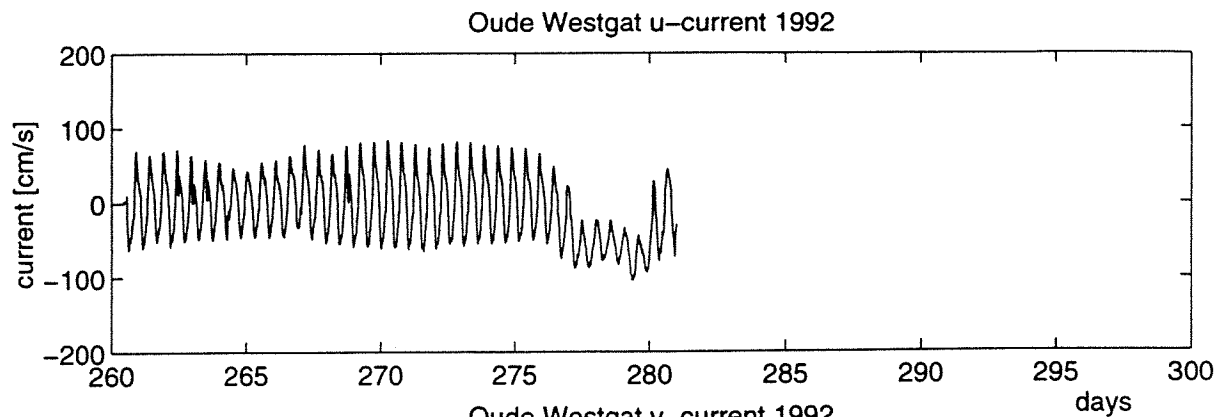
Rijks Instituut voor Kust en Zee





Tijdreeksen meetdata Engelmansplaat en Roode Hoofd in u en v richting van de gehele meetperiode (zie Appendix C)

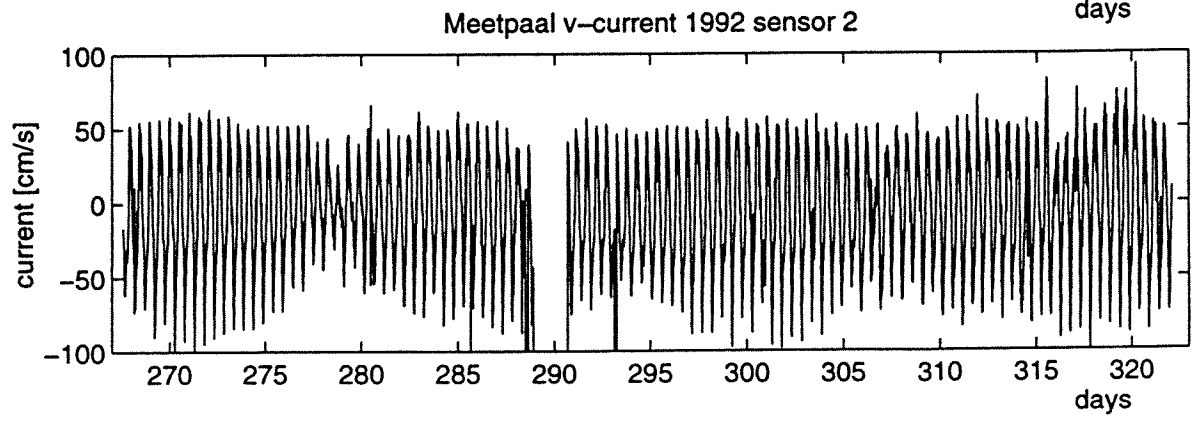
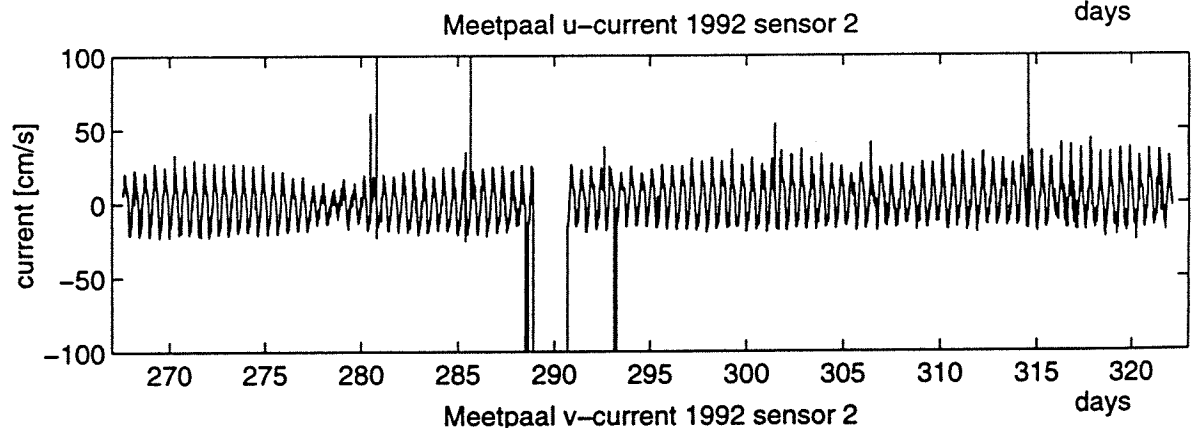
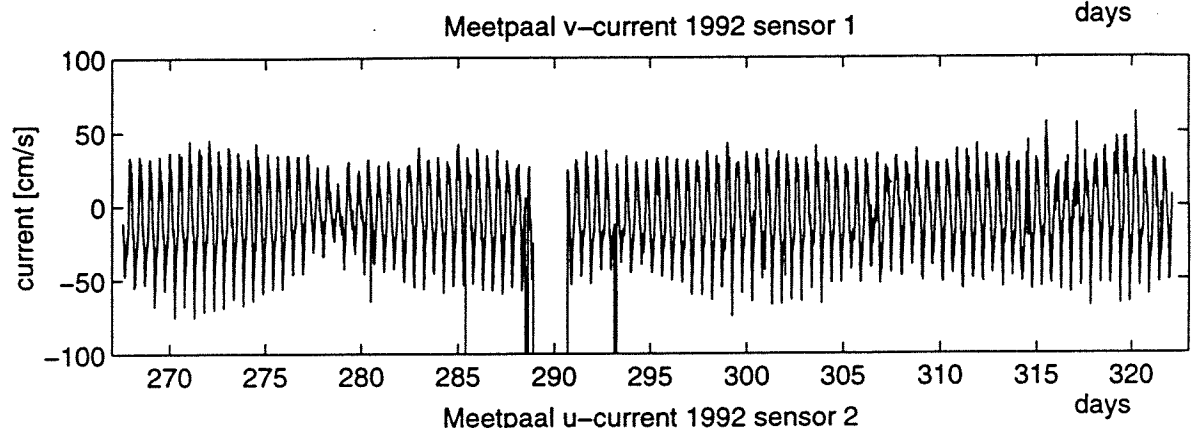
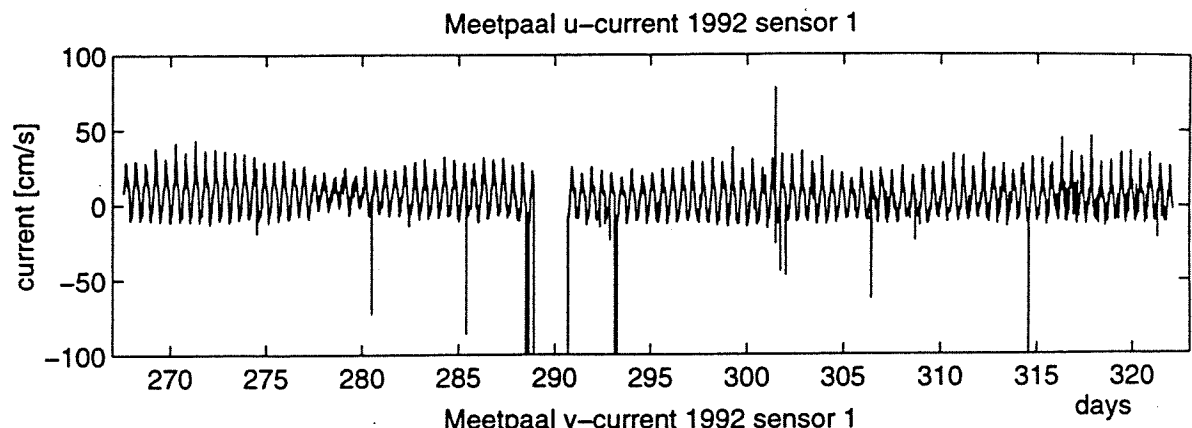
Rijks Instituut voor Kust en Zee 



Tijdreeksen meetdata Oude Westgat en Pinkegat in u en v richting van de gehele meetperiode (zie Appendix C)

Rijks Instituut voor Kust en Zee





Tijdreeksen meetdata Meetpaal sonde (1), Meetpaal sonde (2) in u en v richting van de gehele meetperiode (zie Appendix C)

Rijks Instituut voor Kust en Zee

