

Reproductie-nauwkeurigheid

Pilot 2: het Rijn-Maasmondmodel Rijnmamo-grof-3D

Project: NAUTILUS

Werkdocument: RIKZ/OS/2000.101X



In opdracht van:

Directie Noordzee
Directie Zuid-Holland
Directie Zeeland
Directie Noord-Holland
Samenwerkingsverband Maasvlakte 2 Varianten
Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam
Meetstrategie 2000+

Reproductienauwkeurigheid

Pilot 2: het Rijn-Maasmondmodel Rijmamo-grof-3D

Project: NAUTILUS
Werkdocument: RIKZ/OS/2000.101X
Datum: januari 2000
Auteurs: A.W. Gebraad
M. Verlaan
M. Zijlema

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave.....	3
1 Inleiding.....	5
2 Beschrijving van het model.....	7
2.1 Algemeen.....	7
2.2 Beginvoorwaarden en randvoorwaarden	9
2.2.1 Initiële velden	9
2.2.2 Zeerandvoorwaarden.....	9
2.2.3 Rivierandvoorwaarden.....	9
2.2.4 Wind.....	9
3 Beschrijving van de metingen	11
3.1 Inleiding	11
3.2 Beschrijving van waterstandsmetingen.....	11
3.3 Beschrijving van stroomsnelheidsmetingen	12
3.4 Beschrijving van saliniteitsmetingen	13
3.4.1 Saliniteitsmetingen in verticalen.....	13
3.4.2 Saliniteitsmetingen in permanente meetstations	13
3.4.3 Nauwkeurigheid in saliniteitsmetingen	14
4 Kwantificatie van de model(on)nauwkeurigheid	15
4.1 Methodiek	15
4.1.1 Numerieke onzekerheid	15
4.1.2 Onzekerheid van fysische parameters.....	15
4.1.3 Onzekerheid door vereenvoudigingen in de modellering	15
4.2 Ruimtelijk en temporeel onderscheid in de analyse	16
5 De basisanalyse	17
6 Bepaling van de optredende residuen.....	22
6.1 Inleiding	22
6.1.1 Temporele verdeling	22
6.1.2 Ruimtelijke verdeling	23
6.2 Residuen in de verticalen.....	23
6.3 Residuen in de permanente stations.....	25
6.4 Totaalbeeld	26
7 Experimenten met een vereenvoudigd model.....	27
8 Experimenten voor de bepaling van de numerieke nauwkeurigheid.....	31
8.1 Inleiding	31
8.2 Tijdintegratie	31
8.2.1 Schatting van de globale fout.....	31
8.2.2 Bepaling van het Courant getal	37
8.3 Ruimtelijke horizontale discretisatie.....	38
8.3.1 Karakteristieke eigenschappen van het rooster	38
8.3.2 Anti-creep.....	49
8.4 Ruimtelijke verticale discretisatie	52
8.4.1 Effect van het aantal lagen en de laagverdeling.....	52
8.4.2 Effect van de discretisatie van verticale advectie in zouttransport.....	52

8.5 Samenvatting van de resultaten	56
9 Experimenten voor de bepaling van de nauwkeurigheid van de fysische modellering	58
9.1 Inleiding	58
9.2 Effect inspeeltijd	59
9.3 Effect van de windschuifspanningscoëfficiënten	60
9.3.1 Effect van de wind en de Charnock formulering.....	61
9.3.2 Effect van de c_u parameter in de oppervlaktelaag	64
9.4 Turbulentiemodel	65
9.4.1 Effect van het Prandtl/Schmidt getal	65
9.4.2 Effect van de c_u -parameter	67
9.4.3 Toepassing van het algebraïsch model.....	68
9.4.4 Toepassing van het RNG-model	69
9.5 Effect van de Manningwaarden	70
9.6 Effect van het randvoorwaardetype op de rivierzijde	73
9.6.1 Effect van de Q-rand i.p.v. Q_H-rand	74
9.6.2 Effect van een groter debiet op de rivierranden.....	76
9.7 Effect van de bodemligging	78
9.8 Vergelijking tussen de berekeningen.....	81
9.8.1 Vergelijking van waterstanden.....	81
9.8.2 Vergelijking van stroomsnelheden	83
9.8.3 Vergelijking van saliniteiten	85
10 Conclusies.....	87
10.1 Conclusies met betrekking tot het Rijmamo-grof-3D-model.....	87
10.2 Algemene conclusies	89
11 Aanbevelingen	90

1 Inleiding

Verschillen die optreden tussen modelberekeningen met WAQUA en TRIWAQ enerzijds en metingen in het veld anderzijds kunnen worden verklaard door een groot aantal onzekerheden in de metingen maar vooral ook in het model. Bij grote ingrepen, zoals de aanleg van de tweede Maasvlakte, of het wijzigen van het beheer van de Haringvlietsluizen, is het wenselijk een goed inzicht te hebben in de nauwkeurigheid van modellen waarmee de effecten van deze ingrepen zullen worden voorspeld. Dit inzicht is tevens van belang voor het beoordelen en het maken van keuzen m.b.t. modelaanpassingen welke tot significante verbeteringen van modelnauwkeurigheid zouden moeten leiden.

Normaliter worden berekeningen van bijdragen aan de model-onnauwkeurigheid vooral uitgevoerd met behulp van een gevoeligheids-onderzoek. Door modelresultaten te vergelijken voor verschillende parameterinstellingen en/of met verschillende formuleringen kan de invloed van de betreffende formulering, term, constante, enz. worden bestudeerd. Het doel van deze studie is een zo goed mogelijk overzicht van de mogelijke foutenbronnen te geven, en hun bijdragen aan de totale fout te kwantificeren. In de literatuur wordt een dergelijk overzicht vaak een 'error budget' genoemd. De som van de bijdragen kan in dat geval goed worden vergeleken met de opgetreden residuen. In dit rapport wordt het residu gedefinieerd als Root Mean Square (RMS) error. De definitie van de RMS-waarde is als volgt: als ε_i het verschil tussen de modelresultaat en meting in station i weergeeft, dan bedraagt de RMS-waarde

$$\|\varepsilon\|_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |\varepsilon_i|^2}{n}}$$

waarin n het totaal aantal stations zijn. Hieronder staat een fictief voorbeeld.

Bijdrage onnauwkeurigheid	Mean square error (m ²)	RMS (m)
Bijdrage rand	0,01	0,10
Bijdrage bodemwrijving	0,04	0,20
Bijdrage numeriek	0,0025	0,05
Bijdrage meting	0,01	0,10
Totaal	0,0625	0,25
Waargenomen residu	0,09	0,30

Tabel 1.1: Een fictief voorbeeld van 'error budget'

Volgens deze tabel is de waargenomen residu 30 cm. Hiervan wordt 25 cm verklaard vanuit 4 bronnen. De overige 5 cm ontbreekt dus nog in deze balans. Dit kan een resultaat zijn van een verkeerde inschatting, of het feit dat een belangrijk proces in de analyse niet is meegenomen; zo zou bijvoorbeeld de invloed van onnauwkeurigheid in de opgegeven rivierafvoer de overige bijdrage kunnen leveren. Uit Tabel 1.1 valt ook af te lezen dat bijvoorbeeld een roosterverfijning weinig zin heeft omdat de relatieve bijdrage van numerieke fouten gering is.

De belangrijkste bronnen van onnauwkeurigheid in een model zijn:

- 1) numerieke fouten,
- 2) vereenvoudigde of niet gemodelleerde processen,
- 3) de onnauwkeurigheid van parameters,
- 4) randvoorwaarden en schematisatie en
- 5) meetfouten.

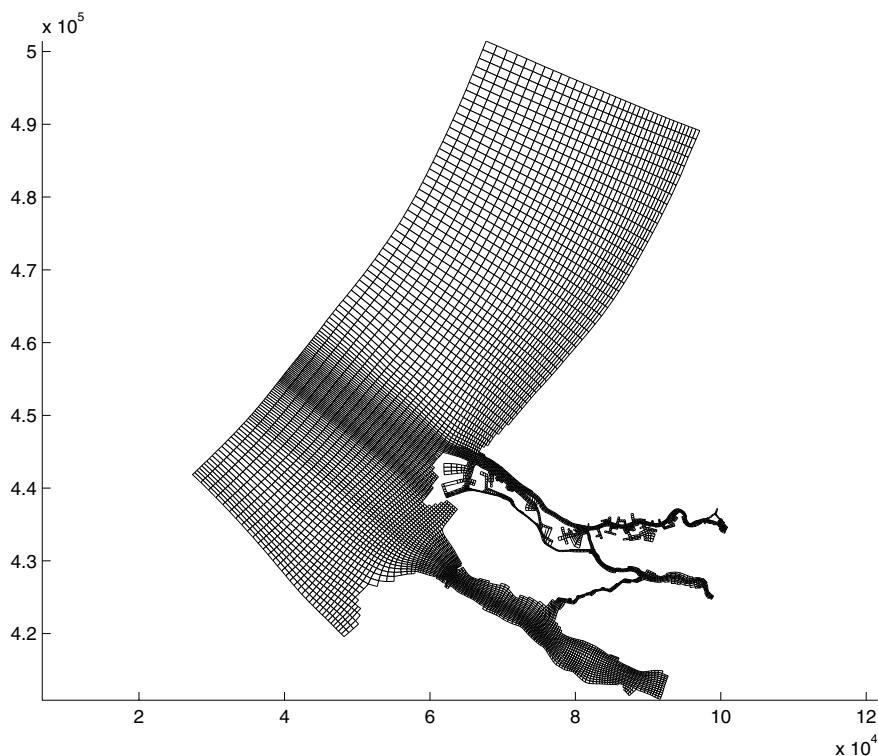
In 1998 is een pilot gedaan met het model van de Westerschelde, het zg. SCALWEST 2DH-model (zie [18]). Bij deze pilot is vooral de reproductie van de waterstanden bestudeerd, omdat er geen metingen van stroomsnelheden en saliniteiten beschikbaar waren. Bovendien betrof het hier een 2D-model, waarin dieptegemiddelde stroomsnelheden en saliniteiten berekend worden. In het vervolg van dit werkdocument worden de resultaten beschreven van een pilot met een 3D-model van de Rijnmaasmond, Rijnmo-grof-3D. Hierbij zal de analyse zich vooral concentreren op de stroomsnelheden en saliniteiten. De waterstanden worden iets minder uitgebreid beschouwd, omdat daar in de vorige pilot uitvoerig op in is gegaan.

In het vervolg van het project NAUTILUS zullen de resultaten van dit onderzoek ook gebruikt worden voor het berekenen van de voorspelnauwkeurigheid. Dit vervolg op deze studie gaat een stap verder doordat niet alleen de opgetreden fouten worden geanalyseerd maar er ook voorspellingen van de nauwkeurigheid worden gemaakt. Dit maakt het mogelijk om bij bijvoorbeeld een stormvloedverwachting ook een bandbreedte op te geven. De breedte van de band kan dan variëren naar omstandigheden. Zo is de waterstand tijdens een langere periode van rustig weer nauwkeuriger te voorspellen dan tijdens een storm. In het beleid en beheer kan men dan de risico's van een beslissing beter inschatten.

2 Beschrijving van het model

2.1 Algemeen

Het Rijmamo model is een numeriek waterbewegingsmodel van de Hollandse Kust en het westelijk deel van het Noordelijk Deltabekken gebaseerd op het programma pakket SIMONA-TRIWAQ ([20]). Het model omvat tevens simulatie van zouttransport en turbulentie. Het Rijmamo model heeft een fijnmazige en grofmazige versie en zijn vervaardigd op basis van de corresponderende roosters van het Zeedelta model ([1], [2] en [3]). In deze studie wordt in principe het grove rooster van het Rijmamo model (versie 1), zoals weergegeven in Figuur 2.1, toegepast. Om het effect van de horizontale discretisatie te bestuderen is in Hoofdstuk 8 één berekening met het fijne rooster gedaan.



Figuur 2.1: Rooster van Rijmamo-grof model

Het grove model heeft afmetingen van 126×180 roosterpunten waarvan er 9077 actief zijn (vullingsgraad 40%). In de verticaal bevat het model 10 lagen waarvan vier vaste lagen van anderhalve meter dikte aan het oppervlak en een gelijke verdeling in zes zgn. sigma lagen van de resterende waterdiepte tot aan de bodem. In Hoofdstuk 8 worden tevens de resultaten van de berekeningen met 10, 20 en 40 equidistante sigma lagen behandeld.

Het Rijmamo-grof model heeft open randen aan zeezijde (Noordzee en Voordelta) en rivierzijde (Nieuwe Maas, Oude Maas en Hollandsch Diep). De toegepaste randvoorwaarden op deze randen worden in respectievelijk Paragraaf 2.2.2 en Paragraaf 2.2.3 besproken. De Bovenrijnafvoer was in de genoemde periode $900 \text{ m}^3/\text{s}$, wat relatief laag is vergeleken met het gemiddelde van $2200 \text{ m}^3/\text{s}$. Van 1 november 18:00 uur tot 3 november 6:00 uur heeft er een storm gewoed. Dit zorgt voor een opzet van maximaal 1.0 m bij Hoek van Holland. Deze hoge opzet tezamen met de lage rijnafvoer gaf een relatief sterke zoutindringing op de Nieuwe Waterweg. De bodemruwheid is gemodelleerd op basis van de zgn. Manning-formule en de Manning-parameter bedraagt gemiddeld $0.024 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$.

De simulatieperiode beslaat van 28 oktober 1985 t/m 4 november 1985 (in Paragraaf 9.2 wordt het effect van de inspeeltijd onderzocht). De tijdstap was in alle gevallen 30 seconden, behalve in de berekeningen ten behoeve van de schatting van de globale fout op basis van de tijdintegratie welke in Hoofdstuk 8 zullen worden besproken.

De bodemschematisatie van het Rijmamo-grof model is overeenkomstig de bodem uit het Zeedelta model ([3]). Deze is gebaseerd op de volgende lodingen:

- Zeegebied (Noordzee) : lodingen uit 1987
- Kustgebied : Jarkuslodingen uit 1995 - 1996
- Haringvlietmond : lodingen uit 1990
- Rivieren : lodingen en DTM's uit 1993 - 1997
- Overige gebieden : uit NDB-model (1990)

Er zijn geen oorspronkelijke bodemgegevens uit 1985 meer beschikbaar. Niettemin is toch gekozen voor de bovengenoemde periode en wel om de volgende redenen:

- Er zijn van de periode oktober-november 1985 heel veel metingen beschikbaar waarmee deze studie grondig kan worden uitgevoerd;
- In de betreffende periode waren de Haringvlietsluizen gesloten. Dit houdt in dat de sluisformulering welke nodig is om de effecten van de sluisen op de stroming en zouttransport te modelleren, niet hoeft te worden toegepast. Momenteel wordt in het kader van project Nautilus onderzoek gedaan naar deze modellering en de toetsing ervan (zie [14] en [21]).

Tot slot is in alle modelberekeningen de Beerdam dicht zoals destijds in 1985 het geval was. Daarentegen is in de schematisatie de configuratie van de havens gelijk aan die van 1998 en is ook de geometrie van de Maeslantkering in open toestand geschematiseerd, hetgeen niet overeenkomt met de werkelijke situatie in 1985.

De simulaties zijn uitgevoerd op een HP9000/735 workstation (compcl5). De doorloopsnelheid (= werkelijke tijd:simulatietijd) is ongeveer 1:1.3. Bij de start van het project was de parallele versie van TRIWAQ niet beschikbaar. Tijdens het laatste onderdeel van dit project welke in Hoofdstuk 8 wordt behandeld is de parallele versie van TRIWAQ geïnstalleerd op de SGI Cray Origin2000 ("Unite") machine bij het academisch rekencentrum SARA in Amsterdam ([19]). Met deze versie zijn een aantal berekeningen uitgevoerd waarin het model is opgedeeld in acht subdomeinen waarbij rekening is gehouden met de load-balancing. Dit heeft geresulteerd in een doorloopsnelheid van 1:41; een versnellingsfactor van 32 t.o.v. compcl5 (per processor is Unite factor 4 sneller dan compcl5).

2.2 Beginvoorwaarden en randvoorwaarden

2.2.1 Initiële velden

Om inspeelproblemen zoveel mogelijk te beperken, zijn alle berekeningen gestart met niet-uniforme velden voor waterstanden, dieptegemiddelde stroomsnelheden en dieptegemiddelde saliniteiten. Deze velden zijn afkomstig uit een berekening met het 2DH Zeedelta-grof model met als startdatum 15 september 1985. Het rooster van het Rijmamo-grof model is een 1 op 1 uitsnede uit het Zeedelta-grof model zodat er geen interpolatieslag hoeft te worden uitgevoerd.

Om het effect van inspeeltijd te onderzoeken (zie Paragraaf 9.2) zijn tevens initiële velden weggeschreven op 18-10-1985 0:00 uur en 23-10-1985 0:00 uur. Hierbij dient te worden opgemerkt dat de velden niet zijn weggeschreven op hoogwater. Dit leverde geen numerieke problemen op.

2.2.2 Zeerandvoorwaarden

Aan zeezijde worden met een interval van 4 tot 8 gridcellen waterstanden opgelegd afkomstig uit het Kuststrook-model. Dit Kuststrook-model is aangestuurd met randvoorwaarden welke met een Kalman-filter zijn bepaald [5]. De randvoorwaarden beslaan de periode van 15 september 1985 tot 5 november 1985.

Deze randvoorwaarden zijn tevens gebruikt om het Zeedelta model aan te sturen waarmee de rivierandvoorwaarden en initiële velden ten behoeve van het Rijmamo-grof model zijn bepaald.

De zoutconcentraties op de zeeranden zijn constant in de tijd en bedragen 35 ppt op zee tot 32 ppt aan de kust. Om het getij-effect in zouttransport aan de kust te simuleren is een zgn. return-time van 180 minuten ingevoerd (dit correspondeert met het M_2 -getij).

2.2.3 Rivierandvoorwaarden

Aan de rivierzijde worden zowel debieten als waterstanden afkomstig uit een 2DH berekening met het Zeedelta-grof model opgelegd. Op de Nieuwe Maas, de Oude Maas en het Hollandsch Diep worden de totale debieten opgelegd in de diepe, niet droogvallende, punten.

De waterstanden worden op de Nieuwe Maas opgelegd in Krimpen a/d IJssel, op de Oude Maas in het noordelijkste punt van de rand en op het Hollandsch Diep in het zuidelijkste punt van de rand.

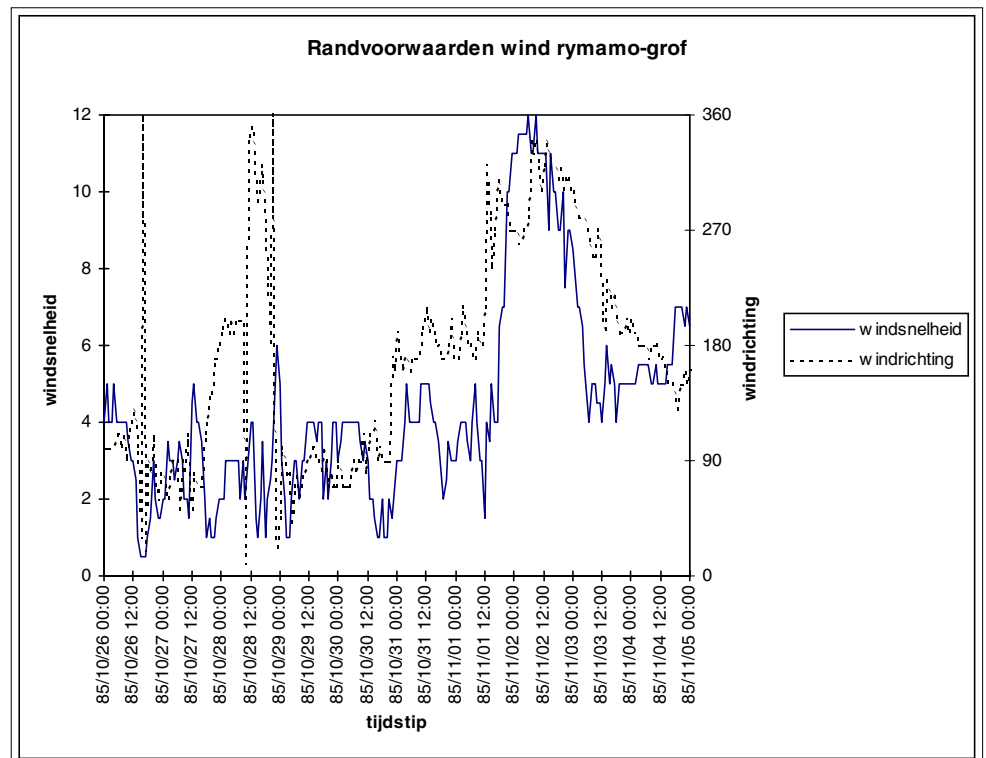
Bij twee berekeningen die in Hoofdstuk 9 worden beschreven (T8 en T5C) is zonder waterstandspunt op de rivieranden gerekend, dat wil zeggen op de rivieranden worden uitsluitend debieten opgelegd. Bovendien is in deze berekeningen de Hollandsche IJssel inbegrepen.

De opgelegde zoutconcentraties op de rivieranden zijn evenals de debieten en waterstanden afkomstig uit het Zeedelta-grof model.

2.2.4 Wind

Bij een aantal berekeningen die in Hoofdstuk 9 worden beschreven is met wind gerekend. Dit betrof de berekeningen T3A, T3B, T4A en T4B. De wind gemeten bij Hoek van Holland is als tijdreeks en ruimtelijk uniform op het model gezet.

In Figuur 2.2 is het verloop van de windrandvoorwaarde gepresenteerd. Duidelijk waarneembaar is de storm die op 2 november heeft gewoed. In de overige sommen is het effect van de wind alleen via de zeerandvoorwaarden (d.w.z. de opzet) meegenomen.



Figuur 2.2: Wind bij Hoek van Holland in de geanalyseerde periode

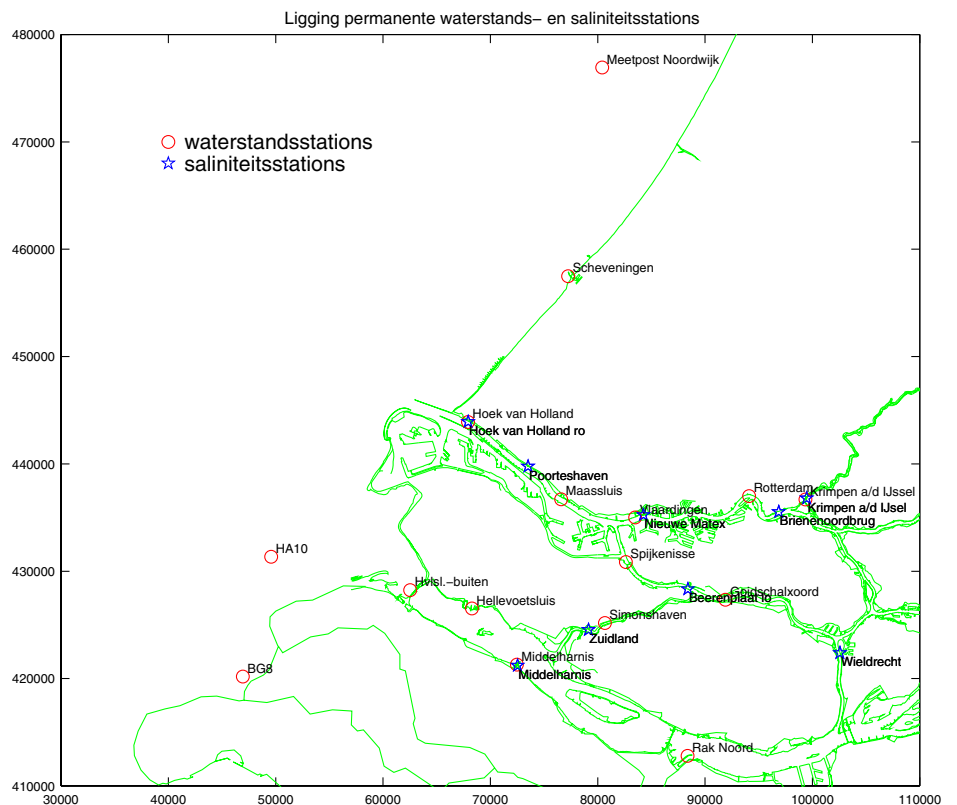
3 Beschrijving van de metingen

3.1 Inleiding

Voor deze pilot zijn dezelfde metingen gebruikt als tijdens een eerder onderzoek met een oudere versie van het Rijmamo model [9]. De stroomsnelheids- en saliniteitsmetingen komen uit de meetcampagne van 1985 [16]. Alle metingen zijn nogmaals gevalideerd, zoveel mogelijk vrij van fouten en geconverteerd naar een bruikbaar formaat (zie [10] en [11]). In de volgende paragrafen worden de metingen nader beschreven.

3.2 Beschrijving van waterstandsmetingen

Tijdens dit onderzoek zijn waterstandsmetingen gebruikt om de reproductienauwkeurigheid van het Rijmamo-grof model te toetsen. De metingen van de permanente waterstandsmeetpunten zijn afkomstig uit DONAR en zijn beschikbaar voor de periode van 1-10-1985 t/m 5-11-1985 met een tijdsinterval van 60 minuten. In Figuur 3.1 zijn de waterstandsstations welke tijdens dit onderzoek zijn gebruikt, gepresenteerd. De metingen van Noordwijk zijn niet compleet en beginnen pas op 1 november.



Figuur 3.1: Ligging vaste meetlocaties voor waterstanden en saliniteiten

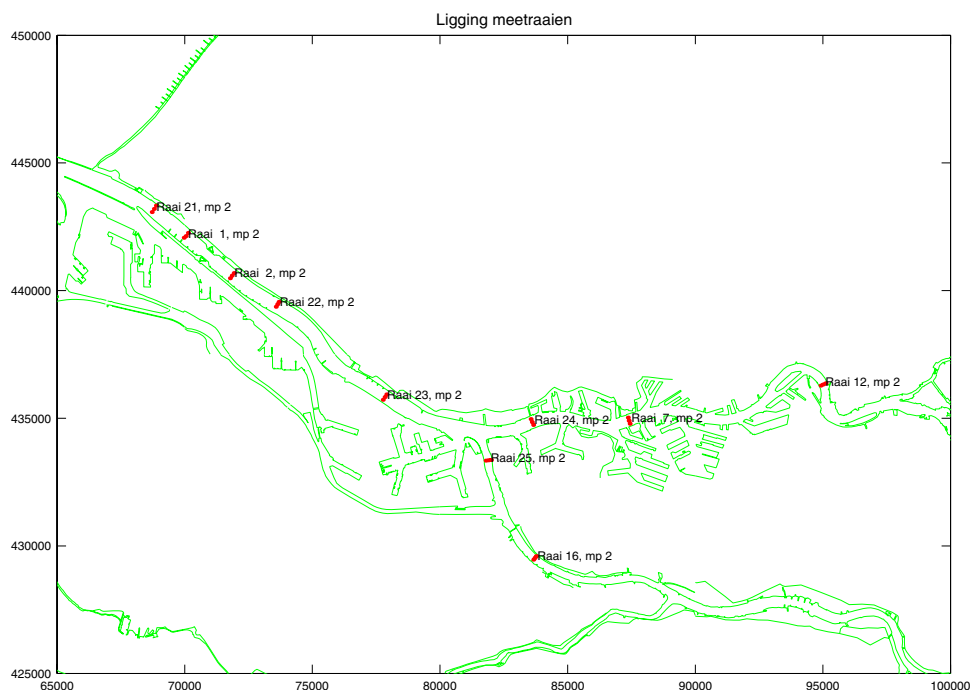
3.3 Beschrijving van stroomsnelheidsmetingen

Tijdens dit onderzoek zijn alleen metingen van stroomsnelheden meegenomen ter plaatse van diverse meetraaien. Deze metingen zijn op 31-10-1985, 1-11-1985 en 4-11-1985 uitgevoerd. Op deze dagen is vanaf ongeveer 07:00 uur tot 19:00 uur elk half uur de stroomsnelheid over de verticaal met een interval van één meter beschikbaar. Elke raai bestaat uit 3 meetpunten, waar over de verticaal metingen zijn verricht. Voor dit onderzoek zijn de metingen uit het middelste meetpunt genomen. De stroomsnelheidsmetingen betreffen de stroomsnelheidscomponenten loodrecht op de raairichting (zie [16]). In Tabel 3.1 zijn de posities van de stroomsnelheidsmetingen, welke tijdens dit onderzoek zijn gebruikt, gepresenteerd en in Figuur 3.2 is de ligging van alle raaien weergegeven.

De nauwkeurigheid van de gebruikte snelheidsmetingen hangt af van de gebruikte meetinstrumenten en de methode van verwerking. De stroomsnelheidscomponent loodrecht op de raairichting is berekend uit de afgelezen tellerstand, de bij het meetinstrument behorende ijklijn en de gemeten stroomrichting. Uit het meetverslag [16] is echter niet op te maken welke nauwkeurigheid de meting daardoor heeft.

raai	punt	RD coördinaten (x,y)	M coördinaat	N-coördinaat	31-10	1-11	4-11
2	2	71846, 440587	52.4688	67.1115			x
21	2	68792, 443203	52.3414	49.875	x	x	x
24	2	83600, 434850	52.9124	113.3508	x	x	x
25	2	81890, 433353	61.9296	104.4869	x	x	x

Tabel 3.1: Coördinaten van de raaien waarin stroomsnelheden zijn gemeten
RD-coördinaten afkomstig uit DONAR
M- en N-coördinaten uit Rijmamo-grof .1-3D



Figuur 3.2: Ligging meetraaien

3.4 Beschrijving van saliniteitsmetingen

In de modelberekeningen wordt met de saliniteit (aantal gram zout per kg zeewater uitgedrukt in promillen) gerekend enerzijds om de zout/zoet verdeling te bepalen en anderzijds om de dichtheid van (verdund) zeewater te berekenen. Hiervoor zijn er enkele empirische formules beschikbaar zoals de formule van Eckart [8] welke in de TRIWAQ-berekeningen wordt toegepast. In Paragrafen 3.4.1 en 3.4.2 worden derhalve de saliniteitsmetingen in respectievelijk de verschillende meetraaien en in de permanente meetstations beschreven. In Paragraaf 3.4.3 worden er enkele kanttekeningen geplaatst ten aanzien van de nauwkeurigheid in de metingen.

3.4.1 Saliniteitsmetingen in verticalen

De saliniteitsmetingen in verticalen zijn op 31-10-1985, 1-11-1985 en 4-11-1985 uitgevoerd. Op deze dagen is vanaf ongeveer 07:00 uur tot 19:00 uur elk half uur de saliniteit over de verticaal met een interval van één meter beschikbaar.

Evenals bij de stroomsnelheidsmetingen zijn ook bij de saliniteitsmeting de middelste meetpunten genomen. In Figuur 3.2 is de ligging van alle raaien gepresenteerd.

In Tabel 3.2 zijn de lokaties van de saliniteitsmetingen, welke tijdens dit onderzoek zijn gebruikt, gepresenteerd.

Raai	punt	RD coördinaten (x,y)	M coördinaat	N-coördinaat	31-10	1-11	4-11
1	2	70042, 442137	52.5425	56.9016			x
2	2	71846, 440587	52.4688	67.1115			x
7	2	87393, 434904	52.3684	125.5301			x
12	2	95002, 436322	52.3153	157.1512	x	x	x
16	2	83711, 429532	74.9922	115.4235	x	x	x
21	2	68792, 443203	52.3414	49.875	x	x	x
22	2	73624, 439463	51.8747	76.0713			x
23	2	77829, 435831	53.071	89.3348	x	x	x
24	2	83600, 434850	52.9124	113.3508	x	x	x
25	2	81890, 433353	61.9296	104.4869	x	x	x

Tabel 3.2: Coördinaten van de raaien waarin saliniteiten zijn gemeten

RD-coördinaten afkomstig uit DONAR

M- en N-coördinaten uit Rijmamo-grof.1-3D

3.4.2 Saliniteitsmetingen in permanente meetstations

In dit onderzoek zijn naast saliniteitsmetingen in tijdelijke meetraaien ook saliniteitsmetingen in permanente meetstations gebruikt. Dit zijn metingen op één of meerdere dieptes gedurende de periode 1-10-1985 t/m 5-11-1985. In Tabel 3.3 wordt van de metingen een overzicht gegeven. De lokatie van deze metingen is gepresenteerd in Figuur 3.1. De saliniteitsmetingen in de stations Brienoordbrug, Spijkenissebrug, Wioldrecht, Zuidland en Poorteshaven zijn niet gebruikt omdat in de periode van 28-10-1985 t/m 5-11-1985 meetdata in deze stations ontbrak. De metingen van Nieuwe Matex bleken niet juist te zijn (zie [13]) en zijn bij de uiteindelijke analyses niet meegenomen.

Meetstation	tijdstap	aantal waarden	diepten
Hoek van Holland, rechteroever (ro)	5 min	10368	NAP -2.50 m, NAP -4.50 m, NAP -9.00 m
Beerenplaat, linkeroever (lo)	5 min	10368	NAP -2.00 m
Krimpen a/d IJssel, lo	5 min	10368	NAP -4.00 m
Middelharnis	5 min	10368	NAP -1.00 m

Tabel 3.3: Coördinaten van de permanente saliniteitsstations

3.4.3 Nauwkeurigheid in saliniteitsmetingen

De metingen naar de saliniteit worden uitgevoerd als geleidendheids- en temperatuurmetingen. De nauwkeurigheid waarmee de saliniteit wordt bepaald aan de hand van de geleidendheid en de temperatuur wordt beïnvloed door:

- de meetfouten van geleidendheids- en temperatuurmetingen;
- de wijze waarop de relatie tussen de saliniteit, de geleidendheid en de temperatuur wordt bepaald.

Met de geijkte geleidendheidsmeter met een ingebouwde automatische temperatuurherleiding kan vrij nauwkeurig de geleidendheid gemeten worden. Er wordt echter geen uitspraak omtrent de ijking gedaan in het meetverslag [16]. Wel wordt er gemeld dat tijdens de meetcampagne zich storingen hebben voorgedaan in de gebruikte meetapparatuur.

Voor wat betreft de omrekening van de gemeten geleidendheid met de bijbehorende gemeten temperatuur naar de saliniteit wordt onder andere gebruik gemaakt van de zg. NDB-lijn '80-'81 [7]. Deze empirische formule geeft de relatie weer tussen de geleidendheid, de temperatuur en de chlorositeit (aantal gram chloorionen per liter water) van zee- c.q. rivierwater van verschillende geografische herkomst binnen het Noordelijk Deltabekken. Dit verband is gecalibreerd op basis van titraties van de genomen watermonsters en geldt dus feitelijk voor de plaats waar en het tijdstip waarop de monsters genomen zijn. In hoeverre de watersamenstelling in de rivierengebied tijdens de meetperiode in het najaar van 1985 afwijken van de samenstelling waarvoor de NDB-lijn '80-'81 geldt is echter niet bekend. Desalniettemin is de verwachting dat deze bron van onnauwkeurigheid relatief klein zal zijn.

In geval van hoge chlorideconcentraties kan de saliniteit eenvoudigweg berekend worden door de met de NDB-formule berekende concentraties met een factor van 1.78 te vermenigvuldigen. Dit is het gevolg van het feit dat voor zeewater de samenstelling van het opgeloste zout, zoals o.a. chloriden, carbonaten en sulfiden, vrij constant is voor de verschillende plaatsen op aarde. Voor lage concentraties ("brak water") is echter de onderlinge verhouding van de opgeloste stoffen, met inbegrip van de industriële zouten, niet bekend zodat de saliniteit niet kan worden berekend. Niettemin heeft men ter bepaling van de saliniteit de lage chloride-concentraties eveneens met 1.78 vermenigvuldigd. De op deze wijze berekende saliniteitswaarden worden waarschijnlijk onderschat. Bij de vergelijking met de modelberekeningen moet hiermee terdege rekening gehouden worden.

4 Kwantificatie van de model(on)nauwkeurigheid

4.1 Methodiek

De gebruikelijke methode om inzicht te krijgen in bijdragen aan modelonzekerheid is het toepassen van gevoeligheidsanalyses. De werkwijze is afhankelijk van het type onzekerheid. In deze studie worden drie typen onzekerheden onderscheiden:

1. Numerieke onzekerheid
2. Onzekerheid van fysische parameters
3. Onzekerheid door vereenvoudigingen in de modellering

Deze typen onzekerheden zullen hierna in het kort worden toegelicht.

4.1.1 Numerieke onzekerheid

Doordat de wiskundige vergelijkingen waarop het numerieke model is gebaseerd, worden gediscretiseerd en op een computer met eindige precisie worden opgelost ontstaat er een numerieke fout. Deze numerieke fout is een combinatie van een groot aantal factoren. Standaardtechnieken voor het schatten van numerieke fouten zijn: het berekenen van afbreekfouten uit hogere orde termen, het vergelijken met berekeningen met een fijner of een grover rooster of een kleinere of een grotere tijdstap, berekeningen uitgevoerd met dubbele precisie of vergelijking met berekeningen uitgevoerd met andere instellingen voor parameters zoals iteratienauwkeurigheid.

4.1.2 Onzekerheid van fysische parameters

Een aantal parameters in het model is niet met grote nauwkeurigheid bekend. Vaak doordat zij moeilijk te meten zijn. Een voorbeeld van zo'n parameter is de Chézy-coëfficiënt waarmee de bodemwrijving wordt beschreven. De schuifspanning aan de bodem is heel moeilijk direct te meten waardoor deze coëfficiënt alleen indirect door afregelen van het model te bepalen is. De nauwkeurigheid van deze parameter kan men schatten of op basis van ervaring of door trial-and-error exercities. Het bereik waarover de parameter kan worden gevarieerd zonder dat dit een echte verslechtering van de modelresultaten oplevert is in sommige gevallen een goede maat voor de nauwkeurigheid. In andere gevallen is er het een en ander bekend over de nauwkeurigheid van de parameter en kan men vervolgens bekijken hoe groot de afname van de nauwkeurigheid ten gevolge hiervan is.

4.1.3 Onzekerheid door vereenvoudigingen in de modellering

Een belangrijk deel van de modelfouten wordt veroorzaakt door vereenvoudigingen in het model. Uitgaande van de Navier-Stokes vergelijkingen welk een nauwkeurig model voor de waterbeweging vormen is er een groot aantal aannames gedaan om te komen tot de differentiaalvergelijkingen zoals die in WAQUA/TRIWAQ worden opgelost. Een aantal voorbeelden zijn: hydrostatische drukaanname, dieptemiddeling, turbulentiesluiting, grenslaagformulering aan de bodem en wind-dragformulering. In het algemeen

is het niet eenvoudig om een schatting te maken van de fouten die door een aanname worden geïntroduceerd. In een aantal gevallen kan een schatting worden gemaakt. In een aantal andere gevallen kan een geavanceerder model worden gebruikt om het effect van de vereenvoudigingen te schatten; zo kan bijvoorbeeld een drie-dimensionale simulatie worden gebruikt om de dieptemiddeling te bestuderen.

Hoewel de methodiek dus per situatie/bron kan verschillen is het hier steeds de bedoeling een kwantitatieve schatting te maken. Een uitspraak als: "de tijdsintegratie methode is tweede orde nauwkeurig" is niet voldoende. Pas zodra de evenredigheidsconstante bekend is kan een dergelijke uitspraak worden gebruikt in deze context. In principe zijn uitspraken in de vorm van een formule te verkiezen boven getallen omdat dan ook de invloed van een of meerdere parameters direct duidelijk is.

4.2 Ruimtelijk en temporeel onderscheid in de analyse

De methodiek uit de vorige paragraaf is nog erg algemeen en kan in principe op alle modelvariabelen en op diverse aggregatieniveaus worden gebruikt. In de praktijk moet een keuze uit deze overvloed van mogelijkheden worden gemaakt. Deze keuze zal voor een groot deel gebaseerd zijn op ervaring met het model en door het gebruiksdoel van het model. In het geval van het Rijmamo-model zal het gebruiksdoel (in ieder geval in NAUTILUS kader) enerzijds zijn het operationeel voorspellen van waterstanden en stroomsnelheden ten behoeve van de scheepvaartbegeleiding in de Nieuwe Waterweg. Daarnaast is het model een belangrijk instrument om de effecten te bestuderen van eventuele ingrepen, zoals het gedeeltelijk openen van de Haringvlietsluizen. Hierbij zijn vooral de zoutindringing en de stroomsnelheden van belang.

Van stroomsnelheden is bekend dat deze sterk in de ruimte variëren. Vooral als de bodem in de omgeving van het beschouwde punt niet vlak is kunnen er grote variaties optreden. Het is op dergelijke locaties van groot belang het meetpunt bij vergelijking met een model zo nauwkeurig mogelijk te plaatsen. In een aantal gevallen is afronden van de positie naar roosterpunten al te grof. Door het middelende karakter van modelberekeningen moet er vaak ook rekening worden gehouden met de verschillen tussen de stroomsnelheden gemeten op een punt en de modelwaarde die representatief is voor een hele roostercel.

Samengevat kan men stellen dat ruimte en tijd een belangrijke rol spelen in de te verwachten nauwkeurigheid. Het is daarom van belang om ook in de analyse dit onderscheid te maken.

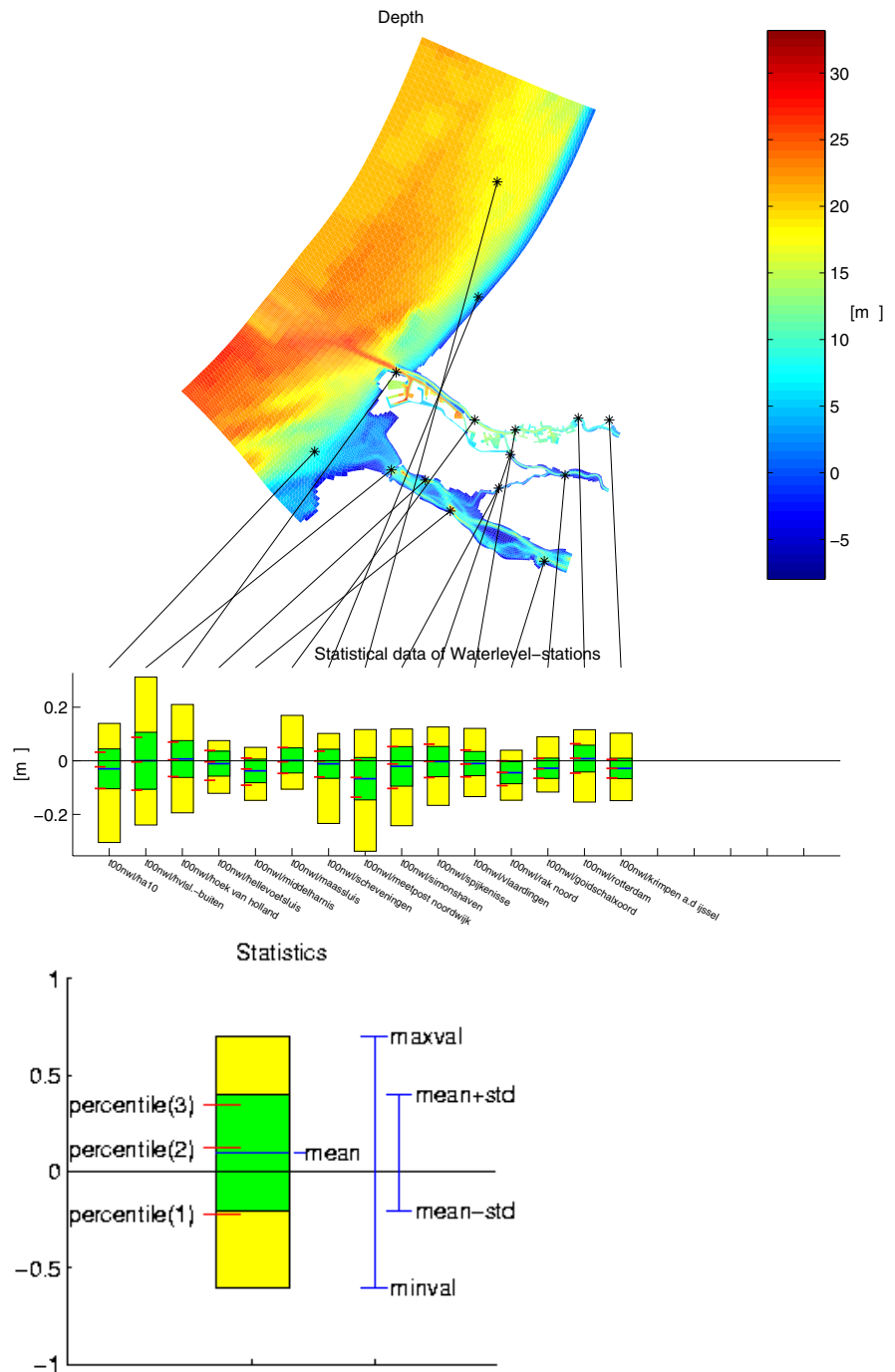
5 De basisanalyse

De basisanalyse is het uitgangspunt bij verdere analyses en modelverbeteringen. Door deze analyse enigszins standaard te maken wordt het mogelijk om vrij snel inzicht te krijgen in wat kwantitatief de verbetering is als gevolg van een bepaalde ingreep. Omdat het belangrijkste doel is een goed inzicht te geven in de modelnauwkeurigheid ligt de nadruk op het vergelijken van de modelberekeningen (maximaal twee) met metingen. De basisanalyse omvat de volgende gegevens (zie ook [4]):

Statistische overzichten	Twee typen overzichten van alle stations worden geproduceerd (zie Tabel 5.1 voor de definitie van de kentallen), voor waterstanden , stroomsnelheden (gesplitst naar snelheidscomponenten) en saliniteiten
Tabel-vorm	In Ascii- formaat worden pagina's gemaakt met getabelleerde statistische gegevens per station. De volgende kentallen worden gegeven: <ul style="list-style-type: none">• Gemiddelde fout• Root-mean-square (RMS)• Standaarddeviatie• Minimale fout• Maximale fout Dit gebeurt per modelberekening, of – in het geval dat opzet bestudeerd wordt – voor de opzet tijdreeksen.
Grafisch	Op de grafische overzichten (postscript formaat) is de bodemligging en kustlijn van het model geplot met daarin de stationslocaties. Elke stationslocatie, gesorteerd in x-richting, wordt met een lijnstuk verbonden aan een boxplot waarin de statistische gegevens zijn afgebeeld. Hierin wordt de minimum en maximum waarde, het gemiddelde en de standaarddeviatie en de gevraagde percentielen van de reeks aangegeven. Dit wordt nader toegelicht in een voorbeeld boxplot op de eerste pagina van een basisanalyse verslag. Het maximum aantal boxplots per pagina is beperkt tot twintig, zodat er eventueel meerdere pagina's nodig zijn. Een voorbeeld van een dergelijke grafische weergave van de statistische kentallen wordt gegeven in Figuur 5.1.

Tijdreeksen	waterstanden, stroomsnelheden (gesplitst naar snelheidscomponenten), saliniteiten
Eén modelberekening	<p>In het geval van één modelberekening worden in de "tijdreeksen plots", per station, per variabele en eventueel per component de voorspelde en waargenomen tijdreeksen (indien aanwezig) geplot. De statistiek wordt bepaald op basis van het verschil tussen deze twee. De maximum verschil waarde (MAX) en de root mean square (RMS) worden in de titel vermeld. In het geval van snelheden wordt tevens de hoek vermeld van de beschouwde component. Deze hoek wordt gegeven in graden t.o.v. de noord-as met de klok mee.</p>
Twee modelberekeningen	<p>Als twee modelberekeningen zijn opgegeven, kan er voor gekozen worden de twee modelberekeningen apart, of het verschil tussen de berekeningen te beschouwen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Berekeningen apart Van beide berekeningen worden de waargenomen en voorspelde tijdreeksen per station in één figuur geplot. Per berekening wordt de statistiek dan bepaald van het verschil tussen de waargenomen en voorspelde tijdreeks. De hoog-laag water punten worden op elke kromme aangemerkt. De verschillen in de hoog-laag water punten tussen de waargenomen en voorspelde tijdreeks worden voor elke runid in de figuur geschreven, uitgedrukt in (centi)meters en minuten. • Verskil tussen berekeningen In dit geval wordt het verschil van de tweede berekening ten opzichte van de eerste bepaald. In de figuur wordt het verschil tussen de beide waargenomen tijdreeksen (Obs2-Obs1) en het verschil tussen beide voorspelde tijdreeksen (Prd2-Prd1) geplot. De statistiek wordt nu bepaald op basis van Prd2-Prd1 t.o.v. Obs2-Obs1. De hoog-laag water tijdstippen van de tweede berekening worden op de verschilkrummen aangemerkt. De hoog-laag water tijdstippen van de eerste berekening (zowel voor de waargenomen en voorspelde reeks) worden op de nullijn aangemerkt. Twee bij elkaar horende markers worden door een lijnstuk met elkaar verbonden zodat de 'scheve opzet' zichtbaar wordt. Deze scheve opzet wordt ook uitgedrukt in (centi)meters en minuten en zowel voor de waarnemingen als de voorspellingen in de figuur geschreven

Runid/SDSid/Exp : t00nw/T00n/EXP
Simulation start : 28-Oct-1985 00:00
Simulation end : 05-Nov-1985 00:00



Figuur 5.1: Voorbeeld van grafische weergave van de statistische kentallen (boven) en de voorbeeld boxplot (onder), zoals die op de eerste pagina van een basisanalyse verslag gegeven wordt

Ruimtelijke plots	waterstanden, stroomsnelheden (gesplitst naar snelheidscomponenten), saliniteiten en wind
Eén model-berekening	In de "ruimtelijke plots" vermeldt de titel het type en tijdstip van de map data. Voor stroomsnelheden en saliniteiten wordt ook het verticale bereik vermeld waarover gemiddeld is.
Twee model-berekeningen	Wanneer twee modelberekeningen worden opgegeven, geven de "ruimtelijke plots" altijd het verschil weer tussen beide berekeningen.

Zt-plots	stroomsnelheden (gesplitst naar snelheidscomponenten) en saliniteiten
Eén model-berekening	Per station wordt in kleur de variabele als functie van de diepte en de tijd geplot. De horizontale as geeft de tijd, de verticale as de diepte en de kleur geeft de modelwaarde weer. Op de tijdstippen en dieptes waar meetwaardes beschikbaar zijn wordt in kleur de meetwaarde in kleine vierkantjes geplot.
Twee model-berekeningen	Wanneer twee modelberekeningen worden opgegeven, geven de zt-plots altijd het verschil weer tussen beide berekeningen. Op de tijdstippen en dieptes waar meetwaardes beschikbaar zijn wordt in kleur het verschil tussen beide metingen in kleine vierkantjes geplot.

kental	formule	notaties	gerelateerde begrippen
bias	$\frac{\sum_{i=1}^n x(i)}{n}$	μ , mean(x), $\langle x \rangle$	verwachting gemiddelde mean systematische fout
standaard-deviatie	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x(i) - \mu)^2}{n}}$	σ , std(x)	standaarddeviatie
variantie	$\frac{\sum_{i=1}^n (x(i) - \mu)^2}{n}$	var(x), σ^2	variantie toevallige fout
Root-mean-square (RMS)	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x(i)^2}{n}}$	RMS	
percentiel	$\{x, \frac{\text{aantal}\{x(i) < x\}}{n} = \text{perc}\}$	x_{90}	overschrijdingskans mediaan

Tabel 5.1: Overzicht van de kentallen, die door basisanalyse worden bepaald. In deze tabel zijn $x(1), x(2), x(3) \dots t/m \dots x(n)$ residuen, dwz verschillen tussen waargenomen en voorspelde waarden

Opmerkingen:

- Het genereren van deze uitvoer is volledig geautomatiseerd. Met 'een druk op de knop' kan het analyse-rapport worden gemaakt. Het is hiermee eenvoudig de invloed van een ingreep op de resultaten te beoordelen. In dit document zal steeds een selectie uit de uitvoer worden gepresenteerd. De volledige data is op CD-ROM's bij Nautilusgroep verkrijgbaar.
- Deze basisanalyse is tevens een geschikt instrument voor de validatie van modellen.
- Het maximum en minimum zijn vaak geen goede statistische kentallen omdat voor veel verdelingen de waarden niet convergeren maar afhangen van de toevallige steekproef en vooral ook van de grootte van de steekproef.
- Het gemiddelde, de standaarddeviatie en de RMS zijn geen onafhankelijke waarden, maar zijn d.m.v. de relatie $RMS^2 = \mu^2 + \sigma^2$ met elkaar verbonden.
- De formule voor percentielen ziet er ingewikkelder uit dan dit kental werkelijk is. Als bv. het 90 percentiel gelijk is aan 3 betekent dit dat 10% van de waarden groter is dan 3 en 90% kleiner.

6 Bepaling van de optredende residuen

6.1 Inleiding

Om een beeld te krijgen van de verschillen tussen model en metingen, de residuen, is voor de gebruikte periode (zie Hoofdstuk 3), een referentieberekening uitgevoerd (T00n). De specificaties van deze berekening zijn gegeven in Tabel 6.1. De resultaten van deze berekening zijn vervolgens geanalyseerd met behulp van de basisanalyse (zie Hoofdstuk 5). Omdat de hoeveelheid metingen behoorlijk groot is, is ten behoeve van de analyse een temporele opdeling van de vaste meetlocaties en een ruimtelijke opdeling van de verticalen gemaakt, zoals beschreven in resp. Paragrafen 6.1.1 en 6.1.2.

Parameter T00n	instelling
Periode	28-10-1985 t/m 4-11-1985
Turbulentiemodel	standaard k-ε model met $c_{\mu}=0.09$
Manning waarde	0.016/0.020 (Oude Maas/Haringvliet)
Wind	geen
Oppervlakterandvoorwaarde c_{μ}	$c_{\mu} = 0.09$
Rivierrandvoorwaarden	Q EN H-rand
Prandtl-Schmidt getal	1

Tabel 6.1: Parameters zoals gebruikt in de referentieberekening (T00n)

Basisanalyse berekent een aantal kentallen als maat voor het residu, zoals de gemiddelde fout, de standaarddeviatie en de RMS-waarde (zie Hoofdstuk 5). Zoals in Hoofdstuk 5 opgemerkt bevat de RMS-waarde zowel de gemiddelde (systematische) fout als de standaarddeviatie (toevallige fout) en is daarmee het meest representatief voor de totale fout. Daarom, en ook om de hoeveelheid getallen te beperken, wordt in dit werkdocument alleen de RMS-waarde beschouwd.

Bij de residuen van de stroomsnelheden is steeds alleen de component loodrecht op de raairichting beschouwd, omdat alleen van deze component metingen beschikbaar zijn (zie Paragraaf 3.3). Als er dus gesproken wordt over 'de stroomsnelheid' wordt deze component bedoeld.

6.1.1 Temporele verdeling

De temporele verdeling wordt toegepast om een onderscheid te kunnen maken tussen de verschillende weersomstandigheden die optreden tijdens de geanalyseerde periode. De periode begint met rustig weer, en op 2 november vindt er een storm plaats. Tijdens de storm zijn er geen verticalen gemeten, en daarom wordt het effect van de storm bekeken aan de hand van de tijdreeksen van de permanente stations (waterstanden en saliniteiten). Deze reeksen worden opgesplitst in een rustig periode (29 oktober 0:00 - 1 november 12:00) en een periode tijdens storm (1 november 12:00 - 3 november 12:00). Hierbij moet worden opgemerkt dat de permanente saliniteitsstations alleen in de bovenste helft van de waterdiepte; slechts bij Hoek van Holland is op 9 meter

onder NAP een meting beschikbaar (zie Tabel 3.3). Bij de permanente meetstations wordt verder geen ruimtelijke verdeling toegepast.

6.1.2 Ruimtelijke verdeling

Een ruimtelijke verdeling wordt toegepast omdat het model in verschillende gebieden andere geometrische en fysische eigenschappen heeft. Aan de zeezijde domineert het getij en is de saliniteit relatief hoog, terwijl aan de rivierzijde het debiet belangrijk is en het water relatief zoet is. De verticalen (saliniteiten en snelheden) zijn daarom zowel horizontaal als verticaal opgedeeld:

- Horizontaal: De verticalen van het model zijn opgedeeld in deelgebieden, waar naar verwachting de effecten zullen verschillen (zie Tabel 6.2 en Figuur 3.2): in de Nieuwe Waterweg zijn de zoet-zoutverschillen het grootst, raai 23 (bij Maassluis) ligt vlak na de samenstroming van de Oude en de Nieuwe Maas en de Oude en de Nieuwe Maas worden door verschillende riviertakken gevoed.
- Verticaal: Verder is er in de analyse een onderscheid gemaakt tussen de bovenste helft van de verticaal (0-8 meter onder NAP) en de onderste helft (9-20 m onder NAP).

Bij de verticalen wordt verder geen temporele verdeling toegepast; de resultaten van 31 oktober, 1 november en 4 november worden als geheel beschouwd. In het geval er na de storm (4 november) een duidelijk ander effect is dan vóór de storm wordt dat apart vermeld. Voor details wordt er verwezen naar de CD-ROM's, die bij de Nautilus-groep beschikbaar zijn.

Deelgebied	Raaien Saliniteit	Raaien Snelheid
Nieuwe Waterweg	21, 1, 2, 22	21, 2
Maassluis	23	-
Nieuwe Maas	24, 7, 12	24
Oude Maas	25, 16	25

Tabel 6.2: Opdeling model in deelgebieden

6.2 Residuen in de verticalen

De residuen van de verticalen (Tabel 6.3) laten zien dat de fouten het grootst zijn in de Nieuwe Waterweg en dan met name in de onderste helft van de verticaal. Dit geldt zowel voor saliniteiten (onderin te zoet, zie Figuur 6.1) als snelheden (onderin te groot). Een verklaring is dat in de Nieuwe Waterweg de grootste variaties in saliniteit plaatsvinden, doordat de zouttong daar met het getij heen en weer beweegt. Een kleine faseverschuiving daarin leidt al tot grote fouten. Verder van de zee af wordt de fout in saliniteiten kleiner. In de Nieuwe Maas en Oude Maas is de RMS waarde meer dan de helft afgenomen ten opzichte van de RMS waarde in de Nieuwe Waterweg. Naarmate de afstand tot de zee groter wordt neemt de saliniteit af en worden de verschillen in saliniteit kleiner. Hierdoor neemt ook de RMS waarde ten opzichte van de metingen af. De RMS-waarde in de Nieuwe Maas is groter dan in de Oude Maas, omdat de zoutindringing in de Nieuwe Maas te groot is. Vooral onderin de verticaal is het daar te zout.

De snelheden onderin in de Oude Maas zijn een stuk slechter dan in de Nieuwe Maas; dit wordt vooral veroorzaakt doordat daar de snelheden op 4 november

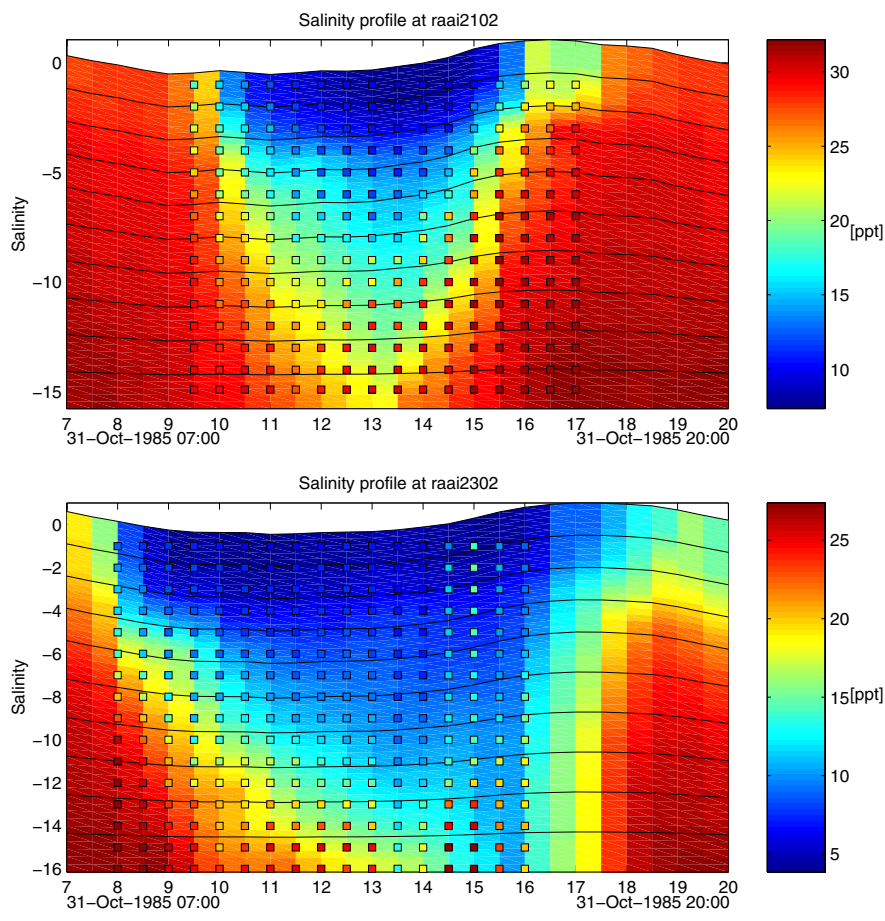
(na de storm) niet goed gereproduceerd worden. Op de overige dagen is de RMS-waarde daar kleiner. Een oorzaak kan zijn dat de bodem ter plaatse van raai 25 in het model 14 m is, terwijl de metingen maar tot 10.6 m diepte gaan. Waarschijnlijk was de bodem in 1985 een stuk ondieper, wat tot grote verschillen kan leiden. In Hoofdstuk 9 gaan we hier nader op in.

RMS snelheid (cm/s)	0-8 m onder NAP	>8 m onder NAP	Totaal
Nieuwe Waterweg	19	29	24
Nieuwe Maas	13	15	14
Oude Maas	14	26	17
Totaal	16	25	20

RMS saliniteit (ppt)	0-8 m onder NAP	>8 m onder NAP	Totaal
Nieuwe Waterweg	2.1	6.2	4.5
Maassluis	2.0	3.9	3.1
Nieuwe Maas	1.2	1.8	1.4
Oude Maas	1.1	1.4	1.2
Totaal	1.6	4.4	3.0

Tabel 6.3: RMS-waarden in de verticalen voor zowel snelheid als saliniteit

Runid/SDSid/Exp : t00n31/T00n/EXP
 Simulation start : 28-Oct-1985 00:00
 Simulation end : 05-Nov-1985 00:00



Figuur 6.1: Zt-plot van de saliniteiten in raai 21 (bovenste figuur) en raai 23 (onderste figuur). De meetwaarden zijn in de vierkantjes geplot.

6.3 Residuen in de permanente stations

De waterstanden worden in het algemeen goed gereproduceerd, waarbij de RMS-waarden in het binnengebied kleiner zijn dan op de Noordzee. Het station Haringvlietsluizen-buiten reproduceert de waterstanden over het algemeen het minst goed. Dit komt waarschijnlijk doordat de bodemwrijving in de Haringvlietmond niet goed is (zie ook [6]). Tijdens de storm wordt de RMS-waarde bij vrijwel alle stations hoger (zie Tabel 6.4). De enige uitzondering is het station Haringvlietsluizen-buiten, waar de RMS tijdens storm ongeveer 2 cm lager is dan tijdens rustig weer.

De RMS-waarden van de saliniteiten in de 4 vaste meetstations varieert in de rustige periode van ongeveer 0.2 ppt bij Middelharnis en Krimpen a.d. IJssel tot ongeveer 3.5 ppt bij Hoek van Holland (bij eb blijft het model te zout). Het Beerkanaal zit hier tussen in met een RMS waarde van 1.3 ppt. Ook hier geldt dus dat hoe verder van de zee, hoe lager de RMS-waarden voor saliniteit.

Tijdens de storm nemen deze waarden toe bij alle stations, behalve bij Hoek van Holland. In dit station neemt de RMS-waarde met ongeveer 0.5 ppt af, omdat de hoge saliniteit bij eb nu ook bij de metingen optreedt. Bij de overige stations wordt de zoutindringing tijdens de storm te groot. In totaal neemt daarom de RMS tijdens de storm toe (zie Tabel 6.4).

RMS	rustige periode	storm	Totaal
waterstanden (cm)	5.6	8.5	6.8
saliniteiten (ppt)	2.2	2.5	2.3

Tabel 6.4: RMS-waarden in de permanente stations voor zowel waterstanden als saliniteiten

6.4 Totaalbeeld

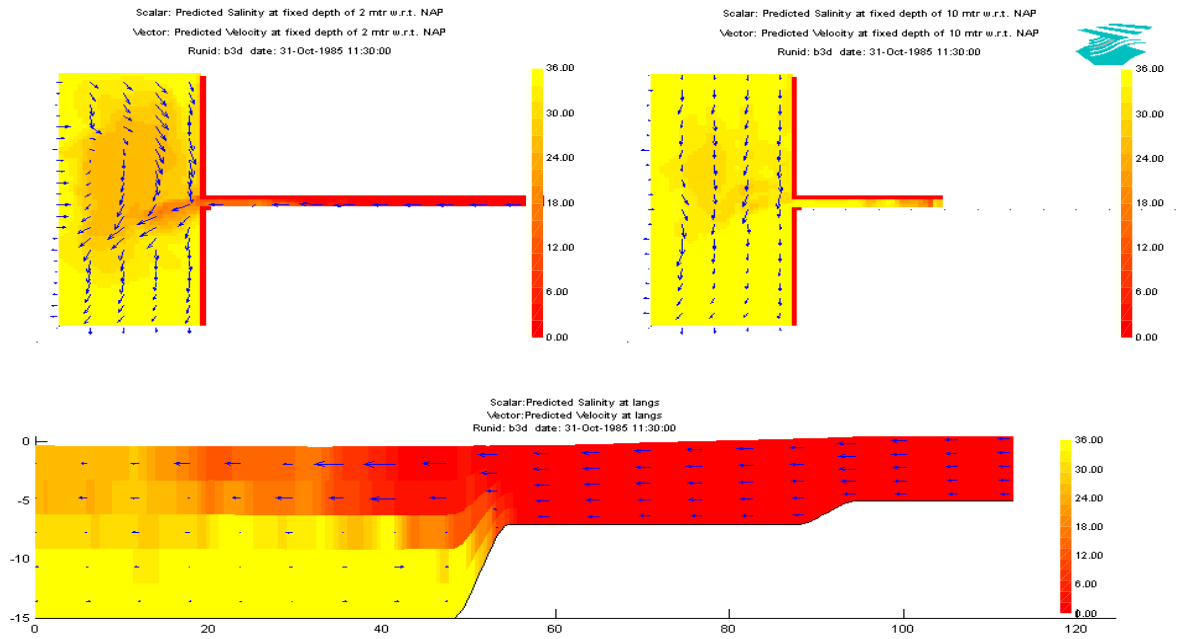
De referentieberekening geeft aanleiding tot het volgende totaalbeeld:

- De waterstanden worden in alle stations, behalve Haringvliet-luizen-buiten, in de rustige periode goed gereproduceerd, tijdens storm iets minder.
- Zowel de stroomsnelheden als de saliniteiten worden bovenin de verticaal beter gereproduceerd dan onder in de verticaal. Vooral in de Nieuwe Waterweg is het model onderin te zoet. Mogelijke oorzaken zijn:
 - De gebruikte bodemschematisatie is een recente bodem, terwijl de metingen uit 1985 zijn. Sindsdien is de bodem over het algemeen dieper geworden door baggeren. De gebruikte bodem is dus over het algemeen te diep, waardoor de snelheden te groot zijn in de onderste helft. Dit kan effect hebben op de zouttransport.
 - De verticale menging in het model is mogelijk te klein, waardoor het onderin het model te zoet wordt. Dit kan komen doordat parameters in het k- ϵ turbulentiemodel niet optimaal zijn ingesteld of door andere onvolkomenheden in het turbulentiemodel.
 - Het model heeft mogelijk nog niet lang genoeg ingespeeld. De initiële velden komen uit een 2DH (dieptegemiddelde) berekening. Initieel is het model dus onderin de verticaal te zoet en bovenin te zout.
- Deze, en ander aspecten, worden in Hoofdstukken 8 en 9 onderzocht.
- De zoutindringing is in de rustige periode al te groot in het model. Tijdens de storm neemt dit alleen nog maar toe, wat een negatief effect heeft op de RMS-waarde.

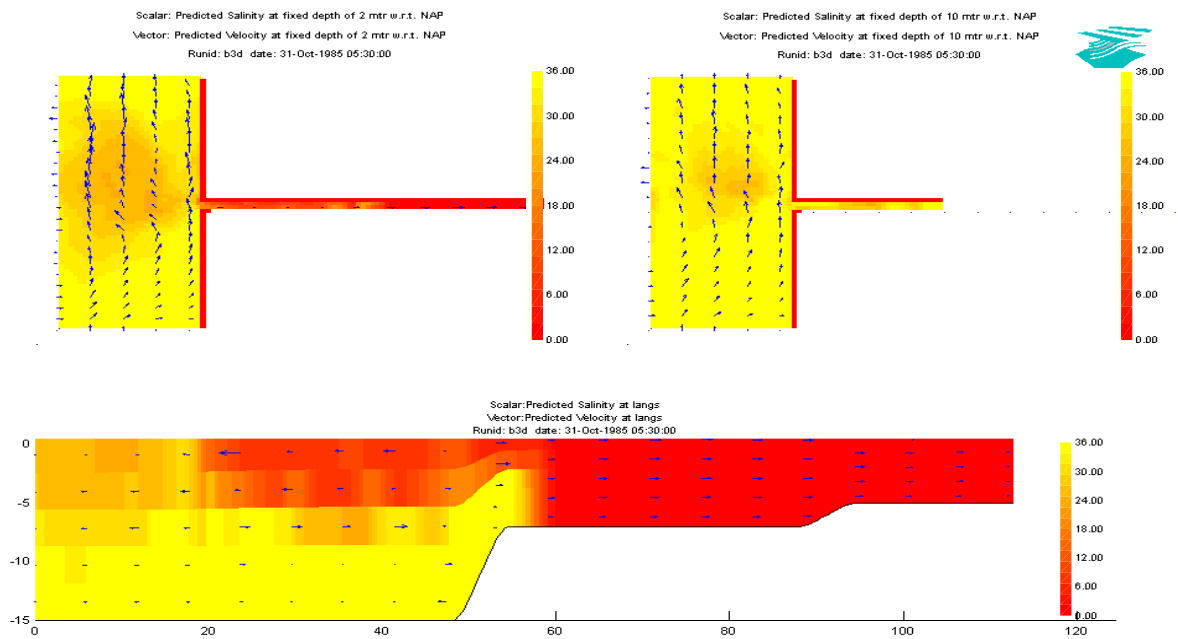
7 Experimenten met een vereenvoudigd model

Om meer inzicht te krijgen in de processen die zich afspelen in een gebied als de Rijn-Maasmond zijn er een aantal experimenten gedaan met een zeer eenvoudig model van de Rijn-Maasmond. We zijn hierbij vooral geïnteresseerd in de effecten van bepaalde veranderingen op zoutindringing en verticale menging. De schematisatie van het eenvoudige model bestaat uit een rechthoek (de zee) met een lange pijp (de Nieuwe Waterweg en de rivieren die daarop uitkomen). De gridcelgrootte is 1 km en er is gerekend met 5 equidistante lagen. Om problemen met de rivierandvoorwaarden te voorkomen is de pijp 100 km lang; dit is behoorlijk langer dan de rivieren in Rijnmamo-grof, waarvan de randvoorwaarden op ongeveer 40 km van de kust liggen. Op zee en in het eerste deel van de pijp (tot 30 km uit kust) is de diepte 15 meter, daarna neemt de diepte door middel van een drempel van 5 km snel af tot 7 meter. Hiermee wordt de bodem van Rijnmamo-grof na de havens zeer schematisch weergegeven. Aan het eind van de pijp is de diepte 5 meter. Aan het uiteinde van de pijp is een debiet van 460 m³/s opgelegd. Dit is het gemiddelde debiet van de Nieuwe Maas, de Oude Maas en Hollandsch Diep over de dagen 28 oktober t/m 2 november 1985. Als zeerandvoorwaarden zijn op de noordrand en zuidrand waterstanden opgelegd, afkomstig uit Rijnmamo-grof.

Met deze instellingen is eerst een referentieberekening gedaan (b3d). In Figuur 7.1 en Figuur 7.2 wordt voor maximale eb en maximale vloed een beeld gegeven van de zoutverdeling en de stroomsnelheden. De drempel is duidelijk van belang: het zout wordt er door tegengehouden en alleen bij maximale vloed komt het enigszins verder de pijp in.



Figuur 7.1: Saliniteit (kleur) en snelheid (vector) bij maximale eb voor de referentieberekening (b3d). Twee horizontale doorsnedes (op 2 meter en 10 meter diepte) en een verticale doorsnede.

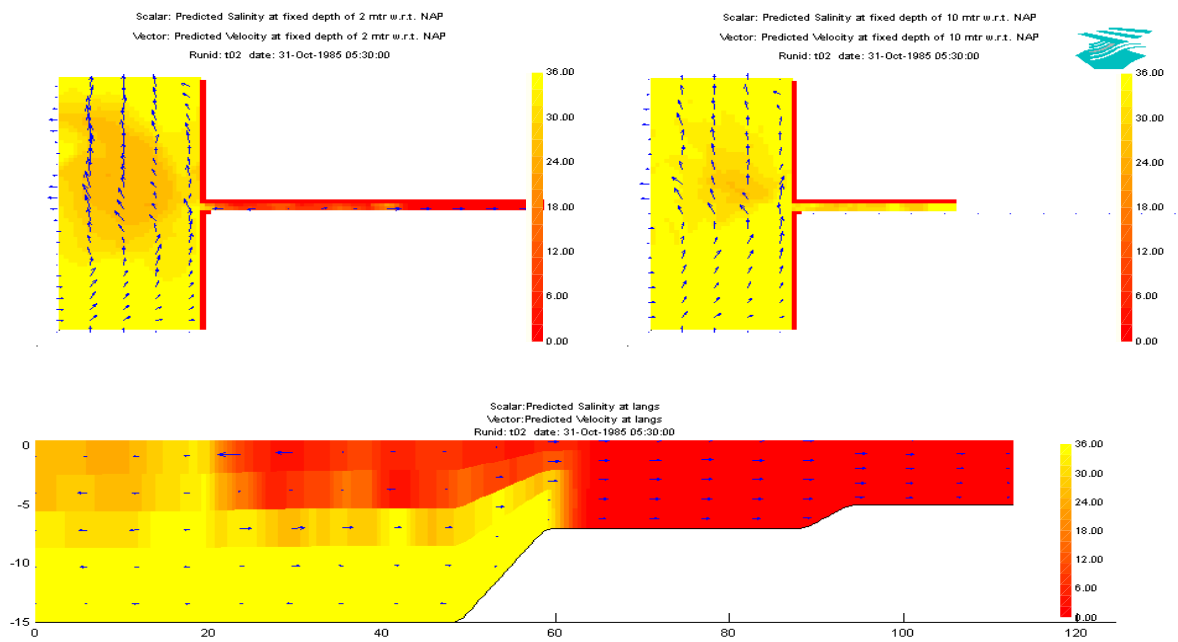


Figuur 7.2: Saliniteit (kleur) en snelheid (vector) bij maximale vloed voor de referentieberekening (b3d). Twee horizontale doorsnedes (op 2 meter en 10 meter diepte) en een verticale doorsnede.

In Tabel 7.1 zijn de verschillende berekeningen en de effecten op stroomsnelheden en saliniteiten in het kort weergegeven. Een grotere bodemwrijving (kleinere Chézy-waarde) en een ondiepere bodem zorgen voor meer verticale menging, omdat er meer turbulentie opgewekt wordt. Hierdoor neemt de zoutindringing ook iets toe. Door een kleiner Prandtl/Schmidt-getal neemt de turbulente diffusie toe, waardoor er meer verticale menging van saliniteit optreedt (zie ook Paragraaf 9.4.1). Het meeste effect op de zoutindringing heeft de helling van de drempel (zie Figuur 7.3); als de helling minder steil is wordt het zout gemakkelijker verder geduwd. Ook een grotere bodemwrijving (kleinere Chézy-waarde) en toevoeging van wind zorgen ervoor dat het zout iets verder de pijp inkomt. Een kleiner verhang in de zeerandvoorwaarden heeft vooral ertoe geleid dat de snelheden op zee lager worden. Een verhoging van het debiet heeft vooral invloed op de saliniteit op zee.

Berekening	Omschrijving	Effect op snelheden (t.o.v. b3d)	Effect op saliniteiten (t.o.v. b3d)
b3d	referentie	-	-
t01	bodem op zee en eerste deel pijp 2 meter ondieper	lager	meer menging voor drempel, iets grotere zoutindringing
t02	drempel minder steil	vóór drempel iets lager	zout komt verder pijp in
t03	debiet 10 % groter	nauwelijks effect	bij eb komt zoet verder de zee op
t04	Chézy overal 10% omlaag	nauwelijks effect	iets meer menging, zout komt iets verder pijp in
t05	wind van 15 m/s uit het noorden toegevoegd	bij eb veel groter, bij vloed dwars op de kust, in plaats van langs	zoet komt minder ver zee op en alleen naar zuiden, bij eb komt zout verder de drempel op
t06	Prandtl/Schmidt-getal=0.5 in plaats van 1	nauwelijks effect	horizontale menging kleiner, verticale menging groter
t07	minder verhang tussen zeerandvoorwaarden noord en zuid	snelheid langs kust kleiner en dwars op kust groter	bij vloed komt zout verder pijp in

Tabel 7.1: Overzicht berekeningen met vereenvoudigd model



Figuur 7.3: Saliniteit (kleur) en snelheid (vector) bij maximale vloed voor de berekening met een minder steile drempel (t02). Twee horizontale doorsneden (op 2 meter en 10 meter diepte) en een verticale doorsnede.

De experimenten met het vereenvoudigde model laten zien dat de bodemschematisatie veel effect heeft op zowel de zoutindringing als de verticale menging. Daarom is het gebruik van een goede bodem zeer aan te raden. Helaas is de bodem van Rijmamo-grof niet meer correct voor de periode 1985. De bodem uit 1985 is slechts met zeer veel inspanning te achterhalen. Bovendien is ook de geometrie veranderd doordat er havens bijgekomen zijn. Bij het interpreteren van de resultaten van Rijmamo-grof moet hiermee terdege rekening gehouden worden. Dit zal in Hoofdstuk 9 worden geïllustreerd.

8 Experimenten voor de bepaling van de numerieke nauwkeurigheid

8.1 Inleiding

Ter verificatie van modelresultaten, afkomstig van een TRIWAQ simulatie, is het van belang om inzicht te verkrijgen in de nauwkeurigheid van de berekeningen waarmee de resultaten zijn verkregen. Onnauwkeurigheden kunnen op vele niveaus aanwezig zijn of ontstaan bij numerieke berekeningen. Voorbeelden zijn het toepassen van bepaalde differenties (lagere- of hogere orde schema's), de lokaal optredende niet-orthogonale roosterlijnen, de rekking van het rooster, sigma-transformatie, het droogvallen en onderlopen, vereenvoudiging van bepaalde fysische fenomenen en gelaagdheid. De Hoofdstukken 8 en 9 behandelen de kwantificatie van een aantal van de genoemde factoren die de globale fout in de resultaten karakteriseren. Hiermee is het mogelijk om te onderzoeken welke invloed deze effecten kunnen hebben op het eindresultaat.

In dit hoofdstuk beschouwen we de berekeningen van het Rijnmamo-grof model tijdens een rustige periode met gemiddeld getij: 1 november 1985 van 0:00 uur tot 13:00 uur. Om overvloed aan getallen te vermijden worden slechts de onderlinge vergelijking van de stroomsnelheden en saliniteiten in raaien 12, 16, 21, 23 en 25 (zie Tabel 6.2) tussen twee verschillende berekeningen gepresenteerd. De overige resultaten zijn te vinden op de CD-ROM's die bij de Nautilus-groep verkrijgbaar zijn.

8.2 Tijdintegratie

8.2.1 Schatting van de globale fout

De globale fout is de in de numerieke benadering optredende fout. Of preciezer geformuleerd: zij ϕ de exacte oplossing van het continue modelprobleem en zij $\phi_{h,\Delta t}$ de uit een gediscetiseerde model gevonden numerieke benadering, zoals de stroomsnelheid en saliniteit. De globale fout is gedefinieerd door

$$\varepsilon_{h,\Delta t} \equiv \phi - \phi_{h,\Delta t}$$

Hierin zijn h en Δt respectievelijk de maaswijdte van een gegeven rooster en tijdstap van het ADI-schema toegepast in het gediscetiseerde model. Teneinde de globale fout te kunnen schatten moeten we ons eerst realiseren dat de foutschatting in de praktijk moeilijk uitgebuit kan worden, omdat het meestal niet mogelijk is in een concreet geval met weinig extra rekenwerk schatting voor $\varepsilon_{h,\Delta t}$ te vinden. In onze beschouwing behandelen we de zogeheten *Richardson correctie* waarmee een nauwkeurige schatting van de globale fout wordt verkregen. Een belangrijk kenmerk van deze techniek is dat een dergelijke schatting wordt verkregen door herhaling van de numerieke berekening met verdubbeling van het aantal roosterzellen of halvering van de tijdstap. Deze aanpak kan worden toegepast voor een willekeurige numerieke schema. We noteren de benadering van de oplossing ϕ met de stapgrootte δ met ϕ_δ . Nemen we aan dat het schema een globale fout van de orde p heeft en we gaan de berekening nogmaals doen met stap $\delta/2$, dan verkrijgen we als foutschatting het volgende:

$$\phi - \phi_{\delta/2} \approx \frac{1}{2^p - 1} (\phi_{\delta/2} - \phi_{\delta})$$

Het rechterlid van het bovenstaande formule heet de Richardson correctie. Het optellen van deze correctie bij de reeds verkregen numerieke benadering $\phi_{\delta/2}$ heet Richardson extrapolatie. De Richardson correctie kan dus voor twee doeleinden toegepast worden:

1. foutschatting voor $\phi_{\delta/2}$
2. $\phi_{\delta/2}$ + correctie = nauwkeuriger benadering

Met behulp van de Richardson correctie wordt de globale fout van de snelheidsgrootte en saliniteit bij de tijdintegratie voor verschillende tijdstappen geschat. Met de snelheidsgrootte wordt bedoeld de magnitude van de totale stroomsnelheid. De berekening met het Rijmamo-grof model wordt viermaal uitgevoerd met de volgende tijdstappen: 7.5 sec., 15 sec., 30 sec. en 60 sec. Beschouwen we de oplossingen $\phi_{\Delta t}$, $\phi_{2\Delta t}$, $\phi_{4\Delta t}$ en $\phi_{8\Delta t}$ berekend met respectievelijk de kleinste beschouwde tijdstap (7.5 sec), dubbele tijdstap (15 sec), viervoudige tijdstap (30 sec) en achtvoudige tijdstap (60 sec). Met de Richardson correctie wordt de globale fout voor de drie kleinst beschouwde tijdstappen geschat:

$$\varepsilon_{4\Delta t} \approx \frac{1}{3} (\phi_{4\Delta t} - \phi_{8\Delta t})$$

$$\varepsilon_{2\Delta t} \approx \frac{1}{3} (\phi_{2\Delta t} - \phi_{4\Delta t})$$

$$\varepsilon_{\Delta t} \approx \frac{1}{3} (\phi_{\Delta t} - \phi_{2\Delta t})$$

Hierbij is aangenomen dat de tijdintegratie gebaseerd op de ADI techniek tweede orde nauwkeurig is ($p = 2$).

Om vrij snel inzicht in de foutontwikkeling te verkrijgen worden op basis van de globale fout de RMS-waarden berekend waarna op basis daarvan de actuele orde van nauwkeurigheid p zal worden bepaald. Tevens worden de maximale verschillen van snelheidsgrootte en saliniteit gepresenteerd. De berekeningen met 4 verschillende tijdstappen zijn uitgevoerd met 10 equidistante lagen. Tevens zijn er berekeningen met 20 en 40 equidistante lagen uitgevoerd om te onderzoeken of het verloop van de globale fout van snelheidsgrootte en saliniteit als functie van de tijdstap (d.w.z. convergentiegedrag in tijd) beïnvloed wordt door het aantal lagen. In Tabellen 8.1 t/m 8.24 zijn de resultaten van de foutanalyse voor snelheidsgrootte (Tabellen 8.1 t/m 8.12) en saliniteit (Tabellen 8.13 t/m 8.24) in oppervlakte- en bodemlagen voor respectievelijk vier verschillende tijdstippen op 1 november 1985, t.w. 3:00 uur (ebkentering), 5:00 uur (maximale vloed), 7:00 uur (vloedkentering) en 10:00 uur (maximale eb), samengevat.

LAAG	Δt (sec)	RMS (cm/s)	p	max. verschil (cm/s)
oppervlakte (k=1)	30	0.59	–	2.36
	15	0.39	0.597	1.55
	7.5	0.34	0.198	1.49
bodem (k=10)	30	0.30	–	1.23
	15	0.20	0.585	1.22
	7.5	0.18	0.152	1.74

Tabel 8.1: Globale fout in snelheidsgrootte en orde-nauwkeurigheid (p) als functie van tijdstap op 1 november 1985, 3:00 uur, #lagen = 10

LAAG	Δt (sec)	RMS (cm/s)	p	max. verschil (cm/s)
oppervlakte (k=1)	30	0.84	–	3.51
	15	0.58	0.534	2.56
	7.5	0.56	0.051	2.42
bodem (k=10)	30	0.63	–	3.70
	15	0.44	0.518	2.98
	7.5	0.33	0.415	1.73

Tabel 8.2: Globale fout in snelheidsgrootte en orde-nauwkeurigheid (p) als functie van tijdstap op 1 november 1985, 5:00 uur, #lagen = 10

LAAG	Δt (sec)	RMS (cm/s)	p	max. verschil (cm/s)
oppervlakte (k=1)	30	0.83	–	3.51
	15	0.58	0.517	2.51
	7.5	0.65	-0.164	2.97
bodem (k=10)	30	0.38	–	3.17
	15	0.25	0.604	1.43
	7.5	0.32	-0.356	1.65

Tabel 8.3: Globale fout in snelheidsgrootte en orde-nauwkeurigheid (p) als functie van tijdstap op 1 november 1985, 7:00 uur, #lagen = 10

LAAG	Δt (sec)	RMS (cm/s)	p	max. verschil (cm/s)
oppervlakte (k=1)	30	0.60	–	2.04
	15	0.44	0.447	1.81
	7.5	0.43	0.033	1.74
bodem (k=10)	30	0.44	–	3.17
	15	0.32	0.459	1.70
	7.5	0.33	-0.044	1.75

Tabel 8.4: Globale fout in snelheidsgrootte en orde-nauwkeurigheid (p) als functie van tijdstap op 1 november 1985, 10:00 uur, #lagen = 10

LAAG	Δt (sec)	RMS (cm/s)	p	max. verschil (cm/s)
oppervlakte (k=1)	30	0.42	–	1.73
	15	0.35	0.263	1.49
bodem (k=20)	30	0.18	–	0.81
	15	0.16	0.170	0.83

Tabel 8.5: Globale fout in snelheidsgrootte en orde-nauwkeurigheid (p) als functie van tijdstap op 1 november 1985, 3:00 uur, #lagen = 20

LAAG	Δt (sec)	RMS (cm/s)	p	max. verschil (cm/s)
oppervlakte (k=1)	30	0.62	–	2.56
	15	0.48	0.369	2.38
bodem (k=20)	30	0.25	–	1.00
	15	0.19	0.396	0.81

Tabel 8.6: Globale fout in snelheidsgrootte en orde-nauwkeurigheid (p) als functie van tijdstap op 1 november 1985, 5:00 uur, #lagen = 20

LAAG	Δt (sec)	RMS (cm/s)	p	max. verschil (cm/s)
oppervlakte (k=1)	30	0.60	–	2.64
	15	0.53	0.179	2.71
bodem (k=20)	30	0.21	–	0.76
	15	0.16	0.392	0.63

Tabel 8.7: Globale fout in snelheidsgrootte en orde-nauwkeurigheid (p) als functie van tijdstap op 1 november 1985, 7:00 uur, #lagen = 20

LAAG	Δt (sec)	RMS (cm/s)	p	max. verschil (cm/s)
oppervlakte (k=1)	30	0.48	–	2.07
	15	0.48	0.000	1.96
bodem (k=20)	30	0.40	–	2.19
	15	0.27	0.567	1.59

Tabel 8.8: Globale fout in snelheidsgrootte en orde-nauwkeurigheid (p) als functie van tijdstap op 1 november 1985, 10:00 uur, #lagen = 20

LAAG	RMS (cm/s)	max. verschil (cm/s)
oppervlakte (k=1)	0.43	1.86
bodem (k=40)	0.17	1.19

Tabel 8.9: Globale fout in snelheidsgrootte voor $\Delta t = 30$ sec op 1 november 1985, 3:00 uur, #lagen = 40

LAAG	RMS (cm/s)	max. verschil (cm/s)
oppervlakte (k=1)	0.61	2.56
bodem (k=40)	0.17	1.19

Tabel 8.10: Globale fout in snelheidsgrootte voor $\Delta t = 30$ sec op 1 november 1985, 5:00 uur, #lagen = 40

LAAG	RMS (cm/s)	max. verschil (cm/s)
oppervlakte (k=1)	0.49	1.94
bodem (k=40)	0.15	1.19

Tabel 8.11: Globale fout in snelheidsgrootte voor $\Delta t = 30$ sec op 1 november 1985, 7:00 uur, #lagen = 40

LAAG	RMS (cm/s)	max. verschil (cm/s)
oppervlakte (k=1)	0.49	2.00
bodem (k=40)	0.17	1.19

Tabel 8.12: Globale fout in snelheidsgrootte voor $\Delta t = 30$ sec op 1 november 1985, 10:00 uur, #lagen = 40

LAAG	Δt (sec)	RMS (ppt)	p	max. verschil (ppt)
oppervlakte (k=1)	30	0.0283	–	0.1409
	15	0.0244	0.214	0.1072
	7.5	0.0237	0.042	0.1058
bodem (k=10)	30	0.0213	–	0.0801
	15	0.0165	0.368	0.0628
	7.5	0.0147	0.167	0.0568

Tabel 8.13: Globale fout in saliniteit en orde-nauwkeurigheid (p) als functie van tijdstap op 1 november 1985, 3:00 uur, #lagen = 10

LAAG	Δt (sec)	RMS (ppt)	p	max. verschil (ppt)
oppervlakte (k=1)	30	0.0367	–	0.1612
	15	0.0266	0.464	0.1139
	7.5	0.0267	-0.005	0.1191
bodem (k=10)	30	0.0212	–	0.0795
	15	0.0160	0.406	0.0616
	7.5	0.0154	0.055	0.0602

Tabel 8.14: Globale fout in saliniteit en orde-nauwkeurigheid (p) als functie van tijdstap op 1 november 1985, 5:00 uur, #lagen = 10

LAAG	Δt (sec)	RMS (ppt)	p	max. verschil (ppt)
oppervlakte (k=1)	30	0.0324	–	0.1324
	15	0.0236	0.457	0.0906
	7.5	0.0255	-0.110	0.1137
bodem (k=10)	30	0.0207	–	0.0795
	15	0.0140	0.564	0.0496
	7.5	0.0149	-0.090	0.0552

Tabel 8.15: Globale fout in saliniteit en orde-nauwkeurigheid (p) als functie van tijdstap op 1 november 1985, 7:00 uur, #lagen = 10

LAAG	Δt (sec)	RMS (ppt)	p	max. verschil (ppt)
oppervlakte (k=1)	30	0.0244	–	0.0939
	15	0.0182	0.423	0.0691
	7.5	0.0190	-0.062	0.0756
bodem (k=10)	30	0.0223	–	0.0798
	15	0.0158	0.247	0.0584
	7.5	0.0154	0.037	0.0601

Tabel 8.16: Globale fout in saliniteit en orde-nauwkeurigheid (p) als functie van tijdstap op 1 november 1985, 10:00 uur, #lagen = 10

LAAG	Δt (sec)	RMS (ppt)	p	max. verschil (ppt)
oppervlakte (k=1)	30	0.0292	–	0.1391
	15	0.0246	0.247	0.1206
bodem (k=20)	30	0.0137	–	0.0533
	15	0.0107	0.357	0.0676

Tabel 8.17: Globale fout in saliniteit en orde-nauwkeurigheid (p) als functie van tijdstap op 1 november 1985, 3:00 uur, #lagen = 20

LAAG	Δt (sec)	RMS (ppt)	p	max. verschil (ppt)
oppervlakte (k=1)	30	0.0367	–	0.1756
	15	0.0354	0.052	0.1887
bodem (k=20)	30	0.0138	–	0.0574
	15	0.0099	0.479	0.0676

Tabel 8.18: Globale fout in saliniteit en orde-nauwkeurigheid (p) als functie van tijdstap op 1 november 1985, 5:00 uur, #lagen = 20

LAAG	Δt (sec)	RMS (ppt)	p	max. verschil (ppt)
oppervlakte (k=1)	30	0.0337	–	0.1485
	15	0.0298	0.177	0.1367
bodem (k=20)	30	0.0129	–	0.0496
	15	0.0098	0.397	0.0676

Tabel 8.19: Globale fout in saliniteit en orde-nauwkeurigheid (p) als functie van tijdstap op 1 november 1985, 7:00 uur, #lagen = 20

LAAG	Δt (sec)	RMS (ppt)	p	max. verschil (ppt)
oppervlakte (k=1)	30	0.0253	–	0.0990
	15	0.0224	0.176	0.0903
bodem (k=20)	30	0.0144	–	0.0584
	15	0.0115	0.324	0.0676

Tabel 8.20: Globale fout in saliniteit en orde-nauwkeurigheid (p) als functie van tijdstap op 1 november 1985, 10:00 uur, #lagen = 20

LAAG	RMS (ppt)	max. verschil (ppt)
oppervlakte (k=1)	0.0331	0.1931
bodem (k=40)	0.0110	0.0521

Tabel 8.21: Globale fout in saliniteit voor $\Delta t = 30$ sec op 1 november 1985, 3:00 uur, #lagen = 40

LAAG	RMS (ppt)	max. verschil (ppt)
oppervlakte (k=1)	0.0416	0.2133
bodem (k=40)	0.0107	0.0476

Tabel 8.22: Globale fout in saliniteit voor $\Delta t = 30$ sec op 1 november 1985, 5:00 uur, #lagen = 40

LAAG	RMS (ppt)	max. verschil (ppt)
oppervlakte (k=1)	0.0355	0.1623
bodem (k=40)	0.0104	0.0476

Tabel 8.23: Globale fout in saliniteit voor $\Delta t = 30$ sec op 1 november 1985, 7:00 uur, #lagen = 40

LAAG	RMS (ppt)	max. verschil (ppt)
oppervlakte (k=1)	0.0311	0.1391
bodem (k=40)	0.0137	0.0683

Tabel 8.24: Globale fout in saliniteit voor $\Delta t = 30$ sec op 1 november 1985, 10:00 uur, #lagen = 40

Uit de tabellen kunnen we het volgende concluderen:

- de globale fout van zowel de snelheidsgrootte als saliniteit is aan de bodem doorgaans kleiner dan aan het oppervlak. Dit kan als volgt verklaard worden: de waterbeweging wordt bij de bodem voornamelijk gedecteerd door de bodemwrijving. In tegenstelling tot de andere termen in de impulsvergelijkingen is de bodemwrijving vrijwel tijdonafhankelijk;
- de fout van de snelheidsgrootte neemt af met het aantal lagen, zowel bij de bodem als aan het oppervlak. De mate waarin de fout afneemt door de verdubbeling van het aantal lagen is ongeveer gelijk aan die van de halvering van de tijdstap;
- de fout van de saliniteit bij de bodem neemt af met het aantal lagen; aan het oppervlak neemt die fout juist toe met het aantal lagen;
- er is nauwelijks sprake van convergentie in tijd ($p < 1$): wanneer de tijdstap gehalveerd wordt dan zal de globale fout met minder dan factor 2 worden afgenomen. Kennelijk is met $\Delta t = 30$ sec. de convergentie naar de exacte oplossing van de differentiaalvergelijking al nagenoeg bereikt;
- gezien de relatief lage RMS-waarden en maximale verschillen van zowel de snelheidsgrootte als saliniteit zullen naar alle waarschijnlijkheid zowel de tijdintegratie als de lagenverdeling niet tot de belangrijkste foutenbronnen behoren (zie ook Paragraaf 8.4.1).

8.2.2 Bepaling van het Courant getal

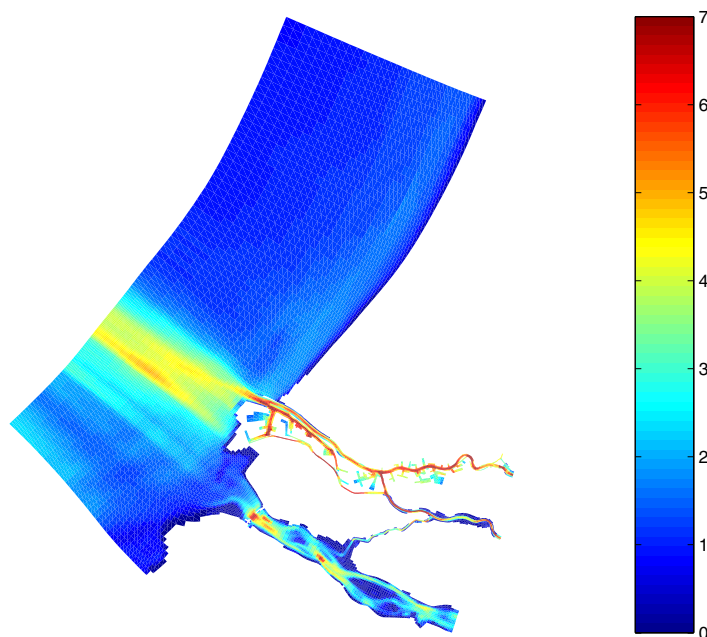
In deze paragraaf bestuderen we het Courant-getal als functie van de ruimte. Het Courant getal geeft de verhouding weer tussen de fysische en de numerieke snelheid. Het Courant-getal in twee dimensies is gegeven door:

$$C_f = 2\Delta t \sqrt{g H \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)}$$

waarin g de gravitatieversnelling en H de totale waterdiepte zijn en Δx en Δy zijn de maaswijdtes in respectievelijk x - en y -richting. De motivatie voor het evalueren (lees: visualiseren) van de Courant-getallen is het volgende. Ondanks de onvoorwaardelijke stabiliteit zal TRIWAQ bij toenemende tijdstap last krijgen van ADI-effecten die de nauwkeurigheid sterk verminderen. Dit treedt vooral op bij grillige gebieden. Hierdoor is de maximale tijdstap in de praktijk toch een functie van het Courant-getal. Bovendien worden de matrices die numeriek geïnverteerd moeten worden minder goed geconditioneerd bij relatief grote tijdstappen (d.w.z. grote Courant-getallen). Hierdoor kunnen de rekenfouten van de computer een rol gaan spelen en wordt er geen betrouwbare oplossing meer gevonden. Bij een TRIWAQ model dient de waarde van het Courant getal kleiner dan 20 à 25 te zijn.

De ruimtelijke verdeling van het Courant-getal is weergegeven in Figuur 8.1. Uit Figuur 8.1 kan opgemaakt worden dat voor gehele modelgebied een tijdstap van 30 seconden ruimschoots voldoende is. Tevens is gebleken dat het Courant-getal niet van de tijd afhangt.

De algehele conclusie in deze paragraaf is dat ten aanzien van de convergentie en stabiliteit van de tijdintegratie de gekozen tijdstap van 30 seconden voldoende klein is. In verband met de doorlooptijd is een tijdstap van 1 minuut wellicht geschikter voor het Rijnmooi-grof model. Een andere conclusie is dat de bijdrage van de tijdintegratie aan de totale fout zeer gering is.



Figuur 8.1: Ruimtelijke verdeling van het Courant-getal.

8.3 Ruimtelijke horizontale discretisatie

In deze paragraaf behandelen we enkele aspecten in de horizontale discretisatie van de waterbeweging en zouttransport die mogelijke invloed hebben op het eindresultaat van een modelberekening.

8.3.1 Karakteristieke eigenschappen van het rooster

In deze paragraaf bestuderen we de karakteristieke eigenschappen van het rooster van het Rijnmamo-grof model en hun invloed op de modelberekening. De volgende grootheden zullen worden bestudeerd:

- de maaswijdte variatie zowel in x - en y -richting
- de cell-aspect ratio (verhouding tussen de lengte van de roostercel in m en n richting)
- orthogonaliteit
- resolutie

Deze grootheden zullen hierna preciezer worden geformuleerd en tevens gepresenteerd.

Maaswijdte variatie

In de praktijk worden vaak rekenroosters met variërende mazen toegepast. De bedoeling daarvan is om de oplossing in bepaalde delen van het gebied goed te kunnen beschrijven. Dit kan echter wel consequenties voor de nauwkeurigheid van de modelberekeningen hebben.

In TRIWAQ kan de maaswijdte variatie per horizontale richting als volgt worden berekend. Gegeven een rekenrooster met

$$\{(m,n) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \mid m = 1, \dots, M, n = 1, \dots, N\}.$$

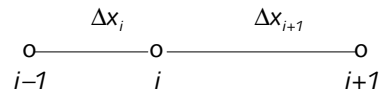
De maaswijdte variatie in beide richtingen zijn:

$$r_x = \frac{\Delta x|_{(m+1,n)}}{\Delta x|_{(m,n)}}, \quad r_y = \frac{\Delta y|_{(m,n+1)}}{\Delta y|_{(m,n)}}$$

De grootheden r_x en r_y worden ook wel cell-expansion ratio's genoemd. De maaswijdte variatie moet beperkt blijven tot minimaal ca. 0.7 en maximaal ca. 1.3 (zie bv. de User's Guide WAQUA).

Figuur 8.2 geeft aan dat in de y -richting deze waarde gemakkelijk gehaald wordt. Daarentegen is in de x -richting op een aantal plaatsen rond de Nieuwe Waterweg de waarde wat groot (om nabij 1.5). Dit kan effect hebben op de modelberekening.

Om het effect van de rekking van het rooster van het RIJMAMO-grof model op de resultaten van de modelberekening te kunnen onderzoeken beschouwen we een één-dimensionale situatie waarin een eerste orde afgeleide wordt gediscretiseerd:



We benaderen de afgeleide $\partial\phi/\partial x$ in het roosterpunt x_i met een standaard differentieformule:

$$\frac{\phi_{i+1} - \phi_{i-1}}{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}} = \phi'_i + \frac{1}{2}(r-1)\Delta x_i \phi''_i + O(\Delta x_i^2)$$

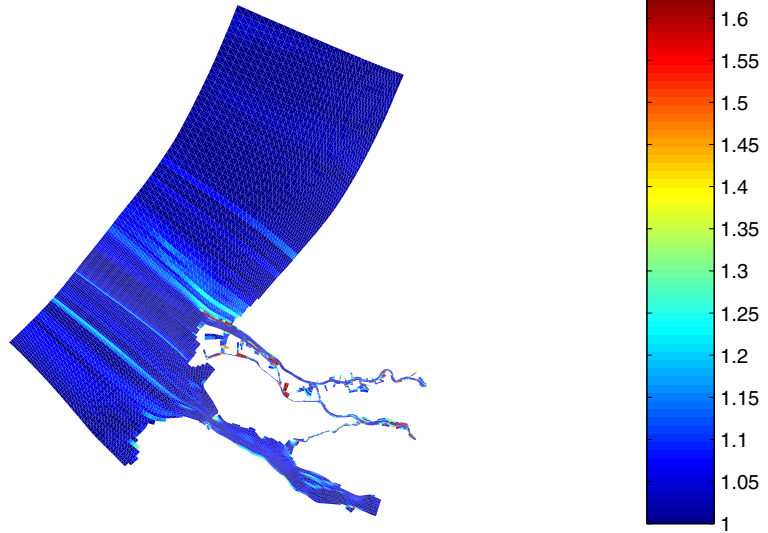
met

$$r = \frac{\Delta x_{i+1}}{\Delta x_i}$$

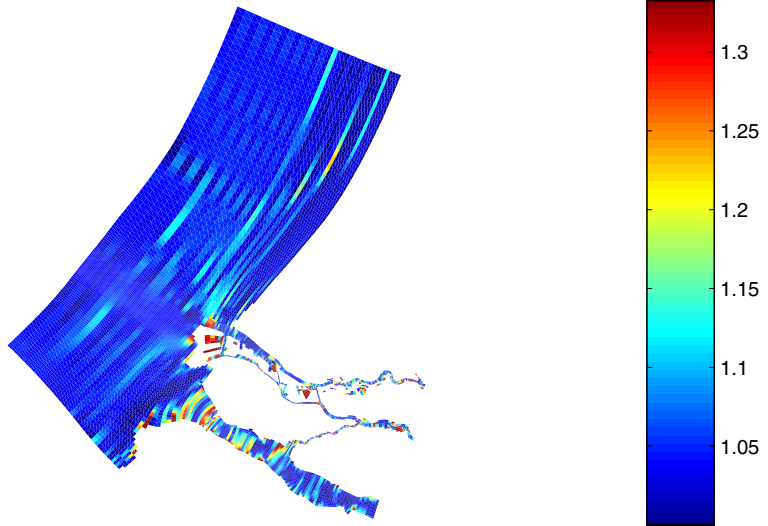
de cell-expansion ratio. De tweede term in het rechterlid van de differentieformule heeft met de rekking van het rooster te maken. De rekking heeft een direct gevolg op de discretisatiefout. Op uniforme roosters ($r = 1$) is de differentieformule tweede orde nauwkeurig. Echter, op niet uniforme roosters hebben we voor de formule een orde aan nauwkeurigheid verloren. Met name in gebieden waar ϕ'' groot is, moet de rekking niet te groot worden gekozen. Voor een goede reproductie van het model dient de volgende voorwaarde voor de cell-expansion ratio te gelden: $0.7 \leq r \leq 1.3$.

Voor het Rijmamo-grof model berekenen we de tweede term in het rechterlid van de differentieformule voor de eerste orde afgeleide van de waterstand zowel in x - als in y -richting. Het blijkt dat het effect van de rekking van het rooster op de waterstandsgradiënten verwaarloosbaar is, zoals bijvoorbeeld in Figuur 8.3 is te zien.

Cell-expansion ratio in x-direction

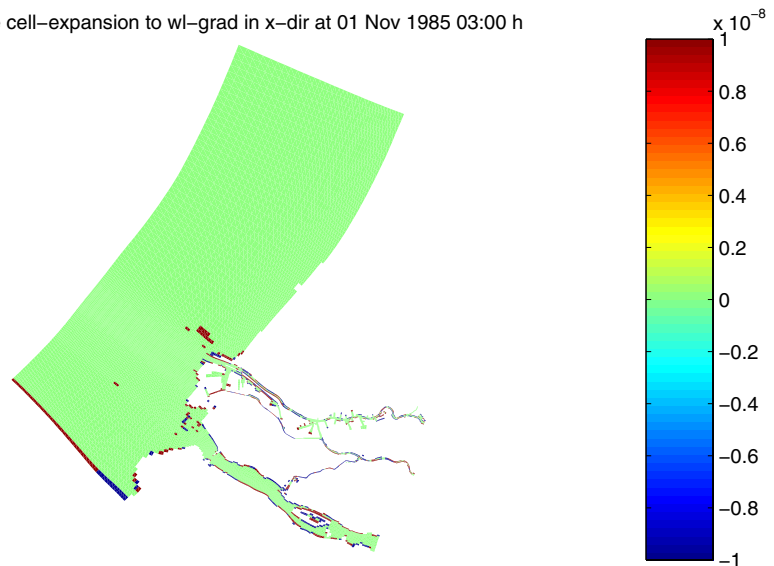


Cell-expansion ratio in y-direction

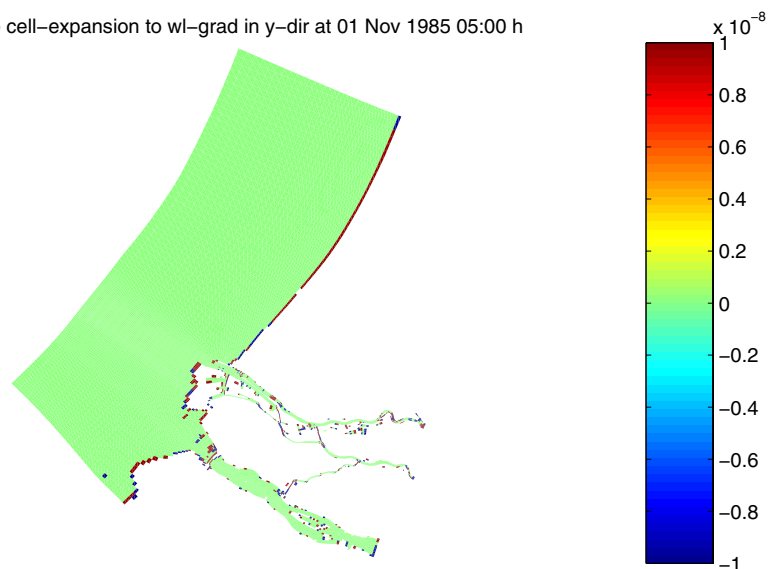


Figuur 8.2: Ruimtelijke verdeling van de maaswijdte variatie in x- en y-richting.

Influence cell-expansion to wl-grad in x-dir at 01 Nov 1985 03:00 h



Influence cell-expansion to wl-grad in y-dir at 01 Nov 1985 05:00 h



Figuur 8.3: Invloed rekking van rooster op $\partial\zeta/\partial x$ en $\partial\zeta/\partial y$.

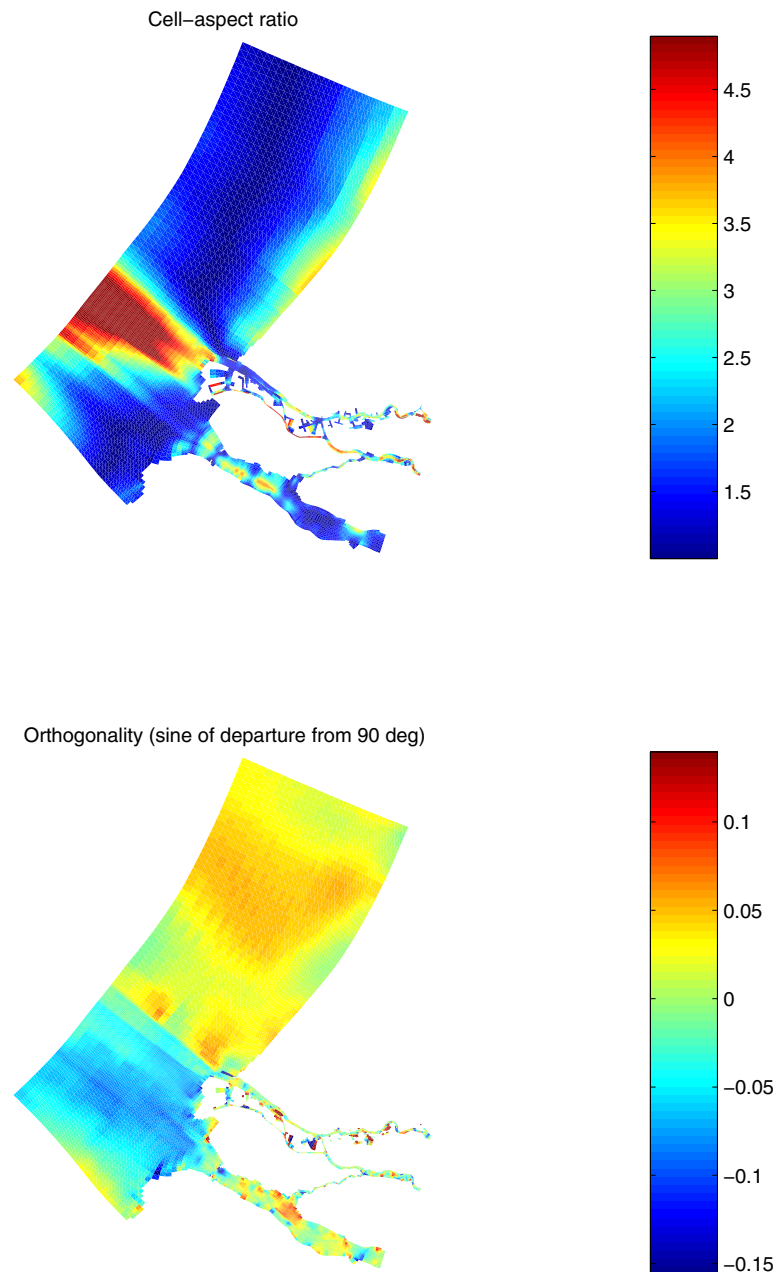
Cell-aspect ratio

In kromlijnige roosters komen gerekte cellen voor. Hiervoor wordt het begrip "cell-aspect ratio" geïntroduceerd. Gegeven een roostercel met lengte Δx en breedte Δy in respectievelijk x- en y-richting. De cell-aspect ratio is gedefinieerd door

$$r_c = \frac{\Delta x}{\Delta y}$$

Deze grootte hangt samen met de koppeling van de onbekenden in de impulsvergelijking in een bepaalde richting, waarmee de verhouding tussen de hoofd-diagonaal en off-diagonaal elementen van de discretisatie-matrix wordt bepaald. Anders gezegd: de cell-aspect ratio is maatgevend voor de conditie van de matrix die numeriek geïnverteerd moeten worden. Gevolg: de convergentie-snelheid van de iteratieve methodes (zoals Jacobi en Gauss-Seidel) wordt mede beïnvloed door de cell-aspect ratio. Bekend is dat de matrices minder goed geconditioneerd worden (en dus de convergentie-snelheid van iteratieve methodes verlaagd worden) bij relatief kleine en grote cell-aspect ratio's. In de praktijk neemt men als richtlijn: $1/8 \leq r_c \leq 8$.

Figuur 8.4 laat zien dat de voorwaarde $1/8 \leq r_c \leq 8.0$ gemakkelijk haalbaar is.



Figuur 8.4: Ruimtelijke verdeling van cell-aspect ratio en orthogonaliteit.

Orthogonaliteit

De orthogonaliteit is de mate waarin de roosterlijnen loodrecht op elkaar staan en wordt bepaald als sinus van de hoekafwijking van 90° . Bepaalde termen zijn uit de impulsvergelijkingen gelaten aangezien ervan uitgegaan wordt dat het rooster orthogonaal is. Bij niet voldoen hieraan worden fouten in de modelberekeningen geïntroduceerd. Aanbevolen worden waarden over het modelgebied kleiner dan 0.03 (ca. 2°) en lokaal 0.08 (ca. 5°). Overschrijding tot veel grotere waarden kan lokaal worden toegelaten als het uitstralingseffect gering is (bv. bij een kleine roosterafstand of kleine verhang). Zie User's Guide WAQUA.

Figuur 8.4 geeft aan dat in de Voordelta, tussen de Nieuwe Waterweg en het Haringvliet, de afwijking relatief groot is, t.w. 6° . Dit geldt ook voor gebieden rond de Nieuwe Waterweg en in het binnengebied van het Haringvliet. In de rest van het modelgebied is de orthogonaliteit goed.

Bekend is dat niet-orthogonale coördinaten transformaties in de impulsvergelijkingen tot introductie van specifieke krommingstermen leiden. Door deze termen te evalueren kunnen we de invloed van de afwijking van orthogonaliteit op de modelresultaten bestuderen. De termen ten gevolge van de niet-orthogonaliteit van het rekenrooster komen in principe voor in de uitdrukkingen voor advectie, waterstandsgradiënt en viscositeit van de impulsvergelijkingen. Van deze termen is de bijdrage van de waterstandsgradiënt relatief het grootst.

Voor orthogonale roosters zijn de bijdrage van het verhang in resp. u - en v -impulsvergelijking als volgt (zie [20]):

$$g \frac{1}{\sqrt{g_{\xi\xi}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} \quad \text{en} \quad g \frac{1}{\sqrt{g_{\eta\eta}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta}$$

Ze worden respectievelijk in de eerste en tweede halve tijdstap berekend. De niet-orthogonale bijdrage van het verhang in u -impuls-vergelijking is gegeven door:

$$\frac{g}{g^*} g_{\xi\eta} \left(\frac{g_{\xi\eta}}{\sqrt{g_{\xi\xi}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} - \sqrt{g_{\xi\xi}} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \right)$$

en in de v -impulsvergelijking is de niet-orthogonale bijdrage gelijk aan:

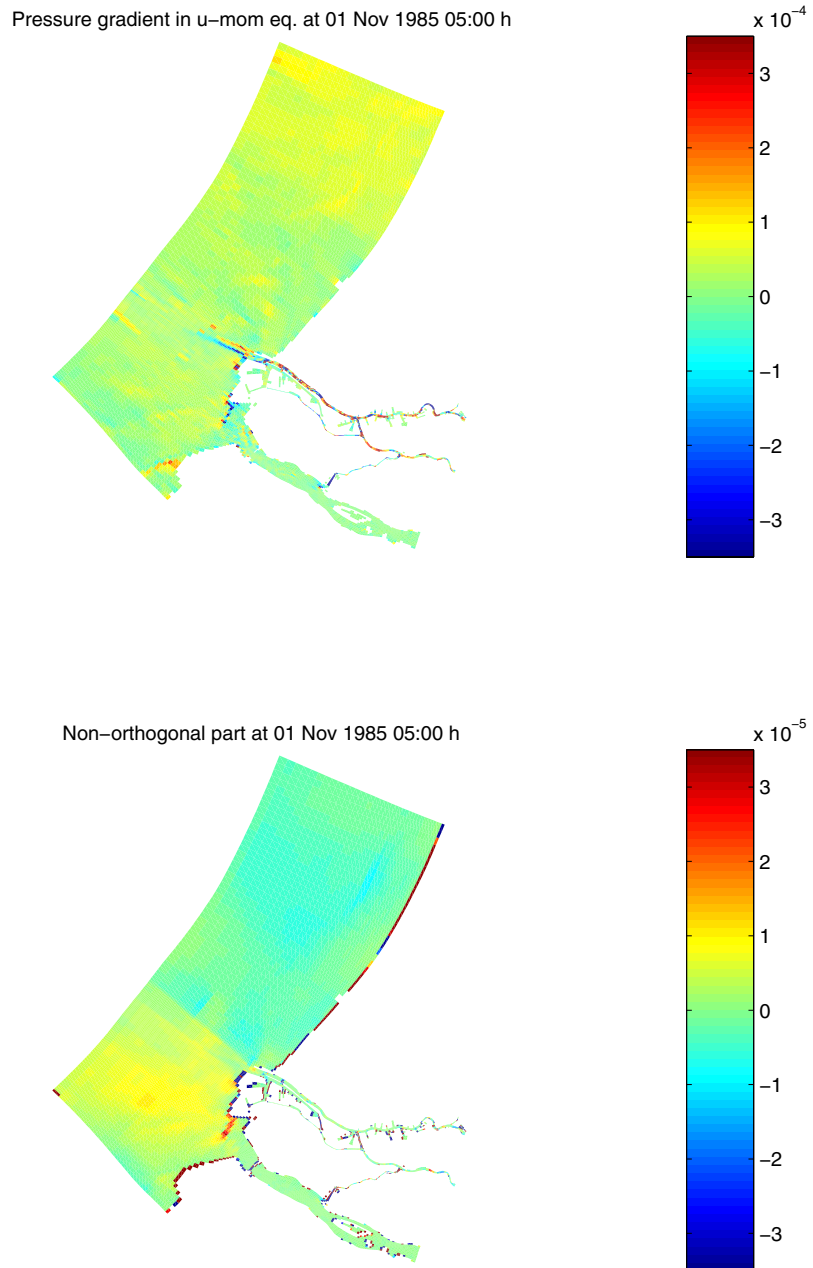
$$\frac{g}{g^*} g_{\xi\eta} \left(\frac{g_{\xi\eta}}{\sqrt{g_{\eta\eta}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} - \sqrt{g_{\eta\eta}} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} \right)$$

met

$$g_{\xi\eta} = \sqrt{g_{\xi\xi} g_{\eta\eta}} \cos \alpha$$

waarin α de insluithoek van twee roosterlijnen is (zie Figuur 8.4). In feite geeft $g_{\xi\eta}$ de mate van orthogonaliteit weer. Beide niet-orthogonale termen worden respectievelijk in de eerste en tweede halve tijdstap geëvalueerd.

In Figuur 8.5 zijn de orthogonale en niet-orthogonale bijdragen van het verhang in x-richting gepresenteerd.

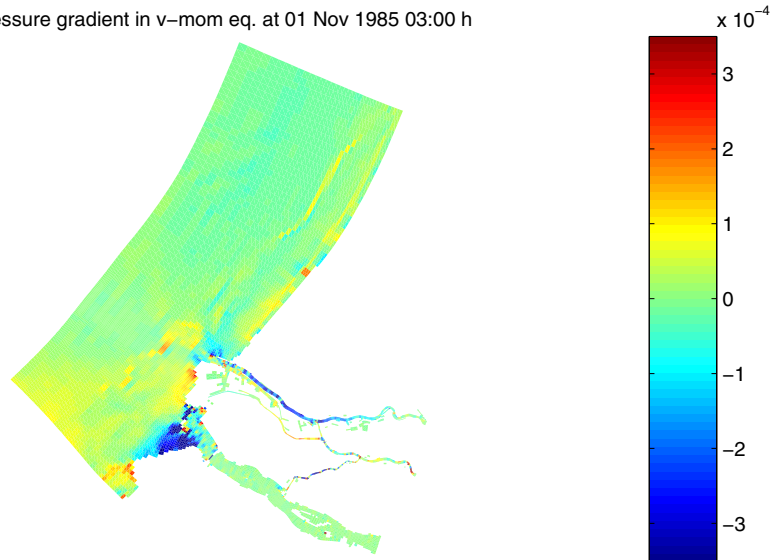


Figuur 8.5: Bijdrage van verhang en niet-orthogonale gedeelte in x-richting.

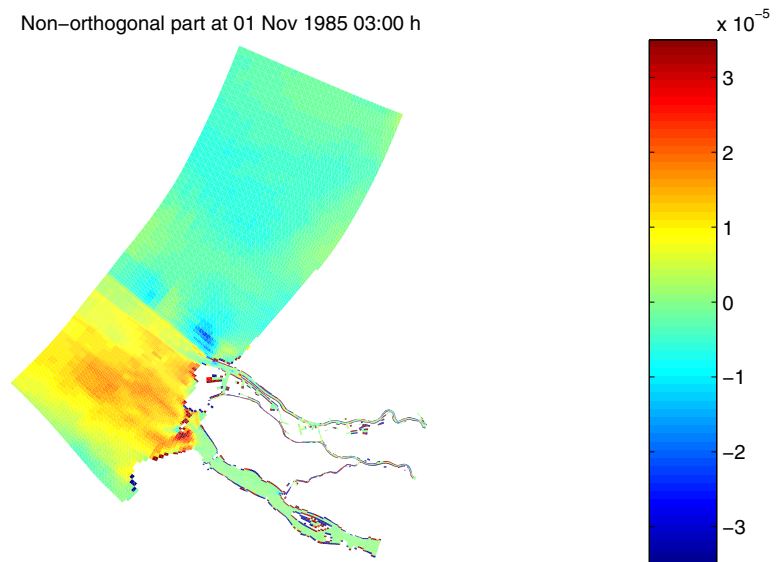
Relatief grotere verhangen in x-richting treden vooral op in het gedeelte van de Voordelta en de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas (ook op andere momenten). De niet-orthogonale bijdrage is relatief het grootst in het zuidelijke gedeelte van de Voordelta en bedraagt ca. 10% van de orthogonale bijdrage. In Figuur 8.6 zijn de orthogonale en niet-orthogonale bijdragen van het verhang in y-richting gepresenteerd. Zowel de orthogonale als niet-orthogonale bijdragen zijn significant in het zuidelijke gedeelte van de Voordelta, waarbij de niet-orthogonale bijdrage eveneens 10% van de orthogonale bijdrage bedraagt.

De niet-orthogonale bijdragen zijn lokaal relatief groot, hetgeen betekent dat de verwaarlozing van dergelijke termen in de bewegingsvergelijkingen consequenties kunnen hebben voor de nauwkeurigheid van de modelresultaten. In hoeverre dat zich uitpakt voor de zoutindringing is *a priori* geen uitspraak over te doen. Rekening houdend met de ADI-effecten vereist dit de nodige aanpassing van de numerieke schema's in TRIWAQ.

Pressure gradient in v-mom eq. at 01 Nov 1985 03:00 h



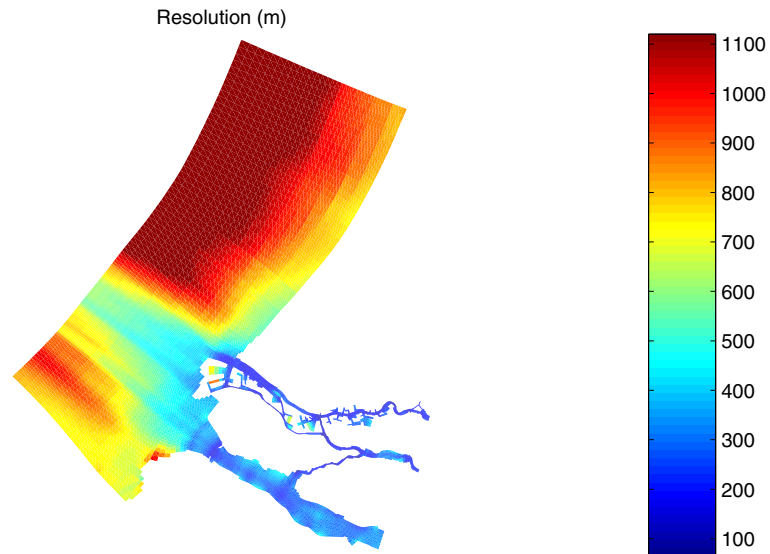
Non-orthogonal part at 01 Nov 1985 03:00 h



Figuur 8.6: Bijdrage van verhang en niet-orthogonale gedeelte in y-richting.

Resolutie

De resolutie wordt hier gedefinieerd als de wortel van de roostercel oppervlakte. Hiermee kan de fijnheid van het rooster over het modelgebied worden aangegeven. In Figuur 8.7 is te zien dat de resolutie verloopt van ca. 1 km aan de zeezijde tot ca. 100 m aan de rivierzijde.



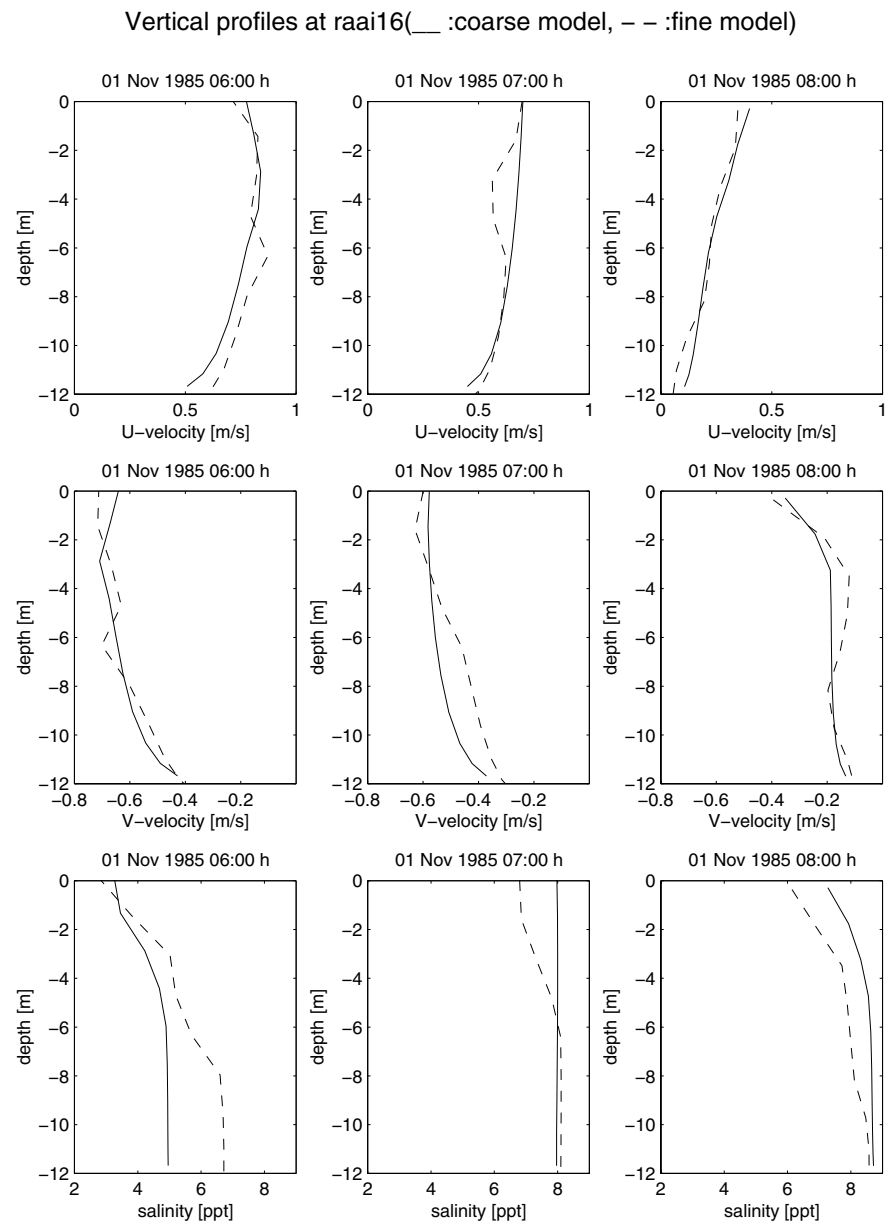
Figuur 8.7: Ruimtelijke verdeling van fijnheid van het rooster.

Om vast te stellen of het rooster voldoende fijn is om de hydrodynamica en zout/zoet verdeling ter plaatse goed te kunnen reproduceren, wordt de resultaten van het grove model vergeleken met die van het fijne model. Dat model heeft een rooster ter grootte van 320×592 roosterpunten waarvan 32% actief zijn. De berekening met het fijne rooster is uitgevoerd in het kader van het Nautilus project "Reproductie zoutindringing Nieuwe Waterweg" waarvan de resultaten zijn beschreven in [15]. De lagenverdeling verschilt met die van het grove model. Deze verdeling is als volgt: dikte van laag 10 (bodemiaag) is 3% van de totale waterdiepte, laag 9 is 5% van de totale diepte dik, laag 8 heeft een dikte van 8% van de totale diepte en de dikte van elk van de overige lagen is 12% van de totale diepte. Om een vergelijking tussen grove en fijne model mogelijk te maken is de berekening met het grove model herhaald met de bovengenoemde lagenverdeling.

Figuur 8.8 geeft de verticalen van Cartesische ("noord-oost") snelheidscomponenten en saliniteit in raai 16 weer. Hieruit is te zien dat met het fijne rooster relatief meer gelaagdheid wordt geïntroduceerd dan met het grove rooster. Deze tendens is tevens te zien in andere raaien. Opvallend is dat de door het grove model berekende snelheidsprofielen nauwelijks van het logaritmische karakter afwijken waardoor een meer gemengde zoutverdeling in de verticaal ontstaat (raai 16, 1 november 1985, 7:00 u). Daarnaast blijkt dat met het fijne model de zoutindringing in de Nieuwe Waterweg relatief groter is. De waterbeweging wordt vooral gevormd door een evenwicht tussen drukgradiënt en verticale viscositeit. Op het grove rooster wordt de drukgradiënt waarschijnlijk onderschat en bovendien varieert het nauwelijks in de verticaal. Dit leidt enerzijds tot te lage zoutindringing en anderzijds tot een minder verticale gelaagdheid. Daarnaast speelt mogelijk ook de grotere detaillering van de bodemschematisatie een rol.

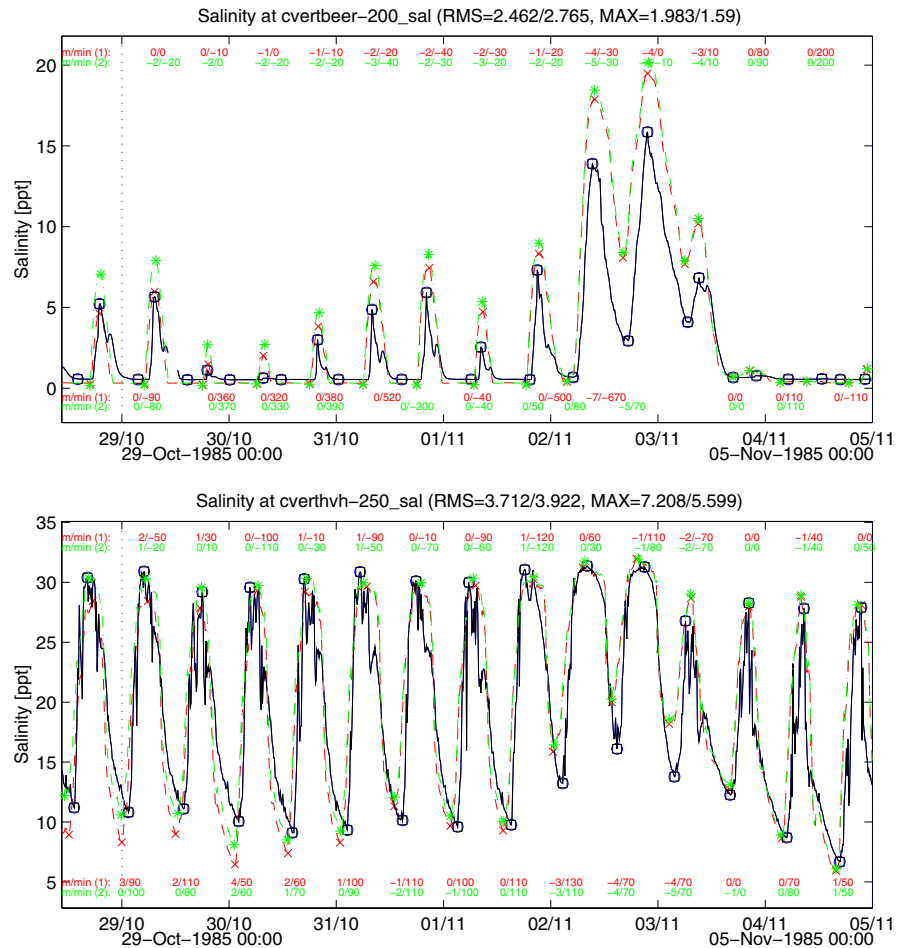
Wanneer de resultaten van zowel het grove als het fijne model worden vergeleken met de metingen dan blijkt zoals verwacht dat de resultaten van het fijne model nauwkeuriger te zijn. Ter illustratie worden de Basisanalyse-resultaten van zowel het grove als het fijne model vertoond in resp. Figuur 8.9 (in Paragraaf 9.2 worden de resultaten van de lange inspeelperiode behandeld) en Figuur 8.10 (in [15] worden eveneens de resultaten van het Zeedelta model besproken, vandaar de toegevoegde resultaten ervan in Figuur 8.10). Duidelijk te zien is dat ten opzichte van het grove model de RMS-waarde voor saliniteit in het fijne model is afgenomen; in Beerenplaat is de waarde zelfs met factor 2 verlaagd. De afname van de RMS-waarden in alle vaste meetstations varieert tussen 1.3 en 2.0.

Overigens heeft de verticale lagenverdeling nauwelijks impact op de gelaagdheid zoals in Paragraaf 8.4.1 zal blijken.



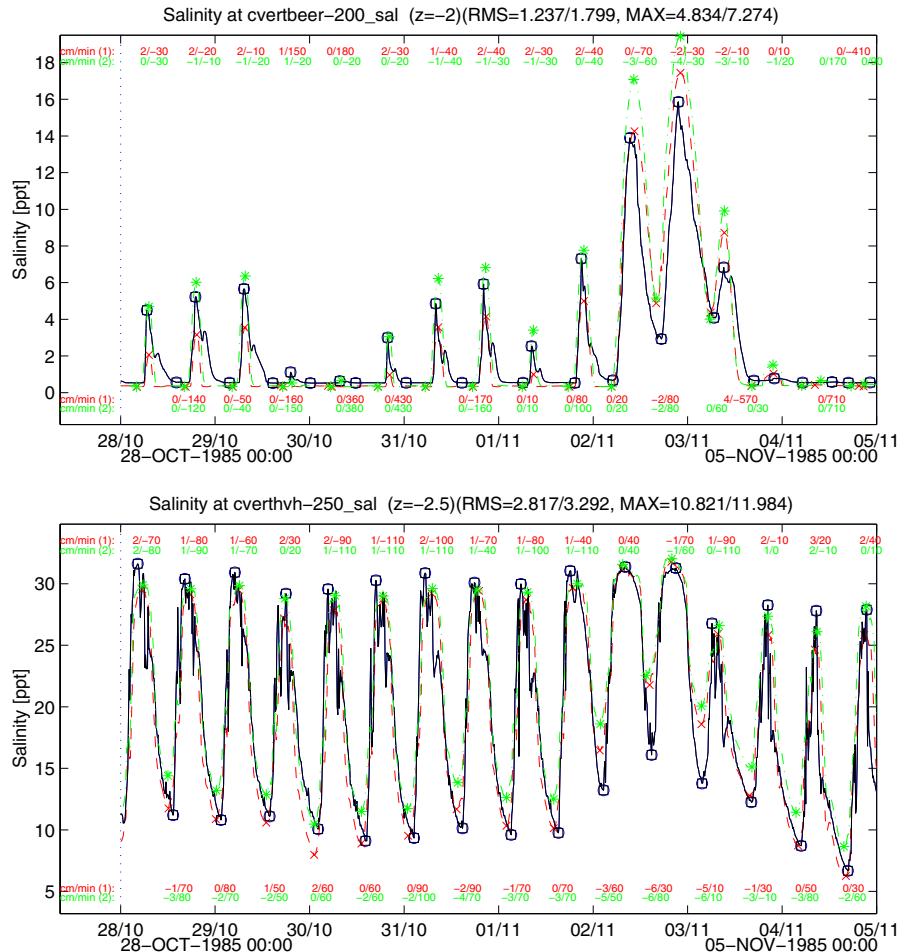
Figuur 8.8: Verticalen van de Cartesische snelheidscomponenten en saliniteiten in raai 16.

Runid/SDSid/Exp : t00nwl/T00n/EXP	Runid/SDSid/Exp : t02nwl/T02n/EXP
Simulation start : 28-Oct-1985 00:00	Simulation start : 28-Oct-1985 00:00
Simulation end : 05-Nov-1985 00:00	Simulation end : 05-Nov-1985 00:00
— : Observed	— : Observed
- - - : Predicted	- - - : Predicted



Figuur 8.9: Saliniteitsreeks van Beerenplaat (2m onder NAP) en Hoek van Holland (2.5m onder NAP) voor het Rijmamo-grof model (t00nwl = korte inspeelperiode; t02nwl = lange inspeelperiode).

Runid/SDSid/Exp : rr9/rr9/EXP	Runid/SDSid/Exp : rz4/rz4/EXP
Simulation start : 26-OCT-1985 00:00	Simulation start : 24-OCT-1985 00:00
Simulation end : 05-NOV-1985 00:00	Simulation end : 05-NOV-1985 00:00
— : Observed	— : Observed
- - - : Predicted	- - - : Predicted



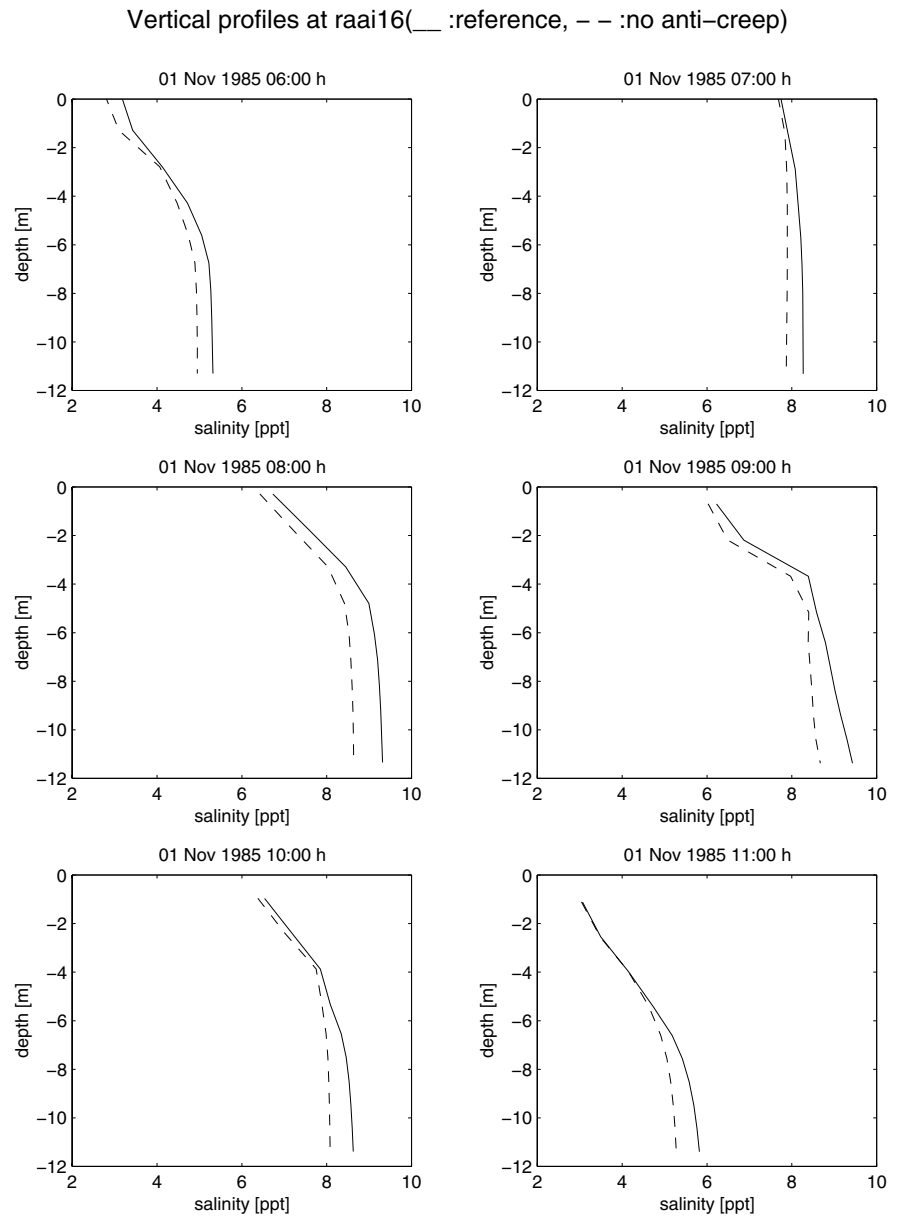
Figuur 8.10: Saliniteitsreeks van Beerenplaat (2m onder NAP) en Hoek van Holland (2.5m onder NAP) voor het Rijnmamo-fijn model (rr9) en Zeedelta model (rz4) (zie [15]).

8.3.2 Anti-creep

Het gegeven domein in verticale richting wordt verdeeld in een gegeven aantal lagen welke constant is over het horizontale gebied. Dit geeft aanleiding tot de introductie van de krommingstermen in de horizontale diffusie van zoutconcentratie. Deze zg. anti-creep termen kunnen dominant zijn bij grote bodemgradiënten en hebben invloed op het convergentie gedrag van de berekening. Dit leidt tot meer rekentijd dan in een situatie waarin de bodemgradiënten minder steil zijn.

In deze exercitie zal het effect van de anti-creep termen op de nauwkeurigheid cq. gelaagdheid van de berekening met het Rijnmamo model worden bestudeerd. We doen dit aan de hand van de volgende strategieën:

- Over het gehele gebied worden de anti-creep correcties uit de transportvergelijking voor zout verwijderd. Het effect hiervan op de gelaagdheid is maatgevend voor de nauwkeurigheid van de modelberekening. Het resultaat is bijvoorbeeld te zien in Figuur 8.11.
- De anti-creep termen worden vergeleken met de diffusie termen. Hun verhouding geeft aan op welke lokaties van het gebied het toevoegen van de anti-creep termen noodzakelijk is. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 8.12.



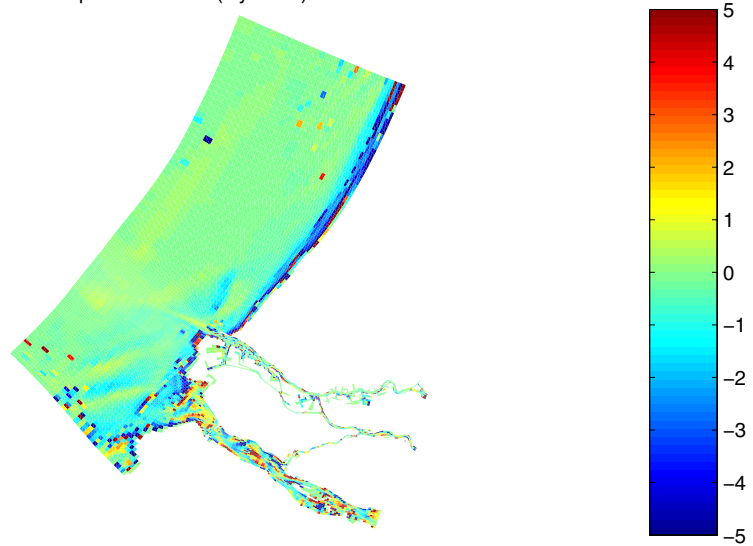
Figuur 8.11: Verticalen van de saliniteiten in raai 16.

In de bodemlaag zijn met name in het Haringvliet en in de Nieuwe Waterweg de anti-creep termen belangrijker dan de horizontale diffusietermen. In de rest van het modelgebied en tevens in de bovenste helft van de waterdiepte bedraagt de anti-creep bijdrage een fractie van de horizontale diffusie. Verwaarlozing van deze anti-creep termen heeft echter nauwelijks effect op de

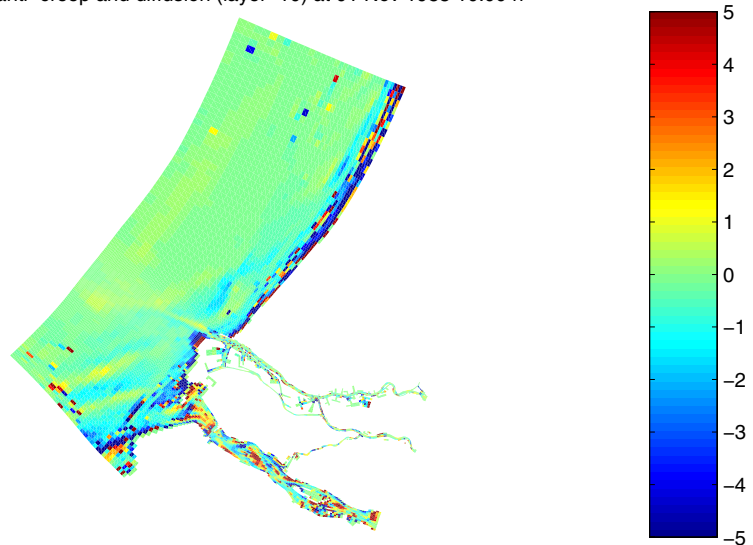
zoutindringing; slechts onderin de diepte wordt lokaal, zowel in de Nieuwe als in de Oude Maas, ± 1 ppt zoeter.

Mogelijk hangt de invloed van de anti-creep correcties op de zouttransport af van de resolutie van het horizontale rooster: hoe fijner het rooster hoe groter de impact. Dit geldt eveneens voor de horizontale diffusie termen. De nauwkeurigheid van de horizontale menging kan mogelijk nog vergroot worden door de horizontale diffusiecoëfficiënten van de lokale maaswijdte af te laten hangen.

Ratio of anti-creep and diffusion (layer=10) at 01 Nov 1985 07:00 h



Ratio of anti-creep and diffusion (layer=10) at 01 Nov 1985 10:00 h



Figuur 8.12: Ruimtelijke verdeling van de verhouding tussen anti-creep en horizontale diffusie.

8.4 Ruimtelijke verticale discretisatie

In deze paragraaf behandelen we enkele aspecten in de verticale discretisatie van de waterbeweging en zouttransport die mogelijke invloed hebben op het eindresultaat van een modelberekening.

8.4.1 Effect van het aantal lagen en de laagverdeling

In een gestratificeerde model kan het aantal lagen een belangrijk criterium zijn voor de bepaling van de nauwkeurigheid van de modelberekeningen. Tot nu toe zijn de berekeningen uitgevoerd met 10 lagen waarbij de bovenste 4 lagen een vaste dikte van 1.5 m hebben terwijl de overige dieptes procentueel equidistant zijn verdeeld in zes lagen. Deze keuze is gemaakt ten behoeve van de verificatieberekeningen van het Rijmamo-fijn model voor de situatie van de doorgestoken Beerdam (zie ([12])). Aan de hand van metingen is hierbij gebleken dat die keuze tot optimale reproductie van de zout/zoetverdeling in het Beerkanaal leidt.

In deze paragraaf beschouwen we tevens de berekening met 10 equidistante lagen. De resultaten hiervan worden vergeleken met die van de berekening waarbij 4 lagen vast zijn en de overige lagen equidistant verdeeld zijn. Globaal laat de vergelijking tussen beide berekeningen met betrekking tot zowel Cartesische snelheidscomponenten als saliniteit weinig verschillen zien. In Figuur 8.13 wordt een vergelijking tussen beide berekeningen ter plaatse van raai 16 gepresenteerd. Ten opzichte van de situatie met 10 equidistante lagen is het model met vier vaste en zes equidistante lagen onderin wat zouter. Echter, het maximale globale verschil is ongeveer 1 ppt. Elders zijn de verschillen nog kleiner. Ook de vorm van de snelheidsprofielen verandert niet wezenlijks; alleen in absolute waarde verschillen ze gering.

In Paragraaf 8.3.1 is een berekening uitgevoerd met 10 sigma lagen die als volgt zijn verdeeld: 12%, 12%, 12%, 12%, 12%, 12%, 12%, 8%, 5% en 3% van de totale diepte voor respectievelijk lagen 1 tot en met 10. Het blijkt dat de resultaten van deze berekening vergelijkbaar zijn met die van 10 equidistante lagenverdeling. Kennelijk heeft een verfijnde resolutie bij de bodem geen effect op de verticale gelaagdheid.

Naast de berekening met 10 lagen zijn tevens berekeningen met 20 en 40 equidistante lagen uitgevoerd. Figuur 8.14 laat een vergelijking van saliniteit tussen 10 en 40 equidistante lagenverdeling zien, waaruit kan worden opgemaakt dat er in raai 25 nauwelijks verschillen aanwezig zijn. Ook in de rest van het modelgebied wordt eenzelfde beeld gegeven. In Figuur 8.15 wordt de vergelijking van Cartesische U- en V-snelheidscomponenten in raai 21 tussen 10 en 20 lagen gepresenteerd. De getoonde verschillen worden slechts door verticale resolutie veroorzaakt. Kennelijk zijn 10 lagen, al dan niet equidistant, voldoende om de 3D effecten in het model te beschrijven.

8.4.2 Effect van de discretisatie van verticale advectie in zouttransport

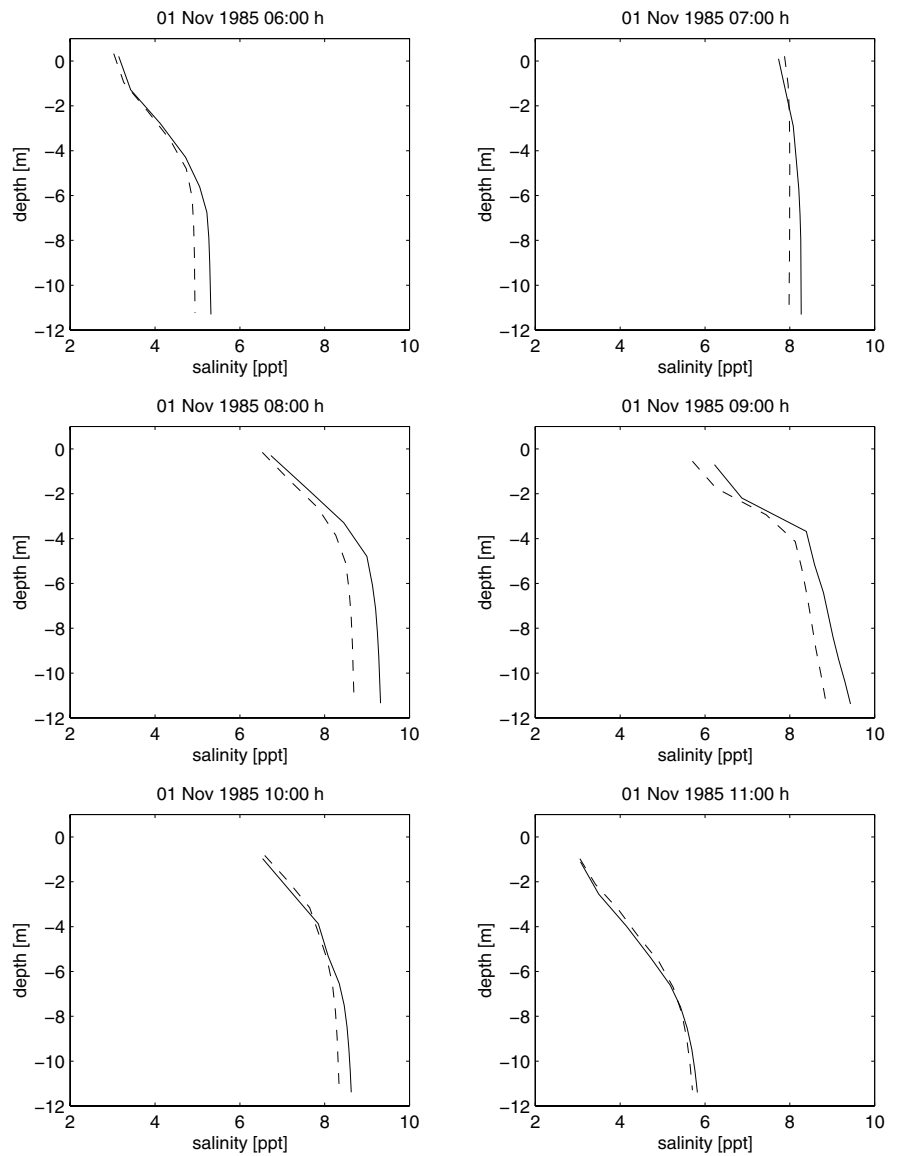
Bij de bestudering van de discretisatie van de transportvergelijking voor saliniteit zoals geïmplementeerd in TRIWAQ bleek dat de discretisatie van de verticale advectie onjuist is. Op basis van de eindige volume aanpak luidt de discretisatie van de verticale advectie (zie [20]):

$$\omega_{k-1}c(z_{k-1}) - \omega_k c(z_k)$$

Daar de concentraties slechts in waterstandspunten zijn gegeven dienen de concentraties op laag-interfaces $c(z_{k-1})$ en $c(z_k)$ te worden berekend met behulp van interpolaties, als volgt:

$$c(z_{k-1}) = \frac{1}{2}(c_{k-1} + c_k); \quad c(z_k) = \frac{1}{2}(c_k + c_{k+1})$$

Vertical profiles at raai16(— :reference, - - :equidistant)



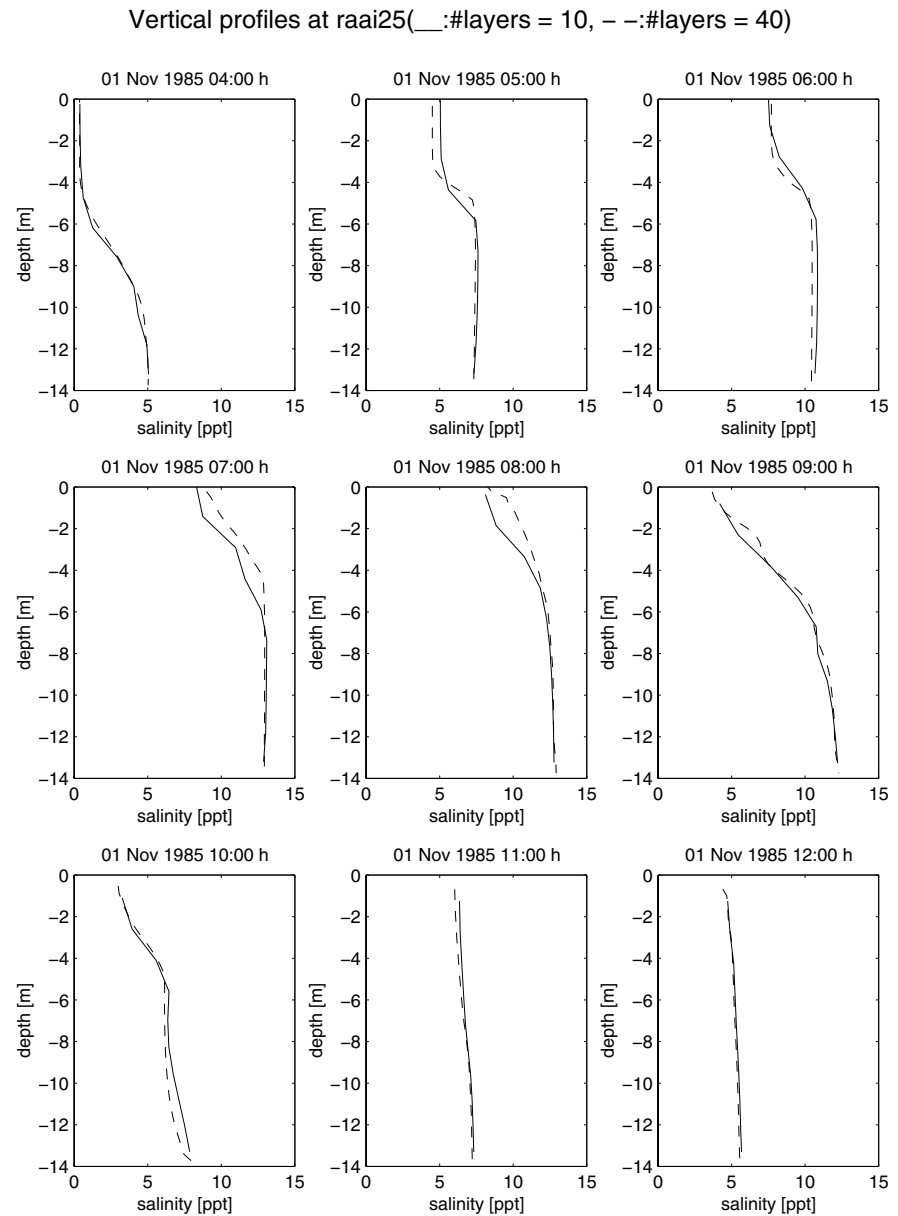
Figuur 8.13: Verticalen van de saliniteiten in raai 16.

In de huidige TRIWAQ code worden ten onrechte echter de volgende interpolaties gebruikt:

$$c(z_{k-1}) = \frac{h_k c_{k-1} + h_{k-1} c_k}{h_{k-1} + h_k}; \quad c(z_k) = \frac{h_{k+1} c_k + h_k c_{k+1}}{h_k + h_{k+1}}$$

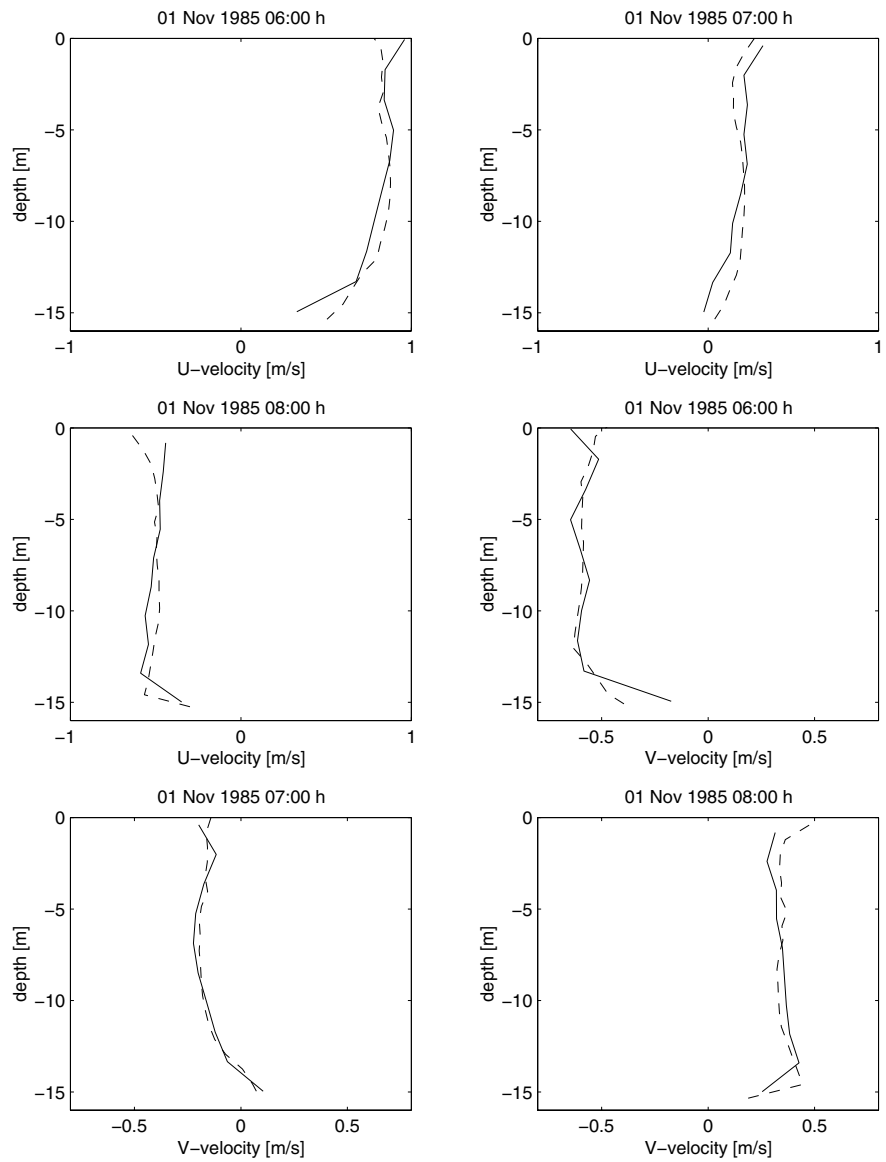
Bovendien worden zowel in de oppervlak- als in bodemlaag eenzijdige interpolaties ("upwind") toegepast welke theoretisch de lokale nauwkeurigheid verlaagt.

Op grond van het bovenstaande is een vergelijking gemaakt tussen de berekeningen met en zonder de verbetering van de discretisatie van de verticale advectie, welke in Figuur 8.16 is weergegeven. Opvallend is dat de "knik" in de verticaal van saliniteit verdwijnt door de verbetering van de discretisatie. Verder ogen de zoutverticaleen gladder. Echter, de algehele zout/zoet verdeling op de Nieuwe Waterweg blijft ongewijzigd.



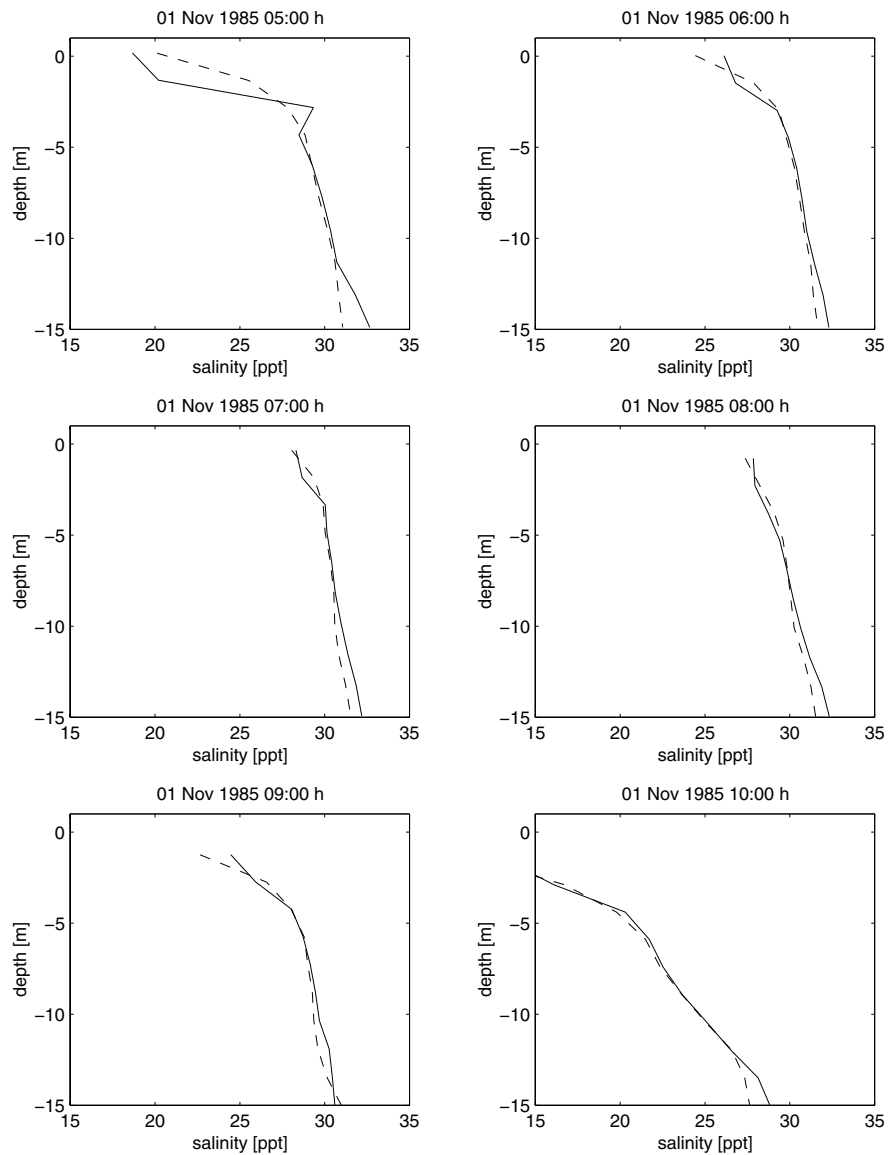
Figuur 8.14: Verticalen van de saliniteiten in raai 25.

Vertical profiles at raai21(— :#layers = 10, - - :#layers = 20)



Figuur 8.15: Verticalen van de Cartesische snelheidscomponenten in raai 21.

Vertical profiles at raai21(__ :reference, - - :improved transport)



Figuur 8.16: Verticalen van de saliniteiten in raai 21.

8.5 Samenvatting van de resultaten

In dit hoofdstuk is een gevoeligheidsanalyse van enkele numerieke aspecten van het Rijmamo-grof model uitgevoerd. Op basis van deze analyse kunnen uitspraken worden gedaan naar de mogelijke invloed van deze factoren op de nauwkeurigheid van de modelresultaten. De resultaten van de analyse kan als volgt worden samengevat (invloed aspect in oplopende sterkte):

- De bijdrage van de **tijdintegratie** aan de totale fout is zeer gering zoals blijkt uit het volgende tabel:

	RMS snelheid (cm/s)	RMS saliniteit (ppt)
oppervlaktelaag	0.70	0.03
bodemlaag	0.44	0.02

-
- Zowel het **aantal lagen** als de **lagenverdeling** hebben relatief weinig effect op de algehele zout/zoet verdeling dan wel gelaagdheid. Ook de waterbeweging (i.e. stroomsnelheden) wordt er amper door beïnvloed.
 - Zonder **anti-creep** correcties wordt het model onderin iets zoeter (max. 1 ppt). De berekeningen met en zonder anti-creep laten geen noemenswaardig verschil zien in de zoutindringing.
 - De eigenschappen van het grove rooster vertonen géén uitzonderlijke gevallen waardoor de nauwkeurigheid kan worden aangetast, behalve de **orthogonaliteit** welke tussen de Nieuwe Waterweg en het Haringvliet relatief sterk van afwijkt ($\pm 6^\circ$). De verhouding tussen de niet-orthogonale en orthogonale bijdragen van de drukgradiënt aldaar is ongeveer 1 op 10, wat significant kan worden genoemd. Dit kan mogelijk invloed hebben op de nauwkeurigheid van de modelresultaten. Om daarover een uitspraak te kunnen doen vereist dat de nodige aanpassing in de TRIWAQ-code.
 - De **horizontale grofheid van het rooster** heeft een significant effect op de nauwkeurigheid van zowel de stroomsnelheden als de saliniteit. Ten opzichte van het fijne rooster vertoont het model met het grove rooster relatief minder gelaagdheid. Vergeleken met de beschikbare metingen laat het fijne model een grotere overeenkomst zien dan het grove model.

Naast de numerieke factoren zijn er echter andere facetten van het model die wellicht de nauwkeurigheid kunnen beïnvloeden, zoals bijvoorbeeld bepaalde vereenvoudigingen van enkele fysische fenomenen (bodempwrijving, turbulentie, etc.). Dit zal in Hoofdstuk 9 uitgebreid worden behandeld.

9 Experimenten voor de bepaling van de nauwkeurigheid van de fysische modellering

9.1 Inleiding

Om tot een computerprogramma van realistische omvang met werkbare rekentijden te komen, is de fysica van de waterbeweging en het zouttransport op diverse plaatsen vereenvoudigd. Dit is inherent aan het proces van modelleren en moet daarom niet worden opgevat als een tekortkoming van WAQUA/TRIWAQ. Wel is hierdoor het resultaat mogelijk wat minder nauwkeurig dan zonder deze benaderingen.

Om de nauwkeurigheid van de fysische modellering te bepalen is voor de belangrijkste fysische parameters een gevoeligheidsonderzoek uitgevoerd waarbij gekeken is naar de variatie in waterstanden, stroomsnelheden en saliniteit. De grootte van de fysische parameter is dusdanig gewijzigd dat deze nog wel fysisch acceptabel is. In Tabel 9.1 staat een overzicht van de verschillende berekeningen. In de overige paragrafen van dit hoofdstuk worden de resultaten van de verschillende berekeningen, alsmede de achtergrond van de aangepaste parameter besproken. In Paragraaf 9.8 wordt tenslotte in histogrammen overzichten gegeven van de RMS-waarden van alle berekeningen.

Berekening	Aangepaste instelling	wijziging	Paragraaf
T01	Periode (inspeeltijd)	23-10-1985 t/m 4-11-1985	9.2
T02n	Periode (inspeeltijd)	18-10-1985 t/m 4-11-1985	9.2
T1	Turbulentiemodel	algebraïsch	9.4.3
T2A	Manning waarde	-10 %	9.5
T2B	Manning waarde	+10 %	9.5
T3A	Wind + Charnock	$\beta = 0.0144$	9.3.1
T3B	Wind + Charnock	$\beta = 0.0320$	9.3.1
T4A	Oppervlakterandvoorwaarde c_u	$c_u = 0.06$	9.3.2
T4B	Oppervlakterandvoorwaarde c_u	$c_u = 0.12$	9.3.2
T5A	Prandtl-Schmidt getal	0.5	9.4.1
T5B	Rivierandvoorwaarden	Q_H-rand met 10% groter debiet	9.6.2
T5C	Rivierandvoorwaarden	Q-rand met 10% groter debiet	9.6.2
T8	Rivierandvoorwaarden	Q-rand	9.6.1
T9A	Interne c_u -waarde	$c_u = 0.06$	9.4.2
T10	Turbulentiemodel	RNG	9.4.4

Tabel 9.1: Overzicht verschillende berekeningen

De resultaten van het onderzoek naar de nauwkeurigheid van de fysische modellering zullen per berekening gepresenteerd worden in tabellen van verschillen in RMS-waarden, waarbij voor de gevonden resultaten een

verklaring geprobeerd is te geven. Bij de interpretatie van de verschillen wordt de ruimtelijke en temporele verdeling, zoals beschreven in Paragrafen 6.1.1 en 6.1.2, gehandhaafd. De resultaten van de berekeningen staan uitgebreider beschreven in [13].

Bij de residuen van de stroomsnelheden is steeds alleen de component loodrecht op de raairichting beschouwd, omdat alleen van deze component metingen beschikbaar zijn (zie Paragraaf 3.3). Als er dus gesproken wordt over 'de stroomsnelheid' wordt deze component bedoeld.

9.2 Effect inspeeltijd

Vanwege de meetdagen t.w. 31 oktober, 1 november en 4 november, is gekozen om als analyseperiode de periode van 29 oktober t/m 4 november te gebruiken.

Om de invloed van de inspeelperiode te bepalen zijn drie berekeningen uitgevoerd:

- korte inspeelperiode : 28 oktober t/m 4 november (T00n)
- middellange inspeelperiode : 23 oktober t/m 4 november (T01)
- lange inspeelperiode : 18 oktober t/m 4 november (T02n)

De initiële velden op de begindagen zijn afkomstig uit een berekening met het Zeedelta model (Paragraaf 2.2.1).

In het programma awaqpro werd m.b.t. zouttransport een laagdikte correctie uitgevoerd, waarbij de dikte van een laag kleiner dan 1 cm op 1 cm werd gezet. Deze correctie heeft in dit model voor stabiliteitsproblemen gezorgd (in de buurt van het Spui). Er kwamen in het hele model zeer hoge residuen in saliniteit voor. Dit is opgelost door in de code van awaqpro de minimalisatie van de laagdiktes overal op 1 mm te zetten. Nadat de code van awaqpro en de metingen aangepast waren, zijn de T00 en T02 som herhaald (T00n en T02n). De T01 berekening is niet herhaald.

Omdat de T01 berekening niet is herhaald met de nieuwe awaqpro, worden de resultaten van deze berekening verkregen met de oude awaqpro niet op deze plaats besproken. Uit de vergelijking tussen de T00-berekening en de T01-berekening bleek dat de verschillen tussen beide berekeningen klein zijn.

Stations:

- De verschillen tussen de waterstanden van de berekeningen met de kortste en de langste inspeelperiode zijn relatief klein (maximaal 1 cm). De grootste verschillen treden op bij HA10, Hvsl.buiten, Hoek van Holland en Maassluis.
- Bij Hoek van Holland zijn de verschillen in zoutconcentraties tussen de berekening met de kortste en langste inspeeltijd na 1 november klein (max. 0.4 ppt). Vooral bij de maximale zoutindringing blijkt de berekening met de langste inspeelperiode wat zouter te zijn. Dit is o.a. het geval bij Beerenplaat (zie Figuur 8.9), Krimpen a/d IJssel en Nieuwe Matex.
De grootste verschillen in zoutconcentraties zijn te vinden in het Beerkanaal en de havens die daarop uit komen. Dit komt doordat in de lange inspeelsom dit gebied door diffusie zouter is geworden.
- In het algemeen worden de zoutconcentraties door de langere inspeeltijd hoger. Omdat de zoutconcentraties al te hoog zijn, nemen de RMS-waarden toe (zie onderstaande tabel).

$RMS_{T02n} - RMS_{T00n}$	rustige periode	storm	Totaal
waterstanden (cm)	0.1	0.0	0.0
saliniteiten (ppt)	0.3	0.2	0.3

Verticalen:

- Er is nauwelijks verschil tussen de berekende stroomsnelheden. In de Nieuwe Waterweg zijn de maximale verschillen ongeveer 0.10 m/s (raai 21). In de andere raaien zijn de verschillen kleiner (orde enkele cm/s).
- De grootste verschillen treden op 31 oktober op, waarvoor relatief de kortste inspeeltijd geldt.
- Door de langere inspeeltijd is er meer zout in het model, wat positief uitpakt in de gebieden waar het te zoet was (onderin de verticaal in de gebieden Nieuwe Waterweg en Maassluis). In de Nieuwe Maas was het al te zout, zodat daar de RMS nog hoger wordt.

Snelheid: $RMS_{T02n} - RMS_{T00n}$ in cm/s	0-8 m onder NAP	>8 m onder NAP	Totaal
Nieuwe Waterweg	0	0	0
Nieuwe Maas	0	0	0
Oude Maas	0	0	0
Totaal	0	0	0

saliniteit: $RMS_{T02n} - RMS_{T00n}$ in ppt	0-8 m onder NAP	>8 m onder NAP	Totaal
Nieuwe Waterweg	0.1	-0.2	-0.1
Maassluis	-0.1	-0.3	-0.2
Nieuwe Maas	0.1	0.4	0.2
Oude Maas	0.0	-0.2	-0.1
Totaal	0.1	-0.2	-0.1

De verschillen tussen de lange inspeelsom en korte inspeelsom zijn klein. Een langere inspeeltijd geeft in principe nauwkeuriger resultaten. Een berekening met een lange inspeelperiode duurt echter 14 dagen en een berekening met een korte inspeelperiode slechts 6 dagen. Om de rekenkosten en rekenduur te beperken is er voor gekozen om bij alle overige berekeningen een korte inspeelperiode te hanteren.

9.3 Effect van de windschuifspanningscoëfficiënten

In Paragraaf 9.5 is aandacht besteed aan de invloed van de Manningwaarde op de waterbeweging in het Rijmamo model. In de onderste laag van de verticaal wordt als gevolg van bodemwrijving turbulentie opgewekt. Een zelfde werking heeft ook de wind(schuifspanning) aan het wateroppervlak. Als gevolg van de windschuifspanningen wordt aan het wateroppervlak turbulentie opgewekt, die zich neerwaarts door de waterkolom verspreidt.

In dit onderzoek is op twee manieren gekeken naar de invloed van de windschuifspanning op de waterbeweging:

- de invloed van de berekening van de Cd-waarde met behulp van de formulering van Charnock met:
 - $\beta = 0.0144$ (T3A)
 - $\beta = 0.0320$ (T3B)
- de invloed van de opwekking van turbulentie in de oppervlakte laag, met:
 - $c_{\mu} = 0.06$ (T4A)

- $c_\mu = 0.12$ (T4B)

Bij berekeningen T4A en T4B is T3B als uitgangspunt genomen; de Charnockparameter $\beta = 0.0320$. De parameter c_μ is alleen aangepast voor de opwekking van turbulentie in de oppervlaktelaag. De parameter c_μ die in de impulsvergelijkingen staat waarmee de interne uitwisseling van impuls wordt berekend, wordt hier niet aangepast en blijft op de default-waarde van 0.09 staan (zie 9.4.2 voor de effecten van deze parameter).

Met de parameter c_μ wordt de turbulente kinetische energie aan het wateroppervlak als volgt bepaald:

$$k_{z=\zeta} = \frac{u_{*s}^2}{\sqrt{c_\mu}}$$

met:

$k_{z=\zeta}$: turbulente kinetische energie aan het wateroppervlak (m^2/s^2)
 u_{*s} : schuifspanningssnelheid (m/s)
 c_μ : parameter

Bij een andere c_μ -waarde aan het wateroppervlak verandert de turbulente kinetische k energie in de oppervlaktelaag. Dit wordt door het k - ϵ model naar beneden getransporteerd, waardoor in de lagen onder de oppervlaktelaag k en ϵ (de mate van dissipatie van de turbulente energie) en dus indirect ook de viscositeit ν effect ondervinden. Indirect wordt er zo in het model meer (met een lager c_μ) of minder (met een hogere c_μ) turbulentie opgewekt.

De schuifspanningssnelheid wordt als volgt bepaald:

$$u_{*s} = \sqrt{\frac{\rho_a C_d u_{10}^2}{\rho}}$$

met:

ρ_a : dichtheid van lucht (kg/m^3)
 ρ : dichtheid van water (kg/m^3)
 C_d : schuifspanningscoëfficiënt (-)
 u_{10} : windsnelheid op 10 meter boven maaiveld (m/s)

9.3.1 Effect van de wind en de Charnock formulering

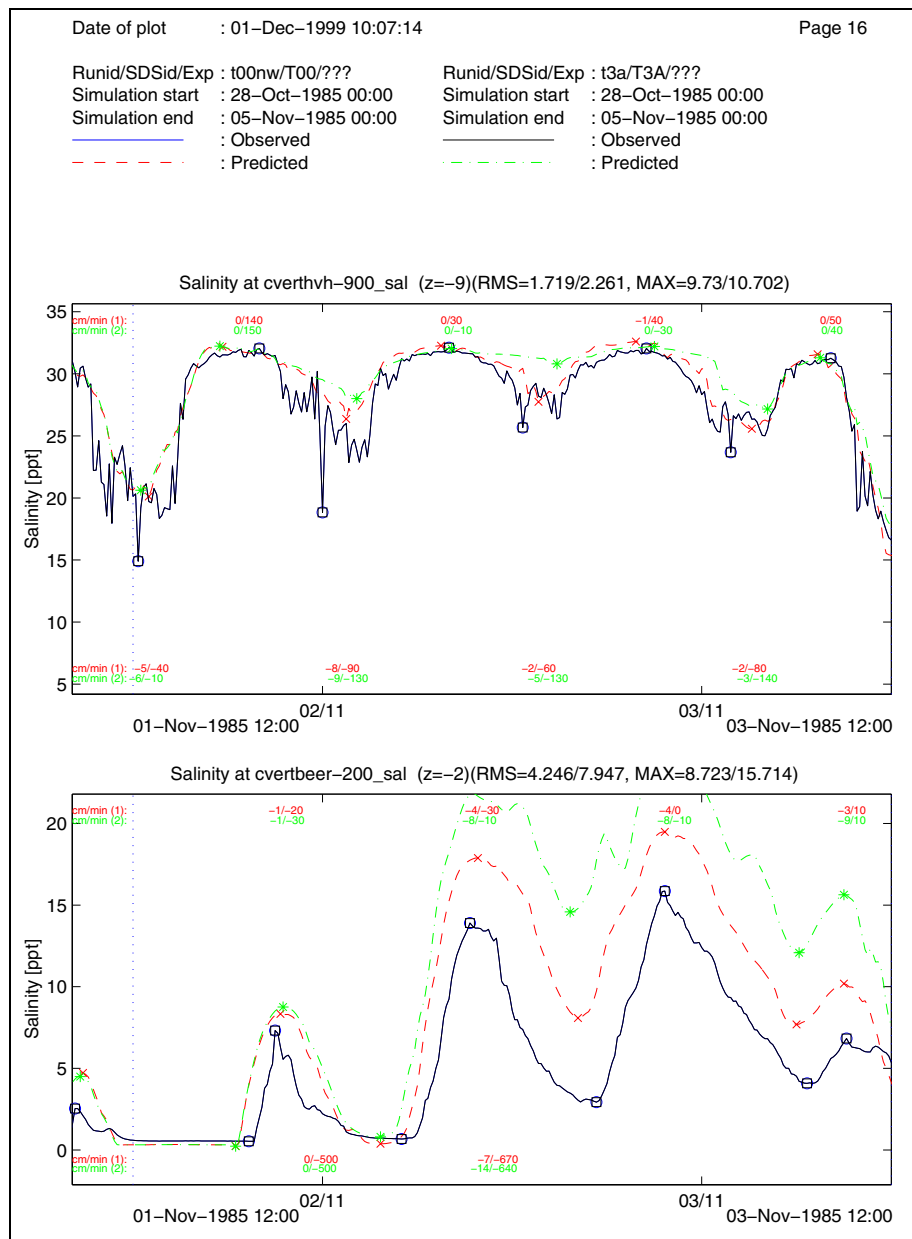
Wanneer in een berekening ook de wind meegenomen wordt zijn de verschillen tijdens een rustige periode klein. Tijdens de storm op 2 november zijn wel duidelijk verschillen waarneembaar:

Stations:

- De waterstanden verschillen opvallend weinig, zowel in de rustige periode als tijdens de storm (zie ook onderstaande tabel).
- De zoutconcentratie neemt overal in het model toe, vooral tijdens storm. Bij Hoek van Holland met 15 ppt., bij Beerenplaat 10 ppt en bij Krimpen 5 ppt (zie ook Figuur 9.1). De zoutindringing vindt ook eerder plaats. Zelfs in Middelharnis is de zoutindringing merkbaar! Hierdoor wordt de RMS waarde tijdens de storm hoger (zie onderstaande tabel). De zoutindringing is groter bij een hogere waarde voor de parameter β (T3B versus T3A).

$RMS_{T3A} - RMS_{T00n}$	rustige periode	storm	Totaal
waterstanden (cm)	0.0	-0.1	0.0
saliniteiten (ppt)	0.0	1.9	0.9

$RMS_{T3B} - RMS_{T00n}$	rustige periode	storm	Totaal
waterstanden (cm)	0.0	0.0	0.0
saliniteiten (ppt)	0.0	2.3	1.1



Figuur 9.1: Saliniteitsreeks van Hoek van Holland (9m onder NAP) en Beerenplaat tijdens storm voor de referentieberekening (T00n) en T3A

Verticalen:

- De verschillen in stroomsnelheden zijn erg klein t.o.v. de berekening zonder wind. De grootste verschillen zijn in de orde van enkele cm/s en zijn te vinden aan het wateroppervlak. De vloodsnelheden bovenin raai 21 nemen iets toe: maximaal 0.15 m/s op 31 oktober.
- Ook de verschillen in zoutconcentraties zijn tijdens rustig weer klein; de maximum verschillen liggen in de buurt van de 0.5 ppt tot 1 ppt. Op 4 november (na de storm) zijn de verschillen groter en kunnen oplopen tot 2.5 ppt. Dit komt omdat zout water dat achter is gebleven in het gebied

langzaam het gebied uitstroomt. De saliniteiten tijdens eb nemen op 31 oktober bovenin de raaien iets af (max. 1 ppt).

- In onderstaande tabellen zijn de verschillen in de RMS-waardes opgenomen. De verschillen die optreden zijn geheel bepaald door 4 november (na de storm). De beide andere dagen geven nauwelijks verschillen te zien. Door het achtergebleven zout na de storm treedt in de Nieuwe Waterweg in de onderste helft van de verticaal verbetering op.
- Het is opvallend dat de RMS-waarden voor saliniteiten over de hele verticaal toenemen als de locaties verder van de zee afliggen (behalve de Oude Maas). Blijkbaar is het gebruik van een ruimtelijk uniforme wind vooral voor het binnengebied niet aan te raden.
- Een hogere Charnockwaarde geeft dezelfde effecten, maar dan sterker.

Snelheid: RMS_{T3A} - RMS_{T00n} in cm/s	0-8 m onder NAP	>8 m onder NAP	Totaal
Nieuwe Waterweg	0	0	0
Nieuwe Maas	0	0	0
Oude Maas	0	0	0
Totaal	0	0	0

Saliniteit: RMS_{T3A} - RMS_{T00n} in ppt	0-8 m onder NAP	>8 m onder NAP	Totaal
Nieuwe Waterweg	0.0	-0.5	-0.3
Maassluis	0.2	0.2	0.2
Nieuwe Maas	0.6	0.7	0.6
Oude Maas	0.1	0.1	0.1
Totaal	0.2	-0.2	0.0

Snelheid: RMS_{T3B} - RMS_{T00n} in cm/s	0-8 m onder NAP	>8 m onder NAP	Totaal
Nieuwe Waterweg	0	0	0
Nieuwe Maas	0	1	0
Oude Maas	0	0	0
Totaal	0	0	0

Saliniteit: RMS_{T3B} - RMS_{T00n} in ppt	0-8 m onder NAP	>8 m onder NAP	Totaal
Nieuwe Waterweg	0.1	-0.6	-0.4
Maassluis	0.2	0.2	0.2
Nieuwe Maas	0.8	0.9	0.8
Oude Maas	0.1	0.1	0.1
Totaal	0.3	-0.2	0.0

9.3.2 Effect van de c_μ parameter in de oppervlaktelaag

Een verandering van deze c_μ -waarde heeft gevolgen voor het overbrengen van de windschuifspanning op het opwekken van turbulentie in de oppervlaktelaag en zal zo indirect de menging in het hele model beïnvloeden. In dit onderzoek zijn twee berekeningen uitgevoerd om dit effect te kunnen bestuderen:

- $c_\mu = 0.06$ (T4A)
- $c_\mu = 0.12$ (T4B)

Hierbij is T3B als uitgangspunt genomen: de Charnockparameter $\beta = 0.0320$.

De verandering van de c_μ -waarde had de volgende effecten op de waterbeweging:

Stations:

- De invloed op de waterstanden is erg klein. De verschillen tussen de berekeningen met een veranderde c_μ -waarde en de berekening met een c_μ -waarde van 0.09 zijn maximaal 0.02 cm. De verschillen in RMS-waarden zijn dan ook identiek aan die van T3B (zie onderstaande tabel).
- De verschillen in saliniteiten zijn ook erg klein. Bij Hoek van Holland is duidelijk waarneembaar dat de saliniteiten bij een lagere c_μ -waarde iets gaan achterlopen. Bij maximale vloed zijn de concentraties iets te laag (max. 2 ppt) en tijdens maximum eb iets te hoog (max 2.5 ppt). Bij Hoek van Holland zijn de verschillen tijdens storm niet groter. Dit in tegenstelling tot Beerenplaat en Krimpen waar de grootste verschillen (max. 1.5 ppt) tijdens storm optreden. Op de RMS-waarden heeft dit nauwelijks effect.

$RMS_{T4A} - RMS_{T3B}$	rustige periode	storm	Totaal
waterstanden (cm)	0.0	0.0	0.0
saliniteiten (ppt)	0.0	0.0	0.0

$RMS_{T4B} - RMS_{T3B}$	rustige periode	storm	Totaal
waterstanden (cm)	0.0	0.0	0.0
saliniteiten (ppt)	0.0	0.0	0.0

Verticalen:

- Ten opzichte van T3B zijn er nauwelijks verschillen waarneembaar in de stroomsnelheden en saliniteiten; de tabellen met verschillen in RMS-waarden zijn dan ook vrijwel identiek aan de tabel van T3B.

Snelheid: $RMS_{T4a} - RMS_{T3B}$ in cm/s	0-8 m onder NAP	>8 m onder NAP	Totaal
Nieuwe Waterweg	0	0	0
Nieuwe Maas	0	0	0
Oude Maas	0	0	0
Totaal	0	0	0

Saliniteit: $RMS_{T4a} - RMS_{T3B}$ in ppt	0-8 m onder NAP	>8 m onder NAP	Totaal
Nieuwe Waterweg	0.0	0.0	0.0
Maassluis	0.1	0.1	0.1
Nieuwe Maas	0.0	0.0	0.0
Oude Maas	0.0	0.0	0.0
Totaal	0.0	0.0	0.0

Snelheid: $RMS_{T_{4b}}$ - $RMS_{T_{3B}}$ in cm/s	0-8 m onder NAP	>8 m onder NAP	Totaal
Nieuwe Waterweg	0	0	0
Nieuwe Maas	0	0	0
Oude Maas	0	0	0
Totaal	0	0	0

Saliniteit: $RMS_{T_{4b}}$ - $RMS_{T_{3B}}$ in ppt	0-8 m onder NAP	>8 m onder NAP	Totaal
Nieuwe Waterweg	0.0	0.1	0.0
Maassluis	0.0	0.0	0.0
Nieuwe Maas	0.0	0.0	0.0
Oude Maas	0.1	0.0	0.0
Totaal	0.0	0.0	0.0

Het veranderen van de c_u -waarde aan het oppervlak heeft heel weinig effect. Blijkbaar heeft een verandering van de turbulente kinetische energie aan het oppervlak weinig invloed op de waterstanden, stroomsnelheden en saliniteiten in het hele model. In Paragraaf 9.4.2 wordt het effect bestudeerd van de c_u -parameter, die direct de viscositeit van de binnenlagen beïnvloedt.

9.4 Turbulentiemodel

9.4.1 Effect van het Prandtl/Schmidt getal

De turbulente diffusie-coëfficiënt D_v wordt verondersteld rechtevenredig te zijn met de turbulente viscositeit ν_v en wordt veelal gelijk genomen.

De volgende formulering wordt hiervoor gebruikt:

$$D_v = \frac{\nu_v}{\sigma}$$

met

D_v	: turbulente diffusiecoëfficiënt	(m^2/s)
ν_v	: turbulente viscositeit	(m^2/s)
σ	: Prandtl-Schmidt getal	(-)

Het Prandtl-Schmidt getal geeft de verhouding tussen beide parameters en vaak is $\sigma=1$. Wanneer de diffusiecoëfficiënt toeneemt (bij $\sigma < 1$) zal de opgeloste stof (in dit geval zout) dus meer over de verticaal gemengd worden. Om te onderzoeken wat het effect hiervan is, is de volgende berekening gedaan:

- Prandtl-Schmidt getal = 0.5 (T5A)

Een verlaging van het Prandtl-Schmidt getal gaf de volgende resultaten:
Stations:

- De verschillen in waterstanden zijn erg klein, maximaal 0.02 m. Op het Haringvliet zijn de verschillen orde 10^{-3} .
- De tijdreeksen van de saliniteitsstations geven wel behoorlijke verschillen aan. In het algemeen worden de saliniteiten kleiner. Omdat het model meestal te zout is bij de vaste meetlocaties heeft dit tot gevolg dat de RMS waardes afnemen.

$RMS_{T5A} - RMS_{T00n}$	rustige periode	storm	Totaal
waterstanden (cm)	0.0	0.0	0.0
saliniteiten (ppt)	-0.3	-0.6	-0.4

Verticalen:

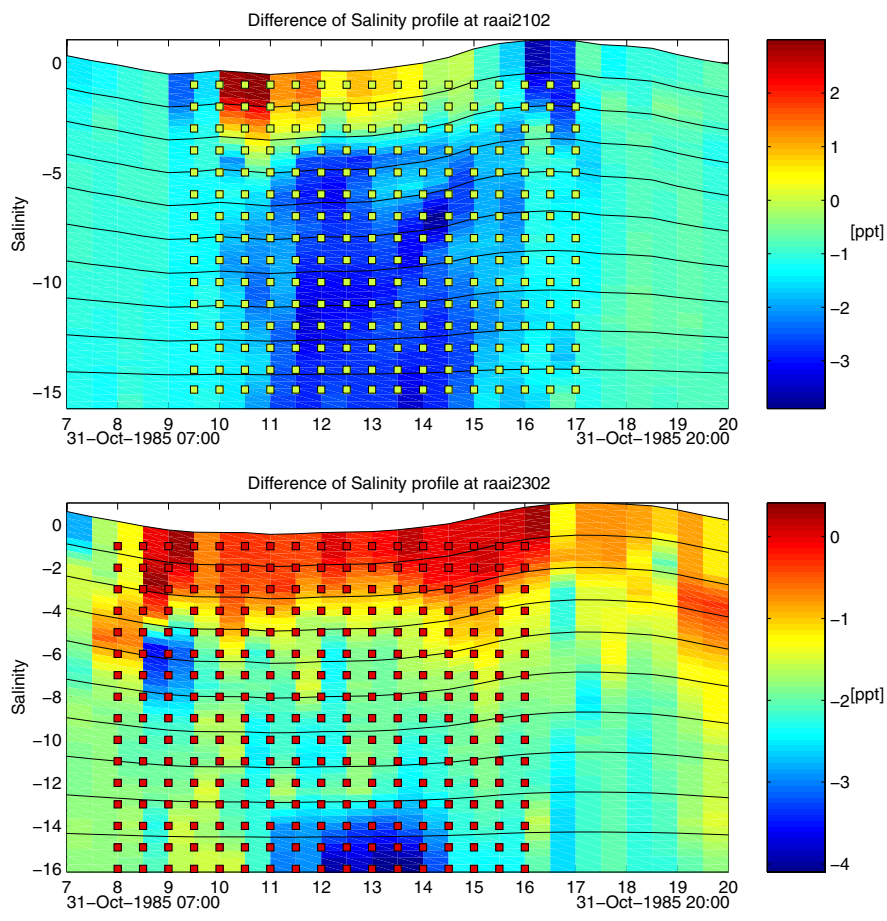
- In de Nieuwe Waterweg nemen de stroomsnelheden bovenin de verticaal af en onderin toe (max 0.2 m/s). Hierdoor neemt de RMS-waarde onderin toe.
- Zoals ook te verwachten bij een lager Prandtl-Schmidt getal wordt de diffusie groter en daardoor worden de onderste lagen zoeter en de bovenste lagen zouter (zie ook Figuur 9.2). In alle verticalen nemen de saliniteiten dus onderin de verticaal af. De RMS-waardes nemen daardoor vooral toe in de gebieden waar het al te zoet is (Nieuwe Waterweg en Maassluis), zie ook onderstaande tabellen.

Snelheid: $RMS_{T5A} - RMS_{T00n}$ in cm/s	0-8 m onder NAP	>8 m onder NAP	Totaal
Nieuwe Waterweg	0	4	2
Nieuwe Maas	-2	-1	-2
Oude Maas	1	3	2
Totaal	0	3	1

saliniteit: $RMS_{T5A} - RMS_{T00n}$ in ppt	0-8 m onder NAP	>8 m onder NAP	Totaal
Nieuwe Waterweg	0.1	1.8	1.2
Maassluis	0.2	1.3	0.9
Nieuwe Maas	-0.1	0.5	0.1
Oude Maas	0.4	0.8	0.5
Totaal	0.1	1.3	0.8

Runid/SDSid/Exp : t00n31/T00n/EXP
 Simulation start : 28-Oct-1985 00:00
 Simulation end : 05-Nov-1985 00:00

Runid/SDSid/Exp : t5a31/T5A/EXP
 Simulation start : 28-Oct-1985 00:00
 Simulation end : 05-Nov-1985 00:00



Figuur 9.2: Zt-plot van het verschil in saliniteiten tussen de berekening T5A en de referentieberekening (T5C-T00n). De bovenste figuur laat de resultaten zien voor raai 21 (in de Nieuwe Waterweg) en de onderste figuur voor raai 23 (bij Maassluis).

9.4.2 Effect van de c_μ -parameter

In het k- ϵ model wordt de turbulente viscositeit in v_t in de binnenlagen gegeven door:

$$v_t = c_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

Hierin is k de turbulente kinetische energie, ϵ de mate van dissipatie van de turbulente energie en c_μ een constante parameter. In de referentieberekening is voor $c_\mu = 0.09$ gekozen (de default waarde). Een verandering van deze c_μ -parameter beïnvloedt direct de turbulente viscositeit. Om het effect van deze parameter te bestuderen is c_μ verlaagd tot 0.06 (berekening T9A). Hierdoor wordt de turbulente viscositeit lager en neemt de menging af.

Deze berekening gaf de volgende resultaten:

Stations:

- De verschillen in waterstanden zijn erg klein, maximaal 3 cm bij Goidschalkoord. In de rustige periode nemen de RMS-waardes iets af (zie ook onderstaande tabel).
- Ook het effect op de zoutconcentraties is klein, maximaal 1 ppt. Hierdoor wordt de totale RMS-waarde nauwelijks beïnvloed.

$RMS_{T9A} - RMS_{T00n}$	rustige periode	storm	Totaal
waterstanden (cm)	-0.1	0.0	0.0
saliniteiten (ppt)	0.0	0.0	0.0

Verticalen:

- De verschillen zijn vooral merkbaar in het onderste gedeelte van het model, maar zijn ook daar erg klein. Onderstaande tabellen met de verschillen in RMS-waarde laten een maximaal verschil van 1 cm/s voor de snelheden en 0.1 ppt voor de saliniteiten zien.

Snelheid: $RMS_{T9A} - RMS_{T00n}$ in cm/s	0-8 m onder NAP	>8 m onder NAP	Totaal
Nieuwe Waterweg	1	1	1
Nieuwe Maas	0	0	0
Oude Maas	0	1	0
Totaal	0	1	0

saliniteit: $RMS_{T9A} - RMS_{T00n}$ in ppt	0-8 m onder NAP	>8 m onder NAP	Totaal
Nieuwe Waterweg	0.0	0.1	0.0
Maassluis	0.0	0.1	0.1
Nieuwe Maas	0.0	0.0	0.0
Oude Maas	0.1	0.1	0.1
Totaal	0.0	0.1	0.0

Het effect van een andere c_{ii} -waarde voor de interne uitwisseling van impuls is zeer klein, hoewel de parameter met 1/3 is verlaagd (van 0.09 naar 0.06). Dit lijkt erop te wijzen dat een ander proces dan de verticale menging een grotere rol speelt.

9.4.3 Toepassing van het algebraïsch model

In de referentieberekening is om de turbulente energie en dissipatie te berekenen gebruik gemaakt van het k-ε turbulente model. Dit model wordt al een paar jaar gebruikt in SIMONA/TRIWAQ als standaard voor het berekenen van 3D-waterbeweging. Omdat in dit onderzoek specifiek gekeken wordt naar de reproductienauwkeurigheid van een 3D model en de gevoeligheid van het model voor een aantal parameters (zoals bodemwrijving, wind, randvoorwaarden e.d.) mag een berekening met een andere modellering van de turbulente niet ontbreken.

Daarom is er een berekening uitgevoerd met een algebraïsch model (zie [20]) om de verticale uitwisseling van impuls ten gevolge van turbulentie te berekenen.

De berekening met het algebraïsch model werd instabiel ter plaatse van Hoek van Holland. De Richardson-getallen waren in de verschillende berekeningen in de orde van 10^{11} . Ook een som met een hogere impliciteitsfactor ($\theta = 0.75$) voor

transport leverde geen stabiele situatie op. Een extra berekening zonder demping van de mengweglengte op basis van Richardson-getal was wel stabiel maar is voortijdig afgebroken omdat de resultaten waarschijnlijk niet realistisch zouden zijn.

Omdat in het Rijmamo model relatief sterke gelaagdheid optreedt ($Ri > 0.25$) is besloten de problemen met het algebraïsch model niet verder te onderzoeken en de resultaten niet te gebruiken in dit onderzoek.

9.4.4 Toepassing van het RNG-model

In de referentiesom is vooral in de Nieuwe Waterweg geconstateerd dat het model onderin de verticaal te zoet is. Dit kan veroorzaakt worden door teveel menging. Daarom is er ook een berekening gedaan met een variant op het k- ϵ model, het RNG-model (berekening T10). Het grootste verschil ten opzichte van het standaard k- ϵ model is dat de mate van dissipatie van turbulentie energie ϵ hoger is en dus dat de turbulente viscositeit lager is. Hierdoor neemt de menging af. Deze variant op het k- ϵ model is pragmatisch van aard en het enige verschil is gelegen in de sluitingsconstanten. Zie voor meer details [20].

Het resultaten van het gebruik van het RNG-model in plaats van het standaard k- ϵ model zijn:

Stations:

- Het effect op de waterstanden is zeer klein, orde 10^{-2} (maximaal 2 cm.).
- Het effect op de zoutconcentraties is iets groter. Het grootste verschil treedt op 9 meter diepte bij Hoek van Holland op, het wordt daar maximaal 2 ppt zoeter.
- In totaal nemen de RMS waarden een klein beetje af (zie onderstaande tabel).

$RMS_{T10} - RMS_{T00n}$	rustige periode	storm	Totaal
waterstanden (cm)	-0.1	0.0	0.0
saliniteiten (ppt)	-0.1	-0.1	-0.1

Verticalen:

- Het grootste verschil treedt op 31 oktober onderin de verticaal in de Oude Maas op; de RMS neemt op die dag 4 cm/s toe. Op de overige dagen en in de andere gebieden is het effect zeer klein.
- Het model wordt overal een beetje zoeter, ook onderin. Daardoor worden daar de RMS-waardes groter (zie onderstaande tabel). Het effect van het RNG-model is dus vooral in de onderste helft van de verticaal merkbaar.

Snelheid: RMS _{T10} - RMS _{T00n} in cm/s	0-8 m onder NAP	>8 m onder NAP	Totaal
Nieuwe Waterweg	0	1	1
Nieuwe Maas	-1	0	0
Oude Maas	0	2	1
Totaal	0	1	0

saliniteit: RMS _{T10} - RMS _{T00n} in ppt	0-8 m onder NAP	>8 m onder NAP	Totaal
Nieuwe Waterweg	0.0	0.2	0.1
Maassluis	0.0	0.2	0.2
Nieuwe Maas	0.0	0.0	0.0
Oude Maas	0.1	0.2	0.1
Totaal	0.0	0.2	0.1

Het effect van het gebruik van het RNG-model in plaats van het reguliere k-ε model is erg klein. Ook de verandering in de c_u -parameter in de oppervlaktelaag (Paragraaf 9.3.2) en in de binnenlagen (Paragraaf 9.4.2) had weinig effect op de waterstanden, stroomsnelheden en saliniteiten in het model. Blijkbaar hebben veranderingen in de turbulente kinetische energie k en de mate van dissipatie van de turbulente energie ϵ (op wat voor wijze dan ook) maar een geringe invloed op de modeltoestand. Dit wijst erop dat ook andere wijzigingen in het k-ε-model weinig effect zullen hebben.

9.5 Effect van de Manningwaarden

Over het algemeen heeft de bodemwrijving een grote invloed op de waterbeweging in 2DH en 3D modellen. De Chézy-waarde ($C=h^{1/6}/n$, met h is waterdiepte en n is Manningwaarde) komt in de impuls-vergelijkingen voor; zowel een verhoging van de Manningwaarde als een verlaging van de waterdiepte heeft dus tot gevolg dat de Chézy-waarde afneemt (en de wrijving toeneemt). Daarnaast zorgt een ruwere bodem ook voor meer turbulentie (en dus menging) in de verticaal. Daarom zijn twee berekeningen uitgevoerd waarbij de Manningwaarde is gevarieerd:

- berekening met een 10% lagere Manningwaarde : T2A
- berekening met een 10% hoger Manningwaarde : T2B

De variatie van de Manningwaarde had de volgende gevolgen voor de waterbeweging:

Stations:

- Een afname in Manningwaarde (T2A) heeft een verlaging van de RMS-waarden van de waterstanden tot gevolg (vooral bij rustig weer) en een toename in Manningwaarden een verhoging van de RMS-waarden (zie onderstaande tabel).
- De grootste verschillen in zoutconcentraties tussen de referentiesom (T00n) en een som waarbij de Manningwaarde is veranderd, zijn te vinden in Krimpen a/d IJssel tijdens de storm. Bij een lagere Manningwaarde (T2A) neemt de saliniteit maximaal 4 ppt toe (op 4 m diepte). Omdat de zoutindringing ook bij de referentiesom al te groot was, neemt de RMS-waarde in totaal toe. Bij een verhoogde Manningwaarde zijn de effecten tegengesteld en neemt de RMS-waarde tijdens de storm af.

$RMS_{T2A} - RMS_{T00n}$	rustige periode	storm	Totaal
waterstanden (cm)	-0.2	0.0	-0.1
saliniteiten (ppt)	0.0	0.1	0.1

$RMS_{T2B} - RMS_{T00n}$	rustige periode	storm	Totaal
waterstanden (cm)	0.3	0.1	0.2
saliniteiten (ppt)	0.0	-0.2	-0.1

Verticalen:

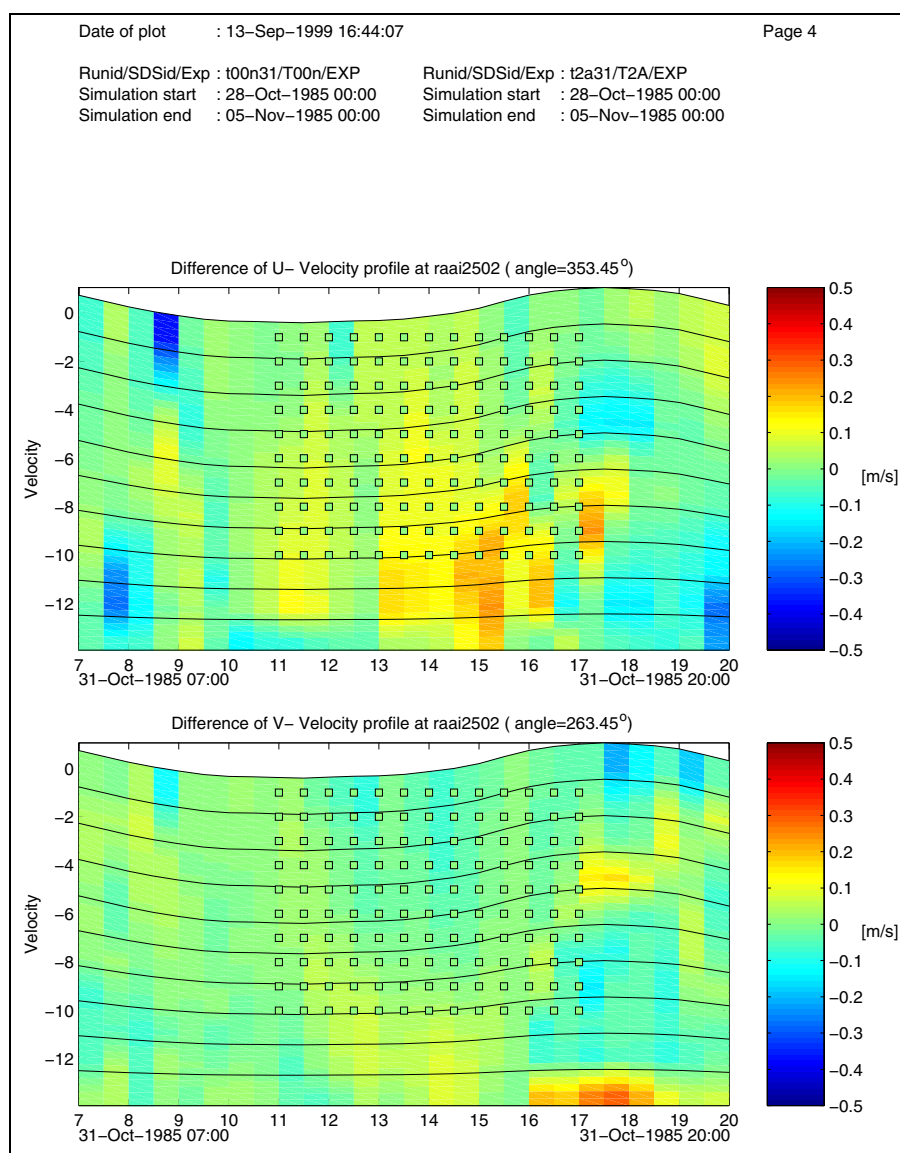
- Zoals te verwachten nemen de stroomsnelheden onderin de verticalen toe bij een lagere Manningwaarde (zie Figuur 9.3). Dit is voor alle gebieden het geval. Omdat de snelheden onderin de verticaal in de Nieuwe Waterweg, bij Maassluis en in de Oude Maas te groot zijn in de referentiesom resulteert een lagere Manningwaarde in een grotere RMS en een hogere Manningwaarde in een kleinere RMS-waarde. In de Nieuwe Maas heeft deze parameter opvallend weinig effect.
- Voor saliniteiten is een toename van de Manning-waarde ook gunstig, hoewel er daardoor meer menging ontstaat. Blijkbaar is de impulsvergelijking in dit geval belangrijker dan de turbulentie. Een toename van de Manningwaarde heeft op de Chézy-waarde een soortgelijk effect als afname van de waterdiepte. Omdat de gebruikte bodem te diep is voor de gemeten situatie (1985) is op grond van deze berekening te verwachten dat het model bij het gebruik van een juiste (ondiepere) bodem ook zal verbeteren.
- De effecten bij een 10% kleinere Manningwaarde zijn bij de saliniteiten groter dan bij een 10% grotere Manningwaarde. Bij de snelheden zijn de effecten ongeveer in dezelfde orde.

Snelheid: $RMS_{T2A} - RMS_{T00n}$ in cm/s	0-8 m onder NAP	>8 m onder NAP	Totaal
Nieuwe Waterweg	1	4	3
Nieuwe Maas	0	0	0
Oude Maas	2	7	4
Totaal	1	4	2

Saliniteit: $RMS_{T2A} - RMS_{T00n}$ in ppt	0-8 m onder NAP	>8 m onder NAP	Totaal
Nieuwe Waterweg	0.1	0.4	0.3
Maassluis	0.1	0.2	0.2
Nieuwe Maas	-0.1	0.3	0.0
Oude Maas	0.2	0.3	0.3
Totaal	0.1	0.3	0.2

Snelheid: RMS_{T2B} - RMS_{T00n} in cm/s	0-8 m onder NAP	>8 m onder NAP	Totaal
Nieuwe Waterweg	1	-4	-2
Nieuwe Maas	-1	-1	-1
Oude Maas	1	-6	-1
Totaal	0	-3	-1

Saliniteit: RMS_{T2B} - RMS_{T00n} in ppt	0-8 m onder NAP	>8 m onder NAP	Totaal
Nieuwe Waterweg	0.1	-0.2	-0.1
Maassluis	-0.1	0.3	0.1
Nieuwe Maas	0.0	-0.2	-0.1
Oude Maas	0.0	0.1	0.0
Totaal	0.0	-0.1	0.0



Figuur 9.3: Zt-plots van het verschil in snelheden tussen de berekening T2A en de referentieberekening (T2A-T00n) voor raai 25 (Oude Maas). De bovenste figuur laat de resultaten zien voor de snelheidscomponent loodrecht op de raai en de onderste figuur voor de component evenwijdig aan de raai.

9.6 Effect van het randvoorwaardetype op de rivierzijde

Het Rijmamo model wordt aangestuurd met randvoorwaarden op de zeezijde en op de riviertakken (zie Paragraaf 2.2.3). De randvoorwaarden op de 3 riviertakken bestaan elk uit debieten en een waterstandspunt, berekend met het Zeedelta model.

In het kader van de reproductienauwkeurigheid is onderzocht welke invloed andere randvoorwaarden hebben op de waterbeweging in het model. In principe kunnen op bovenstroomse randen (rivierranden) 3 soorten randvoorwaarden opgelegd worden:

Q-rand: Alleen een debiet en geen waterstanden. De debieten (en ook zoutconcentraties) zijn nu op de lokatie van de randen exact gelijk aan de debieten zoals die uit het grotere model komen (of gemeten zijn). Een nadeel is dat de waterstanden nabij de rand afwijken omdat er geen waterstand opgelegd wordt. Dit type randvoorwaarde wordt veel toegepast bij rivieren.

H-rand: Alleen waterstanden worden bovenstrooms opgelegd. De waterstanden nabij de rand zijn in dit geval identiek aan de waterstanden uit het grotere model (of de gemeten waterstanden). De debieten zullen afwijken. Deze randvoorwaarden wordt vaak toegepast bij zeeën en estuaria.

Q_H-rand: Dit is een combinatie van een Q-rand en een H-rand: zowel debieten als waterstanden worden opgelegd. Hierdoor zullen zowel de debieten als de waterstanden nabij de rand redelijk goed met de debieten en waterstanden uit het grotere model (of gemeten) overeenkomen. Alleen zal het debiet, dat door de waterstandspunten stroomt, afwijken. Hetzelfde geldt voor de waterstand in de debietpunten. Dit type rand is opgelegd bij de referentieberekening, waarbij telkens één waterstandspunt is gebruikt op elke rand.

De verschillen tussen de 3 typen randvoorwaarden zijn in het kader van het project Nautilus onderzocht (zie [17]). Hierbij zijn het Rijmamo grof en het Rijmamo fijn model (beide 2DH) gebruikt. Uit dit onderzoek bleek dat de verschillen tussen de verschillende berekeningen klein maar niet verwaarloosbaar zijn. Bij een waterstandsrand is de zoutindringing het grootst.

In het kader van dit onderzoek zijn 3 berekeningen uitgevoerd:

- het effect van een Q-rand i.p.v. een Q_H-rand (T8)
- het effect van een 10% groter debiet bij een Q_H-rand (T5B)
- het effect van een 10% groter debiet bij een Q-rand (T5C)

In alle overige berekeningen (inclusief de referentieberekening) is gerekend met een Q_H-rand. Het voordeel hiervan is dat bij een dergelijke randvoorwaarde de waterstanden nabij de rand niet te veel kunnen afwijken van de opgelegde waterstanden. De debieten door de rand zijn echter niet exact aan de opgelegde debieten vanwege het debiet dat door het waterstandspunt stroomt. Met alleen een Q-rand is dit niet het geval en zullen de stroomsnelheden en zoutconcentraties dichter bij de stroomsnelheden en zoutconcentraties van het Zeedelta model liggen.

9.6.1 Effect van de Q-rand i.p.v. Q_H-rand

Bij het opleggen van een Q-rand op de rivierranden zijn wat aanpassingen gepleegd:

- Bij de berekeningen met een Q_H-rand lag de rand op de Hollandse IJssel bij Krimpen a/d IJssel, waar een waterstandsrand werd opgelegd. Bij het opleggen van enkel Q-randen is de Hollandse IJssel geheel in het model opgenomen.
- Verder zijn op de rand op de Oude Maas en het Hollandsch Diep de waterstandspunten gebruikt als extra punt in de debietrand.

Wanneer op de rivierranden alleen een debiet wordt gezet, heeft dit de volgende gevolgen voor de waterbeweging:

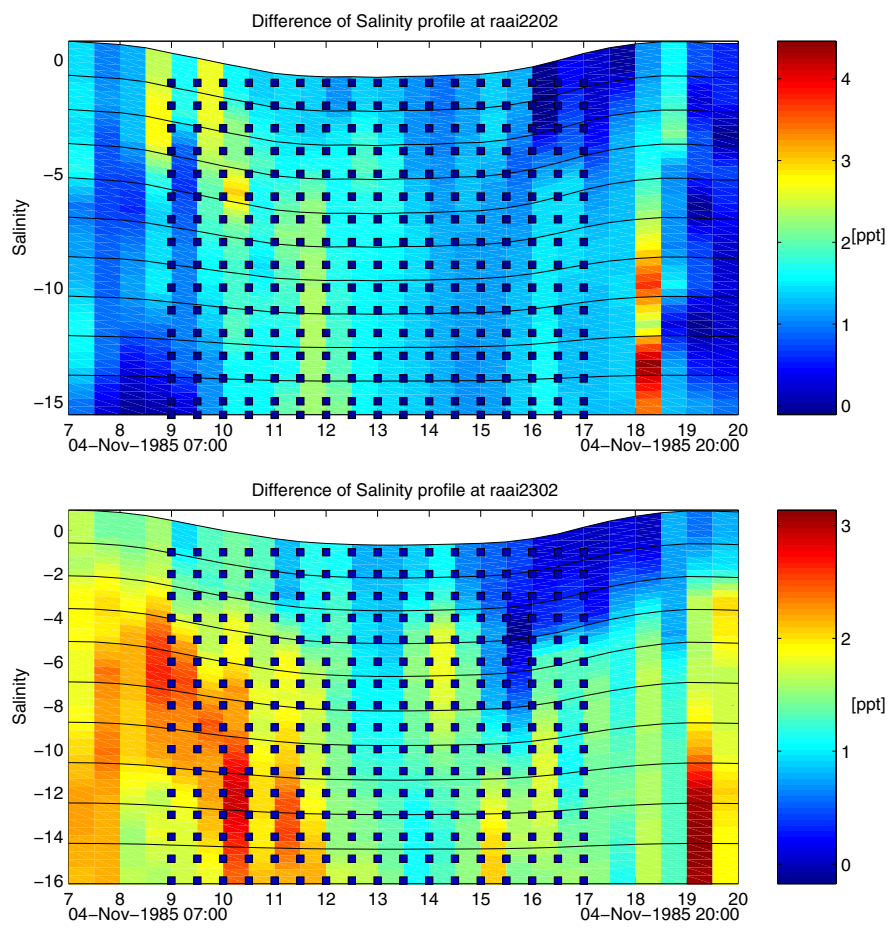
Stations:

- Het laagwater in Goidschalxoord en Spijkenisse is lager dan bij een Q_H-rand (0.12 m). In Hoek van Holland is geen verschil merkbaar. De verschillen in Krimpen a/d IJssel zijn groot (max. 0.15 m). Op de Haringvliet liggen de waterstanden bij een Q-rand in het begin hoger dan bij een Q_H-rand. In onderstaande tabel is te zien dat deze verandering de RMS van de waterstanden vooral in de rustige periode verhoogt.
- Door alleen een Q-rand te gebruiken worden de zoutconcentraties in het hele gebied groter. Kennelijk blijft bij een Q-rand meer zout water achter in het gebied. Ook het extra (zoete) debiet dat bij de referentieberekening door de waterstandspunten het gebied binnenkwam is nu afwezig, waardoor er hogere zoutconcentraties optreden. Vooral in Krimpen zijn de concentraties groter (max. 5 ppt. onderin de verticaal). Hierdoor wordt de RMS-waarde vooral tijdens de storm hoger (zie onderstaande tabel).

$RMS_{TR} - RMS_{TOOR}$	rustige periode	storm	Totaal
waterstanden (cm)	1.1	0.2	0.7
saliniteiten (ppt)	0.1	0.6	0.3

Runid/SDSid/Exp : t00n_4/T00n/EXP
 Simulation start : 28-Oct-1985 00:00
 Simulation end : 05-Nov-1985 00:00

Runid/SDSid/Exp : t8_4/T8/EXP
 Simulation start : 28-Oct-1985 00:00
 Simulation end : 05-Nov-1985 00:00



Figuur 9.4: Zt-plot van het verschil in saliniteiten tussen de berekening T8 en de referentieberekening (T8-T00n). De bovenste figuur laat de resultaten zien voor raai 22 (in de Nieuwe Waterweg) en de onderste figuur voor raai 23 (bij Maassluis).

Verticalen:

- De stroomsnelheden bovenin de Nieuwe en Oude Maas zijn bij een Q-rand tijdens eb lager (max. 0.2 m/s). In de Nieuwe Waterweg is de stroomsnelheid maximaal 0.5 m/s lager. Onderstaande tabellen laten zien dat hierdoor de RMS-waarde van de stroomsnelheden vooral onderin de verticaal van de Oude Maas verbetert.
- De zoutconcentraties worden in het hele gebied groter. Op laagwaterkentering zijn de verschillen in zoutconcentraties het grootst. Bij alle raaien is de zoutconcentratie dan 2 a 3 ppt groter (zie ook Figuur 9.4).
- Het zouter worden van het model zorgt voor een verbetering onderin de verticaal van de Nieuwe Waterweg, bij Maassluis en de Oude Maas. De Nieuwe Maas was al te zout en daar worden de RMS-waardes dus groter.

- Bovenin de verticaal nemen de RMS-waarden juist toe. Dit is consistent met de toename van de RMS-waarden in de vaste saliniteitslocaties (deze locaties meten niet dieper dan 9 meter onder NAP).
- Per saldo is het gebruik van de Q-rand in plaats van de Q_H-rand voor de verticalen een verbetering.

Snelheid: RMS_{T8} - RMS_{T00n} in cm/s	0-8 m onder NAP	>8 m onder NAP	Totaal
Nieuwe Waterweg	1	-1	0
Nieuwe Maas	-1	0	-1
Oude Maas	1	-5	-1
Totaal	0	-1	0

Saliniteit: RMS_{T8} - RMS_{T00n} in ppt	0-8 m onder NAP	>8 m onder NAP	Totaal
Nieuwe Waterweg	0.5	-1.2	-0.6
Maassluis	0.1	-0.2	-0.1
Nieuwe Maas	0.9	0.8	0.9
Oude Maas	-0.1	-0.4	-0.2
Totaal	0.5	-0.6	-0.2

9.6.2 Effect van een groter debiet op de rivieranden

Bij de referentiesom (T00n) zijn de debieten en waterstanden ten behoeve van de Q_H-randen door het Zeedelta-model berekend. Op het moment dat het debiet bij een Q_H-rand met 10% wordt vergroot is dat niet meer consistent met de oorspronkelijke waterstand op die rand. Het gevolg is dat het extra debiet door het waterstandpunt weer het model uitstroomt om consistente randvoorwaarden te krijgen. Het effect van de berekening met een 10% groter debiet bij een Q_H-rand (T5B) is dus zeer gering. Daarom is ook een berekening gedaan met een 10% groter debiet bij een Q-rand (T5C). Hieronder is wel de tabel van T5B opgenomen, maar worden alleen de resultaten van T5C besproken en vergeleken met T8 en T00n.

Een groter debiet op de rivieranden heeft het volgende effect:

Stations:

- Het vergroten van het rivierdebiet heeft een duidelijk effect op de getijamplitudes. Tijdens eb komt er namelijk meer water het model in, terwijl tijdens vloed er meer water uitgaat. De getijamplitude neemt hierdoor in het algemeen af. Dit heeft tot gevolg dat de RMS in de rustige periode bij T8 teruggedraaid wordt tot ongeveer 0.6 cm. Tijdens de storm neemt de RMS-waarde juist toe ten opzichte van de T8-berekening.
- Ten opzichte van T8 nemen de saliniteiten af, vooral tijdens eb bij Hoek van Holland.

RMS_{T5B} - RMS_{T00n}	rustige periode	storm	Totaal
waterstanden (cm)	0.0	0.0	0.0
saliniteiten (ppt)	0.0	0.1	0.1

RMS_{T5C} - RMS_{T00n}	rustige periode	storm	Totaal
waterstanden (cm)	0.6	0.6	0.6
saliniteiten (ppt)	0.0	0.5	0.3
RMS_{T5C} - RMS_{T8}	rustige periode	storm	Totaal
waterstanden (cm)	-0.5	0.4	-0.1
saliniteiten (ppt)	0.0	0.0	0.0

Verticalen:

- In de onderste helft van Nieuwe Waterweg en de Oude Maas treedt een faseverschil op in de snelheden, waardoor daar de RMS-waarde ten opzichte van T8 toeneemt. In de overige gebieden is een combinatie van een Q-rand en een vergroting van het debiet positief voor de snelheden.
- Door het extra debiet bij de Q-rand komt er per saldo meer zoet water het model binnen, zodat de effect van de Q-rand op de saliniteiten (zie Paragraaf 9.6.1) weer wordt verzwakt: zowel de verbeteringen als de verslechteringen nemen af.

Snelheid: RMS_{T5B} - RMS_{T00n} in cm/s	0-8 m onder NAP	>8 m onder NAP	Totaal
Nieuwe Waterweg	0	0	0
Nieuwe Maas	0	0	0
Oude Maas	0	0	0
Totaal	0	1	0

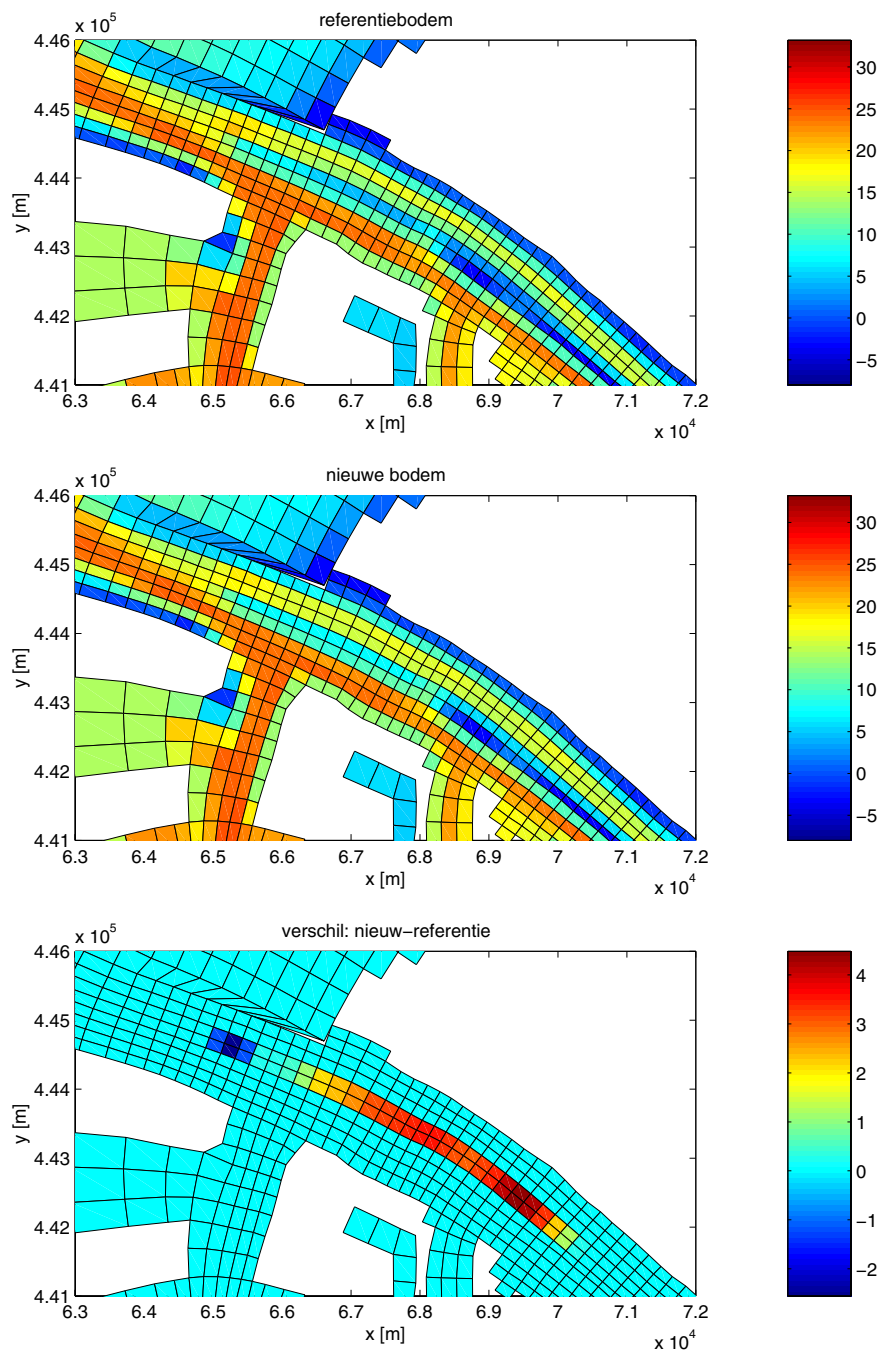
Saliniteit: RMS_{T5B} - RMS_{T00n} in ppt	0-8 m onder NAP	>8 m onder NAP	Totaal
Nieuwe Waterweg	0.0	0.0	0.0
Maassluis	0.0	0.1	0.0
Nieuwe Maas	0.0	0.0	0.0
Oude Maas	0.0	0.0	0.0
Totaal	0.0	0.0	0.0

Snelheid: RMS_{T5C} - RMS_{T00n} in cm/s	0-8 m onder NAP	>8 m onder NAP	Totaal
Nieuwe Waterweg	0	1	1
Nieuwe Maas	-1	-2	-1
Oude Maas	0	-1	0
Totaal	0	1	0

Snelheid: RMS_{T5C} - RMS_{T8} in cm/s	0-8 m onder NAP	>8 m onder NAP	Totaal
Nieuwe Waterweg	-1	2	1
Nieuwe Maas	0	-2	0
Oude Maas	-1	4	0
Totaal	0	1	0

Saliniteit: RMS_{T5C} - RMS_{T8} in ppt	0-8 m onder NAP	>8 m onder NAP	Totaal
Nieuwe Waterweg	0.2	-0.6	-0.3
Maassluis	0.0	0.0	0.0
Nieuwe Maas	0.6	0.5	0.5
Oude Maas	-0.1	-0.3	-0.2
Totaal	0.2	-0.3	-0.1

Saliniteit: RMS_{T5C} - RMS_{T8} in ppt	0-8 m onder NAP	>8 m onder NAP	Totaal
Nieuwe Waterweg	-0.3	0.6	0.3
Maassluis	-0.1	0.2	0.1
Nieuwe Maas	-0.4	-0.3	-0.3
Oude Maas	0.0	0.1	0.1
Totaal	-0.2	0.3	0.0

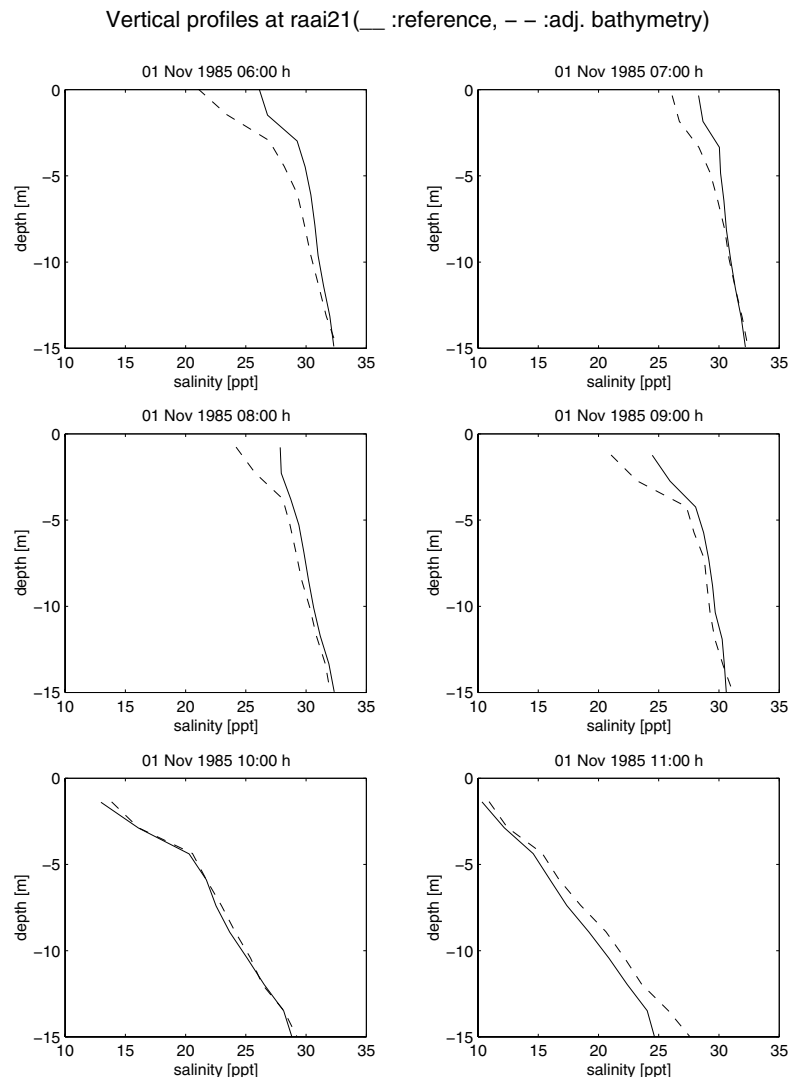


Figuur 9.5: De bodems in de monding van de Nieuwe Waterweg bij de referentiebodem (boven), de aangepaste bodem (midden) en het verschil tussen deze bodems (onder), zoals besproken in paragraaf 9.7.

9.7 Effect van de bodemligging

Bij de experimenten met het vereenvoudigde model was al geconstateerd dat de bodemligging behoorlijk relevant is voor de zoutindringing. In principe is de bodemligging van het Rijnmaasmondgebied vrij nauwkeurig bekend, omdat er regelmatig lodingen worden uitgevoerd. Toch wordt hier ook de gevoeligheid voor de bodemligging onderzocht, omdat de volgende aspecten kunnen leiden tot onnauwkeurigheid van de gebruikte bodem:

- Er is een recente bodem gebruikt, terwijl een situatie uit 1985 wordt doorgerekend. Sinds 1985 kan de bodemligging enigszins veranderd zijn, onder andere door baggeren.
- Het gebruikte Rijmamo-model is dusdanig grof dat de geul in de Nieuwe Waterweg slechts één à twee gridcellen breed is. De bochten in die geul kunnen daardoor niet goed gerepresenteerd worden.



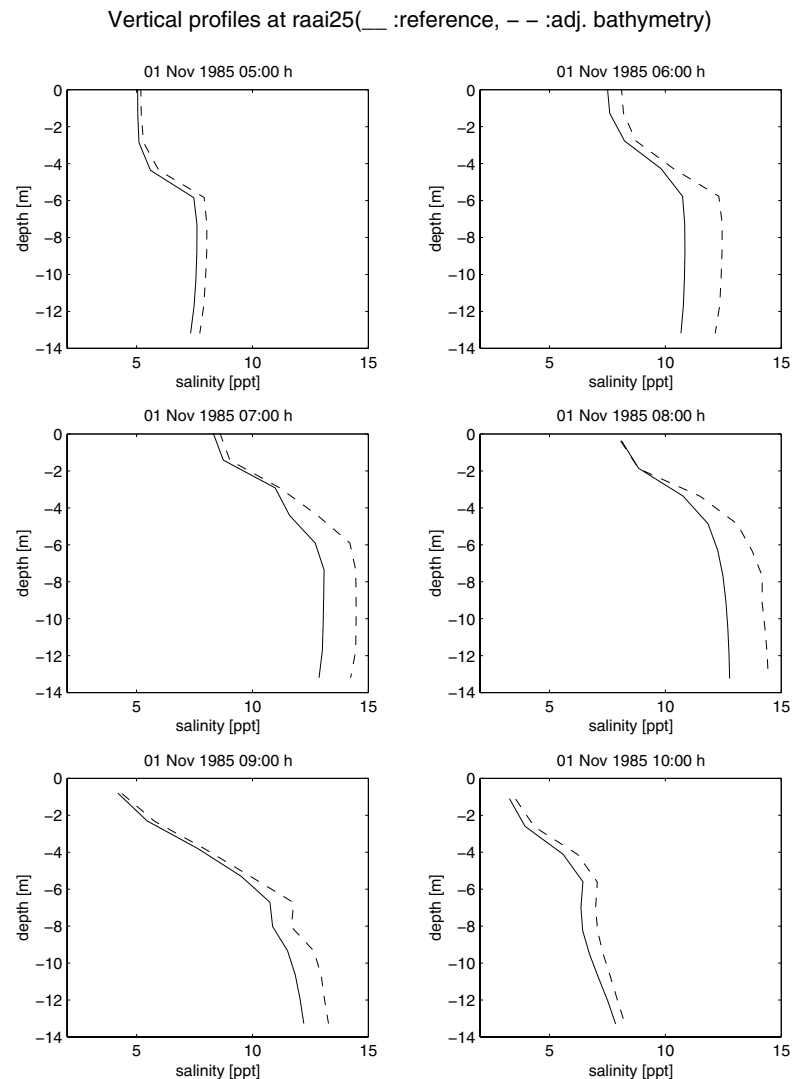
Figuur 9.6: Profielen van de saliniteit in raai 21; berekening met aangepaste bodem (onderbroken lijn) vergeleken met de referentieberekening (doorgetrokken lijn).

Om de gevoeligheid van de zoutindringing voor de bodemligging ook in Rijmamo-grof te onderzoeken is een experiment uitgevoerd, waarbij de bodem aan het begin van de Nieuwe Waterweg rondom raai 21 is aangepast (zie Figuur 9.5). Door deze aanpassing is de noordelijk geul iets breder en gelijkmatiger van diepte geworden. In totaal is van slechts 54 gridcellen de diepte aangepast (maximaal 4 meter).

De resultaten van deze berekening zijn niet vergeleken met metingen, omdat de wijzigingen in de bodem willekeurig zijn en niet bedoeld om de bodem uit 1985 te reconstrueren. De resultaten dienen slechts om de gevoeligheid voor bodemligging te onderzoeken.

Uit de resultaten blijkt dat een dergelijke kleinschalige verandering in de bodemschematisatie veel effect heeft op de saliniteiten, zowel ter plekke van de aanpassing als op grote afstand ervan. Figuur 9.6 en Figuur 9.7 tonen respectievelijk de saliniteitsprofielen van raai 21 (bij Hoek van Holland) en raai 25 (Oude Maas) als resultaat van de nieuwe bodem in vergelijking met de referentiebodem. In raai 21 zijn de verschillen maximaal 5 ppt. Ook in raai 25 (Oude Maas) heeft de bodemaanpassing effect (maximaal 2 ppt). Zelfs in de raaien 12 en 16 blijkt er nog verschil te zijn (maximaal 0.5 ppt tot 1 ppt). Ook verandert het profiel van vorm. De bodemligging heeft dus niet alleen invloed op de zoutindringing, maar ook op de menging in het model.

Uit dit experiment blijkt dat de bodemligging van groot belang is voor de saliniteit. Een lokale aanpassing in de bodem heeft in een groot deel van het model invloed op de saliniteit en de menging. Het belang van een juiste bodem (uit de periode van de metingen) is dus veel belangrijker dan verwacht.



Figuur 9.7: Profielen van de saliniteit in raai 25; berekening met aangepaste bodem (onderbroken lijn) vergeleken met de referentieberekening (doorgetrokken lijn).

9.8 Vergelijking tussen de berekeningen

In deze paragraaf zullen de effecten van de verschillende fysische parameters, die tijdens deze studie zijn onderzocht met elkaar vergeleken worden. Dit gebeurt op basis van de resultaten van de statistische analyse die door basisanalyse automatisch wordt uitgevoerd. De grote hoeveelheid tabellen die door basisanalyse zijn geproduceerd zijn samengevat in staafdiagrammen van de RMS-waarden. Hierbij is de ruimtelijke en temporele opdeling uit Hoofdstuk 6.1 aangehouden.

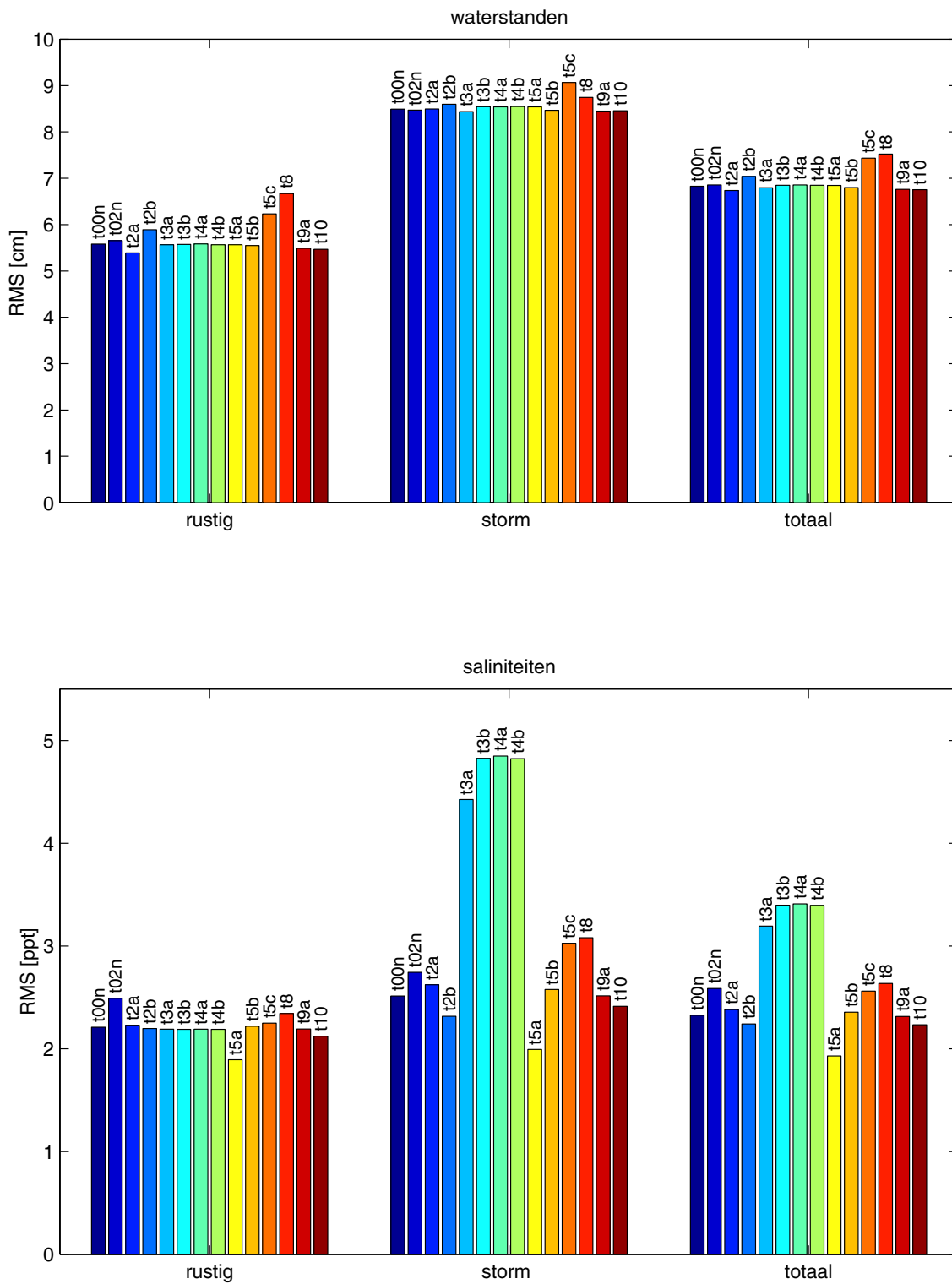
9.8.1 Vergelijking van waterstanden

Omdat in de pilot van het Westerschelde model [18] zeer uitgebreid is ingegaan op de reproductie van waterstanden, is er bij deze pilot minder aandacht aan besteed. In het kort worden hier de resultaten van de huidige pilot samengevat, waarbij men zich moet realiseren dat steeds het totale effect (op alle stations samen) wordt beschouwd. Eventuele effecten bij individuele stations kunnen hierdoor buiten het zicht vallen.

In Figuur 9.8 wordt in de bovenste figuur een overzicht gegeven van de RMS-waarden van de vaste waterstandsstations voor alle berekeningen. Dit wordt gegeven voor de rustige situatie, de stormsituatie en voor de totale periode. De grootste effecten worden veroorzaakt door het veranderen van de Manningwaarden (T2A en T2B), het gebruik van een Q-rand in plaats van een Q_H-rand (T8) en een Q-rand met een groter debiet (T5C). Deze effecten zijn tijdens de rustige periode duidelijker dan tijdens de storm. De gevoeligheid van de waterstanden voor de bodemruwheid (Manningwaarden) is in de pilot van het Westerschelde model [18] ook geconstateerd. Een grotere bodemruwheid zal, doordat er meer energieverlies optreedt, in het algemeen de amplitudes verlagen. Dat de rivierdebieten ook veel invloed op de waterstanden hebben is te verwachten omdat de debieten voor een belangrijk deel de hoeveelheid water in het model bepalen.

Verder is het opmerkelijk dat de verschillende berekeningen met wind (T3A, T3B, T4A en T4B) geen zichtbaar effect op de totale RMS-waarde van de waterstanden hebben. Ook zijn de waterstanden nauwelijks gevoelig voor de inspeeltijd (T02n) en variaties in het turbulentiemodel (T4A, T4B, T5A, T9A en T10).

RMS-overzicht vaste meetlocaties



Figuur 9.8: RMS-overzicht vaste meetlocaties

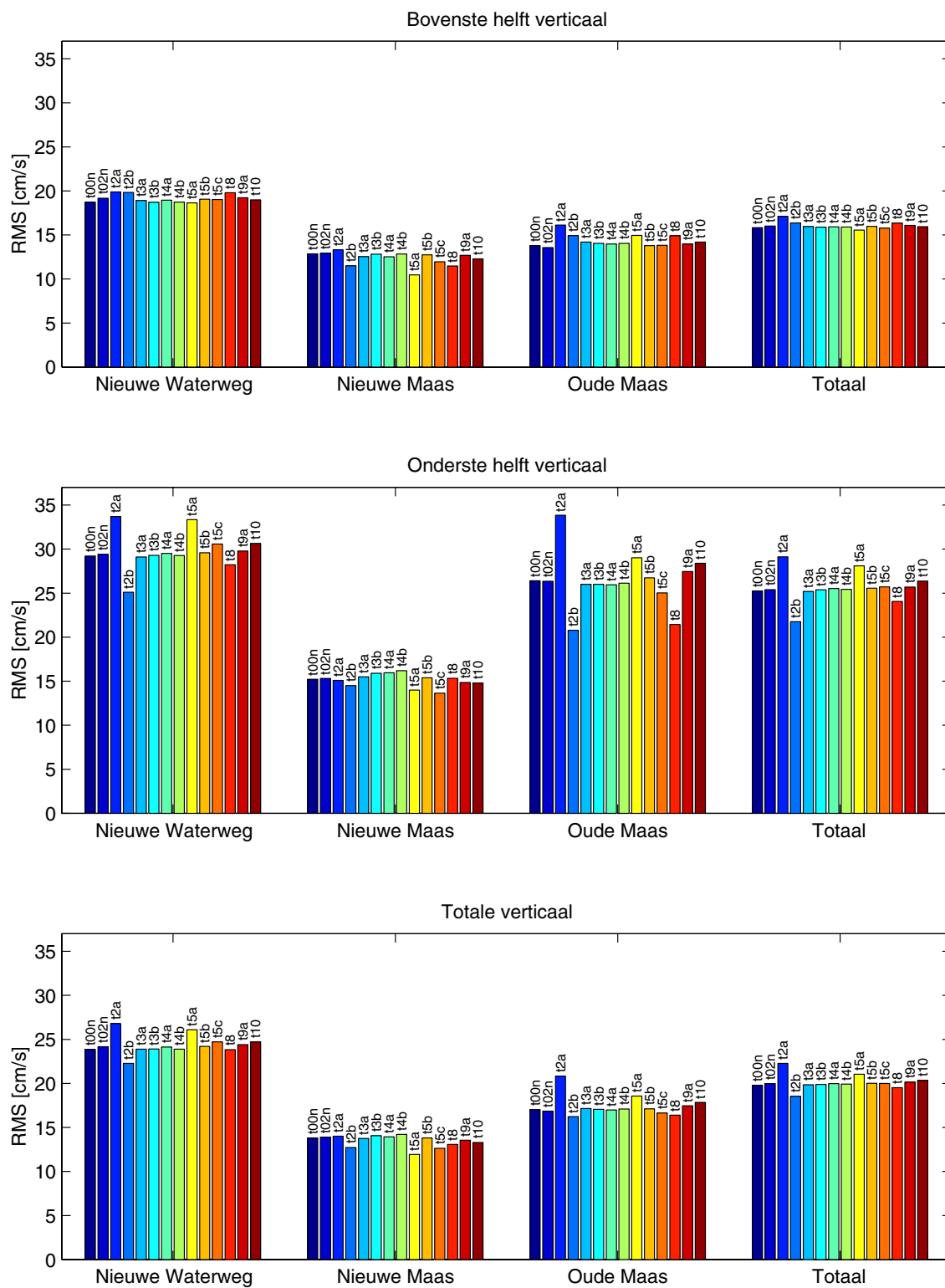
9.8.2 Vergelijking van stroomsnelheden

In Figuur 9.9 wordt een overzicht gegeven van de RMS-waarden van de stroomsnelheden voor alle berekeningen. Onder in de verticaal zijn de RMS-waarden het grootst en ook de verschillen tussen de berekeningen zijn daar duidelijker. Een verandering van de bodemwrijving (Manningwaarden, T2A en T2B) en de verlaging van het Prandtl/Schmidt getal (T5C) hebben de grootste effecten op de RMS-waarden van de stroomsnelheden. Ook het gebruik van een Q-rand in plaats van een Q_H-rand (T8) laat verschillen zien, vooral onderin de verticaal in de Nieuwe Waterweg en de Oude Maas.

Dat de bodemwrijving onderin de verticaal het meest effect heeft is te verwachten, omdat het energieverlies bij een grotere Manningwaarde daar het grootst is.

De inspeeltijd (T02n) en het toevoegen van wind en variatie van de Charnock-parameter daarin (T3A en T3B) hebben nauwelijks effect op de stroomsnelheden. Dat het verhogen van het debiet bij een Q_H-rand geen effect heeft komt door terugstroming door het waterstandpunt (T5B, zie Paragraaf 9.6.2). Ook is uit diverse berekeningen (T4A, T4B, T9A en T10) gebleken dat de stroomsnelheden in deze situatie vrijwel niet gevoelig zijn voor veranderingen in de turbulente kinetische energie k en de mate van dissipatie van de turbulente energie ϵ .

RMS-overzicht verticalen: snelheden



Figuur 9.9: RMS-overzicht verticalen van de stroomsnelheden

9.8.3 Vergelijking van saliniteiten

Vaste meetstations:

In Figuur 9.8 wordt in de onderste figuur een overzicht gegeven van de RMS-waarden in de vaste saliniteitsmeetlocaties. Dit heeft alleen betrekking op de bovenste helft van de verticaal (zie Tabel 3.3). In de rustige periode hebben een langere inspeeltijd (T02n) en een verlaging van het Prandtl/Schmidt getal (T5A) een duidelijk effect. Ook het gebruik van een Q-rand in plaats van een Q_H-rand (T8), en vervolgens een verhoging van 10% van het debiet (T5C) heeft (een wat kleiner) effect op de RMS-waarde. Tijdens de storm komen daar de berekeningen met een andere Manningwaarde (T2A en T2B) en de berekeningen met wind (T3A en T3B) nog bij. Bij deze laatste berekeningen wordt de zoutindringing tijdens de storm nog groter dan die al was, zodat de RMS-waarden toenemen flink toenemen.

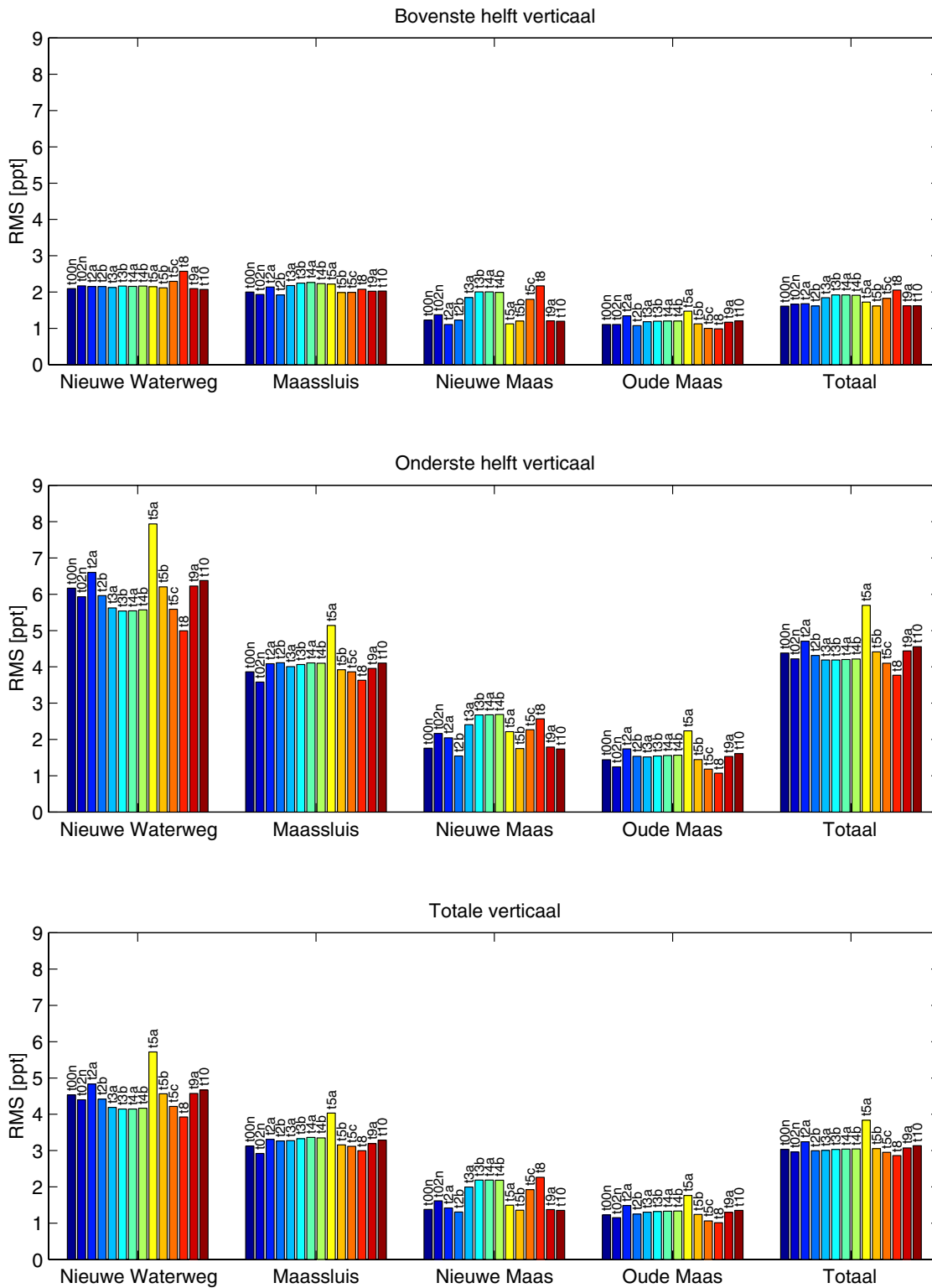
Verticalen:

In Figuur 9.10 wordt een overzicht gegeven van de RMS-waarden van de saliniteiten op de verticalen voor alle berekeningen. Onder in de verticaal zijn de RMS-waarden het grootst, vooral in de Nieuwe Waterweg. Het meest opvallend is het effect van een verlaging van het Prandtl/Schmidt getal (T5A). Onderin de verticaal is de RMS daardoor overal flink toegenomen, behalve in de Nieuwe Maas. Daarnaast heeft een verandering van de Manningwaarde veel invloed (T2A en T2B), vooral een afname met 10%, waardoor de RMS-waarden toenemen (T2A). Ook het gebruik van een Q-rand (T8) en het debiet 10% groter bij T5C) heeft effect; in het algemeen worden de RMS-waarden daardoor bovenin de verticaal groter en onderin de verticaal kleiner. Het toevoegen van wind (T3A en T3B) heeft alleen in de Nieuwe Maas een duidelijke verhoging van de RMS-waarden tot gevolg, waarbij een grotere Charnock-parameter (T3B) slechtere resultaten geeft. In de Nieuwe Waterweg worden de RMS-waarden bij deze berekeningen juist kleiner. Als vervolgens de turbulentieparameter c_u in de oppervlaktelaag wordt gevarieerd (T4A en T4B) heeft dat nauwelijks invloed. Een klein positief effect heeft verder de inspeeltijd (T02n) in de onderste helft van de verticaal, behalve in de Nieuwe Maas.

In Figuur 9.10 is de berekening met een aangepaste bodem niet opgenomen, omdat daarvoor geen vergelijking met metingen is uitgevoerd. Wel bleek uit deze berekening dat de invloed van de bodemligging op de saliniteit en de menging erg groot is (zie paragraaf 9.7).

Uit diverse berekeningen (T4A, T4B, T9A en T10) is gebleken dat ook de saliniteiten in deze situatie vrijwel niet gevoelig zijn voor veranderingen in de turbulente kinetische energie k en de mate van dissipatie van de turbulente energie ϵ .

RMS-overzicht verticalen: saliniteiten



Figuur 9.10: RMS-overzicht verticalen van de saliniteiten

10 Conclusies

In deze tweede pilot in het kader van Nautilus/reproductienauwkeurigheid is onderzocht wat de nauwkeurigheid in een vergelijking met in-situ waarnemingen is van het Rijmamo-grof-3D-model met betrekking tot waterstanden, stroomsnelheden en saliniteiten. Hierbij is vooral gekeken naar het Noordelijk Deltabekken. Daarnaast is door middel van een uitgebreide gevoeligheidsstudie gezocht naar de belangrijkste oorzaken van de opgetreden verschillen tussen de modelberekening en de metingen. Onderstaande conclusies hebben overigens alleen betrekking op het gebruikte Rijmamo-grof-3D-model in de periode najaar 1985. Bij belangrijke wijzigingen in het model of het gebruik van een ander model moet in principe opnieuw gezocht worden naar de belangrijkste foutenbronnen.

10.1 Conclusies met betrekking tot het Rijmamo-grof-3D-model

De periode in het najaar van 1985 waarvoor de berekeningen zijn uitgevoerd wordt gekenmerkt door een extreem lage rivierafvoer en het optreden van een storm. Het algemene beeld dat in de vergelijking met metingen naar voren komt is dat de resultaten in het algemeen minder nauwkeurig zijn tijdens een storm en dat er een grote ruimtelijke variatie is voor de nauwkeurigheid van stroomsnelheden en saliniteit. De grootste verschillen lijken zich te bevinden in de zoutindringing. Hierdoor zijn de gevonden verschillen het grootst op die plaatsen waar de ruimtelijke variatie van de saliniteit het grootst is. De waargenomen verschillen zijn niet willekeurig maar vrij systematisch van aard. Zo wordt bijvoorbeeld in de Nieuwe Waterweg de saliniteit bij de bodem voor de gehele periode door het model onderschat, verder in het binnengebied in de Nieuwe Maas is dit omgekeerd. De fouten in saliniteit en stroming lijken sterk gerelateerd.

Onderstaande tabellen geven een overzicht van de waargenomen gemiddelde nauwkeurigheden over de hele periode van de validatie.

RMS waterstanden (cm)	rustige periode	storm	Totaal
Totaal	5.6	8.5	6.8

RMS snelheid (cm/s)	0-8 m onder NAP	>8 m onder NAP	Totaal
Nieuwe Waterweg	19	29	24
Nieuwe Maas	13	15	14
Oude Maas	14	26	17
Totaal	16	25	20

RMS saliniteit (ppt)	0-8 m onder NAP	>8 m onder NAP	Totaal
Nieuwe Waterweg	2.1	6.2	4.5
Maassluis	2.0	3.9	3.1
Nieuwe Maas	1.2	1.8	1.4
Oude Maas	1.1	1.4	1.2
Totaal	1.6	4.4	3.0

Een deel van de onzekerheid wordt veroorzaakt door de mate van nauwkeurigheid van de metingen. Deze nauwkeurigheid is onvoldoende bekend om een uitspraak te kunnen doen over de bijdrage ervan aan de totale fout.

Om de bronnen in het model op te sporen, die bijdragen aan de verschillen tussen modelberekeningen en metingen, zijn diverse numerieke en fysische parameters onderzocht. Hierbij viel op dat een groot aantal modelparameters, waarvan vooraf de inschatting was dat deze van belang zouden zijn, nauwelijks invloed hadden op de berekeningsresultaten.

Van de onderzochte numerieke aspecten bleek uiteindelijk dat er slechts twee significante bijdragen waren. De grootste invloed heeft de horizontale resolutie. Daarnaast is de in TRIWAQ verwaarloosde niet-orthogonale component van de drukgradiënt in een aantal gebieden ongeveer 10% van de totale drukgradiënt. Hoewel dit natuurlijk in principe een grote bijdrage aan de gevonden verschillen kan verklaren is dat op dit moment niet met zekerheid te zeggen omdat er mogelijk een andere balans in het model kan ontstaan met een iets andere waterstand, maar ongeveer dezelfde stroomsnelheden. De andere onderzochte factoren waren van ondergeschikt belang. Bijvoorbeeld de tijntegratie had slechts een invloed van orde 0.03 ppt op de saliniteit, maar ook het aantal lagen had weinig invloed.

Ook van de onderzochte fysische parameters hadden de meeste weinig invloed op de resultaten binnen de door ons toegepaste variaties. Zo hadden variaties m.b.t tot het turbulentiemodel soms wel enige invloed (tot enkele tienden ppt en enkele cm/s), maar bij lange na niet voldoende om de opgetreden verschillen te verklaren. Ook een variatie van de bodemwrijving had, bij een realistische variatie van 10% van de Manningwaarde betrekkelijk weinig invloed. Het gebruik van wind in de oppervlakterandvoorwaarde van het turbulentiemodel had tijdens een storm wel een behoorlijke invloed, toch kan men hiermee niet de optredende verschillen bij rustiger weer verklaren. Bij het gebruik van een Q_H-rand aan de rivierzijde is de invloed van de gebruikte debieten gering, wat vooral wordt veroorzaakt door een directe compensatie via het waterstandsdeel van de rand. Bij gebruik van een Q-randvoorwaarde, zoals gebruikelijk voor het Zeedelta-model, is er wel een duidelijke invloed. Toch kan dit de waargenomen modelfouten niet verklaren doordat deze debieten voor zover bekend redelijk nauwkeurig bekend zijn. Bij bijvoorbeeld het gebruik van het model voor operationele verwachtingen is deze invloed daarom waarschijnlijk wel van belang. Ongeveer hetzelfde geldt voor de randvoorwaarde aan de zeezijde van het model.

Wél een grote invloed op de zoutindringing werd geconstateerd voor variaties van de schematisatie van de bodem. Gezien het feit dat de gebruikte bodemgegevens aanzienlijk recenter waren dan de uitgevoerde berekeningen zou dit een behoorlijk deel van de verschillen kunnen verklaren. Omdat er geen goede bodemgegevens voor 1985 beschikbaar waren kon deze invloed niet rechtstreeks bepaald worden. De onzekerheid over de nauwkeurigheid van de

schematisatie bij een veroudering van meerdere jaren was binnen de beschikbare tijd niet goed in te schatten. Aangezien deze factor mogelijk een dominante bijdrage levert in de fouten-balans is het op dit moment niet zinnig te proberen een dergelijke balans op te stellen. Tenslotte is het op dit moment niet uit te sluiten dat er nog andere, niet onderzochte, factoren een bijdrage leveren in deze balans.

10.2 Algemene conclusies

Een belangrijk doel van deze tweede pilot van het projectonderdeel reproductienauwkeurigheid van Nautilus is het testen van de methodiek voor het bepalen van de nauwkeurigheid van modellen en de belangrijkste foutenbronnen voor een 3-D model. Deze opzet is voor een belangrijk deel geslaagd.

Ten eerste kan, mits er voldoende metingen beschikbaar zijn, met een programma als basisanalyse een duidelijk overzicht worden verkregen van de nauwkeurigheid van een model. Hierbij is het van belang veel energie te steken in een compacte en intuïtieve weergave van de resultaten omdat men anders verzandt in een grote hoeveelheid figuren waaruit moeilijk de belangrijkste aspecten kunnen worden bepaald.

Vervolgens kan met een gevoeligheidsstudie worden gezocht naar de belangrijkste bijdragen aan de daarvoor gevonden verschillen. Met een foutenbalans kan steeds worden ingeschat of alle belangrijke factoren zijn opgespoord. Bij dit zoeken naar foutenbronnen speelt kennis van degene die de experimenten opstelt een grote rol. Het aantal parameters in het model is immers zo groot dat bij willekeurig zoeken de kans groot is dat er lang gezocht moet worden naar de juiste oorzaken. In principe moet dit onderzoek bij iedere belangrijke wijziging in het model herhaald worden.

Tenslotte zijn in deze pilot goede aanwijzingen gevonden voor verbetering van het model en modellering van de onzekerheden. Hoewel op dit moment nog geen uitsluitel kan worden gegeven over de belangrijkste factoren in de foutenbalans met een kwantitatieve schatting van de bijdragen, is er goede vooruitgang geboekt in deze richting en is er vertrouwen ontstaan dat de gebruikte methodiek werkt.

11 Aanbevelingen

- Uit de experimenten die zijn uitgevoerd met een aangepaste bodemschematisatie bleek dat de zoutverdeling vrij gevoelig is voor de nauwkeurigheid van de schematisatie. Hierdoor is het vermoeden ontstaan dat een betere schematisatie (passend bij de gesimuleerde periode) veel betere modeluitkomsten zal geven. Om dit te controleren is het aan te bevelen nieuwe berekeningen uit te voeren met betere (passender) bodemgegevens.
- Door de grote gevoeligheid van de zoutindringing voor variaties van de bodem is het noodzakelijk de schematisatie van het model zeer zorgvuldig te maken. Dit impliceert o.a. het gebruik van lodingsgegevens die bij de betreffende simulatieperiode horen, met voldoende resolutie en een nauwkeurige interpolatie (mogelijk zelfs specifiek met het oog op de waterbeweging).
- De werkelijke invloed van de op dit moment ontbrekende niet-orthogonale component van de drukgradiënt kan goed worden onderzocht door deze termen in TRIWAQ te implementeren. Gezien de grootte van deze termen in verhouding tot de andere krachten in de balans kan dit aanzienlijke verbeteringen van de modelnauwkeurigheid opleveren.
- Doordat het zoutveld zich maar langzaam aanpast aan de getijbeweging kan een correctie van dit veld door middel van data-assimilatie heel effectief zijn. Omdat er weinig ervaring is met het assimileren van saliniteitsmetingen is hier verder onderzoek noodzakelijk.
- De periode in 1985 waarvoor de berekeningen zijn uitgevoerd wordt gekenmerkt door een veel lagere afvoer van de Rijn dan gemiddeld. Als gevolg hiervan is de zoutindringing verder dan gebruikelijk. Om de conclusies voor deze periode te kunnen generaliseren naar andere periodes met veel hogere afvoer zijn extra berekeningen nodig voor een dergelijke periode.

Referenties

- [1] Alkyon Hydraulic Consultancy, *Zeedelta model, Bouw en eerste afregeling*, RIKZ, Werkdocument RIKZ/OS-98.111X, april 1998
- [2] Alkyon Hydraulic Consultancy, *Zeedelta model, aanpassing model*, RIKZ, Werkdocument RIKZ/OS-98.146X, oktober 1998
- [3] Alkyon Hydraulic Consultancy, *Gereduceerd Zeedelta model, Bouw en afregeling*, RIKZ, Werkdocument RIKZ/OS-99.133X, juni 1999
- [4] Brouwer, J.R., G.B. van Baren, *Gebruikershandleiding BASISANALYSE, Een standaard uitvoer set voor Waqua/Triwaq berekeningen, versie 2.0*, SIMTECH, juni 1999
- [5] Brouwer, J.R., *User's Guide KALMAN, Preprocessor ADOBS, Append observed data to a Waqua SDS-file, versie 1.1*, SIMTECH, september 1998
- [6] Cohen, P.F.D., *Gevoeligheidsonderzoek met een numeriek getijmodel voor nauwkeurige reproductie van de waterbeweging in het Haringvliet*, Afstudeerverslag TUD, RIKZ, Werkdocument RIKZ/OS-99.126X, juni 1999
- [7] Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, Distrikt Zuidwest, *Relatie geleidendheid - chlorideconcentratie Noordelijk Deltabekken <1980 en 1981>*, Nota nr. 71.004.04, oktober 1983
- [8] Eckart, C., *Properties of water, Part II. The equation of state of water and sea water at low temperatures and pressure*, Amer. J. of Sci., vol. 256, p. 225-240, 1958
- [9] Ingenieursbureau Svašek B.V., *Calibratie, validatie en berekeningen Rijmamo 3D t.b.v. Mer Beheer Haringvlietsluizen, Deelrapport Fase A, Deel 1, verwerking meting 1985*, november 1996
- [10] Ingenieursbureau Svašek B.V., *Reproductienauwkeurigheid, Berekeningen met Rijmamo-grof.1-3D, verslag fase 1: Conversie metingen, oplevering PRES2ADOBS, rapport 99242/1108*, juni 1999
- [11] Ingenieursbureau Svašek B.V., *Reproductienauwkeurigheid, Berekeningen met Rijmamo-grof.1-3D, verslag conversie saliniteitsreeksen, rapport 99295/1108*, juni 1999
- [12] Ingenieursbureau Svašek B.V., *Het Rijmamo 3D₁₀ (v2) model versus het Rijmamo 3D₇ (v2) model; Verificatie aan de hand van de meetset "doorgestoken Beerdam"*, RIKZ, Werkdocument RIKZ/OS-99.129X, 1999
- [13] Ingenieursbureau Svašek B.V., *Reproductienauwkeurigheid, Berekeningen met Rijmamo-grof.1-3D voor onderzoek naar de invloed van fysische parameters*, RIKZ, Werkdocument RIKZ/OS-99.146X, september 1999
- [14] Ingenieursbureau Svašek B.V., *3D-simulatie van de zoutindringing in het Haringvliet tijdens de meetproef maart 1997; Faserapportage Fase 3: Gevoeligheid sluisformulering*, RIKZ, Werkdocument RIKZ/OS-99.152X, november 1999
- [15] Ingenieursbureau Svašek B.V., *Reproductie van de zoutindringing in het Rijn-Maasmond gebied met de modellen Zeedelta 3D₁₀ en Rijmamo 3D₁₀; Periode oktober - november 1985*, RIKZ, Werkdocument RIKZ/OS-99.156X, november 1999
- [16] Kranenborg, B, A.Z.Visser, *Lage afvoermeting 1985*, DBW/RIZA, Werkdocument 89.130X, december 1989

-
- [17] Plieger, R. *Alternatieve rivierrandvoorwaarden Rijmamo-model*, RIKZ, Werkdocument RIKZ/OS-99.131X
 - [18] Verlaan, M, M.Zijlema, M.H.P. Jansen, *Reproductienauwkeurigheid van modellen, Pilot 1: het Westerscheldemodel Scalwest*, RIKZ, Werkdocument RIKZ/OS-98.166X, december 1998.
 - [19] Vollebregt, E.A.H., Vortech Computing, *Parallel TRIWAQ op een SGI Cray Origin2000 supercomputer*, Technisch Rapport, TR99-06, juni 1999
 - [20] Zijlema, M., SEPRA RKZ-438 *TRIWAQ three-dimensional shallow water flow model, Technical documentation, Version 1.1*, RIKZ, mei 1998
 - [21] Zijlema, M., *Modellering van de sluis; overzicht van Q-h relaties in WAQUA en herziening 3D sluisformulering met testberekening*, RIKZ, Werkdocument RIKZ/OS-99.145X, september 1999