

DE COMPLEXE STROMING IN DE TOEGANGSGEUL VAN DE ZANDVLIET- EN BERENDRECHTSLUIS: INZICHT VIA METINGEN EN MODELLERING

M. FETTWEIS en M. SAS
International Marine en Dredging
Consultants nv

THE COMPLEX FLOW FIELD IN THE ENTRANCE CHANNEL TO THE LOCKS OF ZANDVLIET AND BERENDRECHT: MEASUREMENTS AND MODELLING

The locks of Zandvliet and Berendrecht are the major entrance to the Port of Antwerp. The locks are connected to the river Scheldt by an access channel. The flow field in this access channel is complex, it is driven by tides, horizontal eddies, density induced currents and boundary effects. These are 3-dimensional, unsteady processes with dynamic links between the flow and the buoyancy. They can only be modelled using a 3-dimensional, unsteady and dynamically coupled model of flow and salt.

In this article the results of a numerical study concerning the simulation of currents in the access channel and in the river Scheldt are described. The model covers an area of the river of 8.5 km. The grid distance is 50 m. The model has been calibrated and validated by comparing the model results to various observations.

The measurements consist of through-tide measurements in the river during spring and neap tide and of ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) current measurements in the entrance channel. It was found that the model can simulate the flow and the density field correctly. The model allowed to get a better insight in the flow field in the entrance channel. It was found that the total exchange of water between the entrance channel and the river is 10 to 12 times bigger than the amount due to tide (storage capacity). This exchange is controlled mainly by density induced flows. With decreasing salinity in the river the exchange of water between the entrance channel and the river decreases gradually. In case of no salinity the exchange factor reduces to 50%.

1. INLEIDING

De sluizen van Zandvliet en Berendrecht, gelegen ter hoogte van de Drempe van Zandvliet in de Beneden-Zeeschelde, vormen de meest belangrijke aanlooproute tot de haven van Antwerpen. De sluizen zijn met de Schelde verbonden door een toegangsgeul. De stroming in de toegangsgeul is complex en uitgesproken driedimensionaal. Door de lage snelheden is de toegangsgeul een preferentieel gebied voor de sedimentatie van slib.

In het kader van het hydraulisch sedimentologisch onderzoek van de noordelijke containerkaai werd het stromingspatroon in de nabij gelegen toegangsgeul grondig geanalyseerd (IMDC, 1993). In dit artikel worden de resultaten samengevat.

Bij de wateruitwisseling tussen de Schelde en de toegangsgeul spelen verschillende fenomenen een rol. Ten eerste zorgt de getijwerking voor de vulling en lediging van de toegangsgeul. De stroming in de Schelde geeft aanleiding tot de vorming van een horizontale neer aan de ingang van de toegangsgeul. Verder veroorzaken saliniteits-

verschillen tussen de rivier en de toegangsgeul en de aanvoer van zoeter water door versassing van schepen een dichtheidsstroming. Tenslotte wordt de horizontale stroming afgebogen door de aanwezigheid van de verticale kaaimuren, dit resulteert in de vorming van een verticale neer.

Een gedetailleerd inzicht in de stroming in de toegangsgeul kan bekomen worden door metingen in situ en met behulp van numerieke modellen. De saliniteitsverdeling wordt gewoonlijk gekarakteriseerd door enerzijds een vermindering van de turbulentie door de verticale stratificatie en anderzijds door de stroming ten gevolge van de horizontale dichtheidsverschillen. Dit complex en driedimensionaal fenomeen waarbij de stroming en de densiteit dynamisch gekoppeld zijn, kan enkel gesimuleerd worden met een driedimensionaal model dat rekening houdt met een koppeling tussen stroming en zouttransport. Ook maakt de complexe aard van de stroming in en rond de toegangsgeul het gebruik van een driedimensionaal model noodzakelijk.

Vooraleer een model als 'goed' beschouwd kan worden, dient eerst een uitgebreide ca-

libratie en validatie procedure gevolgd te worden. Calibratie is de procedure waarbij de modelparameters (zoals wrijvingscoëfficiënt, eddy viscositeit etc.) aangepast worden om een goede overeenkomst te bekomen tussen modelberekeningen en meetresultaten. Validatie is een bijkomende test om na te gaan of het model niet 'overgecalibreerd' werd, door de modelberekeningen voor een andere situatie (b.v. een ander getij) te vergelijken met een tweede onafhankelijke dataset. Tijdens de validatie worden de modelparameterwaarden niet gewijzigd.

In het verleden werden reeds enkele meetcampagnes uitgevoerd in de toegangsgeul en in de nabije omgeving ervan. Deze omvatten drijfvermetingen tijdens eb (29/3/89) en vloed (6/4/89) op drie punten in de verticale, een 13-uursmeting in een viertal punten (4/4/89), waarvan drie in de toegangsgeul, een langdurige meting over een doodspring-doodtijcyclus (31/3-13/4/89), twee 13-uursmetingen ter hoogte van de Drempe van Zandvliet tijdens doodtij (27/9/90) en springtij (4/10/90) in dezelfde punten en ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) snelheidsmetingen tijdens eb (29/4/93) en

vloed (19/4/89) over de breedte van de toegangsgeul. [zie IMDC (1990), IMDC (1992a), IMDC (1992b), Antwerpse Zeehavendienst (1993) en Fettweis et al. (1994)].

2. HET 3D HYDRAULISCH MODEL

2.1. Beschrijving van het numeriek model

Het model (Cooper, 1983) lost de ondiep-watervergelijkingen op. De driedimensionale hydrodynamische vergelijkingen kunnen als volgt geschreven worden aannemende dat (1) de druk hydrostatisch is, (2) de Boussinesq benadering geldt en (3) de horizontale turbulentie benaderd kan worden door middel van de eddy viscositeit (zie verder):

$$\frac{\delta u}{\delta t} + u \frac{\delta u}{\delta x} + v \frac{\delta u}{\delta y} + w \frac{\delta u}{\delta z} + \frac{1}{\rho} \frac{\delta p}{\delta x} = \Omega v + A_h \nabla^2 u + \frac{1}{\rho} \frac{\delta \tau_x}{\delta z} \quad (1)$$

$$\frac{\delta v}{\delta t} + u \frac{\delta v}{\delta x} + v \frac{\delta v}{\delta y} + w \frac{\delta v}{\delta z} + \frac{1}{\rho} \frac{\delta p}{\delta y} = -\Omega u + A_h \nabla^2 v + \frac{1}{\rho} \frac{\delta \tau_y}{\delta z} \quad (2)$$

De derde momentumvergelijking kan vereenvoudigd worden tot de hydrostatische vergelijking:

$$p = -g \int_z^\eta \rho dz \quad (3)$$

De continuïteitsvergelijking voor massa:

$$\frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta v}{\delta y} + \frac{\delta w}{\delta z} = 0 \quad (4)$$

De continuïteitsvergelijking voor zout:

$$\frac{\delta s}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x}(us) + \frac{\delta}{\delta y}(vs) + \frac{\delta}{\delta z}(ws) = K_h \nabla^2 s + \frac{\delta f_{sz}}{\delta z} \quad (5)$$

De gebruikte symbolen betekenen:

- x,y,z : Cartesische coördinaten [m],
- u,v,w : snelheidscomponenten in x-, y- en z-richting [m/s],
- t : tijd [s],
- ρ : dichtheid [kg/m³],
- p : druk [Pa],
- Ω : Coriolis parameter [1/s],
- ∇^2 : $\delta^2/\delta x^2 + \delta^2/\delta y^2$,
- η : z aan het vrij oppervlak [m],
- A_h : horizontale eddy viscositeit [m²/s],
- T_x, T_y : horizontale componenten van het verticale turbulente momentumtransport [Pa],
- s : saliniteit [kg/m³],
- K_h : horizontale eddy diffusiviteit [m²/s],
- f_{sz} : verticale turbulente zoutflux [kg/m²s].

Typische lengteschalen van processen in een estuarium variëren tussen enkele tientallen kilometers tot een grootte orde van millimeters voor de turbulente processen. Een mathematisch model kan niet met dit groot verschil in lengteschalen (factor 10⁸) rekening houden. Een veel gebruikte techniek is om de viscositeit artificieel te vergroten, dit wordt dan de eddy viscositeit ge-

noemd, zodat voldoende energiedissipatie kan optreden voor de typische lengteschalen gebruikt in het numeriek model.

De eddy viscositeit is dus niet constant zoals de moleculaire viscositeit, maar is afhankelijk van de toepassing. Eddy diffusiviteit wordt op dezelfde wijze, in analogie met de moleculaire diffusiviteit, ingevoerd.

De dichtheid van het water wordt berekend via de zogenoemde statusvergelijking van water (zie e.g. Gill, 1982).

Aan de bodem wordt een kwadratische wrijvingsformule gebruikt. De wrijvingscoëfficiënt f volgens Darcy-Weissbach kan als volgt geschreven worden:

$$f = \frac{1}{32} [\log_{10}(14.8z/k_n)]^{-2} \quad (6)$$

waarbij k_n de ruwheid volgens Nikuradse [m] en z de dikte van de onderlaag is. De ruwheidslengte k_n is een functie van de grootte van de bodemvormen, ofwel direct als grootte van partikels (b.v. stenen) ofwel indirect als een ribbelhoogte.

De vergelijkingen worden opgelost met behulp van een eindige differentie techniek op een zogenoemd Arakawa-C rooster. De waterstanden en de saliniteiten worden berekend in het midden van elke cel, terwijl de u-snelheden aan de oostzijde en de v-snelheden aan de zuidzijde van elke cel berekend worden. De horizontale partiële differenties worden gediscetiseerd door middel van een expliciet opwaarts numeriek schema. Voor de verticale termen in de vergelijking wordt gebruik gemaakt van een impliciet schema. De reductie van de verticale menging door de gelaagdheid van de dichtheid is een essentieel element in het

Fig. 1: Grenzen van het model in de Schelde.

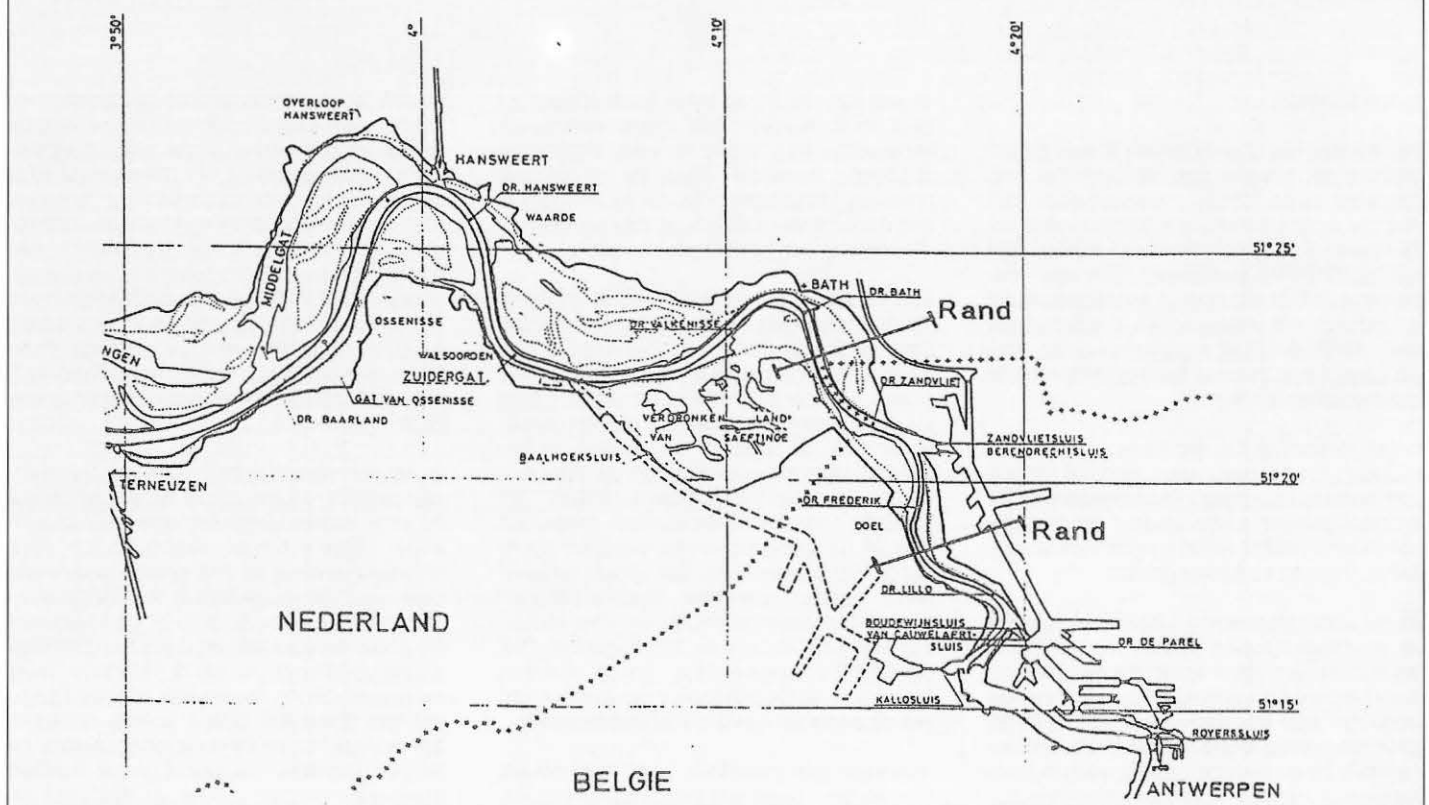


Fig. 2: Ligging van de meetpunten voor de springtijmeting van 4/10/90 en de doortijmeting van 27/9/90 en de vaarroute van de ADCP metingen op 19 en 29/4/93.

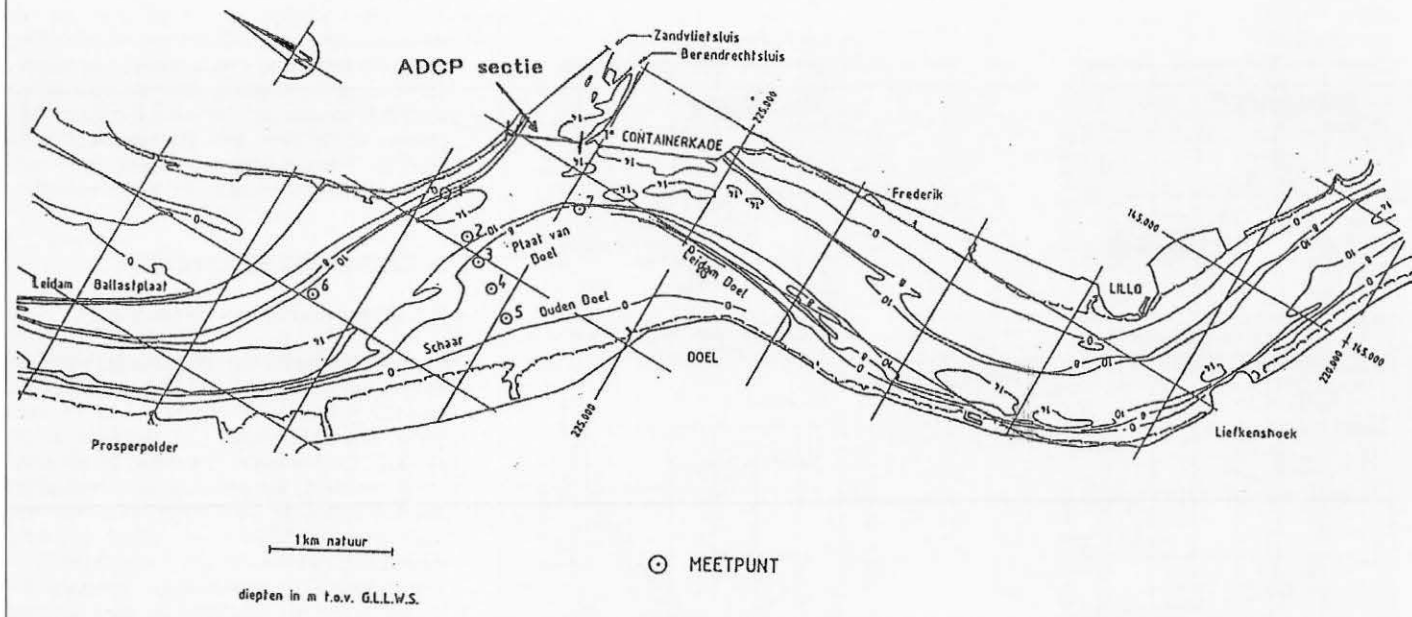
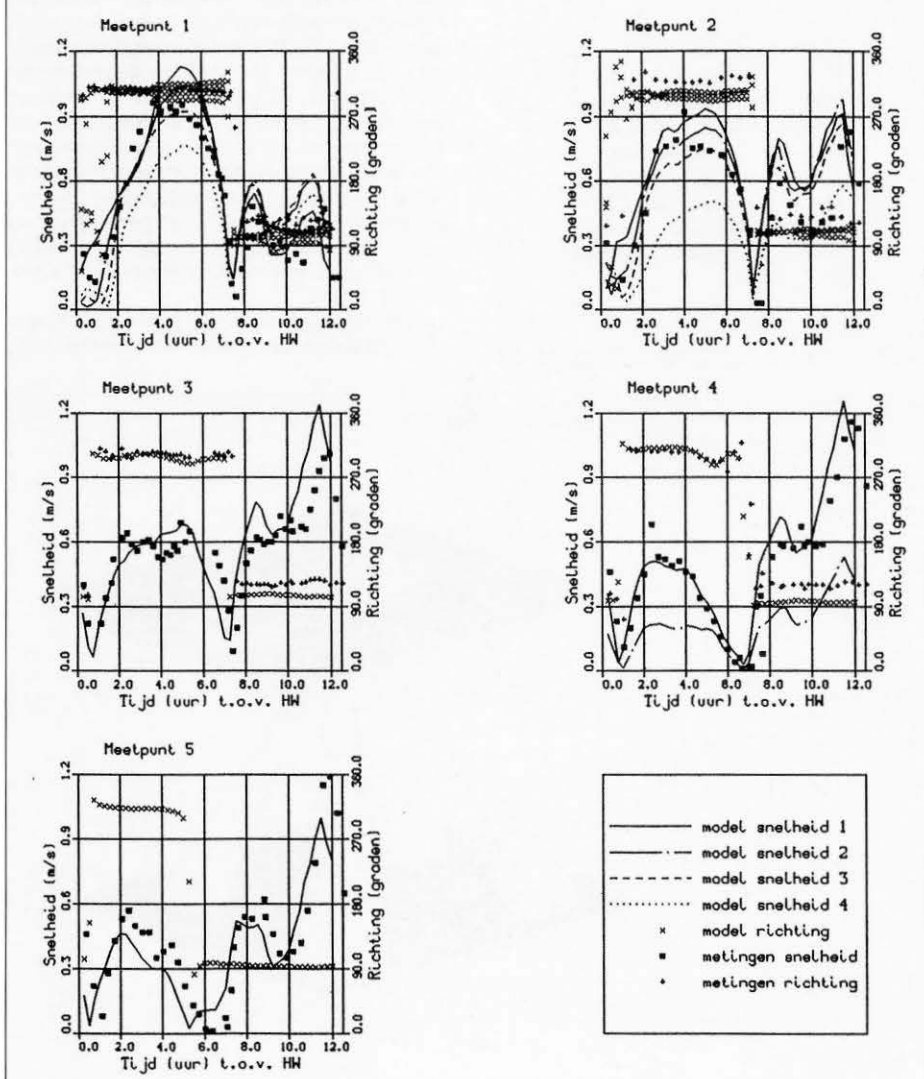


Fig. 3: Springtij Hoge Saliniteit Snelheid in Meetpunten van 4/10/90 Vergelijking met Metingen



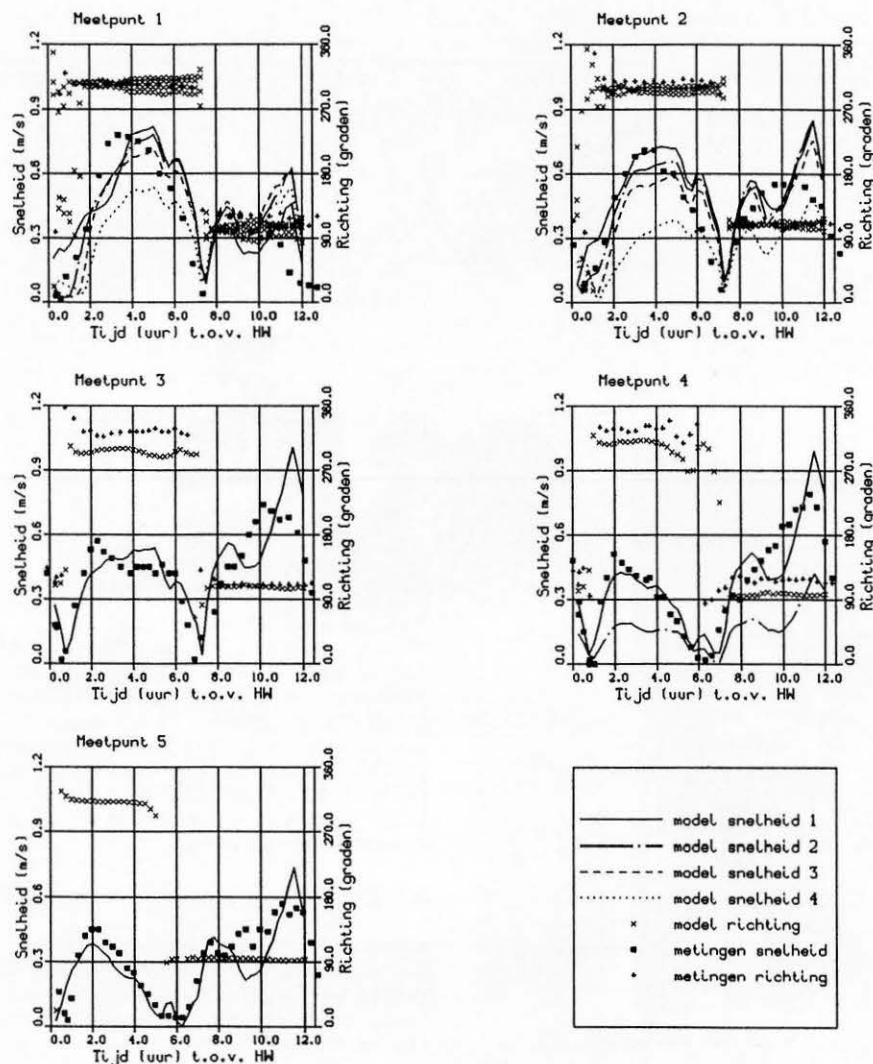
model; zonder dit zou het zout snel vermengd worden doorheen de waterkolom resulterend in een onrealistisch logaritmisch snelheidsprofiel. Het model maakt gebruik van een 'mixing-length' formulering voor de turbulentie. Een beschrijving van de mixing-length en de reductie van de verticale turbulente menging kan gevonden worden in Odd en Rodger (1978).

2.2. Beschrijving van het Schelde model

Het model omvat een deel van de Schelde van nagenoeg 8.5 km lengte afwaarts begrensd ter hoogte van de Belgisch-Nederlandse grens, opwaarts ter hoogte van Doel (zie figuur 1).

De bathymetrie werd gediscretiseerd op een rechthoekig equidistant rooster met een cellengte van 50 m. De oriëntatie van het rooster is zodanig dat de zuidelijke containerkaai parallel is met de y-richting van het rooster. Daarvoor werd het rooster over 22.8° t.o.v. het noorden in tegenuurwijzerzin gedraaid. Het modelgebied bestaat uit 70 kolommen, 172 rijen, resulterend in nagenoeg 6000 actieve cellen. De verticale lagen hebben een dikte van minimum 3m dikte. De verdeling van de lagen over de verticale is als volgt: laag 1 is gelegen tussen het wateroppervlak en -3 m TAW (Tweede Algemene Waterpassing), laag 2 tussen -3 m TAW en -6 m TAW, laag 3 tussen -6 m TAW en -9 m TAW en laag 4 tussen -9 m TAW en de bodemdikte. Op ondiepe plaatsen (< -12 m TAW) wordt de onderste laag stelselmatig uitgeschakeld, de nieuwe bodemlaag vergroot dan om de juiste diepte te behouden. De dikte van de bovenlaag verandert met het getij; tijdens springtij is dit dan b.v. tussen ongeveer 3 m bij laagwater en 9 m bij hoogwater. Deze relatief grove verticale resolutie is voldoende voor de Schelde omdat er geen duidelijk afglijnde grens bestaat tussen zoet en zout water.

Fig. 4: Doodtij Hoge Saliniteit Snelheid in Meetpunten van 27/9/90 Vergelijking met Metingen



Het model omvat zowel gesloten randen (oeveren, kaaimuren) als open randen. Langs de gesloten randen wordt er een 'free slip' conditie toegepast. Aan de afwaartse open rand, ter hoogte van de Belgisch-Nederlandse grens wordt een waterstand opgelegd, terwijl aan de opwaartse rand (ter hoogte van Doel) het model aangedreven wordt door een snelheidsrandvoorwaarde. Tevens moet aan beide open randen een saliniteitswaarde opgelegd worden.

3. CALIBRATIE EN VALIDATIE

3.1. Beschrijving van de gegevens

De twee datasets van de 13-uursmetingen ter hoogte van de Drempel van Zandvliet werden gebruikt voor de calibratie en validatie van het model. [zie Fettweis et al. (1994)]. De metingen omvatten zowel stroming, richting, temperatuur als conductiviteit. De calibratie werd uitgevoerd door het springtij van 4/10/90 te simuleren, als validatie werd het doodtij van 27/9/90 gesimuleerd. Zowel de waterstands- als de snelheidsrandvoorwaarde werden gegenereerd uit simulaties met het 2D hydraulisch model FINEL van de Schelde. [zie IMDC (1991)].

Het zoutgehalte in de rivier is variabel, de twee belangrijkste factoren zijn enerzijds het getij en anderzijds de bovenafvoer van de rivier. Grote bovendebieten treden op in de winter, tijdens de zomer is het bovendebiet geringer. Hoge zoutwaarden komen voor tijdens de herfst en lage waarden op het einde van de winter en het begin van de lente. In de herfst bedraagt de saliniteitsgradiënt tussen Prosperpolder en Liefkenshoek ongeveer 0.51 g/l per km, terwijl tijdens lage saliniteiten de gradiënt afneemt tot 0.28 g/l per km (Antwerpse Zeehaven-dienst, 1981).

Uit de metingen ter hoogte van de Drempel van Zandvliet op 4/10/90 en 27/9/90 werd

Fig. 5: Springtij 04/10/90 - Hoge Saliniteit Snelheidsverticalen Meetpunt 1 (3D Model)

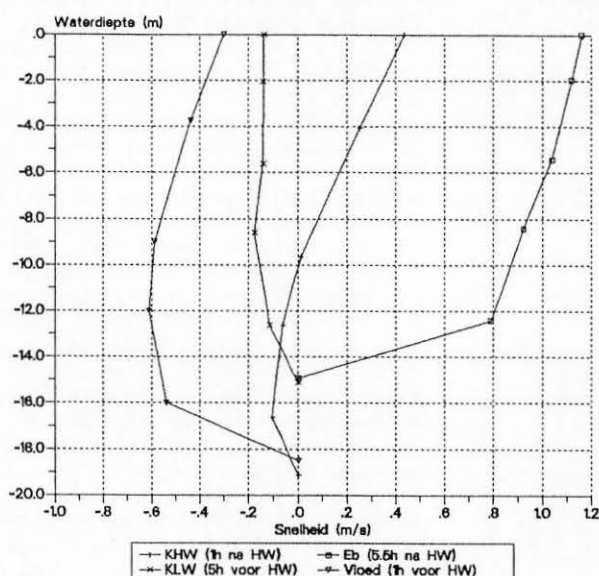


Fig. 6: ADCP snelheidsmeter

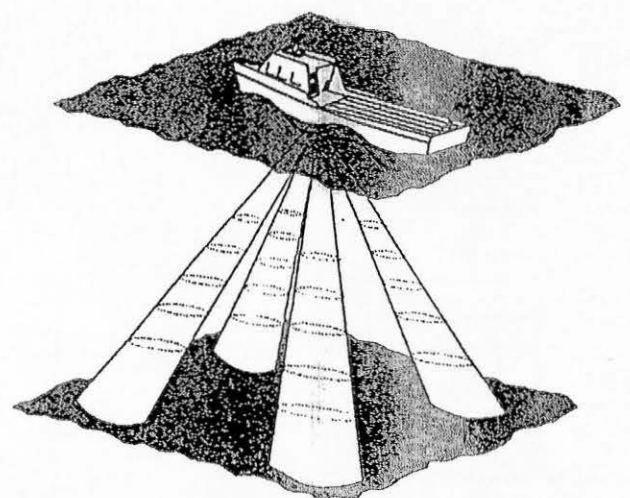
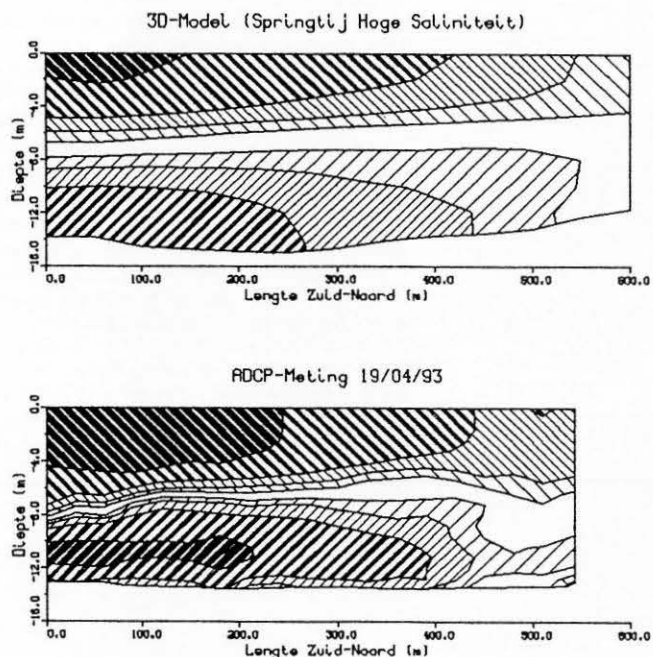


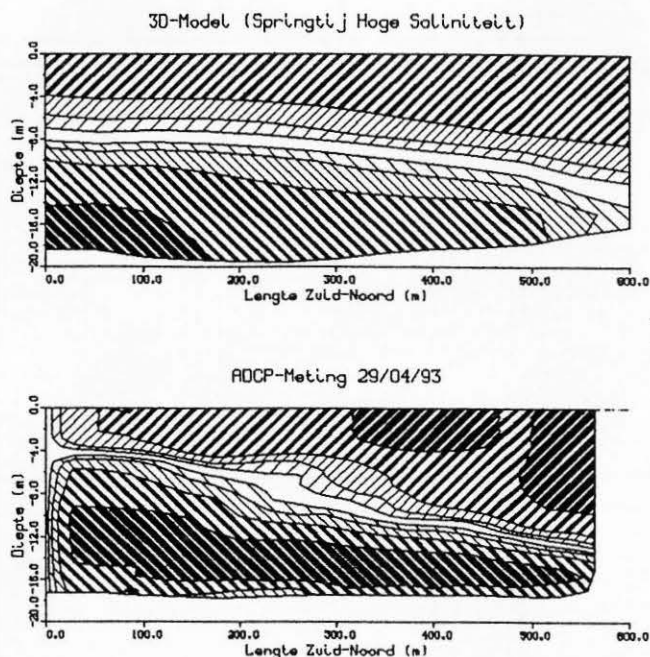
Fig. 7: Toegangsgeul Zandvliet - Berendrecht
Tijd: omstreeks 5.0h voor HW



Snelheden in cm/s
Oost-West Snelheid (+ naar Sluizen, - naar Schelde)

	< -20.0		2.0 : 5.0
	-20.0 : -10.0		5.0 : 10.0
	-10.0 : -5.0		10.0 : 20.0
	-5.0 : -2.0		> 20.0
	-2.0 : 2.0		

Fig.8 : Toegangsgeul Zandvliet - Berendrecht
Tijd: omstreeks 1.0h na HW



Snelheden in cm/s
Oost-West Snelheid (+ naar Sluizen, - naar Schelde)

	< -20.0		2.0 : 5.0
	-20.0 : -10.0		5.0 : 10.0
	-10.0 : -5.0		10.0 : 20.0
	-5.0 : -2.0		> 20.0
	-2.0 : 2.0		

een saliniteitsgradiënt berekend van 0.42 g/l per km tijdens springtij en 0.35 g/l per km tijdens doortij (Fettweis et al., 1994). Deze saliniteitsgradiënten werden weerhouden voor de calibratie- en de validatiesimulatie. Een derde en vierde simulatie werd uitgevoerd voor een springtij tijdens een periode met een lage horizontale zoutgradiënt (0.20 g/l per km) en voor een springtij zonder zout respectievelijk. De berekeningen werden gestart op hoogwater. Als beginvoorwaarde voor saliniteit, snelheid en waterstand werd een constante waarde over heel het modelgebied genomen.

Gedurende de calibratie (springtij - hoge saliniteit) werden diverse simulaties uitgevoerd om de waarde van de bodemruwheid en de horizontale diffusiecoëfficiënt te bepalen.

3.2. De stroming in de Schelde

De snelheden in de Schelde werden vergeleken met de gemeten waarden in de meetpunten van 4/10/90 en 27/9/90. De positie van de meetpunten is weergegeven in figuur 2. Uit deze vergelijking, zie figuur 3 en 4, blijkt dat de gemeten verticaal gemiddelde snelheid goed overeenstemt met de snelheid in de bovenste lagen van het model. Daarnaast blijkt dat het snelheidsprofiel afwijkt van het klassieke snelheidsprofiel:

Fig. 9 : Springtij hoge saliniteit. Stroming in de toegangsgeul 2 uur voor HW.

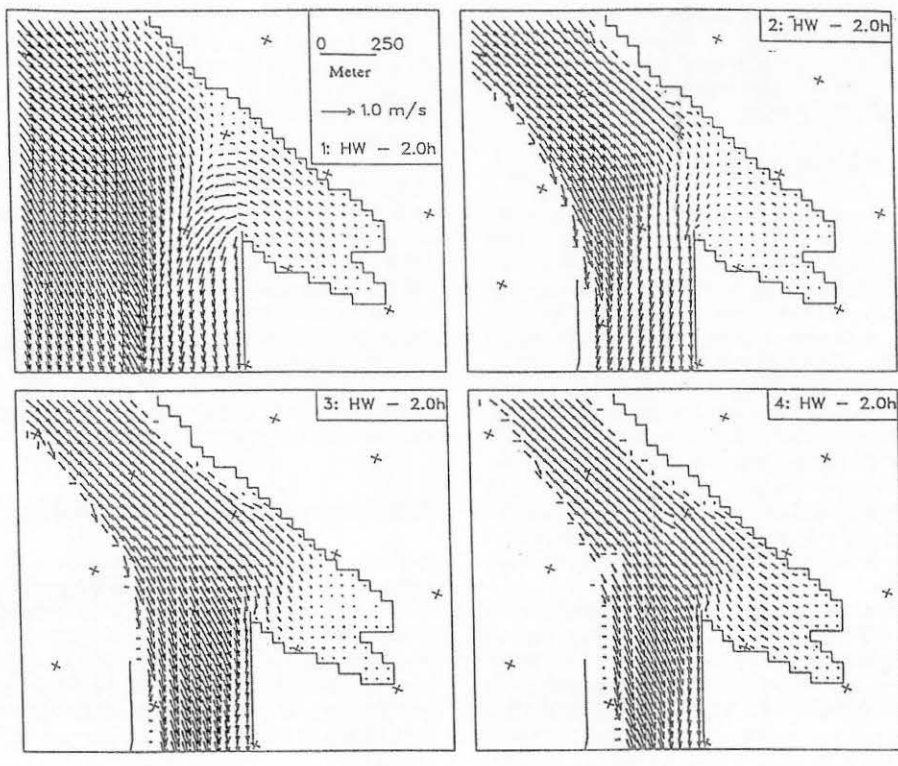
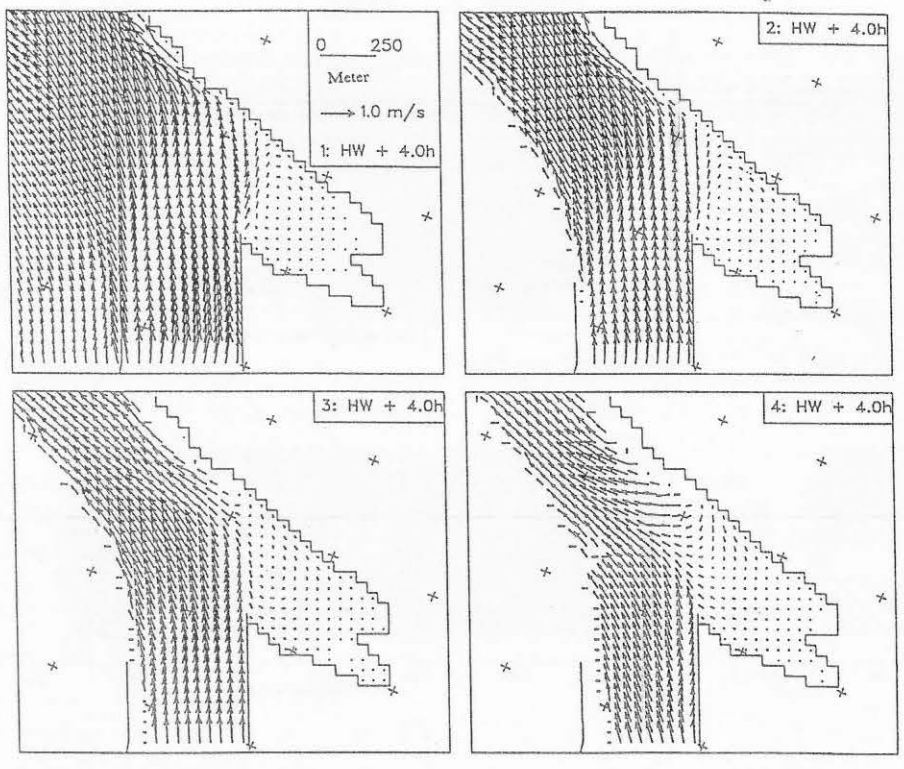


Fig. 10 : Springtij hoge saliniteit. Strooming in de toegangsgeul 4 uur na HW.



aan het oppervlak is een zeewaartse component waarneembaar. Dit veroorzaakt tijdens vloed een afname van de snelheid aan de oppervlakte en tijdens eb een toename ervan (zie figuur 5). Deze verandering van het snelheidsprofiel wijst duidelijk op de aanwezigheid van een horizontale dichtheidsgradiënt. Door de aanwezige verticale gelaagdheid van de saliniteit omstreeks hoogwaterkentering is de stroming in de bovenlaag zeewaarts gericht terwijl in de onderlaag het zoutere water nog naar opwaarts stroomt (zie figuur 5). De bovengenoemde bevindingen werden ook teruggevonden in de meetresultaten, zie Fetweis et al. (1994).

3.3. De toegangsgeul

De snelheden in de toegangsgeul werden geanalyseerd op basis van metingen met een akoestische Doppler snelheidsmeter (ADCP). Dit instrument laat toe om al varende in enkele minuten de snelheidsverdeling over een volledige dwarssectie op te meten (Rowe et al., 1987) (zie figuur 6). Tijdens de meting wordt met behulp van vier stralen energie uitgezonden. Deze energie wordt gereflecteerd door partikels die in de weg van de stralen liggen. Een klein deel van de gereflecteerde energie keert terug naar het instrument. De Doppler verschuiving in frequentie van de gereflecteerde energie is proportioneel met de snelheid.

Een dergelijke meting werd uitgevoerd op 19/4/93 en 29/4/93 aan de ingang van de toegangsgeul (zie figuur 2). Per verticale werd de snelheidsvector opgemeten met een resolutie van 0.5 m. De tussenafstand tussen de verticalen bedroeg ongeveer 25m bij een totale breedte van de $\pm 600\text{m}$.

Aangezien op deze meetdagen de getijomstandigheden, de saliniteitsvoorwaarden en de bathymetrie verschilden van de calibratieomstandigheden, is een gedetailleerde vergelijking onmogelijk. Bovendien bestaat de verticale resolutie van het 3D model slechts uit vier lagen, terwijl door de ADCP metingen werden uitgevoerd elke 0.5 m wat resulteert in een veel fijnere weergave van de verticale snelheidsstructuur dan in het model.

Niettemin kan aan de hand van twee situaties, namelijk 5 uur voor hoogwater en 1 uur na hoogwater worden aangetoond dat de stroming kwalitatief en kwantitatief goed wordt berekend in het model. Enkel omstreeks 2 tot 3 uur na hoogwater is de overeenkomst minder goed. De eerste situatie (zie figuur 7) is typisch voor het uitstromen van water naar de Schelde via de bodem, terwijl de toegangsgeul gevuld wordt via de bovenlaag. De tweede situatie (zie figuur 8) is kenmerkend voor het instromen van zoeter water van de Schelde naar de sluizen via de bodem, terwijl er water uit de toegangsgeul stroomt via de bovenlaag. Gezien de bovengenoemde beperkingen tonen deze figuren aan dat de in- en uitstroming van water in de toegangsgeul goed gereproduceerd wordt door het model.

4. STROMING IN DE TOEGANGSGEUL

Het gebruik van het mathematisch stromingsmodel laat toe de lokale en ogenblikkelijke informatie die vergaard werd tijdens stroommetingen uit te breiden tot een globaal stroombeeld in de toegangsgeul en de directe omgeving ervan. De kwalitatieve beschrijving van het stromingspatroon in de toegangsgeul kan als volgt worden samengevat:

- begin van de vloed (5-4 uur voor HW)
Het water stroomt de toegangsgeul binnen in de bovenlaag. De saliniteit in de toegangsgeul is nog laag. Het zoutere water uit de toegangsgeul stroomt aan de bodem terug naar de rivier.
- rest van de vloed (3 uur voor HW)
Omstreeks 3 uur voor HW heeft het zoutere water de toegangsgeul bereikt, daardoor keert de stroming om. Het zoutere water stroomt de toegangsgeul binnen langs de bodem en het zoetere water verlaat de toegangsgeul in de bovenlaag in noordelijke richting. Van zodra het uitstromend water de rivier bereikt heeft, wordt het meegevoerd naar opwaarts.
- begin van de eb (1-2 uur na HW)
De saliniteit bereikt nu haar maximum in de rivier. In de toegangsgeul is echter nog zoeter water aanwezig. Een neer ontstaat over bijna heel de waterkolom, draaiend in uurwijzerzin. De grootste instroming gebeurt aan de bodem. Het water wordt nu in een spiraalvormige beweging naar de oppervlakte getransporteerd, waar het de toegangsgeul verlaat.
- rest van de eb (3-6 uur na HW)
De neer in uurwijzerzin blijft behouden, doch de spiraalvormige beweging keert zich om. Zoeter water wordt via een neerwaartse beweging naar de bodem getransporteerd. Het zoutere water in de onderlaag verlaat de toegangsgeul.

Het typisch stromingspatroon tijdens vloed (2 uur voor HW) en tijdens eb (4 uur na HW) is weergegeven in de figuren 9 en 10. De stroming in de toegangsgeul blijft onder alle getijomstandigheden klein: zowel bij springtij als bij doottij, bij hoge of bij lage saliniteit blijven de snelheden beperkt tot maximaal 0.2 tot 0.3 m/s. Dit betekent dat het water dat de toegangsgeul binnenkomt of verlaat nooit snel genoeg stroomt om erosie van slib te kunnen veroorzaken. Bij lage saliniteitswaarden daalt de snelheid in de toegangsgeul met 5% tot 10% t.o.v. de situatie met hoge saliniteit. Bij afwezigheid van een saliniteitsgradiënt is de stroming in het grootste deel van de toegangsgeul verwaarloosbaar klein tijdens vloed. Tijdens eb zijn de snelheden groter ($\pm 0.1\text{m/s}$) ten gevolge van de aanwezigheid van een neer. In de toegangsgeul is de structuur van de snelheidsverticalen complex. De aanwezigheid van een neer, gecombineerd met de wateruitwisseling ten gevolge van dichtheitsverschillen maakt dat in de toegangsgeul de stroming in de boven- en de onderlaag meestal in tegenovergestelde richting staat. De dikte van deze lagen is niet eenduidig definieerbaar, maar verandert in de loop van het getij. De stroming bij afwezigheid van een saliniteitsgradiënt is nagenoeg constant over de verticaal zodat er geen tweelagen stroming meer optreedt.

5. SALINITEIT IN DE TOEGANGSGEUL EN DE RIVIER

Het verticale saliniteitsverschil in de rivier is meestal beperkt tot $<1\text{g/l}$ ($\pm 0.5\text{g/l Cl}^-$) uitge-

zonderd tijdens het saliniteitsmaximum (2 uur na kentering hoogwater), de waarden kunnen dan oplopen tot boven de 3.0 g/l (1.7g/l Cl⁻) afhankelijk van de plaats. In de toegangsgeul is altijd een duidelijke verticale saliniteitsgradiënt aanwezig. Het verschil in zoutgehalte tussen oppervlakte en bodem is min of meer constant, enkel tijdens kentering bij laagwater neemt het verschil af, [IMDC (1990)]. Het saliniteitsverschil tussen oppervlakte en bodem is gemiddeld ongeveer dubbel zo groot als in de Schelde en loopt aan de zuidzijde van de toegangsgeul op tot 2.5 g/l en aan de noordzijde tot 3.0 g/l. In figuur 11 worden de saliniteitsverschillen duidelijk geïllustreerd. Uit de figuur blijkt ook dat tijdens eb er nog nauwelijks sprake is van gelaagdheid aan de noordzijde van de toegangsgeul.

Zowel de horizontale (in de lengterichting van de Schelde), de verticale als de laterale (dwars op de lengterichting) saliniteitsgradiënt kunnen teruggevonden worden in de simulaties. In de rivier stijgt het zoutgehalte naar afwaarts toe. Omstreeks maxi-

male saliniteit (ongeveer één uur na hoogwater) is er een duidelijke verticale gradiënt aanwezig in de waterkolom. Deze gradiënt verdwijnt geleidelijk aan en tijdens minimum saliniteit (ongeveer één uur na laagwater) is de rivier verticaal goed gemengd. De laterale saliniteitsgradiënt is afhankelijk van de plaats in de rivier, in tegenstelling met de verticale gradiënt is de laterale zoutgradiënt maximaal omstreeks laagwater, bij minimale saliniteit dus.

In de toegangsgeul is altijd een verticale saliniteitsgradiënt aanwezig. In de bovenlaag is het zoutgehalte geringer dan aan de bodem. Tijdens maximum saliniteit in de Schelde is het zoutgehalte aan de oppervlakte van de toegangsgeul kleiner dan in de rivier, zodat er een horizontale saliniteitsgradiënt tussen de toegangsgeul en de rivier aanwezig is. Omstreeks minimum saliniteit in de Schelde is het zoutgehalte in de toegangsgeul over heel de diepte hoger dan in de rivier. Deze fenomenen worden in figuur 11 geïllustreerd. In deze figuur wordt het zoutgehalte in functie van de

tijd uitgezet in een aantal punten gelegen in de toegangsgeul en in de rivier. De sterke verticale gradiënt in de toegangsgeul (vooral in het zuidelijk gedeelte ervan) contrasteert scherp met de geringe gradiënt in de rivier. De verschillen in saliniteit tussen de rivier en de toegangsgeul zijn het gevolg van de stroming in de toegangsgeul. Zoals boven beschreven stroomt het water over nagenoeg het hele getij in twee lagen in de toegangsgeul. Door de geringe snelheid in de toegangsgeul en door de gelaagdheid van de stroming wordt het water trager vervangen in de toegangsgeul dan in de rivier, wat als gevolg heeft dat er zowel horizontaal als verticaal een zoutgradiënt gevormd kan worden.

6. WATERUITWISSELING TUSSEN DE TOEGANGSGEUL EN DE RIVIER

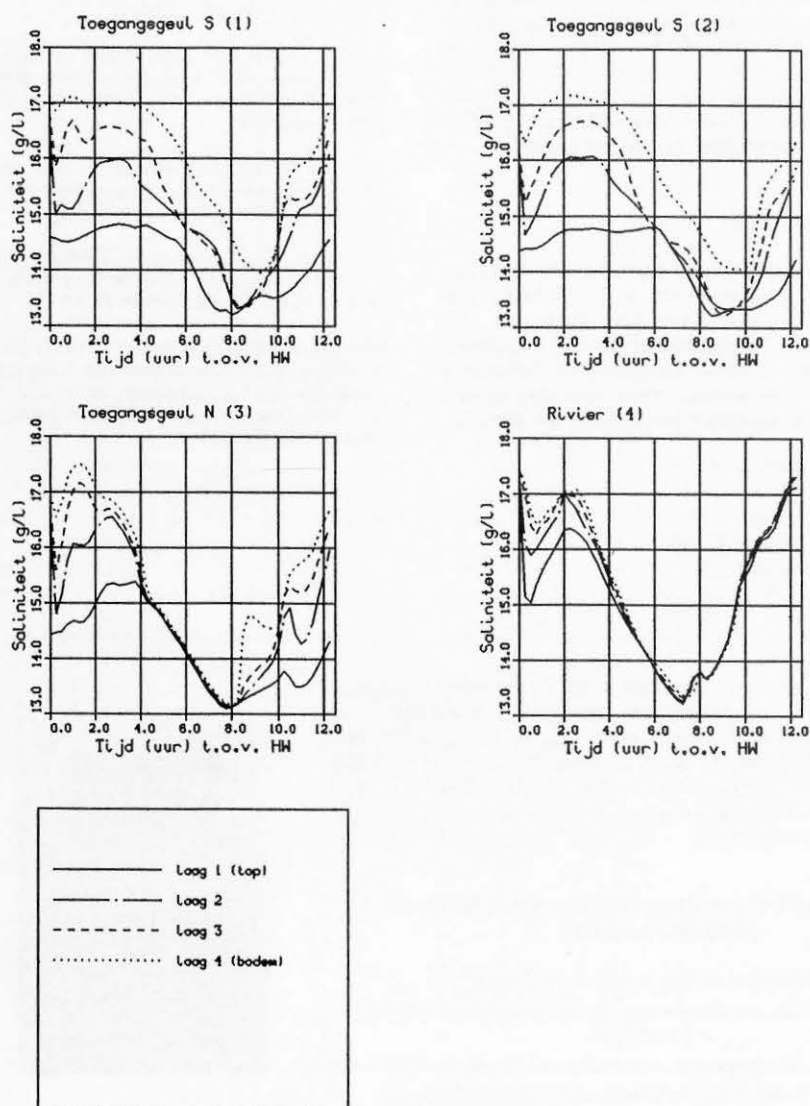
Zoals hoger gezegd, wordt de wateruitwisseling tussen de toegangsgeul en de Schelde veroorzaakt door de vulling en leiding door het getij, door een neer die ontstaat door de langstreckende stroming in de Schelde, door de densiteitsstromingen als gevolg van zoutverschillen in de Schelde gedurende het getij en door randeffecten (kaaimuren).

Door het in- en uitstromend debiet door de meetraai aan de ingang van de toegangsgeul te integreren over een getij, werd het totaal volume instromend water berekend. Een vergelijking met het getijvolume laat toe om na te gaan in welke mate de horizontale wateruitwisseling, als gecombineerd effect van neervorming en densiteitsstroming, de dominerende factor is.

Tijdens springtij bedroeg de wateruitwisseling als gevolg van het getij (komberging) $1.88 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en bij doortij $1.40 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, terwijl de totale wateruitwisseling (komberging+horizontale uitwisseling) ongeveer $20 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ bedraagt. In tabel 1 wordt de wateruitwisseling samengevat voor de verschillende omstandigheden. Hieruit kunnen volgende conclusies worden getrokken:

1. De totale wateruitwisseling (neer en saliniteit) is een factor 10 tot 12 groter dan de verticale (komberging). Vroegere analyses voor de toegangsgeul van de Zandvlietsluis gaven een verhouding aan van 20 tot 25 (Waterbouwkundig Laboratorium, 1971).
2. De grootte van de horizontale saliniteitsgradiënt heeft een invloed op de totale wateruitwisseling. Bij een lagere saliniteit is de uitwisseling van water tussen de toegangsgeul en de rivier met ongeveer 16% en zonder saliniteit met ongeveer 50% verminderd t.o.v. de toestand bij een hoge saliniteit.
3. De densiteitseffecten veroorzaakt door de aanwezigheid van een horizontale saliniteitsgradiënt spelen een voorname rol bij de wateruitwisseling tussen de toegangsgeul en de rivier.
4. De saliniteit heeft een grotere invloed dan de verschillen in getij. Zo is bij doortij met een hoge saliniteit de wateruitwisseling groter dan bij springtij met een lage saliniteit.

Fig. 11: Springtij Hoge Saliniteit Saliniteit in Toegangsgeul en Rivier



Tabel 1: Wateruitwisseling (in miljoen m³) tussen de toegangsgeul en de rivier tengevolge van verticale (komberging) en horizontale (neer en saliniteit) waterbewegingen (totaal=komberging+horizontaal).

Simulatie	Komberging	Totaal
Springtij hoge saliniteit	1.88	19.89
Doodtij hoge saliniteit	1.40	17.15
Springtij lage saliniteit	1.88	16.65
Springtij geen saliniteit	1.88	9.35

5. De gemiddelde hoeveelheid water (overeenkomend met halftij) in de toegangsgeul tijdens springtij bedraagt ongeveer 5.5 miljoen m³ en tijdens doodtij ongeveer 5.2 miljoen m³. Dit betekent dat tijdens één springtijcyclus bij een hoge saliniteit het water 3.6 keer 'ververst' wordt. Tijdens één springtijcyclus bij een lage saliniteit is dit 3.0 keer en tijdens één doodtijcyclus bij een hoge saliniteit 3.3 keer. Tijdens één springtijcyclus zonder saliniteit wordt het water slechts 1.7 keer ververst.

7. CONCLUSIES

In dit artikel werden de resultaten van enkele numerieke modelsimulaties van een deel van de Beneden-Zeeschelde besproken. Het doel van het model was om een beter inzicht te bekomen in de stroming in de toegangsgeul tot de sluizen van Zandvliet en Berendrecht, gelegen ter hoogte van de Drempel van Zandvliet. De stroming in de toegangsgeul wordt zowel gedomineerd door het getij, door de langstrekken- de stroming in de Schelde, door dichtheids- effecten als door randeffecten in de toegangsgeul. Om met elk van deze processen rekening te kunnen houden is het noodzakelijk om gebruik te maken van een 3D hydrodynamisch model gekoppeld aan een zouttransportmodel. De modelresultaten werden vergeleken met meetwaarden. Hiertoe werden twee 13-uursmetingen in een dwarsraai ter hoogte van de Drempel van Zandvliet uitgewerkt en werd de snelheidsverdeling in een dwarsraai aan de ingang van de toegangsgeul opgemeten met een ADCP. De resultaten van deze vergelij-

king tonen aan dat het numeriek model in staat is om de stroming in de Schelde en in de toegangsgeul met voldoende nauwkeurigheid weer te geven.

Buiten de hier geïllustreerde toepassing, zijnde het vergroten van de kennis inzake de wateruitwisseling en de zoutindringing in een inham van de Schelde, vormt een dergelijk model de basis voor de studie van sedimenttransporten. Toegangsgeulen, zoals die van de Zandvliet-Berendrechtssluis, zijn preferentiële gebieden voor de sedimentatie van slib. Jaarlijks worden grote hoeveelheden slib uit de toegangsgeulen tot de haven verwijderd. Een slibtransportmodel, dat gebruik maakt van het stromingsveld berekend door een hydrodynamisch model, laat toe om deze sedimentatie te berekenen. Zodoende kunnen de effecten van menselijke ingrepen (zoals de verdieping van de vaargeul of de bouw van de noordelijke containerkaai) voorspeld worden en kunnen indien nodig compenserende maatregelen genomen worden.

DANKWOORD

De auteurs wensen hun dank te betuigen aan het personeel van de Studiedienst van de Antwerpse Zeehavendienst voor de vruchtbare samenwerking. De inspanningen van de bemanning van het meetschip van de Antwerpse Zeehavendienst tijdens de ADCP meting waarderen zij ten zeerste.

M. FETTWEIS
M. SAS
I.M.D.C. nv
Wilrijkstraat 37-45
2140 Borgerhout

LITERATUURLIJST

Antwerpse Zeehavendienst (1993). ADCP Meting Toegangsgeul Zandvliet - Berendrecht op 19/04/93 en 29/04/93.

Cooper A.J. (1983). Formulation and Development of a 3D Numerical Model of Estuaries. HR Wallingford, Report IT 254.

Fettweis M., M. Sas en L. Meyvis (1994). Analyse van Stroom- en Sedimentmetingen ter hoogte van de Drempel van Zandvliet. Water. Nr.76.

Gill A.E. (1982). Atmosphere-Ocean Dynamics. International Geophysics Series, Volume 30. Academic Press.

I.M.D.C. (1990). Toegangsgeul Zandvliet - Berendrecht. Meetcampagne t.b.v. de Baggerwerken. Eindrapport.

I.M.D.C. (1991). Containerkaai Noord - Hydraulisch Onderzoek, Eindrapport. Nr. 1146-91.12.08.

I.M.D.C. (1992a). Containerkaai Noord - Hydraulisch en Sedimentologisch Onderzoek. Deelrapport 1: Stroom- en Sedimentmeting 27/09/90. Rapport Nr. 1166-92.01.02-03.

I.M.D.C. (1992b). Containerkaai Noord - Hydraulisch en Sedimentologisch Onderzoek. Deelrapport 2: Stroom- en Sedimentmeting 04/10/90. Rapport Nr. 1166-92.01.04-05.

I.M.D.C. (1993). Interactie tussen de Containerkaai Noord en de Toegangsgeul Zandvliet Berendrecht. Hydraulisch - Sedimentologisch Onderzoek. Eindrapport.

Odd N.V.M. en J.G. Rodger (1978). Vertical Mixing in Stratified Flows. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol.104, No.HY3.

Rowe F.D., R.L. Gordon en R.G. Williams (1987). Acoustic Profiling of Currents and Backscatter Level. ASCE, Coastal Sediments '87.

Waterbouwkundig Laboratorium (1971). De Aanslibbing en de Aanzanding van de Toegangsgeul tot de Zeesluis van Zandvliet. Model 277. Ministerie van Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium Borgerhout.

De tijdschriften WATER en ENERGIE & MILIEU worden uitgegeven door de vzw WEL - Marktplein 16, 2110 Wijnegem. Tel. 03/353.72.53. Een jaarabonnement kost 1400 Fr. per tijdschrift voor 6 nummers. Een abonnement op de 2 tijdschriften samen kost 2200 Fr. Bedrag te storten op rekening nr. 068-2114041-50 of P.C. 000-0227052-72 voor WATER of voor een gezamenlijk abonnement op één van beide rekeningen met vermelding "WATER + ENERGIE & MILIEU".

Inhoudsopgave van het tijdschrift Energie & Milieu nr. 4 juli/augustus 1994

Warmte/kracht-koppeling en industrie

De invloed van de wegbedekking op het brandstofverbruik van voertuigen

Het nieuwe afvalstoffendekreet: implicaties voor het bedrijfsleven

Relighting & renovation: kwaliteitsverlichting gekoppeld aan een doordacht rationeel energiegebruik

