

Opdrachtgever:

RIKZ Middelburg

Modellering secundaire stroming en 3D sedimenttransport Westerschelde

Verslag

maart 2000

Z2799

wl | delft hydraulics

Modellering secundaire stroming en 3D sedimenttransport Westerschelde

P.M.C. Thoolen



wL | delft hydraulics

Inhoud

1	Inleiding	1
2	Opzet van de studie.....	2
2.1	Doelstelling.....	2
2.2	Aanpak	2
2.2.1	Overzicht uitgevoerde activiteiten.....	2
2.2.2	Detailering uitgevoerde activiteiten.....	2
3	3D en quasi-3D secundaire stroming.....	5
3.1	Inleiding	5
3.2	SSD in DELFT3D-MOR	5
3.2.1	Inleiding	5
3.2.2	Afleiding SSD	6
3.3	SSL in DELFT3D-MOR.....	7
3.3.1	Inleiding	7
3.3.2	Afleiding SSL	8
3.4	Vergelijking quasi-3D en 3D-TRISCAL.....	10
3.4.1	Inleiding	10
3.4.2	Beschrijving SSD quasi-3D versus TRISCAL3D	10
3.4.3	Beschrijving SSL quasi-3D versus TRISCAL3D.....	11
3.4.4	Discussie	12
3.5	vergelijking (quasi) 3D en metingen.....	13
3.5.1	Analyse ADCP metingen	13
3.5.2	Vergelijking secundaire stromingsintensiteit quasi-3D, TRISCAL en ADCP.....	15
3.6	Effect SSL op Secundaire stroming in dwarsrichting (SSD).....	16
3.6.1	Invloed SSL op SSD	16
3.6.2	Analyse invloed quasi-3D SSL op quasi-3D SSD	17
3.7	Conclusies quasi-3D simulaties	17
4	3D stroming en sedimenttransport.....	19
4.1	Hydrodynamica	19
4.1.1	Inleiding	19

I Inleiding

In 1998 is door WL onderzoek verricht naar de invloed van driedimensionale stromingseffecten op het sedimenttransport in het Westerschelde-estuarium en met name op de drempelvorming bij Hansweert (rapport Z2489, ref. [3]). Hiervoor is een quasi-3D sedimenttransportmodel van de Westerschelde opgezet op basis van DELFT3D-MOR en met gebruikmaking van de TRISCAL schematisatie (zie ref. [8] en ref. [9]). In de studie is aandacht besteed aan de invloed van de bodemhelling op het sedimenttransport en is onderzocht wat de gevoeligheid is van de modelresultaten voor de aanpassingstijd en -lengte van de sedimentconcentratieverdeling met betrekking tot de lokale stromingscondities. Daarnaast is onderzoek gedaan naar de effecten van de secundaire stroming in *dwaars*richting op het sedimenttransport en de morfologische ontwikkeling. Op basis van de conclusies en aanbevelingen in ref. [3] met betrekking tot secundaire stroming, is in 1999 door WL een vervolgonderzoek uitgevoerd naar formuleringen voor secundaire stroming in *langs*richting, waarvan de implementatie op dit moment ontbreekt in de quasi-3D aanpak (rapport Z2649, ref. [4]). Uit deze studie zijn aanbevelingen gekomen met betrekking tot mogelijkheden voor uitbreiding van de quasi-3D aanpak in DELFT3D-MOR, met formuleringen voor secundaire stroming in langsrichting.

Naar aanleiding van de resultaten uit de voorafgaande studies is door RIKZ aan WL opdracht verleend, via overeenkomst RKZ-788, d.d. 9/12/1999, om de voorgestelde formuleringen te toetsen aan metingen. Hiertoe moet een bewerking worden uitgevoerd op de eerder gemaakte quasi-3D berekeningen, zodat de grootte van de secundaire stroming in langsrichting kan worden bepaald.

Recent is een nieuwe versie van DELFT3D-MOR beschikbaar gekomen waarmee 3D sedimenttransport berekeningen kunnen worden uitgevoerd. In de huidige studie wordt deze nieuwe versie van DELFT3D-MOR gebruikt ter verificatie van de quasi-3D benadering en de formulering voor de secundaire stromingsintensiteit in langsrichting.

2 Opzet van de studie

2.1 Doelstelling

Het doel van het project is tweeledig: in eerste instantie wordt nagegaan of de in ref. [4] voorgestelde verbeteringen van de quasi-3D versie van DELFT3D-MOR de resultaten van de sedimenttransport simulaties verbeteren. Daarnaast wordt onderzocht wat de verschillen zijn tussen sedimenttransport resultaten verkregen met het huidige quasi-3D sedimenttransport model voor de Westerschelde en resultaten verkregen met een volledig 3D sedimenttransport model dat gebaseerd is op de nieuwe versie van DELFT3D-MOR.

2.2 Aanpak

2.2.1 Overzicht uitgevoerde activiteiten

Het onderzoek omvat vijf activiteiten, die hieronder kort zijn samengevat. Activiteiten 1 en 2 hebben betrekking op de hydrodynamica van het quasi-3D model, en met name het bepalen van de secundaire stroming in langsrichting. Gedurende activiteiten 3 en 4 worden resultaten van 3D sedimenttransport simulaties met het nieuwe DELFT3D-MOR model onderzocht.

1. Nader onderzoek naar de nauwkeurigheid van de quasi-3D waterbeweging (gericht op de berekening van de secundaire stroming in dwars- en langsrichting) aan de hand van een directe vergelijking met metingen in het gebied rond de drempel van Hansweert (ADCP metingen (zie de rapporten van M.H.P. Jansen ref. [9])).
2. Vergelijking tussen de secundaire stroming berekend met het aangepaste quasi-3D model (implementatie van de aanbevelingen uit ref. [4]) en de secundaire stroming op basis van het TRISCAL 3D stromingsveld.
3. Bepaling van de 3D sedimenttransportberekeningen en vergelijking met de quasi-3D sedimenttransportberekeningen.
4. Vergelijken van 3D sedimenttransportresultaten met metingen.
5. Maken van conclusies en voorstellen ten aanzien van het vervolgtraject met het doel om te komen tot een morfodynamisch model van de Westerschelde.

2.2.2 Detaillering uitgevoerde activiteiten

Ad. 1, §2.2.1: Dit onderzoek betreft de quasi-3D waterbeweging zoals gesimuleerd in ref. [3]. Deze waterbeweging bevat alleen secundaire stroming in dwarsrichting en is eerder vergeleken met de 3D TRISCAL waterbeweging (ref. [3]). Het onderzoek richt zich op de berekende intensiteit van de secundaire stroming in *dwars*richting en wordt vergeleken met gemeten dwarsstroomsnelheden.

Uit de resultaten van de studie ref. [4] is gebleken dat de grootte van de secundaire stroming in *langs*richting bepaald kan worden uit de grootte van de secundaire stroming in *dwars*richting. Omgekeerd kan de secundaire stroming in *dwars*richting op zijn beurt weer aangepast worden door de invloed van de secundaire stroming in *langs*richting op de stroming in *dwars*richting mee te nemen. Dit gebeurt middels twee relatief eenvoudige formuleringen waarvoor de secundaire stroming in *dwars*richting veroorzaakt door Coriolis bekend dient te zijn, de secundaire stroming veroorzaakt door bochteffect, en het dieptegemiddelde stromingsveld. In dit rapport wordt dus de quasi-3D intensiteit van de secundaire stroming in *langs*richting bepaald op basis van de intensiteit van de secundaire stroming in *dwars*richting.

Ad. 2, §2.2.1: Uit het TRISCAL 3D stromingsveld is in studie ref. [3] de intensiteit van de secundaire stroming in *dwars*richting bepaald en vergeleken met de quasi-3D berekeningen. Helaas is bij de afleiding hiervan een fout gemaakt, waardoor de secundaire stromingsintensiteit die in figuur 5.1 van rapport ref.[3] is weergegeven een factor 2 te klein is. Dit is gecorrigeerd in de huidige studie. Daarnaast is uit het TRISCAL 3D stromingsveld voor twee tijdstippen (tijdens maximale ebstroomsnelheid en tijdens maximale vloedstroomsnelheid) ook de intensiteit van de secundaire stroming in *langs*richting bepaald. Deze is vervolgens vergeleken met de resultaten van het quasi-3D model afgeleid bij Ad. 1.

Ad. 3, §2.2.1: het huidige quasi-3D sedimenttransportmodel op basis van DELFT3D-MOR is uitgebreid in verticale richting met 7 equidistante lagen, conform het 3D TRISCAL model (ref.[3]). De secundaire stroming in *langs*richting en in *dwars*richting berekend door de hydrodynamische 3D simulaties met Delft3D is vergeleken met 3D TRISCAL resultaten. Dit is gedaan zowel met, als zonder, het meenemen van zout in de simulatie. Hetzelfde model is gebruikt voor 3D sedimenttransport berekeningen, alleen is er nu gebruik gemaakt van 5 (niet-equidistante) lagen om de simulatieduur te beperken en de nauwkeurigheid van de resultaten nabij de bodem te vergroten (door toepassing van een dunne bodemlaag). De concentratie randvoorwaarden voor het 3D sedimenttransportmodel zijn identiek genomen aan de quasi-3D randvoorwaarden. Hierbij is de sedimentconcentratie aan de rand uniform over de verticaal verdeeld. De berekeningen zijn uitgevoerd voor de periode van een morfologisch getij, zoals eerder gebruikt in de studie ref.[3]. Gedurende iedere tijdstap van dit morfologisch getij (van 12 uur en 20 minuten) wordt de bodemaanpassing berekend alvorens een nieuwe hydrodynamische stap wordt gedaan. Per tijdstap wordt de bodemaanpassing vermenigvuldigd met 59 om de morfologische resultaten na een maand te kunnen berekenen.

De morfologische veranderingen na één morfologische tijdstap van een maand en de sedimentconcentratiepatronen tijdens maximale ebstroomsnelheid en maximale vloedstroomsnelheid berekend door het 3D model, worden vergeleken met de morfologische veranderingen en de sedimentconcentratiepatronen, zoals berekend in de studie ref. [3] met het quasi-3D model. Het is op dit moment niet mogelijk de resttransportpatronen, gesimuleerd door het 3D model, weer te geven, maar in de nabije toekomst zal dit zeker gerealiseerd moeten worden.

Ad 4, §2.2.1. In eerste instantie was het de bedoeling de *morfodynamische* ontwikkeling voor een periode van een maand te bepalen met het 3D sedimenttransportmodel en deze te

vergelijken met een maandmeting van de morfodynamische ontwikkeling op de Drempel van Hansweert. Echter, de verhouding tussen de rekestijd en de gesimuleerde tijd in de 3D berekeningen met het Westerschelde model is ca. 1:1. Dit betekent dat de morfodynamische simulatie van een maand op dit moment ook ongeveer een maand doorlooptijd in beslag neemt. Daarom is ervoor gekozen de 3D simulatie van het morfologisch getij ook te vergelijken met de metingen. Bij deze vergelijking is rekening gehouden met een morfologische factor van 1.46, hetgeen betekent dat een periode van een maand wordt gesimuleerd met een morfologische tijdstap van 30 dagen/1.46.

Ad 5, §2.2.1. Naar aanleiding van de resultaten en de conclusies worden voorstellen geformuleerd ten aanzien van het vervolgtraject. Het uiteindelijk doel van dit vervolgtraject is de ontwikkeling van een morfodynamisch model van de Westerschelde.

3 3D en quasi-3D secundaire stroming

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de secundaire stroming, afkomstig van drie informatiebronnen, onderzocht en met elkaar vergeleken. De informatiebronnen betreffen:

1. quasi-3D berekeningen met DELFT3D-MOR
2. ADCP metingen
3. 3D berekeningen met TRISCAL

Alvorens de berekeningen en metingen met elkaar te vergelijken worden eerst de formuleringen voor de intensiteit van de secundaire stroming in langsrichting (SSL) en in dwarsrichting (SSD) afgeleid. Voor de ADCP metingen en de 3D TRISCAL berekeningen is het bepalen van de intensiteit van de SSL en de SSD relatief eenvoudig omdat de secundaire stroming impliciet in het 3D stromingsveld aanwezig is. In de quasi-3D berekeningen wordt de intensiteit van de SSD bepaald m.b.v. een parametrisatie die in de standaard versie van DELFT3D-MOR is geïmplementeerd. De intensiteit van de SSL wordt in de huidige studie achteraf berekend m.b.v. het 2Dh stromingsveld en de intensiteit van de SSD. Hierbij wordt de formule toegepast die is afgeleid als onderdeel van de studie beschreven in rapport Z2649 (ref. [4]).

3.2 SSD in DELFT3D-MOR

3.2.1 Inleiding

De huidige versie van de quasi-3D module van DELFT3D-MOR bevat een formulering voor de parametrisatie van de SSD. De dwarsrichting is gedefinieerd als de richting loodrecht op de dieptegemiddelde stroming. De secundaire stromingsintensiteit die met de geparametriseerde formulering berekend wordt, is een maat voor de grootte van de stroming in dwarsrichting, loodrecht op de richting van het dieptegemiddelde profiel. Deze wordt in DELFT3D-MOR veroorzaakt door

- Coriolis versnelling
- bochteffect

De SSD door Coriolis ontstaat doordat een deeltje dat beweegt met snelheid u op het noordelijk halfrond een versnelling naar rechts ondervindt waarvan de grootte evenredig is met de snelheid. Omdat aan het oppervlak een deeltje een grotere snelheid ondergaat dan aan de bodem wordt hierdoor een spiraalstroming op gang gebracht. De richting van de spiraal is dus afhankelijk van de richting van de hoofdstroming.

De SSD door bochteffect wordt veroorzaakt doordat in een bocht door de centrifugale kracht een deeltje een versnelling ondervindt die gericht is naar de buitenbocht. De versnelling is evenredig met u^2 zodat deze aan het oppervlak groter is dan aan de bodem. Er ontstaat dan een waterstandsverhang waarbij het laagste punt zich aan de binnenbocht bevindt en het hoogste punt aan de buitenbocht. Door het drukverschil ontstaat hierdoor aan

de bodem een snelheid loodrecht op de dieptegemiddelde snelheid (de hoofdstroomrichting), en gericht naar de binnenbocht, waardoor een spiraalstroming op gang wordt gebracht. De richting van deze spiraalstroming is afhankelijk van de kromming van de bocht.

3.2.2 Afleiding SSD

De implementatie van de parametrisatie van de SSD in DELFT3D-MOR wordt uitgebreid beschreven in de Manual van DELFT3D-MOR (ref. [2]) en in hoofdstuk 5 van rapport Z2489 (ref. [3]). In de afleiding beschreven in hoofdstuk 5 van de studie ref. [3] is echter een fout gemaakt in de toepassing van de formulering voor secundaire stroming van (Kalkwijk en Booij, 1986). Hierdoor is de intensiteit van de secundaire stroming in dwarsrichting die is afgeleid uit de 3D TRISCAL resultaten en die is weergegeven in figuur 5.1 van genoemd rapport, een factor 2 te klein. In de huidige studie is daarom besloten de formules voor de intensiteit van de SSD opnieuw te presenteren en een nieuwe vergelijking te maken tussen de quasi-3D DELFT3D-MOR resultaten en de TRISCAL 3D resultaten.

De algemeen geldende definitie van secundaire stroming (zie De Vriend, 1977 en Wang, 1989) is gegeven door:

$$u_d\left(\frac{z}{h}\right) = I_d f_d\left(\frac{z}{h}\right) = \frac{u_s h}{R_s} \frac{3}{2\kappa^2} \left(\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{g}}{\kappa C}\right) f_d\left(\frac{z}{h}\right) \quad (3.1a)$$

met

$u_d(z/h)$ = secundaire stroming in dwarsrichting op hoogte z/h	[m/s]
u_s = dieptegemiddelde snelheid in hoofdstroomrichting	[m/s]
I_d = intensiteit secundaire stroming in dwarsrichting	[m/s]
R_s = kromtestraal	[m]
κ = Von Karman's constante (0.4)	[-]
C = Chezy coëfficiënt	[m ^{1/2} /s]
g = gravitatieversnelling	[m ² /s]
h = waterdiepte	[m]

De functie f_d beschrijft de vorm van het dwarsprofiel. Behalve dichtbij de bodem kan deze functie benaderd worden door een lineaire vergelijking, gegeven door:

$$f_d = 4\left(\frac{z}{h} - \frac{1}{2}\right) \quad (3.1b)$$

met

$$\int_0^1 |f_d(\zeta)| d\zeta = 4 \int_0^1 \left(\zeta - \frac{1}{2}\right) d\zeta = 1 \quad (3.1c)$$

Uit (3.1a) - (3.1c) volgt dat

$$\int_0^1 |u_d(\zeta)| d\zeta = \frac{u_s h}{R_s} \frac{3}{2\kappa^2} \left(\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{g}}{\kappa C}\right) \equiv I_d \quad (3.1d)$$

In DELFT3D-MOR wordt de volgende definitie gehanteerd:

$$I_{d, \text{Delft3D-Mor}} = \frac{\bar{u}}{R_s} h \quad (3.1e)$$

met

$\bar{u} = 2Dh$ dieptegemiddelde snelheid

Dus de verhouding tussen I_d en $I_{d, \text{DELFT3D-MOR}}$ ((3.1d)/(3.1e)) wordt gegeven door de factor

$$\frac{3}{2\kappa^2} \left(\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{g}}{\kappa C} \right)$$

Deze factor is een factor 2 kleiner dan de factor eerder genoemd in hoofdstuk 5 van rapport Z2489.

3.3 SSL in DELFT3D-MOR

3.3.1 Inleiding

Uit de resultaten beschreven in ref. [3] is gebleken dat er grote verschillen optreden tussen de quasi-3D sedimenttransportberekeningen nabij de drempel van Hansweert in de Westerschelde en tussen sedimenttransportmetingen en waargenomen bodemveranderingen. In de studie ref. [4] is daarom onderzocht in hoeverre de aanname dat het verticale snelheidsprofiel van de hoofdstroming logaritmisch is, een rol zou kunnen spelen bij het optreden van deze verschillen. Uit 3D simulaties en metingen is gebleken dat in de Westerschelde, en met name nabij de drempel van Hansweert, het snelheidsprofiel niet logaritmisch is. De aanname in het quasi-3D model dat het snelheidsprofiel in de hele Westerschelde gedurende iedere fase van het getij logaritmisch is, veroorzaakt daardoor direct een fout in het netto sedimenttransport. Verder veroorzaakt het ook een fout in de quasi-3D berekening van de SSD en daardoor wordt ook indirect de berekening van het netto sedimenttransport en de morfologische ontwikkeling beïnvloed.

In de huidige studie wordt de SSL gedefinieerd als afwijking van het snelheidsprofiel t.o.v. het logaritmisch profiel. Per definitie is de dieptegemiddelde waarde van de secundaire stroming in langsrichting nul. Met de aanname dat de Westerschelde een goed gemengd estuarium is, zijn de volgende processen en mechanismen geïdentificeerd als oorzaken van SSL:

- effecten van *horizontale* zoutgradiënt
- versnelling in de tijd, en
- versnelling in de ruimte

In de studie Z2649, ref. [4] is geconstateerd m.b.v. een orde-van-grootte analyse dat het effect van de horizontale zoutgradiënt op het verticale profiel erg klein is. Dit wordt in de huidige studie dan ook buiten beschouwing gelaten. Uit dezelfde studie is gebleken dat de SSL veroorzaakt door *versnelling in de tijd*

- van dezelfde orde van grootte is als de SSD veroorzaakt door Coriolis,
- zowel tijdens eb als tijdens vloed op dezelfde locaties positief of negatief kan zijn.

Bovendien is gebleken dat de SSL veroorzaakt door *versnelling in de ruimte*

- van dezelfde orde van grootte is als de SSD veroorzaakt door bochteffect,

- tijdens eb en vloed op dezelfde locaties tegengesteld van teken is.

Aangezien de SSD door bochteffect een factor 10 groter is dan de SSD door Coriolis kan met name de SSL door versnelling in ruimte een aanzienlijke invloed hebben op het sedimenttransport in het quasi-3D model.

In hoofdstuk 4 zal blijken dat op plaatsen in de Westerschelde waar verticale saliniteitsverschillen optreden, ook de *verticale* zoutgradient van invloed is op de intensiteit van zowel de SSL als de SSD.

3.3.2 Afleiding SSL

Uit een 3D snelheidsveld kan de secundaire stroming in langsricting bepaald worden door het logaritmisch profiel af te trekken van het 3D snelheidsprofiel:

$$u_l(z/h) = |u(z/h)| \cos(\beta) - u_s(1 + \alpha + \alpha \log(z/h)) \quad (3.2a)$$

waarbij

$$\begin{aligned} u_l(z/h) &= \text{secundaire stroming in langsricting op hoogte } z/h & [\text{m/s}] \\ |u(z/h)| &= \text{grootte van de snelheid op hoogte } z/h & [\text{m/s}] \\ \beta &= \text{hoek tussen de dieptegemiddelde stroming en de stroming op diepte } z/h & [\text{deg}] \\ \alpha &= \sqrt{g/\kappa C} & [-] \\ u_s &= \text{dieptegemiddelde snelheid in hoofdstroomricting} & [\text{m/s}] \end{aligned}$$

Definitie (3.2a) toont, dat als $u_l(1) > 0$ (SSL aan het oppervlak positief) er sprake is van een vertragend snelheidsprofiel. Is het negatief, dan is er sprake van een versnellend snelheidsprofiel. In het vervolg van deze studie bepaalt het teken van SSL aan het oppervlak het teken van de secundaire stromingsintensiteit in langsricting (I_l). Deze wordt als volgt berekend:

$$I_l = \frac{\int_0^1 |u_l(\zeta)| d\zeta}{\frac{3}{2\kappa^2} \left(\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{g}}{\kappa C} \right)} \quad (3.2b)$$

De factor in de noemer wordt veroorzaakt door de definitie van de intensiteit voor de secundaire stroming in DELFT3D-MOR, zoals uitgelegd in paragraaf 3.2.2. De factor geldt ook voor de intensiteit van de SSL, omdat deze, voor de quasi-3D resultaten, als volgt wordt afgeleid van de intensiteit van de SSD (zie ook hoofdstuk 3 (ref. [4])):

$$I_l = I_d \frac{I_{te} + I_{se}}{I_{be} + I_{ce}} \quad (3.3)$$

Hierin is

$$I_{te} = \frac{1}{f\bar{u}} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{\alpha}} I_{ce} \quad (3.4)$$

$$I_{se} = \frac{R_s}{2\bar{u}^2} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{s}} I_{be}$$

s plaatscoördinaat langs de stroomlijn [m]

f	Coriolisversnelling	[1/s]
	$f=2\omega\sin\varphi$,	
	φ = breedtegraad,	
	ω = rotatiesnelheid van de aarde ($7.27 \cdot 10^{-5}$ rad/s)	
I_{te}	(evenwicht) secundaire stroming in <i>langs</i> richting door versnelling in tijd [m/s]	
I_{se}	(evenwicht) secundaire stroming in <i>langs</i> richting door versnelling in plaats [m/s]	
I_l	intensiteit secundaire stroming in <i>langs</i> richting (SSL)	[m/s]
I_{be}	(evenwicht) secundaire stroming in <i>dwaars</i> richting door bochteffect	[m/s]
I_{ce}	(evenwicht) secundaire stroming in <i>dwaars</i> richting door Coriolis	[m/s]

De uitdrukking voor I_{te} in vergelijking (3.4) kan worden vereenvoudigd tot:

$$I_{te} = \frac{h}{2\bar{u}} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \quad (3.5)$$

met

$$h = \text{waterdiepte} \quad [\text{m}]$$

Hierin is gebruikt dat, in DELFT3D-MOR, I_{ce} is gedefinieerd als

$$I_{ce} = \frac{fh}{2} \quad (3.6)$$

Op dezelfde manier kan de uitdrukking voor I_{se} in vergelijking (3.4) worden vereenvoudigd tot:

$$I_{se} = \frac{h}{2\bar{u}} \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial s} = h \frac{\partial \bar{u}}{\partial s} \quad (3.7)$$

Hierin is gebruikt dat, in DELFT3D-MOR, I_{be} is gedefinieerd als

$$I_{be} = \frac{\bar{u}h}{R} \quad (3.8)$$

De grootte van I_{te} en I_{se} kunnen nu worden uitgerekend met behulp van vergelijkingen (3.5) en (3.7) en de dieptegemiddelde snelheidsvelden die het resultaat zijn van de quasi-3D berekeningen met het DELFT3D-MOR Westerschelde model.

Het teken van I_{te} in vergelijking (3.5) is tegengesteld aan de definitie (3.2a): (3.5) is positief als :

$$\frac{\partial \bar{u}_s}{\partial t} > 0,$$

d.w.z. bij versnelling. Vergelijking (3.2a) is echter positief bij vertraging. Vergelijking (3.5) moet dus met '-1' vermenigvuldigd worden om consistentie te verkrijgen met (3.2a). Hetzelfde geldt voor I_{se} : I_{se} is positief als

$$\frac{\partial \bar{u}_s}{\partial s} > 0,$$

dus bij versnelling in stroomrichting. Ook (3.7) moet daarom met '-1' vermenigvuldigd worden.

3.4 Vergelijking quasi-3D en 3D-TRISCAL

3.4.1 Inleiding

Door RIKZ zijn 3D-TRISCAL stromingsvelden toegeleverd van de maximale vloedstroomsnelheid en de maximale ebstroomsnelheid in de simulatieperiode van 17 en 18 april 1996. Uit deze stromingsvelden zijn de intensiteit van de SSD, en de intensiteit van de SSL bepaald. Voor het bepalen van de intensiteit van de SSD is de procedure toegepast als beschreven in paragraaf 3.2.2. Voor het bepalen van de intensiteit van de SSL zijn vergelijkingen (3.2a) en (3.2b) gebruikt.

Met het DELFT3D-MOR systeem is, voor dezelfde periode als waarvoor TRISCAL resultaten beschikbaar zijn, een quasi-3D simulatie uitgevoerd. Uit de berekende intensiteit voor SSD en de dieptegemiddelde snelheidsvelden tijdens maximale ebstroomsnelheid (17/4/96 17:30) en tijdens maximale vloedstroomsnelheid (18/4/96 02:00), zijn met vergelijkingen (3.5), (3.7) en (3.3) waarden voor I_{tes} , I_{ses} en I_l bepaald. In de volgende paragrafen wordt een vergelijking gemaakt tussen de verkregen quasi-3D resultaten en de TRISCAL-3D resultaten. Hierbij wordt onderzocht :

- wat de overeenkomsten en verschillen zijn de tussen de SSD berekend door quasi-3D model en 3D TRISCAL
- wat de overeenkomsten en verschillen zijn de tussen de SSL berekend door quasi-3D model en 3D TRISCAL
- wat de oorzaken kunnen zijn van de verschillen tussen quasi-3D en 3D TRISCAL

3.4.2 Beschrijving SSD quasi-3D versus TRISCAL3D

Figuren 3.1a en 3.1b tonen de intensiteit van de spiraalstroming in dwarsrichting zoals berekend door het quasi-3D model en zoals afgeleid uit de 3D-TRISCAL stromingsberekeningen, voor maximale eb- en maximale vloedstroomsnelheid. Het blijkt dat er behoorlijke verschillen zijn tussen de quasi-3D- en 3D resultaten.

Maximale ebsnelheid

In het quasi-3D model (fig. 3.1a, bovenste plaatje) zien we ten noorden van de Plaat van Ossenisse twee spiraalstromen naast elkaar ontstaan. De buitenste (oranje gekleurd) ontstaat door de bocht in de kustlijn bij Hansweert, en de richting is aan het wateroppervlak naar de Plaat van Ossenisse gericht. De binnenste (blauw gekleurd) ontstaat door de kromming in de Plaat van Ossenisse en is aan het oppervlak naar Hansweert gericht. In de buitenbocht bij het Middelgat ontwikkelt zich door de kromming van de geul en de richting van de ebstroming eveneens een linksdraaiende spiraalstroming. Het ontstaan van de buitenste (oranje) secundaire stromingen in het Middelgat zijn te wijten aan de lokale kustlijnkrommingen of aan de traplijn schematisaties in het rooster.

Vergelijken we de quasi-3D resultaten tijdens maximale ebstroming met de TRISCAL 3D-resultaten tijdens maximale ebstroming (figuur (3.1b)) dan zien we behoorlijke verschillen. In het TRISCAL 3D-model worden twee linksdraaiende spiralen gegenereerd in de Schaar van Waarde en de Schaar van Ossenisse. In de quasi-3D resultaten zijn deze niet of nauwelijks aanwezig. Ten noorden van de Plaat van Ossenisse is de spiraalstroming in het TRISCAL 3D model van dezelfde orde van grootte als in het quasi-3D model, terwijl ten

oosten en ten westen van de plaat van Ossenissee de spiraalstroming in het TRISCAL 3D model sterker is dan in het quasi-3D model. De intensiteit van de rechtsdraaiende spiraal in de buitenbocht bij het Middelgat is in het TRISCAL 3D model groter dan in het quasi-3D model, terwijl de effecten van de trapjes in het rooster in het TRISCAL 3D model ontbreken.

Maximale vloedsnellheid

In het quasi-3D model (fig. 3.1a, onderste plaatje) wordt tijdens maximale vloedstroming de secundaire stroming met name opgewekt ten noorden van de Plaat van Ossenissee. Hierbij is de intensiteit van de rechtsdraaiende spiraal nabij Hansweert in het quasi-3D model kleiner dan in het TRISCAL 3D model. In de geul ten westen van de Plaat van Ossenissee en in het Middelgat is in de quasi-3D resultaten een sterke linksdraaiende spiraal aanwezig. In de TRISCAL 3D-resultaten is deze nauwelijks aanwezig. In de TRISCAL resultaten zien we weer wel een sterke linksdraaiende spiraalstroming ten zuidoosten van de plaat van Ossenissee, die in de quasi-3D resultaten volledig ontbreekt.

3.4.3 Beschrijving SSL quasi-3D versus TRISCAL3D

Figuren 3.2a en 3.2b tonen de resultaten voor I_{te} , I_{se} gedurende maximale ebstroomsnelheid en maximale vloedstroomsnelheid. Figuur 3.2c laat I_l zien tijdens maximale ebstroomsnelheid en maximale vloedstroomsnelheid. Figuur 3.2d laat de intensiteit van SSL zien zoals impliciet berekend door het TRISCAL 3D model.

Maximale ebsnellheid

Figuur 3.2a, het bovenste plaatje, toont dat in de bewerking van de 2D eb-resultaten er geringe versnelling optreedt op de drempel van Hansweert en dat deze versnelling het sterkst is vlak voor de bodemhelling in de richting van het diepe Middelgat. Waar het water het Middelgat instroomt treedt vertraging op. In het diepste deel van het Middelgat is de stroming weer min of meer logaritmisch, en dit gaat over in vertraging. De vertraging wordt minder op de bodemhelling naar de ondiepere geulen. De intensiteit is het hoogste op plaatsen met een zeer steile bodemgradient.

Het onderste plaatje in dezelfde figuur toont de intensiteit van de SSL door versnelling in de tijd. In de richting van de ebstroming zien we dat in de geulen met name sprake is van versnelling. Er treden geen grote pieken op zoals bij de secundaire stroming door versnelling in plaats.

Figuur 3.2c, het bovenste plaatje, bevat de quasi-3D SSL tijdens maximale ebstroomsnelheid. Deze kan direct worden vergeleken met het bovenste plaatje in figuur 3.2d die dezelfde resultaten, verkregen met het 3D TRISCAL model, bevat. De SSL van beide berekeningen bevat aanzienlijke verschillen. De TRISCAL berekening toont een versnelling in de binnenbocht langs de plaat van Ossenissee die in de DELFT3D-MOR bewerking slechts wat vlekkelig en met een lagere intensiteit voorkomt. Dit vlekkelige patroon wordt veroorzaakt door de sommatie van I_{te} , en I_{se} , zoals aangegeven in vergelijking (3.3). Verder heeft de DELFT3D-MOR bewerking een versnelling op de drempel van Hansweert, terwijl TRISCAL 3D juist meer een vertragend profiel laat zien. In het diepe deel van het Zuidergat hebben beide een vertragend profiel. In de buitenbocht vanuit het Zuidergat in de richting van het Middelgat geven beide een vertragend profiel te zien, maar

dit vertragend profiel loopt in de TRISCAL berekeningen veel verder door en heeft een hogere intensiteit. In het Middelgat laten beide versnellende profielen zien van eenzelfde intensiteit.

Maximale vloodsnelheid

In figuur 3.2b zijn dezelfde resultaten als in fig. 3.2a weergegeven, maar dan voor maximale vloedstroming. Het bovenste plaatje is min of meer tegengesteld aan hetzelfde plaatje in figuur 3.2a. Waar tijdens eb water een plaat op stroomt, stroomt tijdens vloed water de plaat weer af. De bathymetrie heeft dus op eenzelfde locatie tijdens vloed een omgekeerd effect op de vorm van het snelheidsprofiel als tijdens eb.

Het onderste plaatje in dezelfde figuur toont de intensiteit van de SSL door versnelling in de tijd, tijdens maximale vloedstroomsnelheid. Deze heeft eenzelfde patroon als het onderste plaatje in figuur 3.2a, hoewel de intensiteit in het geheel (zowel op plaatsen van versnelling als op plaatsen van vertraging) bij maximale vloedstroming iets sterker is dan bij maximale ebstroming.

Figuur 3.2c, het onderste plaatje, bevat de quasi-3D SSL tijdens maximale vloedstroomsnelheid. Deze kan direct worden vergeleken met het onderste plaatje in figuur 3.2d die dezelfde resultaten, verkregen met het 3D TRISCAL model, bevat. De verschillen tussen de onderste plaatjes van beide figuren zijn kleiner dan bij de eb-resultaten. Beide laten in het Zuidergat een versnelling in de richting van de Drempel van Hansweert zien, van eenzelfde intensiteit. Op de drempel treedt bij beide vertraging op, maar in de 3D TRISCAL berekening is de intensiteit wat groter dan in de DELFT3D resultaten. Verder zien we ten zuidwesten van de plaat van Ossenissee in de DELFT3D-MOR resultaten een iets vertragend profiel, terwijl in de 3D TRISCAL hier behoorlijke versnelling optreedt. Het vlekkerige patroon in de quasi-3D resultaten is weer ontstaan door de sommatie van I_{se} en I_{te} .

3.4.4 Discussie

In de studie ref. [3] zijn de verschillen tussen het ruimtelijk patroon van de quasi-3D en TRISCAL 3D resultaten van de intensiteit van de SSD reeds geconstateerd. In deze studie is toen gesuggereerd dat het niet-logaritmisch zijn van de snelheidsprofielen in de TRISCAL 3D berekeningen met name de oorzaak is van de waargenomen verschillen. Deze niet-logaritmische profielen zouden (in een goed gemengd systeem) ontstaan kunnen zijn door

- de horizontale (zout) concentratiegradient, (welke niet in de quasi-3D simulatie is meegenomen).
- versnelling in de tijd, en
- versnelling in de ruimte

In de studie ref. [4] is met een orde-van-grootte analyse aangetoond dat de horizontale zoutgradient de vervorming van het snelheidsprofiel niet kan verklaren. De effecten van de versnelling in tijd (ofwel van I_{te}) en van versnelling in de ruimte (ofwel van I_{se}) op de intensiteit van de SSD komen in paragraaf 3.6 aan de orde. Uit deze paragraaf zal blijken dat ook de interactie tussen de SSL en de SSD niet de verschillen kan verklaren tussen de SSD berekend door 3D TRISCAL en door het quasi 3D model. Uit hoofdstuk 4 zal blijken dat de verklaring gezocht moet worden in het feit dat op een aantal locaties in het 3D model dichtheidsverschillen optreden die ervoor zorgen dat de verticale snelheidsprofielen niet

logaritmisch zijn. Dit is een typisch 3D resultaat dat uiteraard nooit met een quasi-3D simulatie verkregen kan worden. Een belangrijk deel van de verschillen tussen de intensiteit van de SSL berekend door het quasi-3D model en berekend door 3D TRISCAL kan ook door het optreden van dichtheidsverschillen in de verticaal verklaard worden, zie hoofdstuk 4.

3.5 vergelijking (quasi) 3D en metingen

3.5.1 Analyse ADCP metingen

Inleiding

Op 17 april 1996 zijn in een aantal raaien op de drempel van Hansweert stroommetingen uitgevoerd met behulp van een Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP). De metingen zijn verwerkt door V.O.F. Aqua Vision. Een kwalitatieve analyse van de meetresultaten is beschreven in rapport ref. [9]. Volgens ref. [9] zijn de ADCP metingen in het algemeen goed bruikbaar. Alleen aan het wateroppervlak, aan de bodem en in ondiepe gebieden zijn de metingen onnauwkeurig. Door filtering en extrapolatie zijn de stroomsnelheden aan het oppervlak en aan de bodem gecorrigeerd (zie ref. [9]). De systematische fout van de metingen is 0.005- 0.01 m/s (RD-instruments, 1989). Bij lage stroomsnelheden kan de fout oplopen tot 27% (ref. [9]).

In ref. [9] is een vergelijking gemaakt tussen de ADCP metingen en 3D TRISCAL berekeningen. In deze paragraaf zal een vergelijking gemaakt worden tussen de intensiteit van de SSD en SSL impliciet gemeten door de ADCP en de intensiteit van de SSD en SSL bepaald uit de quasi-3D berekeningen.

De gebruikte metingen betreffen snelheidsprofielen in 2 raaien (B en C) nabij de drempel van Hansweert, tijdens maximale ebstroomsnelheid en maximale vloedstroomsnelheid. In tabel 3.1 staan de datasets vermeld die in deze studie zijn gebruikt:

	metin g	tijdstip meting	waterstand (m)
max. Vloed raai B	27	13:45-13.55	2.52
max. Vloed raai C	26	13.23-13.38	2.10
max. eb raai B	39	17.56-18.05	0.22
max. eb raai C	40	18.14-18.27	-0.17

Tabel 3.1 overzicht ADCP metingen

Uit de gemeten snelheden is een dieptegemiddelde waarde bepaald en deze is, voor de maximale ebstroomsnelheid van ca. 17/4/96 18:00 en de maximale vloedstroomsnelheid van ca. 17/4/96 14:00, weergegeven in figuren 3.3a en 3.3b. In dezelfde figuur is eveneens de gemeten snelheid aan het oppervlak weergegeven. De bovenste raai is raai B, de onderste is raai C.

De ADCP snelheden in raai B laten zien dat, tijdens maximale vloedstroomsnelheid (fig. 3.3a), zich in de buitenbocht een spiraalstroming naar rechts ontwikkelt, en in de binnenbocht een spiraalstroming naar links. In raai C is dit juist andersom: in de buitenbocht is een spiraalstroming naar links en in de binnenbocht een spiraalstroming naar rechts. Tijdens maximale ebstroomsnelheid (figuur 3.3b) overheersen in raaien B en C de spiraalstroming naar rechts, maar in raai B zien we in de binnenbocht ook een spiraalstroming naar links ontstaan. Overigens betekent een spiraalstroming naar rechts dat aan de bodem sedimenttransport naar links ontstaat en een spiraalstroming naar links impliceert bodemtransport naar rechts.

Verticale snelheidsprofielen in langsrichting

In figuren 3.4b en 3.4c zijn de verticale snelheidsprofielen gemeten door de ADCP tijdens maximale ebstroomsnelheid voor enkele punten langs de raaien B en C weergegeven. In figuur 3.4a zijn de locaties van deze punten als functie van de afstand van de raai af te lezen. De bovenste raai is raai B, de onderste is raai C. Figuur 3.4d laat enkele gemeten profielen in raai B tijdens maximale vloedstroomsnelheid zien.

De in fig. 3.4b en 3.4c getoonde ADCP profielen zijn 'vertraagde' profielen, in vergelijking met de logaritmische snelheidsprofielen die ook in de figuren zijn weergegeven. De gemeten profielen vertonen een merkwaardig onregelmatig verloop in de verticaal. Het is niet duidelijk waardoor dit wordt veroorzaakt. De bovenste drie meetpunten aan het oppervlak representeren geen betrouwbare waarde. Zij zijn verkregen door de metingen, gedaan op 2 m onder het wateroppervlak, te kopiëren naar erboven gelegen locaties.

Tijdens maximale vloedstroomsnelheid zijn de getoonde profielen in raai B op de meeste locaties 'versneld' t.o.v. de logaritmische profielen. De gemeten profielen lijken tijdens maximale vloedstroomsnelheid een iets gladder verloop te hebben dan tijdens maximale ebstroomsnelheid. Ook hier geldt echter dat de bovenste drie punten geen betrouwbare waarde representeren.

Verticale snelheidsprofielen in dwarsrichting

In figuren 3.4e-3.4g worden in dezelfde locaties in raaien B en C de gemeten verticale profielen in dwarsrichting, loodrecht op de dieptegemiddelde hoofdstroomrichting, gepresenteerd. Een aantal van deze profielen laat ook een onregelmatig verloop in de verticaal zien, die soms dezelfde orde van grootte hebben als de snelheid in dwarsrichting.

Discussie

Het is duidelijk dat de grootte van de secundaire stromingsintensiteit afgeleid van de ADCP metingen sterk wordt beïnvloed door de onregelmatige vorm van de verticale profielen. Daarnaast kunnen de oppervlakte- en bodemmetingen een onnauwkeurig effect hebben bij het bepalen van de intensiteit. Aangezien het teken van de SSL wordt bepaald door vergelijking (3.2a) is het duidelijk dat onnauwkeurigheden in de oppervlaktesnelheden zelfs een verkeerd teken voor de intensiteit van de SSL tot gevolg kunnen hebben.

3.5.2 Vergelijking secundaire stromingsintensiteit quasi-3D, TRISCAL en ADCP

Inleiding

Om de ADCP metingen te kunnen vergelijken met de intensiteit voor de SSD en de SSL berekend m.b.v. de quasi-3D simulatie van DELFT3D-MOR, zijn de gemeten ADCP snelheden m.b.v. vergelijkingen (3.2a) en (3.2b) vertaald naar een door de ADCP 'gemeten' intensiteit van SSL. In eerste instantie zijn voor het bepalen van de intensiteit alle ADCP metingen meegenomen, dus ook de 'onbetrouwbare' waarden aan het oppervlak en dichtbij de bodem. Vervolgens is voor een tweede maal de intensiteit bepaald, maar nu zonder meenemen van de bovenste vier en de onderste vier punten in de verticaal.

Figuren 3.5a en 3.5b laten de intensiteit van de SSD en de SSL als functie van de afstand langs de raaien B en C zien. In deze figuren zijn de resultaten van de ADCP metingen tijdens maximale ebstroomsnelheid weergegeven, samen met o.a. de quasi-3D berekeningen en de 3D-TRISCAL resultaten. Figuren 3.6a en 3.6b tonen dezelfde intensiteit voor de quasi-3D en de 3D TRISCAL resultaten, maar bij het bepalen van de intensiteit voor de ADCP metingen zijn de bovenste vier en de onderste vier metingen weggelaten. Consequentie hiervan is dat de secundaire stromingsintensiteit in deze figuren door een tekort aan meetpunten niet betrouwbaar is op dieptes kleiner dan ca. 6 m.

Maximale ebstroomsnelheid

In raaien B en C vertonen de 3D-TRISCAL resultaten en de quasi-3D resultaten voor de SSD een grote overeenkomst (zie figuren 3.5a en 3.6a), maar de secundaire stromingsintensiteit afgeleid van de ADCP metingen is behoorlijk anders dan de modelresultaten. Met name in figuur 3.5a is de intensiteit van de ADCP metingen veel groter dan de intensiteit van de 3D-TRISCAL en quasi-3D modelresultaten, en de richting van de secundaire stroming is in de ADCP metingen soms omgekeerd aan de richting in de modellen. In figuur 3.6a zijn de verschillen tussen de ADCP metingen en de modelresultaten kleiner, wat erop duidt dat de grootte en de richting van de secundaire stromingsintensiteit die is afgeleid van de ADCP metingen, in ieder geval erg gevoelig is voor het wel of niet meenemen van de metingen aan het oppervlak en aan de bodem.

Hetzelfde geldt voor de intensiteit voor de SSL (figuren 3.5b en 3.6b). De SSL van 3D-TRISCAL en de quasi-3D berekeningen vertonen in raai B en in raai C behoorlijke overeenkomsten. De SSL van de ADCP berekeningen zijn zowel wat grootte als richting van de intensiteit betreft behoorlijk anders dan de modelresultaten. Ook de verschillen onderling tussen de SSL bepaald uit de ADCP metingen met en zonder meenemen van de oppervlakte en bodemmetingen, zijn aanzienlijk.

Maximale vloedstroomsnelheid

In tegenstelling tot de resultaten bij maximale ebstroomsnelheid zijn in raaien B en C de overeenkomsten tussen de 3D-TRISCAL resultaten en de quasi-3D resultaten gering (zie figuren 3.7a en 3.8a). De secundaire stromingsintensiteit afgeleid van de ADCP metingen

vertoont in raai B juist wel weer overeenkomsten met de 3D-TRISCAL resultaten. Voor raai C geldt dit niet. Uit figuren 3.7a en 3.8a blijkt dat de intensiteit van de SSD van de ADCP metingen tijdens maximale vloedstroomsnelheid veel minder gevoelig is voor de oppervlakte- en bodemmetingen van de ADCP dan tijdens maximale ebstroomsnelheid. Kijken we naar de secundaire stroming in langsrichting (figuren 3.7b en 3.8b) dan zien we dat de richting van de SSL in de quasi-3D berekeningen overeenkomt met de richting van de SSL in de 3D-TRISCAL berekeningen, maar dat de grootte van de intensiteit in de quasi-3D berekeningen i.h.a. wat lager is dan bij de 3D-TRISCAL resultaten. Alleen in raai B, tussen 700 en 1300 m is de quasi-3D intensiteit groter dan de 3D-TRISCAL intensiteit. De intensiteit afgeleid uit de ADCP metingen is weer heel anders dan de modelresultaten en met name in raai C blijkt de intensiteit van de SSL weer erg gevoelig voor het wel of niet meenemen van de oppervlakte- en bodemmetingen in de afleiding.

3.6 Effect SSL op Secundaire stroming in dwarsrichting (SSD)

3.6.1 Invloed SSL op SSD

De stromingscomponenten in langs- en dwarsrichting beïnvloeden elkaar. In het huidige quasi-3D model wordt de stroming in langsrichting beschouwd als de hoofdstroming en de stroming in dwarsrichting als de secundaire stroming. De hoofdstroming vormt de aandrijving voor de secundaire stroming, door de afwijking van het snelheidsprofiel t.o.v. het uniforme profiel. De secundaire stroming heeft ook invloed op de hoofdstroming door transport van impuls van bijvoorbeeld de binnenbocht naar de buitenbocht.

Als het snelheidsprofiel niet logaritmisch is, heeft de afwijking van het profiel t.o.v. het logaritmische profiel ook invloed op de aandrijving van de secundaire stroming in dwarsrichting. Samenvattend kunnen we dus zeggen dat de SSL de SSD beïnvloedt, maar dat de SSD ook de SSL beïnvloedt.

In rapport ref. [4], wordt voorgesteld de invloed van SSL op de quasi-3D berekende SSD mee te nemen door de uitgerekende intensiteit van de SSD te corrigeren met de volgende factoren:

$$f_c = \frac{\overline{\alpha u} + \beta I_l}{\overline{\alpha u}} \quad (3.9)$$

$$f_s = \frac{(\overline{\alpha u})^2 + \text{sign}(I_l)(\beta I_l)^2}{(\overline{\alpha u})^2}$$

met deze factoren kan dan de intensiteit van de SSD, I_d , als volgt opnieuw berekend worden:

$$I_{dn} = f_s I_b + f_c I_c \quad (3.10)$$

waarbij

$$I_{dn} = \text{gecorrigeerde SSD} \quad [\text{m/s}]$$

I_b = secundaire stroming in dwarsrichting door bochteffect	[m/s]
I_c = secundaire stroming in dwarsrichting door Coriolis	[m/s]
β = calibratie parameter	[-]
$\alpha = \sqrt{g/\kappa C}$	[-]

3.6.2 Analyse invloed quasi-3D SSL op quasi-3D SSD

In figuren 3.9a en 3.9b wordt de intensiteit van SSD gepresenteerd die is berekend met de quasi 3D benadering van DELFT3D-MOR (bovenste plaatjes) en nadat het effect van de SSL op de SSD is meegenomen (onderste plaatjes). Dus na toepassing van vergelijkingen (3.9) en (3.10). In deze berekening is β gelijk aan 1 gekozen. Aangezien de dieptegemiddelde snelheid van de orde 1-2 m/s is, $\alpha \approx 0.1$, en I_l van de orde 0.01-0.02 m/s, betekent $\beta = 1$ dat de invloed van I_l op de intensiteit van SSD door Coriolis tien keer zo klein is als de invloed van de snelheid en dat de invloed van I_l op de intensiteit van SSD door bochteffect honderd keer zo klein is als de invloed van de snelheid. Het is duidelijk dat het effect van deze correctie op de oorspronkelijke SSD heel klein is, hetgeen ook te zien is aan de resultaten gepresenteerd in figuren 3.9a en 3.9b. Bij toepassing van $\beta = 10$ wordt de invloed van I_l op de aandrijving van de SSD vergelijkbaar aan de invloed van de snelheid op de aandrijving van de SSL. De resultaten voor $\beta = 10$ zijn, alleen voor vloed, gepresenteerd in figuur 3.10. In het bovenste plaatje is de oorspronkelijk berekende intensiteit voor de SSD weergegeven en in de onderste is de gecorrigeerde intensiteit voor de SSD weergegeven. De figuur toont dat de correctie geen verbetering is t.o.v. de overeenkomst tussen de oorspronkelijke resultaten en de 3D TRISCAL resultaten.

3.7 Conclusies quasi-3D simulaties

Uit de TRISCAL 3D en de quasi-3D berekende SSL blijkt dat, met name op locaties met zeer steile bodemgradienten, het snelheidsprofiel aanzienlijk afwijkt van het logaritmisch profiel. Dit betekent dat de SSL een rol speelt bij sedimenttransport en morfologische ontwikkeling van de bodem en niet verwaarloosd mag worden in een sedimenttransportmodel waar steile bodemgradienten optreden.

De intensiteit van de SSD berekend door het quasi-3D model en afgeleid uit de 3D TRISCAL resultaten komen tijdens maximale vloedstroomsnelheid en tijdens maximale ebstroomsnelheid redelijk overeen. Opvallend is dat de secundaire stroming in 3D TRISCAL op de rechte stukken voor en na een bocht nog merkbaar is, terwijl deze in de quasi-3D berekening al gauw is verdwenen. Verder treedt er in de Schaar van Ossensisse en de Schaar van Waarde in 3D TRISCAL secundaire stroming op die in de quasi-3D berekening ontbreekt.

De intensiteit van de SSL berekend door het quasi-3D model en afgeleid uit de 3D TRISCAL resultaten tijdens maximale vloedstroomsnelheid en tijdens maximale ebstroomsnelheid vertonen behoorlijke verschillen. Met name tijdens maximale ebstroomsnelheid is de 3D TRISCAL intensiteit voor SSL een factor 4 of meer groter dan in de quasi-3D berekening. Bovendien komt secundaire stroming in langsrichting in de TRISCAL resultaten voor op plaatsen waar in het quasi-3D model de SSL een intensiteit 0 heeft. Tijdens maximale vloedstroomsnelheid is het intensiteitspatroon op de overgang van het Zuidergat naar de Drempel van Hansweert in beide berekeningen hetzelfde. Het 3D

TRISCAL model berekent echter in veel meer locaties een secundaire stromingsintensiteit in langsrichting dan de quasi-3D berekening.

Bij het corrigeren van de quasi-3D berekende SSD, met gebruikmaking van de quasi-3D berekende intensiteit van de SSL, treden er slechts geringe verschillen op als voor de parameter β de waarde '1' wordt gekozen. Toepassen van een grotere waarde voor de parameter geeft geen verbetering van de resultaten voor de SSD in vergelijking met de ADCP metingen en de 3D TRISCAL resultaten. De methode verklaart dus niet de verschillen die optreden tussen de SSD berekend door 3D TRISCAL en de SSD uit het quasi-3D model. Naar verwachting speelt de invloed van de SSL op de SSD ook een kleine rol bij het sedimenttransport.

Op basis van bovenstaande conclusies kunnen we constateren dat de beste verificatie van de hier onderzochte quasi-3D benadering waarschijnlijk wordt verkregen door de intensiteit voor de SSD en die voor de SSL te vergelijken met de intensiteit van de SSD en de SSL verkregen met 3D simulaties met DELFT3D-MOR (zonder zout mee te nemen). Aangezien de enige verschillen tussen het quasi-3D model en het DELFT3D-MOR model het gebruikte aantal lagen is, zijn berekende verschillen tussen de SSD's en SSL's direct terug te voeren op de parametrisatie in de quasi-3D benadering. Deze vergelijking komt in hoofdstuk 4 ter sprake.

De vorm van de gemeten ADCP profielen vertonen veel slingeren in de verticaal die waarschijnlijk te wijten zijn aan onnauwkeurigheden in de metingen.

Vanwege de onregelmatige vorm van de gemeten verticale profielen t.o.v. de berekende 3D profielen en de onnauwkeurige metingen aan oppervlak en bodem, zijn de secundaire stromingsintensiteit afgeleid van de ADCP metingen moeilijk te vergelijken met de quasi-3D resultaten. Er zijn grote verschillen tussen de intensiteit bepaald uit de ADCP metingen en de quasi-3D intensiteit. Deze verschillen zijn van dezelfde orde van grootte als de verschillen tussen de ADCP metingen en de TRISCAL 3D resultaten. De conclusie is dat voor het valideren van de modelresultaten een uitgebreidere set data nodig is, met name op plaatsen met een dominante secundaire stroming.

4 3D stroming en sedimenttransport

4.1 Hydrodynamica

4.1.1 Inleiding

In deze paragraaf wordt een vergelijking gemaakt tussen 3D berekeningen met DELFT3D-MOR en met 3D-TRISCAL. Hierbij wordt zowel met, als zonder zouttransport gerekend om te zien of er verticale dichtheidsverschillen optreden en om te onderzoeken wat eventueel het effect hiervan is op de secundaire stromingsintensiteit. Onderstaande tabel geeft een overzicht van de uitgevoerde hydrodynamische- en sedimenttransport simulaties.

Run Identificatie	zout: ja/nee	Omschrijving	aantal lagen
r11	nee	quasi-3D, sediment	-
r12	ja	quasi-3D, sediment	-
n11	nee	3D flow simulatie	7 equidistant
n12	ja	3D flow simulatie	7 equidistant
r10	nee	3D sedimenttransport	5 niet-equidistant
s10	ja	3D sedimenttransport	5 niet-equidistant
n10	ja	3D sedimenttransport	10 niet-equidistant

Tabel 4.1 overzicht 3D en quasi-3D simulaties

Simulatie r12 is gebruikt om te zien of de horizontale zoutgradiënt een verwaarloosbaar effect heeft op de secundaire stromingsintensiteit, zoals verondersteld in hoofdstuk 3. Dit blijkt inderdaad zo te zijn. De resultaten van r12 zijn niet gepresenteerd.

4.1.2 Vergelijking 3D en quasi 3D hydrodynamica, exclusief zout

Om de oorzaak van de in hoofdstuk 3 geconstateerde verschillen tussen het quasi-3D model en het TRISCAL 3D model verder te onderzoeken, wordt de quasi-3D berekening gevalideerd met een 3D berekening met DELFT3D-MOR. Dit wordt gedaan zonder in de 3D som het effect van dichtheidsstroming op de waterbeweging mee te nemen. Hierdoor is het enige verschil tussen beide modellen het aantal toegepaste lagen in de verticaal en betekent het vergelijken van de resultaten voor secundaire stroming dus een rechtstreekse verificatie van de parametrisaties voor de secundaire stromingsintensiteit die in het quasi-3D model zijn geïmplementeerd.

De 3D simulatie heeft run-identificatie n11, en wordt vergeleken met quasi-3D simulatie r11, die als onderdeel van de studie ref.[3] is gedraaid. Figuur 4.2a bevat de intensiteit van de SSD voor maximale ebstroomsnelheid (bovenste plaatje) en maximale vloedstroomsnelheid (onderste plaatje), zoals afgeleid uit de resultaten van de Delft3D simulatie n11. Deze figuur kan direct worden vergeleken met figuren 3.1a en 3.1b die de

resultaten weergeven van respectievelijk de quasi-3D simulatie en de 3D-TRISCAL simulatie.

De belangrijkste overeenkomst tussen de 3D berekening en de quasi-3D berekening (figuren 4.2a en 3.1a) is dat de intensiteit van de SSD die in beide simulaties wordt berekend in de grote bochten in het systeem globaal dezelfde ordegrootte en ruimtelijke verdeling heeft. In figuren 3.5a en 3.7a is voor raaien B en C (zie fig. 3.4a) de intensiteit van de SSD van de 3D berekening samen met de quasi-3D berekening ook te zien, als functie van de afstand langs de raaien. Tijdens de maximale ebstroomsnelheid komen beide goed overeen, maar tijdens maximale vloedstroomsnelheid is de intensiteit van de quasi-3D berekening i.h.a. groter.

Het belangrijkste verschil tussen de 3D berekening en de quasi-3D berekening wordt gekenmerkt door:

- het in de 3D berekening ontbreken van een grote linksdraaiende spiraalstroming tijdens maximale ebstroomsnelheid in het Zuidergat ten noorden van de plaat van Ossensisse,
- het in de 3D berekening ontbreken van een grote rechtsdraaiende spiraalstroming tijdens maximale vloedstroomsnelheid in het Zuidergat ten noorden van de plaat van Ossensisse,
- het in de 3D berekening ontbreken van een grote rechtsdraaiende spiraalstroming tijdens maximale ebstroomsnelheid ten noorden van de Molenplaat,
- het in de 3D berekening ontbreken van een grote linksdraaiende spiraalstroming tijdens maximale vloedstroomsnelheid te noorden van de Molenplaat,
- het in de 3D berekening ontbreken van een grote linksdraaiende spiraalstroming tijdens maximale vloedstroomsnelheid langs de oostkust van de geul onder de Overloop van Hansweert.

Een vergelijking tussen de resultaten voor de intensiteit van de SSL berekend door het quasi-3D model en het Delft3D model (figuur 4.2b en figuur 3.2c) laat zien dat nabij de Drempel van Hansweert en het Zuidergat op dezelfde locaties versnelling of vertraging optreedt. Dit duidt erop dat de gebruikte quasi-3D afleiding voor de intensiteit van de SSL een goede benadering is en tot een verbetering van het quasi-3D model kan leiden. Maar omdat de quasi-3D intensiteit voor de SSL is afgeleid van de quasi-3D intensiteit van de SSD is het onontkoombaar dat eerder bij de SSD geconstateerde verschillen tussen beide modellen ook leidt tot verschillen tussen de SSL. Een verbetering van de quasi-3D implementatie van de SSD zal ook onmiddellijk leiden tot een verbetering van de quasi-3D implementatie van de SSL.

4.1.3 Vergelijking Delft3D hydrodynamica exclusief zout en 3D TRISCAL inclusief zout

Vergelijken we de TRISCAL 3D resultaten met de Delft3D-MOR resultaten (fig. 4.2a en fig. 3.1b) dan is het opvallend dat er tussen de DELFT3D-MOR berekening en de TRISCAL 3D berekening grote verschillen bestaan die ook al waren geconstateerd bij het vergelijken van het quasi-3D model en het TRISCAL 3D model. Deze betreffen:

- het in de Delft3D berekening ontbreken van een grote linksdraaiende spiraalstroming nabij de Drempel van Hansweert tijdens maximale ebstroomsnelheid,
- het in de Delft3D berekening ontbreken van een grote linksdraaiende spiraalstroming in de bocht ten zuidoosten van de Plaat van Ossensisse,

- in de TRISCAL 3D berekening lopen de spiraalstromingen tijdens maximale ebstroomsnelheid verder door op de rechte stukken van de geulen
- het in de Delft3D berekening ontbreken van een grote rechtsdraaiende spiraalstroming ten noorden van de Plaat van Ossensisse nabij het Zuidergat maximale vloedstroomsnelheid,
- het in de Delft3D berekening ontbreken van een grote linksdraaiende spiraalstroming in de bocht ten zuidoosten van de Plaat van Ossensisse.

Aangezien het grootste verschil tussen de Delft3D berekening en de TRISCAL 3D berekening het respectievelijk niet, en wel, meenemen van dichtheidsstroming is, moeten de geconstateerde verschillen tussen de resultaten van beide modellen hierin gezocht worden. Dit zal in paragraaf 4.1.4. onderzocht worden.

Wanneer we de resultaten voor de intensiteit van de SSL berekend door het Delft3D model en het 3D TRISCAL model onderling vergelijken (figuur 4.2b en figuur 3.2d) dan zien we weer enorme verschillen die alleen verklaarbaar kunnen zijn door de verschillen in dichtheidsstroming in beide modellen.

4.1.4 Vergelijking Delft3D hydrodynamica inclusief zout en 3D TRISCAL inclusief zout

Het 3D TRISCAL model bevat zeven equidistante lagen in de verticaal. In de TRISCAL simulaties is steeds het effect van zout (dichtheidsstroming) op de waterbeweging meegenomen. Om modelmatige verschillen tussen DELFT3D en 3D-TRISCAL uit te sluiten wordt dezelfde simulatie met DELFT3D gedaan. De DELFT3D simulatie inclusief zout heeft run-identificatie n12.

Figuur 4.3a bevat de intensiteit van de SSD voor maximale ebstroomsnelheid (bovenste plaatje) en maximale vloedstroomsnelheid (onderste plaatje), zoals afgeleid uit de resultaten van de Delft3D simulatie n12. Figuur 4.3b bevat de intensiteit van de SSL. Deze figuren kunnen direct worden vergeleken met respectievelijk figuren 3.1b en 3.2d die de resultaten voor TRISCAL 3D bevatten.

De resultaten van beide modellen vertonen enorme overeenkomsten. De kleine verschillen die nu nog optreden kunnen te wijten zijn aan verschillen in de invoerfile (gebruikte turbulentieformulering, waarde van de saliniteit en temperatuur die zijn toegepast in de toestandsvergelijking, etc.) en in de gebruikte software (Delft3D versus TRIWAQ van RIKZ). Deze zijn hier niet verder onderzocht.

In fig. 4.4 is een verschil plaatje (bovenste grafiek) van het gesimuleerde zoutgehalte in de oppervlaktelaag en in de bodemlaag tijdens maximale ebstroomsnelheid getoond. De onderste twee grafieken laten de verticale zoutverdeling in twee raaien zien. Te zien is dat er een verticale zoutgradient optreedt juist op die plaatsen waar de verschillen tussen de TRISCAL 3D (met zout) en Delft3D simulaties (zonder zout) zich bevinden. In figuur 4.5 is in de bovenste grafiek de verhouding tussen de intensiteit van de SSD berekend door n12 (met zout) en die berekend door n11 (zonder zout) weergegeven voor maximale ebstroomsnelheid. In het onderste plaatje is dezelfde verhouding voor de intensiteit van de SSL getoond. Figuren 4.4 en 4.5 laten nu zien dat de geconstateerde verschillen tussen de

secundaire stromingsintensiteit bijzonder goed correleren met de gebieden waar een verticale zoutgradient optreedt.

4.2 Sedimenttransport berekeningen

4.2.1 Inleiding

In de vorige paragraaf is gekeken naar de verschillen en overeenkomsten tussen het 3D stromingspatroon met en zonder zout. In deze paragraaf zal worden gekeken naar het 3D sedimenttransport.

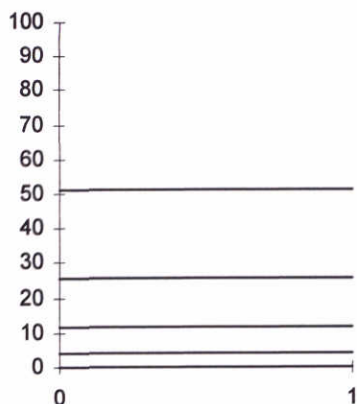
In de studie ref.[3] zijn met het quasi-3D model diverse sedimenttransportberekeningen uitgevoerd. De resultaten van één van deze quasi-3D simulaties, met run-identificatie r11, wordt vergeleken met twee nieuwe 3D sedimenttransportsimulaties waarvan één zonder zout (r10) en één met zout (s10). De simulatie *zonder* zout heeft als doel de quasi-3D sedimenttransport berekening te valideren. De simulatie *met* zout is uitgevoerd om

- het effect van verticale saliniteitsverschillen op sedimenttransport te kwantificeren
- de berekende bodemverandering te vergelijken met de gemeten bodemverandering bij de Drempel van Hansweert

Simulatie r11 is een quasi-3D run waarin suspensief sedimenttransport wordt gesimuleerd op basis van de methode van Galapatti en Vreugdenhil (zie ref.[3] en ref.[5]). De simulatieperiode betreft een periode van 12 uur en 20 minuten (een morfologisch getij). De bodemverandering na een maand wordt uitgerekend door één initiële morfologische tijdstap van 20.55 dagen. Het sedimenttransport na een maand, waarbij herhaaldelijk gebruik wordt gemaakt van het morfologisch getij, is namelijk een factor 1.46 groter dan wanneer gebruik wordt gemaakt van een volledige doottij-springtij cyclus.

Simulatie r10 is een 3D run waarbij waterbeweging en (suspensief) sedimenttransport gekoppeld worden uitgerekend. In het hier gebruikte Westerschelde model is het effect van de sedimentconcentraties op de waterbeweging uitgezet, omdat het Westerschelde model niet is afgeregeld op deze vorm van dichtheidsstroming. Dit betekent dat het sediment met de waterbeweging wordt meegevoerd en uiteraard onderhevig is aan sedimentatie en erosie processen. De 3D simulatie heeft vijf lagen in de verticaal. De laagdiktes zijn als volgt verdeeld:

oppervlaktelaag:	48.6% van de waterdiepte
tweede laag:	26% van de waterdiepte
derde laag::	13.9% van de waterdiepte
vierde laag:	7.5% van de waterdiepte
bodemlaag:	4% van de waterdiepte



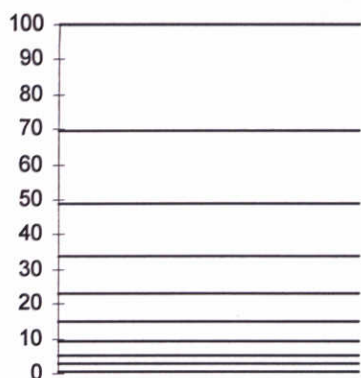
laagdikte verdeling 5 lagen model

De simulatieperiode betreft hetzelfde morfologische getij van 12 uur en 20 minuten. Iedere tijdstap (van 0.5 min) wordt ook het sedimenttransport en de bijbehorende bodemverandering uitgerekend. Per tijdstap vindt dus een terugkoppeling tussen waterbeweging en bodem plaats. De bodemverandering wordt vervolgens per tijdstap vermenigvuldigd met een factor 59 zodat na een simulatie van 12 uur en 20 minuten de bodemverandering na ca een maand (30.3 dagen) bekend is.

Simulatie s10 is dezelfde als r10, maar nu wordt zouttransport en de invloed ervan op de waterbeweging meegenomen.

Simulatie n10 is dezelfde als s10, maar i.p.v. 5 lagen zijn 10 lagen toegepast. Deze 10 lagen hebben de volgende dikteverdeling:

laag 1:	29.2 %
laag 2:	21%
laag 3:	15.1%
laag 4:	10.9 %
laag 5:	7.8 %
laag 6:	5.6%
laag 7:	4%
laag 8:	2.8%
laag 9:	2.1 %
laag 10:	0.5%



laagdikte verdeling 10 lagen model

4.2.2 Vergelijking 3D en quasi 3D sedimenttransport, exclusief zout

In figuur 4.6a staat de bodemverandering na een morfologische maand voor simulatie r11 (quasi 3D) en simulatie r10 (3D, zonder zout). Het globale sedimentatie-erosie patroon van beide simulaties is hetzelfde. De verschillen in het drempelgebied bij Hansweert en ten oosten van de Plaat van Ossensisse kenmerken zich door minder erosie en sedimentatie in de 3D som. Ten noorden van de Plaat van Ossensisse is het sedimentatiegebied in de 3D som homogener verdeeld over de dwarsdoorsnede dan in de quasi-3D run. Dit wordt veroorzaakt door het verschil in secundaire stromingsintensiteit in beide simulaties (zie figuren 3.1 en 4.2a). Verder lijkt het erop dat in de 3D som een iets andere relaxatietijd en/of lengte wordt gesimuleerd, aangezien de scherpe overgang tussen sedimentatie- en erosiegebied ten noordoosten van de plaat van Ossensisse in de 3D run iets oostelijker ligt dan in de quasi-3D run.

In figuur 4.6b is het sedimentatiepatroon van r11 na een morfologische maand afgetrokken van het sedimentatiepatroon van r10 na een morfologische maand. In absolute waarde zijn de verschillen toch nog behoorlijk groot. Met name nabij het Zuidergat en de Drempel van Hansweert, en in de geul ten zuidwesten van de Plaat van Ossensisse bedraagt het verschil meer dan 1 m. Een deel van deze verschillen kan worden verklaard door het ontbreken van het effect van SSL in de quasi-3D simulatie op het sedimentatiepatroon (zie ook figuur 4.2b). In de waterbeweging van de quasi-3D simulatie, die gebruikt wordt voor de sedimenttransport simulatie, wordt op dit moment immers niet standaard de intensiteit voor de SSL uitgerekend. Het is dus zeker de moeite waard om het quasi-3D model te verbeteren door implementatie van de formuleringen voor SSL. Een verklaring voor de overige verschillen moet worden gezocht in het verschil tussen de intensiteit voor de SSD in beide simulaties. Het quasi-3D model moet zeker verbeterd worden bij het bepalen van de kromtestraal op plaatsen waar het rooster 'trapjeslijnen' bevat, maar het lijkt er ook op dat bij zeer steile bodemgradienten het quasi-3D model een sterkere secundaire stromingsintensiteit berekend dan het 3D model. Dit zal in een latere studie verder onderzocht moeten worden.

In figuur 4.6c en 4.6d zijn de dieptegemiddelde concentratieplaatjes tijdens maximale ebstroomsnelheid en tijdens maximale vloedstroomsnelheid voor beide simulaties getoond. Fig. 4.6c zijn volumeconcentraties, terwijl in fig. 4.6d de concentraties in kg/m³ staan.

Omgerekend staan de resultaten van beide figuren echter met dezelfde kleuren weergegeven, en kunnen dus rechtstreeks vergeleken worden. Het ruimtelijk concentratiepatroon is in beide runs globaal hetzelfde.

4.2.3 Vergelijking 3D sedimenttransport exclusief zout en inclusief zout

In figuur 4.7a staat de bodemverandering na ongeveer een maand voor simulatie r10 (3D, zonder zout) en simulatie s10 (3D, met zout). Met name in de Schaar van Waarde en in de geul ten zuid-westen van de Plaat van Ossensisse treedt er in simulatie s10 meer sedimentatie op. In figuur 4.7b is het verschil tussen het sedimentatiepatroon van r10 en s10 weergegeven. Hieruit blijkt dat de effecten van een verticale zoutgradient op het sedimentatiepatroon behoorlijk groot kunnen zijn, aangezien de verschillen tussen beide runs soms meer dan 1 m bedragen. Bij het toepassen van een quasi-3D sedimenttransport simulatie is het dus van belang te weten of in een gebied een verticale zoutgradient optreedt of niet.

4.2.4 Vergelijking 3D sedimenttransport 5 lagen en 10 lagen (met zout)

Als test is behalve een 3D sedimenttransport simulatie met 5 lagen ook een simulatie met 10 lagen gedraaid, waarvan de laagverdeling in paragraaf 4.2.1. staat weergegeven. In fig. 4.8a staat de ontwikkeling van het bodemniveau na een morfologische maand weergegeven. Zo op het eerste gezicht lijken de overeenkomsten tussen beide modellen erg groot. In figuur 4.8b is daarom een verschilplaatje gepresenteerd waarbij de bodemontwikkeling van s10 is afgetrokken van de bodemontwikkeling van n10. Hierin zien we dat de verschillen toch nog zo'n 0.5-1 m kunnen bedragen, met name op de overgang van het diepe Zuidergat naar het drempelgebied van Hansweert. Het voert voor de huidige studie te ver om in detail naar het 3D stromingspatroon te kijken en de verschillen tussen beide modellen te analyseren, maar duidelijk is wel dat het aantal lagen zeker van invloed is op de gesimuleerde morfologische ontwikkeling van een gebied.

In figuren 4.8c-f zijn concentratieplaatjes in diverse lagen gepresenteerd. Voor simulatie s10 zijn de lagen 1, 3 en 5 gekozen waarbij de onderkant van de laag zich op resp. 48.6%, 88.5% en 100% onder het wateroppervlak bevindt. Voor simulatie n10 zijn vergelijkbare dieptes gekozen, en zijn lagen 2, 6 en 10 gepresenteerd. De onderkant van deze lagen bevinden zich respectievelijk op 50.2%, 89.6% en 100% onder het wateroppervlak.

4.2.5 Vergelijking 3D sedimenttransport en metingen Drempel van Hansweert

In (Tank, 1997b) is het gedrag van de Drempel van Hansweert geanalyseerd en beschreven op basis van 5 peilingen in de periode 29 september 1995 - 26 oktober 1995, en op basis van maandelijkse en 3 maandelijkse detailleringen in de periode 1990-1997. Zijn belangrijkste conclusies m.b.t. deze metingen zijn hieronder weergegeven:

1. Het natuurlijke sedimentatiegedrag op de Drempel van Hansweert bestaat uit aanzanding. De meeste aanzanding vindt plaats in de binnenbocht en op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert (bij de haven van Kruiningen). Op het plateau ten oosten van de Plaat van Ossensisse vindt eveneens aanzanding plaats. In de diepe bocht

- bovenstrooms van de Drempel vindt erosie plaats. In de diepe bocht benedenstrooms van de Drempel vindt geringe sedimentatie plaats. Verder geven verplaatsende beddingvormen in de bochten grote diepteverschillen tussen de metingen te zien en erodeert de aanloop van de Schaar van Waarde.
2. De netto aanzanding op de Drempel bedraagt in oktober 1995: $700 \cdot 10^3 \text{ m}^3$. Op het plateau ten oosten van de Plaat van Ossensisse bedraagt de netto aanzanding $350 \cdot 10^3 \text{ m}^3$. In de aanloop naar de Schaar van Waarde bedraagt de netto erosie ruim $150 \cdot 10^3 \text{ m}^3$. In de diepe bocht bij Hansweert bedraagt de netto erosie ruim $400 \cdot 10^3 \text{ m}^3$.
 3. De netto aanzanding van de Drempel in oktober 1995 is $300 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ groter dan de baggerinspanning in september.
 4. De natuurlijke aanzanding van het Drempelgebied is in 1 jaar net zo groot als de jaarlijkse baggerinspanning van gemiddeld $2.5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

Figuur 4.9a (onderste plaatje) geeft het gemeten sedimentatieverloop op de Drempel van 29 sept - 26 okt 1995 weer. In figuur 4.9b-e wordt het gemeten sedimentatieverloop op de Drempel van Hansweert voor de periodes 29/9-5/10, 5/10-12/10, 12/10-19/10, 19/10-26/10. Voor een gedetailleerde analyse van de nauwkeurigheid van de metingen wordt verwezen naar het rapport van (Tank, 1997b). In dit rapport wordt uitgegaan van een nauwkeurigheidsmarge van 20 cm.

Opgemerkt wordt dat in de digitale gegevens van de bodemmetingen voor de periode 19/10-26/10 onnauwkeurige waarden zitten ter hoogte van de (verticale) y-coördinaat 381.5 km - 382.5 km. Dit vindt zijn weerslag in figuur 4.9a, en in figuur 4.9e.

In figuren 4.9a-e zijn in de bovenste plaatjes de sedimentatie- en erosiepatronen weergegeven voor simulatie s10. Omdat s10 een morfologische getij simuleert is de gesimuleerde periode niet steeds exact dezelfde als de gemeten periode. De meetperiode bedraagt 27 dagen, dus de corresponderende periode in s10, waarbij rekening wordt gehouden met de correctiefactor voor het morfologisch getij, bedraagt ca 18.5 dagen. Deze correctie factor wordt toegepast op alle tussenliggende tijdstappen die gepresenteerd zijn in fig. 4.9b-e.

In figuur 4.9a zien we dat de hoeveelheid gesedimenteerd materiaal op de drempel van Hansweert in het model groter is dan gemeten. Ten oosten van het Zuidergat vindt in het model ook veel meer erosie plaats dan wordt gemeten. Voor de resultaten gepresenteerd in figuren 4.9b-d geldt dat er eigenlijk weinig overeenkomst is tussen metingen en berekeningen. Dit kan te maken hebben met de het feit dat er met een morfologisch getij is gerekend i.p.v. morfodynamisch. Vergeleken met de quasi-3D resultaten gepresenteerd in ref.[3] zijn de resultaten van de huidige simulatie echter niet beter of slechter in vergelijking met de metingen.

4.3 Conclusies 3D simulaties

De belangrijkste in hoofdstuk 4 geconstateerde verschillen tussen de intensiteit van de SSD en de SSL afgeleid uit de TRISCAL 3D resultaten en berekend door het quasi-3D model, blijkt te wijten aan het optreden van een verticale zoutgradient in de TRISCAL-3D berekeningen. Deze verticale zoutgradient wordt ook geconstateerd bij het uitvoeren van

DELFT3D-MOR modelsimulaties. Het is niet duidelijk of de zoutgradient ook in werkelijkheid optreedt.

De verticale zoutgradient heeft ook een behoorlijk effect op het sedimentatie-erosie patroon na simulatie van een morfologische maand. De geobserveerde verschillen liggen tussen de -1 en $+1$ m extra sedimentatie en/of erosie.

Tussen de secundaire stromingsintensiteit verkregen uit de quasi-3D resultaten en de DELFT3D-MOR resultaten (zonder zout) zitten ook nog enkele verschillen. Deels wordt dit verklaard doordat het quasi-3D model bij trapjeslijnen in het rooster geen correcte kromtestraal uitrekend. Verder lijkt het erop dat bij een zeer steile bodemgradient het quasi-3D model een sterkere secundaire stromingsintensiteit berekend dan het DELFT3D-MOR model. Hier kan ook het gebruikte aantal lagen in het 3D model een rol spelen.

Het verdubbelen van het aantal lagen van 5 naar 10 heeft effect op het sedimentatiepatroon, hetgeen aangeeft dat 5 lagen voor het Westerschelde model onvoldoende is om de secundaire stroming goed te kunnen weergeven. Dit zal nader onderzocht moeten worden.

De vergelijking tussen de metingen op de Drempel van Hansweert en de 3D DELFT3D-MOR berekeningen van een morfologische maand tonen behoorlijke verschillen. Deze verschillen zijn groter dan de verschillen tussen de DELFT3D-MOR resultaten en de quasi-3D resultaten onderling. Dit betekent dat we op basis van de huidige morfologische data niet kunnen concluderen of het quasi-3D model danwel het DELFT3D-MOR model de beste resultaten geeft.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Algemeen

Het doel van deze studie en de twee voorafgaande studies ref. [3] en ref. [4] is bij te dragen aan de uiteindelijke ontwikkeling van een operationeel morfodynamisch model van de Westerschelde. In de huidige studie is er vooral gekeken naar de invloed van secundaire stroming op het stromingspatroon en het sedimentatiepatroon. Daarbij is de quasi-3D aanpak, waar de secundaire stroming in dwarsrichting (SSD) is geparametriseerd, onderzocht op de zin van uitbreiding van de formulering met een parametrisatie voor de secundaire stroming in langsrichting (SSL). De resultaten van beide parametrisaties zijn vergeleken met resultaten van TRISCAL 3D van RIKZ, en het DELFT3D-MOR model van WL.

Een van de belangrijkste conclusies is dat een goed afgeregeld waterbewegingsmodel onontbeerlijk is voor een goed sedimenttransportmodel van de Westerschelde. Op dit moment zijn de verschillen tussen de resultaten van de quasi-3D en 3D sedimenttransportsimulaties onderling kleiner, dan tussen de modelresultaten en beschikbare metingen. Om dit te kunnen verklaren dient in ieder geval uitgesloten te worden dat de onderliggende hydronamica fouten en/of onnauwkeurigheden bevat. Verder is voor het calibreren en valideren een uitgebreide en betrouwbare dataset nodig, zowel wat betreft waterbeweging, zoutverdeling als ook sedimentconcentraties, baggercijfers en bodemveranderingen.

De grootste morfologische veranderingen in de quasi-3D en 3D modellen worden veroorzaakt door het optreden van secundaire stroming in langsrichting en in dwarsrichting. Dit blijkt niet uit de metingen. Dit verschijnsel hoeft niet noodzakelijkerwijs met het huidige instrumentarium en de huidige beschikbare metingen voor de Westerschelde onderzocht te worden. Hierbij zouden juist ook laboratorium experimenten een praktisch hulpmiddel kunnen zijn.

5.2 Conclusies hydrodynamica

De belangrijkste conclusies bij het vergelijken van de 3D en quasi-3D berekening van secundaire stroming zijn:

Zowel in de 3D als de quasi-3D stromingssimulaties met het Westerschelde model blijkt dat de SSL met name op plaatsen met steile bodemgradienten behoorlijk groot kan zijn. Dit betekent dat in een morfodynamisch model van de Westerschelde de invloed van de SSL zou moeten worden meegenomen. Indien er uiteindelijk gekozen zou worden voor een quasi-3D model op basis van DELFT3D software, moet dus de parametrisatie voor de secundaire stroming uitgebreid worden met de parametrisatie van de SSL.

Er zijn grote overeenkomsten tussen de SSD berekend door het quasi-3D model en berekend door het 3D model. De verschillen die nog optreden zijn deels te wijten aan

bijv. getijplaten) berekent het quasi-3D model een sterkere secundaire stroming dan het 3D model. De reden is niet duidelijk. Mogelijk speelt ook hier het rooster een rol, of is het verschil te verklaren met het gebruikte aantal lagen in de verticaal van het 3D model.

De in het quasi-3D berekende SSL wordt veroorzaakt door versnelling in plaats en versnelling in tijd van het verticale snelheidsprofiel. Er blijkt dat de versnelling in plaats (het effect van plaatranden en steile bodemgradienten) de grootste invloed op het snelheidsprofiel heeft. Bij het vergelijken van de 3D en quasi-3D resultaten worden de grootste versnellingen en vertragingen op dezelfde plek gesimuleerd. Het quasi-3D patroon is echter veel 'vlekkelijker' dan het 3D patroon, wat wordt veroorzaakt door de toegepaste parametrisatie. Verder zijn 'fouten' in de SSD in de quasi-3D aanpak direct van invloed op 'fouten' in de SSL in de quasi-3D aanpak.

De grootste verschillen tussen de SSL en de SSD van de 3D en quasi-3D berekeningen worden veroorzaakt door het optreden van een verticale zoutgradient in het 3D model. Het is niet duidelijk of deze zoutgradient een model-artefact is, of dat het ook werkelijk optreedt.

De in deze studie gebruikte ADCP metingen zijn niet toereikend om de modelresultaten te valideren op de representatie van secundaire stroming. Met name omdat de beschikbare meetraaien niet precies op die plaatsen met een extreme secundaire stroming zijn gelocaliseerd, maar ook omdat de ADCP metingen dichtbij het wateroppervlak en dichtbij de bodem niet gevalideerd zijn.

5.3 Conclusies morfologie

De quasi-3D sedimenttransportresultaten en de 3D sedimenttransportresultaten vertonen grote overeenkomsten. De geconstateerde verschillen tussen de sedimentatie-erosie patronen na simulatie van een morfologische maand door het quasi-3D model en het 3D model (zonder zout) bedragen op sommige plaatsen desondanks meer dan 1 m. Dit is grotendeels te verklaren door de verschillen in gesimuleerde secundaire stromingsintensiteit van beide runs. Zo bevat de quasi-3D sedimenttransport simulatie geen SSL.

De verschillen tussen de sedimentatie-erosie patronen na simulatie van een morfologische maand met de 3D modellen inclusief en exclusief zout, liggen in de orde van -1 m tot $+1$ m meer erosie of sedimentatie.

De verschillen tussen de sedimentatie-erosie patronen na simulatie van een morfologische maand met de 3D modellen met 5 lagen en 10 lagen, liggen in de orde van -0.5 m tot $+0.5$ m meer erosie of sedimentatie.

De resultaten tussen de quasi-3D en 3D resultaten onderling, is kleiner dan tussen de metingen en de modelresultaten.

5.4 Aanbevelingen hydrodynamica

5.4.1 Aanbeveling verdere ontwikkeling Delft3D-Flow

- Het is nuttig de huidige formulering voor secundaire stroming in het quasi-3D model uit te breiden met de parametrisatie voor de SSL. Er dient wel onderzocht te worden hoe het ‘vlekkelig patroon’ verbeterd, dan wel voorkomen, kan worden,
- Het is noodzakelijk de berekening van de kromtestraal bij de randafhandeling van de trapjeslijnen in het rooster in het quasi-3D model te verbeteren

5.4.2 Overige aanbevelingen

Er wordt aanbevolen

- een onderzoek te doen naar de invloed van het aantal lagen op de ontwikkeling van secundaire stroming
- een onderzoek te doen naar het optreden van verticale zoutgradienten in de Westerschelde,
- verder onderzoek uit te voeren om te komen tot een verbeterde 3D waterbeweging van de Westerschelde. Hierbij kan gedacht worden aan het inbouwen van een richtingsafhankelijke (of stromingsafhankelijke) ruwheid,
- er voor te zorgen dat er meer metingen beschikbaar komen. Met name op plekken waar zich een sterke secundaire stroming bevindt. ADCP metingen moeten daarbij aangevuld worden met snelheidsmetingen om snelheden aan het oppervlak en aan de bodem te kunnen valideren.

5.5 Aanbevelingen morfologie

5.5.1 Aanbeveling verdere ontwikkeling onderzoek met Delft3D-Mor

- Naar aanleiding van de huidige resultaten van het quasi-3D model en vergelijking ervan met 3D resultaten en metingen lijkt het quasi-3D model op dit moment geschikt en praktisch om morfologische berekeningen voor de Westerschelde mee te doen. Er wordt echter wel aanbevolen om de quasi-3D parametrisatie van secundaire stroming te verbeteren en uit te breiden met de parametrisatie voor de SSL.
- Er wordt aanbevolen de quasi-3D en 3D sedimenttransportsimulaties uit te voeren voor een relatief eenvoudige situatie als bijv. een gecontroleerd laboratorium experiment. Hierbij zou dan kunnen worden onderzocht welk effect de secundaire stroming heeft op de morfologische ontwikkeling, en onder welke condities de genoemde modellen in staat zijn de gemeten ontwikkeling te simuleren.

5.5.2 Overige aanbevelingen

- Het vervolg onderzoek m.b.t. de Westerschelde zal zich moeten richten op een langere periode (dan de gebruikte 1 maand periode) en een ruimere schaal (dan alleen de

Drempel van Hansweert), waarbij ook gekeken wordt naar de plaat-geul uitwisseling in het oostelijk deel van de Westerschelde. Hiervoor zijn gedetailleerde baggergegevens nodig, die als bronnen en punten in de modelsimulaties kunnen worden meegenomen.

- Het 3D sedimenttransportmodel van de Westerschelde bevat een aanzienlijk aantal rekenpunten waardoor de doorlooptijd van de simulaties erg groot is en 3D morfodynamische simulaties (met simulatieperiodes van meer dan een maand) op dit moment ondoenlijk. Voor het uitvoeren van onderzoek naar de morfologische ontwikkeling van bijv. De Drempel van Hansweert is het niet noodzakelijk de hele Westerschelde met eenzelfde roosterresolutie te modelleren. Er wordt aanbevolen om voor dit soort onderzoek een nieuw rooster met minder rekenpunten te maken dat toch fijn genoeg is in het interessegebied. Een andere optie is om een kleiner model te maken dat genest kan worden in het grote model.
- De gemeten periode van de morfologische metingen bij de Drempel van Hansweert lijkt te kort om de quasi-3D en 3D morfologische resultaten te kunnen valideren. De metingen hebben een nauwkeurigheid van 0.2-0.3 m. De gemeten veranderingen na een maand liggen i.h.a. tussen -0.5 m en 0.5 m. Bij metingen met een langere duur wordt de relatieve onnauwkeurigheid, t.o.v. de morfologische veranderingen, kleiner.

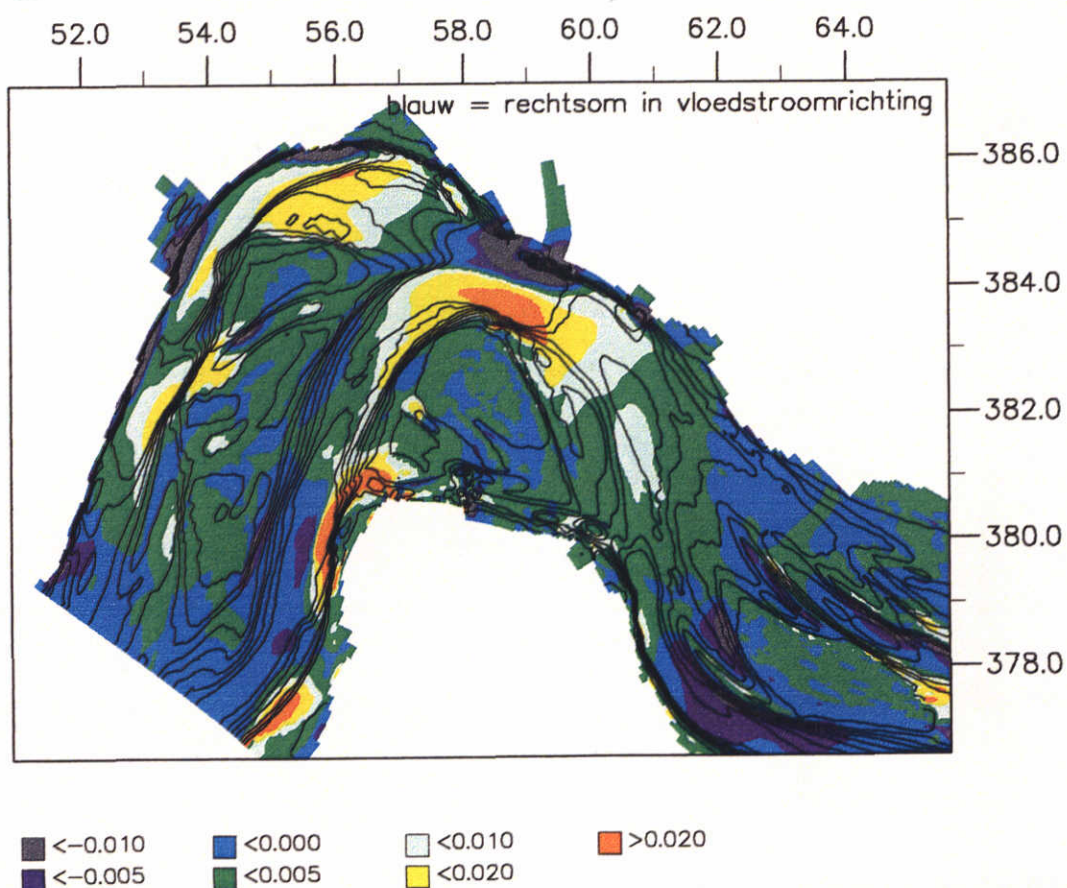
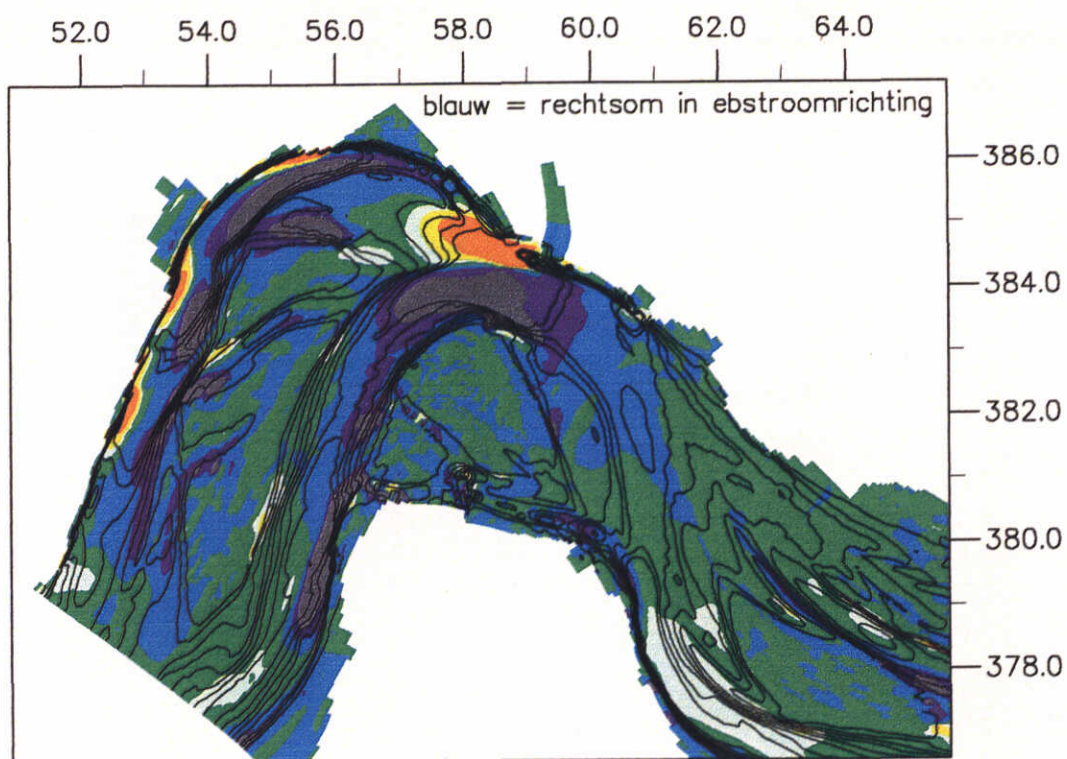
Referenties

- [1] Dam, G., 1997. De vergelijking van HF-radar met andere stromingsgegevens. RIKZ Middelburg, Rapport RIKZ/OS-97.820X.
- [2] Delft Hydraulics, 1996, An introduction to DELFT3D-MOR, Manual Q1416, Release 2.06.
- [3] Delft Hydraulics, 1998. Sedimenttransportmodellering Westerschelde. Rapport Z 2489.
- [4] Delft Hydraulics, 1999. Sedimenttransportmodellering Westerschelde. Rapport Z 2649.
- [5] Galappatti, G. en Vreugdenhil, C.B., (1986). A depth integrated model for suspended sedimenttransport. J. Hydr. Res., Vol 23, 1985, no.4.
- [6] Groenewoud, 1997, "Modellering morfodynamisch gedrag van de Drempel van Hansweert; Fase 1: Modelbouw en simulatie huidige situatie", Onderzoeksrapport TU Delft, Faculteit der Civiele Techniek.
- [7] Jansen, 1997a, "Bouw, calibratie en verificatie SCALWEST t.b.v. project VERDIEPING - Rapportage Activiteit A", Ingenieursbureau Svasek bv, Projectnr. 1011.
- [8] Jansen, 1997b, "Bouw en validatie TRISCAL; 3D-model van de Westerschelde - Rapportage Activiteit B", Ingenieursbureau Svasek bv, Projectnr. 1011.
- [9] Jansen, 1998, "Validatie TRISCAL en aanzet sedimenttransport t.b.v. project VERDIEPING - Rapportage Activiteit C", Ingenieursbureau Svasek bv, Projectnr. 1011.
- [10] Kalkwijk, J.P.Th. & R. Booij, 1986, Adaptation of secondary flow in nearly horizontal flow, J. of Hydr. Res., Vol. 24, No. 1.
- [11] RD Instruments, Acoustic Doppler Current Profielr. Principles of operation: a practical primer. San Diego, 1989.
- [12] Tank, F.T.G., 1997a, Het gedrag van Drempels in de Westerschelde, beschrijving en analyse van zandtransport- metingen op en rondom de Drempel van Hansweert, IMAU rapport R97-08.
- [13] Tank, F.T.G., 1997b, Het gedrag van Drempels in de Westerschelde, beschrijving en analyse van metingen van de morfologie op en rondom de Drempel van Hansweert, IMAU rapport R 97-09.
- [14] Verbeek, F.T.G. Tank & M.D. Groenewoud, april 1998, "Drempels in de Westerschelde, natuur en mens samen aan het werk", RIKZ rapport 98.011.
- [15] Vriend, H.J. de, 1977, A mathematical model of steady flow in curved shallow channels, J. of Hydr. Res., Vol. 15, No. 1.
- [16] Wang, Z.B., Ribberink, J.S. (1986). The validity of a depth integrated model for suspended sedimenttransport. J. of Hydr. Res., 1986, Vol 24, no.1
- [17] Wang, Z.B. (1989). Mathematical Modelling of Morphological Processes in Estuaries. PhD Thesis, Delft University of Technology.
- [18] Wouters, C.A.H., 1998, Drempel van Valkenisse, Afstudeeronderzoek naar mechanismen die bijdragen aan de vorming van de Drempel van Valkenisse, RIKZ werkdocument OS.98.805x.

Lijst van Figuren

- fig. 3.1a simulatie r11, intensiteit SSD
- fig. 3.1b intensiteit spiraalstroming in dwarsrichting, Triscal 3D model
- fig. 3.2a maximale ebstroming; sec. stroming in langsrichting, door versnelling in plaats en tijd
- fig. 3.2b maximale vloedstroming; sec. stroming in langsrichting, door versnelling in plaats en tijd
- fig. 3.2c intensiteit spiraalstroming in langsrichting, Quasi-3D model
- fig. 3.2d intensiteit spiraalstroming in langsrichting, Triscal 3D model
- fig. 3.3a oppervlakte snelheden en dieptegemiddelde snelheden max. vloed, ADCP
- fig. 3.3b oppervlakte snelheden en dieptegemiddelde snelheden max. eb, ADCP
- fig. 3.4a raaien B en C, verificatiepunten tijdens eb en vloed
- fig. 3.4b verticale snelheidsprofielen, max. eb, ADCP meting raai B
- fig. 3.4c verticale snelheidsprofielen, max. eb, ADCP meting raai C
- fig. 3.4d verticale snelheidsprofielen, max. vloed, ADCP meting raai B
- fig. 3.4e verticale dwarsprofielen, max. eb, ADCP meting raai B
- fig. 3.4f verticale dwarsprofielen, max. eb, ADCP meting raai C
- fig. 3.4g verticale dwarsprofielen, max. vloed, ADCP meting raai B
- fig. 3.5a intensiteit SSD, max. eb
- fig. 3.5b intensiteit SSL, max. eb
- fig. 3.6a intensiteit SSD, max. eb
- fig. 3.6b intensiteit SSL, max. eb
- fig. 3.7a intensiteit SSD, max. vloed
- fig. 3.7b intensiteit SSL, max. vloed
- fig. 3.8a intensiteit SSD, max. vloed
- fig. 3.8b intensiteit SSL, max. vloed
- fig. 3.9a secundaire stroming in dwarsrichting, max. eb, $\beta = 1$
- fig. 3.9b secundaire stroming in dwarsrichting max. vloed, $\beta = 1$
- fig. 3.10 secundaire stroming in dwarsrichting max. vloed, $\beta = 10$
- fig. 4.2a simulatie n11, intensiteit SSD
- fig. 4.2b simulatie n11, intensiteit SSL
- fig. 4.3a simulatie n12, intensiteit SSD
- fig. 4.3b simulatie n12, intensiteit SSL
- fig. 4.4 saliniteitsverschil tussen bodemlaag en oppervlaktelaag
- fig. 4.5 verhouding secundaire stromingsintensiteit n12/n11
- fig. 4.6a bodemniveau verandering (m), r11 en r10
- fig. 4.6b verschil sedimentatie patroon r10 en r11
- fig. 4.6c vol. concentratie suspensief materiaal, r11
- fig. 4.6d dieptegemiddelde suspended sediment concentratie, r10
- fig. 4.7a bodemniveau verandering (m) r11 en s10
- fig. 4.7b verschil sedimentatie patroon r10 en s10
- fig. 4.8a bodemniveau verandering (m) s10 en n10
- fig. 4.8b verschil sedimentatiepatroon n10 en s10
- fig. 4.8c suspended sediment concentraties, s10, max. eb
- fig. 4.8d suspended sediment concentraties, s10, max. vloed
- fig. 4.8e suspended sediment concentraties, n10, max. eb
- fig. 4.8f suspended sediment concentraties, n10, max. vloed
- fig. 4.9a bodemniveau verandering (m), s10 en meting
- fig. 4.9b bodemniveau verandering, s10 en meting, 29/9 - 5/10

- fig. 4.9c bodemniveau verandering, s10 en meting 5/10 - 12/10
- fig. 4.9d bodemniveau verandering s10 en meting, 12/10 - 19,5/10
- fig. 4.9e bodemniveau verandering, s10 en meting, 19,5/10 - 27/10

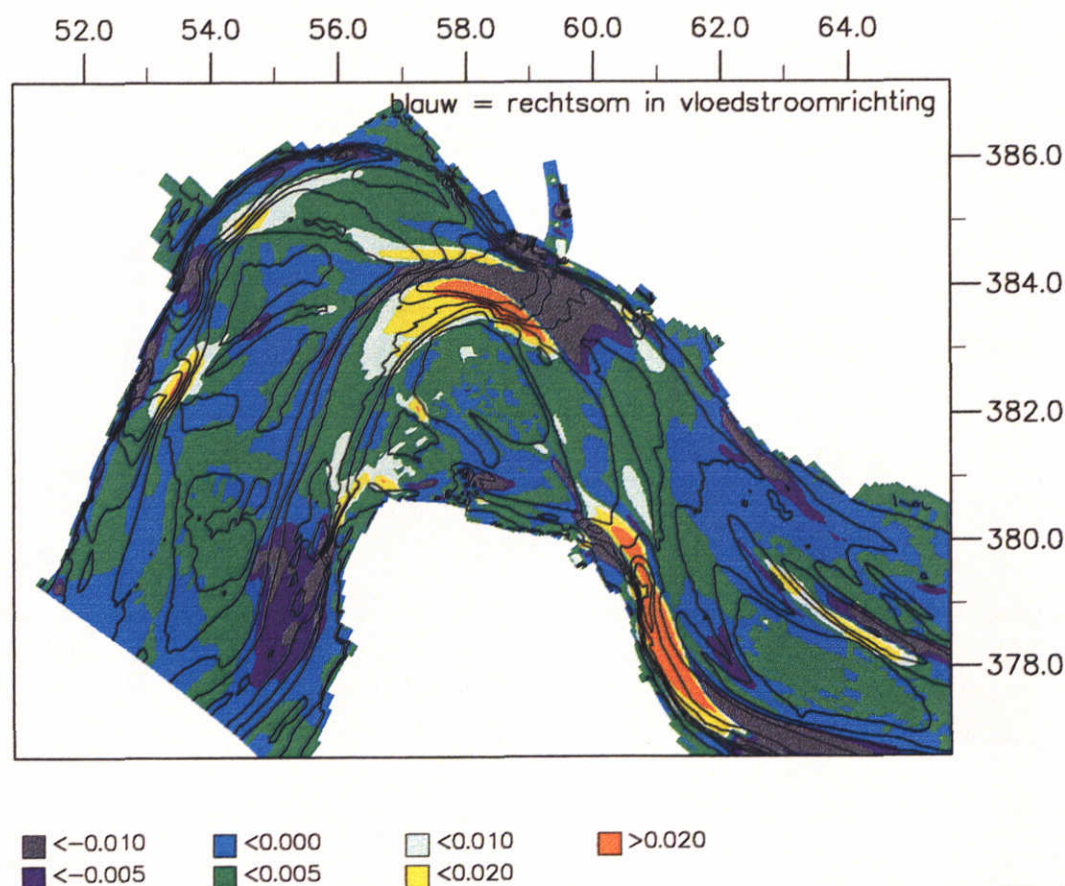
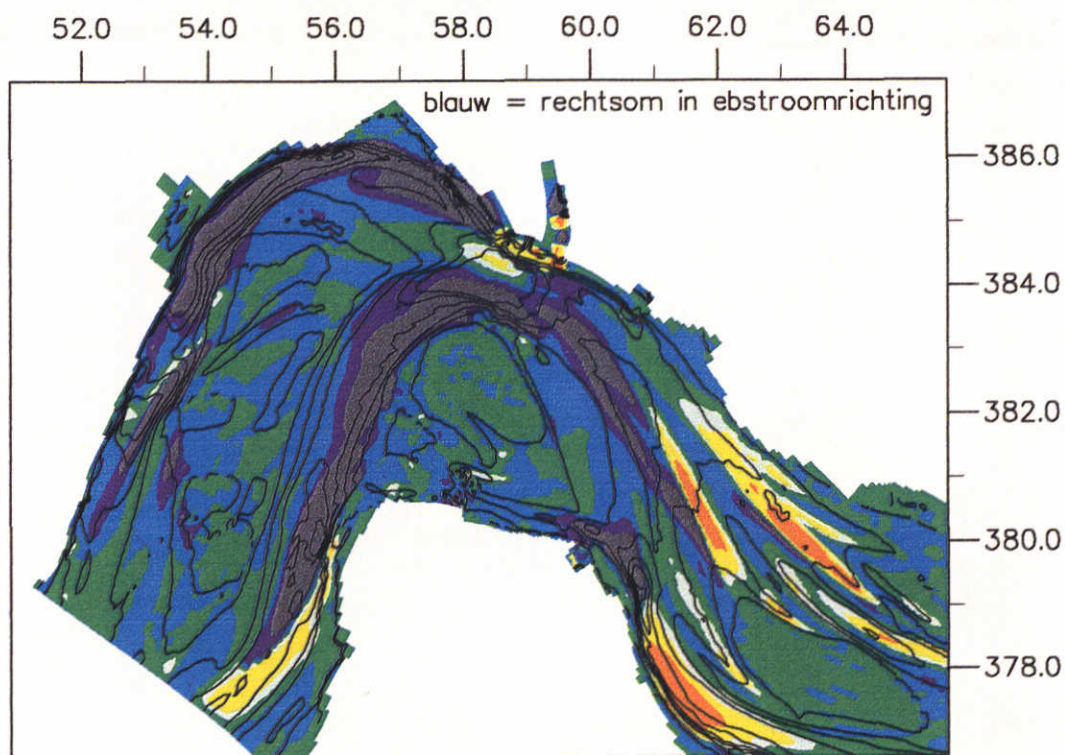


Simulatie r11, intensiteit SSD
tijdens maximale ebstroomsnelheid
en tijdens maximale vloedstroomsnelheid

20/01/2000

fig 3.1a

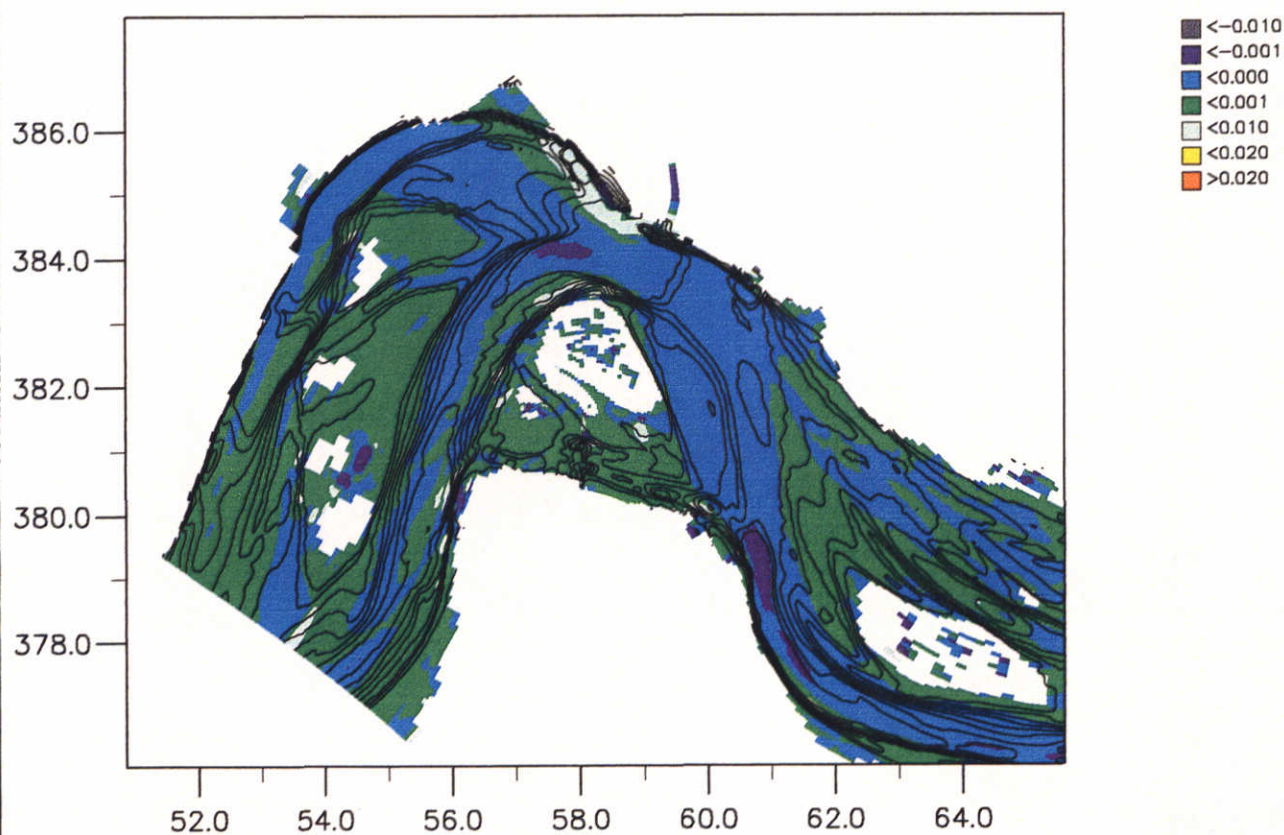
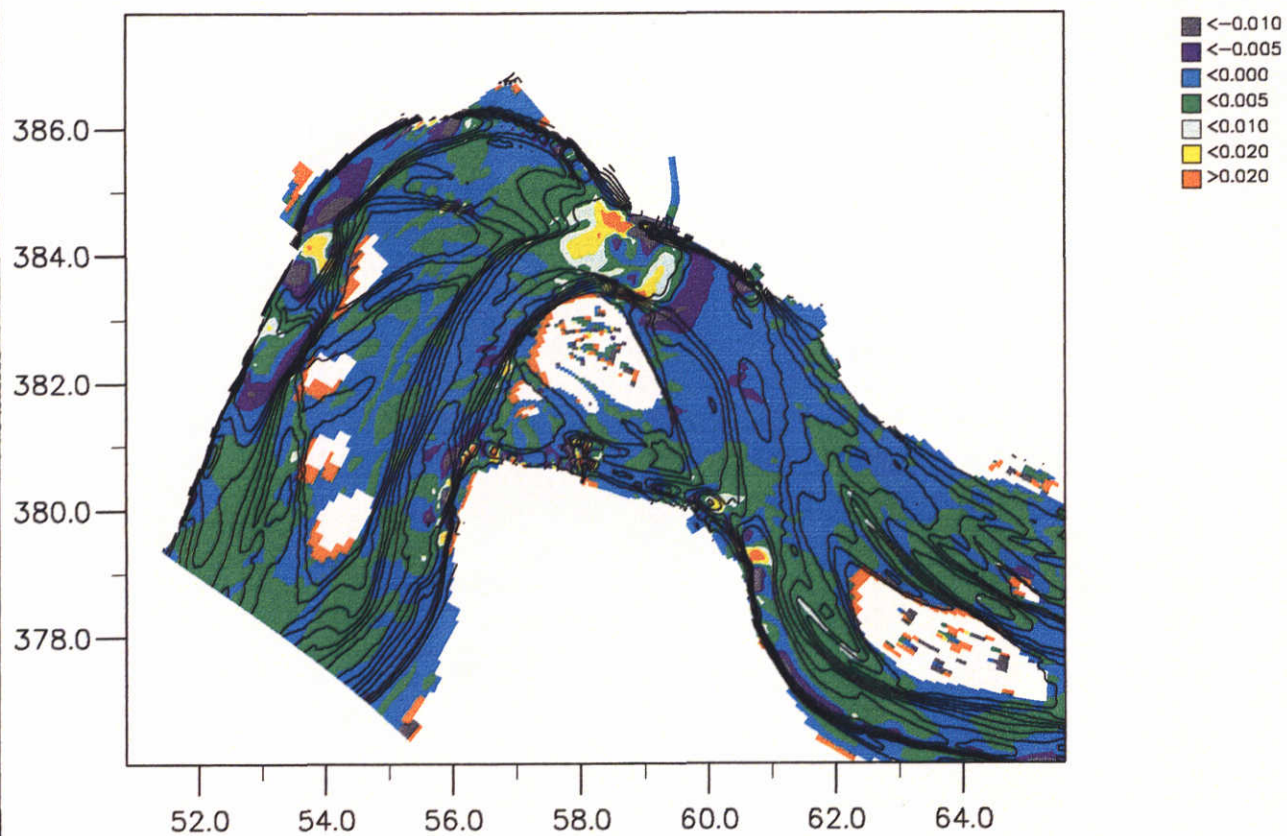
Quasi-3D Delft2D-Mor



Intensiteit spiraalstroming in dwarsrichting
maximale ebstroomsnelheid (boven) en
maximale vloedstroomsnelheid (onder)

22/02/2000 fig 3.1b

Triscal 3D model

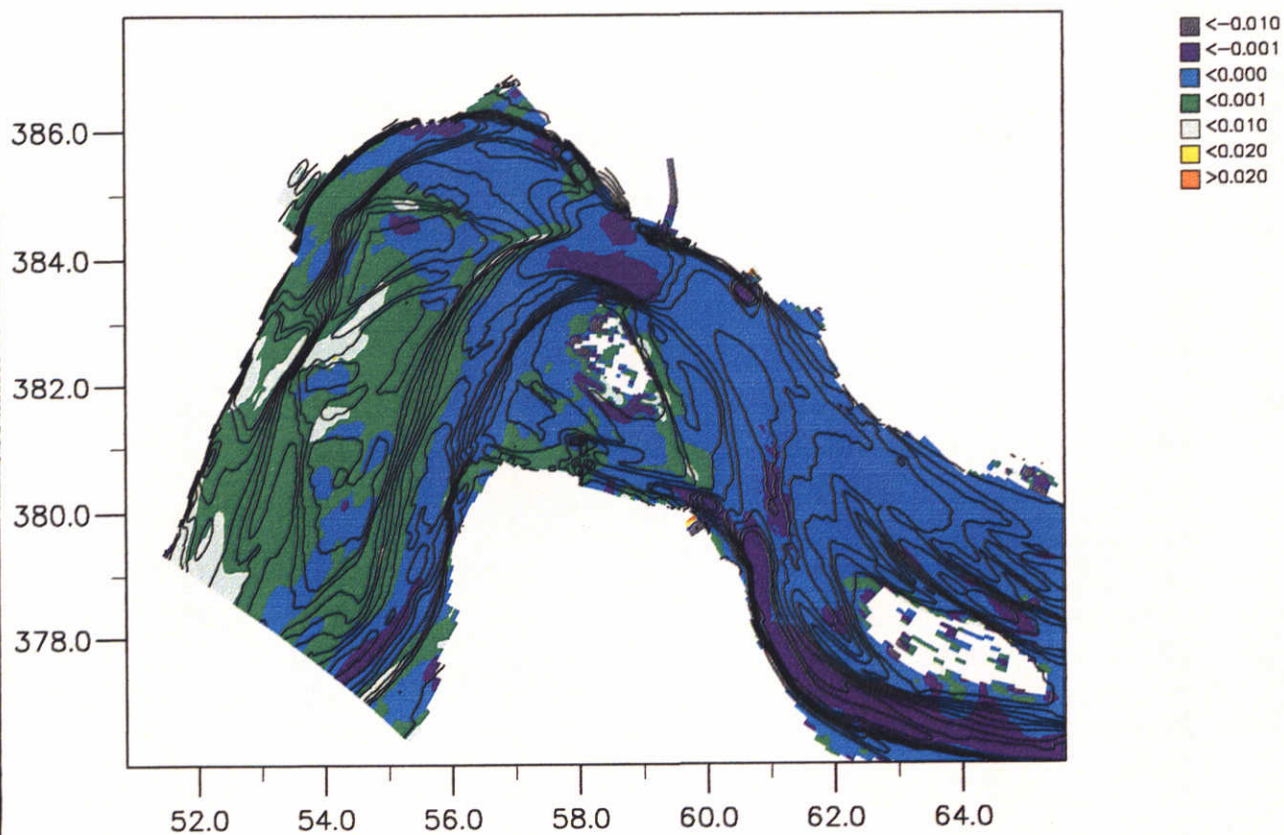
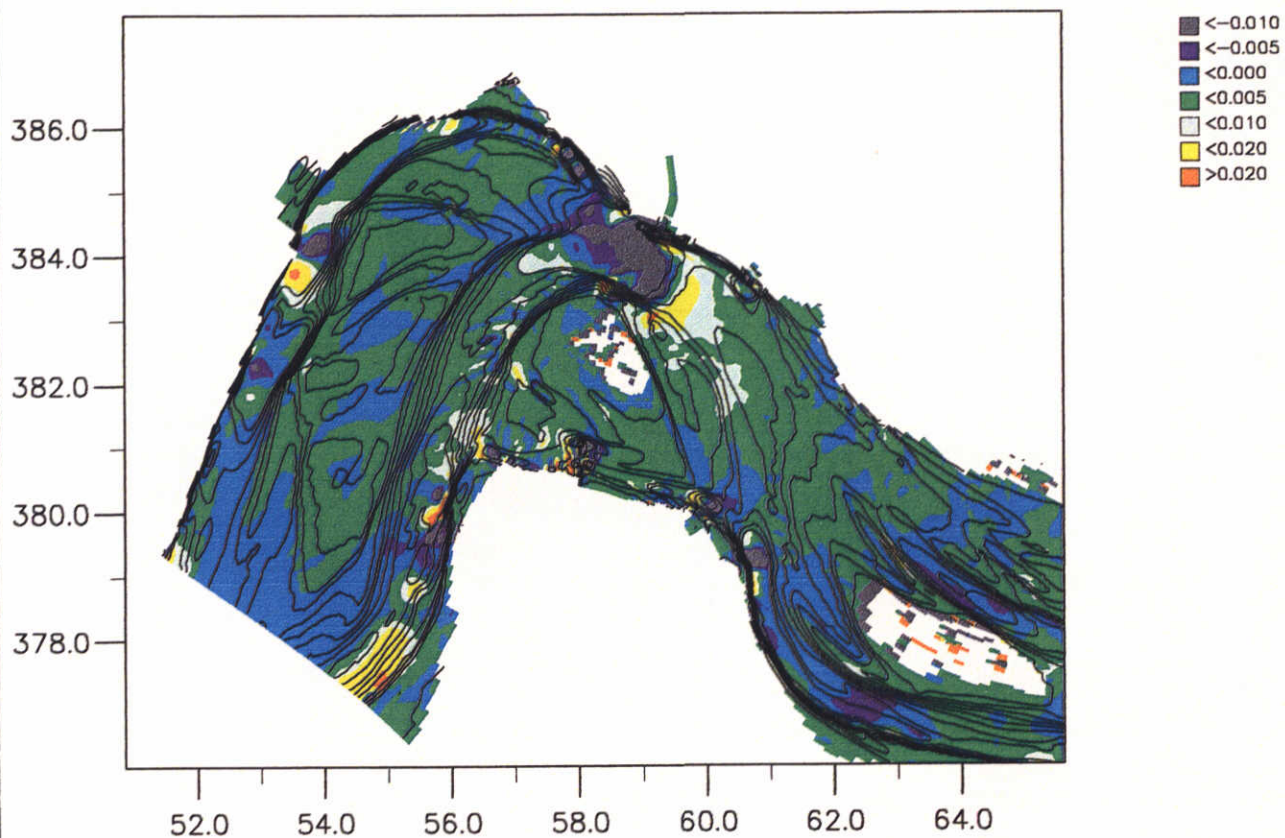


maximale ebstrooming; sec. stroming in langsrichting
 door versnelling in plaats, lse (boven), en tijd, lte (onder)
 blauw = versnelde stroming

21/12/99

fig 3.2a

17/4/96 17:30

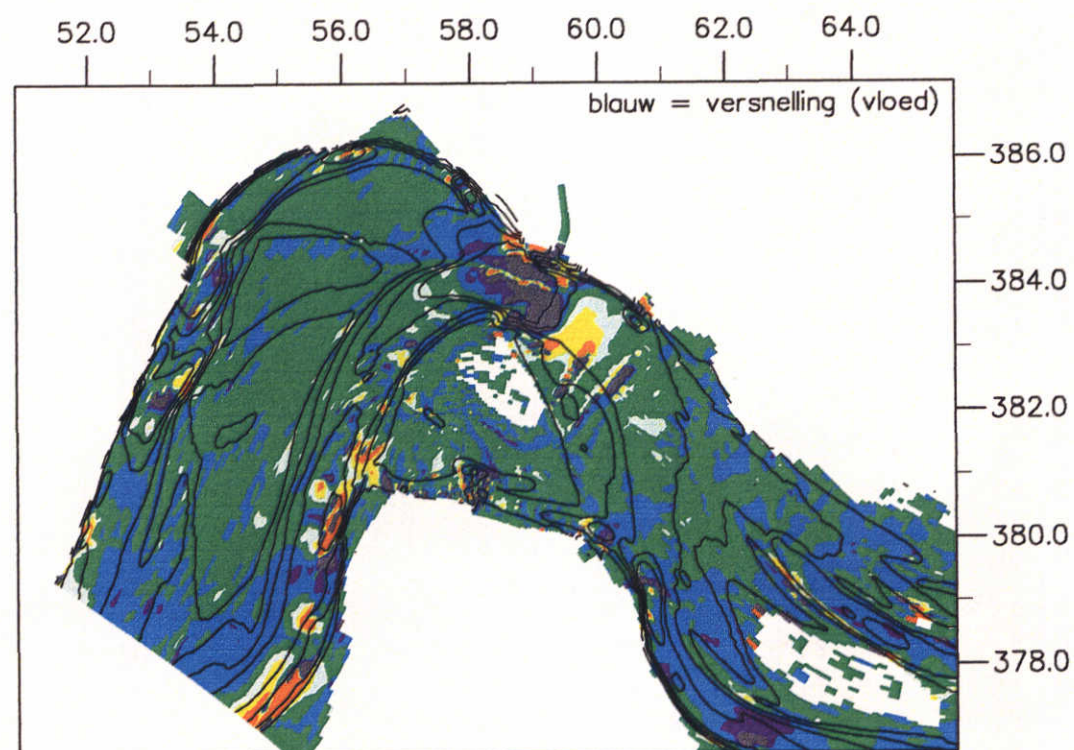
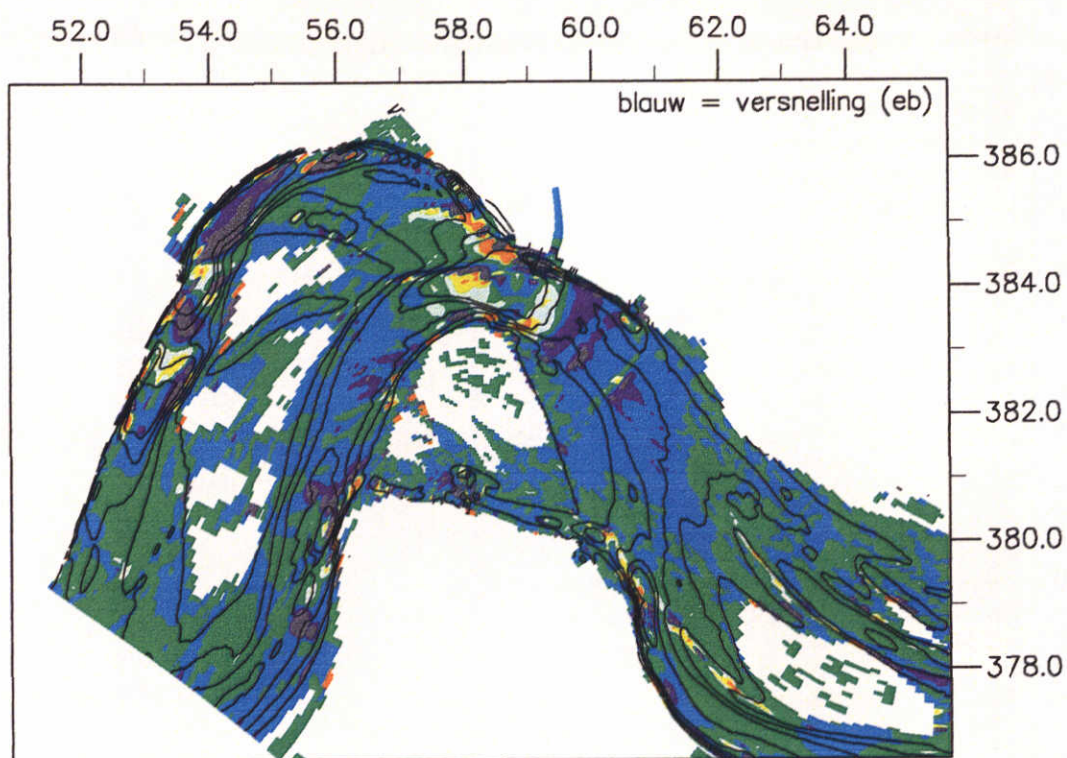


maximale vloedstroming; sec. stroming in langsrichting
 door versnelling in plaats, Ise (boven), en tijd, Ite (onder)
 blauw = versnelde stroming

21/12/99

fig 3.2b

18/4/96 02:00

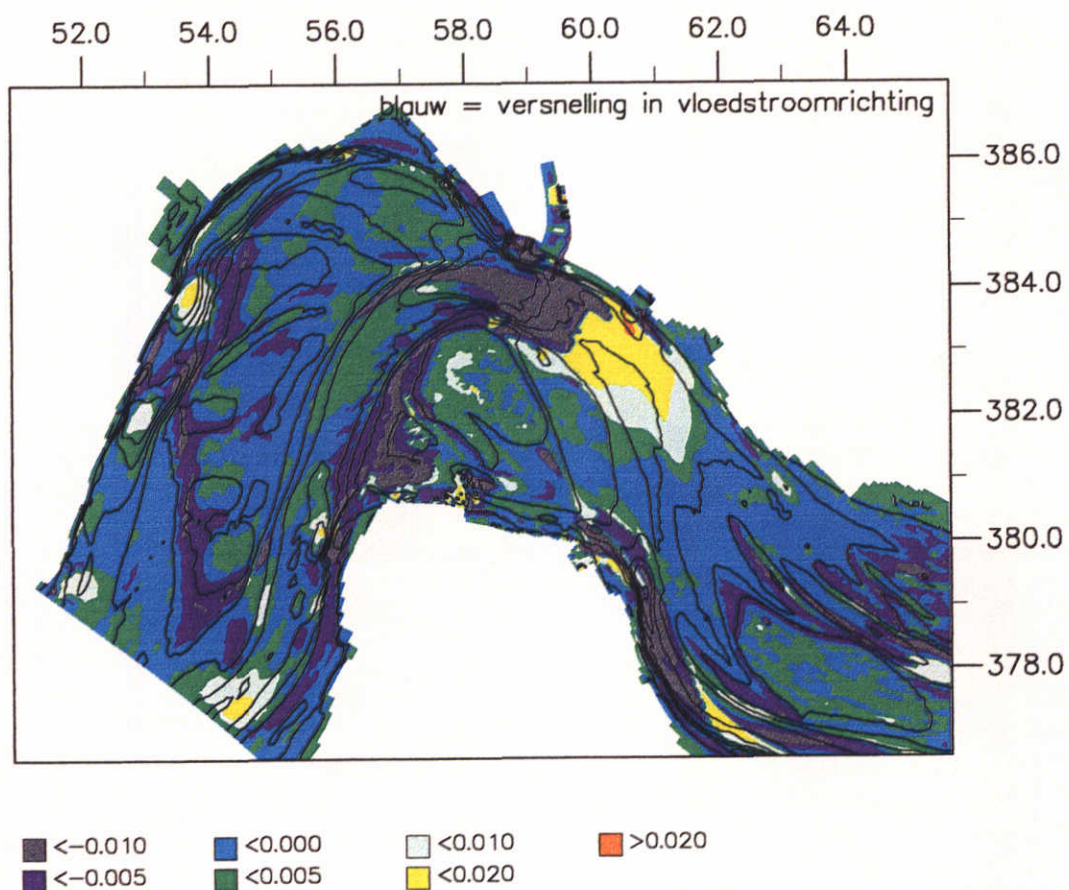
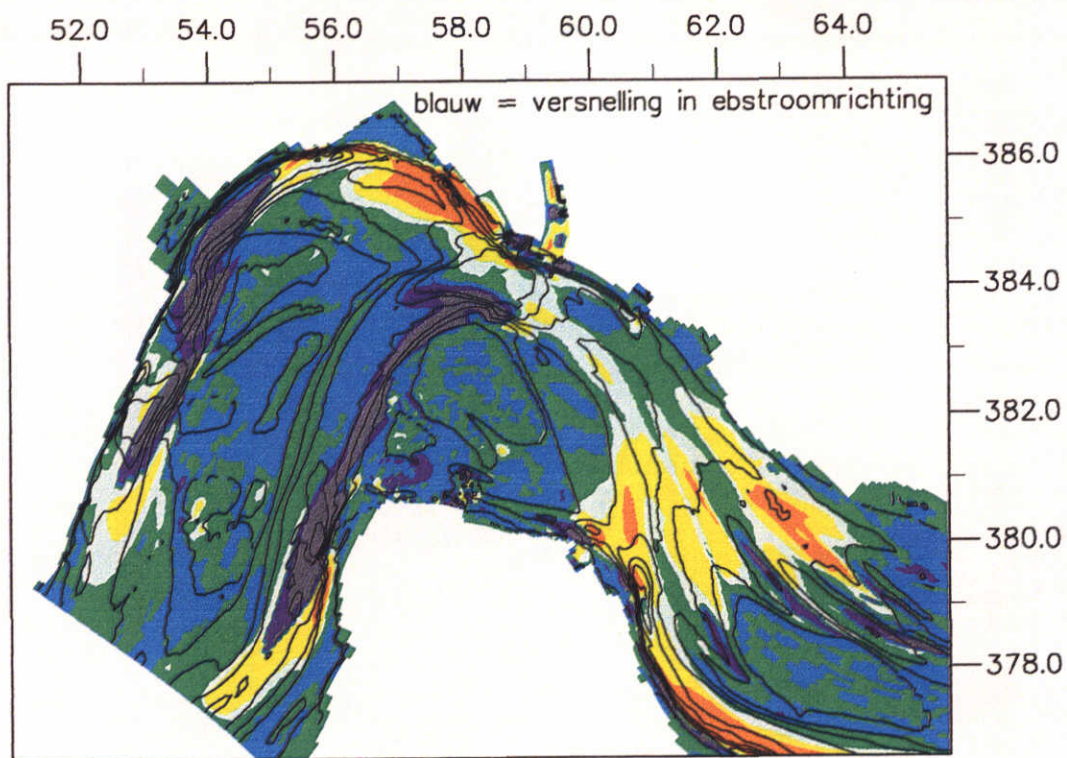


Intensiteit spiraalstroming in langsrichting
maximale ebstroomsnelheid (boven) en
maximale vloedstroomsnelheid (onder)

22/02/2000

fig 3.2c

Quasi-3D, Delft2D-Mor

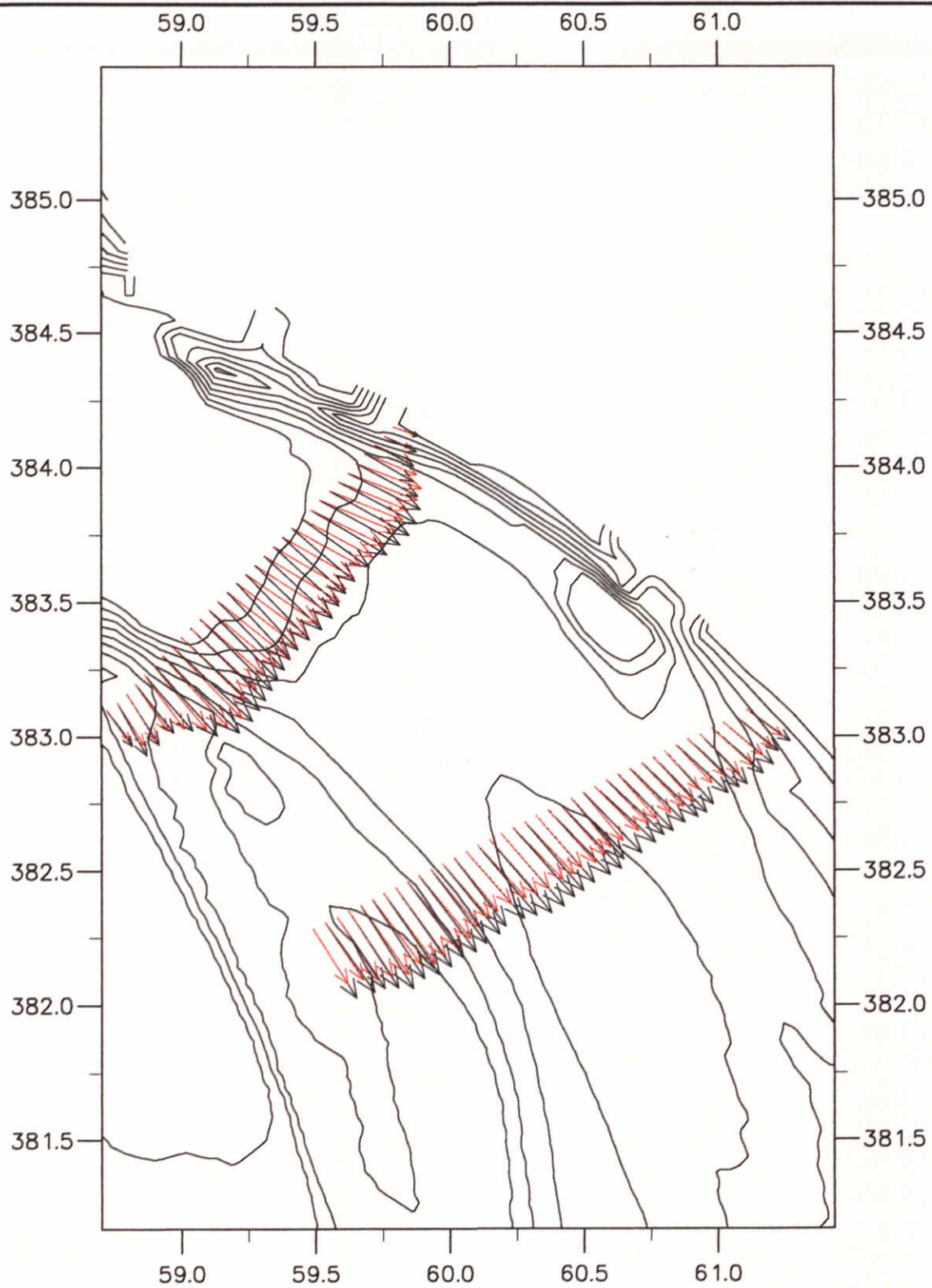


Intensiteit spiraalstroming in langsrichting
maximale ebstroomsnelheid (boven) en
maximale vloedstroomsnelheid (onder)

22/02/2000

fig 3.2d

Triscal 3D model

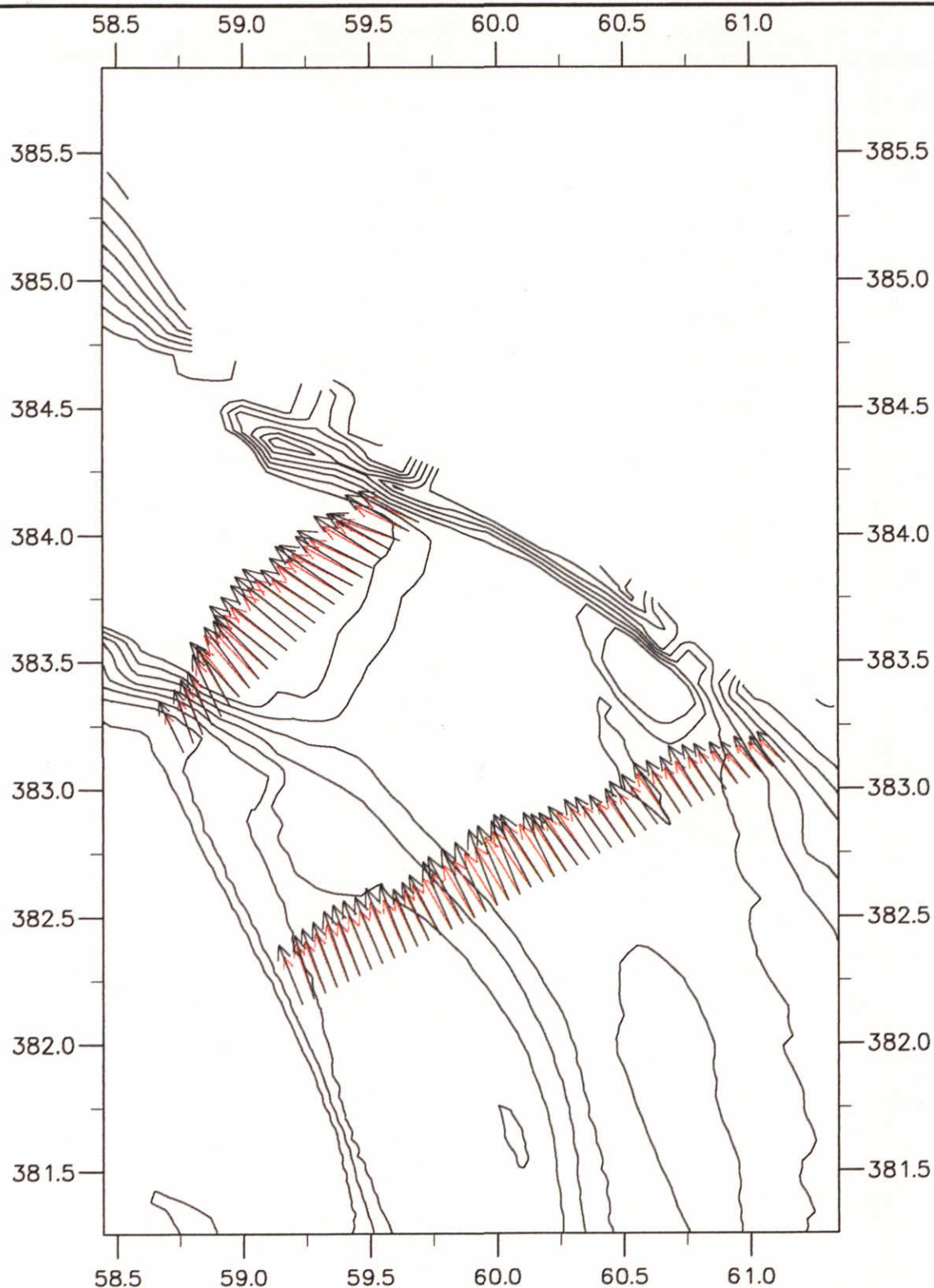


1.000 m/s; ADCP oppervlakte snelheden
1.000m/s; ADCP diepte-gem. snelheden

oppervlakte snelheden en
dieptegemiddelde snelheden tijdens maximale vloedstroomsnelheid
ADCP metingen

fig 3.3a

17/4/96 14:00

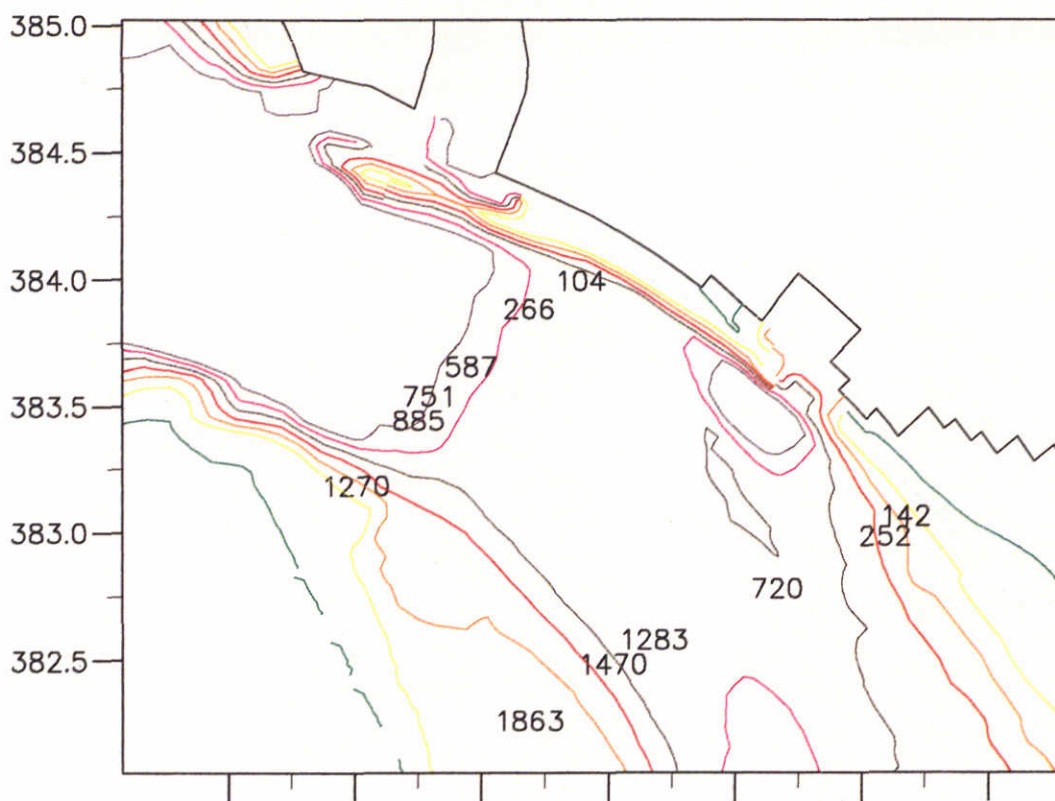


0.500m/s; ADCP diepte-gem. snelheden
0.500 m/s; ADCP oppervlakte snelheden

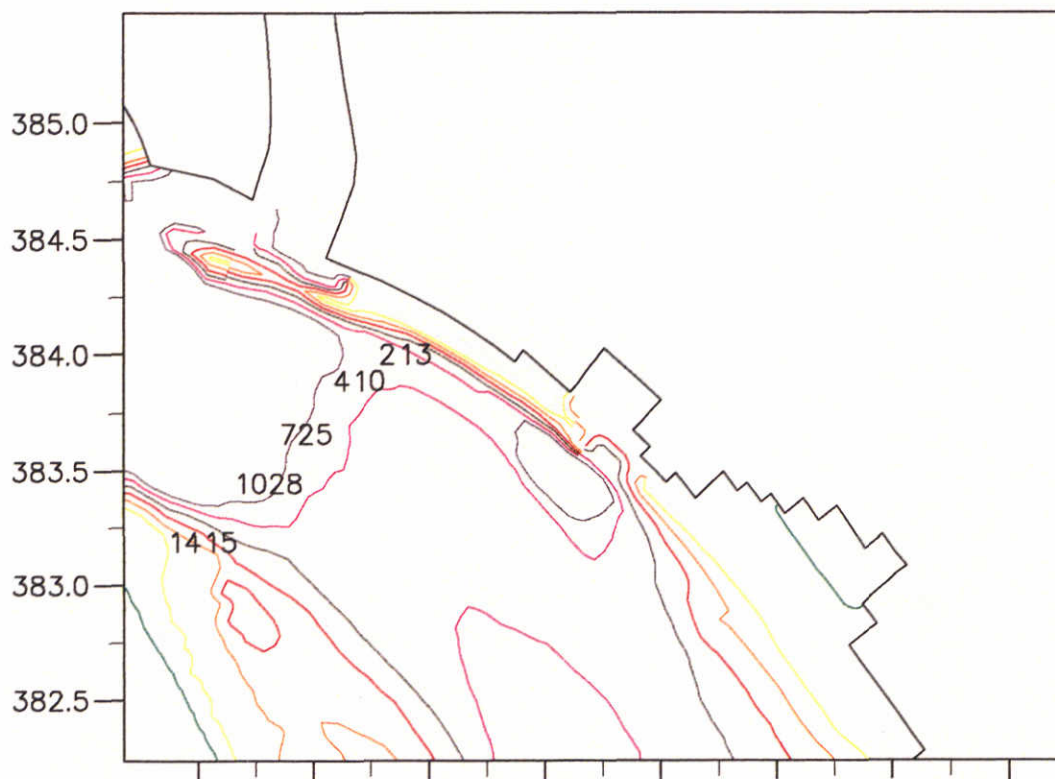
oppervlakte snelheden en
dieptegemiddelde snelheden tijdens maximale ebstroomsnelheid
ADCP metingen

fig 3.3b

17/4/96 18:00



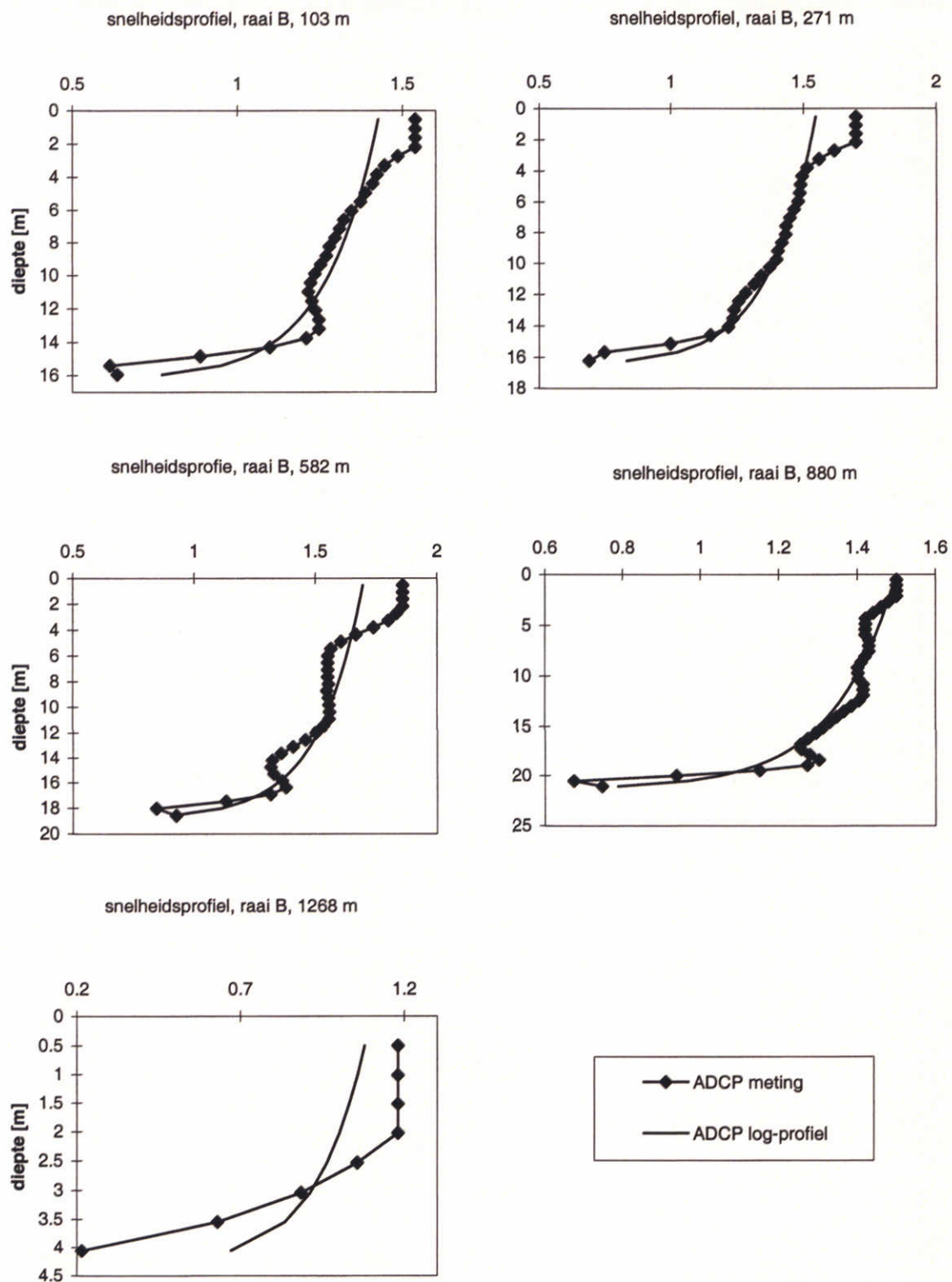
— <-5.000	— <0.000	— <5.000	— <10.000	— <15.000	— <20.000
— <-2.500	— <2.500	— <7.500	— <12.500	— <17.500	— >20.000



— <-5.000	— <2.500	— <10.000	— <17.500	— >22.500
— <-2.500	— <5.000	— <12.500	— <20.000	
— <0.000	— <7.500	— <15.000	— <22.500	

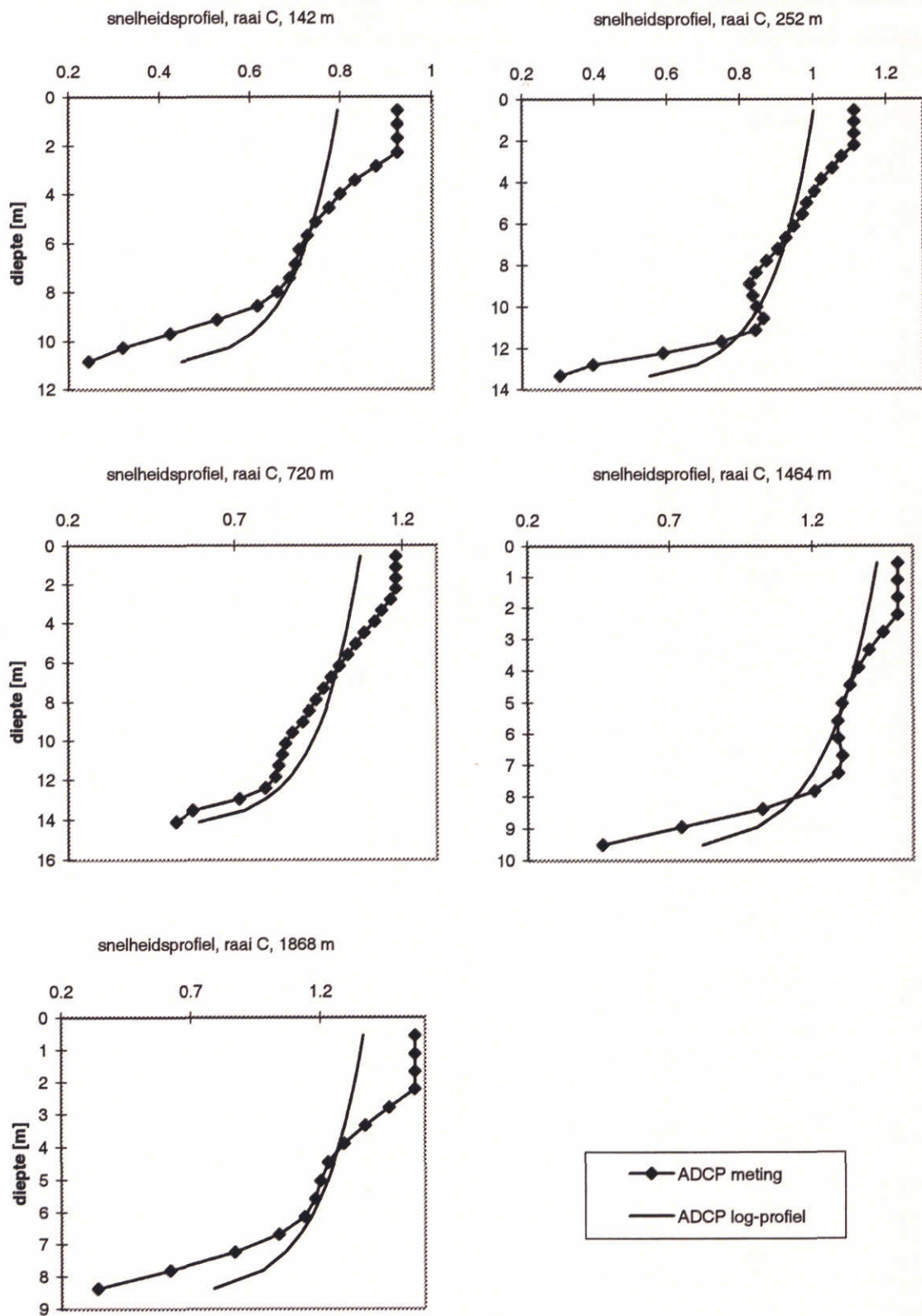
raaien B en C, verificatie punten tijdens eb (boven)
 raai B: verificatie punten tijdens vloed (onder)

fig 3.4a



verticale snelheidsprofielen gemeten door ADCP tijdens maximale ebstroomsnelheid

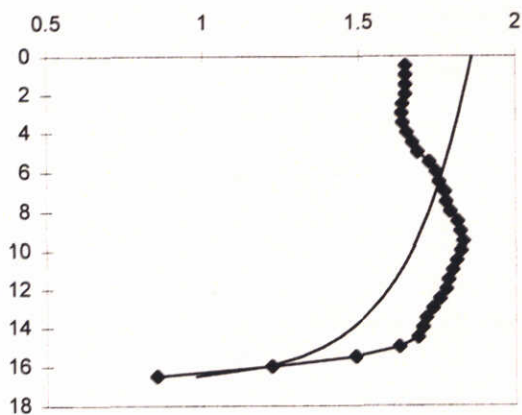
fig 3.4b



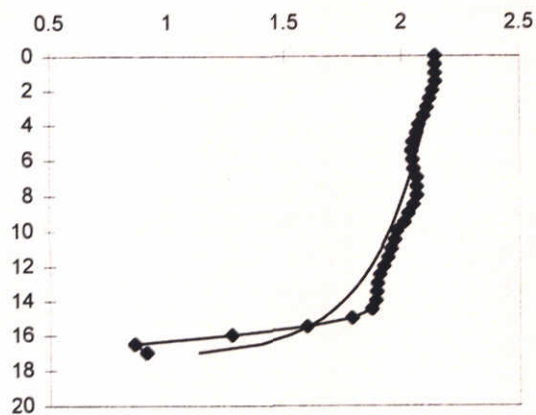
verticale snelheidsprofielen gemeten door ADCP tijdens maximale ebstroomsnelheid

fig 3.4c

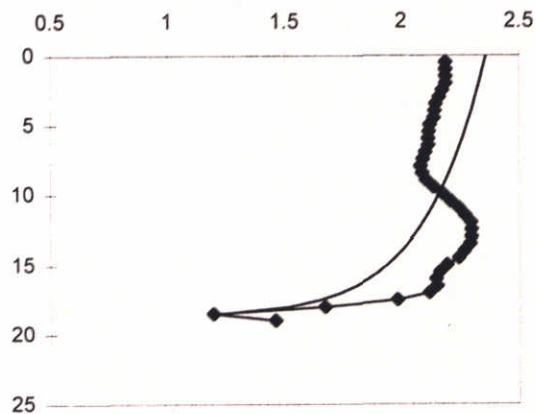
snelheidsprofiel, raai B, 218 m



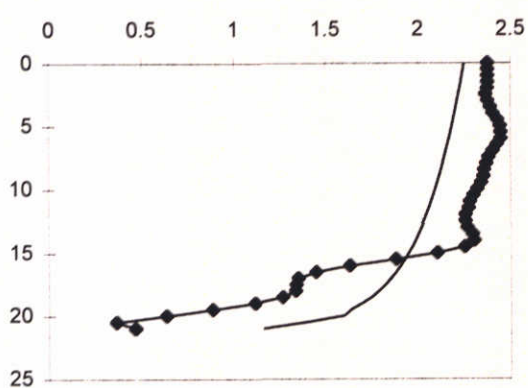
snelheidsprofiel, raai B, 411 m



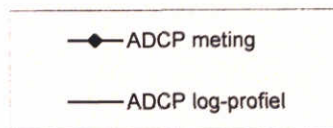
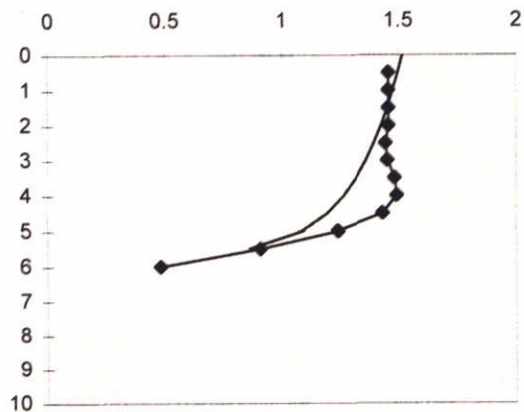
snelheidsprofiel, raai B, 725 m



snelheidsprofiel, raai B, 1038 m



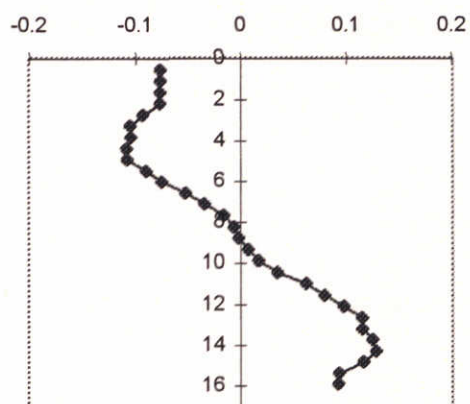
snelheidsprofiel, raai B, 1425 m



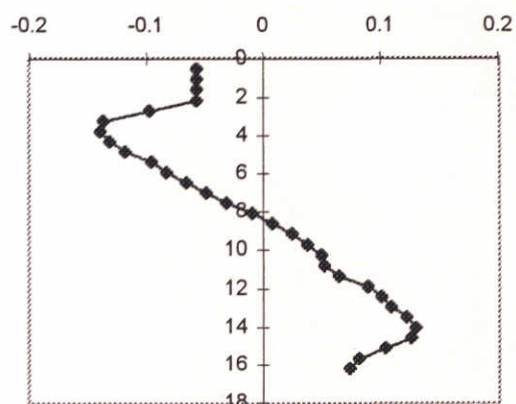
verticale snelheidsprofielen gemeten door ADCP tijdens maximale vloedstroomsnelheid

fig 3.4d

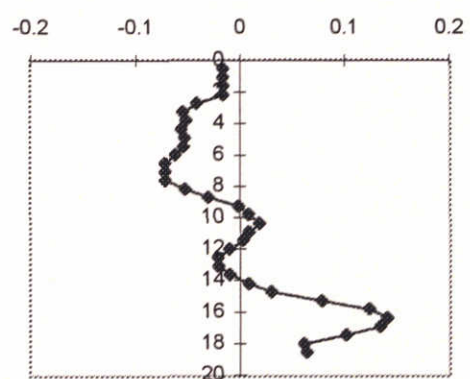
dwarsprofiel op 103 m, raai B



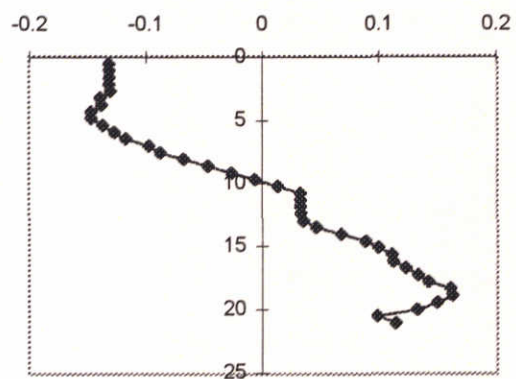
dwarsprofiel op 271 m, raai B



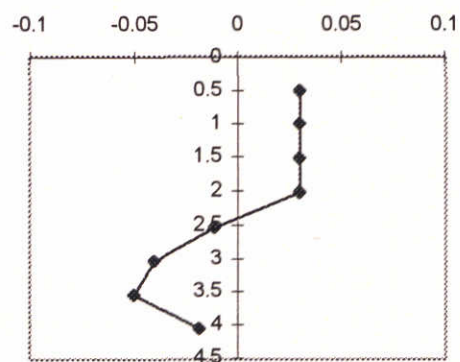
dwarsprofiel op 582 m, raai B



dwarsprofiel op 880 m, raai B



dwarsprofiel op 1270 m, raai B

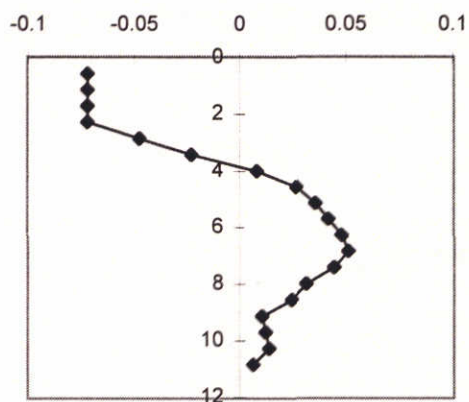


—●— ADCP metingen

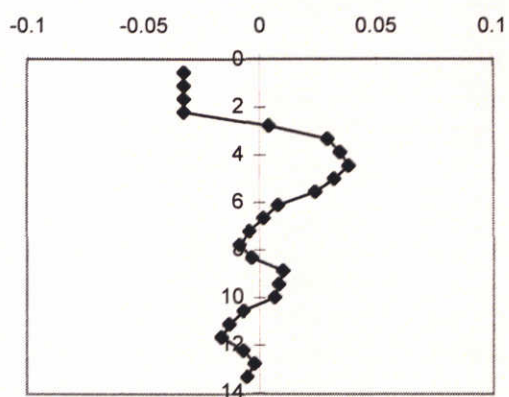
verticale dwarsprofielen gemeten door ADCP tijdens maximale ebstroomsnelheid

fig 3.4e

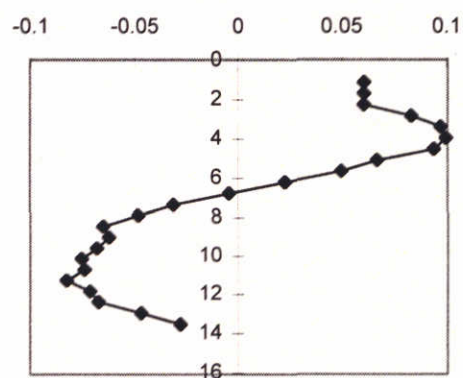
dwarsprofiel op 142 m, raai C



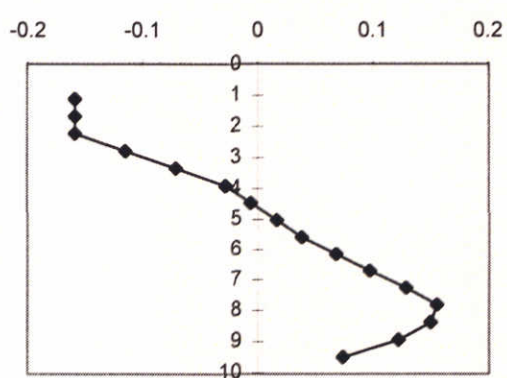
dwarsprofiel op 252 m, raai C



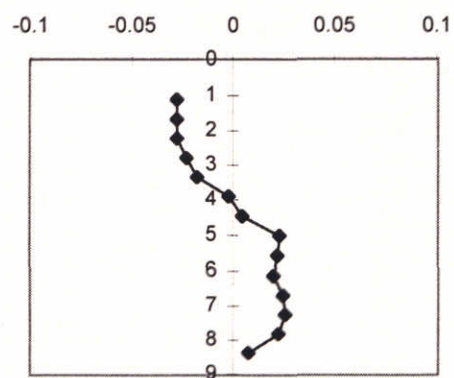
dwarsprofiel op 720 m, raai C



dwarsprofiel op 1470 m, raai C



dwarsprofiel op 1863 m, raai C

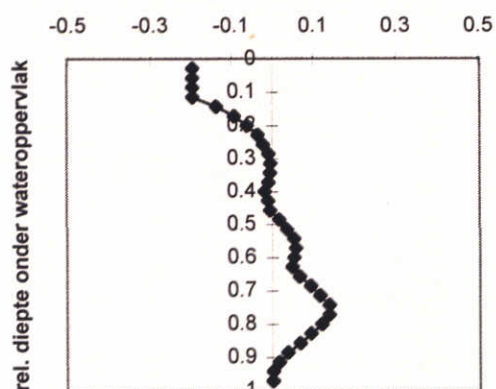


—◆— ADCP
metingen

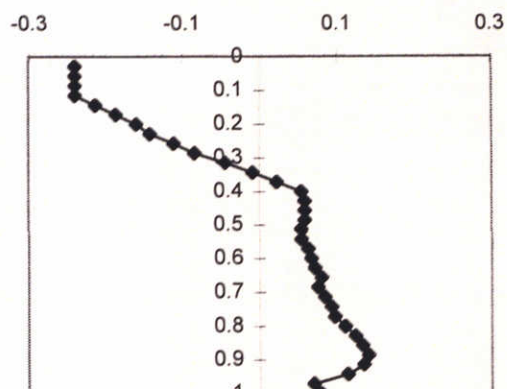
verticale dwarsprofielen gemeten door ADCP tijdens maximale ebstroomsnelheid

fig 3.4f

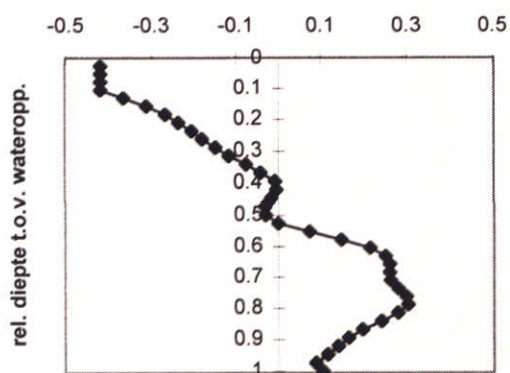
dwarsprofiel op 218 m, raai B



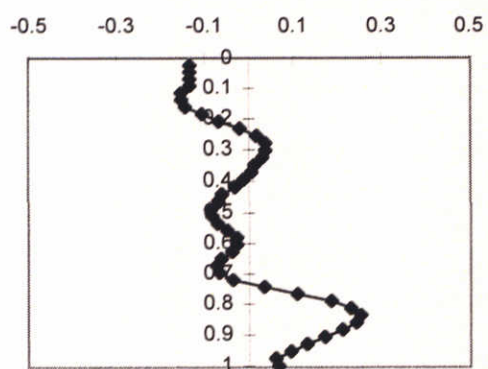
dwarsprofiel op 411 m, raai B



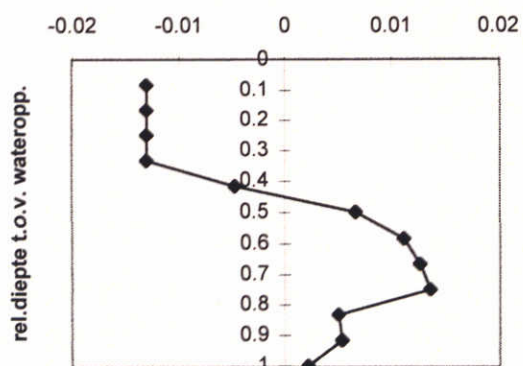
dwarsprofiel, raai B, 725 m



snelheidsprofiel, raai B 1038 m



dwarsprofiel, raai B, 1425 m

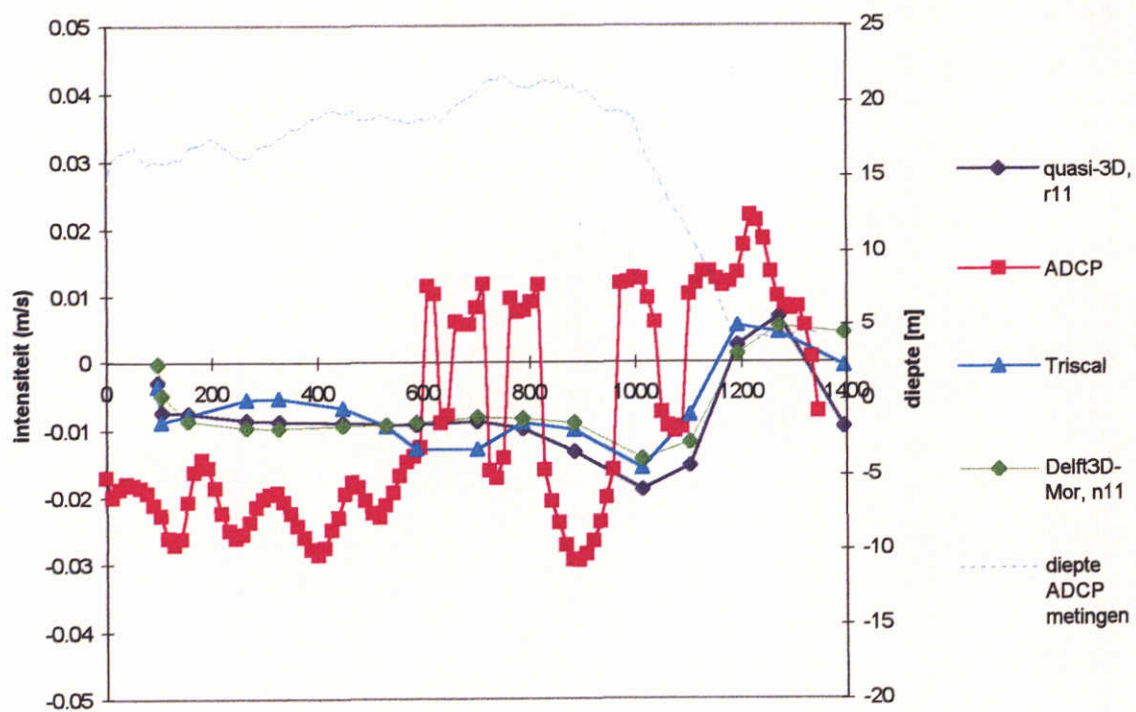


—●— ADCP metingen

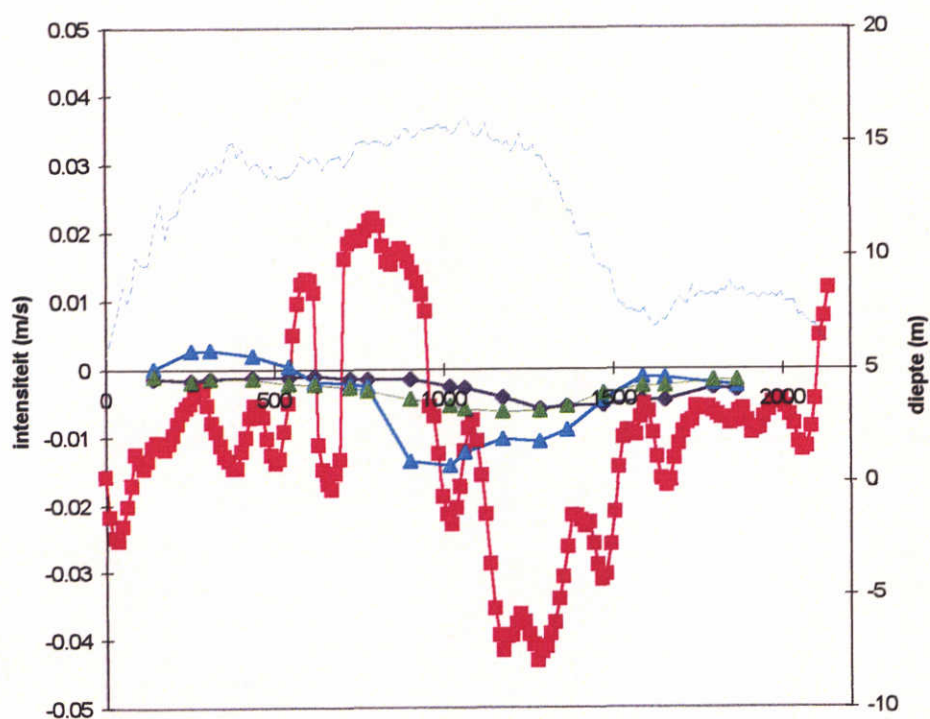
verticale dwarsprofielen gemeten door ADCP tijdens maximale vloedstroomsnelheid

fig 3.4g

Intensiteit SSD, raai B



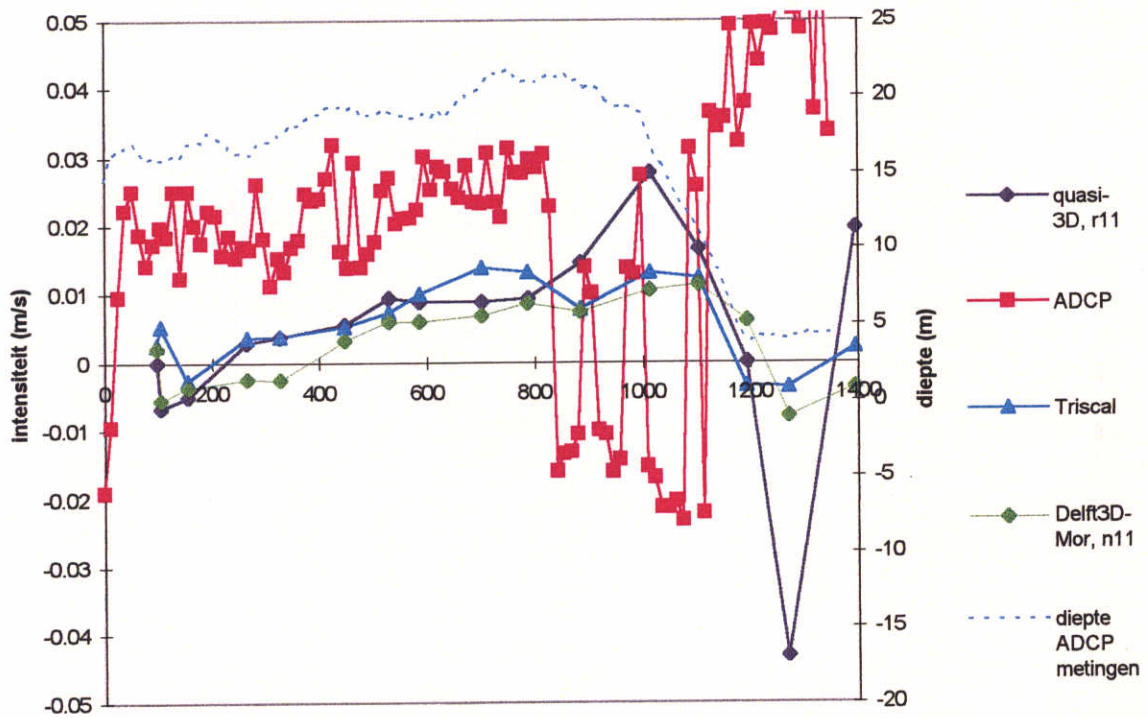
Intensiteit SSD, raai C



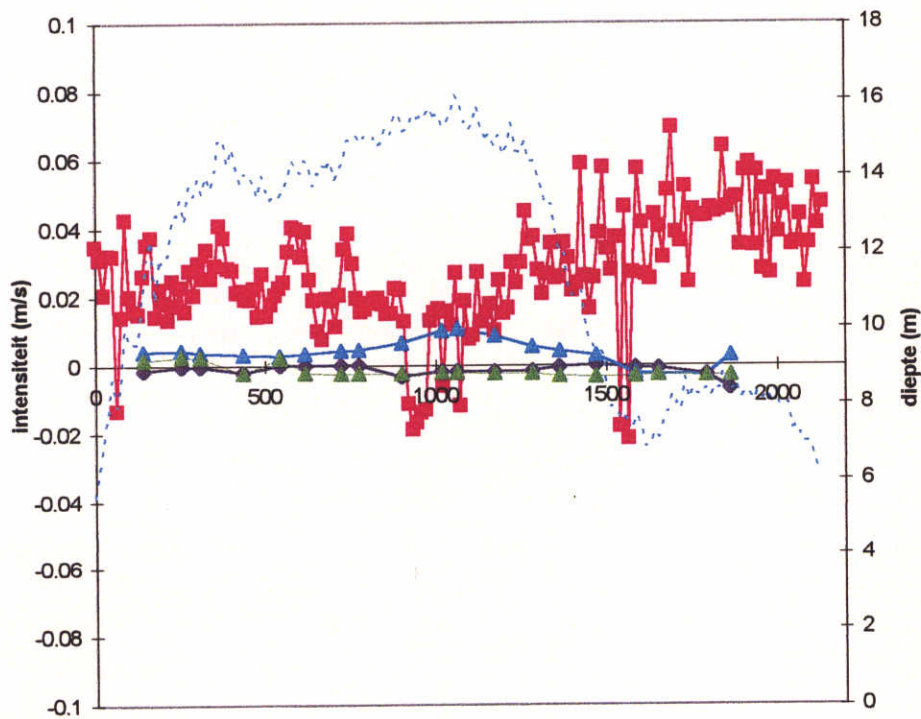
intensiteit SSD als functie van de afstand langs
raai B en raai C, maximale ebstroomsnelheid

fig 3.5a

Intensiteit SSL, raai B

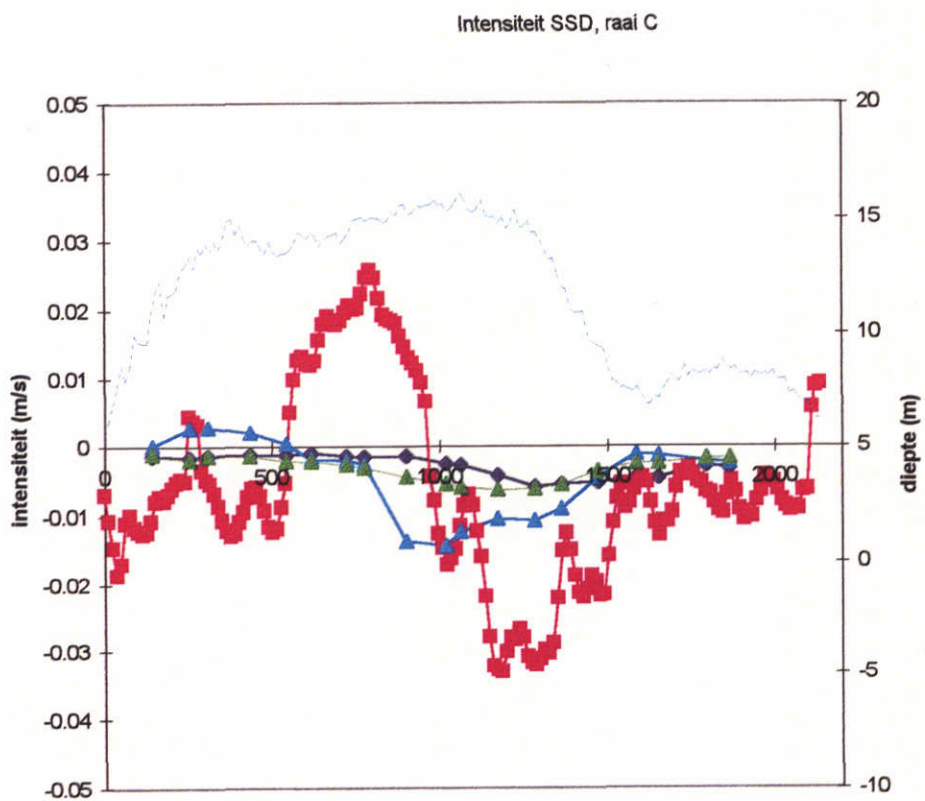
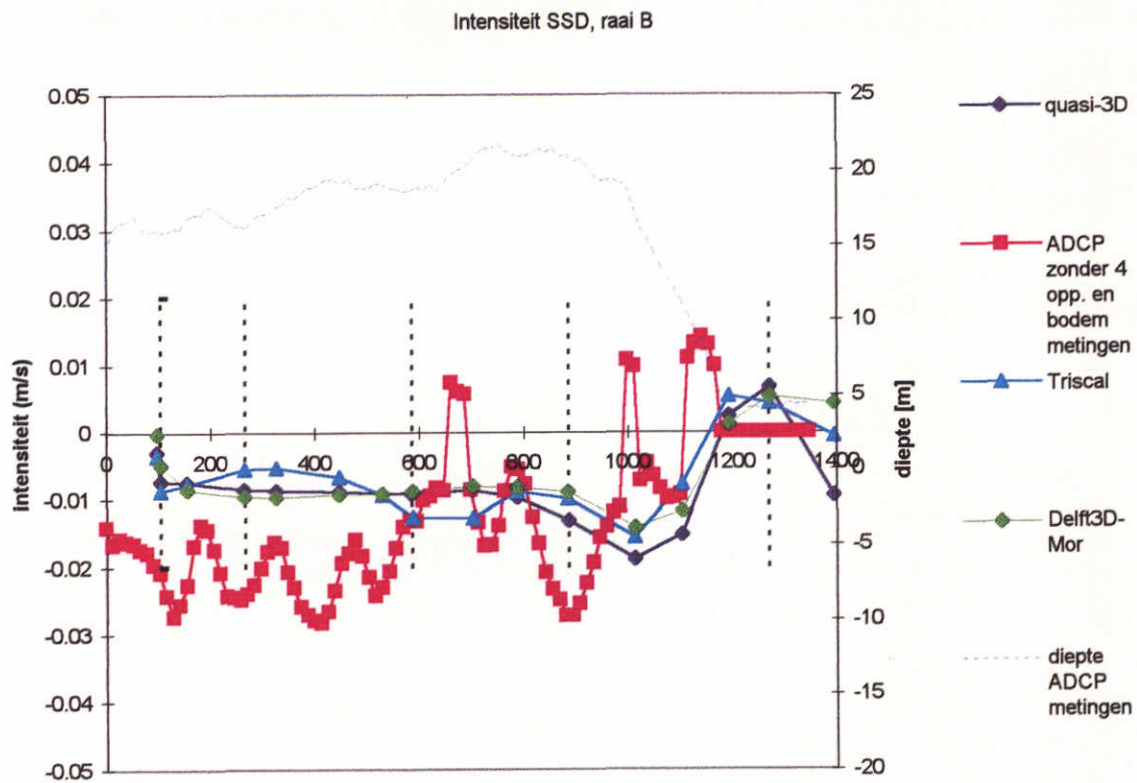


Intensiteit SSL, raai C



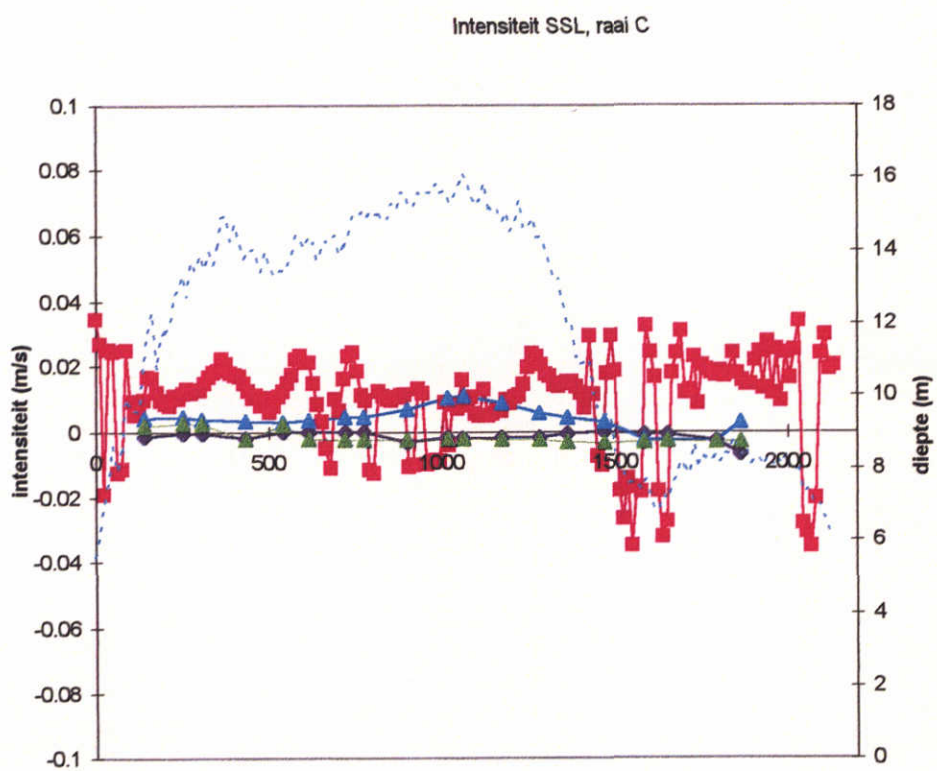
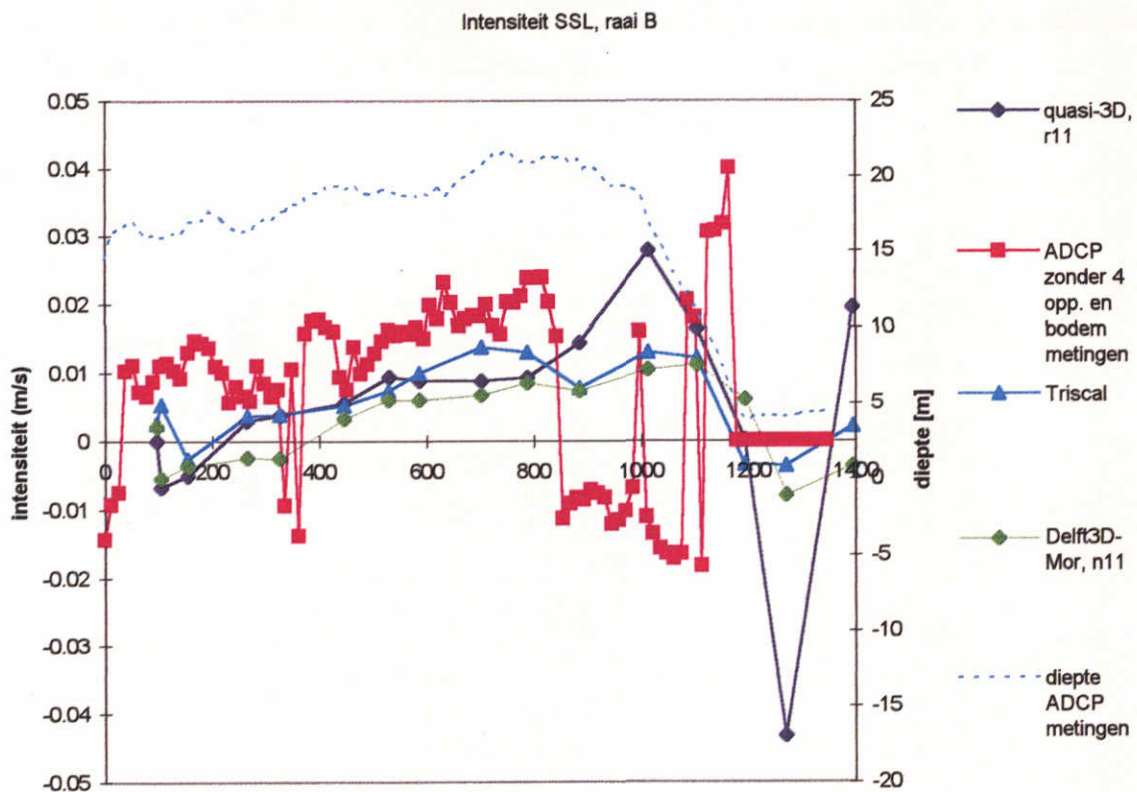
intensiteit SSL als functie van de afstand langs
raai B en raai C, maximale ebstroomsnelheid

fig 3.5b



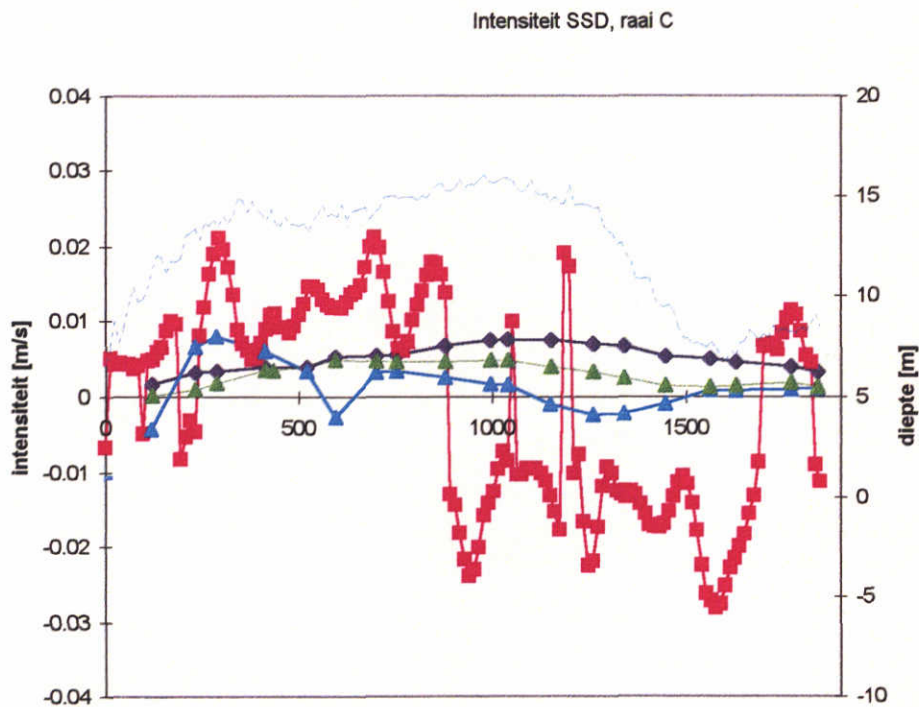
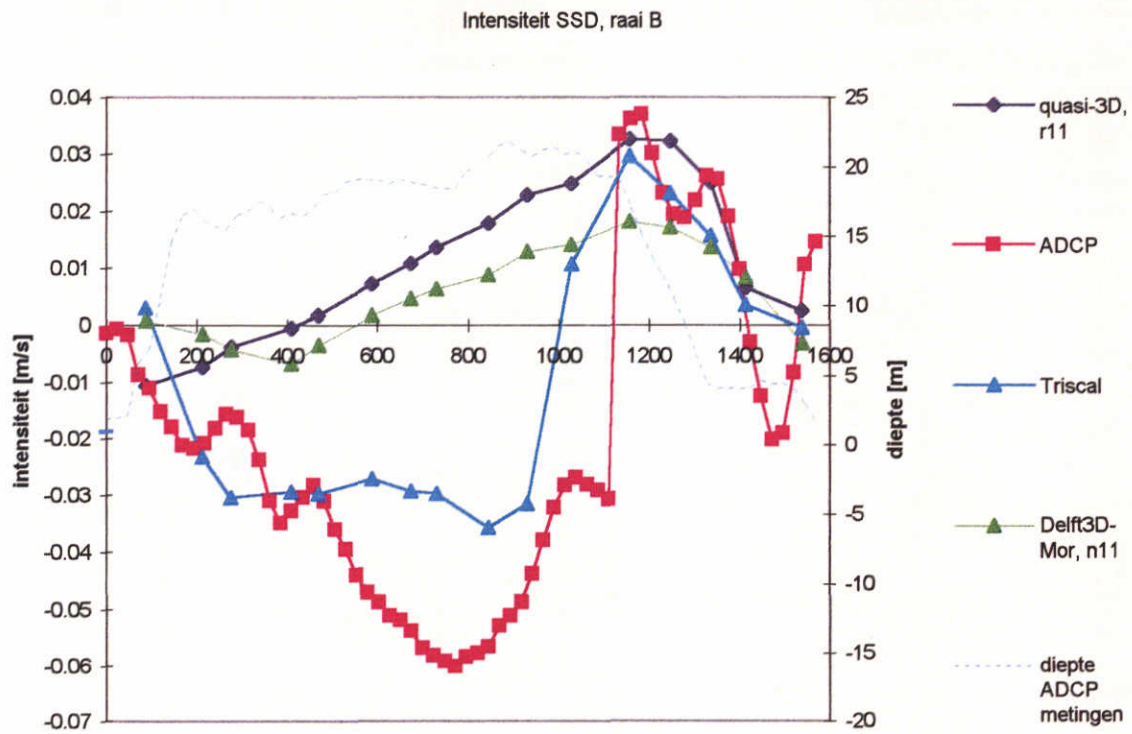
intensiteit SSD als functie van de afstand langs
raai B en raai C, maximale ebstroomsnelheid

fig 3.6a



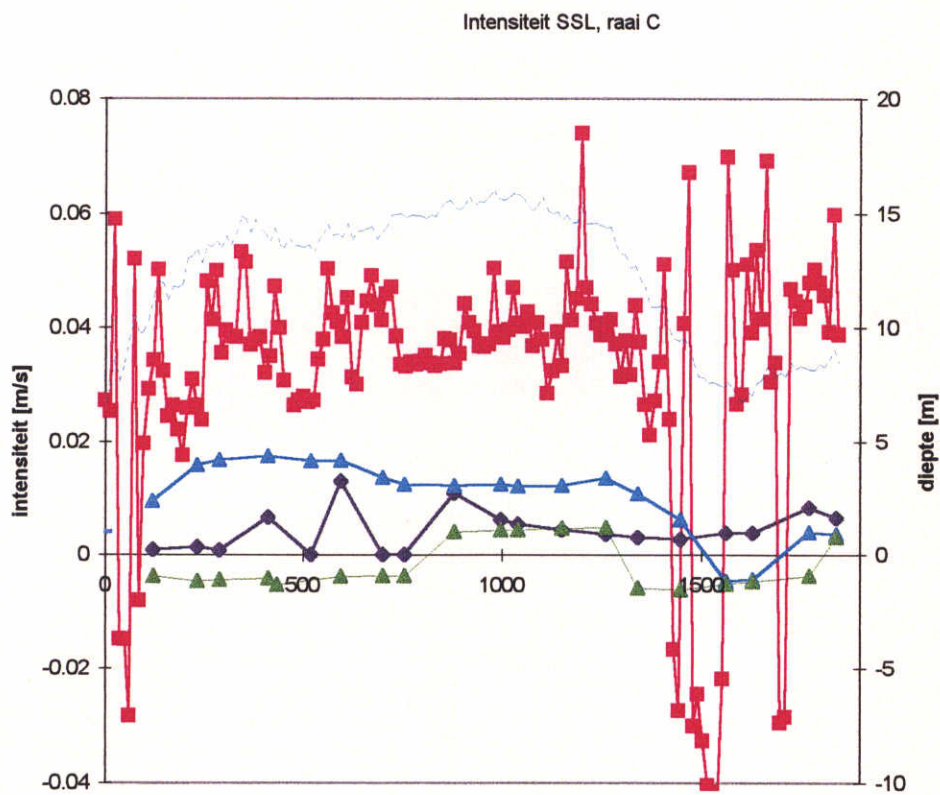
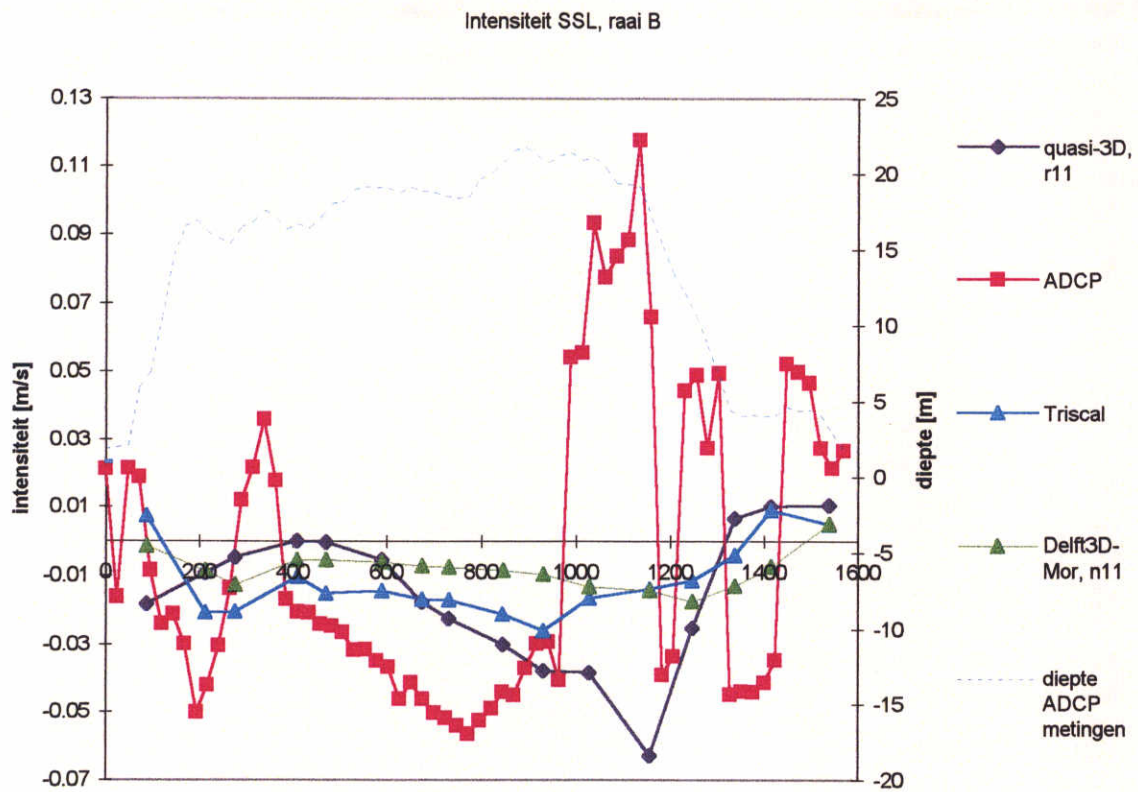
intensiteit SSL als functie van de afstand langs
raai B en raai C, maximale ebstroomsnelheid

fig 3.6b



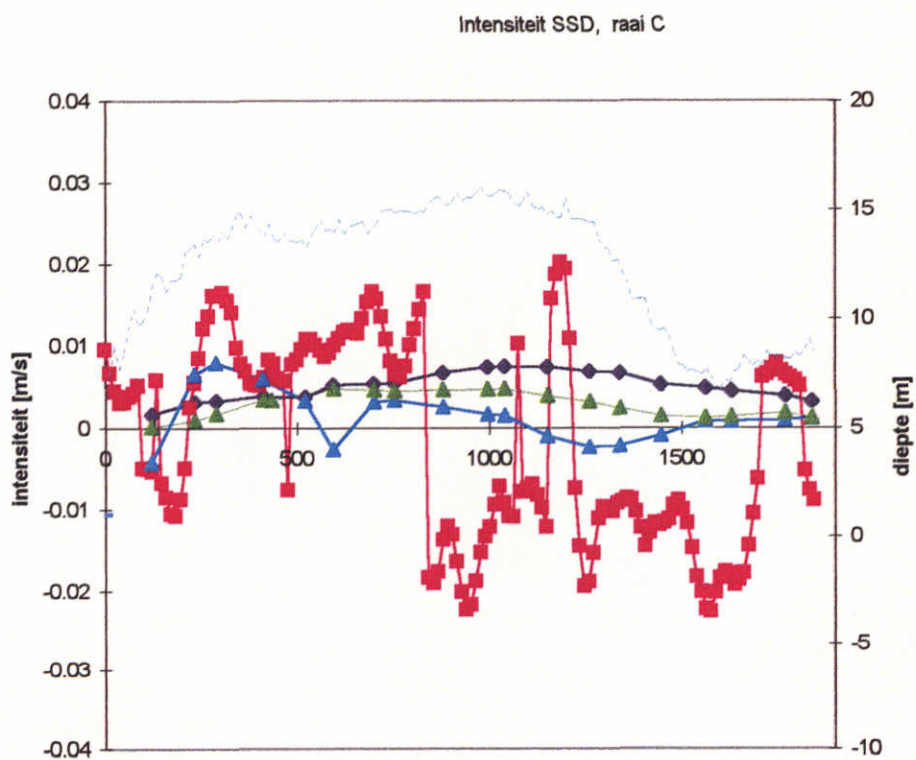
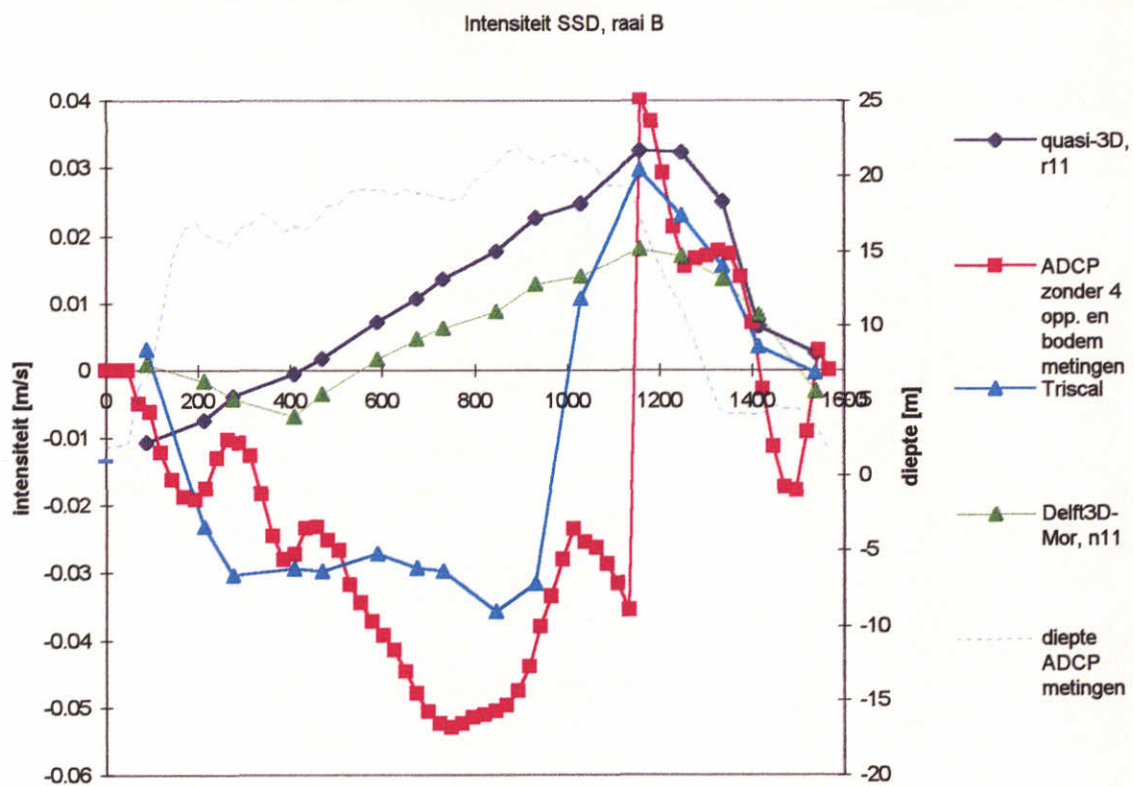
intensiteit SSD als functie van de afstand langs raai B en raai C, maximale vloedstroomsnelheid

fig 3.7a



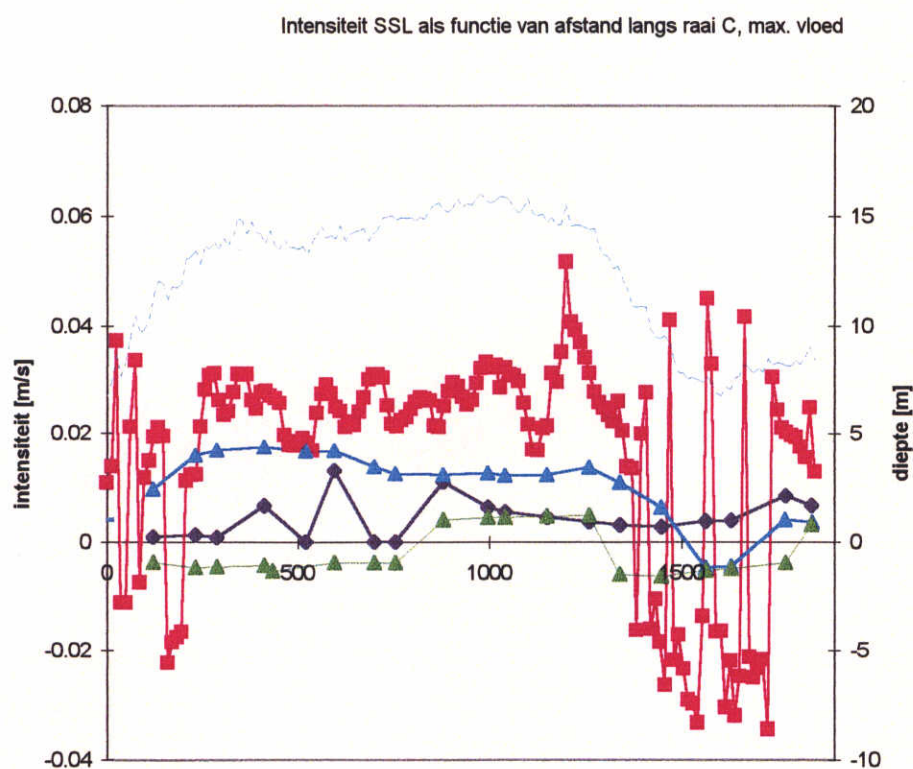
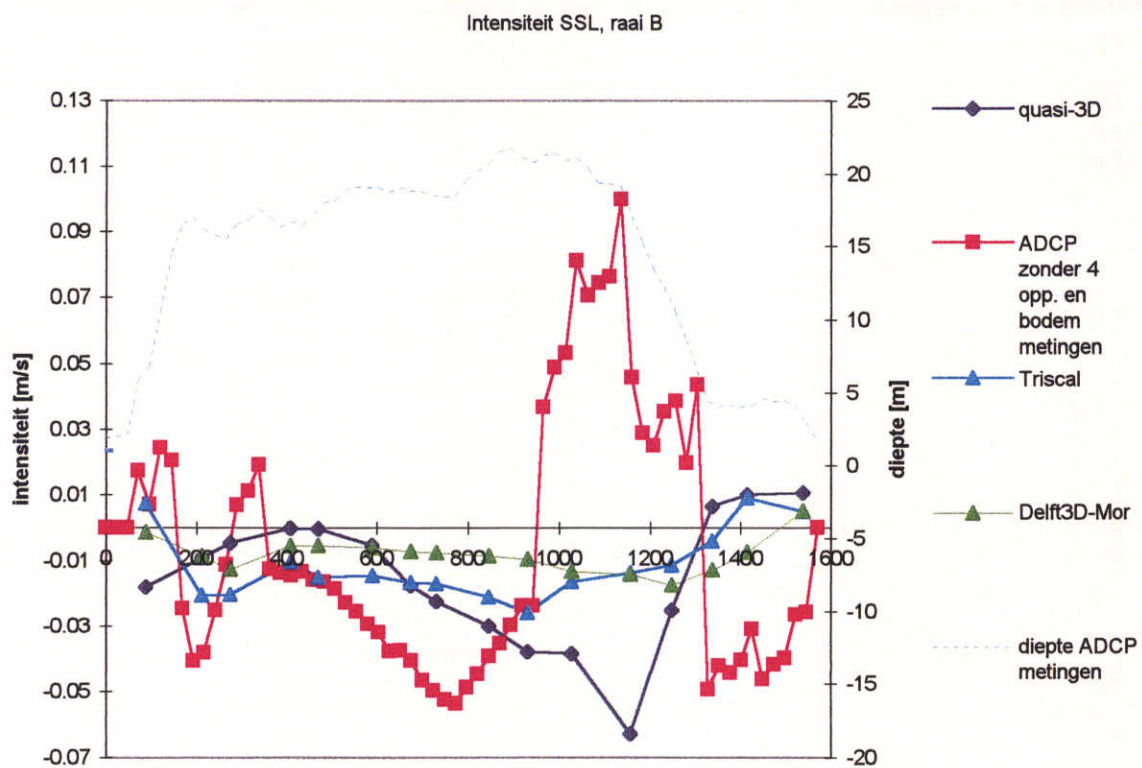
intensiteit SSL als functie van de afstand langs
raai B en raai C, maximale vloedstroomsnelheid

fig 3.7b



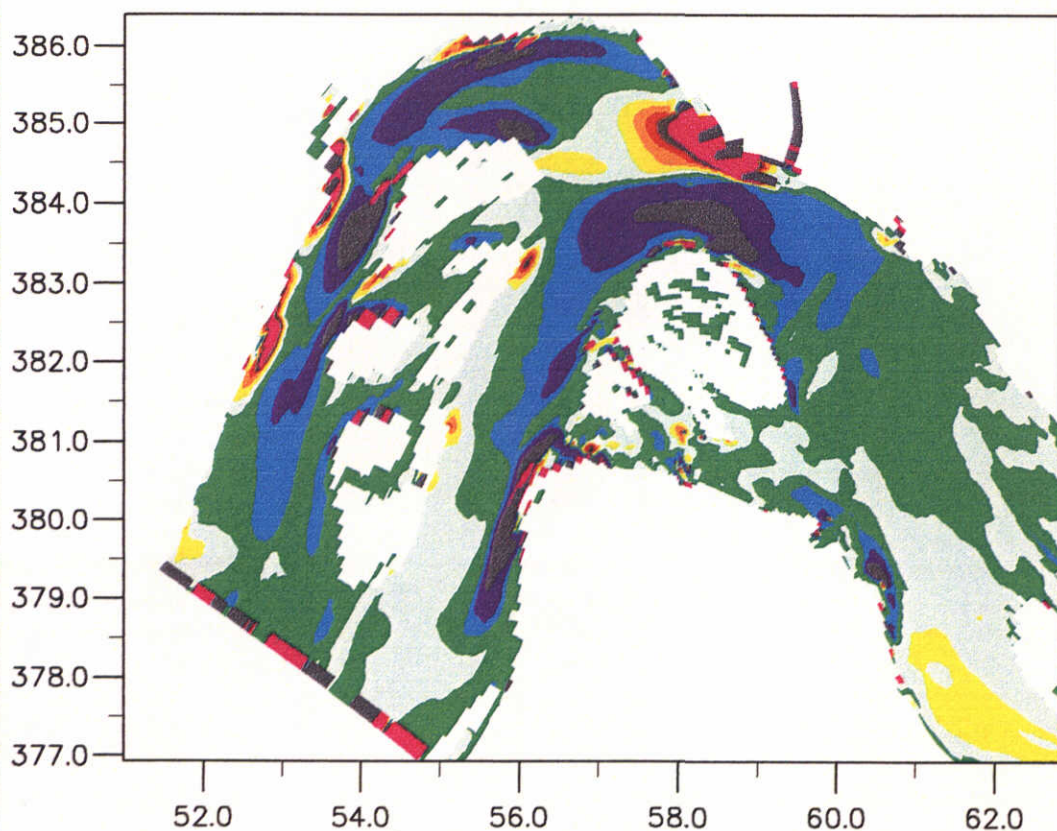
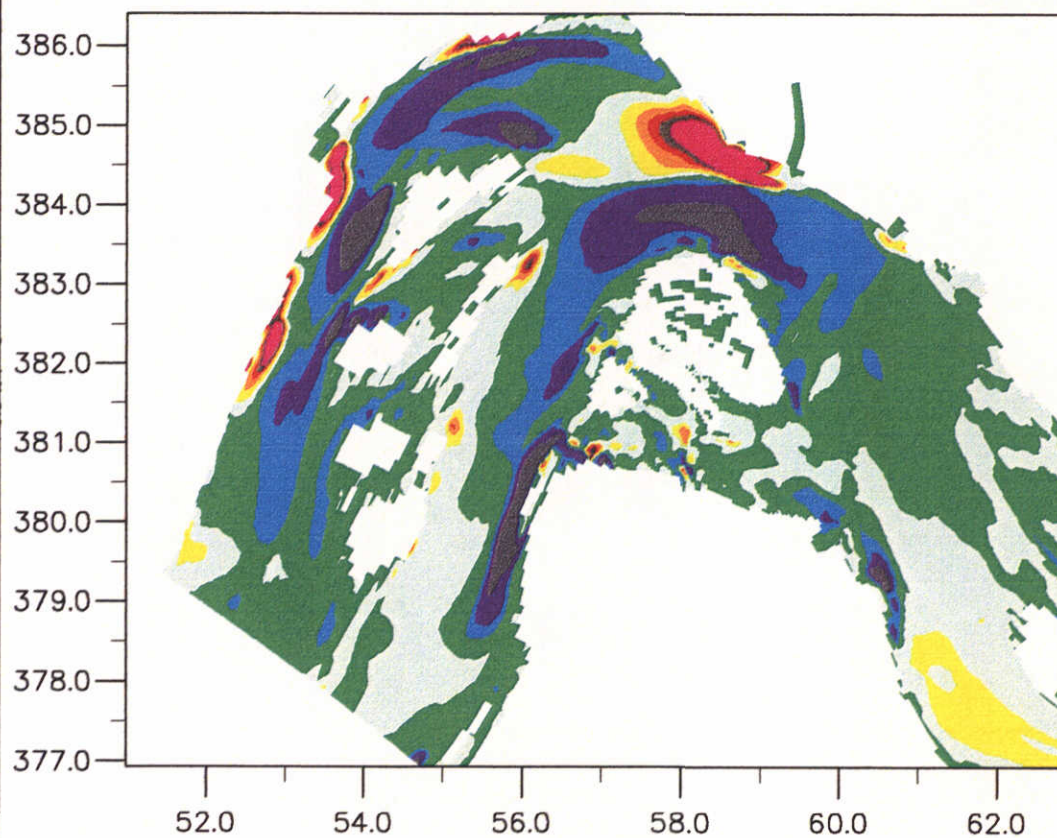
intensiteit SSD als functie van de afstand langs raai B en raai C, maximale vloedstroomsnelheid

fig 3.8a



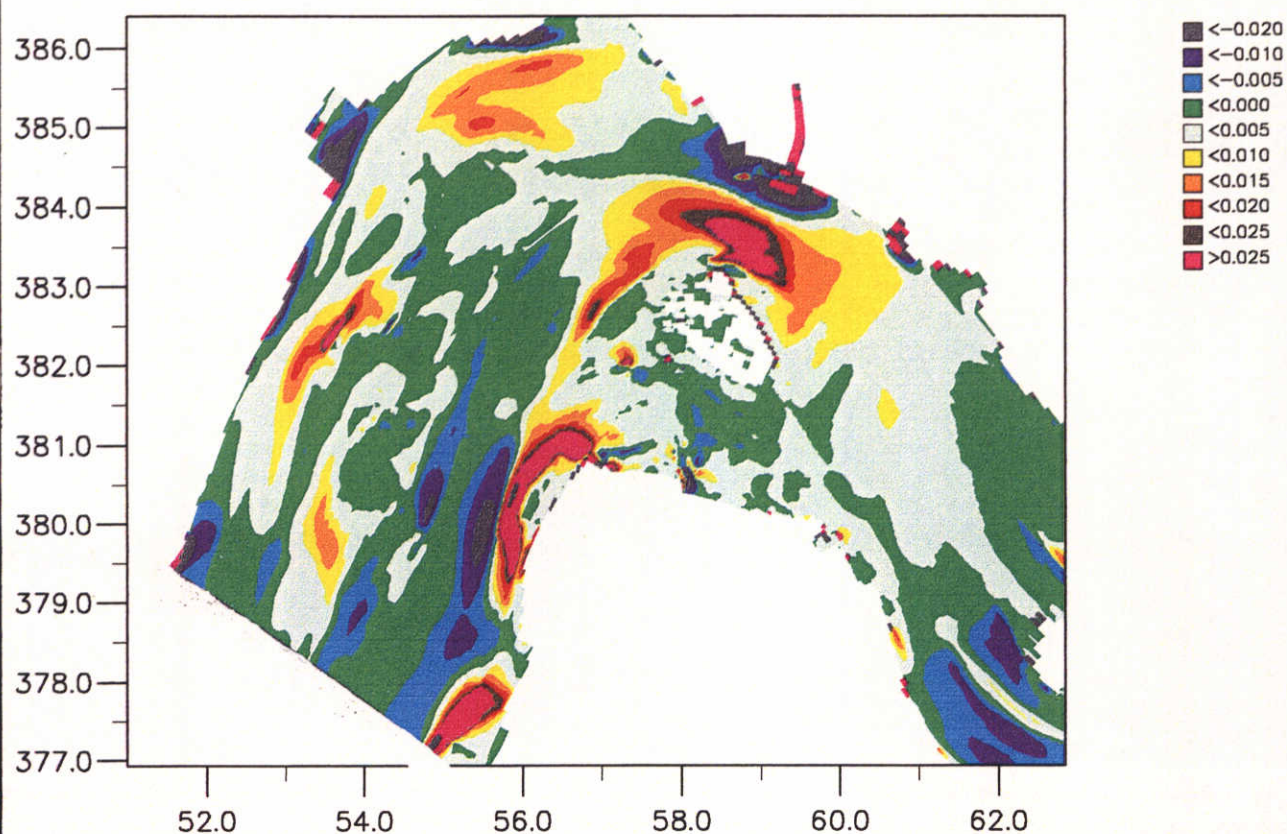
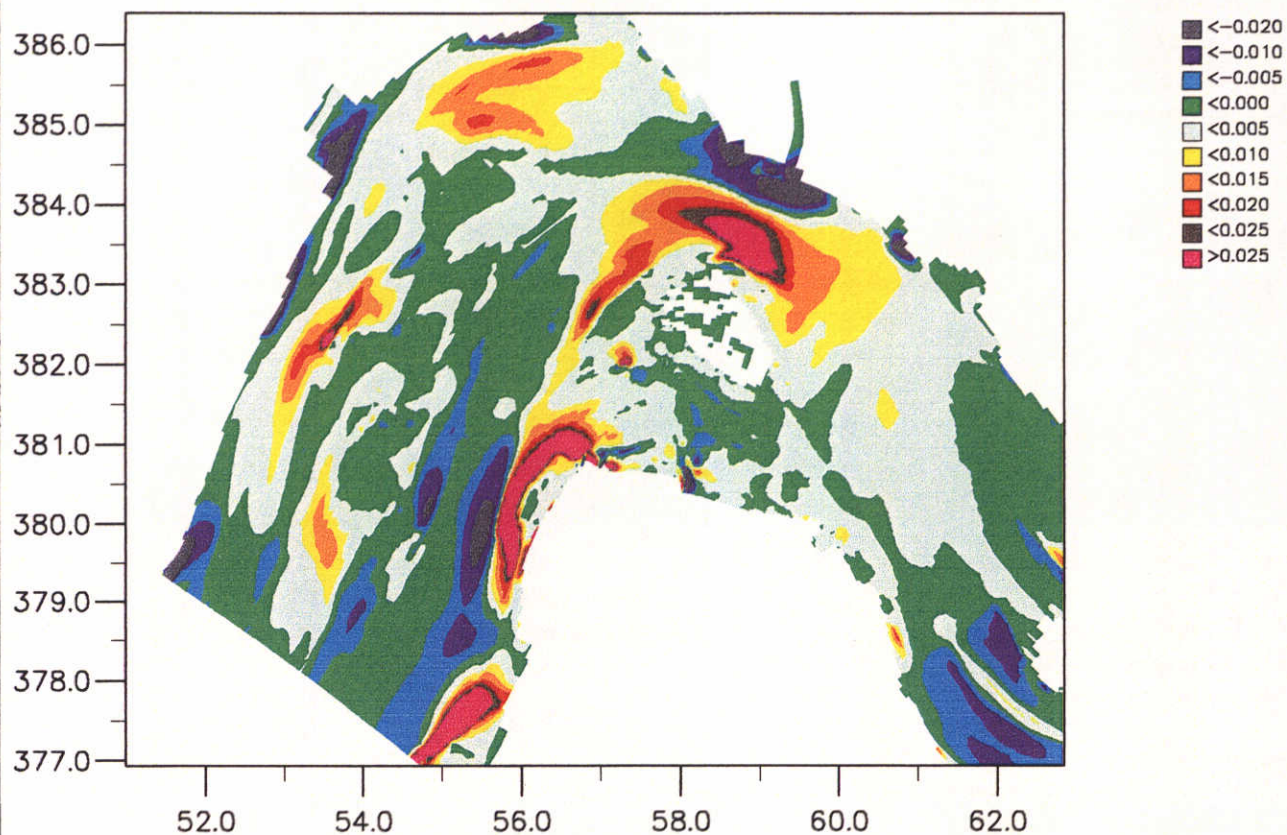
intensiteit SSL als functie van de afstand langs raai B en raai C, maximale vloedstroomsnelheid

fig 3.8b



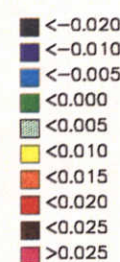
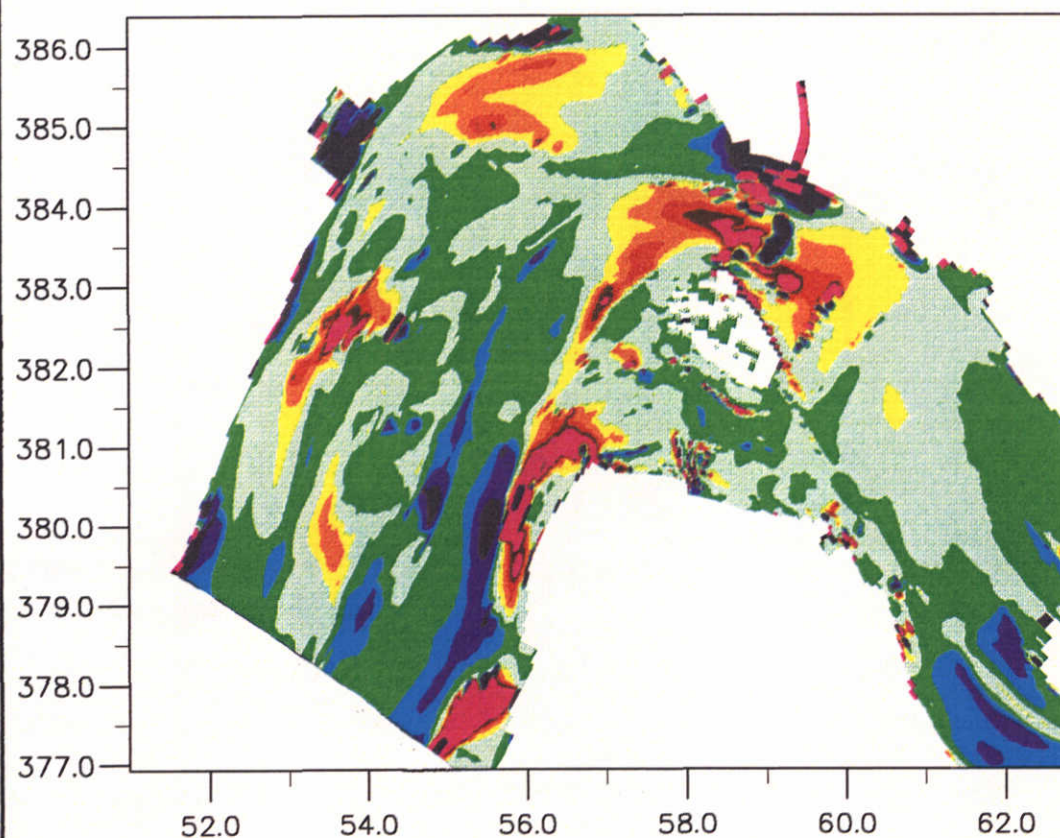
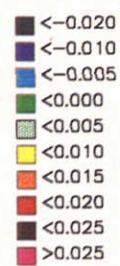
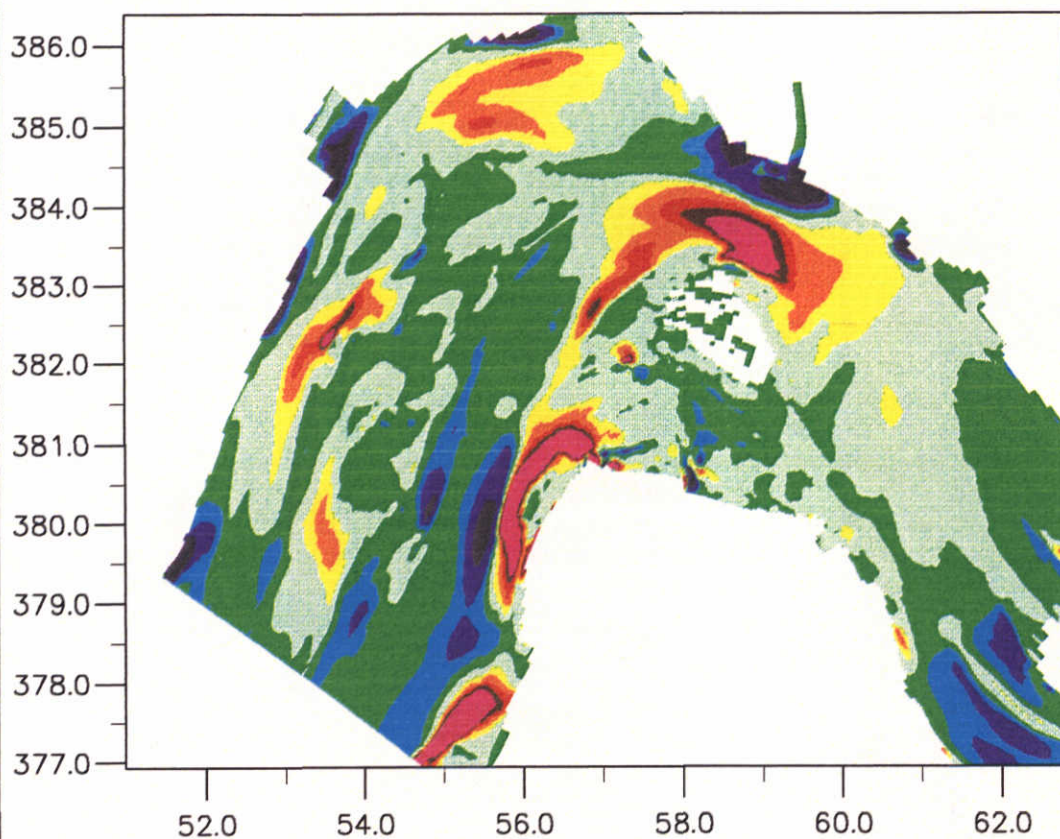
Secundaire stroming in dwarsrichting (boven) en SSD
gecorrigeerd met interactie van sec. stroming in langsrichting (onder)
Delft2D-Mor, maximale ebstroming

fig 3.9a



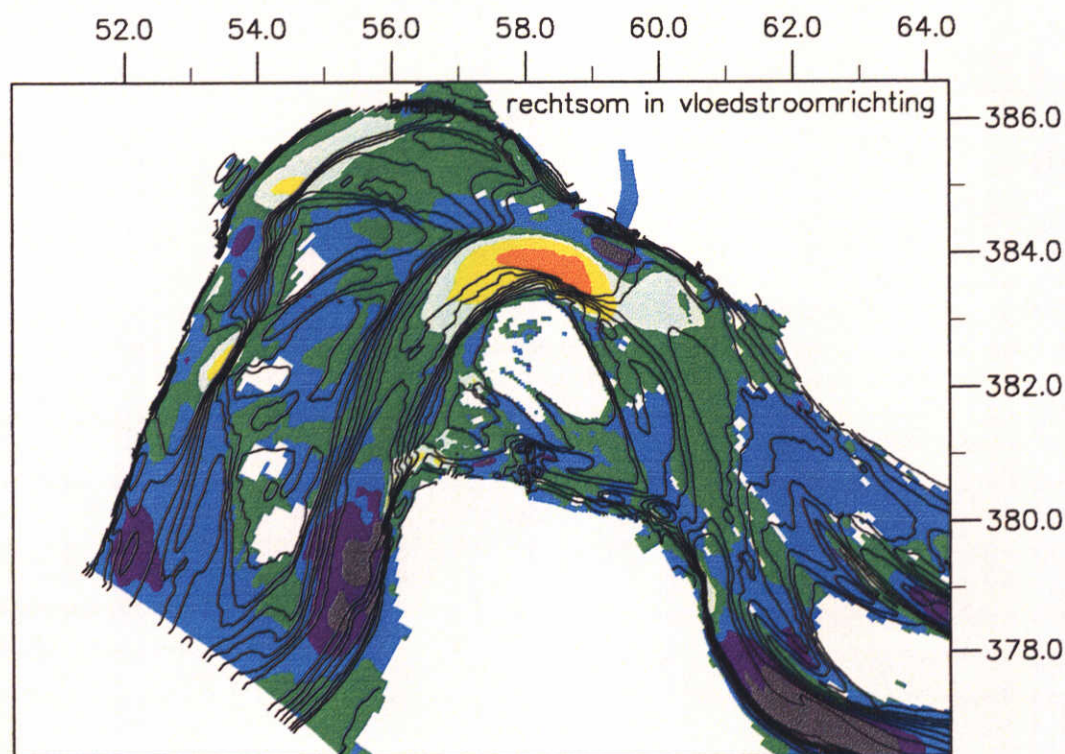
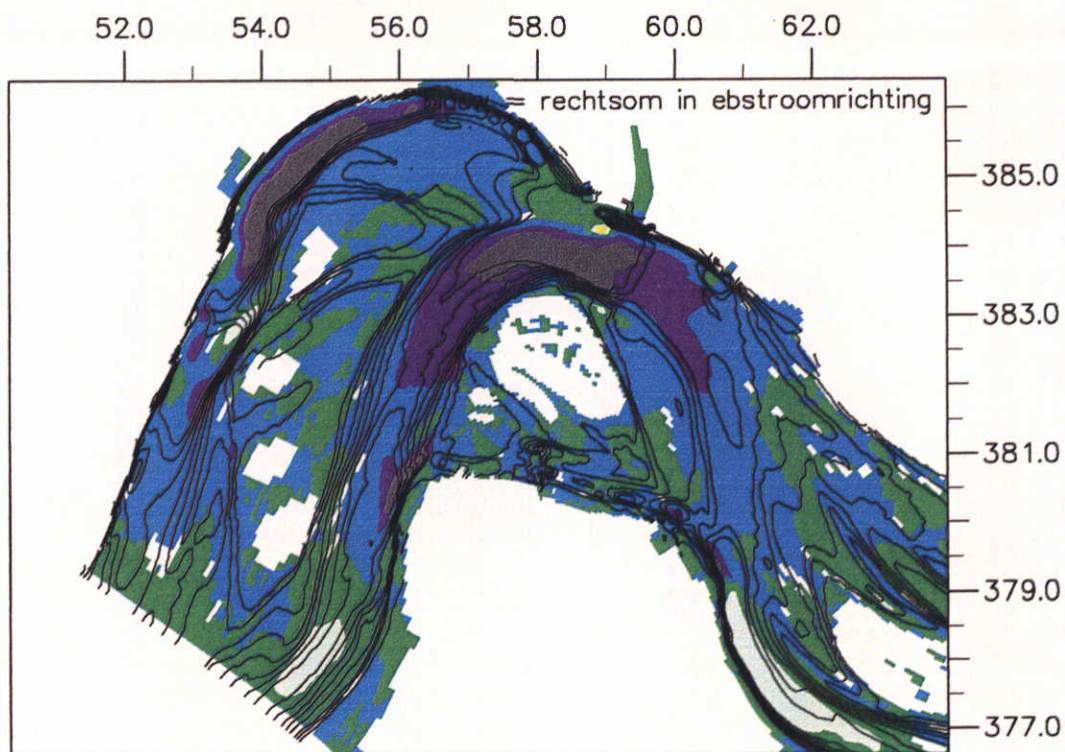
Secundaire stroming in dwarsrichting (boven) en SSD
gecorrigeerd met invloed van sec. stroming in langsrichting (onder)
Delft2D-Mor, maximale vloedstroming

fig 3.9b



Secundaire stroming in dwarsrichting uit n06 (boven)
 en gecorrigeerd met invloed van sec. stroming in langsrichting, $\beta = 10$
 Quasi-3D, maximale vloedstroming

fig 3.10

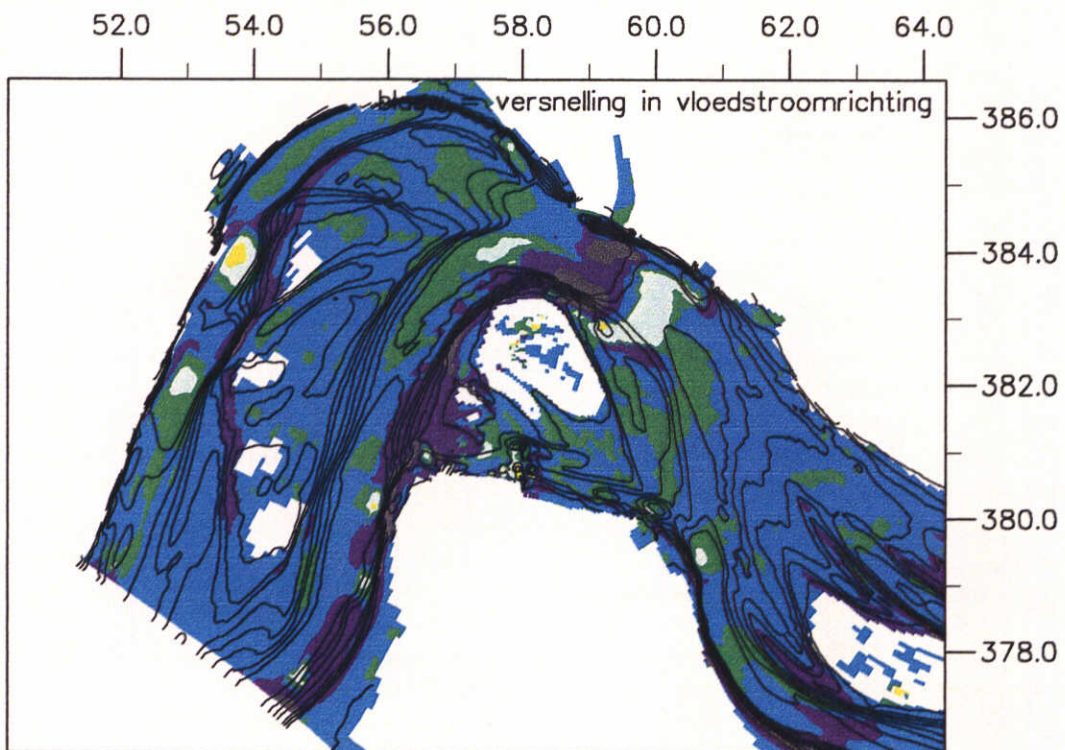
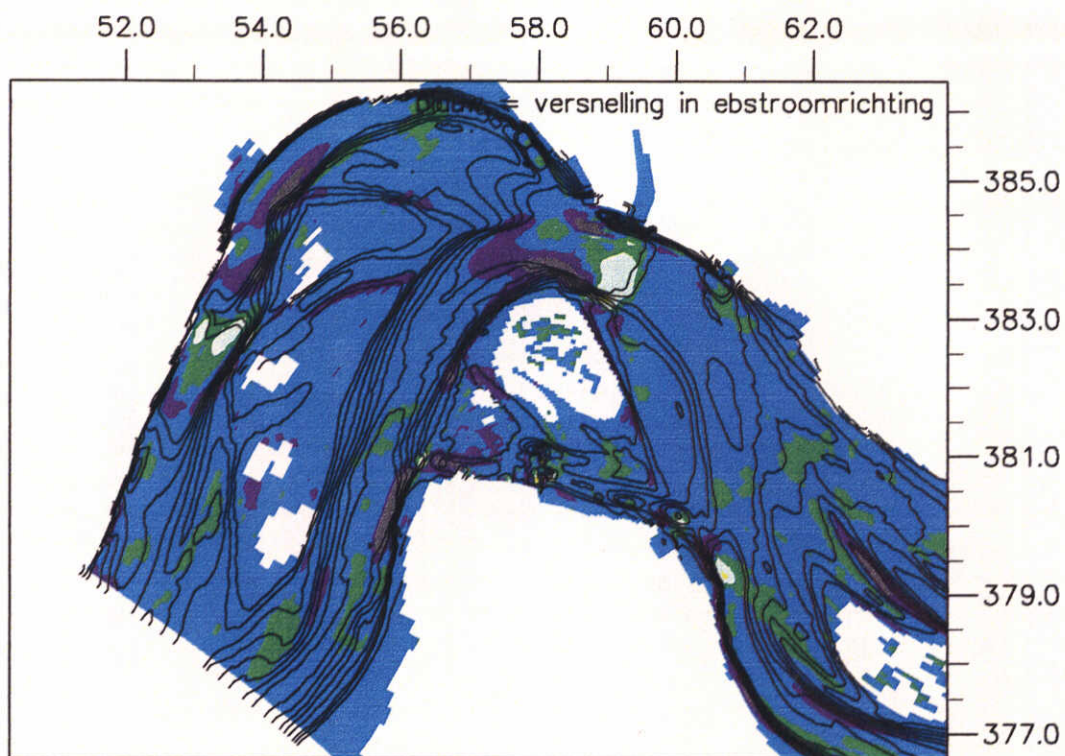


Simulatie n11, intensiteit SSD
tijdens maximale ebstroomsnelheid (boven)
en tijdens maximale vloedstroom snelheid (onder)

20/01/2000

fig 4.2a

3D Delft3D-Mor



Simulatie n11, intensiteit SSL

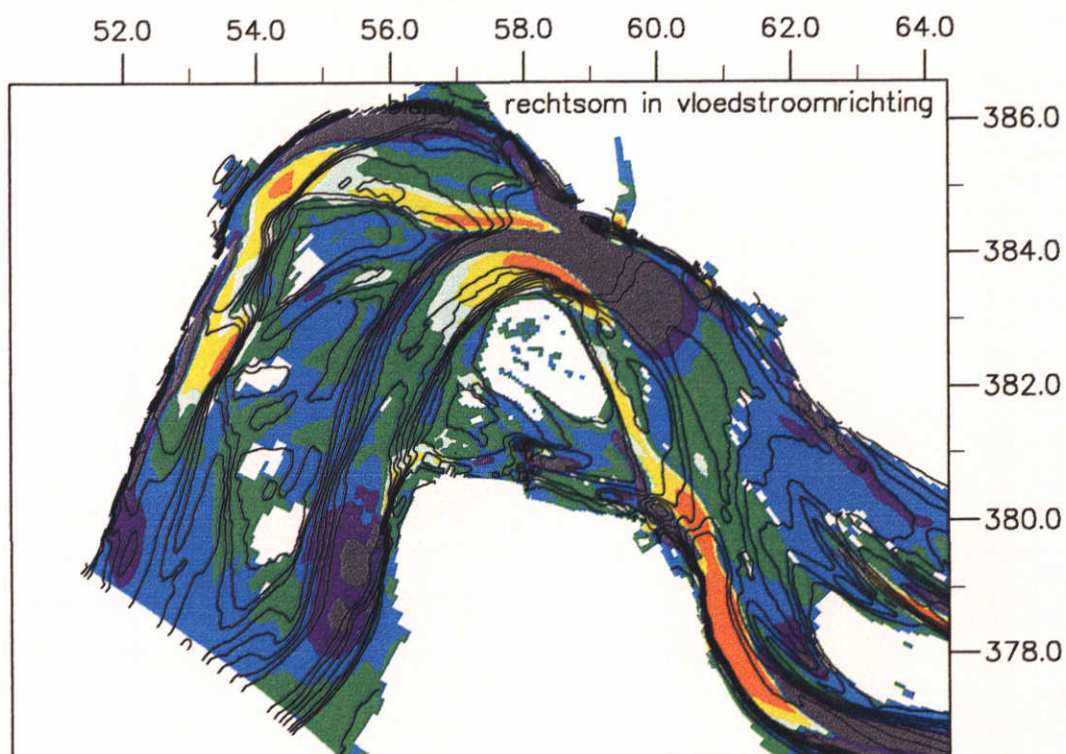
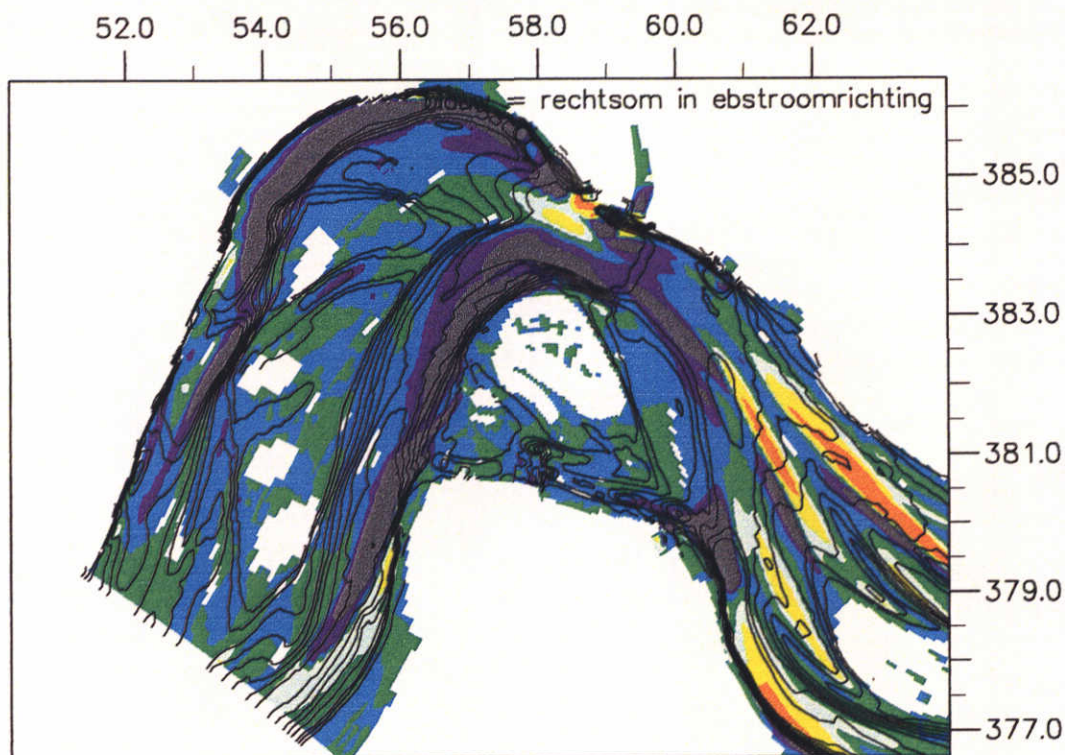
tijdens maximale ebstroomsnelheid (boven)

en tijdens maximale vloedstroom snelheid (onder)

20/01/2000

fig 4.2b

3D Delft3D-Mor

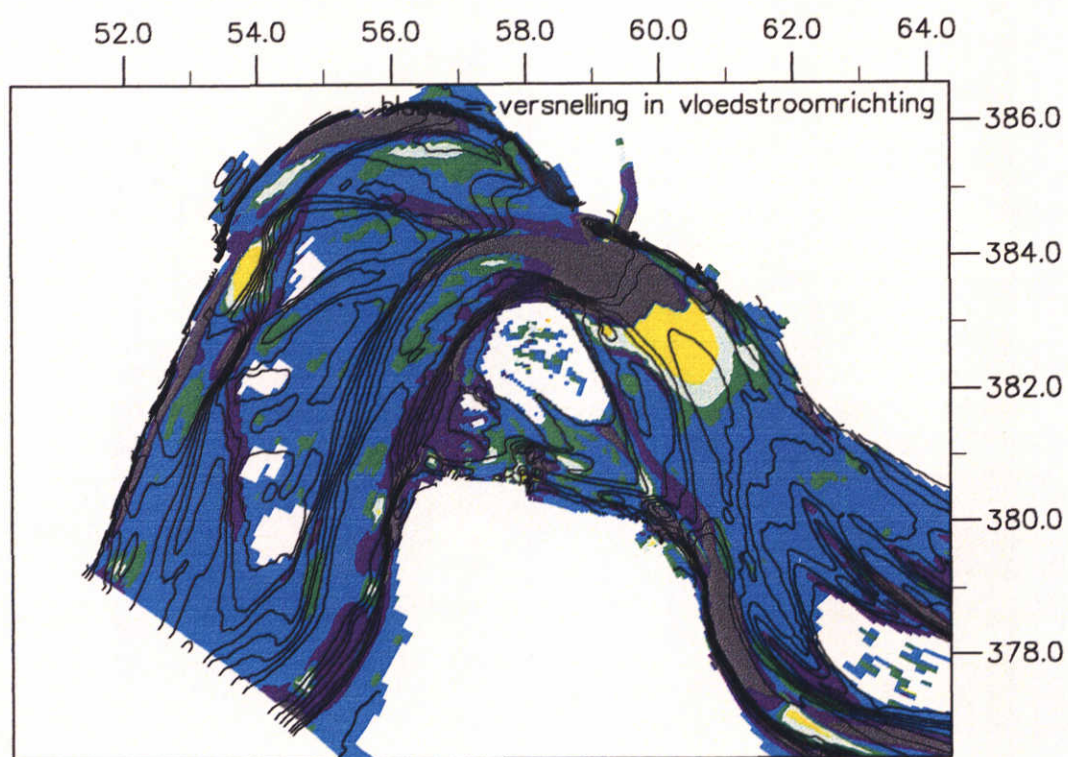
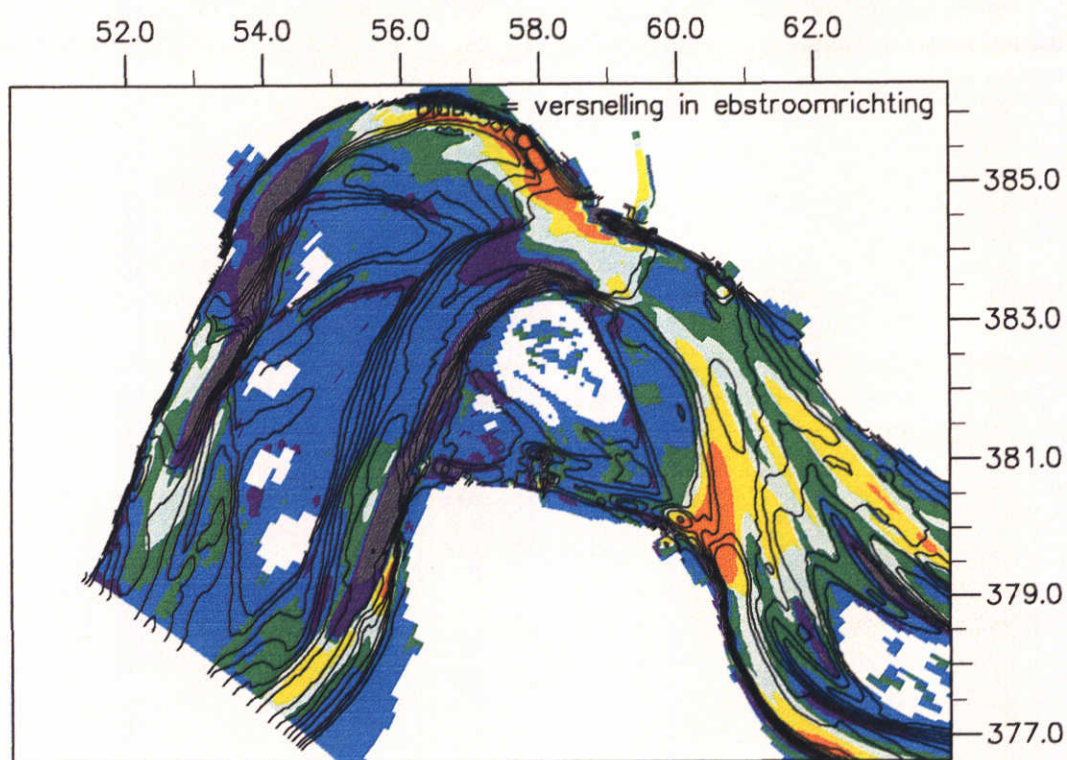


Simulatie n12, intensiteit SSD
 tijdens maximale ebstroomsnelheid (boven)
 en tijdens maximale vloedstroom snelheid (onder)

20/01/2000

fig 4.3a

3D Delft3D-Mor

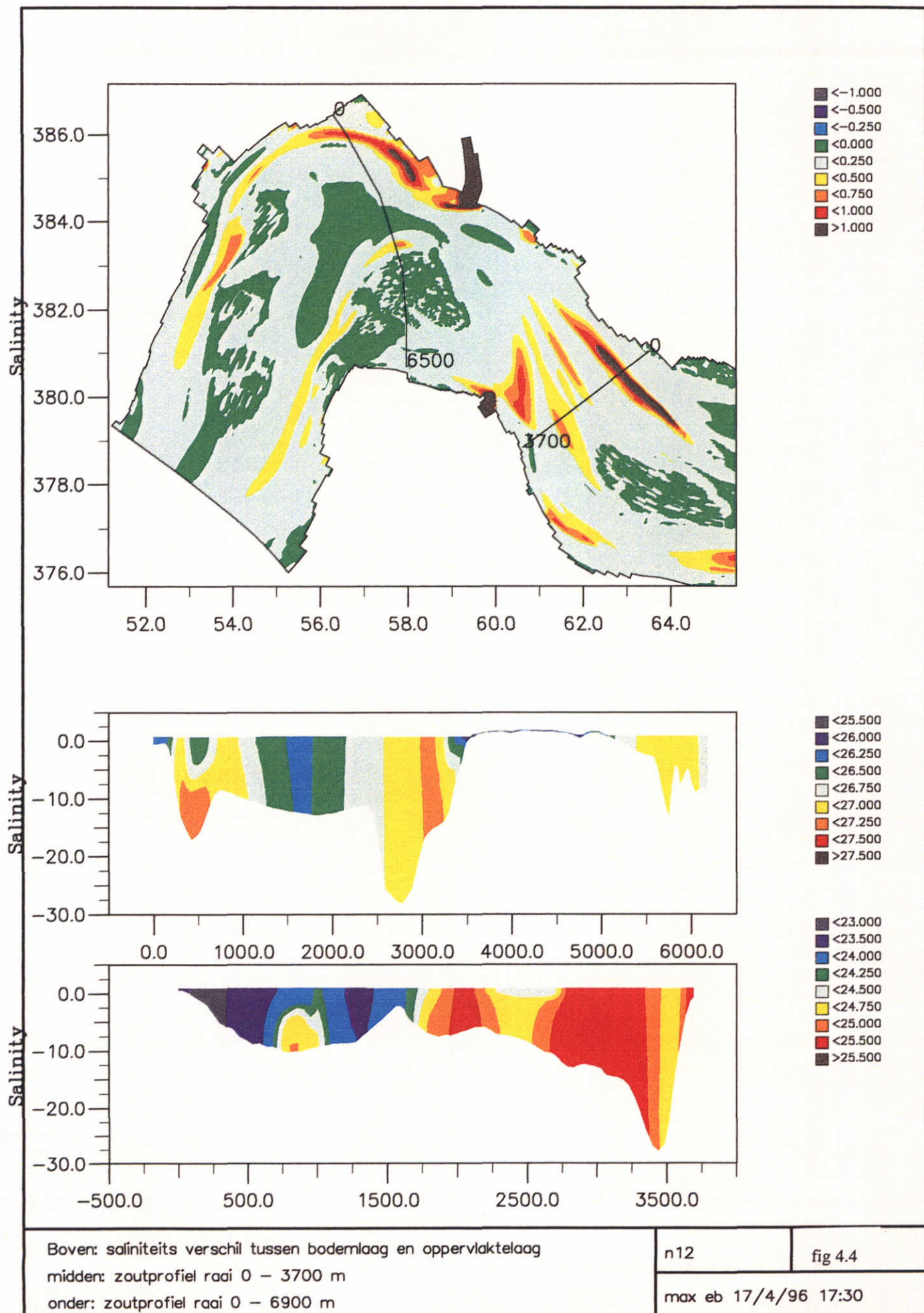


Simulatie n12, intensiteit SSL
 tijdens maximale ebstroomsnelheid (boven)
 en tijdens maximale vloedstroom snelheid (onder)

20/01/2000

fig 4.3b

3D Delft3D-Mor

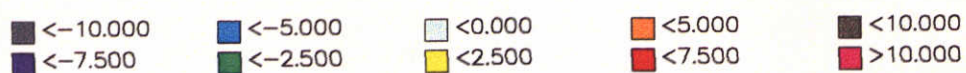
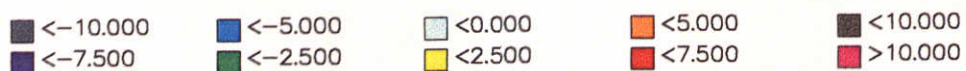


Boven: saliniteits verschil tussen bodemlaag en oppervlaktelaag
 midden: zoutprofiel raai 0 - 3700 m
 onder: zoutprofiel raai 0 - 6900 m

n12

fig 4.4

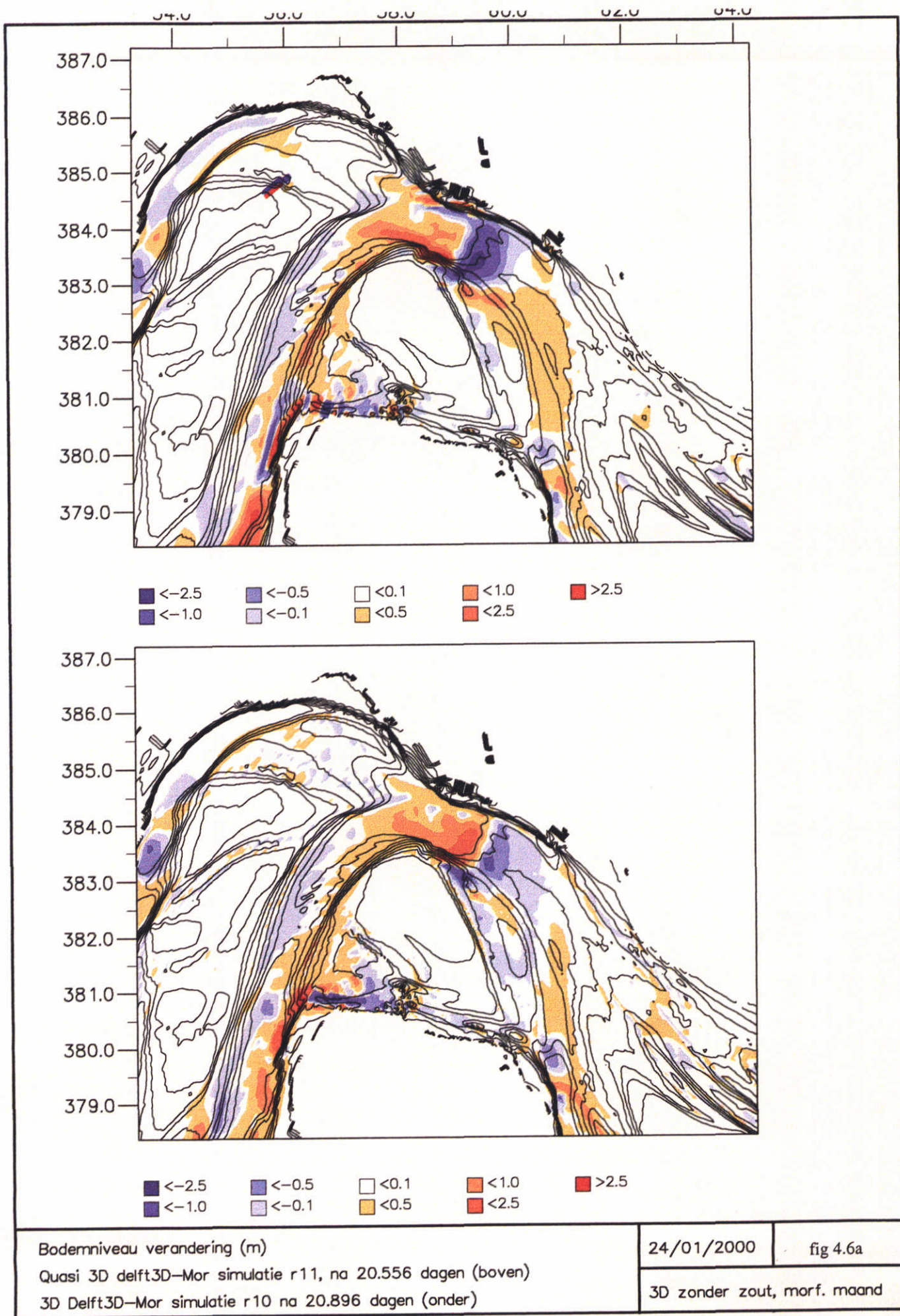
max eb 17/4/96 17:30

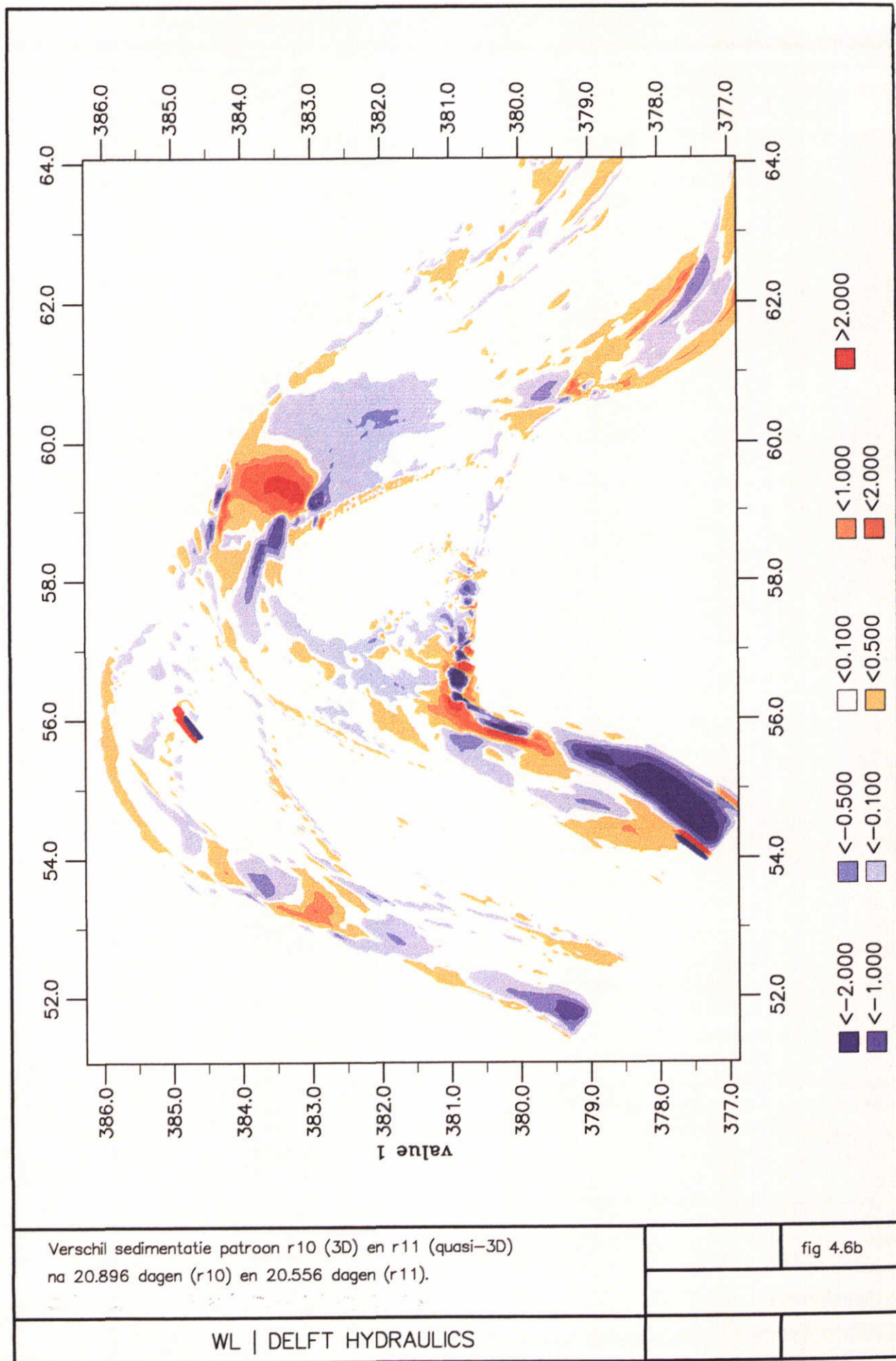


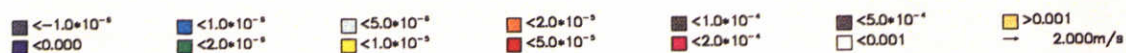
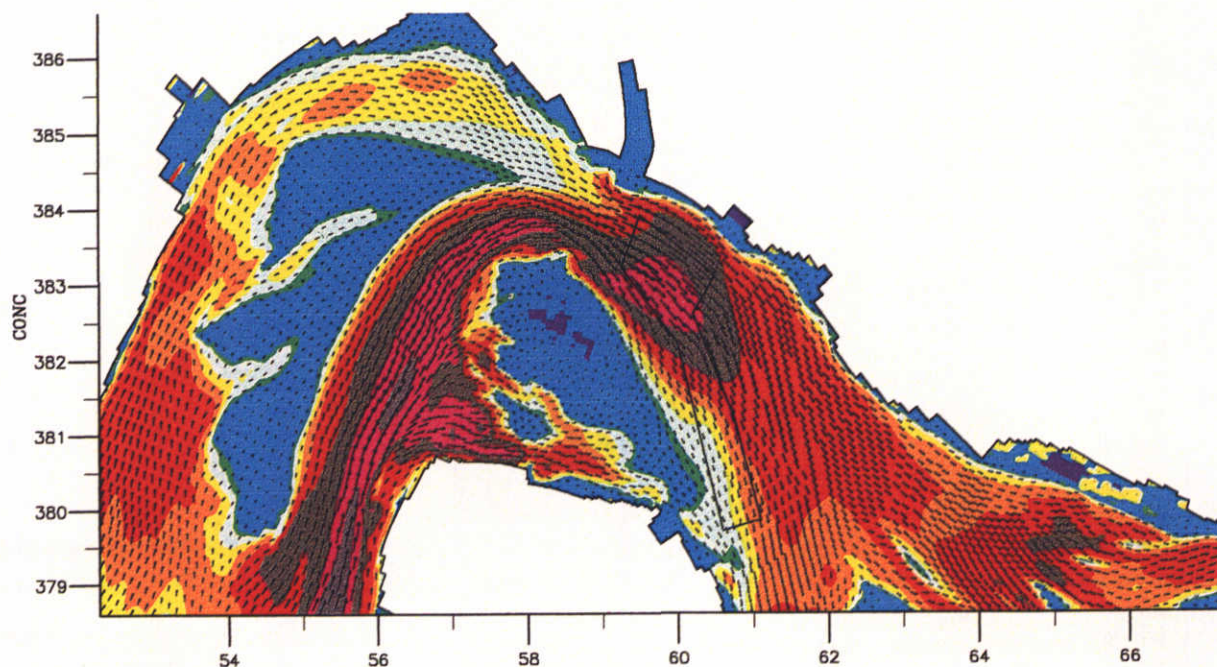
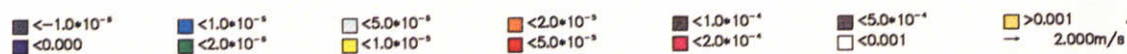
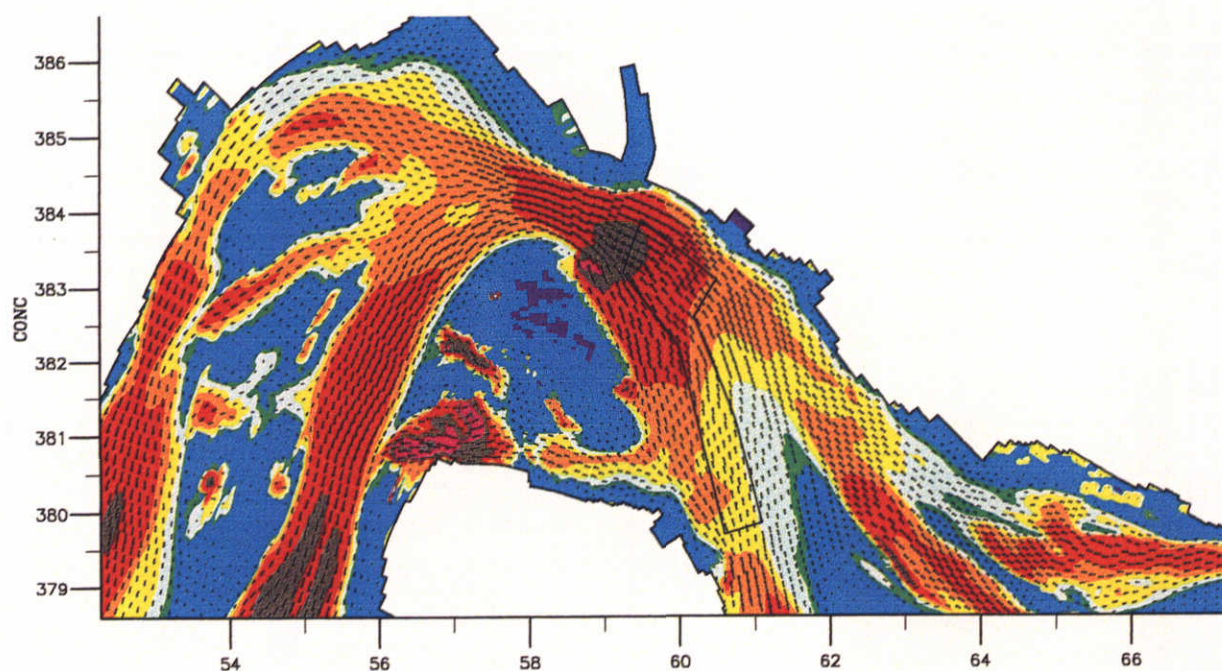
verhouding n_{12}/n_{11} van de intensiteit van de SSD (boven)
 verhouding n_{12}/n_{11} van de intensiteit van de SSL (onder)
 maximale ebstroomsnelheid

fig 4.5

Delft3D—Mor





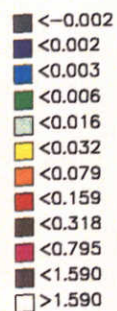
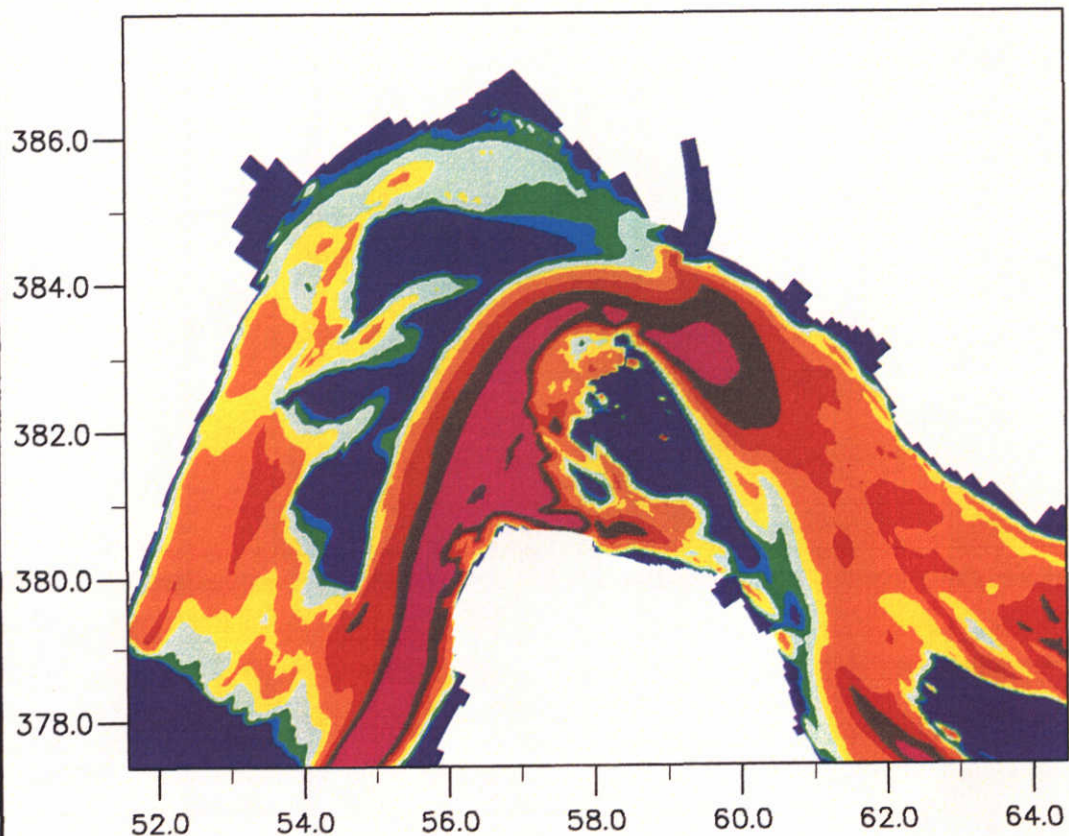
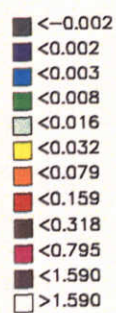
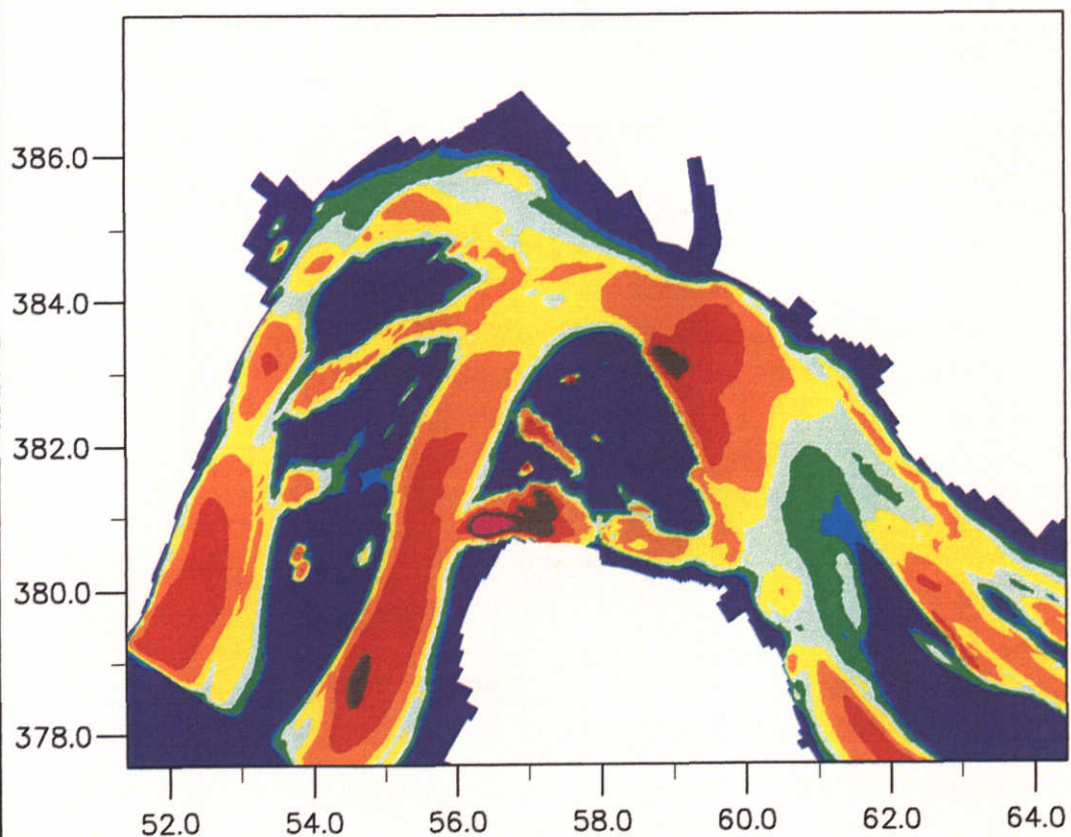


vol. concentratie suspensief materiaal, Galappatti form.
 R11: spiraal stroming en gradienttype bodemrvw
 17/4 17:30 (max eb) en 18/4 02:00 (max vloed)

8/10/98

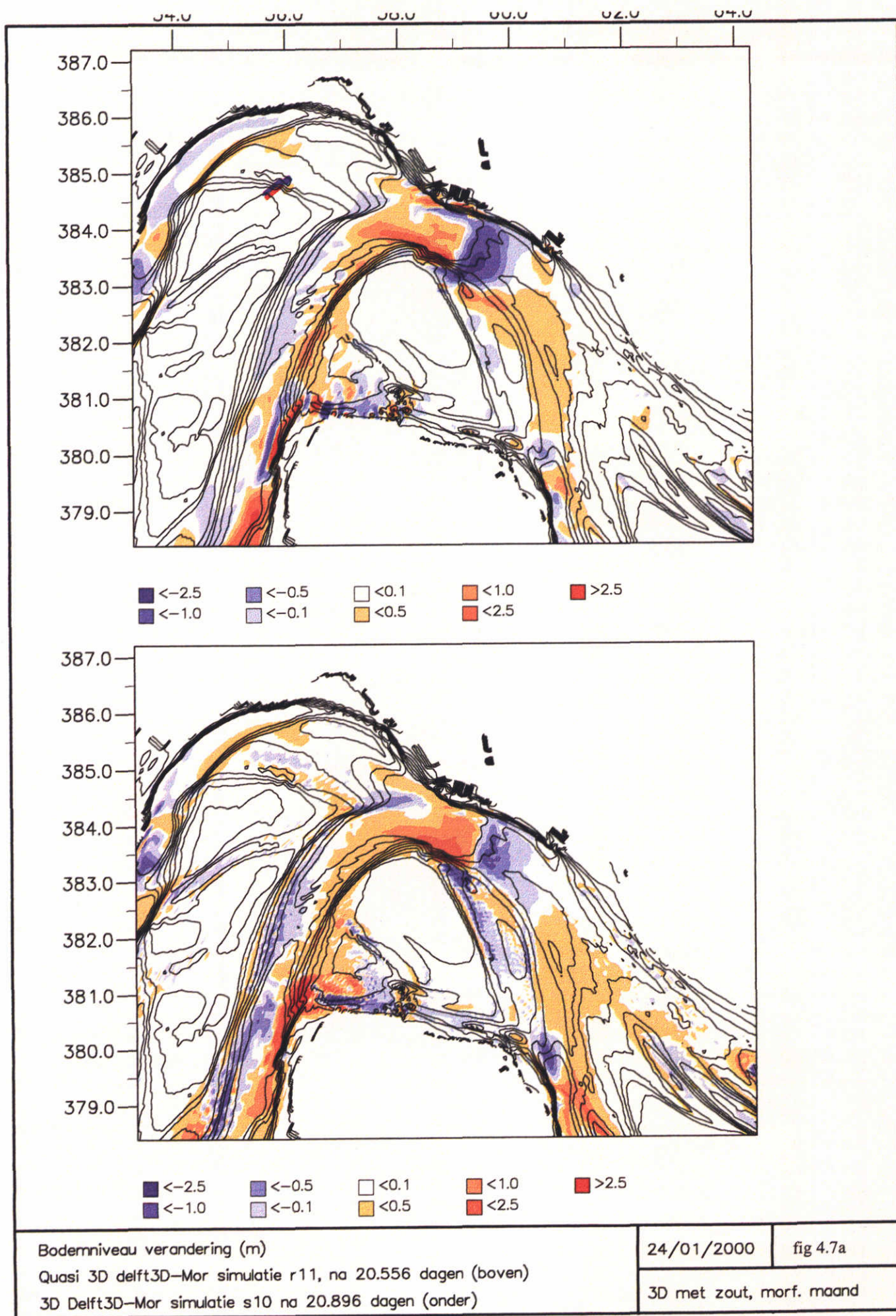
fig 4.6c

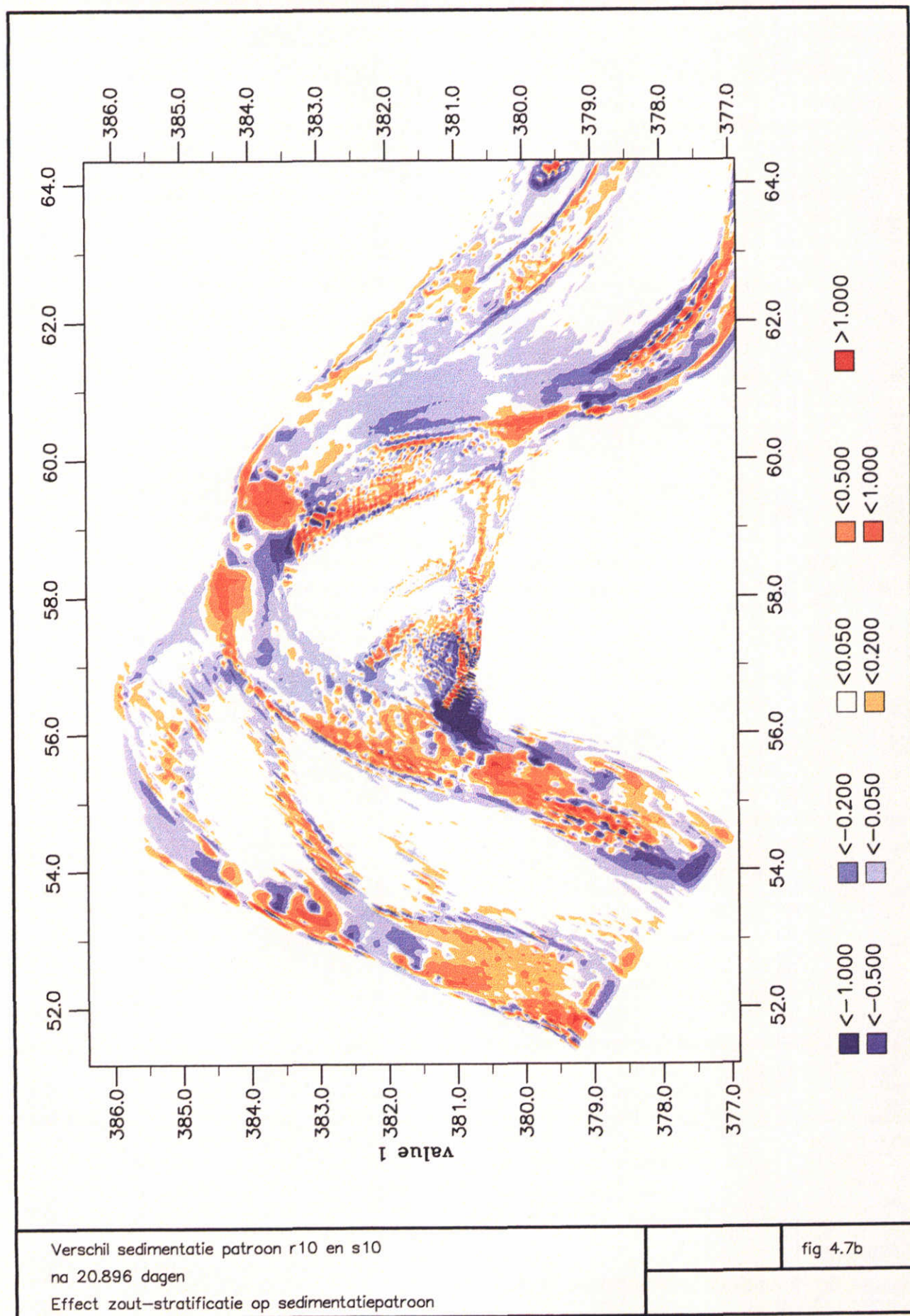
Westerschelde

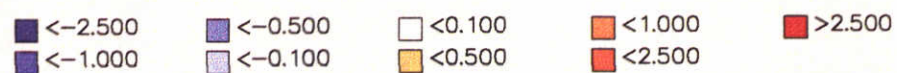
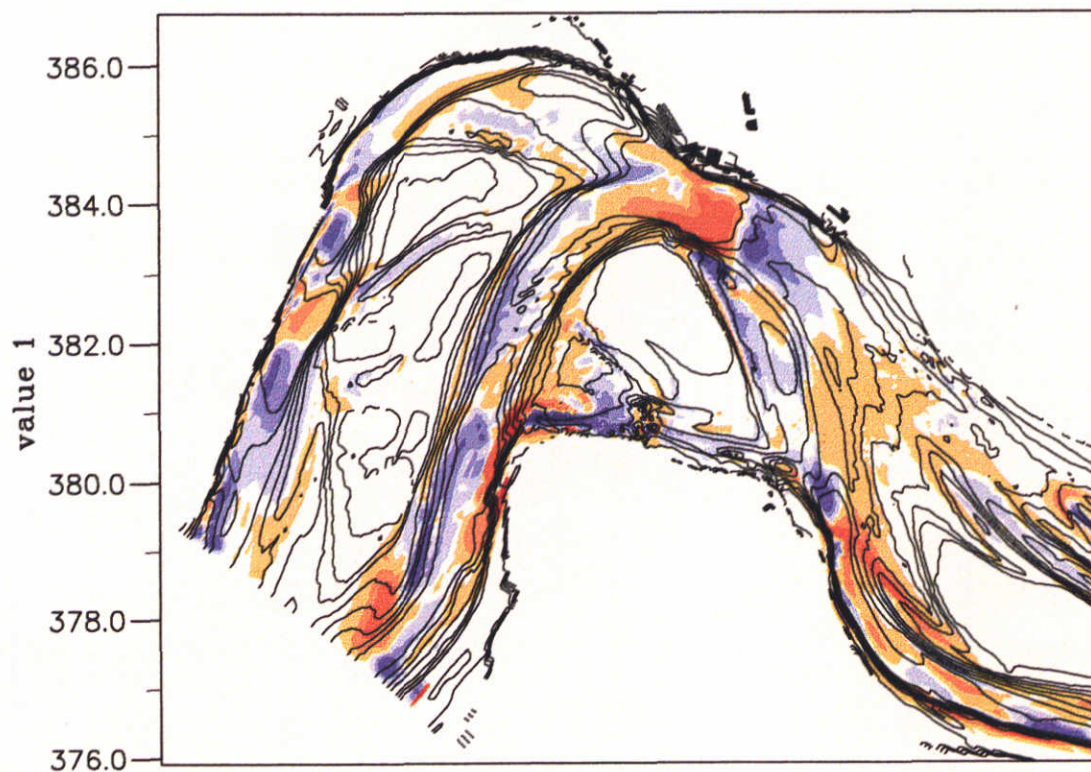
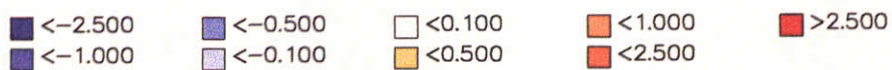
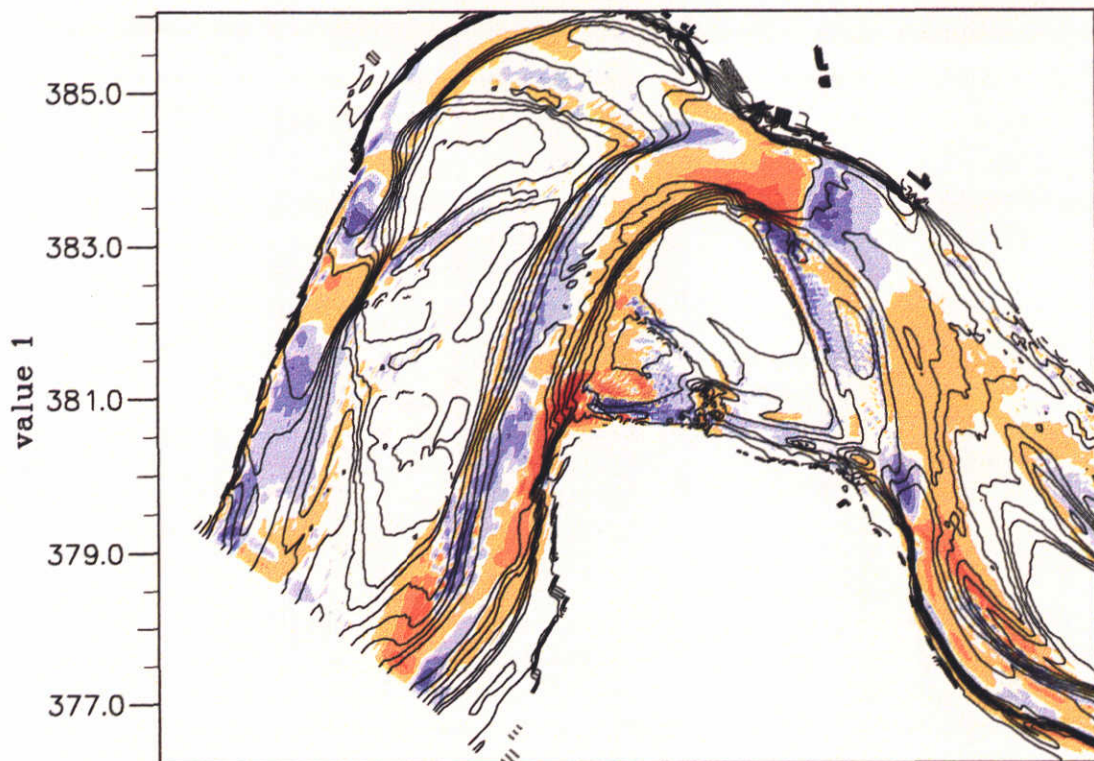


dieptegemiddelde suspended sediment concentratie (kg/m³)
 3D simulatie r10, zonder zout
 maximale ebstroming (boven) en maximale vloedstroming (onder)

fig 4.6d





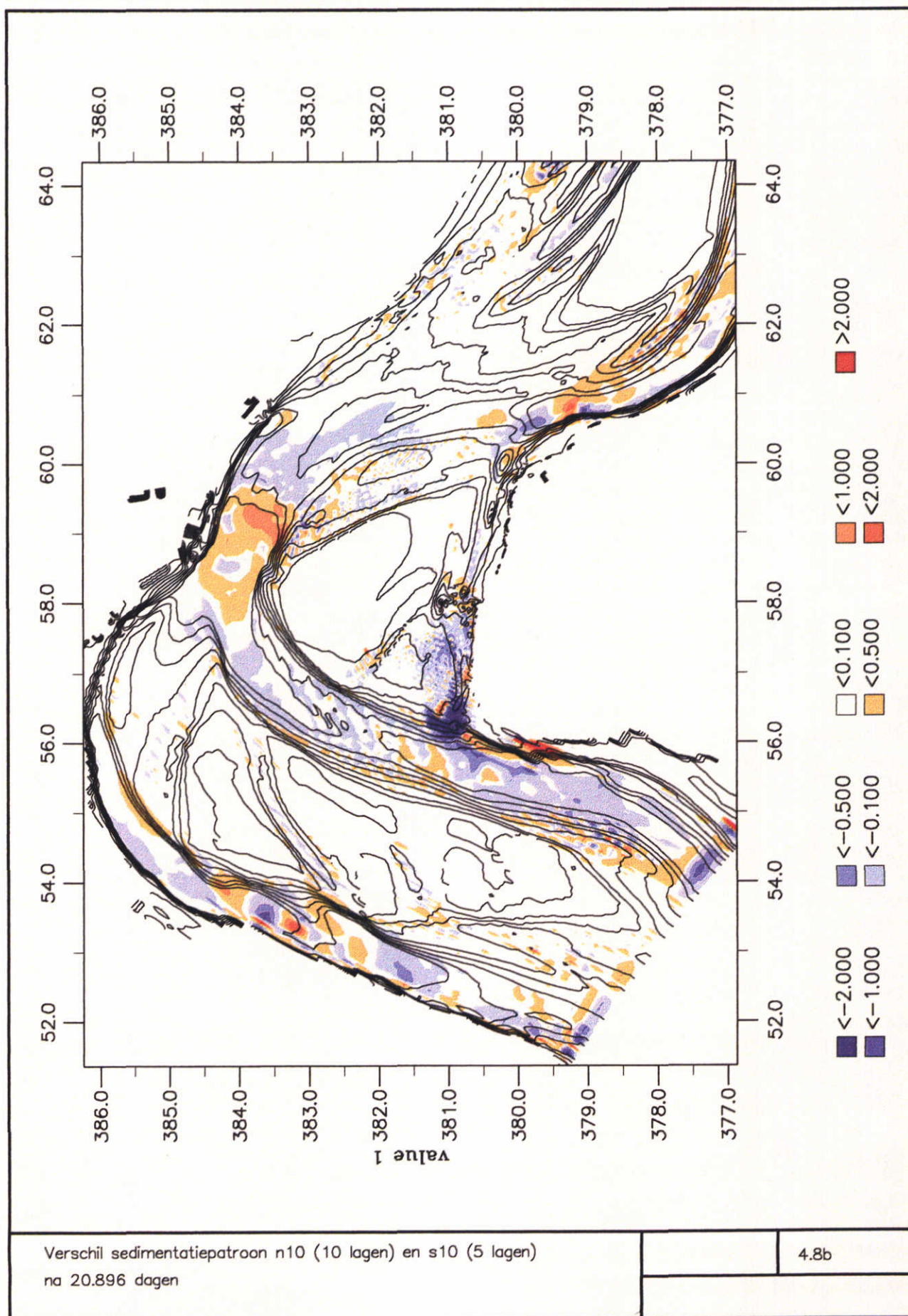


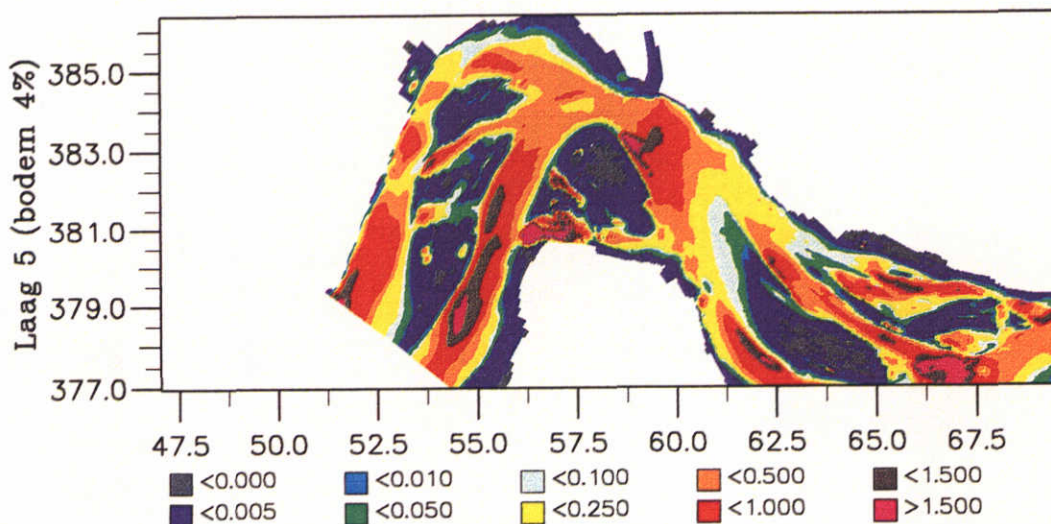
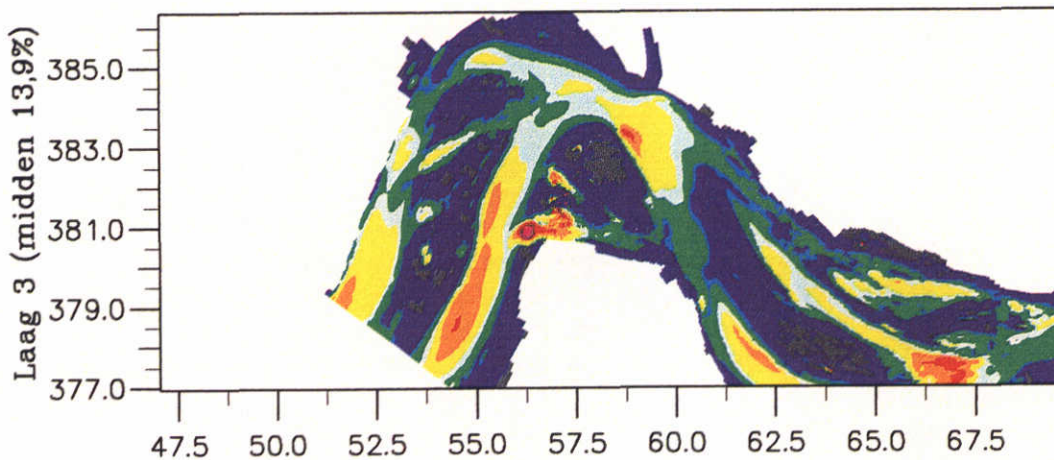
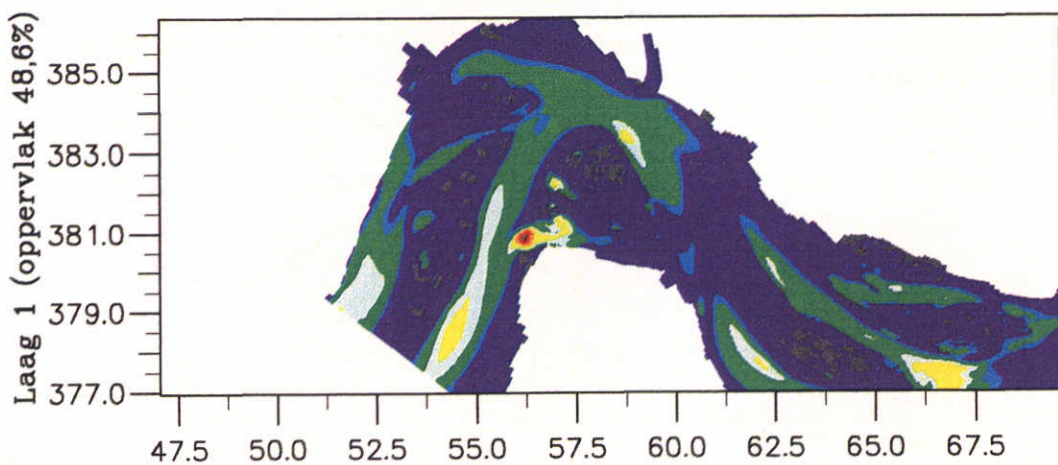
Bodemniveau verandering (m)

3D Delft3D simulatie s10 na 20.896 dagen (boven)

3D Delft3D simulatie n10 na 20.896 dagen (onder)

fig 4.8a





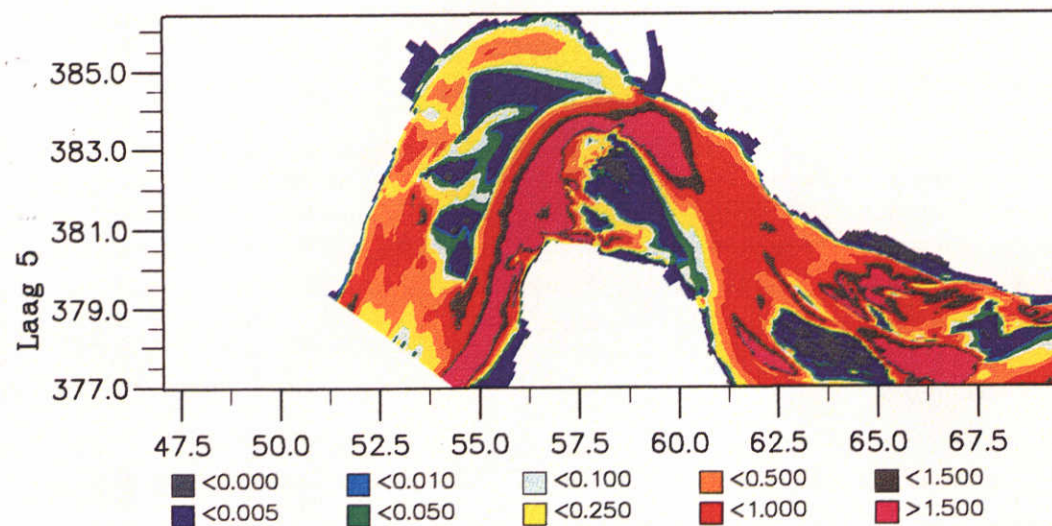
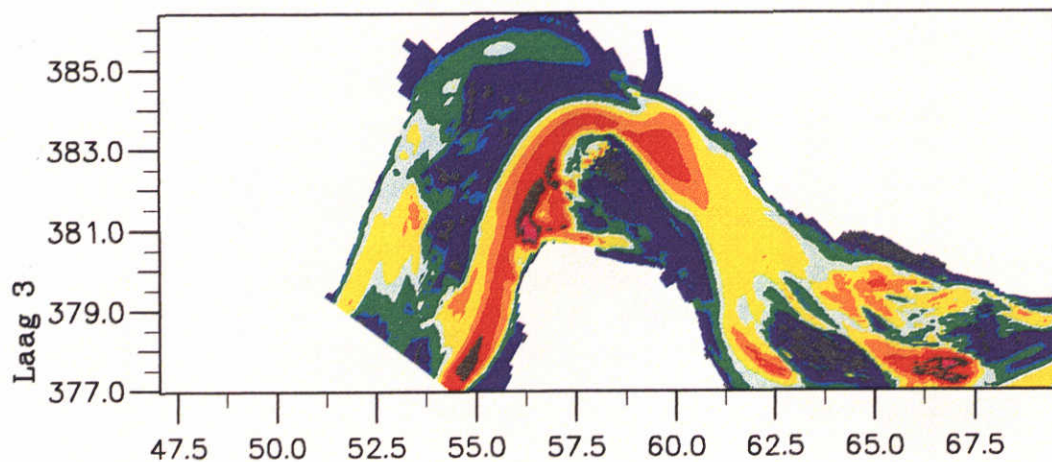
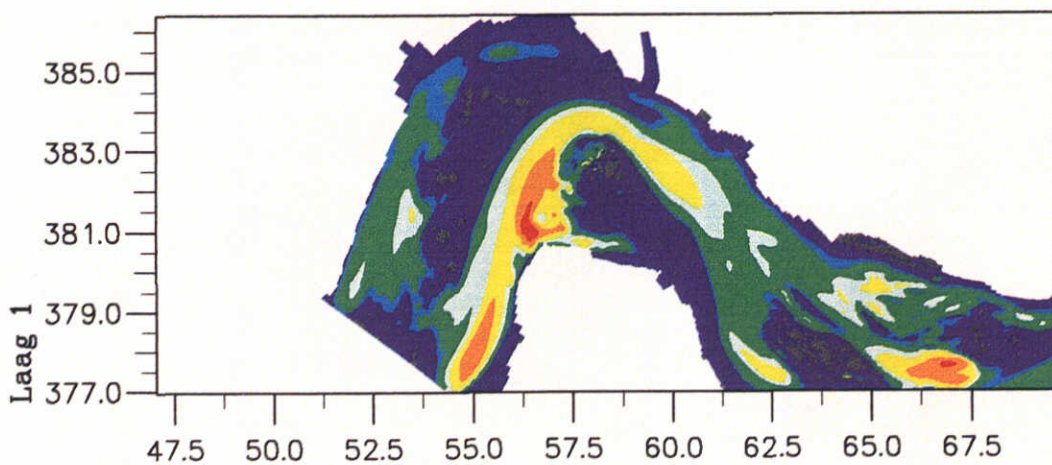
Suspended sediment concentraties (kg/m³)

Delft3D-Mor Simulatie s10

Maximale ebstroming 17/4/96 17:30

16-02-2000

fig 4.8c



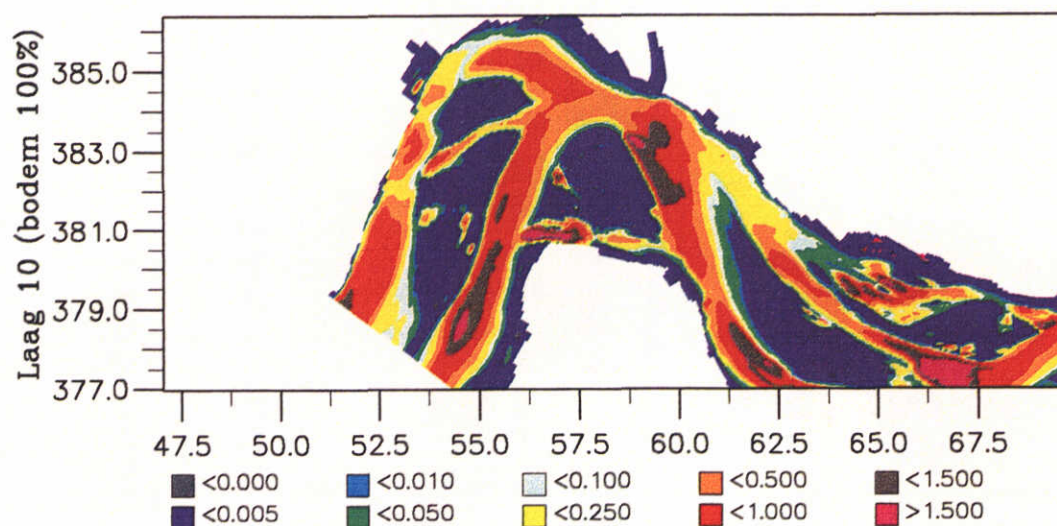
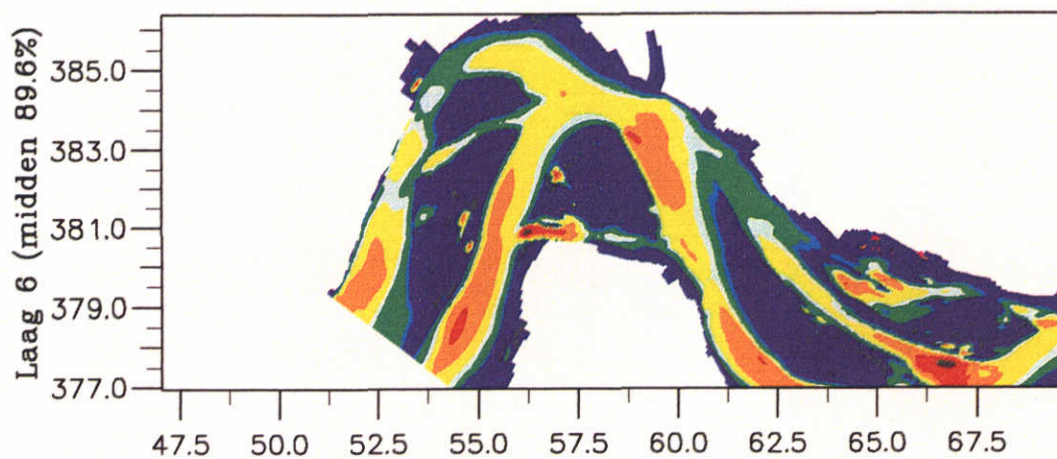
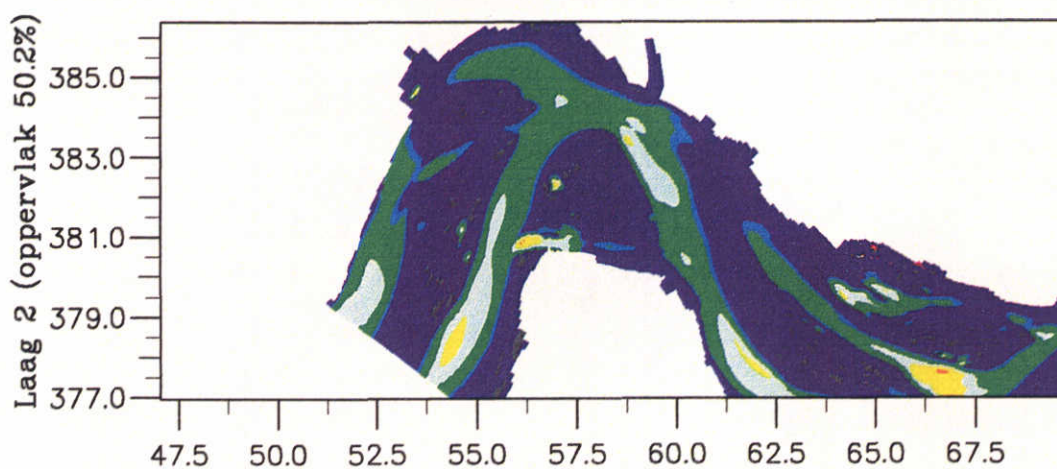
Suspended sediment concentraties (kg/m³)

Delft3D-Mor Simulatie s10,

Maximale vloedstroming 18/4/96 02:00

16-02-2000

fig 4.8d



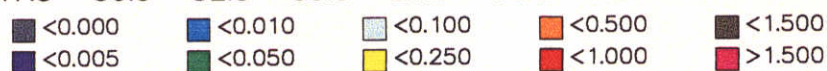
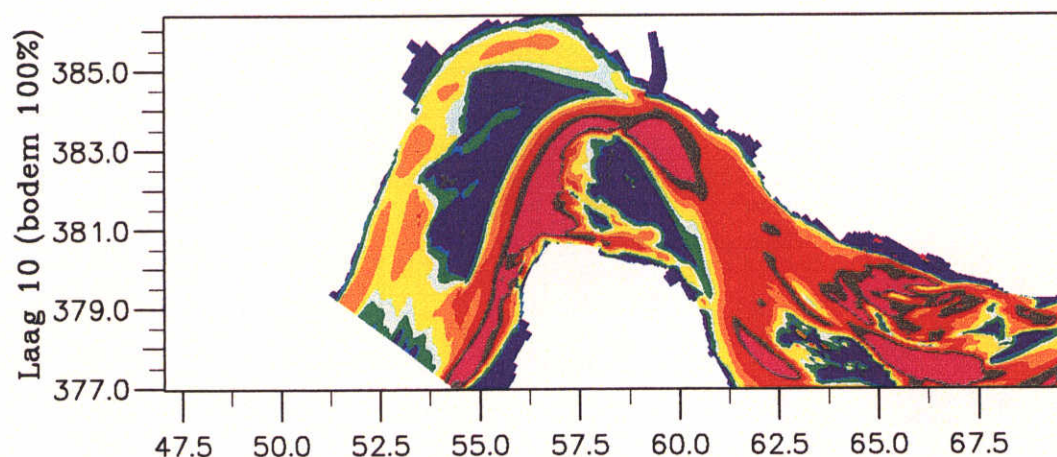
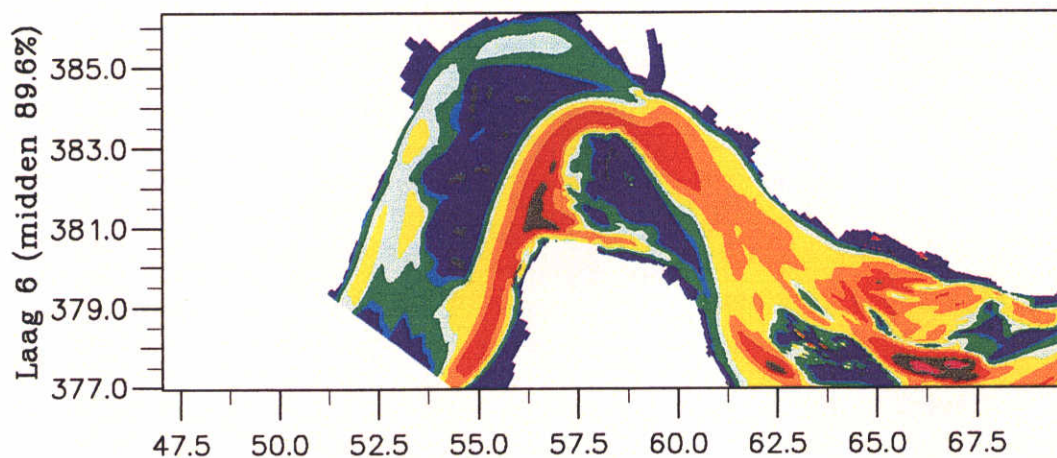
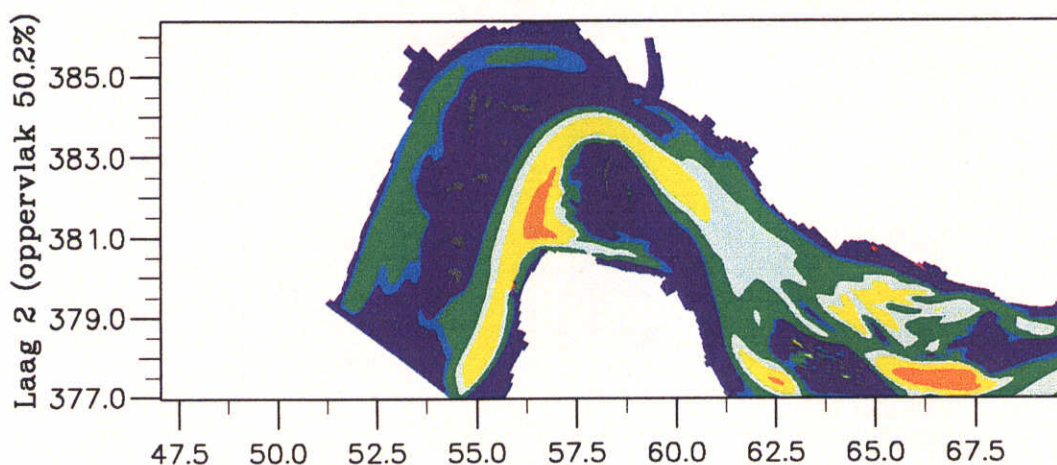
Suspended sediment concentraties (kg/m³)

Delft3D-Mor Simulatie n10, met zout

Maximale ebstroming 17/4/96 17:30

16-02-2000

fig 4.8e



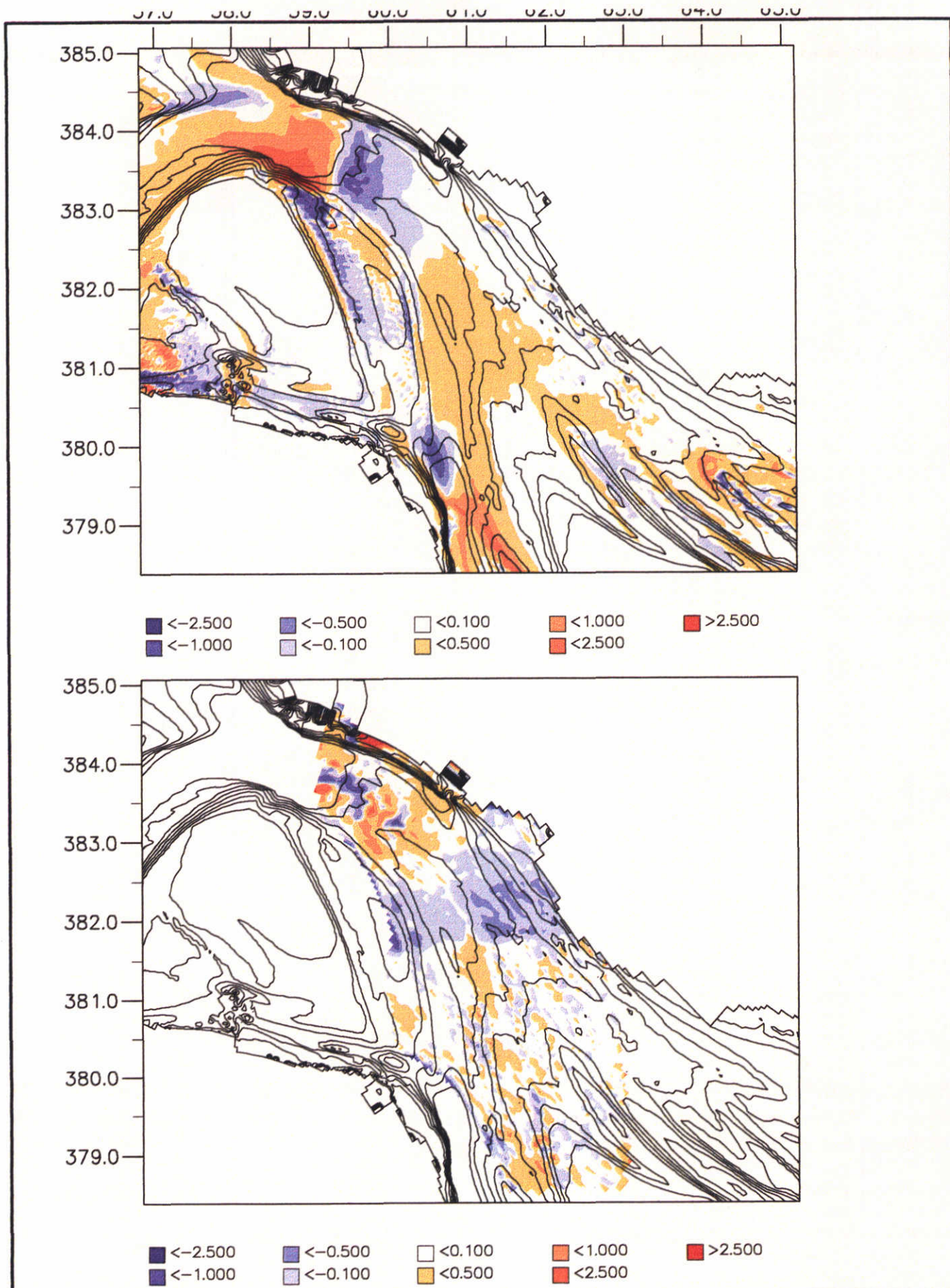
Suspended sediment concentraties (kg/m³)

Delft3D-Mor Simulatie n10, met zout

Maximale vloedstroming 18/4/96 02:00

16-02-2000

fig 4.8f



Bodemniveau verandering (m)

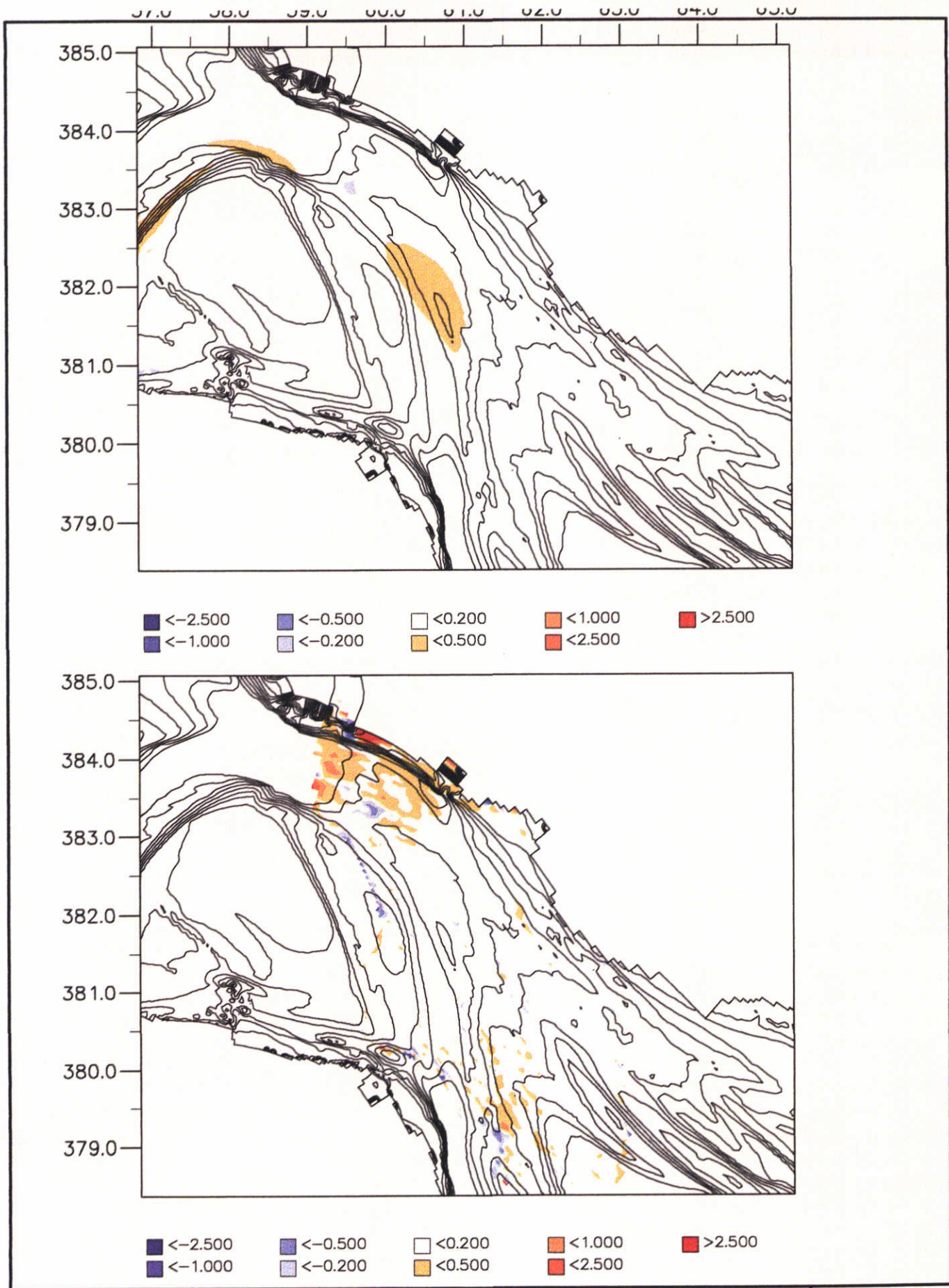
3D delфт3D-Mor simulatie s10, na 18.5 dagen (boven)

gemeten sedimentatie na 27 dagen (29/9 - 26/10 1995, onder)

24/01/2000

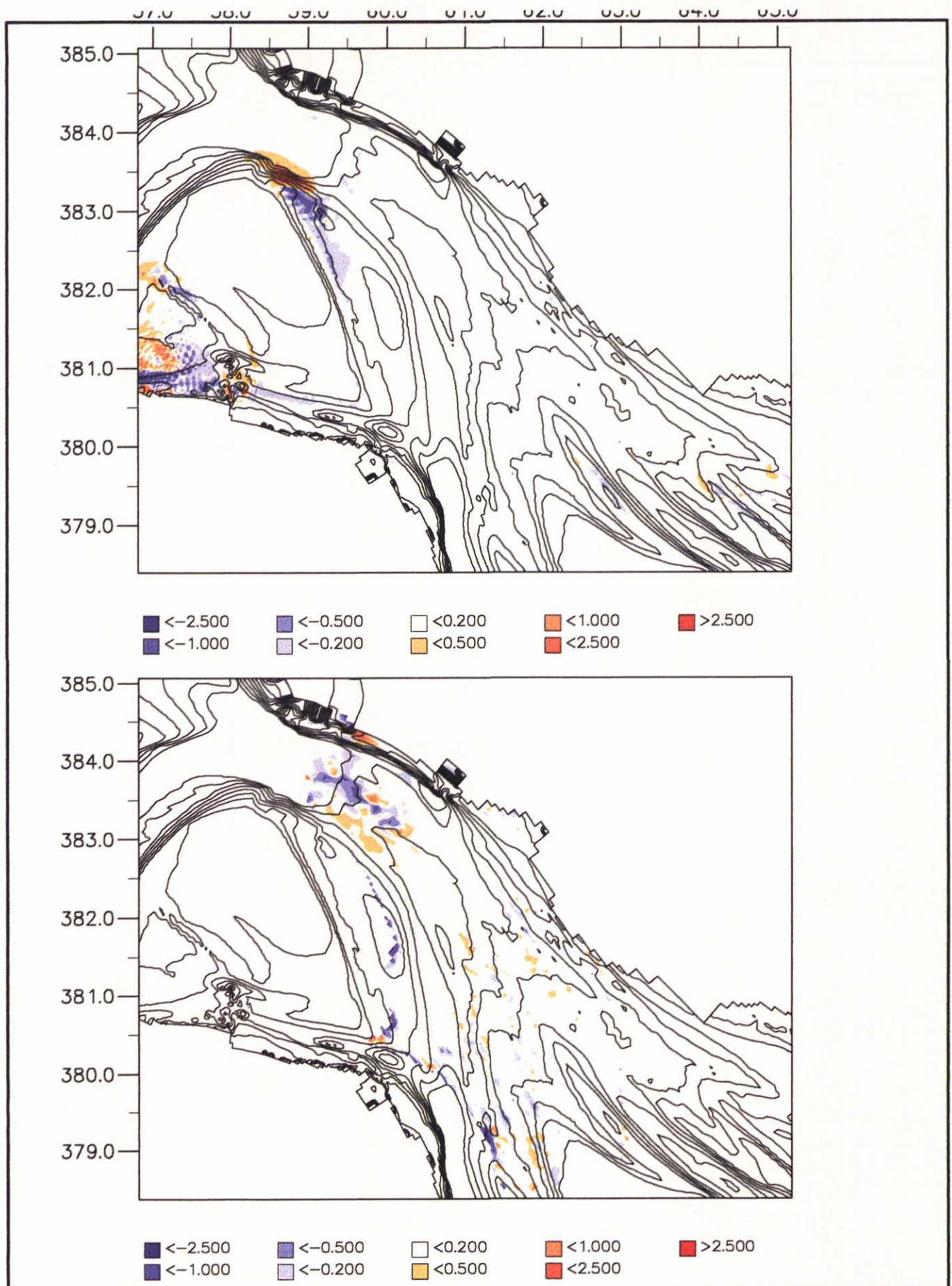
fig. 4.9a

morf. getij factor = 1.46



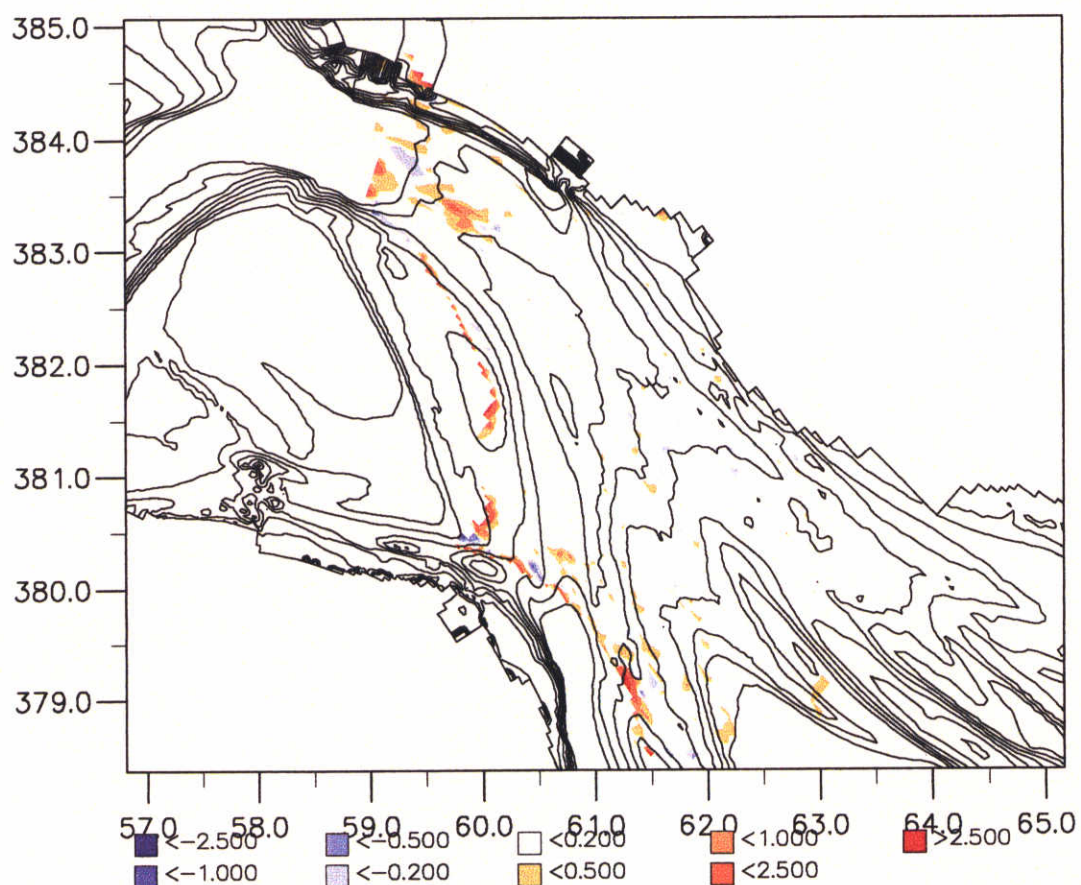
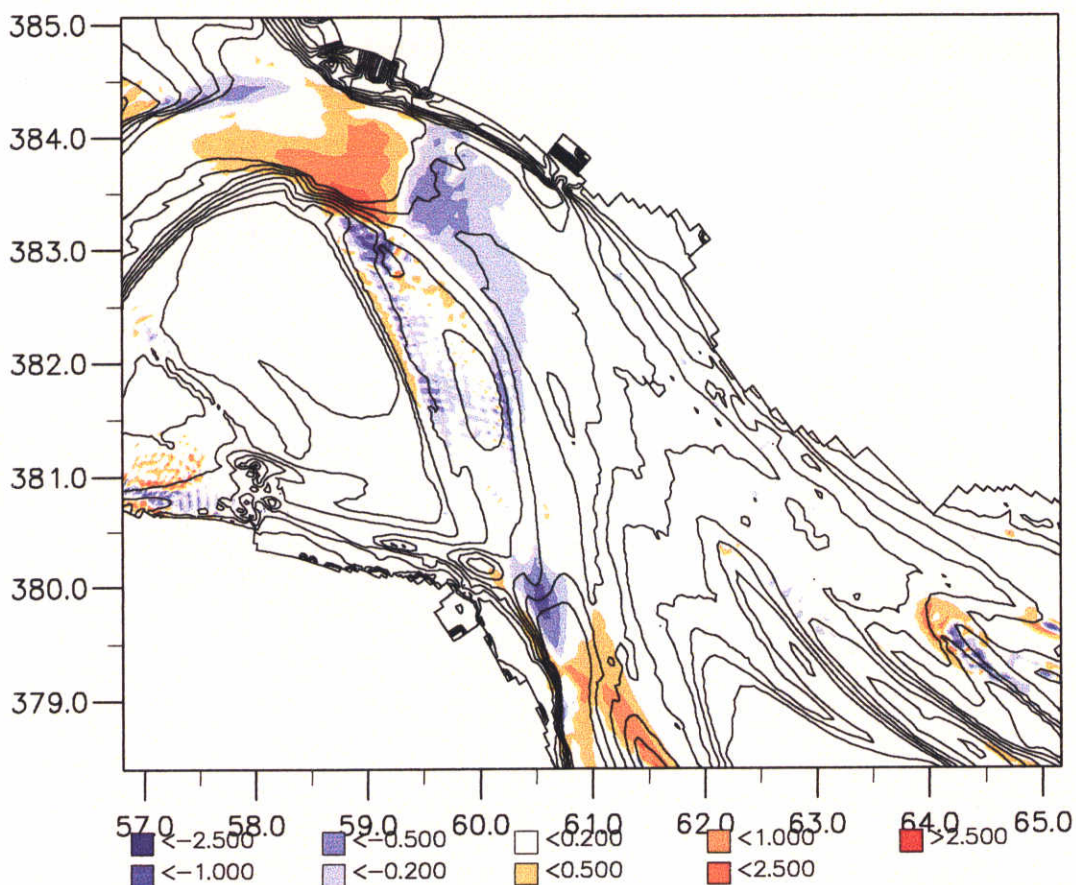
Bodemniveau verandering
 3D delфт3D-Mor simulatie s10, (boven)
 gemeten sedimentatie na 6 dagen (29/9 - 5/10 1995, onder)

24/01/2000	fig 4.9b
morf. getij factor = 1.46	



Bodemniveau verandering
 3D delft3D-Mor simulatie s10, (boven)
 gemeten sedimentatie na 7 dagen (5/10 - 12/10 1995, onder)

24/01/2000 fig 4.9c
 morf. getij factor = 1.46



Bodemniveau verandering

3D delft3D-Mor simulatie s10,

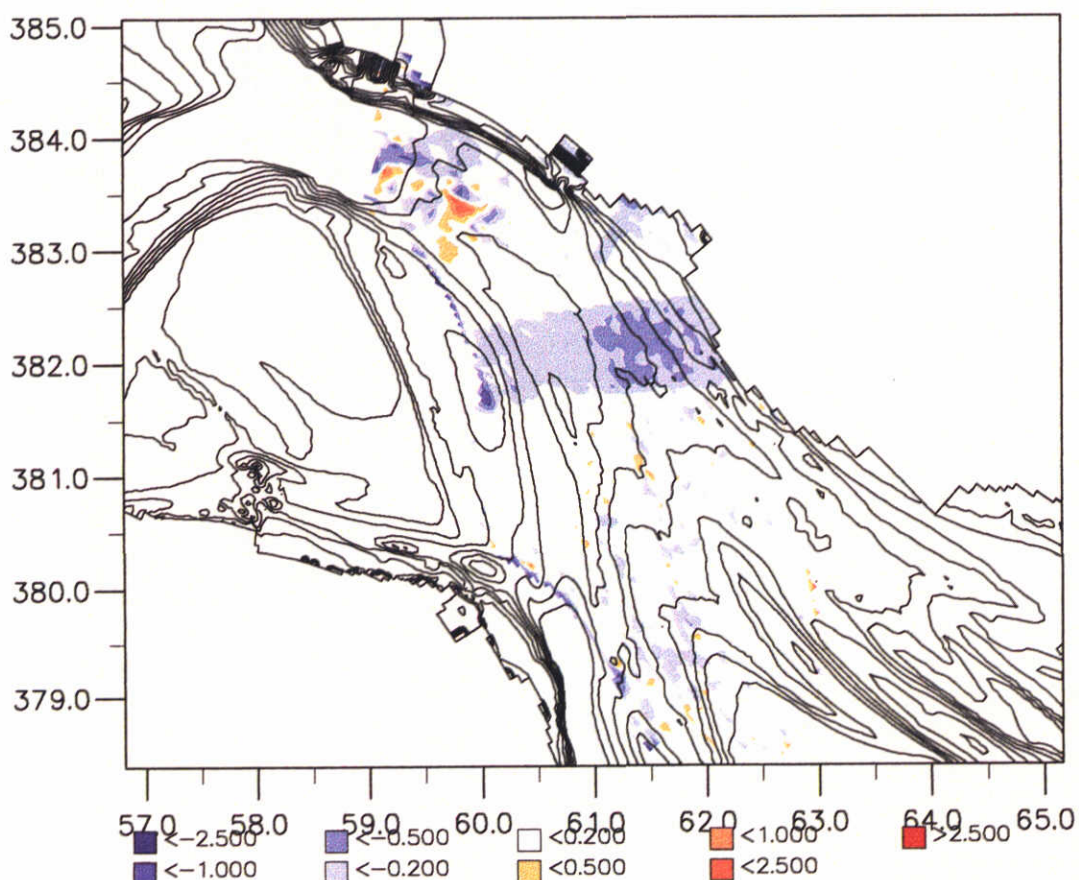
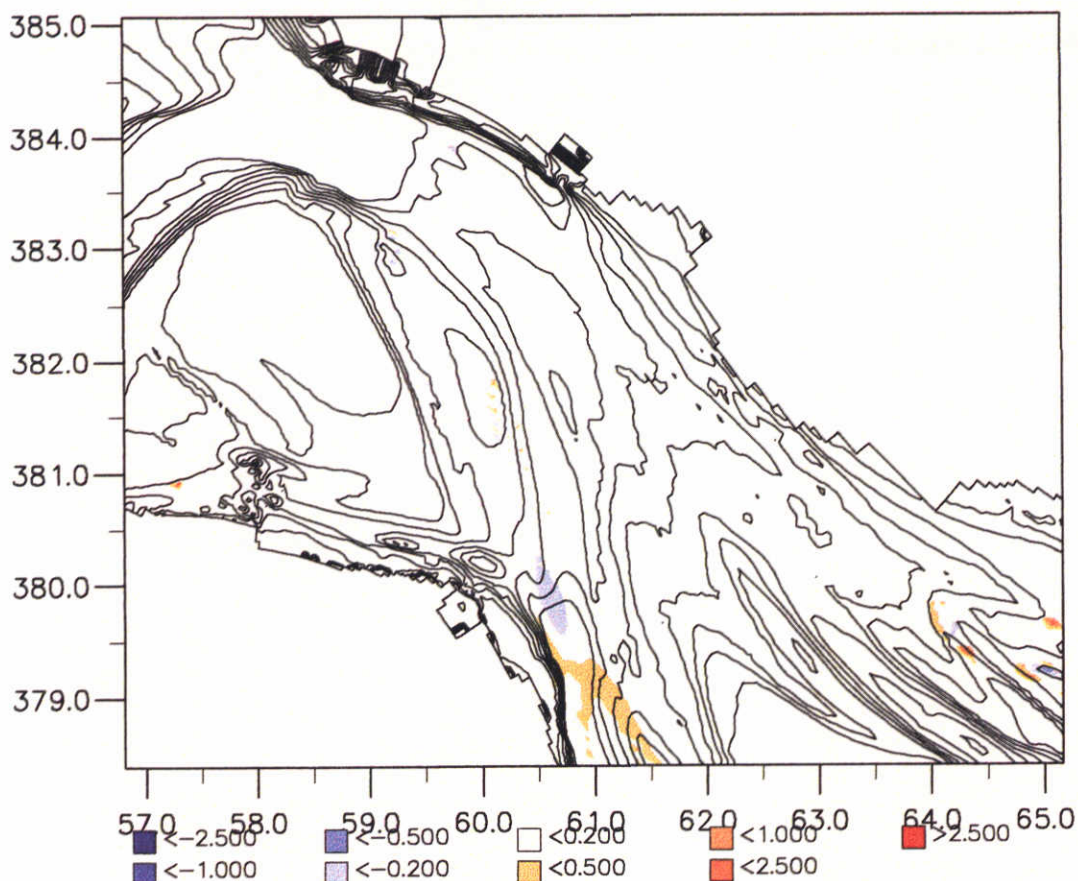
(boven)

gemeten sedimentatie na 7.5 dagen (12/10 – 19.5/10 1995, onder)

24/01/2000

fig 4.9d

morf. getij factor = 1.46



Bodemniveau verandering

3D delft3D-Mor simulatie s10,

(boven)

gemeten sedimentatie na 6.5 dagen (19.5/10 1995 - 27/10 1995, onder)

24/01/2000

fig 4.9e

morf. getij factor = 1.46



wL | delft hydraulics

Rotterdamseweg 185
postbus 177
2600 MH Delft
telefoon 015 285 85 85
telefax 015 285 85 82
e-mail info@wldelft.nl
internet www.wldelft.nl

Rotterdamseweg 185
p.o. box 177
2600 MH Delft
The Netherlands
telephone +31 15 285 85 85
telefax +31 15 285 85 82
e-mail info@wldelft.nl
internet www.wldelft.nl

