

Opdrachtgever:

DG Rijkswaterstaat

Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ

3D modellering Veerse Meer: Modelopzet

September 2000

3D modellering Veerse Meer: Modelopzet

M.D.J.P. Bijvelds en A.J. Nolte



wl | delft hydraulics



OPDRACHTGEVER:		DG Rijkswaterstaat Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ			
TITEL:		3D modellering Veerse Meer: Modelopzet			
SAMENVATTING:					
<p>Het Veerse Meer is een gesloten watersysteem met grote variatie in de bodemligging. Ondiepe delen worden afgewisseld met geulen en diepe putten. Door het spuien van zout water en tengevolge van zoninstraling treedt er in het Veerse Meer gedurende bepaalde periodes van het jaar verticale dichtheidsstratificatie op in de diepe putten. Het is bekend dat 3D modellering van de waterbeweging met een verticale schematisatie gebaseerd op de zogenaamde sigma-transformatie onnauwkeurig wordt bij de combinatie van steile bodemgradiënten en verticale stratificatie.</p> <p>Dit rapport beschrijft de resultaten van een vergelijkende studie voor het Veerse Meer tussen twee numerieke modellen die slechts verschillen in de definitie van het verticale rekenrooster. Naast simulaties met het sigma-coördinatensysteem (standaard Delft3D-FLOW) zijn berekeningen uitgevoerd met een verticale schematisatie gebaseerd op Cartesische z-coördinaten (onderzoeksversie).</p> <p>De stroming in het Veerse Meer wordt hoofdzakelijk geforceerd door de wind en dichtheidsverschillen t.g.v. de lozingen. 3D simulaties met het sigma-model tonen een sterke verticale opmenging en het numerieke model blijkt niet de gemeten stratificatie te reproduceren. Dit sigma-model maakt gebruik van het zogenaamde "anti-creep" algoritme van Stelling en Van Kester (1994) om de onnauwkeurigheid van de sigma-transformatie te verbeteren. De resultaten van 3D simulaties met het Cartesische vaste lagen model komen kwalitatief wel goed met de metingen overeen.</p> <p>Een twee-dimensionale breedtegemiddelde schematisatie van het gebied is gebruikt om het effect van beide verticale modelschematisaties nader te onderzoeken en een verklaring voor de verschillen te vinden. De simulaties laten zien dat het sigma-model beter in staat is de grenslaagstroming tijdens het vullen van de putten te simuleren maar minder goed in staat is de ontwikkelde stratificatie in stand te houden na het beëindigen van de lozing dan het model gebaseerd op Cartesische vaste lagen. Momenteel is nog onduidelijk wat hiervan de oorzaak is. Dit verdient nader onderzoek.</p>					
REFERENTIES:					
VER.	AUTEUR	DATUM	OPMERK.	REVIEW	GOEDKEURING
01	M.D.J.P. Bijvelds	13-09-2000		J.A.Th.M. van Kester	T. Schilperoort
PROJECTNUMMER:		z2800			
TREFWOORDEN:		Veerse Meer, sigma-transformatie, vaste lagen,			
INHOUD:	TEKST	TABELLEN	FIGUREN	APPENDICES	
STATUS:	<input type="checkbox"/> VOORLOPIG	<input type="checkbox"/> CONCEPT	<input checked="" type="checkbox"/> DEFINITIEF		

Inhoud

1	Inleiding	1-1
1.1	Achtergrond	1-1
1.2	Doelstelling	1-2
2	Opzet van het 3D model	2-1
2.1	Modelschematisatie	2-1
2.2	Diepteverdeling	2-2
2.3	Waterbalans	2-5
3	Beschrijving hydrodynamische modellen	3-1
3.1	Numerieke afhandeling	3-1
3.2	Verticale afhandeling	3-1
4	Vergelijking hydrodynamische modellen	4-1
4.1	Het 3D model	4-1
4.2	2DV schematisatie Veerse Meer	4-6
4.2.1	Modelopzet	4-6
4.2.2	Resultaten	4-7
5	Conclusies	5-1

I Inleiding

I.1 Achtergrond

Als onderdeel van de Deltawerken is het Veerse Meer afgesloten van de Oosterschelde en de Noordzee. Na de bouw van de Zandkreekdam in 1960 en de Veersedam in 1961 staat het Veerse Meer alleen via het sluzencomplex in de Zandkreekdam nog in verbinding met de Oosterschelde. Door afvoer van polderwater is de voorheen zoute zeearm brak geworden met een gemiddelde saliniteit van 15 tot 20 ‰. De specifieke geometrie van het meer, die gekenmerkt wordt door putten tot circa 23 meter diep naast aanzienlijke ondiepe gebieden, in samenhang met het hydrologisch regime resulteert in een gestratificeerd systeem gedurende het grootste deel van het jaar. In de zomermaanden is er naast een zoutstratificatie ook een temperatuursstratificatie.

Sinds de afsluiting is de waterkwaliteit van het meer verslechterd. Eutrofiëring heeft onder andere geleid tot uitbundige groei van *Ulva* (zeesla) en hoge concentraties fytoplankton tijdens de voorjaarsbloei. Door het hydrologisch regime, waarbij zout Oosterschelde water dat bij de Zandkreeksluis ingelaten wordt, via de diepe delen naar het westen stroomt, ontstaan een zoute onderlaag en een brakke oppervlaktelaag. De spronglaag bevindt zich op 5 tot 7 meter diepte. In combinatie met het afsterven van *Ulva* en fytoplankton kan in diepe delen van het meer zuurstofloosheid optreden.

In het licht van de (mogelijke) overdracht van het beheer van het Veerse Meer van het Rijk naar de Provincie Zeeland worden maatregelen genomen om de waterkwaliteit te verbeteren. Besloten is tot de aanleg van een doorlaatmiddel in de Zandkreekdam, waardoor een verbinding tot stand wordt gebracht tussen het Veerse Meer en de Oosterschelde. Een bijkomende maatregel is mogelijk het handhaven van een vast peil op 0 m NAP, in tegenstelling tot het huidige variabele peil van -0,70 m NAP in de herfst- en wintermaanden en 0 m NAP in de lente- en zomermaanden.

Door RIKZ en WL | Delft Hydraulics is in opdracht van Rijkswaterstaat Directie Zeeland een eerdere studie uitgevoerd naar de effectiviteit van de voorgestelde maatregelen op de waterkwaliteit (WL | Delft Hydraulics, 1999b). In deze studie werd gebruik gemaakt het STRESS model voor de waterbeweging en van het GEM Veerse Meer model (GEM = Generiek Ecologisch Model voor Estuaria) voor de waterkwaliteit. In samenwerking met RIKZ is het instrumentarium opgezet in het kader van de GEM toepassing Veerse Meer (WL | Delft Hydraulics, 1998).

Uit de studie naar de effectiviteit van het doorlaatmiddel werd geconcludeerd dat het doorlaatmiddel niet per definitie leidde tot een verbetering van de waterkwaliteit. Zo zou in het westelijk deel van het meer ter hoogte van de Veersedam de mate van stratificatie en daarmee samenhangend het risico op zuurstofloosheid toenemen. In het oostelijk deel van het meer trad wel een verbetering van de zuurstofconcentratie op. Daarnaast kwam uit de modelstudie naar voren dat het *Ulva* gehalte sterk zou toenemen wanneer het meer zouter

zou worden. De oorzaak was dat de verbetering van het lichtklimaat¹ belangrijker was dan de afname van de nutriëntconcentratie².

Gezien de relatief eenvoudige modelopzet (STRESS is een 2DV model) en de daardoor geïntroduceerde onzekerheid in de modeluitkomsten, werd een meer gedetailleerde beschouwing van de effectiviteit van het doorlaatmiddel op de waterkwaliteit wenselijk geacht. WL | Delft Hydraulics heeft vervolgens in opdracht van RIKZ voor Rijkswaterstaat Directie Zeeland een 3-dimensionaal hydrodynamisch en waterkwaliteitsmodel opgezet. De 3-dimensionale toepassing onderscheidt zich van de 2-dimensionale STRESS toepassing door een groter detail in het horizontale vlak (zowel in de lengte- als in de breedterichting van het meer). De detaillering in de verticaal is vergelijkbaar.

1.2 Doelstelling

In deze rapportage wordt de opzet van het 3-dimensionale model van het Veerse Meer beschreven. Het rapport valt uiteen in 2 delen. In het eerste deel wordt de schematisatie en de modelinvoer beschreven (hoofdstuk 2). Punten die aan de orde komen zijn:

- bathymetrie;
- horizontale en verticale schematisatie;
- in- en uitgaande debieten (waterbalans).

Het tweede deel van het rapport behandelt de keuze van het hydrodynamisch model. Het Veerse Meer is een zwak-dynamisch systeem. Hiermee wordt bedoeld dat de waterbeweging niet door getij gestuurd wordt. In het Veerse Meer zijn twee factoren dominant voor de waterbeweging: verschillen in dichtheid en windgedreven stroming. Daarnaast stelt de geometrie van het Veerse Meer (een voormalige getijgeul met diepe putten tot -24 m NAP) eisen aan het hydrodynamisch model. In dit rapport wordt onderzocht welk hydrodynamisch model (het gebruikelijke σ -model of het recentelijk ontwikkelde vaste-lagen (z-)model) het best toepasbaar is voor het Veerse Meer. Het verschil tussen beide methoden wordt beschreven in hoofdstuk 3. In hoofdstuk 4 volgt de vergelijking van beide methoden voor de 3D modellering van het Veerse Meer. Hoofdstuk 5 sluit af met conclusies.

¹ Zeewater bevat minder opgelost organisch materiaal dan zoet water. Aangezien opgelost organisch materiaal (o.a. humus) voor een belangrijk deel kan bijdragen aan de uitdoving van licht in de waterkolom, resulteert een afname van de concentratie opgelost organisch materiaal in een verbetering van het lichtklimaat (ervan uitgaande dat andere bijdragen aan de lichtextinctie gelijk blijven).

² Zeewater bevat over het algemeen minder nutriënten dan zoet water. Wanneer het meer zouter wordt, neemt bij conservatieve menging de nutriëntconcentratie in het meer af.

2 Opzet van het 3D model

2.1 Modelschematisatie

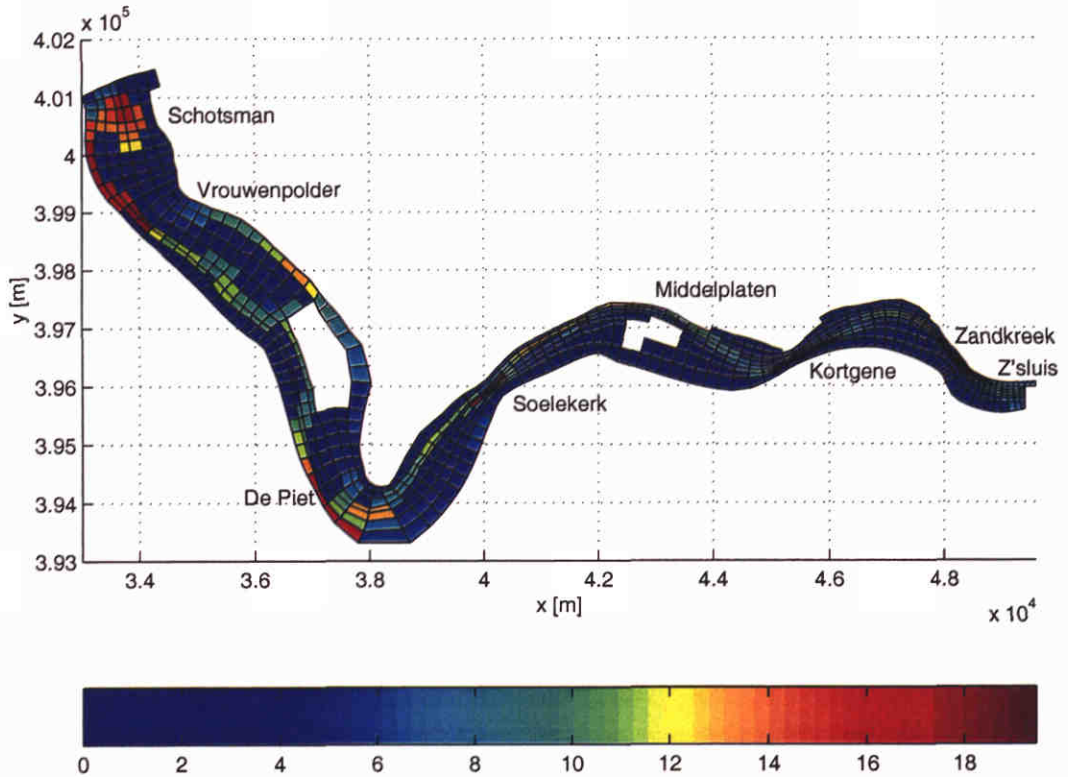
Voor de modelschematisatie is gebruik gemaakt van een aantal informatiebronnen:

1. Kustlijn Veerse Meer (0 m NAP) aangeleverd door de Rijkswaterstaat Directie Zeeland. (De kustlijn maakt onderdeel uit van een GIS bestand);
2. Nautische kaart van het Veerse Meer (uitgave Dienst der Hydrografie van de Koninklijke Marine, editie 1999);
3. Dieptepeilingen Veerse Meer 1990 aangeleverd door de meetdienst Zeeland.

Aan de modelschematisatie liggen de volgende overwegingen ten grondslag:

1. Voldoende horizontaal detail (zowel in de lengte- als de breedterichting);
Voldoende verticaal detail;
2. Goede representatie van diepteverdeling (het geulstelsel met zijn diepe putten in tegenstelling tot de ondiepe delen);
3. Rekeningtijden: het aantal segmenten dient zo klein mogelijk te zijn om de rekeningtijden zo kort mogelijk te houden;

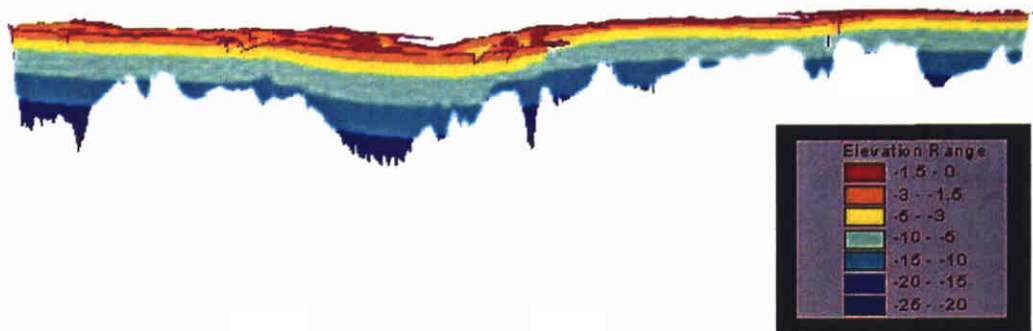
De genoemde overwegingen hebben geleid tot de (horizontale) schematisatie zoals weergegeven in figuur 2.1. In de lengterichting van het meer heeft het modelgrid 115 segmenten, die regelmatig over de lengte verdeeld zijn. In de breedterichting heeft het modelgrid maximaal 8 segmenten, hoewel voor het grootste deel volstaan wordt met 7 segmenten. In het oostelijk deel van het meer waar de geul tegen de noordelijke kustlijn ligt, is de schematisatie in de breedterichting zodanig gekozen dat de geul met optimaal detail weergegeven wordt. In het westelijk deel waar een twee-geulen systeem bestaat, is de schematisatie noodgedwongen minder gedetailleerd. De geul ten oosten van de Haringvrieter wordt slechts door een segment weergegeven.



Figuur 2.1 Horizontaal rekenrooster en het diepteveld voor het Veerse Meer model, inclusief de globale positie van de monitorstations. De diepte van het meer is aangegeven in meters.

2.2 Diepteverdeling

Zowel de kustlijn als de dieptemetingen (circa 100.000 peilingen) zijn in een GIS bestand opgenomen. Ondiepe delen van het meer (dat wil zeggen minder dan 1 meter diep bij een peil van 0 m NAP) ontbreken in de dieptemetingen. Deze waarden zijn op basis van de nautische kaart ingeschat dan wel is een uniforme diepte van -0,5 of -1 m NAP gehanteerd. De bathymetrie van het Veerse Meer wordt in Figuur 2.2 in een 3-dimensionaal beeld weergegeven. Het beeld is in de verticaal met een factor 50 geschaald. Duidelijk is de opeenvolging van putten te zien.



Figuur 2.2 3-dimensionaal zijaanzicht van het Veerse Meer (de verticale richting is 50 keer versterkt). Men kijkt vanuit het zuiden tegen het meer aan. Aan het rechter uiteinde ligt de Zandkreekdam, aan het linker uiteinde ligt de Veersedam.

Gezien het grote aantal metingen is met behulp van GIS een goede berekening te geven van zowel het totaal volume van het meer als wel het volume van de verschillende putten. Bovendien is de verdeling van het volume over de diepte te berekenen. Tabel 2.1 geeft een overzicht.

Tabel 2.1 Volume Veerse Meer per put per laag afgeleid uit dieptemetingen

Diepte (m NAP)	Zandkreek	Kortgene	Middelplaten	Soelekerk	De Piet	Vrouwenpolder	Schotsman	Haringvliet	Totaal	% van Totaal
0 tot -1	1,775,915	1,784,046	1,630,518	1,923,808	3,762,470	3,021,459	1,277,172	3,765,687	18,941,075	18.9%
-1 tot -2	1,004,509	1,152,390	877,424	1,640,753	3,156,916	2,848,527	1,055,908	2,884,457	14,620,884	14.6%
-2 tot -3	699,877	898,039	759,155	1,510,994	2,757,320	2,636,015	872,875	2,287,580	12,421,855	12.4%
-3 tot -4	634,153	818,090	711,673	1,434,041	2,419,390	2,347,057	764,383	1,717,477	10,846,264	10.8%
-4 tot -5	580,474	703,041	671,490	1,353,465	2,115,160	1,990,744	664,181	1,285,932	9,364,488	9.3%
-5 tot -6	511,057	530,291	623,662	1,247,448	1,868,643	1,679,104	588,110	910,673	7,958,988	7.9%
-6 tot -7	385,275	303,524	529,229	1,050,601	1,548,671	1,454,707	543,860	636,728	6,452,595	6.4%
-7 tot -8	306,714	206,509	421,678	859,046	1,169,677	1,239,455	497,234	474,429	5,174,742	5.2%
-8 tot -9	225,594	145,453	338,364	628,699	819,197	1,007,129	452,577	334,170	3,951,182	3.9%
-9 tot -10	152,352	85,532	234,550	432,745	550,884	823,594	392,353	218,403	2,890,412	2.9%
-10 tot -11	117,111	47,709	158,652	315,197	378,466	692,481	327,824	127,098	2,164,539	2.2%
-11 tot -12	90,511	28,861	107,591	195,535	275,325	573,100	281,216	69,067	1,621,206	1.6%
-12 tot -13	67,419	15,779	71,441	117,188	203,502	461,360	228,433	37,872	1,202,994	1.2%
-13 tot -14	48,955	6,433	45,859	85,646	164,736	365,498	181,797	16,175	915,100	0.91%
-14 tot -15	33,461	24	20,306	64,707	129,127	271,875	127,265	3,645	650,411	0.65%
-15 tot -16	23,335	0	5,645	44,162	94,486	194,892	76,513	101	439,135	0.44%
-16 tot -17	14,249	0	139	30,598	62,132	129,367	36,813	0	273,298	0.27%
-17 tot -18	4,796	0	0	24,692	31,108	75,794	14,683	0	151,073	0.15%
-18 tot -19	0	0	0	19,785	10,458	40,020	3,524	0	73,787	0.07%
-19 tot -20	0	0	0	13,100	1,045	19,902	48	0	34,095	0.03%
-20 tot -21	0	0	0	9,367	2	8,705	0	0	18,074	0.02%
-21 tot -22	0	0	0	5,544	0	2,745	0	0	8,289	0.01%
-22 tot -23	0	0	0	1,507	0	796	0	0	2,303	0.00%
-23 tot -24	0	0	0	23	0	76	0	0	100	0.00%
Totaal	6,675,757	6,725,723	7,207,377	13,008,651	21,518,715	21,884,404	8,386,768	14,769,495	100,176,889	100.0%

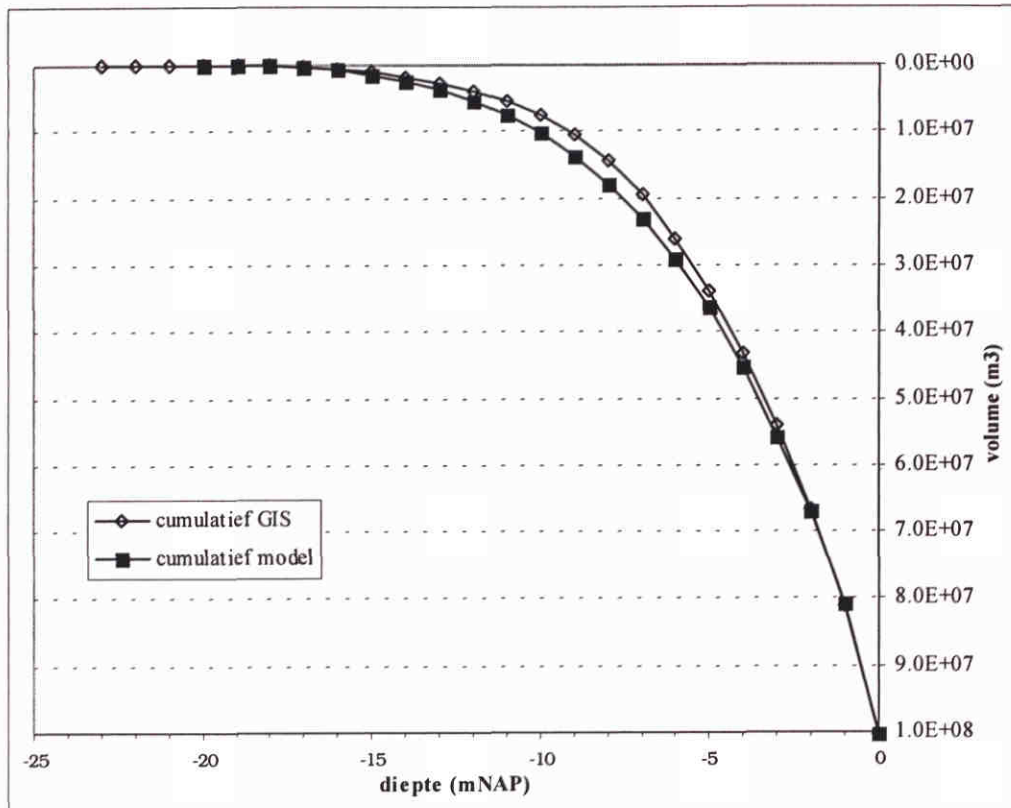
Tabel 2.2 Volume Veerse Meer per put per laag in modeltoepassing

Diepte (m NAP)	Zandkreek	Kortgene	Middelplaten	Soelekerke	De Piet	Vrouwenspolder	Schotsman	Haringvleter	Totaal	% van Totaal
0 tot -1	2,028,231	1,681,918	1,251,671	2,667,845	3,281,097	3,450,766	1,691,663	3,342,505	19,395,697	19.4%
-1 tot -2	1,006,048	1,078,375	448,207	1,739,506	2,802,395	2,979,058	1,229,292	2,638,930	13,921,811	13.9%
-2 tot -3	698,568	758,040	279,527	1,392,215	2,542,353	2,485,088	956,367	2,038,807	11,150,966	11.1%
-3 tot -4	664,486	629,621	270,618	1,260,593	2,425,967	2,222,454	896,668	1,918,676	10,289,085	10.3%
-4 tot -5	586,886	520,576	254,523	1,107,027	2,150,275	1,861,113	728,746	1,862,077	9,071,223	9.1%
-5 tot -6	522,381	419,708	198,877	908,339	1,506,844	1,563,378	624,692	1,411,099	7,155,319	7.1%
-6 tot -7	434,678	313,652	160,406	818,017	1,105,400	1,491,487	580,782	1,067,821	5,972,243	6.0%
-7 tot -8	302,921	222,594	148,196	743,920	987,078	1,491,487	509,458	726,596	5,132,250	5.1%
-8 tot -9	199,006	120,990	128,326	633,088	894,494	1,357,269	458,523	580,333	4,372,028	4.4%
-9 tot -10	137,223	69,295	91,281	537,245	773,443	1,071,641	436,834	305,048	3,422,010	3.4%
-10 tot -11	106,569	31,364	71,661	353,121	609,234	910,703	436,834	199,349	2,718,836	2.7%
-11 tot -12	76,440	14,899	60,926	228,722	478,130	680,722	432,603	135,795	2,108,236	2.1%
-12 tot -13	58,510	0	53,821	174,201	405,631	597,371	408,627	85,034	1,783,196	1.8%
-13 tot -14	40,482	0	31,140	108,454	282,863	516,631	348,787	22,430	1,350,786	1.3%
-14 tot -15	24,437	0	5,441	75,674	193,056	418,772	201,467	0	918,847	0.92%
-15 tot -16	2,539	0	0	73,609	185,404	320,910	140,995	0	723,457	0.72%
-16 tot -17	0	0	0	49,994	90,456	223,388	67,824	0	431,662	0.43%
-17 tot -18	0	0	0	49,994	8,365	145,857	0	0	204,216	0.20%
-18 tot -19	0	0	0	49,994	0	29,942	0	0	79,936	0.08%
-19 tot -20	0	0	0	22,797	0	0	0	0	22,797	0.02%
-20 tot -21	0	0	0	1,600	0	0	0	0	1,600	0.00%
-21 tot -22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00%
-22 tot -23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00%
-23 tot -24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00%
Totaal									100,226,202	100.0%

Het totaal volume van het Veerse Meer is 100 miljoen m³. Dit komt goed overeen met het volume dat vermeld wordt in (RIKZ, 1998). Uit tabel 2.1 blijkt dat het grootste deel van het volume in de bovenste waterlagen zit (66% in de bovenste 5 meter). Eveneens blijkt dat het volume van de diepe delen (meer dan 15 meter diep) slechts 1% van het totaal volume uitmaakt.

In het model zijn het volume en de diepteverdeling belangrijke grootheden. Het totaal volume dient goed te zijn, omdat deze bepalend is voor de verblijftijd in het meer hetgeen weer van belang is voor de effectiviteit van doorspoelen of uitwisselen. De diepteverdeling bepaalt het transport van Oosterschelde water door de geul. Hoe ver het zoute water doorloopt na inlaat bij de Zandkreeksluis, hangt af van het volume in de diepe delen.

De diepteverdeling zoals toegepast in het model, is weergegeven in tabel 2.2. Een vergelijking tussen GIS en het model wordt gemaakt in figuur 2.3. Vanwege het geringe volume zijn in het model de onderste lagen weggelaten.

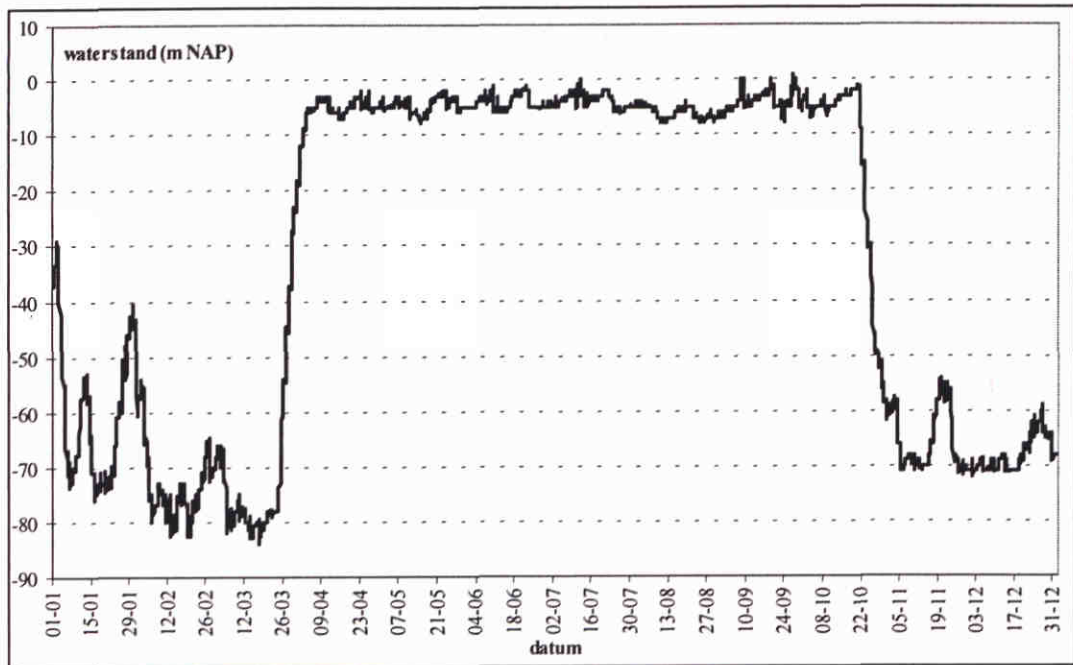


Figuur 2.3 Cumulatief volume per diepteklasse (y-as geeft het volume weer dat zich onder een bepaalde diepte bevindt)

Figuur 2.3 geeft aan dat de volumeverdeling in het model en GIS goed overeenkomen. Afwijkingen zijn het gevolg van het schematiseren van de diepte waardoor een enkel segment een uniforme diepte heeft. Wanneer in het gebied steile bodemgradiënten voorkomen, zoals in het Veerse Meer, is een grote detaillering nodig om een dergelijke gradiënt voldoende nauwkeurig weer te geven. De noodzaak om het aantal segmenten te beperken (en daarmee de rekestijd), resulteert in een relatief grove schematisering die in de diepe delen, waar steile bodemgradiënten optreden, zorgt voor een overschatting van het diep volume.

2.3 Waterbalans

De waterbalans wordt bepaald door alle in- en uitgaande debieten. Peilvariatie treedt op wanneer de in- en uitgaande debieten ongelijk zijn. Aangezien het Veerse Meer geen open verbinding met de Oosterschelde heeft en het meer derhalve als een gesloten systeem kan worden beschouwd (in modeltermen: het meer heeft geen open randen), is de waterbalans bepalend voor het waterpeil. Het waterpeil zoals gemeten in 1995 (station VM4 ligt in het middengedeelte van het Veerse Meer), is gegeven in figuur 2.4.



Figuur 2.4 Waterstand Veerse Meer bij locatie VM4 (middengedeelte van het meer) in 1995

Er zijn 3 uitgaande debieten en 13 ingaande debieten gedefinieerd. Daarnaast wordt een extra debiet toegepast welke de uitwisseling van zout tussen de Oosterschelde en het Veerse Meer representeert. De in- en uitlaten worden hieronder vermeld:

Uitgaande debieten:

1. Zandkreeksluis - water dat door het schutten van het Veerse Meer naar de Oosterschelde wordt gebracht;
2. Verdamping;
3. Spuidebieten - om het peil te handhaven wordt bij de Zandkreeksluis water afgelaten naar de Oosterschelde;

Ongaande debieten:

1. Zandkreeksluis - water dat door het schutten van de Oosterschelde naar het Veerse Meer wordt gebracht;
2. Veerse Sluis - uitstroom van het Kanaal door Walcheren. Omdat het Kanaal door Walcheren een hoger peil heeft dan het Veerse Meer, stroomt er alleen water van het Kanaal door Walcheren naar het Veerse Meer (door middel van schutbewegingen van de Veerse Sluis). Er is geen omgekeerd transport;
3. Neerslag;
4. Afstroming;
5. Poldergemalen - er zijn negen poldergemalen die water uitslaan naar het Veerse Meer:
 - Kleverskerke
 - Oostwateringe
 - Jacoba
 - Willem
 - Adriaan
 - Wilhelmina

- Oosterland
 - De Piet
 - Overige (kleine) polders
6. Peilverhoging - eind maart wordt de waterstand op het zomerpeil van 0 m NAP gebracht. Hiervoor wordt via de Zandkreeksluis water uit de Oosterschelde ingelaten op het Veerse Meer.

Uitwisselingsdebiet

1. Zandkreeksluis - als gevolg van dichtheidsverschillen tussen het zoute Oosterschelde water en het brakke Veerse Meer en de daardoor optredende dichtheidsstromen, treedt een additionele uitwisseling op in de Zandkreeksluis. Hierbij is het uitgaande debiet gelijk aan het ingaande debiet. Deze uitwisseling heeft dus geen effect op het waterpeil.

De maandelijkse grootte van de debieten wordt weergegeven in tabel 2.3 De gegevens zijn aangeleverd door Rijkswaterstaat Directie Zeeland. Voor een beter overzicht zijn de poldergemalen gesommeerd.

Tabel 2.3 Waterbalans Veerse Meer 1995 - in- en uitgaande debieten

Uitgaande debieten (in m ³ /maand)					Uitwisseling (in m ³ /maand)		
	Zandkreeksluis	verdamping	spuidebiet	totaal uit			
januari	118505	187680	29828451	30134636	1493964		
februari	105622	309720	21747485	22162827	1719468		
maart	164714	846400	8605321	9616435	2076516		
april	557899	1149720	2655557	4363176	4040280		
mei	775220	2007990	2443103	5226313	5614110		
juni	832308	1919550	2353943	5105801	6027534		
juli	897180	2444160	3255701	6597041	6497334		
augustus	904222	2206610		3110832	6168474		
september	734121	1021090	5285644	7040855	5008068		
oktober	500170	711480	16718824	17930474	4237596		
november	213162	258830	12502568	12974560	2499336		
december	125673	112770	11214092	11452535	1484568		
Ingaande debieten (in m ³ /maand)							
	Zandkreeksluis	Veerse sluis	Neerslag	Afstroming	Polders	Peilverhoging	totaal in
januari	387115	2354890	2492740	2729391	16161679	0	24125815
februari	506870	2234126	1629483	1759957	11358402	0	17488838
maart	538066	2396299	1138077	722717	4218131	15364560	24377850
april	734513	2288267	642637	0	2025484	1886137	7577038
mei	1020631	2737536	691862	0	978765	0	5428794
juni	1095790	2684628	1176433	23843	934017	0	5914711
juli	1181199	3243300	1438014	0	693873	0	6556386
augustus	1071880	2967284	614420	0	204420	0	4858004
september	870239	2413792	0	2248723	2098894	0	7631648
oktober	854269	2521290	427064	179	1753085	0	5555888
november	676704	2404570	1303345	1357359	3185585	0	8927563
december	419600	2206005	980115	1101060	3553381	0	8260161

Een vergelijking van de gesommeerde in- en uitgaande debieten leert dat de waterbalans niet sluitend is. Uitgaande van een wateroppervlak van 2000 ha, resulteert een verschil in de waterbalans van 1 miljoen m³ in een peilverandering van 5 cm. De waterstand gebaseerd op de waterbalans in tabel 2.3 wordt weergegeven in tabel 2.4.

Tabel 2.4 Berekende en gemeten waterstand 1995 aan het eind van de maand (met waterstand op 1 januari 1995 gelijk aan -0,37 m NAP)

	totaal in	totaal uit	verschil	waterstand aan het eind van de maand (m NAP)	gemeten waterstand aan het eind van de maand (m NAP)
januari	24125815	30134636	-6008821	-0.67	-0.60
februari	17488838	22162827	-4673989	-0.90	-0.70
maart	24377850	9616435	14761415	-0.17	-0.19
april	7577038	4363176	3213862	-0.01	-0.04
mei	5428794	5226313	202481	0.00	-0.05
juni	5914711	5105801	808910	0.05	-0.05
juli	6556386	6597041	-40655	0.04	-0.05
augustus	4858004	3110832	1747172	0.13	-0.07
september	10621858	7040855	3581004	0.31	-0.04
oktober	5555888	17930474	-12374586	-0.31	-0.61
november	8927563	12974560	-4046997	-0.51	-0.71
december	8260161	11452535	-3192374	-0.67	-0.68

De winter van 1995 was erg nat, hetgeen terug te zien is in de hoge polderafvoeren in januari en februari (tabel 2.3). Het polderwater wordt gedurende de maand januari afgevoerd naar de Oosterschelde, waardoor het peil van -0,40 m NAP wordt teruggebracht naar -0,70 m NAP (tabel 2.4). De berekende waterstand op basis van de opgegeven debieten komt niet goed overeen met de gemeten waterstand. De waterbalans is vervolgens zodanig aangepast dat de gemeten waterstand gevolgd wordt. De resulterende waterbalans is weergegeven in tabel 2.5.

Tabel 2.5 Gecorrigeerde waterbalans gebaseerd op gemeten waterstand 1995 (met waterstand op 1 januari 1995 gelijk aan -0,37 m NAP)

	<i>totaal in</i>	<i>totaal uit</i>	<i>verschil</i>	<i>waterstand aan het eind van de maand (m NAP)</i>	<i>gemeten waterstand aan het eind van de maand (m NAP)</i>
januari	24125815	30134636	-6008821	-0.67	-0.60
februari	17488838	17813330	-324492	-0.69	-0.70
maart	21229540	9616435	11613105	-0.11	-0.19
april	5690901	4363176	1327725	-0.04	-0.04
mei	5428794	5226313	202481	-0.03	-0.05
juni	5914711	6047378	-132667	-0.04	-0.05
juli	6556386	6597041	-40655	-0.04	-0.05
augustus	4858004	5310832	-452828	-0.06	-0.07
september	7631648	7040855	590793	-0.03	-0.04
oktober	5555888	17930474	-12374586	-0.65	-0.61
november	8927563	9848918	-921355	-0.70	-0.71
december	8260161	8088307	171854	-0.69	-0.68

3 Beschrijving hydrodynamische modellen

3.1 Numerieke afhandeling

De numerieke modellen die gebruikt worden voor de 3D modellering van hydrodynamica van het Veerse Meer zijn beide gebaseerd op Delft3D-FLOW. Het z -model en het σ -model maken gebruik van dezelfde numerieke procedures. Ze verschillen alleen in de keuze van het verticale coördinaatsysteem. De numerieke procedure binnen de gebruikte modelversies wijkt op een aantal punten af van het standaard Delft3D-FLOW model (Manual Delft3D-FLOW, 1999). Zo worden de horizontale snelheidscomponenten u en v slechts eenmaal per hele tijdstap berekend. Verder worden de horizontale advectietermen in de vergelijkingen expliciet geïntegreerd met als voordeel dat de vergelijkingen slechts in de verticale richting impliciet gekoppeld zijn, hetgeen het oplossen van het stelsel vergelijkingen aanzienlijk vereenvoudigt. Bovenstaande procedure levert een versnelling van de rekentijd op van ongeveer een factor 4 ten opzichte van de standaard versie. De expliciete afhandeling van de advectie termen legt een tijdstaprestrictie op in verband met het hierdoor geïntroduceerde stabiliteitscriterium:

$$\Delta t < \min\left(\frac{\Delta x}{|u|}, \frac{\Delta y}{|v|}\right)$$

Voor de 3D berekeningen voor het Veerse Meer blijkt het stabiliteitscriterium voor de voortplanting van interne lange golven maatgevend te zijn:

$$\Delta t < \frac{\min(\Delta x, \Delta y)}{\sqrt{gH \frac{\Delta \rho}{\rho}}}$$

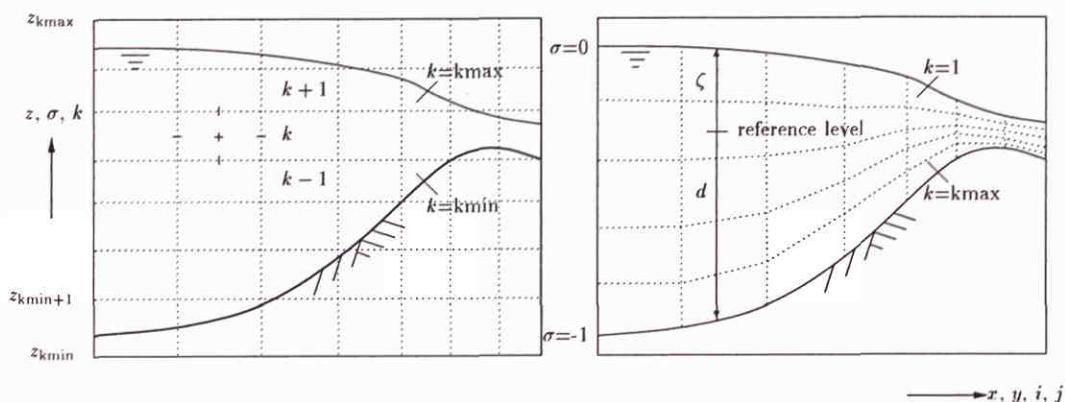
De hiermee samenhangende barocliene drukterm wordt in beide modellen expliciet afgehandeld.

3.2 Verticale afhandeling

Het verschil tussen het z -model en het σ -model komt voort uit de definitie van de verticale schematisatie. In het σ -model dat doorgaans gebruikt wordt, is de waterkolom over het gehele modelgebied verdeeld in evenveel lagen. Oftewel, het model heeft in verticale richting altijd hetzelfde aantal segmenten onafhankelijk van de lokale diepte. Een voorbeeld: in een model met 10 lagen met een uniforme laagdikte, is de dikte van een laag bij een water diepte van 10 meter gelijk aan 1 meter. Indien de waterdiepte 1 meter is, dan is de dikte van een laag gelijk aan 0,1 meter.

In het z-model (vaste-lagen model) ligt, m.u.v. de rekencel bij het vrije wateroppervlak, de laagdikte van een segment vast door de positie van de scheidingsvlakken, die strikt horizontaal lopen. Het aantal segmenten in een waterkolom hangt af van de waterdiepte. Een voorbeeld: voor scheidingsvlakken met een vaste afstand van 1 meter bestaat de waterkolom bij een waterdiepte van 1 meter slechts uit 1 segment. Bij een waterdiepte van 10 meter wordt de waterkolom door 10 segmenten gevormd.

In het σ -model zijn of alle lagen in een waterkolom gevuld met water ('nat') of alle lagen staan droog. In het z-model is de beweging van het vrije wateroppervlak niet beperkt tot de bovenste laag; het oppervlak kan door de lagen heen bewegen in tegenstelling tot vroegere z-modellen (Leendertse en Liu, 1975). De dikte van de laag bij het vrije water oppervlak en de bodem is afhankelijk van de verticale positie van het vrije water oppervlak respectievelijk de bodem. Figuur 3.1 geeft het verschil tussen de verticale schematisatie van het z-model en het σ -model grafisch weer.



Figuur 3.1. Verticaal coördinatenstelsel in het ongetransformeerde z-model en het getransformeerde σ -model (Bijvelds, 1998).

In het σ -model zullen de grensvlakken van de rekencellen, niet evenwijdig lopen aan de isolijnen van de dichtheid. De discretisatie van de verticale uitwisselings termen kan hierdoor in het numerieke model onnauwkeurig zijn. De fout hangt samen met de hellingshoek van de bodem. Voor het Veerse Meer treden bij de putten hellingshoeken van 1/10 op. Het is bekend dat een σ -model dan onnauwkeurige resultaten op kan leveren. Het z-model heeft dit probleem niet, maar zal de grenslaagstroming tijdens het vullen van de putten met zout water minder nauwkeurig berekenen dan het σ -model.

4 Vergelijking hydrodynamische modellen

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de volledige 3D modellering van het Veerse Meer, verkregen zijn door toepassing van zowel het z -model als het σ -model, vergeleken. Als referentie dienen beschikbare meetgegevens (verticale profielen van saliniteit).

Naar aanleiding van deze resultaten zijn testsommen uitgevoerd met een vereenvoudigd Veerse Meer model. Aan de hand van een 2DV simulatie met een sterk geschematiseerde waterbalans waarin alleen de peilopzet is opgenomen, zijn verschillen tussen z -model en σ -model verder onderzocht.

4.1 Het 3D model

Hoewel metingen beschikbaar zijn voor zowel saliniteit als temperatuur worden slechts verticale profielen van de saliniteit beschouwd. Het effect van temperatuurverschillen op de hydrodynamica is van ondergeschikt belang. Bovendien blijkt uit de berekeningen dat de verticale temperatuurverdeling voornamelijk wordt bepaald door zonnestraling welke constant is verondersteld in het testmodel. Horizontale dichtheidsgradiënten ten gevolge van temperatuureffecten zijn daarom verwaarloosbaar.

Modelresultaten van het z -model en σ -model zijn vergeleken met meetgegevens op drie tijdstippen gedurende het jaar: 30 januari 1995, 20 juni 1995 en 7 december 1995. De eerste datum valt samen met de begindatum van de simulatie en komt derhalve overeen met de initiële conditie. De overige twee data zijn representatief voor de kwaliteit van de resultaten van beide modellen gedurende het gehele jaar.

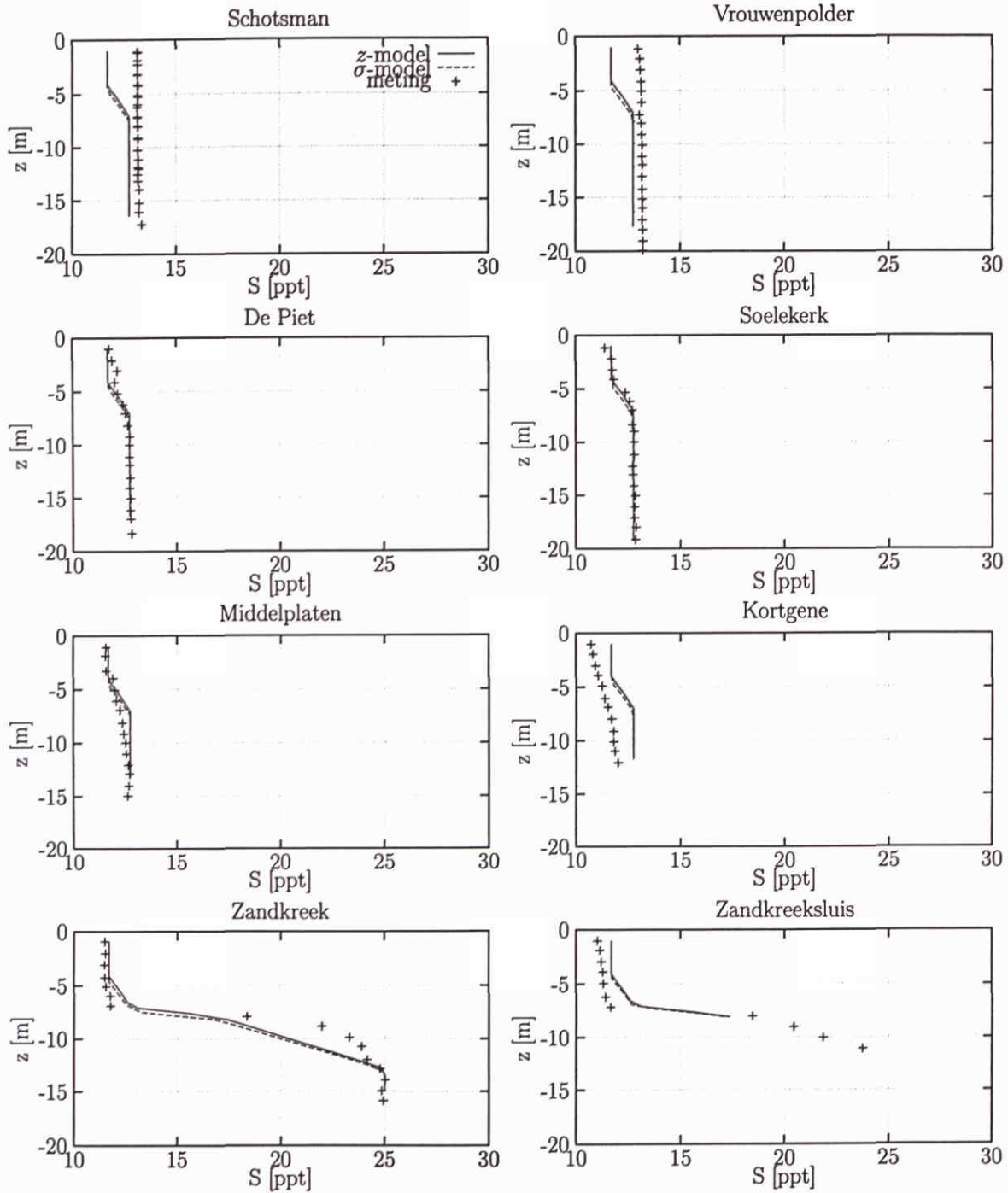
In de Figuren 4.2 tot en met 4.4 zijn de verticale saliniteitsprofielen weergegeven ter hoogte van de verschillende meetstations op voornoemde data. Op 30 januari 1995 is bijna het volledige Veerse Meer opgemengd. Slechts nabij de sluis wordt enige stratificatie waargenomen als gevolg van de nabijheid van de inlaat van Oosterschelde bij de Zandkreeksluis.

Het effect van de peilopzet, die eind maart plaatsvindt, kan duidelijk worden waargenomen in figuur 4.3. De zoutconcentratie nabij de bodem is sterk toegenomen bij de meeste stations waardoor een gestratificeerd systeem is ontstaan. De windgeïnduceerde stroming blijkt onvoldoende sterk om het systeem volledig op te mengen. Kwalitatief wordt dit proces goed door het z -model weergegeven. Echter, het lijkt alsof de voortplantingssnelheid van de zouttong in het z -model lager is dan in de metingen. Verder wijkt de positie van het grensvlak op een aantal plaatsen af van de metingen. Mogelijk is dit het gevolg van de momentopname. De tijdreeksen van de saliniteit op een bepaalde lokatie (figuur 4.5) geven aan dat in het model de verticale positie van het grensvlak sterk fluctueert in de tijd als gevolg van variaties in windsnelheid en windrichting.

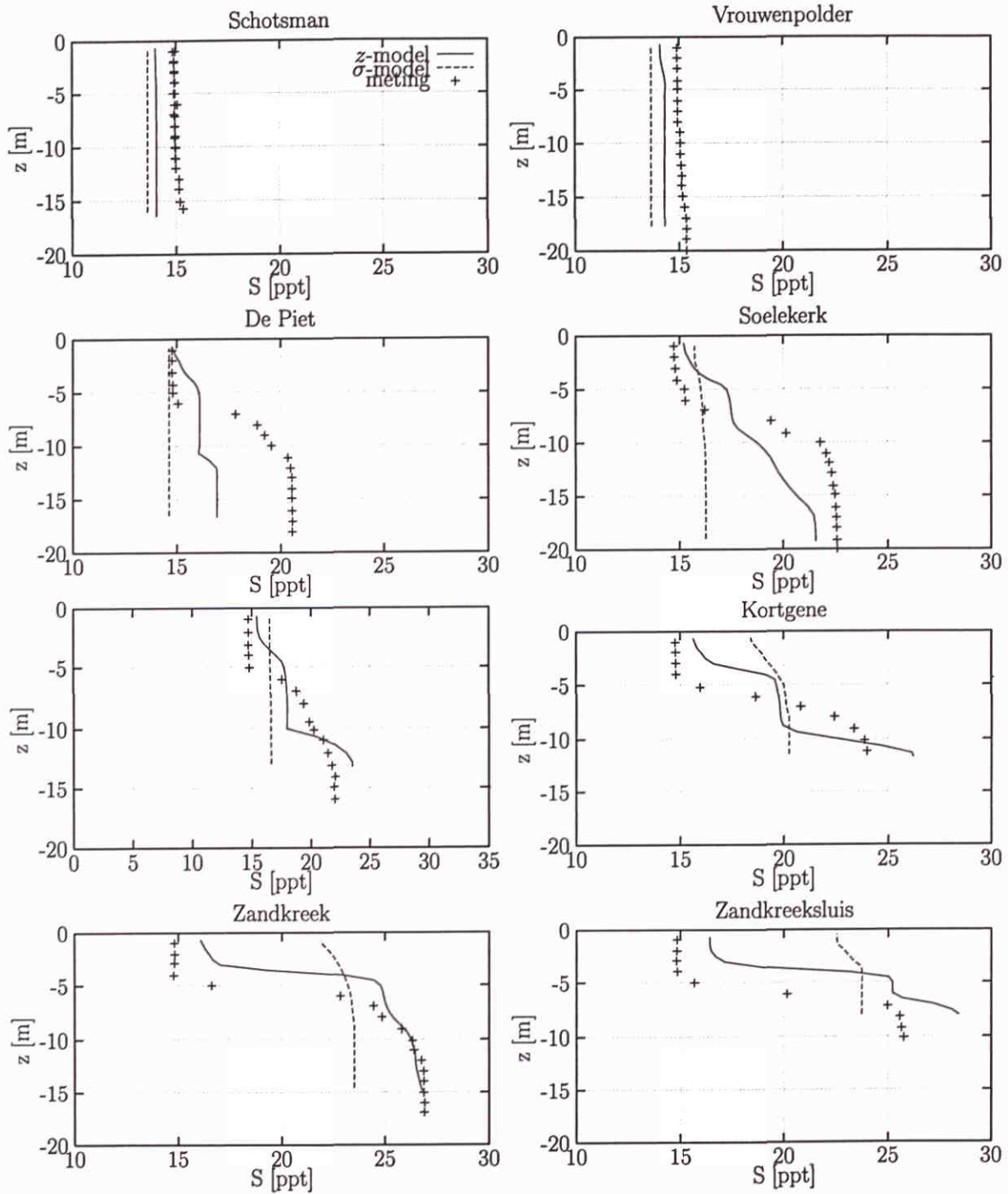
Het achterblijven van het zoutfront in het model in vergelijking tot de metingen worden waarschijnlijk veroorzaakt door de onnauwkeurige representatie van de near-field processen bij de Zandkreeksluis. Deze processen, met een mogelijk niet-hydrostatisch karakter, bepalen lokaal de mate van menging. Door de grofheid van het rooster is het niet mogelijk deze lokale processen weer te geven met als mogelijk gevolg een overschatting van de verticale opmenging. Gezien het feit dat naast de lozing van water ook water wordt gespuut nabij de sluisen betekent dat de totale zoutbalans hierdoor beïnvloed wordt. Daarnaast leidt verticale menging tot een afname van de horizontale dichtheidsgradiënten waardoor de voortplantingssnelheid van het zoutfront afneemt.

Terwijl het z-model een redelijke overeenkomst met de metingen laat zien lijkt het σ -model gedomineerd te worden door (kunstmatige) verticale opmenging. Er worden nauwelijks verticale saliniteitsgradiënten door het model gegenereerd. Aan het verticale saliniteitsprofiel ter hoogte van "Zandkreek" valt af te leiden dat deze menging al plaatsvindt nabij de sluis. Zoals eerder vermeld kan dit grote gevolgen hebben voor de totale zoutbalans. Aan de saliniteitsprofielen op 7 december 1995 valt af te leiden dat dit inderdaad het geval is. Het lijkt erop dat de totale hoeveelheid zout in het σ -model aanzienlijk lager is dan in het z-model. De stratificatie die gedurende de zomer aanwezig is, is in december bijna volledig verdwenen. Deze verticale opmenging lijkt daarentegen door het z-model enigszins te worden onderschat.

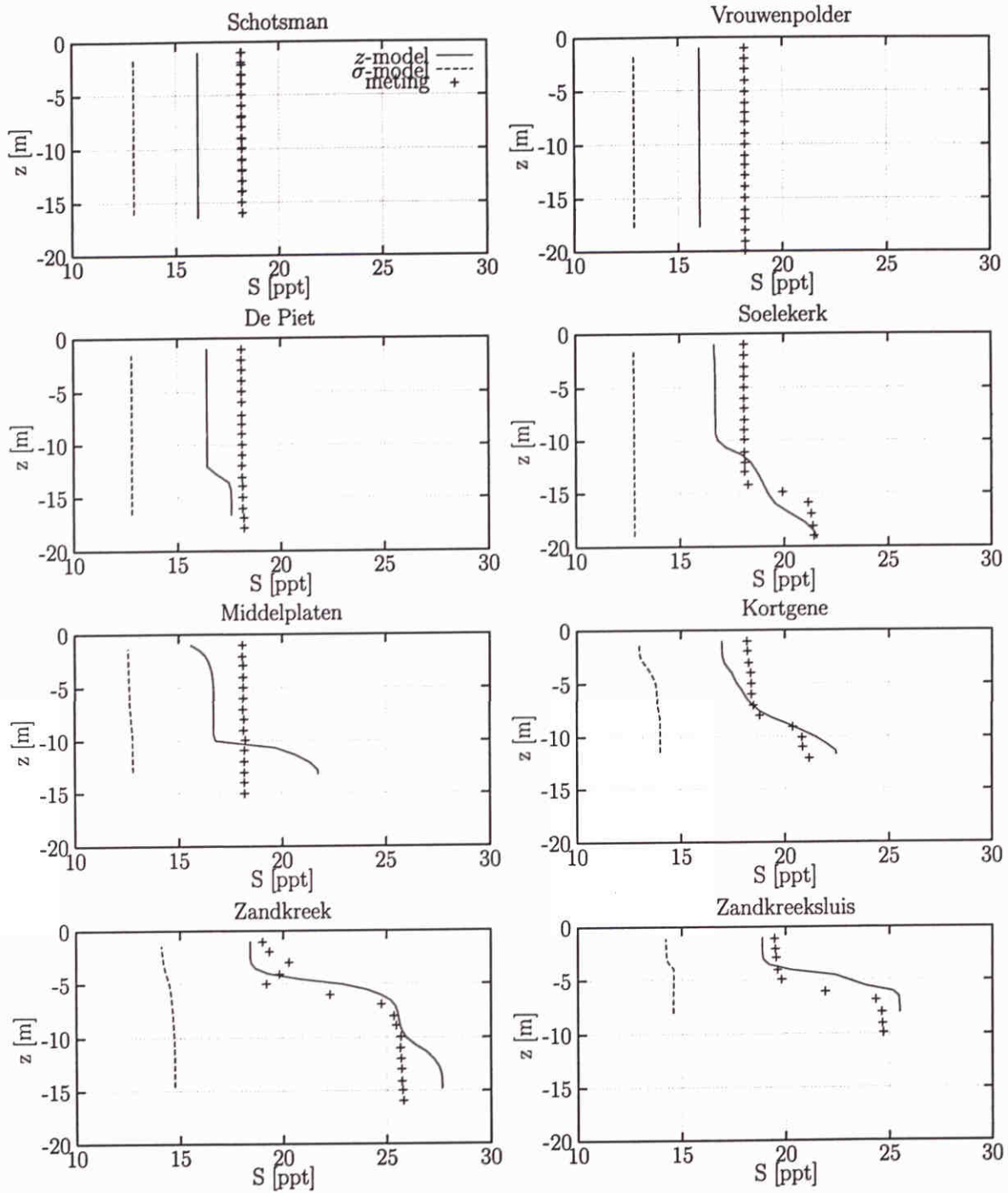
Op basis van bovenstaande kan geconcludeerd worden dat voor het 3D Veerse Meer model met de huidige resolutie het σ -model minder geschikt is voor de modellering van de hydrodynamica dan het z-model. Het z-model geeft resultaten die redelijk goed overeenkomen met de metingen, zeker gezien de resolutie van en de onzekerheden in de invoerparameters. In de volgende paragraaf worden de grote verschillen tussen het z-model en het σ -model verder onderzocht middels een 2DV schematisatie van het Veerse Meer.



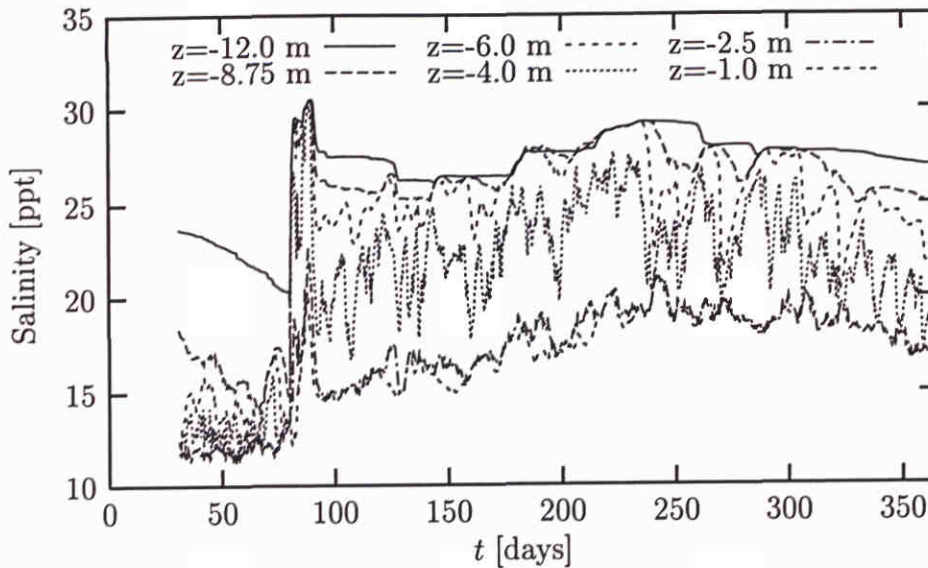
Figuur 4.2: Berekende en gemeten verticale saliniteitsverdeling op 30 januari 1995. De lokatie van de meetstations is weergegeven in figuur 2.1.



Figuur 4.3: Berekende en gemeten verticale saliniteitsverdeling op 20 juni 1995.



Figuur 4.4: Berekende en gemeten verticale saliniteitsverdeling op 7 december 1995.



Figuur 4.5 Tijdsree van de saliniteit ter hoogte van Zandkreek op verschillende dieptes verkregen met het z-model.

4.2 2DV schematisatie Veerse Meer

4.2.1 Modelopzet

Door de wisselwerking van verschillende fysische processen in het volledige 3D model van het Veerse Meer is het niet eenvoudig conclusies te trekken over de oorzaken voor de grote verschillen tussen het z-model en het σ -model. Daarom wordt in deze paragraaf een vereenvoudigd scenario voor het Veerse Meer gebruikt om de verschillen te onderzoeken.

Een schematisch 2DV model wordt gedefinieerd bestaande uit een opeenvolging van een drietal putten. De bathymetrie van het model bestaat uit 2 parabolisch gevormde bekkens waarvan de bodemhelling ongeveer gelijk is aan die van het 3D model. Een derde diep bekken (500 m) is gesitueerd nabij de linker gesloten rand om eventuele reflecties van het zout tegen de gesloten rand zoveel mogelijk tegen te gaan. De horizontale roostergrrootte is constant en gelijk aan 100 m. Wind- en temperatuureffecten worden verwaarloosd en slechts een lozingspunt wordt in het model aangebracht. Dit lozingspunt is gesitueerd nabij de rechter gesloten rand van het model (vergelijkbaar met de Zandkreeksluis).

Om de modellen voor zowel geforceerde als ongeforceerde stroming te testen wordt gedurende een beperkte periode zout water ingelaten. Het debiet is hierbij gelijk aan $7,5 \text{ m}^3/\text{s}$. De saliniteit van het geloosde water is 12 ppt, hetgeen een maximaal dichtheidsverschil van ongeveer 10 kg/m^3 tot gevolg heeft. Na deze periode wordt de inlaat van zout water gestopt en wordt het systeem alleen gedreven door interne dichtheidsverschillen.

De gebruikte tijdstap bedraagt 15 s, de totale simulatietijd is 500 uur. De turbulente viscositeit wordt berekend met behulp van een k - ϵ -turbulentiemodel. Er is geen achtergrondviscositeit toegevoegd aan de berekende turbulente viscositeit.

4.2.2 Resultaten

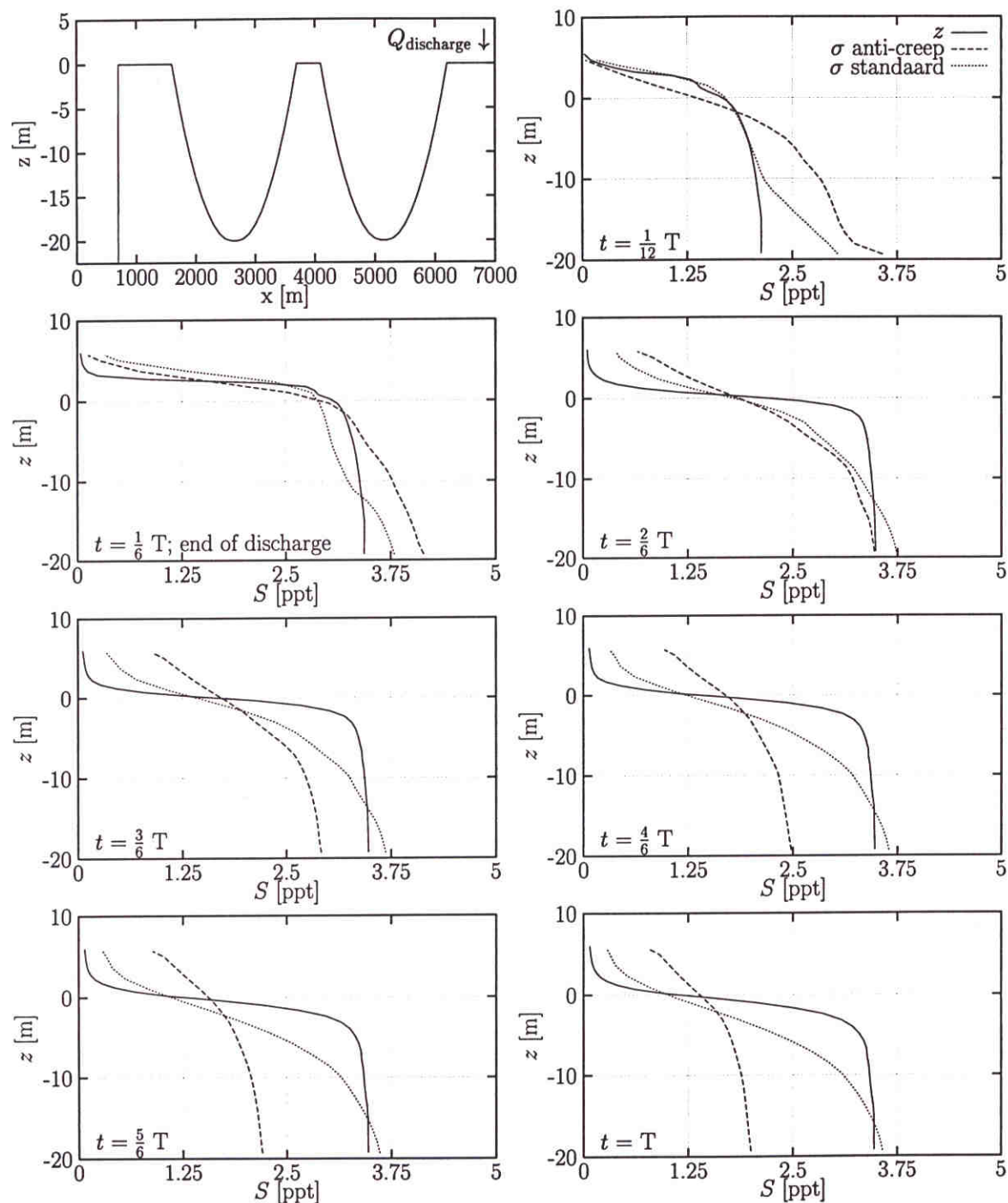
De 2DV simulaties ook uitgevoerd met het σ -model zonder anti-creep procedure van Stelling en Van Kester (1994). Resultaten van drie modellen worden gepresenteerd: het z -model, het σ -model met anti-creep procedure (waarbij de horizontale barocliene drukgradiënt en diffusie langs strikt horizontale vlakken wordt berekend) en het σ -model zonder anti-creep procedure (waarbij de horizontale barocliene drukgradiënten en diffusie langs σ -vlakken wordt berekend).

In figuur 2.6 zijn de verticale verdelingen van zout in het centrum van de rechter put uitgezet op verschillende stadia tijdens de berekening. Initieel vertoont het σ -model met anti-creep de sterkste stratificatie. In dit stadium gedraagt de stroming zich als een gelaagde stroming over een hellende bodem en kan worden beschouwd als een grenslaagstroming. Voor dit type stromingen is een σ -model beter geschikt dan een z -model vanwege de gunstige oriëntatie van het rooster. In het z -model zorgt de horizontale oriëntatie van het rooster en de trapjeslijn van de bodem voor numerieke diffusie van het zout.

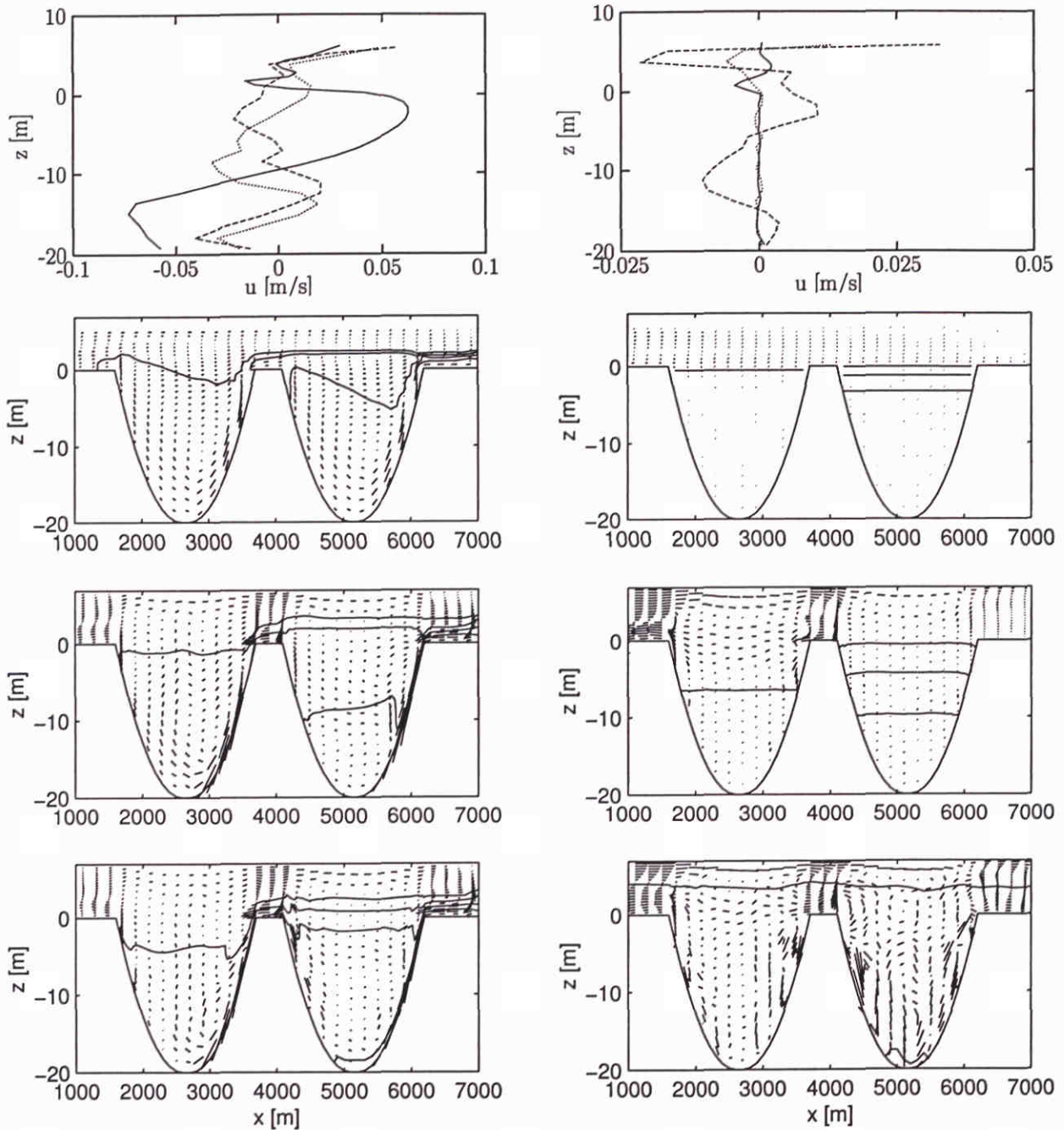
Na circa 65 uur wordt de maximale zoutconcentratie in de rechter put bereikt in alledrie de modellen. De numerieke diffusie in het z -model heeft geleid tot een gestratificeerd systeem waarbij de concentratie in de put vrijwel constant is. Beide σ -modellen geven aanleiding tot een sterkere stratificatie in de rechter put. De verticale opmenging in het z -model valt duidelijk af te leiden uit het verticale snelheidsprofiel in deze put, zie figuur 2.7. De circulatiestroming ten gevolge van dichtheidseffecten beslaat duidelijk een groter oppervlak in het z -model dan in beide σ -modellen.

Na het stoppen van de lozing dient een stabiel gestratificeerd systeem zich te ontwikkelen waarin de snelheden tot 0 worden gereduceerd. Dit proces wordt weergegeven in figuur 4.6. Hoewel geen volledige stationaire toestand wordt bereikt binnen de simulatieperiode geven zowel het z -model als het σ -model zonder anti-creep benadering dit proces kwalitatief goed weer. Merk op dat in het σ -model zonder anti-creep benadering artificiële stroming wordt gegenereerd door aanwezigheid van de diepe put bij de linker rand. Hoewel deze stroming zich concentreert in de bovenste laag van de waterkolom kan dit aanleiding geven tot additionele menging.

Het σ -model met anti-creep procedure is onderhevig aan sterke verticale opmenging. Dit valt ook op te maken uit de verticale profielen van de horizontale snelheid op $t=T$. In tegenstelling tot het z -model en het σ -model zonder anti-creep, hebben de snelheden in het σ -model met anti-creep dezelfde order van grootte als tijdens de lozing. Het lijkt alsof het model streeft naar een volledig gemengde toestand. Een dergelijk gedrag wordt bevestigd indien men de verticale doorsnede van het systeem beschouwd, figuur 4.7. Terwijl het z -model en het σ -model zonder anti-creep benadering een bijna stilstaande watermassa in de putten produceren genereert het σ -model met anti-creep een fysisch onrealistisch stroombeeld dat aanleiding geeft tot verticale opmenging. Het is op dit moment onduidelijk waar deze numerieke opmenging door wordt veroorzaakt. Het vergelijken van de verschillende termen in de bewegingsvergelijking gaf geen grote verschillen te zien voor de drie modellen.



Figuur 4.6: Bathymetrie voor het geschematiseerde 2DV Veerse Meer model (linksboven). Verticale verdeling in het diepste punt van het rechter bekken op 7 verschillende momenten gedurende de simulatie. Op $t=1/6 T$ ($T=500$ uur) wordt de lozing stopgezet. Getrokken lijn: z-model, gestreepte lijn: σ -model met anti-creep, gestippelde lijn: σ -model zonder anti-creep.



Figuur 4.7: Bovenste figuren: verticale verdeling van de horizontale snelheid op $t=1/6T$ (links) en $t=T$ (rechts) in het centrum van het rechter bekken. Merk op dat de schalen verschillend zijn. Zie figuur 4.2 voor legenda. Onderste figuren: globaal snelheidsvectorveld en isolijnen voor saliniteit op $t=1/6T$ (links) en $t=T$ (rechts). Plotinterval voor de isolijnen is gelijk aan 1 ppt en de snelheidsvectoren zijn eens per twee roosterzellen geplot. Van boven naar beneden: z-model, σ -model zonder anti-creep procedure, σ -model met anti-creep procedure.

5 Conclusies

Een 3-dimensionaal model is opgezet voor het Veerse Meer. 3D berekeningen voor het Veerse Meer zijn uitgevoerd met twee numerieke modellen die slechts verschillen in de keuze van de verticale coördinaat. Een model is gebaseerd op Cartesische z -coördinaten (vaste lagen) en het andere model maakt gebruik van de σ -transformatie. De berekening van de horizontale drukgradiënt gebeurt in het laatste model met behulp van een zogenaamde anti-creep procedure.

Uit vergelijking van de berekende zoutprofielen met gemeten zoutprofielen blijkt dat voor de huidige schematisatie van het Veerse Meer het z -model beter geschikt is voor de simulatie van de hydrodynamica in het meer dan het σ -model. In tegenstelling tot het σ -model wordt de waargenomen stratificatie gedurende de zomermaanden in het z -model redelijk goed gereproduceerd. Het σ -model is onderhevig aan sterke verticale menging en is niet in staat een verticaal gestratificeerd systeem te genereren.

Toepassing van een geschematiseerd 2DV model laat zien dat het σ -model met anti-creep procedure reële resultaten genereert indien de stroming geforceerd wordt (in dit geval door de inlaat van zout water). De optredende stratificatie is tijdens deze fase groter dan in het σ -model zonder anti-creep en het z -model. Echter, tijdens de periode van ongeforceerde stroming (na het stoppen van de lozing) geeft het σ -model met anti-creep procedure een sterke verticale menging te zien. Een eerste onderzoek naar de mogelijke oorzaken voor deze opmenging (door vergelijking van termen die in de bewegingsvergelijking voorkomen) heeft hieromtrent nog geen duidelijkheid verschaft.

Geraadpleegde literatuur

Bijvelds, M.D.J.P., 1998

A three-dimensional fixed grid model for shallow-water flow, Tech. report 6-98. Fac. of Civil Eng., Delft Univ. of Techn.

Leendertse, J.J. en Liu, S.K., 1975

A three-dimensional model for estuaries and coastal seas. II Aspects of computation Tech. report R-1764-OWRT. Rand Corporation, Santa Monica

RIKZ, 1998

Monitoring van het Veerse Meer in een historisch perspectief. Data-onderzoek en -analyse. Werkdocument RIKZ AB-98.824X (W. Verhulst).

Stelling, G.S. en Van Kester, J.A.Th.M., 1994

On the approximation of horizontal gradients in sigma co-ordinates for bathymetry with steep slopes. Int. J. for Num. Meth. in Fluids vol. 18, pp. 915-935

WL | Delft Hydraulics, 1998

Toepassing GEM Veerse Meer, J.G.C. Smits, A.N. Blauw en A.J. Nolte, Rapport Z2570, november 1998.

WL | Delft Hydraulics, 1999a

User's manual Delft3D-FLOW, november 1999.

WL | Delft Hydraulics, 1999b

Ecological model for the Lagoon of Venice modelling results, F.J. Los, Rapport T2162, november 1999.



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

