

**Modelleren van  
zoutverspreiding met  
SOBEK 3 en SOBEK-RE**





## **Modelleren van zoutverspreiding met SOBEK 3 en SOBEK-RE**

Ymkje Huismans  
Frans Buschman  
Carine Wesselius  
Jeroen Daniels  
Kees Kuijper

1230077-003



## Titel

Modelleren van zoutverspreiding met SOBEK 3 en SOBEK-RE

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Yann Friocourt (RWS-WVL)	1230077-003	1230077-003-ZWS-0003	75
Martin Scholten (RWS-WVL)			
Neeltje Kielen (RWS-WVL)			

## Trefwoorden

Dispersie, 1D modellering, zoutindringing, SOBEK-RE, SOBEK 3, dispersieformulering, branch-mouth relatie

## Samenvatting

Voor modellering van zoutverspreiding in estuaria wordt in 1D hydrodynamische modellen de dispersiecoëfficiënt gebruikt om processen te simuleren die in werkelijkheid worden veroorzaakt door 3D processen. Voor de dispersiecoëfficiënt zijn formuleringen van Thatcher-Harleman, Savenije, Kuijper en van Rijn, Gisen en Zhang eerder succesvol gebleken in analytische modellen. In dit project zijn deze formuleringen met SOBEK 3 gevalideerd voor prismatische kanalen en convergente estuaria. De validatie van de prismatische kanalen is gedaan aan de hand van de getijgootproeven van Rigter, waarin systematisch de diepte, getijamplitude, ruwheid, relatieve dichtheid, lengte en afvoer zijn gevarieerd. Op basis van deze validatie is geconcludeerd dat de formulering van Kuijper en van Rijn de zoutindringingslengte het beste beschrijft. Voor convergente estuaria heeft validatie plaats gevonden aan de hand van metingen van 11 estuaria onder verschillende condities. Hieruit kwam er niet eenduidig één formulering als beste naar voren.

Ter evaluatie van de dispersieformulering in SOBEK 3 voor een vertakt en werkelijk estuarium is het jaar 2003 doorgerekend voor de Rijn- en Maasmondingschematisatie. De riviertakken in dit gebied zijn over het algemeen prismatisch. Omdat de Kuijper en van Rijn formulering het beste presteert voor prismatische kanalen, is deze formulering gebruikt voor de evaluatie. Zonder kalibratie voor zout is de trend van de berekende zoutgehalten vergelijkbaar met de metingen. Daarbij valt op dat in de Oude Maas de berekende zoutconcentraties te hoog zijn en in de Nieuwe Maas te laag. Hier zijn twee potentiële verklaringen voor: 1) de 3D verspreidingsprocessen op het splitsingspunt worden niet goed weergegeven in het 1D model waardoor te veel zout naar de Oude Maas gaat en te weinig naar de Nieuwe Maas, of 2) de relatie van de dispersie in beide takken aan de zeemonding (Hoek van Holland) veroorzaakt dit probleem, omdat de dispersie in deze beide takken in werkelijkheid verschilt. Aanbeveling is alternatieven voor de relatie van de dispersie aan de zeemonding te onderzoeken en deze nieuwe relatie in te bouwen in SOBEK 3.

## Referenties

KPP modelschematisaties (1230041-004: zoutvragen als onderdeel van RMM schematisatie) en KPP verzilting (advies hydraulische modellen)

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	dec. 2016	Ymkje Huismans	<i>yh</i>	Meinard Tiessen	<i>MT</i>	Gerard Blom	<i>6.2</i>
						<i>E. Jansen</i>	<i>J</i>

## Status

Definitief



## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1	Aanleiding	1
1.2	Doel en afbakening	1
1.3	Dispersie in SOBEK 3 en SOBEK-RE	2
1.4	Aanpassingen aan software	3
1.5	Overzicht toepassingen	4
1.6	Betrokken personen	5
1.7	Leeswijzer	5
<b>2</b>	<b>Theorie van 1D zoutmodellering</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Implementatie van dispersie in SOBEK</b>	<b>15</b>
3.1	Dispersieformulering	15
3.1.1	Beschikbare dispersieformuleringen in SOBEK-RE	15
3.1.2	Thatcher Harleman formulering in SOBEK-RE	15
3.1.3	SOBEK 3.6.2	17
3.2	Branch-mouth relaties	18
3.3	Andere 1D-hydraulische modellering pakketten	18
<b>4</b>	<b>Validatie dispersieformuleringen</b>	<b>19</b>
4.1	Inleiding	19
4.2	Validatie datasets	19
4.2.1	Rigter proeven	19
4.2.2	Convergente estuaria	20
4.3	Validatie aangepaste vorm Thatcher Harleman formulering	20
4.3.1	Rigter proeven	20
4.4	Validatie nieuwe dispersieformuleringen	24
4.4.1	Inleiding	24
4.4.2	Individuele testen	25
4.4.3	Rigter proeven	25
4.4.4	Convergente estuaria	29
4.4.5	Verbeteringen op basis van validatie aangepaste Thatcher Harleman formulering	32
4.5	Vertakte estuaria: Branch Mouth relaties	32
4.6	Discussie	33
4.6.1	Welke formulering is de beste?	33
4.6.2	Waarom verschillende formuleringen voor prismatische en convergente estuaria?	33
4.6.3	Dispersie in systemen zonder getij of zonder rivierafvoer	34
<b>5</b>	<b>Vergelijking SOBEK 3.6 (met f4-term) voor de RMM</b>	<b>35</b>
5.1	Inleiding	35
5.2	Hydrodynamica	35
5.2.1	Evaluatie 2003	35
5.2.2	Evaluatie 2011	38
5.3	Chloride concentraties	41
5.3.1	Evaluatie 2003	41

5.3.2	Evaluatie 2011	44
5.4	Vergelijking SOBEK-RE en SOBEK 3	45
5.5	Discussie	50
<b>6</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>51</b>
6.1	Conclusies	51
6.2	Aanbevelingen	52
6.3	Samenvatting plan van aanpak 2017	53
<b>Bijlage(n)</b>		
<b>A</b>	<b>Vergelijking SOBEK 3.3 (zonder f4-term) en SOBEK-RE</b>	<b>A-1</b>
A.1	Inleiding	A-1
A.2	Werkwijze	A-1
A.3	Resultaten	A-2
A.3.1	Chlorideconcentraties	A-2
A.3.2	Waterbeweging, waterstand en zoutgehalte bij Maassluis	A-6
A.3.3	Dispersiecoëfficiënten	A-8
A.4	Samenvatting	A-9
<b>B</b>	<b>Aangepaste variant Thatcher Harleman in SOBEK-RE</b>	<b>B-1</b>
B.1	Afleiding formulering	B-1
B.2	Vergelijking grootheden Thatcher Harleman dispersieformulering met implementatie in SOBEK-RE	B-2
B.2.1	F4-term: longitudinale dispersie ten gevolge van dichtheidsgradiënten.	B-2
B.2.2	Estuarium Richardson getal	B-4
B.2.3	Derde term: dispersie in een volledig gemengd systeem (Taylor dispersie coëfficiënt)	B-5
B.3	Toelichting verschillen	B-5
B.3.1	Extra term $c/c_0$	B-5
B.3.2	Middeling over twee getij perioden van $\partial c / \partial x$	B-5
B.3.3	Onderscheid $u_0 * j$ en $u_{0j}, t$	B-6
B.3.4	Hydraulische straal versus de waterdiepte	B-6
B.3.5	Lengte estuarium	B-6
B.3.6	Tijd(on)afhankelijkheid $u_0, h_0$ en $s_0$ .	B-7
B.3.7	$f_1$ en $f_3$	B-7
B.3.8	Branch Mouth relatie	B-7
<b>C</b>	<b>Details Branch Mouth relaties in SOBEK-RE</b>	<b>C-1</b>
C.1	Branch-mouth relaties in de SOBEK-RE handleiding	C-1
C.2	Gebruik branch-mouth relaties in SOBEK-RE NDB model	C-1
<b>D</b>	<b>Data convergente estuaria</b>	<b>D-1</b>



# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

Het aantal toepassingen van het 1D hydrodynamisch modelsysteem SOBEK voor berekening van zoutindringing in het hoofdwatersysteem neemt toe. Tegelijk groeit de verwachting van de nauwkeurigheid van resultaten uit SOBEK. Ondanks dat met 3D modellen nauwkeuriger resultaten verkregen kunnen worden, wordt SOBEK vaak toegepast vanwege de beperkte rekentijd. SOBEK is daarmee geschikt om lange perioden door te rekenen. Daarmee groeit het belang voor Rijkswaterstaat om te weten waar de mogelijkheden en grenzen liggen van toepassing van SOBEK voor zoutvragen.

Daarnaast is in opdracht van Rijkswaterstaat als nieuwe generatie 1D software met zoutfunctionaliteit SOBEK 3 ontwikkeld. SOBEK-RE, SOBEK-RUR en DUFLOW software zijn inmiddels vervangen door SOBEK 3. Dit neemt niet weg dat voor het beantwoorden van vragen over zoutverspreiding vooral nog SOBEK-RE modelschematisaties in gebruik zijn. Het is de bedoeling dat op termijn alleen nog SOBEK 3 wordt gebruikt. Validaties van modellen in SOBEK 3 zijn vooral gericht geweest op waterstand en debiet. Bovendien is in eerste instantie niet de volledige zoutformulering van SOBEK-RE overgenomen in SOBEK 3. De verschillen in de zoutformulering van vervangen pakketten en SOBEK 3 zijn aanleiding voor een validatie van de geschiktheid voor zoutmodellering met SOBEK 3.

## 1.2 Doel en afbakening

Het lange termijn doel is om aan te geven voor welke toepassingen SOBEK 3 voldoende nauwkeurig is en voor welke toepassingen alleen een 3D model voldoende nauwkeurig is, waarbij onderscheid gemaakt wordt in modeltoepassing voor beleidsanalyse en voor operationele doeleinden. Voordat deze grens aangegeven kan worden zijn er nog verschillende vragen te beantwoorden, zoals of de juiste trend aangegeven wordt wanneer een watersysteem verandert of wanneer extreme condities optreden waarop het model niet is gekalibreerd.

De eerste stap hierin is om de gebruikte dispersieformuleringen in SOBEK 3 te valideren en indien nodig te verbeteren met de nieuwste wetenschappelijke kennis en wederom te valideren. Dit is het doel van het huidige project.

Het project is afgebakend met de volgende punten:

- Het valideren van 3D modellen valt niet binnen dit project. Mogelijk kunnen gevalideerde 3D modellen wel gebruikt worden om SOBEK resultaten te valideren.
- Alleen estuaria worden beschouwd, en niet systemen waar getij of rivierafvoer klein zijn of wind een grote invloed heeft op de zoutverspreiding.
- Het doel is om dynamische zoutberekeningen te kunnen doen (zoals in Thatcher en Harleman, 1972), en dus niet om statische zoutberekeningen te doen welke met analytische modellen worden uitgevoerd. De reden hiervoor is dat met SOBEK 3 dynamisch wordt gerekend.
- Zoutconcentraties kunnen ook worden bepaald met WAQ, waarmee zout als passieve tracer wordt gemodelleerd. Omdat bij WAQ het zout geen invloed heeft op de stroming door het verhogen van de dichtheid, wordt WAQ verder buiten beschouwing gelaten.

- Het verbeteren van bestaande schematisaties zoals die voor het RMM gebied valt niet binnen dit project, hoewel berekeningen worden uitgevoerd met bestaande RMM schematisaties.

### 1.3 Dispersie in SOBEK 3 en SOBEK-RE

Zout wordt in estuaria verspreid door een landwaartse stroming bij de bodem en een zeewaartse stroming gemiddeld over het getij. Dit proces wordt estuariene circulatie genoemd. Zoutverspreiding door dit proces en andere 3D processen kunnen met 3D modellen worden berekend. Voor 1D modellen wordt stroming en zoutgehalte gemiddeld over de dwarsdoorsnede. Verschillen in de verticaal (of breedte) bestaan niet. Om deze reden worden de effecten van 3D processen zoals de estuariene circulatie meegenomen in een dispersiecoëfficiënt.

Er zijn verschillende formuleringen voor de dispersiecoëfficiënt in analytische 1D modellen beschreven (Savenije, Thatcher-Harleman, Kuijper en van Rijn, Gisen en Zhang). Deze formuleringen maken allen gebruik van de verhouding tussen de stratificerende werking van de rivierafvoer en de menging door het getij (estuariene Richardson getal). Ook hebben zij een afhankelijkheid met de gradiënt in het zoutgehalte langs het estuarium.

De dispersieformulering in SOBEK-RE is gebaseerd op de Thatcher Harleman formulering (zie gedetailleerdere uitleg in §2.3.1, §3.1.1 en 3.1.2) en kent 3 termen: de  $f_1$ -term (constante), welke de achtergronddispersie representeert, de  $f_3$ -term, welke de Taylor dispersie weergeeft en de  $f_4$ -term, welke afhankelijk is van onder andere het estuariene Richardson getal en de zoutgradiënt. Op basis van de theorie is met name  $f_4$ -term onontbeerlijk voor een fysisch onderbouwd model.

Door juiste waarden te gebruiken voor de parameters wordt de uitdrukking grotendeels identiek aan Thatcher-Harleman<sup>1</sup> en heeft de zoutmodellering een fysische basis. Dit betekent dat het model ingezet kan worden voor andere gebieden en situaties dan waarvoor gekalibreerd is. Wel dient hier de kanttekening te worden gemaakt dat de praktische implementatie gedeeltelijk afwijkt van de Thatcher-Harleman formulering, zie Bijlage B. Of dit bezwaarlijk is, is niet bekend.

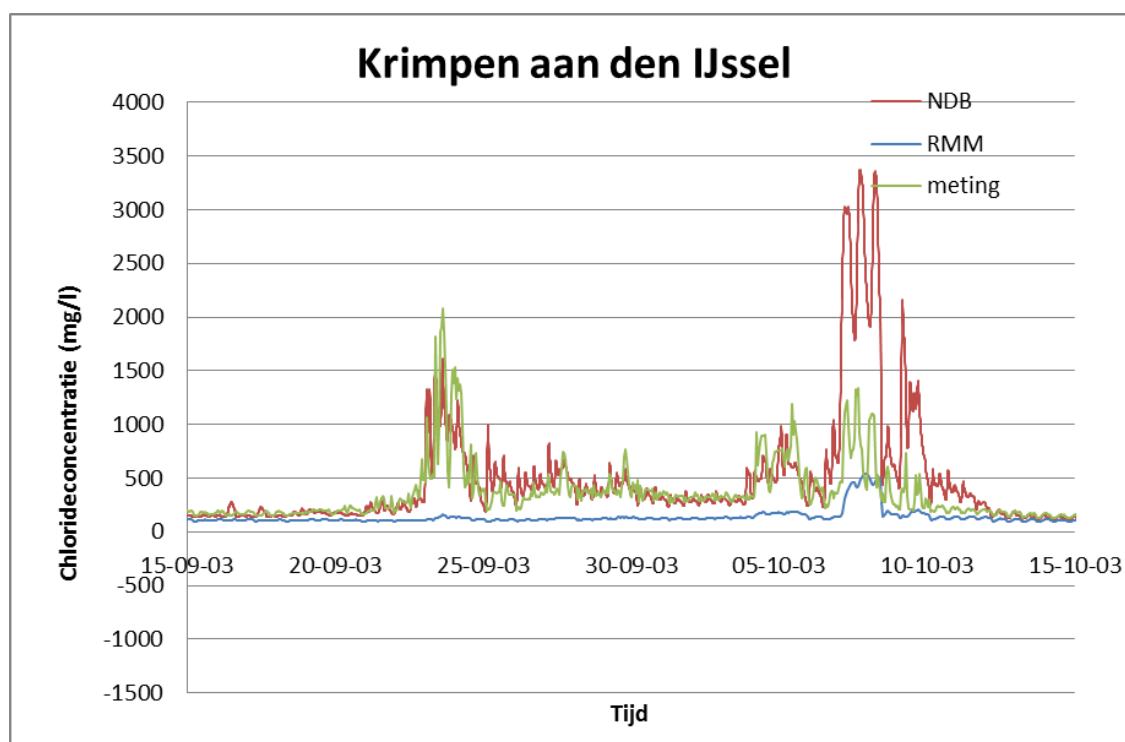
In SOBEK-RE wordt de lokale dispersie bepaald op basis van dispersie in de monding keer de lokale zoutgradiënt. Voor iedere tak in het model is aangegeven op basis van de gegevens van welke monding de dispersiecoëfficiënt moet worden bepaald. Deze relatie heet de branch-mouth relatie. Deze keuze voor hoe de dispersiecoëfficiënt wordt bepaald is, net als de keuze van de formulering, naar verwachting bepalend voor de resultaten van zoutverspreiding. In dit project is alleen de formulering gevalideerd en niet de branch-mouth relatie.

In SOBEK 3 is er in eerste instantie voor gekozen de dispersieformulering te beperken tot de  $f_1$  en  $f_3$  term. Hiermee valt de belangrijkste term ( $f_4$ ) weg uit de formulering. Toch zijn er op basis van een gedegen kalibratie redelijk goede resultaten behaald voor de zoutconcentraties, zoals blijkt uit het SOBEK 3 model van de Rijn Maasmonding (Berends 2015). Echter, omdat de fysische basis uit de dispersieformulering weg is gevallen, is de voorspellende waarde voor afwijkende situaties, zoals een extreem lage rivierafvoer, naar

---

<sup>1</sup> In de periode dat is gewerkt aan softwarepakket ZWENDL, de voorloper van SOBEK, zijn enkele aanpassingen gemaakt aan Thatcher Harleman formulering om zoutverspreiding in de Nieuwe Waterweg beter te kunnen modeleren (zie §3.1.2)

verwachting gering of heeft het zelfs geen voorspellende waarde. Daarnaast maakt het SOBEK 3 minder geschikt voor nieuwe gebieden waar weinig metingen voor bekend zijn, omdat een goede modellering van zout alleen nog maar mogelijk is op basis van een uitgebreide kalibratie en niet langer op basis van de standaardwaarden voor de dispersieparameters, zoals in SOBEK-RE. Deze veronderstelling werd begin 2016 bevestigd door een beknopte validatie van het SOBEK 3.3 model van de Rijn-Maasmonding voor een lage rivierafvoer. Waar voor de gekalibreerde situaties (bovengemiddelde rivierafvoeren) redelijk goede resultaten werden behaald voor de zoutconcentraties, werden deze zwaar onderschat voor het relatief droge jaar 2003 (afvoeren bij Lobith waren vanaf het voorjaar onder het gemiddelde van 2200 m<sup>3</sup>/s). Dit is geïllustreerd voor Krimpen aan de IJssel in Figuur 1.1. Een uitgebreide beschrijving van deze validatie is te vinden in Bijlage A. Samen met de verkennende studie in 2015 gaven deze resultaten aanleiding tot het toevoegen f<sub>4</sub>-term in SOBEK 3.6, waarmee de Thatcher Harleman formulering weer compleet was, en het nader evalueren van deze formulering in dit onderzoek.



Figuur 1.1 Resultaten van het SOBEK-RE NDB model (rood), het SOBEK 3-RMM model (blauw) en de metingen voor het jaar 2003 (boven) en de periode 15/9/2003-15/10/2003 (onder) op de locatie Krimpen aan den IJssel

#### 1.4 Aanpassingen aan software

SOBEK 3 maakt onderdeel uit van de vijfde generatie software (NGHS) en heeft eerdere 1D pakketten vervangen. De officiële versie was begin 2016 SOBEK 3.4.1 en aan het eind van 2016 3.6.2. In versie 3.3 was de  $f_4$ -term niet geïmplementeerd. In SOBEK versie 3.6.2 is de  $f_4$ -term weer geïmplementeerd, evenals nieuwe dispersieformuleringen. Een overzicht hiervan is gegeven in Tabel 1.1.

Tabel 1.1 Overzichtstabel met de gebruikte SOBEK versies en bijbehorende aanpassingen.

Model	Termen	Formulering	Toepassing in dit project
SOBEK-RE NDB	f1, f3, f4	Thatcher-Harleman	H2: 2003 Casus
SOBEK 3.3	f1, f3 expliciet schema	Geen	
SOBEK 3.6 <i>beta 1</i>	f1, f3, f4 impliciet schema en van Leer advection schema	Thatcher-Harleman	Par 5.3: Rigter proeven en convergente estuaria
SOBEK 3.6 <i>beta 2</i>	f1, f3, f4-uitgebreid impliciet schema en van Leer advection schema	Kuijper en van Rijn- <i>prismatisch</i> en Gisen	Par 5.4: Rigter proeven
		Thatcher-Harleman Kuijper en van Rijn- <i>convergent</i> , Gisen, Savenije, Zhang	Par 5.5: Convergente estuaria
SOBEK 3.6 <i>beta 3</i>	f1, f3, f4-uitgebreid + verbetering definitie vloedvolume impliciet schema en van Leer advection schema	Alle: Thatcher Harleman, Kuijper en van Rijn- <i>prismatisch</i> en <i>convergent</i> , Gisen, Savenije, Zhang.	Par 5.4: Rigter proeven met Kuijper en van Rijn.
SOBEK 3.6.2	f1, f3, f4 met alle aanpassingen impliciet schema en van Leer advection schema	Alle	H6: 2003 Casus en 2011 Casus met Kuijper en van Rijn.

Naast de dispersieformulering zijn er in 2016 nog twee aanpassingen doorgevoerd aan SOBEK 3 op het gebied van zoutmodellering. Het dispersieschema voor stoftransport is impliciet gemaakt, zodat de dispersiecoëfficiënt niet meer geknepen hoeft te worden (vanaf versie 3.6). Daarnaast is het advection schema aangepast naar het Van Leer-2 advection schema uit Delft3D-FLOW. Dit advection schema zal minder dispersief gedrag vertonen dan het schema in SOBEK 3.3. Dispersie wordt hierdoor minder door numerieke dispersie bepaald en daarmee relatief meer door fysische oorzaken.

## 1.5 Overzicht toepassingen

Om aan te geven op wat voor manier de software en schematisaties gebruikt worden, staat hieronder een overzicht van toepassingen. Er zijn twee schematisaties voor de Rijn- en Maasmonding: voor SOBEK-RE het Noordelijk Delta Bekken model versie 1\_1\_0 en voor SOBEK 3 het Rijn- en Maasmonding model: opgezet voor 1998 en 2015

Het SOBEK-RE NDB model is bij verschillende projecten (met opdrachtgever als eerste genoemd) toegepast:

- DPZW: effect klimaatverandering op zoutindringing en maatregelen daartegen
- DPZW: stresstest: robuustheid maatregelenpakket bij samenvallen klimaatverandering en (zout-negatieve) systeemingrepen
- RWS: korte termijn effect maatregelenpakket, cumulatief en individueel
- RWS: effect verdieping NWW, MER en beantwoording aanvullende vragen (door Hydrologic)
- RWS: Berekeningen met het Nationaal Water Model, o.a. ten behoeve van WABES.
- RWS: Jaarsommen, in recente jaren ook voor zout met SOBEK-RE NDB 1\_1\_0

SOBEK 3 toepassingen:

- RWS: Vismigratierivier tussen Waddenzee en IJsselmeer; Hier is een SOBEK 3 model vergeleken met een 2Dv model.
- RWS: onderzoek naar de Kier Haringvliet
- RWS: Zoutfluxontrafelaar: bepaling 3D flux componenten en vertaling in 1D dispersie
- RWS: RWsOS
- RWS: Voor jaarsom van 2003

Eerder uitgevoerde validatiestudies over zoutindringing met SOBEK zijn:

- Kalibratie van SOBEK-RE NDB 1\_0\_0 voor waterstand, afvoer en chlorideconcentraties (van Zetten en van der Linden, 2001)
- Validatie en kalibratie zoutbeweging met SOBEK-RE NDB 1\_1\_0 (Kraaijeveld, 2003)
- Validatie en kalibratie SOBEK 3-v1 voor hydrodynamica en zout (Berends, 2015)
- Data-modelvergelijking voor 2003 en 2011, focus op Krimpen en Hollandsche IJssel (Geert Prinsen en Emiel van Velzen)
- Testen in spoedadvies droogte
- Fundamentele testen van modelgedrag (SOBEK-RE, SOBEK-RUR en SOBEK 3) in vereenvoudigde schematisaties. Het gaat om een beperkt aantal testen.
- Vergelijking resultaten SOBEK-RE met de inlaatproef uit 1997 (in het kader van de studies naar Kier Haringvliet).

## 1.6 Betrokken personen

De meest betrokken personen en hun rol zijn:

- Jeroen Daniels (student TU Delft en daarna als junior onderzoeker)
- Ymkje Huismans (projectteam, begeleiding Jeroen)
- Jan Noort (programmeur SOBEK 3)
- Erik de Goede (deelprojectleider software kant)
- Kees Kuijper (adviseur)
- Carine Wesselius (2003 som)
- Wouter Kranenburg (adviseur)
- Rob Uittenbogaard (adviseur)
- Meinard Tiessen (reviewer)
- Frans Buschman (deelprojectleider)
- Aukje Spruyt (projectleider KPP modelschematisaties)
- Erik Ruijgh (projectleider KPP verzilting)

## 1.7 Leeswijzer

Dit rapport beschrijft validaties van verschillende versies van SOBEK 3 voor zoutverspreiding. Om de traceerbaarheid van informatie te vergroten, zijn het plan van aanpak van 2015 (Buschman et al. 2015) en de memo over doorrekenen van een droge periode (2003) ook in dit rapport opgenomen.

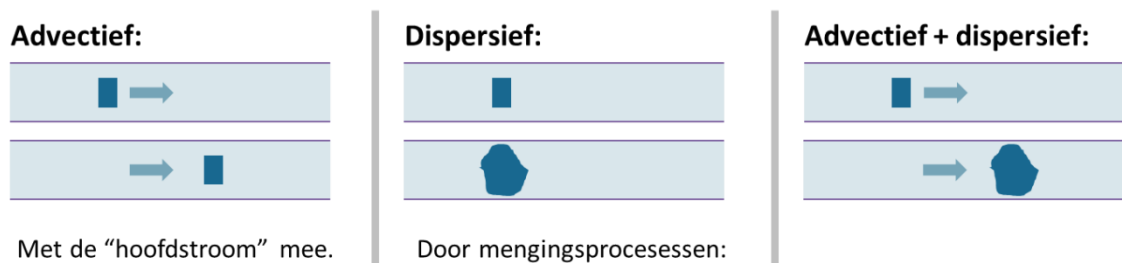
Hoofdstuk 2 beschrijft beknopt de theorie, waarbij wordt verwezen naar bijlagen voor details. In hoofdstuk 3 wordt de implementatie van dispersieformuleringen in SOBEK weer gegeven, inclusief de branch-mouth relaties. Hoofdstuk 4 beschrijft de uitgevoerde validaties voor prismatische kanalen en voor convergente estuaria. Hoofdstuk 5 beschrijft de resultaten van SOBEK 3 met f4-term. Tot slot worden conclusies en aanbevelingen gegeven.



## 2 Theorie van 1D zoutmodellering

### 2.1 Zoutbalansvergelijking

In 1D wordt het transport van zout bepaald door advection en dispersie, zie Figuur 2.1. Advection is de verspreiding van zout met de “hoofdstroom” mee. Onder dispersie van zout vallen alle verspreidingsprocessen die in 1D uitgemiddeld worden, zoals de dichtheidsstroming, turbulentie, interne golven, residuele circulatie, tijdelijke opslag van water in doodlopende takken (bv havenbekkens). Deze verspreidingsprocessen worden samengenomen in één dispersieterm.



Figuur 2.1 Schematische weergave van advection en dispersie transport in 1D modellen.

Zoutmodellering in 1D is gebaseerd op de 1D zoutbalansvergelijking:

$$\frac{\partial(Ac)}{\partial t} + \frac{\partial[A(u_{\text{getij}} - u_r)c]}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left( AD \frac{\partial c}{\partial x} \right) = 0 \quad (1)$$

Met,

$c$	- tijdafhankelijke 1-dimensionale zoutconcentratie [ $kg/m^3$ ]
$A$	- doorstroomoppervlak relatief tot het gemiddelde waterniveau [ $m^2$ ]
$t$	- tijd [ $s$ ]
$u_{\text{getij}}$	- getijsnelheid [ $m/s$ ] (positief in landwaartse richting)
$u_r$	- stroomsnelheid zoet water, afgeleid van de rivierafvoer [ $m/s$ ] (positief in zeewaartse richting)
$D$	- dispersiecoëfficiënt [ $m^2/s$ ]

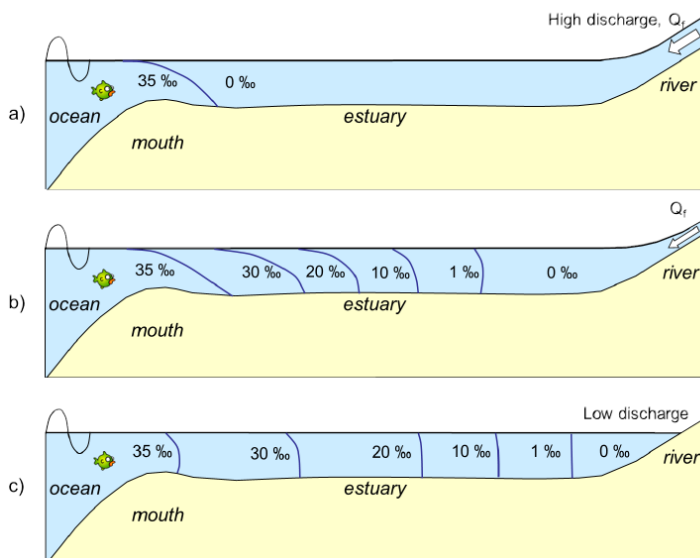
Deze vergelijking betekent dat de variatie van de zoutconcentratie in de tijd (eerste term) wordt bepaald door verspreiding van zout via advection (tweede term) en via dispersie (derde term). In de derde term bepaalt de dispersiecoëfficiënt  $D$  in grote mate het gedrag van dispersie. Voor de dispersiecoëfficiënt bestaan verschillende formuleringen, welke verderop in dit hoofdstuk aan bod zullen komen.

### 2.2 Verspreidingsprocessen

Zoals benoemd zijn er verschillende verspreidingsprocessen die in 1D uitgemiddeld worden. Verspreiding door dichtheidsstroming is een van de belangrijke processen, welke in alle dispersieformuleringen voorkomt. Deze wordt hier daarom nader toegelicht.

Doordat zout water een hogere dichtheid heeft dan zoet water treedt er een dichtheidsstroming op, waarbij het zoute water zich meer nabij de bodem bevindt en zoetwater meer nabij het oppervlak. De mate van verschil tussen zout en zoet in de

waterkolom (stratificatie) wordt grotendeels bepaald door de verhouding tussen het getijvolume en het rivierdebiet. Onder invloed van het getij wordt het systeem meer gemengd. Hoe groter het vloedvolume is ten opzichte van het door de rivier afgevoerde volume water, hoe lager de stratificatie, en andersom (zie Figuur 2.2).



Figuur 2.2 Verdeling van zoutconcentraties bij een gestratificeerde situatie (a), bij een gedeeltelijk gemengde situatie (b) en bij een goed gemengde situatie (c). Figuur overgenomen uit Savenije (2005, 2012).

Dit mechanisme is samengevat in het estuariumgetal (gedefinieerd in de monding van het estuarium):

$$E_d = \frac{\rho_w}{\Delta\rho} \frac{u_0^2}{g d_0} \frac{P_e}{Q_f T_P} \quad (2)$$

Met,

- $\Delta\rho$  - dichtheidsverschil tussen zee- en rivierwater [ $kg/m^3$ ]
- $\rho_w$  - dichtheid zeewater [ $kg/m^3$ ]
- $g$  - valversnelling [ $m/s^2$ ]
- $d_0$  - waterdiepte in de monding [ $m$ ]
- $u_0$  - amplitude van de getijsnelheid in de monding [ $m/s$ ]
- $Q_f$  - rivierafvoer [ $m^3/s$ ]
- $T_P$  - Getijperiode [ $s$ ]
- $P_e$  - vloedvolume in de riviermond [ $m^3$ ]

Bij een hoge waarde voor het estuariumgetal is er relatief veel kinetische energie van het getij beschikbaar voor de menging van zee- en rivierwater. Bij een lage waarde van het estuariumgetal, bijvoorbeeld als de rivierafvoer hoog is, is er sprake van stratificatie.

In 1D modellering wordt over de waterkolom gemiddeld en kunnen de verspreidingsprocessen ten gevolge van deze dichtheidsstroming niet direct gemodelleerd worden. Daarom is de dispersiecoëfficiënt van 1D modellen ordes groter dan voor 3D modellen. Details over verspreidingsprocessen, waaronder de stratificering door rivierafvoer en de menging door getij, zijn te vinden in het afstudeerrapport van Jeroen Daniels (Daniels, 2016).



### 2.3 Dispersieformuleringen

Er zijn verschillende dispersieformuleringen beschikbaar, welke allen een vergelijkbare vorm hebben (Savenije 2005, 2012):

$$D = D_0 \left( \frac{S}{S_0} \right)^K \quad (3)$$

Waarbij  $D_0$  en  $S_0$  respectievelijk de dispersie en de saliniteit (PPT) in de monding zijn en  $K$  de zogenaamde van den Burgh constante.

Met behulp van de tijdonafhankelijke vorm van de zoutbalans kan deze formule herschreven worden tot:

$$D = D_0 \left( \frac{\partial S}{\partial x} \right)^{\frac{1-K}{K}} = D_0 \left( \frac{\partial S}{\partial x} \right)^n \quad (4)$$

Met  $n = \frac{1-K}{K}$ . Voor  $n = 1$  is de dispersie een functie van de dispersie in de monding en de zoutgradiënt. Voor een waarde van  $n = 0$ , is de dispersie in het systeem gelijk aan de dispersie in de monding  $D_0$ , dit treedt op in systemen die volledig getij gedomineerd zijn. Voor waarden van  $n > 1$ , heeft de dispersie ook een laterale component, door variaties van de zoutgradiënten in de breedte.

In de rest van deze paragraaf zullen verschillende formuleringen de revue passeren zoals de formulering van Thatcher en Harleman (1972), welke dynamische zoutconcentraties van verschillende estuaria hebben berekend en Savenije (2012), Kuijper en van Rijn (2011), Gisen (2015) en Zhang (2016) die de statische zoutconcentraties berekend hebben van verschillende systemen. Alle deze formuleringen hebben een aantal componenten gemeen: 1) ze zijn evenredig met het Estuarine Richardson getal, 2) ze zijn evenredig met de zoutgradiënt.

#### 2.3.1 Thatcher en Harleman

De uitdrukking voor de dispersiecoëfficiënt volgens Thatcher en Harleman (1972) luidt:

$$D(x, t) = N \left| \frac{\partial \dot{S}}{\partial \dot{x}} \right| + E_T \quad (5)$$

Met,

$N$	- stratificatie parameter [ $m^2/s$ ]
$\dot{S}$	- dimensieloze 1D zoutconcentratie ( $\dot{c} = c/c_0$ ) waarbij $c_0$ de zoutconcentratie bij de monding is [-]
$\dot{x}$	- $\dot{x} = x/L$ , waarbij $L$ de lengte van het estuarium is [-]
$E_T$	- Taylor dispersiecoëfficiënt [ $m^2/s$ ]

De eerste term aan de rechterkant representeert de longitudinale dispersie die veroorzaakt wordt door dichtheidsgradiënten (zie §2.2). Omdat het aannemelijk is dat de dichtheid geïnduceerde circulatie het sterkste is in de gebieden waar de sterkste longitudinale dichtheidsgradiënten ( $\partial \dot{S} / \partial \dot{x}$ ) optreden, is het eerste deel van de dispersie term evenredig met  $\partial \dot{S} / \partial \dot{x}$ . De tweede term representeert de dispersie in een volledig gemengd systeem.

Op basis van veldexperimenten en schaalmodellen hebben Thatcher-Harleman voor  $N$  en  $E_T$  de volgende uitdrukkingen afgeleid:

$$N = ku_0L_eE_d^{-1/4} \quad (6)$$

$$E_T = 77und^{5/6} \quad (7)$$

Met,

- $k$  - een constante, met waarde 0.002 voor Delaware estuarium (Thatcher en Harleman, 1972) en 0.006 voor de Nieuwe Waterweg (Winterwerp 1980) [–]
- $u_0$  - maximale vloodsnelheid bij de monding [m/s]
- $L_e$  - lengte van het estuarium [m]
- $n$  - de Manning coëfficiënt
- $d$  - waterdiepte [m]

De volledige uitdrukking luidt nu:

$$D(x, t) = ku_0L_eE_d^{-1/4} \left| \frac{\partial \hat{c}}{\partial \hat{x}} \right| + 77und^{5/6} \quad (8)$$

Met deze dispersieformulering hebben Thatcher en Harleman (1972) voor verschillende estuaria de tijdafhankelijke zoutconcentraties berekend.

In SOBEK-RE is een aangepaste vorm van de Thatcher Harleman formulering geïmplementeerd. Details zijn beschreven in Hoofdstuk 3.

## 2.3.2 Savenije

Savenije heeft formulering (3) toegepast op een groot aantal estuaria in de wereld. Hij was in staat om hiermee de zoutconcentraties bij maximale zoutindringing (dus een statisch model) goed te reproduceren (Savenije 2005, 2012). Op basis van deze resultaten heeft hij voor  $D_0$  de volgende uitdrukking gevonden:

$$D_0^{HWS} = 1400u_0E_0 \frac{d_0}{a} N_R^{0.5} \quad (9)$$

Waarbij “HWS” staat voor “High Water Slack” en met

- $E_0$  - getijweglengte in de monding [m]
- $d_0$  - de waterdiepte in de monding [m]
- $a$  - convergentielengte [m]
- $N_R$  - de waarde van het Estuarine Richardson getal in de monding. Waarbij  $N_R \propto 1/E_d$

En waarbij,

$$D_x^{HWS} = D_0^{HWS} \left( \frac{S_x^{HWS}}{S_0^{HWS}} \right)^K \quad (10)$$

Deze uitdrukking is alleen geldig voor convergente estuaria, dat wil zeggen estuaria waarvan de breedte stroomopwaarts afneemt. Voor prismatische estuaria, zoals de Nieuwe Waterweg, is de convergentielengte namelijk oneindig en  $D_0 \rightarrow 0$ .

Voor de waarde van de van den Burgh constante ( $K$ ) heeft Savenije (2012) de volgende uitdrukking afgeleid:

$$K = 0.3 \cdot 10^{-3} \left(\frac{E}{W}\right)^{0.65} \left(\frac{E}{C^2}\right) (1 - \delta_u b)^{-2.0} \left(\frac{b}{a}\right)^{0.58} \left(\frac{E a}{A_0}\right)^{0.14}$$

Waarbij  $W$  de getijamplitude is [m],  $a$  en  $b$  respectievelijk de convergentielengtes zijn voor de het doorstroomoppervlak en de breedte,  $\delta_u$  de dempingscoëfficiënt en  $C$  de Chézy coëfficiënt.

### 2.3.3 Kuijper en van Rijn

In vervolgonderzoek hebben Kuijper en van Rijn (2011) gezocht naar een formule die zowel voor prismatische als convergente estuaria geldig is en waarbij de van den Burgh coëfficiënt niet langer een kalibratieparameter is. Daarbij hebben ze ook een term toegevoegd die het effect van de ruwheid op de verticale menging representeert. Ze kwamen uit op de volgende uitdrukking:

Prismatische estuaria ( $a/E_0 \geq 10$ )

$$D_0^{HWS} = \alpha_0 6 u_0 d_0 N_R^{0.5} \frac{C}{\sqrt{g}} \quad (11)$$

Convergente estuaria ( $a/E_0 < 10$ )

$$D_0^{HWS} = \alpha_0 60 u_0 E_0 N_R^{0.5} \frac{d_0}{a} \frac{C}{\sqrt{g}} \quad (12)$$

Met kalibratie parameter  $0.7 \leq \alpha_0 \leq 1.3$ , en standaard waarde 1.

En met de volgende relatie tussen  $D$  en  $D_0$ :

$$D_x^{HWS} = e^{i\varphi} D_0^{HWS} \left(\frac{S_x^{HWS}}{S_0^{HWS}}\right)^{0.5}$$

$$\varphi = \frac{\delta_u}{2} + \frac{3(a-b)}{2ab} + \frac{1}{2a} \quad (13)$$

Bij het afleiden van bovenstaande dispersieformulering hebben Kuijper en van Rijn aangetoond dat de uitdrukking voor de dispersie in de monding  $D_0$  op elke locatie in het estuarium zou moeten gelden. Dus indien voor  $D_0$  de lokale waarden worden toegepast (lokale waarde voor het Estuarine Richardson getal, voor de getijweglengte, de waterdiepte, enzovoort), kan de waarde voor  $D_x$  ook lokaal worden bepaald. De afhankelijkheid met  $\frac{\partial c}{\partial x}$  volgt dan impliciet (zie Kuijper and van Rijn 2011):

$$D_x^{HWS} = \alpha 60 u_x E_x N_{R,x}^{0.5} \frac{d_x}{a} \frac{C}{\sqrt{g}} \quad (14)$$

## 2.3.4 Gisen

Aan de hand van de dataset van Savenije (Savenije, n.d., zie §4.2.2) en met behulp van een regressieanalyse heeft Gisen (2015) de coëfficiënten van vele dispersieformuleringen geoptimaliseerd. Op basis hiervan zijn drie formuleringen aangewezen die op basis van enkele statische kentallen de beste overeenkomst gaven met de metingen. Eén hiervan is geselecteerd voor huidig onderzoek:

$$D_1^{TA} = 0.1167u_1E_1N_R^{0.57} \quad (15a)$$

$$D_0^{TA} = D_1^{TA}(1 + \beta_{ref}^{TA}[1 - e^{-x_1/a_1}]) \quad (15b)$$

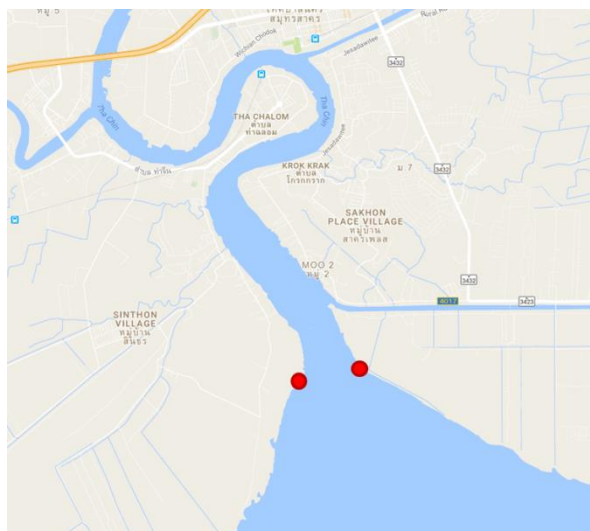
$$\beta_{ref}^{TA} = \frac{Ka_1}{\alpha_G^{TA}A_1} \quad \text{en} \quad \alpha_G^{TA} = \frac{D_1^{TA}}{|Q_f|} \quad (15c)$$

Waarbij  $D_1^{TA}$  de getijgemiddelde (TA) dispersie is op het inflectiepunt,  $u_1$  de maximale vloodsnelheid op het inflectiepunt en  $E_1$  de getijweglengte op het inflectiepunt.

Hierbij geldt de volgende relatie tussen  $D$  en  $D_1$ :

$$D_x^{TA} = D_1^{TA} \left( \frac{S_x^{TA}}{S_1^{TA}} \right)^K \quad (16)$$

De dispersie in het estuarium wordt in deze formule niet gerelateerd aan de monding ( $D_0$ ), maar aan de dispersie op het inflectiepunt (formule 15a), vanuit waar ook de dispersie in de monding berekend kan worden (formule 15b). Het inflectiepunt is het punt in het estuarium waar de convergentielengte verandert, zie Figuur 2.3. Voor het berekenen van  $K$  wordt een uitdrukking gebruikt die Gisen (2015) heeft afgeleid.



Figuur 2.3 Voorbeeld van een inflectiepunt (rode stippen). Kaart van het Tha Chin estuarium uit Google Maps (C).

Bij afwezigheid van een inflectiepunt, zoals bij een prismatisch kanaal, wordt de dispersie berekend met alleen formule 15a.

### 2.3.5 Zhang

In brede estuaria kunnen zich eb- en vloedcharen ontwikkelen, zie Figuur 2.4. Dit zijn getijgeulen waarbij door de ene schaar voornamelijk de vloedstroming gaat en bij de andere schaar voornamelijk de ebstroming. Waar de eb- en vloedstromen samen komen kan zout worden uitgewisseld en met de vloedstroming weer verder omhoog worden gebracht. Dit wordt “tidal pumping” genoemd. Zhang (2016) heeft voor dit effect een coëfficiënt afgeleid, waarbij de waarde voor de dispersie toeneemt naarmate de breedte van het estuarium groter wordt ten opzichte van de getijweglengte. Toevoeging van deze term heeft geleid tot de volgende uitdrukking voor de dispersieformulering:

$$D = 0.1u_x E_x N_{R,x}^K \left( 1 + 10 \left( \frac{B_x}{E_x} \right)^2 \right) \quad (17)$$

Waarbij  $B_x$  de breedte op punt  $x$  is, en ook de andere parameters lokaal op punt  $x$  worden berekend. Deze formule bepaald de dispersie dus lokaal en niet langer op basis van de dispersie in de monding en de zoutgradiënt. Voor het bereken van  $K$  is wederom een nieuwe uitdrukking afgeleid (Zhang and Savenije 2016), bij afwezigheid van voldoende data wordt geadviseerd om  $K = 0.58$  te kiezen.



Figuur 2.4 Monding van de Pungue rivier (Mozambique), waarin eb- en vloedcharen te zien zijn. GoogleMaps (C).



### 3 Implementatie van dispersie in SOBEK

#### 3.1 Dispersieformulering

##### 3.1.1 Beschikbare dispersieformuleringen in SOBEK-RE

In SOBEK-RE zijn verschillende dispersieformuleringen beschikbaar (Sobek-RE 2.52.008 2012):

Optie 1: Een door de gebruiker opgegeven ruimtelijke of tijdafhankelijke dispersie:

$$D = f_1(x) \text{ of } D = f_1(t)$$

Optie 2: Een lineaire afhankelijkheid van de zoutconcentratie:

$$D = f_1(x) + f_2(x) \left| \frac{\partial c(x,t)}{\partial x} \right| \text{ of } D = f_1(t) + f_2(t) \left| \frac{\partial c(x,t)}{\partial x} \right|$$

Optie 3: Thatcher Harleman, zie §3.1.2.

Optie 4: Een empirische dispersie formule.

Voor de Rijn-Maasmonding is tot zover bekend altijd met Thatcher Harleman (optie 3) gewerkt.

##### 3.1.2 Thatcher Harleman formulering in SOBEK-RE

De Thatcher Harleman dispersieformulering in SOBEK-RE is gebaseerd op Thatcher en Harleman (1972), deze luidt:

$$D = f_1(x, t) + f_3(x, t) d(x, t) \frac{\sqrt{g}}{C(x)} |u(x, t)| + \quad (18)$$

$$+ f_4(x, t) L_e^2 \left( \frac{T_p g}{\rho_w} \right)^{\frac{1}{4}} \frac{u_0^*(j)}{c_0^*(j)} [d_0(j) (\rho(j) - \rho_w)]^{\frac{1}{4}} \left[ \frac{Q_f(j, t)}{P_e(j, t) u_0^2(j, t)} \right]^{\frac{1}{4}} \left\langle \frac{c(x, t)}{c_0} \frac{\partial c(x, t)}{\partial x} \right\rangle$$

Met,

$c(x, t)$	- zoutconcentratie [ $kg/m^3$ ]
$C(x)$	- Chézy-coëfficiënt [ $m^{0.5}/s$ ]
$c_0^*(j)$	- referentieconcentratie gerelateerd aan tak $j$ [ $kg/m^3$ ]
$d(x, t)$	- waterdiepte [ $m$ ]
$d_0(j)$	- referentie waterdiepte in de mond van het estuarium gerelateerd aan tak $j$ [ $m$ ]
$f_1(x, t)$	- coëfficiënt [ $m^2/s$ ]
$f_3(x, t)$	- coëfficiënt [-]
$f_4(x, t)$	- coëfficiënt [-]
$g$	- valversnelling [ $m/s^2$ ]
$L_e$	- lengte estuarium; dit is de lengte vanaf de mond van een estuarium tot aan de uiterste locatie waar nog getijdeninvloed aanwezig is [ $m$ ]

$P_e(j, t)$	- vloedvolume dat de mond van het estuarium binnenkomt, gerelateerd aan tak $j$ [ $m^3$ ]
$Q_f(j, t)$	- restdebiet mond estuarium gerelateerd aan tak $j$ [ $m^3/s$ ]
$T_p$	- getijperiode [s]
$u(x, t)$	- stroomsnelheid [ $m/s$ ]
$u_0(j, t)$	- maximale vloednelheid in de mond van het estuarium, gerelateerd aan tak $j$ [ $m/s$ ]
$u_0^*(j)$	- karakteristieke stroomsnelheid in de mond van het estuarium, gerelateerd aan tak $j$ [ $m/s$ ]
$\rho_w$	- dichtheid van rivierwater [ $kg/m^3$ ]
$\langle . \rangle$	- gemiddelde over de laatste twee gehele getijperioden [-]

Meer details over de precieze definities zijn te vinden in bijlage B.2.

In eerste oogopslag vertoont deze formule weinig overeenkomsten met de uitdrukking zoals gevonden door Thatcher en Harleman (1972). De termen kunnen echter herschreven worden, zie Bijlage B.1. Het resultaat is:

$$D = f_1 + f_3 \text{und} \sqrt[5]{g} + f_4 u_0^* L_0 E_d^{*-1/4} \left\langle \frac{c}{c_0} \frac{\partial \dot{c}^*}{\partial \dot{x}} \right\rangle \quad (19)$$

In deze formule herkennen we – op een aantal verschillen na – de dispersieformulering van Thatcher-Harleman:

$$D = k u_0 L_e E_d^{-1/4} \left| \frac{\partial \dot{c}}{\partial \dot{x}} \right| + 77 \text{und} \sqrt[5]{g} \quad (20)$$

De  $f_3$  term komt representeert met de tweede term uit Thatcher-Harleman, namelijk de dispersie in een volledig gemengd systeem. Verschillen zijn dat Thatcher Harleman de hydraulische straal gebruikt en SOBEK-RE de waterdiepte en de introductie van  $\sqrt{g}$ , wat een constante is. Uit dit laatste volgt dat  $f_3 = 77/\sqrt{g} \approx 25$ .

De  $f_4$  term komt grotendeels overeen met de eerste term uit Thatcher-Harleman en representeert de dispersie ten gevolge dichtheidsgradiënten. De grootste verschillen zijn de introductie van  $c/c_0$  en de middeling over twee getijperiodes van  $\partial \dot{c}^*/\partial \dot{x}$ . In §B.3 en §B.2 zal nader op alle verschillen in worden gegaan. Door Winterwerp (1980) is afgeleid dat voor de Nieuwe Waterweg  $f_4$  een waarde van 0.006 zou moeten hebben.

Tot slot komt de  $f_1$  term niet voor in Thatcher-Harleman. Deze term stelt de gebruiker in staat om een achtergronddispersie op te geven die niet afhankelijk is van de waterbeweging. SOBEK-RE biedt daarmee de mogelijkheid om

- met Thatcher-Harleman te werken (via  $f_3$  en  $f_4$ ), of
- een constante dispersie op te leggen ( $f_1$ ) tijd en plaats afhankelijk of onafhankelijk, of een combinatie van beide

Indien waarden voor  $f_3$  en  $f_4$  worden gekozen die overeenkomen met Thatcher-Harleman, dan is de verwachting dat het resultaat grotendeels overeenkomt met Thatcher-Harleman, waarmee zij succesvol een aantal verschillende estuaria hebben doorgerekend.

Er is tot slot gekeken hoe de waarden voor  $f_1$ ,  $f_3$  en  $f_4$  in het SOBEK\_RE NDB\_1\_1\_0 model gekozen zijn (Kraaijeveld 2003). Deze variëren voor  $f_1$  tussen de 50 en de 1000, voor  $f_3$  wordt overal 0 gehanteerd en voor de waarde voor  $f_4$  wordt overal 0.006 gehanteerd, behalve in de Maasmond en op een deel van de Nieuwe Waterweg, waar de waarde 0.007 is.



Hieruit valt te concluderen dat:

- voor de dispersie ten gevolge van dichtheidsgradiënten ( $f_4$ ), een waarde wordt gebruikt die (bijna) gelijk is aan de waarde zoals afgeleid door Winterwerp (1980) voor de Nieuwe Waterweg. Deze term heeft een fysische basis.
- $f_3$  niet wordt gebruikt, omdat in de praktijk zou blijken dat deze dispersie ten gevolge van overige verspreidingsprocessen klein is ten opzichte van  $f_4$ .
- $f_1$  een significante bijdrage heeft aan de dispersie term.

Door de keuze van waarden voor  $f_1$  en  $f_3$  in het SOBEK-RE NBD1\_1\_0 model wordt dus afgeweken van de waarden uit de Thatcher-Harleman formulering.

### 3.1.3 SOBEK 3.6.2

In SOBEK 3 is in eerste instantie alleen optie 3 (de Thatcher Harleman formulering) van SOBEK-RE overgenomen, zonder de  $f_4$ -term, zie Hoofdstuk 1 en Tabel 1.1. De  $f_4$ -term is om verschillende redenen weggelaten:

- De  $f_4$ -term was complex qua implementatie,
- de fysische basis van de  $f_4$ -term was niet bekend bij de betrokken personen,
- voor een aantal basistests kon ook zonder de  $f_4$ -term een goed resultaat behaald worden.

Voor huidig onderzoek is deze term in SOBEK 3.6.2 ontsloten. Naar aanleiding van de validatietesten met de aangepaste vorm van Thatcher en Harleman (zie §4.3), is bovendien gekozen voor het implementeren van een nieuwe formulering die het mogelijk maakt verschillende dispersieformuleringen te testen. Deze formule ziet er als volgt uit:

$$D = c_1 u(x, t) h(x, t) \frac{\sqrt{g}}{C} + c_2 u_0^{c_3} E_0^{c_4} N_R^{c_5} \left(\frac{C}{\sqrt{g}}\right)^{c_6} \left(\frac{d_0}{a}\right)^{c_7} \left(\frac{d_0}{E_0}\right)^{c_8} \left(1 + c_9 \left(\frac{B_0}{E_0}\right)^2\right) \left(\frac{S}{S_0}\right)^{c_{10}} \left|\frac{\partial S}{\partial x}\right|^{c_{11}} \quad (21)$$

Door de juiste waarden te kiezen voor parameters  $c_1$  tot en met  $c_{11}$  kunnen de in Hoofdstuk 2 beschreven dispersieformuleringen geconstrueerd worden. Uitzonderingen hierop zijn:

- de  $e^{i\varphi}$  term uit de Kuijper en van Rijn formulering. In deze term zit de afstand tot de monding verwerkt en de demping. Het is niet rechttoe rechtaan om beide voor elk punt in een numeriek model te verwerken, zeker niet in vertakt model. Deze is daarom in SOBEK 3.6-beta en 3.6.2 achterwege gelaten. Voor prismatische kanalen, waar demping beperkt is, zal de  $e^{i\varphi} \approx 1$  en het weglaten weinig effect hebben.
- de bepaling in Zhang van de dispersie op basis van de lokale waarden, in plaats van op basis van de dispersie in de monding en de zoutgradiënt. Om de lokale bepaling mogelijk te maken moeten grote veranderingen door worden gevoerd in SOBEK. Dit was niet mogelijk binnen het huidige project.

Door voor de constanten  $c_1$  en  $c_2$  de in SOBEK-RE gehanteerde constanten  $f_3$  en  $f_4$  in te vullen en de constante  $f_1$  toe te voegen voor achtergronddispersie ontstaat de vergelijking die in SOBEK 3.6-beta en 3.6.2 is ingebouwd:

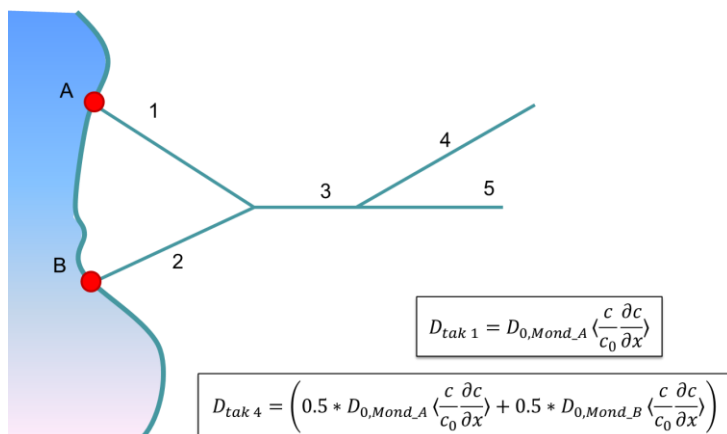
$$D = f_1 + f_3 u(x, t) d(x, t) \frac{\sqrt{g}}{C} + f_4 u_0^{c_3} E_0^{c_4} N_R^{c_5} \left(\frac{C}{\sqrt{g}}\right)^{c_6} \left(\frac{d_0}{a}\right)^{c_7} \left(\frac{d_0}{E_0}\right)^{c_8} \left(1 + c_9 \left(\frac{B_x}{E_x}\right)^2\right) \left(\frac{S}{S_0}\right)^{c_{10}} \left|\frac{\partial S}{\partial x}\right|^{c_{11}} \quad (22)$$

Met deze formule kan niet alleen de op Thatcher en Harleman gebaseerde formule uit SOBEK-RE worden gekozen, maar een scala aan dispersiecoëfficiënten.

### 3.2 Branch-mouth relaties

Een onderdeel wat binnen dit onderzoek niet nader modelmatig is onderzocht, maar wel aandacht verdient in de toekomst is de formulering van branch-mouth relaties. Indien een estuarium uit meerdere takken met eventueel ook meerdere mondingen bestaat, moet voor elke tak de monding worden gedefinieerd. De dispersie wordt immers bepaald op basis van de dispersie in de monding en de zoutgradiënt. In SOBEK-RE wordt voor elke tak gedefinieerd aan welke zeemonding deze gerelateerd moet worden, zie illustratie in Figuur 3.1. Voor deze monding worden dan de waarden voor de variabelen in de dispersiecoëfficiënt (zoals getijsnelheid, diepte, getijvolume, restdebiet, saliniteit en dichtheid) uitgerekend of door de gebruiker opgegeven. De gebruiker kan meerdere mondingen relateren aan één tak, indien hier sprake van is. Voor het uitrekenen van de dispersie in de betreffende tak wordt dan het gemiddelde van de verschillende mondingen gebruikt.

Meer details over de implementatie in SOBEK-RE en een voorbeeld voor het Noordelijke Deltabekken Model (NDB-model), zijn te vinden in Bijlage C.



Figuur 3.1 Voorbeeld implementatie Branch-Mouth relatie in SOBEK-RE.

Thatcher en Harleman lijken overigens gebruikt te hebben gemaakt van een andere Branch Mouth relatie. Zij bepalen de dispersie in de eigen monding van de betreffende tak (daar waar de tak uitmondt in een andere tak), en niet aan de zeemonding. Dit lijkt fysisch meer correct. Meer hierover is te vinden in §4.4.5.

### 3.3 Andere 1D-hydraulische modellering pakketten

Andere 1D-pakketten zijn onder andere HECRAS en MIKE-11. De “user manual” van MIKE-11 geeft aan dat zoutmodellering gebaseerd is op de zoutbalans vergelijking. Er wordt niet genoemd welke dispersieformulering wordt gebruikt. Het is daarom aannemelijk dat de gebruiker zelf waarden voor D moet opleggen. Het dispersiemodel in HECRAS is gebaseerd op Fischer, volgens de user manual. Het is ook mogelijk om zelf waarden voor de dispersiecoëfficiënt te kiezen. Behalve voor SOBEK-RE en SOBEK 3, zijn er geen softwarepakketten bekend waarin de dispersie wordt bepaald volgens een fysisch onderbouwde dispersieformulering voor estuaria.

## 4 Validatie dispersieformuleringen

### 4.1 Inleiding

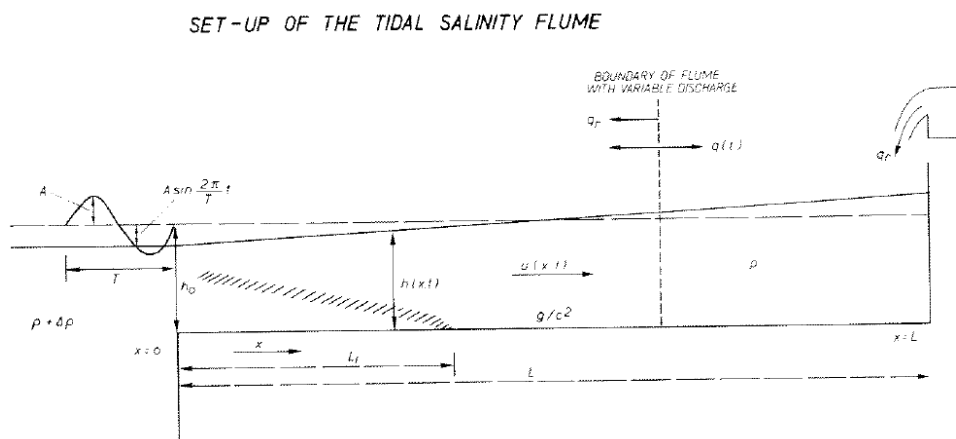
In dit hoofdstuk worden de verschillende dispersieformuleringen gevalideerd aan de hand van twee datasets: gootproeven van Rigter (Rigter 1973a; Rigter 1973b) en meetdata van 11 convergente estuaria verspreid over de continenten (Savenije, n.d.). Omdat in SOBEK<sup>2</sup> de aangepaste vorm van Thatcher Harleman zit (Thatcher and Harleman 1972; Rijkswaterstaat 1984), is in een eerste stap deze formulering gevalideerd. Op basis hiervan zijn verbeteringen voorgesteld, waarna de dispersieformulering in SOBEK 3.6 zo is aangepast dat het nu niet alleen mogelijk is om de voorgestelde verbeteringen, maar ook de meest recent afgeleide dispersieformuleringen te testen (Kuijper and van Rijn 2011; Savenije 2012; Gisen 2015; Zhang and Savenije 2016), zie complete formulering in §3.1.3. In de tweede stap zijn de verbeteringen een voor een getest en zijn ook de nieuwe formuleringen gevalideerd met de data voor de gootproeven en de convergente estuaria.

Hieronder volgt eerst een beschrijving van de beschikbare data (§4.2). Daarna wordt de validatie van de aangepaste Thatcher Harleman formulering besproken, inclusief discussie en de voorgestelde verbeteringen (§4.3). Vervolgens worden de nieuwe dispersieformuleringen gevalideerd in §4.4. In §4.4.5 wordt ingegaan op vertakte systemen. In §4.6 worden de verschillende formuleringen bediscussieert en wordt ook ingegaan op modellering van dispersie in systemen zonder getij of zonder rivierafvoer.

### 4.2 Validatie datasets

#### 4.2.1 Rigter proeven

De proefopstelling van Rigter is geïllustreerd in Figuur 4.1. Het gaat hierbij om een langwerpige rechte goot van 0.672 m breed, 0.5 m hoog en 100 m lang. Aan de bovenstroomse rand werd zoetwater toegevoerd en in de bak aan de benedenstroomse kant werd een periodiek getij gegenereerd. Vanuit onderin bak werd zout ingebracht. In de proeven heeft Rigter het getij, de relatieve dichtheid, de rivierafvoer, de lengte, de ruwheid en de waterdiepte gevarieerd, zie Tabel 4.1. Waarden zijn geschaald naar het prototype, de Nieuwe Waterweg.



Figuur 4.1 Proefopstelling Rigter Bron: Rigter 1973.

<sup>2</sup> SOBEK-RE, SOBEK 3.6-beta en SOBEK 3.6.2

Tabel 4.1 Overzicht Rigter cases met naar prototype geschaalde waarden.

Variabele	W	C	H	$L_e$	Q	$\Delta\rho/\rho$
Eenheid	[m]	[m <sup>1/2</sup> /s]	[m]	[m]	[m <sup>3</sup> /s]	[-]
				67.859		
	0.4			72.538	473	0.0045
	0.5	40	9.98	86.579	592	0.0066
	0.6	50	12.03	100.621	711	0.0137
<b>Referentie</b>	<b>0.8</b>	<b>60</b>	<b>13.82</b>	<b>114.662</b>	<b>949</b>	<b>0.0215</b>
	1.2	70	16.00	128.698	1896	0.0290
	1.6	80	17.02	161.459	2845	0.0355
	2.4	90	19.98	194.221	3801	

#### 4.2.2 Convergente estuaria

Over vele jaren heeft professor Savenije data verzameld van 30 estuaria over de hele wereld bij verschillende condities (Savenije, n.d.). De dataset bestaat uit gegevens over de geometrie en de verschillende hydrodynamische condities waarbij gemeten is. Voor dit onderzoek zijn er 11 geselecteerd: de Maputo, Pungue, Delaware, ChaoPhya, Schelde, Landak, Perak, ThaChin, Limpopo, Lalang, en de Sinnamary. Bij de selectie zijn voornamelijk estuaria geselecteerd waarvan aangegeven is dat de data betrouwbaar is en welke verschillen in geometrie (bijvoorbeeld smal versus breed). Van de minder betrouwbare set is de Delaware gebruikt, omdat Thatcher en Harleman deze ook hebben gebruikt voor validatie en zijn op aanraden van professor Savenije de Schelde en de Pungue opgenomen in de validatie-set. Details omtrent deze estuaria zijn te vinden in Bijlage D.

### 4.3 Validatie aangepaste vorm Thatcher Harleman formulering

In de eerste stap is de aangepaste vorm van de Thatcher Harleman formulering, zoals beschikbaar in SOBEK-RE en SOBEK 3.6, gevalideerd aan de hand van de Rigter cases en de convergente estuaria.

#### 4.3.1 Rigter proeven

Voor de validatie van de Rigter proeven zijn de volgende waarden gebruikt voor de kalibratieparameters:

- $f_3 = 25$  (Thatcher and Harleman 1972; Thatcher and Najarian 1983)
- $f_4 = 0.006$  (Winterwerp 1980)

In Figuur 4.2 zijn de resultaten van validatie met de Rigter proeven gepresenteerd en in Tabel 4.2 de waarden voor enkele statistische indicatoren. Hieronder worden de resultaten per variabele besproken. De afhankelijkheid met de lengte van het estuarium wordt hierbij buiten beschouwing gelaten, omdat in de literatuur geen eenduidige definitie van de lengte van het estuarium te vinden is.

#### Afhankelijkheid met getijamplitude

Door een toename in getijamplitude vinden er twee processen plaats 1) toename getijweglengte, waardoor het verschil tussen maximale en minimale zoutindringingslengte toeneemt (advectie) en 2) toename menging waardoor zout minder ver het systeem in kan dringen (afname dispersie). Deze afhankelijkheid wordt kwalitatief goed gemodelleerd, met een onderschatting van de indringingslengte bij kleine getijamplitudes.

#### Afhankelijkheid met de rivierafvoer

Door een toename van rivierafvoer vindt er minder menging plaats, waardoor zout verder kan indringen (toename dispersie). Deze wordt teniet gedaan door de toename in rivierafvoeren, die “tegendruk” bieden aan de zoutindringing (toename advectioneel transport zeewaarts), waardoor netto de zoutindringingslengte afneemt. Deze afhankelijkheid wordt kwalitatief goed gemodelleerd. Bij hoge rivierafvoeren zien we echter een overschatting van de indringingslengte, totdat bij de hoogste afvoer zout het model niet meer binnenkomt. Beide effecten kunnen verklaard worden, zie kader op pagina 23.

#### Afhankelijkheid met de ruwheid

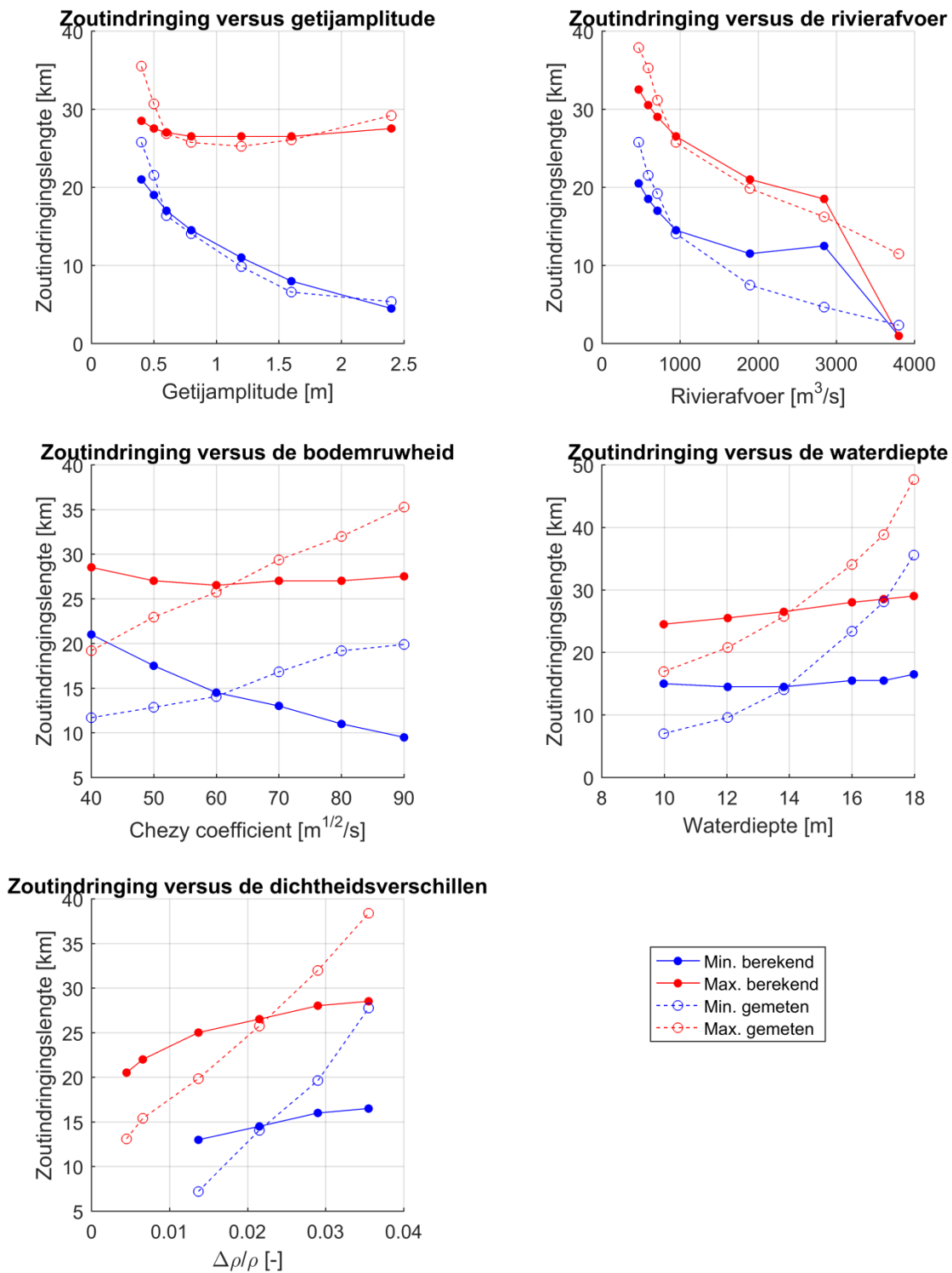
Door een afname van de ruwheid (toename Chézy waarde), neemt de menging door turbulentie af en kan zout verder indringen (toename dispersie). Hoewel door een toename van de getijsnelheden ook meer menging optreedt (minder dispersie) is kennelijk het effect van de menging door turbulentie groter, waardoor netto de zoutindringing toeneemt. Door de toename van eb- en vloednelheden door een gladdere bodem neemt daarnaast de getijweglengte toe (advectioneel deel), waardoor het verschil tussen minimale en maximale zoutindringing toeneemt. Het model geeft een goede weergave van de toename van het verschil tussen maximale en minimale zoutindringing, maar voorspelt een afname van de gemiddelde zoutindringing in plaats van een toename. Het effect van de ruwheid op de turbulente menging is dus niet goed ondervangen in de dispersieformulering en dient te worden toegevoegd, door bijvoorbeeld de afhankelijkheid met  $C/\sqrt{g}$  te introduceren.

#### Afhankelijkheid met de diepte

Wanneer de diepte toeneemt, neemt ook de gravitatiecirculatie toe en kan zout verder indringen (toename dispersie). Door een toename van de vloednelheden zal enerzijds meer menging optreden (afname dispersie en zoutindringing), anderzijds zal door advectioneel transport zout verder kunnen indringen. In de metingen zien we inderdaad een toename van de zoutindringing. Het model voorspelt echter nauwelijks toename van zoutindringing door toename in diepte. Dit effect is dus onvoldoende ondervangen in de dispersieformulering en dient te worden toegevoegd door met de diepte te schalen.

#### Afhankelijkheid met de relatieve dichtheid

Wanneer de relatieve dichtheid toeneemt, neemt de druk aan de zee kant toe en daarmee ook de gravitatiecirculatie. Dit leidt tot een toename in zoutindringing (toename dispersieve deel). Dit gedrag wordt kwalitatief goed beschreven door het model, maar wel onderschat. Verbetering is mogelijk door de afhankelijkheid met  $\rho/\rho_0$  sterker te maken.

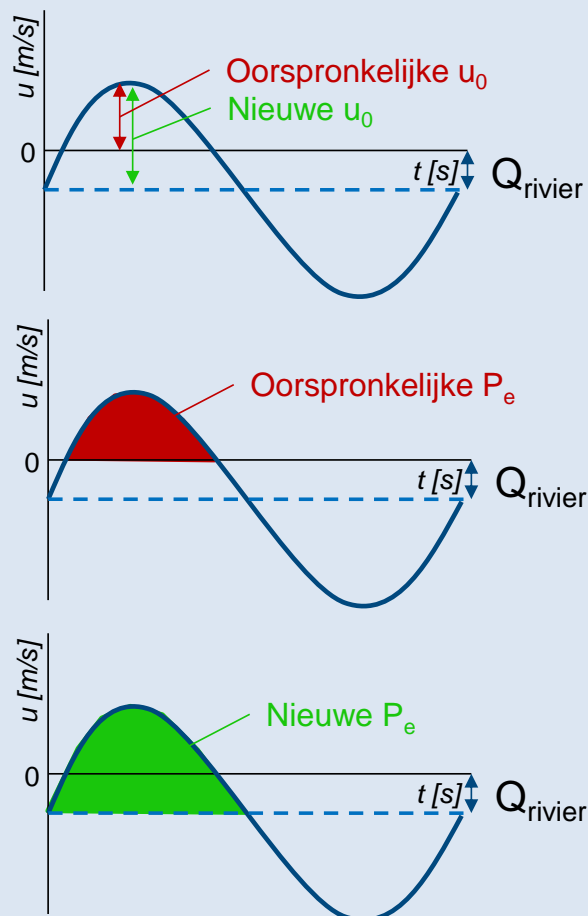


Figuur 4.2 Resultaten validatie aangepaste Thatcher Harleman dispersieformulering met Rigter gootproeven.

### Verklaring afwijkingen zoutindringing bij hoge rivierafvoeren.

De piek bij 2845 m<sup>3</sup>/s wordt veroorzaakt door hoe in SOBEK de getijsnelheid en het vloedvolume berekend worden, zie illustratie in Figuur 4.3. Doordat voor de maximale vloednelheid de absolute maximum snelheid wordt genomen in plaats van de relatieve snelheid ten opzichte van de rivieruitstroming en het vloedvolume wordt berekend door de integraal te nemen van het gecombineerde debiet tijdens uitstroom, kan het bij hoge rivierafvoeren voorkomen dat de vloednelheid en het vloedvolume nul naderen, waardoor de dispersie richting oneindig gaat. Dit zorgt voor een zeer sterke indringing. Dit kan verholpen worden door uit te gaan van de werkelijke getijsnelheid en vloedvolume, zoals geïllustreerd in Figuur 4.3.

Dat bij nog grotere rivierafvoer geen zout het model meer binnenkomt heeft te maken met de instroomrandvoorwaarde. Zout kan alleen het model inkomen als er instroom van water is. Bij hele hoge rivierafvoeren zal er geen omkering van stroming meer plaatsvinden en kan zout dus niet langer het model binnendringen. In de praktijk zal deze situatie nauwelijks voorkomen. Bovendien vormt bij hele hoge afvoeren de zoutindringing geen probleem.



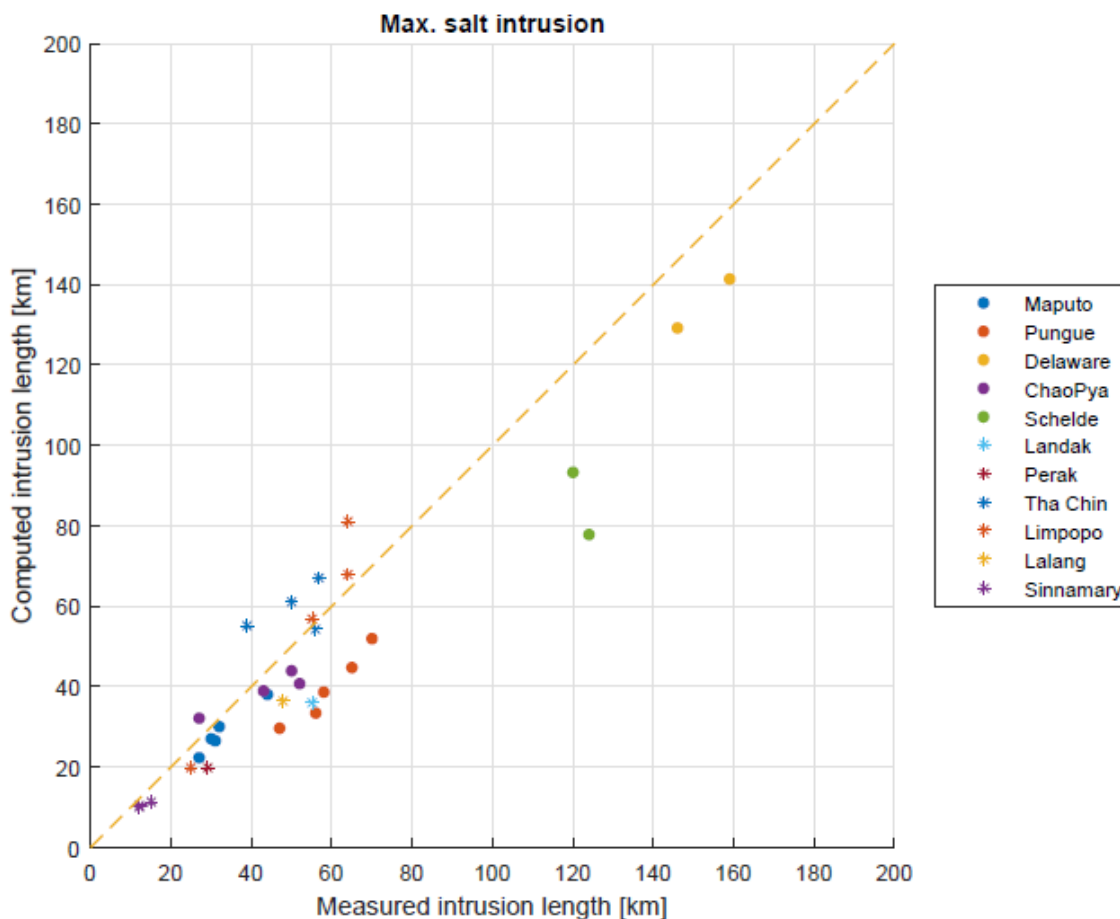
Figuur 4.3 Huidige (in rood) en nieuwe (groen) methode om de getijsnelheid en het vloedvolume uit te rekenen.

#### 4.3.2 Convergente estuaria

Voor de validatie van de convergente estuaria zijn de volgende waarden gebruikt voor de kalibratieparameters, zoals ook gebruikt door Thatcher en Harleman (1972):

- $f_3 = 75$
- $f_4 = 0.0015$

De convergente estuaria konden niet op dezelfde systematische manier worden onderzocht als de Rigter proeven (variatie met getij, rivierafvoer, diepte, ruwheid en relatieve dichtheid), omdat in de natuur altijd meerdere parameters tegelijk variëren. Door te valideren met data van vele estuaria in verschillende toestanden, zijn deze variaties impliciet wel getest. Het totaalbeeld is gepresenteerd in Figuur 4.4. Voor een vergelijking met alle zoutprofielen wordt verwezen naar het afstudeerverslag (Daniels 2016). De aangepaste Thatcher Harleman formulering is globaal in staat om het juiste gedrag te modelleren ( $R^2 = 0.87$ , zie ook Tabel 4.3). Maar een vergelijking met de zoutindringsprofielen laat zien dat er vaak grote afwijkingen zijn tussen de gemeten en berekende waarden (standaardafwijking  $\sigma = 3.33$  ppt).



Figuur 4.4 Gemeten en berekende indringingslengtes voor de convergente estuaria.

## 4.4 Validatie nieuwe dispersieformuleringen

### 4.4.1 Inleiding

Op basis van de mogelijke verbeteringen zoals genoemd in §4.4.5 is de dispersieformulering in SOBEK 3.6 aangepast, zie §3.1.3. De formulering is hierbij zo aangepast dat het niet alleen mogelijk is om de voorgestelde verbeteringen, maar ook de meest recent afgeleide



dispersieformuleringen te testen (Kuijper and van Rijn 2011; Savenije 2012; Gisen 2015; Zhang and Savenije 2016), welke overigens veelal bovenstaande verbeteringen (gedeeltelijk) bevatten. De resulterende formulering is gerapporteerd in §3.1.3.

#### 4.4.2 Individuele testen

Eerst zijn voor de gootproeven de individuele aanpassingen getest aan de hand van de Rigter proeven. Voor details en figuren wordt verwezen naar Daniels (2016). Op basis hiervan kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- overstappen van  $\langle \frac{c}{c_0} \frac{\partial c^*}{\partial x} \rangle$  naar  $\langle \frac{c}{c_0} \rangle^K$  leidt voor alle proeven tot een verbetering.
- Toevoeging van  $C/\sqrt{g}$  leidt tot het juiste gedrag bij variatie met de ruwheid (toename zoutindringing bij hogere Chezy waarden).
- Toevoeging van de afhankelijkheid met de diepte leidt tot een verbetering van de voorspelling van de zoutindringing ten gevolge van een verandering in diepte.
- Verandering van de macht van het Estuarine Richardson getal leidt tot een verbetering van het gedrag bij variatie met de relatieve dichtheid, maar het verergerd de piek die bij hoge afvoeren optreedt. Dit wordt gerelateerd aan de definitie van het vloedvolume en de getijsnelheid in SOBEK, zie kader op pagina 23, welke pas in een later stadium is aangepast, namelijk in versie 3.6-beta 3, zie ook Tabel 1.1.

#### 4.4.3 Rigter proeven

De formuleringen van Kuijper en van Rijn-*prismatisch* en Gisen zijn gevalideerd aan de hand van de Rigter proeven, hierbij zijn de respectievelijk SOBEK 3.6-beta 2 en SOBEK 3.6-beta 3 gebruikt en de standaard waarden voor kalibratieparameters (zie §2.3.3 en §0). Omdat de formuleringen van Savenije en Zhang niet geschikt zijn voor prismatische kanalen, zijn deze alleen gevalideerd aan de hand van de convergente estuaria, zie §4.4.4.

Voor de Kuijper en van Rijn formulering is  $\alpha = 1$  gebruikt. Zoals genoemd in §3.1.3 is de dempingsterm  $e^{i\varphi}$  term weggelaten. Dit heeft naar verwachting weinig effect voor prismatische kanalen. Omdat de Kuijper en van Rijn formulering alle in §4.4.5 genoemde verbeteringen bevat zal deze naar verwachting goed presteren.

De resultaten in Figuur 4.5 laten inderdaad een verbetering zien voor alle variabelen, bovendien wordt elk gedrag nu kwalitatief goed gerepresenteerd. Ook de piek bij hoge rivierafvoer is verdwenen dankzij het aanpassen van de definitie voor vloedvolume en getijsnelheid in SOBEK, zie discussie in §4.3. Uiteraard blijven er wel afwijkingen bestaan. Zo wordt bij kleine getijamplitude de zoutindringing nog steeds onderschat en bij grote getijamplitude enigszins overschat. De afwezigheid van zout voor hele hoge rivierafvoer is nog niet opgelost, en de afhankelijkheid met de waterdiepte vertoont een nagenoeg lineaire trend, terwijl deze volgens de gootproeven ligt kwadratisch zou moeten zijn.

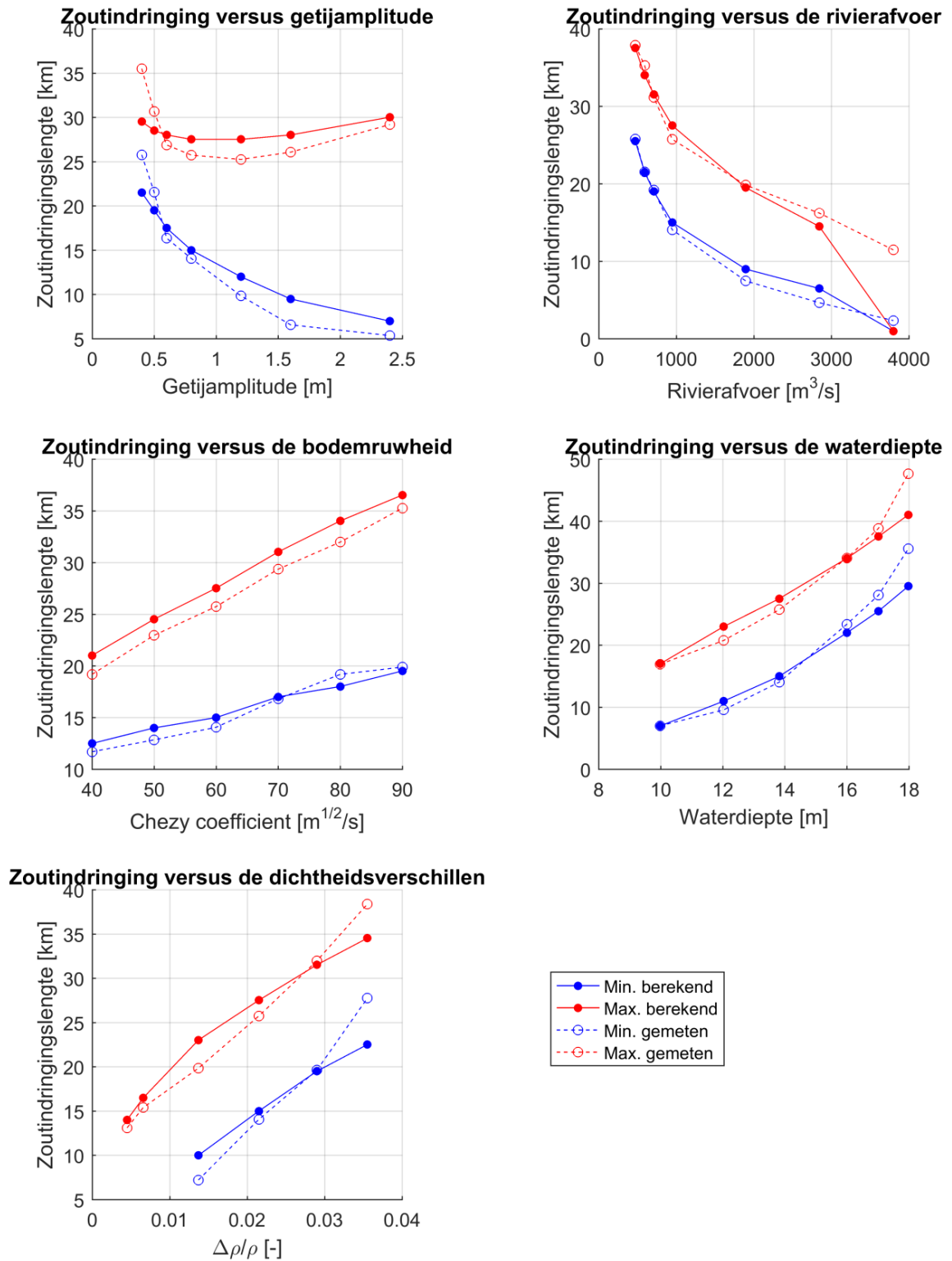
Voor de Gisen formulering is voor K 0,57 gebruikt voor de gootproeven. De resultaten zijn getoond in Figuur 4.6. Wat met name opvalt is het afwijkende gedrag met toenemende getijamplitude. Volgens de Gisen formulering neemt de dispersie toe met toenemende getijsnelheid ( $D \propto u_0^n$ ), wat betekent dat bij toenemende getijamplitude de dispersie en de zoutindringing toenemen. In de gootproeven neemt de dispersie juist af, doordat meer menging optreedt. Dit verklaart de afwijkende trend. De overige variabelen geven wel de juiste trend weer, dit ondanks de afwezigheid van de term  $C/\sqrt{g}$  en de afhankelijkheid met de waterdiepte. Dit is juist te danken aan de positieve evenredigheid met de getijsnelheid. Wanneer de bodemruwheid toeneemt, nemen de getijsnelheden af en daarmee ook de dispersie en de zoutindringing. In werkelijkheid is de afname niet te wijten aan de afnemende snelheden, maar aan de toename in turbulente menging. Het zelfde geldt voor de afhankelijkheid met de waterdiepte. Wanneer de waterdiepte toeneemt, zullen de getijsnelheden toenemen en volgens de Gisen formulering ook de dispersie. In werkelijkheid zal de toename niet te danken zijn aan de toename in getijsnelheid (deze zorgt juist voor meer menging en minder dispersie), maar aan de toename in gravitatiecirculatie. De Gisen-formulering voorspelt bij de gootproeven dus bij "toeval" de juiste afhankelijkheid met de waterdiepte en de bodemruwheid.

Samengevat zien we dat de Kuijper en van Rijn formulering de juiste afhankelijkheid weergeeft voor alle geteste variabelen, hiermee presteert deze formulering overduidelijk het beste. Voor de volledigheid zijn in Tabel 4.2 de waarden voor correlatiecoëfficiënt (R2) en de kwadratisch gemiddelde fout (RMSE, Root Mean Squared Error) weergegeven, welke bevestigen dat de Kuijper en van Rijn formulering de beste overeenkomst geeft met de metingen.

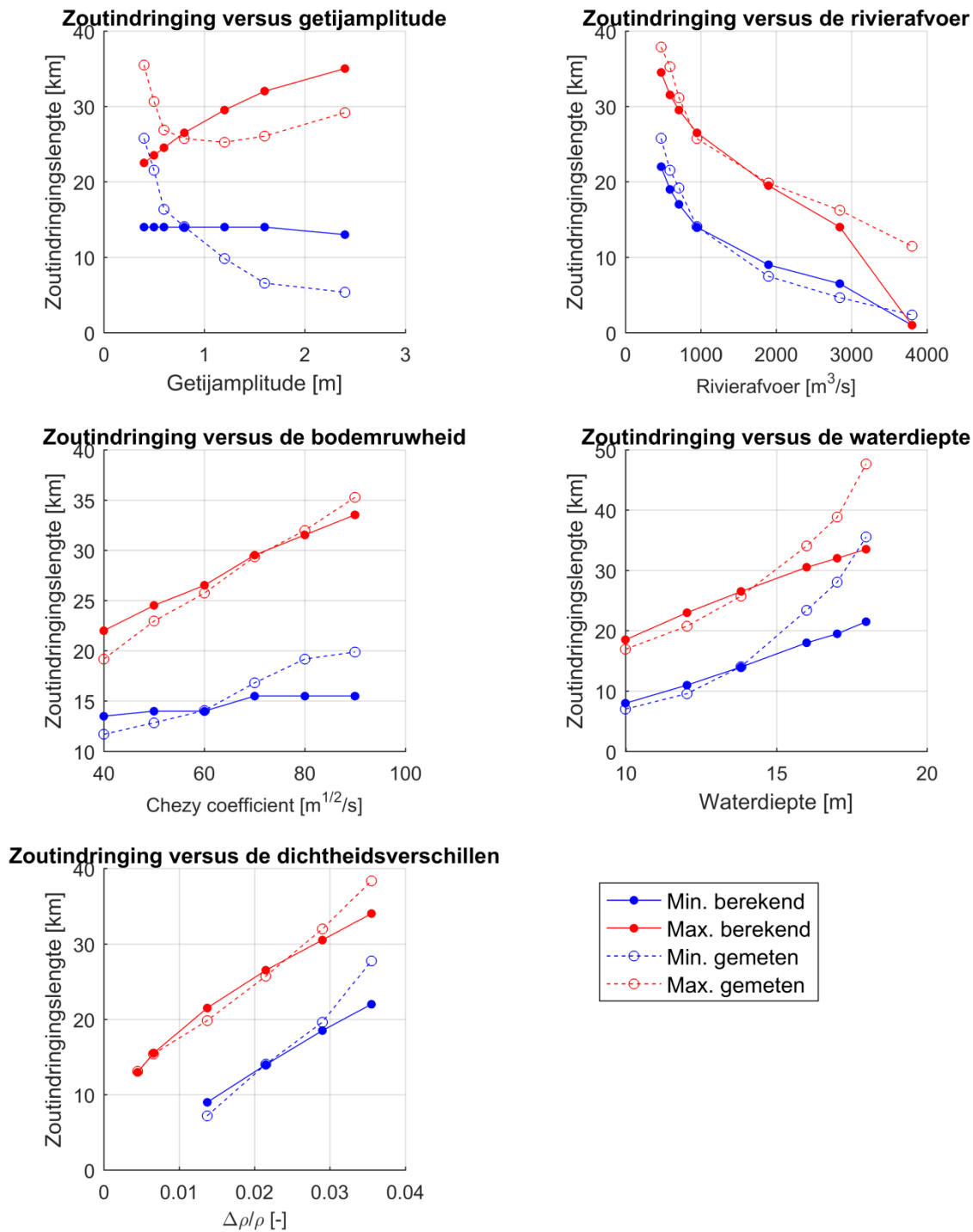
Tabel 4.2 Statistische indicatoren voor de validatie van de verschillende dispersieformuleringen aan de hand van de Rigter getijgootproeven.

Dispersieformulering	TH	Kuijper en van Rijn	Gisen
R2	0.60	0.86	0.65
RMSE	0.38	0.14	0.32

NB. Zowel de Gisen als de Thatcher Harleman formulering zijn getest met versie 3.6-beta 2, zonder de aanpassing voor de definitie van het vloedvolume en de getijsnelheid, deze aanpassing is pas later gemaakt (versie 3.6-beta 3) en alleen getest voor de Kuijper en van Rijn formulering, omdat deze het beste presteerde. Voor Gisen heeft de aanpassing geen groot effect, omdat deze dispersie een positief evenredig verband heeft met de getijsnelheid en daarom niet oneindig wordt bij zeer kleine getijsnelheden.



Figuur 4.5 Resultaten validatie Kuijper en van Rijn dispersieformulering met Rigter gootproeven.



Figuur 4.6 Resultaten validatie van de Gisen-dispersieformulering met Rigter gootproeven.

#### 4.4.4 Convergente estuaria

Voor convergente estuaria zijn alle formuleringen getest (Thatcher en Harleman, Kuijper en van Rijn – convergent, Gisen, Savenije en Zhang), de resultaten zijn weergegeven in Figuur 4.7 en Tabel 4.3. Er zijn ook vergelijkingen gemaakt voor alle zoutprofielen, waarvoor de statistische indicatoren zijn opgenomen in Tabel 4.3. De figuren van de deze vergelijking zijn alleen opgenomen in het afstudeerrapport (Daniëls 2016).

Bij grotere indringingslengte (Schelde en Delaware) vinden met de Gisen formulering grotere afwijkingen plaats. Dit zijn de breedste estuaria. Hiervoor presteert de Savenije formulering het beste. Deze formulering geeft echter gemiddeld een onderschatting van de indringingslengte, net als de Kuijper en van Rijn formulering. De onderschatting van de Kuijper en van Rijn formulering kan mogelijk gerelateerd worden aan de afwezigheid van de  $e^{i\varphi}$ -term. Tot slot is het opvallend dat de Zhang formulering geen verbeterde resultaten geeft voor brede estuaria (de indringingslengte wordt onderschat), terwijl deze formulering juist een uitdrukking bevat voor de zoutverspreiding via de eb- en vloedscharen in brede estuaria.

Opgemerkt dient te worden dat de formulering van Zhang is opgezet om de dispersie lokaal uit te rekenen en niet via een afhankelijkheid van de dispersie in de monding en de zoutgradiënt. Omdat lokaal uitrekenen niet mogelijk is in SOBEK 3.6<sup>3</sup> is de dispersieformulering omgeschreven naar de vorm waarbij de dispersie weer een functie is van de dispersie in de monding en de zoutgradiënt, d.w.z.

$$D = 0.1u_0E_0N_{R,0}^K \left( 1 + 10 \left( \frac{B_x}{E_x} \right)^2 \right) \left( \frac{S^{TA}}{S_0^{TA}} \right)^K \quad (16)$$

In plaats van:

$$D = 0.1u_xE_xN_{R,x}^K \left( 1 + 10 \left( \frac{B_x}{E_x} \right)^2 \right) \quad (16)$$

Theoretisch gezien zou dit tot vergelijkbare resultaten moeten leiden, zoals Kuijper en van Rijn hebben aangetoond, zie ook §2.3.3.

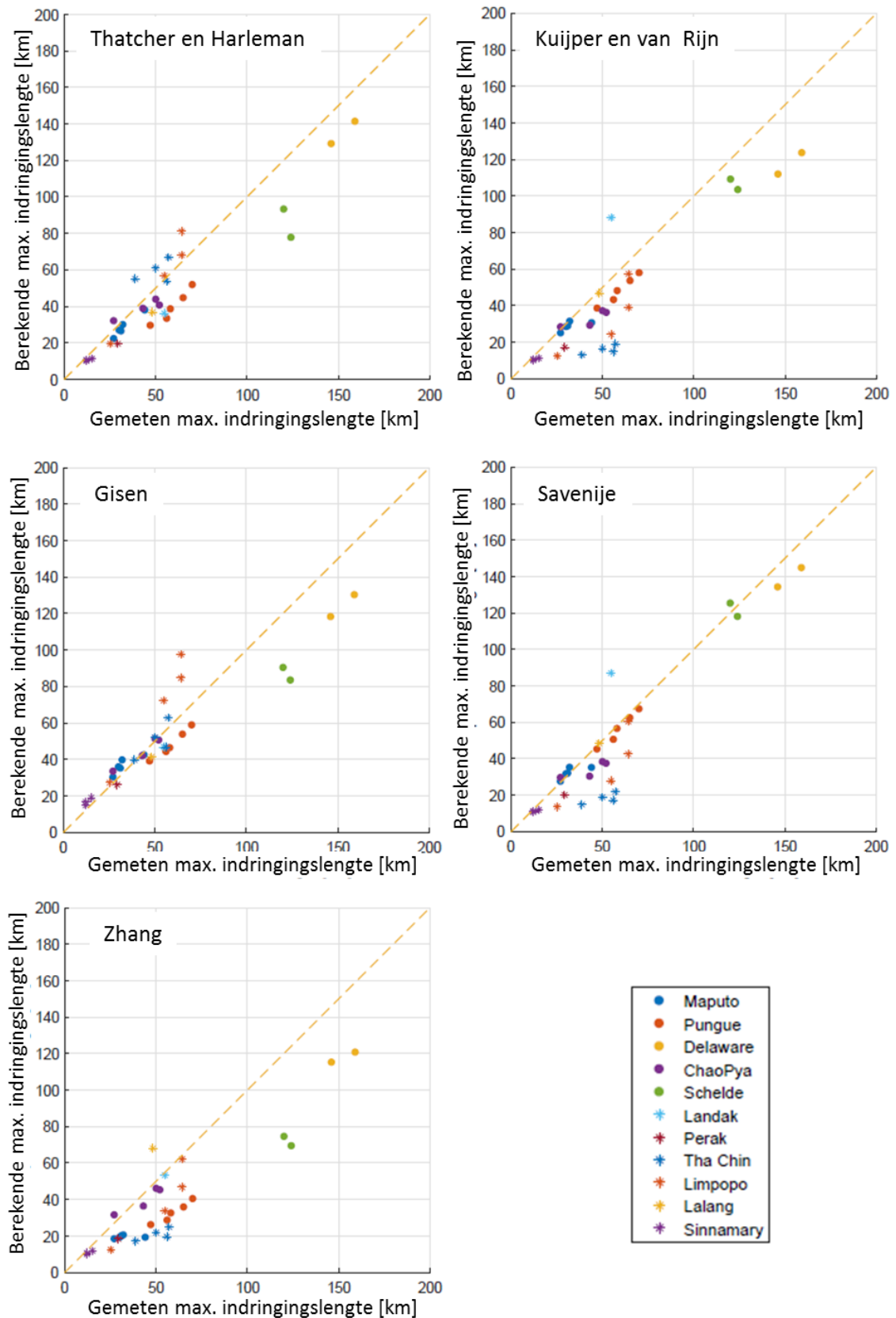
Tabel 4.3 Statistische indicatoren (correlatie en Root Mean Squared Error van de relatieve fout van de indringingslengte, standaardafwijking van de relatieve fout van de indringingslengte, gemiddelde afwijking van het zoutprofiel en standaardafwijking van de fout rondom de gemiddelde afwijking van het zoutprofiel) voor de validatie van de verschillende dispersieformuleringen voor convergente estuaria. Meer details zijn te vinden in Daniëls 2016.

Dispersieformule	TH	K&vR	Gisen	Savenije	Zhang
R2 [-]	0.87	0.83	0.85	0.86	0.82
RMSE [-]	0.23	0.35	0.21	0.30	0.38
$\sigma_L$ [-]	0.20	0.26	0.21	0.27	0.23
$B_e$ [ppt]	0.01	-2.62	0.35	-1.50	-2.24
$\sigma_p$ [ppt]	3.33	3.64	2.94	3.21	4.09

NB. Geen van deze formuleringen is getest met de aanpassing voor de definitie van het vloedvolume en de getijsnelheid in SOBEK, zie §4.4.5. Deze aanpassing is pas later gemaakt en alleen getest voor de Kuijper en van Rijn formulering voor prismatische kanalen. Omdat de convergente estuaria veelal lage rivierdebieten hebben zal de aanpassing waarschijnlijk nauwelijks verschillen opleveren.

<sup>3</sup> Versies 3.6-beta 1,2 en 3 en 3.6.2.

Samenvattend komt uit de validatie met de convergente estuaria niet duidelijk één formulering als beste naar voren. Bij niet al te grote indringingslengte presteert Gisen het beste, ook komen de zoutindringsprofielen het beste overeen met de metingen (laagste waarde voor  $\sigma_p$ ).



Figuur 4.7 Gemeten en berekende indringingslengtes voor de convergente estuaria voor verschillende dispersieformuleringen. Het figuur voor Thatcher Harleman is identiek aan Figuur 4.4

## 4.4.5 Verbeteringen op basis van validatie aangepaste Thatcher Harleman formulering

Op basis van de analyse uit §4.3 kan gesteld worden dat dispersie ten gevolge van:

- de mate van menging/ stratificatie en dichtheidsverschillen kwalitatief goed wordt gemodelleerd (variatie met rivierafvoer, getijamplitude en relatieve dichtheid), de afhankelijkheid met dichtheidsverschillen zou verbeterd kunnen worden door een hogere macht voor het estuarium getal te gebruiken.
- het effect van ruwheid op de menging, via turbulentie niet goed wordt gemodelleerd. Dit zou verbeterd kunnen worden door een afhankelijkheid met  $C/\sqrt{g}$  toe te voegen.
- het effect diepte op de gravitatiecirculatie en daarmee de verspreiding van zout niet goed wordt gemodelleerd. Dit zou verbeterd kunnen worden door de afhankelijkheid met  $h$  in te brengen.
- Er een piek optreedt bij hoge rivierafvoeren, welke verholpen kan worden door de definitie van de getijsnelheid en het vloedvolume aan te passen.

Niet volgend uit deze analyse, maar wel uit literatuur, volgt de aanbeveling om overstappen van  $\langle \frac{c}{c_0} \frac{\partial c^*}{\partial x} \rangle$  naar  $\langle \frac{c}{c_0} \rangle^K$ .

## 4.5 Vertakte estuaria: Branch Mouth relaties

In dit hoofdstuk zijn verschillende dispersieformuleringen getest voor onvertakte systemen. Indien een estuarium uit meerdere takken met eventueel ook meerdere mondingen bestaat, moet voor elke tak de monding worden gedefinieerd, waarvoor  $D_0$  bepaald wordt. Hier zijn drie opties voor beschikbaar (Figuur 4.8):

### Optie 1: Elke tak relateren aan de zeemonding(en)

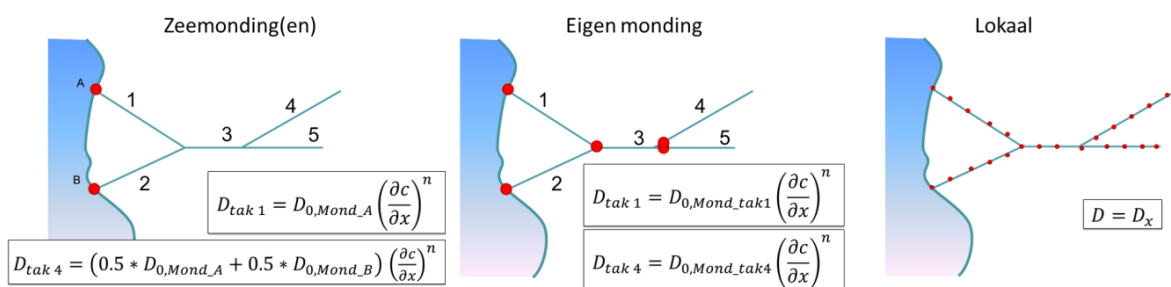
In SOBEK-RE wordt voor elke tak gedefinieerd aan welke zeemonding deze gerelateerd moet worden. Voor deze monding worden dan de waarden voor de getijsnelheid, diepte, getijvolume, restdebiet, saliniteit en dichtheid uitgerekend of door de gebruiker opgegeven. De gebruiker kan meerdere mondingen relateren aan één tak, indien hier sprake van is. Voor het uitrekenen van de dispersie in de betreffende tak wordt dan het gemiddelde van de verschillende mondingen gebruikt.

### Optie 2: Elke tak relateren aan de eigen monding

Het is ook mogelijk om elke tak als afzonderlijk estuarium te beschouwen en te relateren aan de eigen monding. Thatcher Harleman doet dit voor het Potomac estuarium welke uitmondt in een groter estuarium, namelijk de Chesapeake Bay.

### Optie 3: De dispersiecoëfficiënt lokaal uitrekenen (geen Branch Mouth relatie)

In recent onderzoek hebben Kuijper en van Rijn (2011) aangetoond dat de dispersiecoëfficiënt ook lokaal kan worden gedefinieerd (lokale waarde voor het Estuariene Richardson getal, voor de getijweglengte, de waterdiepte en de getijsnelheid), zie ook §2.3.3.



Figuur 4.8 Illustratie verschillende Branch-Mouth relaties



Optie 1 leidt ertoe dat de waarde voor de dispersiecoëfficiënt van een tak verderop in het estuarium grotendeels bepaald wordt door de karakteristieken van de tak die uitmondt in zee. Het estuariumgetal (mate voor menging) wordt immers bepaald op basis van de karakteristieken bij de zeemonding. Omdat elke tak in het estuarium een hele andere menging kan hebben lijkt dit een onlogische keuze en lijkt optie 2 beter. Dit zou bovendien vermijden dat de gebruiker bij elke tak moet opgeven aan welke zeemonding deze gerelateerd moet worden, de tak hoeft enkel aan het knooppunt benedenstrooms gerelateerd te worden. Ook is een middeling van de karakteristieken uit de verschillende zeemondingen niet langer nodig.

Eenvoudiger is het om alle waarden lokaal te definiëren (optie 3). Optie 2 en 3 hebben echter mogelijk beperkingen bij de praktische implementatie. Zo is bij optie 2 niet duidelijk welke monding gebruikt moet worden als de tak zout van twee kanten kan ontvangen (bijvoorbeeld het Spui) en moet bij optie 3 nagedacht worden hoe bijvoorbeeld de lokale dispersie kan worden berekend als er negatieve debieten optreden (Hollandsche IJssel). Tevens kunnen er bij optie 3 mogelijk instabiliteiten of onrealistische resultaten optreden door sterke fluctuaties in ruwheid of diepte, welke weer leiden tot sterke fluctuaties in de dispersie.

## 4.6 Discussie

### 4.6.1 Welke formulering is de beste?

Uit de analyse volgt dat voor de gootproeven (welke model staan voor de prismatische estuaria) de formulering van Kuijper en van Rijn-*prismatisch* het beste presteert en aanzienlijke verbeteringen geeft ten opzichte van de tot nog toe in SOBEK gebruikte Thatcher en Harleman formulering. Voor convergente estuaria komt niet eenduidig een formulering als beste naar voren. Omdat voor Gisen de zoutindingsprofielen het beste overeen komen met de metingen, zou deze als “beste” aangemerkt kunnen worden. Deze formulering kent echter praktische beperkingen bij de toepassing in de praktijk. Omdat de dispersie wordt berekend vanaf het inflectiepunt zijn er extra berekeningen nodig om de dispersie ook in de monding uit te rekenen, zie ook §0. Bovendien is het inflectiepunt, net als de locatie van de monding, niet altijd eenduidig.

### 4.6.2 Waarom verschillende formuleringen voor prismatische en convergente estuaria?

Een belangrijk discussiepunt is waarom er verschillende formuleringen nodig zijn voor prismatische en convergente estuaria. Dit valt mogelijk te relateren aan de geometrie. In de gootproeven zijn de breedte en diepte vergelijkbaar met elkaar, terwijl in werkelijke estuaria (prismatisch en convergent) de breedte vele malen groter is dan de diepte en zich allerlei onregelmatigheden in de geometrie bevinden.

In de gootproef zal bij een grotere getijamplitude de zoutindringing ten gevolge van dispersie afnemen, omdat de menging toeneemt/ stratificatie afneemt (zie ook uitleg in §4.3.1). Dit zien we terug in de formuleringen van Kuijper en van Rijn-*prismatisch* en Thatcher Harleman (omgekeerd evenredig verband van de dispersie met de getijsnelheid). Mogelijk neemt in echte estuaria de dispersie juist toe, omdat bij een grotere getijamplitude zout een grotere lengte heeft waarover mengingsprocessen kunnen optreden (zoals “tidal trapping” en “tidal pumping”), waardoor de menging ten gevolge van getijamplitude mogelijk juist toeneemt in plaats van afneemt. Dit zien we terug in de formuleringen van Kuijper en van Rijn-*convergent*, Savenije en Gisen (evenredig verband van de dispersie met de snelheid).

Bovengenoemde relatie met de geometrie is een hypothese, waarvoor nog geen bewijs is. Opvallend is overigens wel dat voor convergente estuaria Thatcher Harleman vergelijkbaar presteert als de andere formuleringen, terwijl de eerstgenoemde een omgekeerd evenredig verband heeft van de dispersie met de snelheid.

Samengevat betekent dit dat, of:

- er voor verschillend type estuaria vanwege het verschil in geometrie verschillende formuleringen dienen te worden gebruikt,
- de 1D gootproeven mogelijk niet representatief zijn voor echte estuaria (ook niet de prismatische), gezien de diepte en breedte schaal vergelijkbaar aan elkaar zijn en er geen onregelmatigheden zitten in de geometrie die bijdragen aan mengingsprocessen.
- de hypothese dat voor convergente estuaria een grotere getijamplitude tot grotere dispersie moeten leiden, door mengeffecten in de horizontaal incorrect is.

Het is niet eenvoudig te bewijzen welke van de bovenstaande opties de juiste is. Deze onzekerheid hoeft de voortgang van SOBEK 3 toepassingen voor de Rijn-Maasmonding niet te belemmeren. Er zijn voldoende relaties die wel zeker en uitgelegd kunnen worden. Bovendien biedt de nieuwe formule in SOBEK 3 mogelijkheden om indien nodig, op basis van fysica en de kennis die we daar nu van hebben, over te stappen op een andere formulering. Concrete vervolgstappen worden in §0 genoemd.

#### 4.6.3 Dispersie in systemen zonder getij of zonder rivierafvoer

Geen van de dispersieformuleringen is opgesteld voor systemen met kunstwerken zoals sluizen en stormvloedkeringen. Omdat hier processen in optreden die niet worden gedekt door de diverse dispersieformuleringen voor estuaria, zijn deze hier naar verwachting niet of in beperkte mate geschikt voor. Dit geldt ook voor systemen waarbij wind dominant is in de zoutverspreiding, ook voor dit type menging is geen parameter opgenomen in de geteste dispersieformuleringen.

Ook kunnen er in estuaria takken voorkomen waar geen rivierdebiet doorstroomt, zogenaamde “dode takken”. In de besproken dispersieformuleringen wordt de dispersie nul wanneer er geen rivierdebiet is. In dit soort systemen treedt echter wel dispersie op. De Thatcher en Harleman formulering is de enige dispersie formulering die hier een term voor heeft, de “Taylor Dispersie” term (zie formule 5 en 7), ofwel de  $f_3$ -term in SOBEK-RE (formule 19). Hoewel voor de Rigter proeven deze term van weinig belang is, omdat er altijd een zekere rivierafvoer is, is deze voor systemen als de Hollandsche IJssel wel degelijk van belang. Geadviseerd wordt om de Taylor dispersie term te handhaven en ook in te zetten voor de Rijn-Maasmonding. Alternatief zou hier ook een constante dispersie kunnen worden gebruikt, de huidige  $f_1$ -term in SOBEK-RE.

## 5 Vergelijking SOBEK 3.6 (met f4-term) voor de RMM

### 5.1 Inleiding

Zoals volgt uit hoofdstuk 5 geeft de Kuijper en van Rijn dispersieformulering de beste overeenkomsten voor de Rigter cases. Omdat de Rigter cases model staan voor prismatische kanalen in het algemeen en de Nieuwe Waterweg in het bijzonder is deze formulering geselecteerd om de Rijn-Maasmonding mee te berekenen. Hierbij gaat het om verkennende berekeningen, om na te gaan of (zonder afregeling van de coëfficiënten) de Kuijper en van Rijn formulering ook in de praktijksituatie tot realistische resultaten leidt.

In de berekeningen is de Kuijper en van Rijn formulering aangevuld met de f3 term, welke de Taylor dispersie weergeeft in gebieden waar dichtheidsstromingen (f4-term) geen, of een beperkte rol hebben in de verspreiding van zout. De geteste dispersieformulering ziet er als volgt uit:

$$D = 25 u(x, t) h(x, t) \frac{\sqrt{g}}{C} + 6 \hat{u}_0 h_0 N_R^{0.5} \frac{C}{\sqrt{g}} \left( \frac{S}{S_0} \right)^{0.5}$$

Hierbij is f3 = 25 (standaard waarde conform Thatcher en Harleman) en f4 = 6 (standaard waarde conform Kuijper en van Rijn).

In het vervolg van dit hoofdstuk worden het gemeten en gesimuleerde debiet, waterstand en chloridegehalte vergeleken. Hierbij zijn de gemeten debieten gebaseerd op QH-relaties, wat een onzekerheid geeft in de waarden. In Tabel 5.1 staan de locaties waarvoor de vergelijkingen zijn uitgevoerd weergegeven. De simulaties zijn uitgevoerd voor de periodes 2003 en augustus tot en met december 2011. Voor 2003 is hierbij de 1998 schematisatie gebruikt en voor 2011 de 2015 schematisatie, maar zonder de Tweede Maasvlakte (alles achter het Yangtzekanaal is eruitgehaald) en zonder de ruimte voor de rivier maatregelen in de Noordwaard.

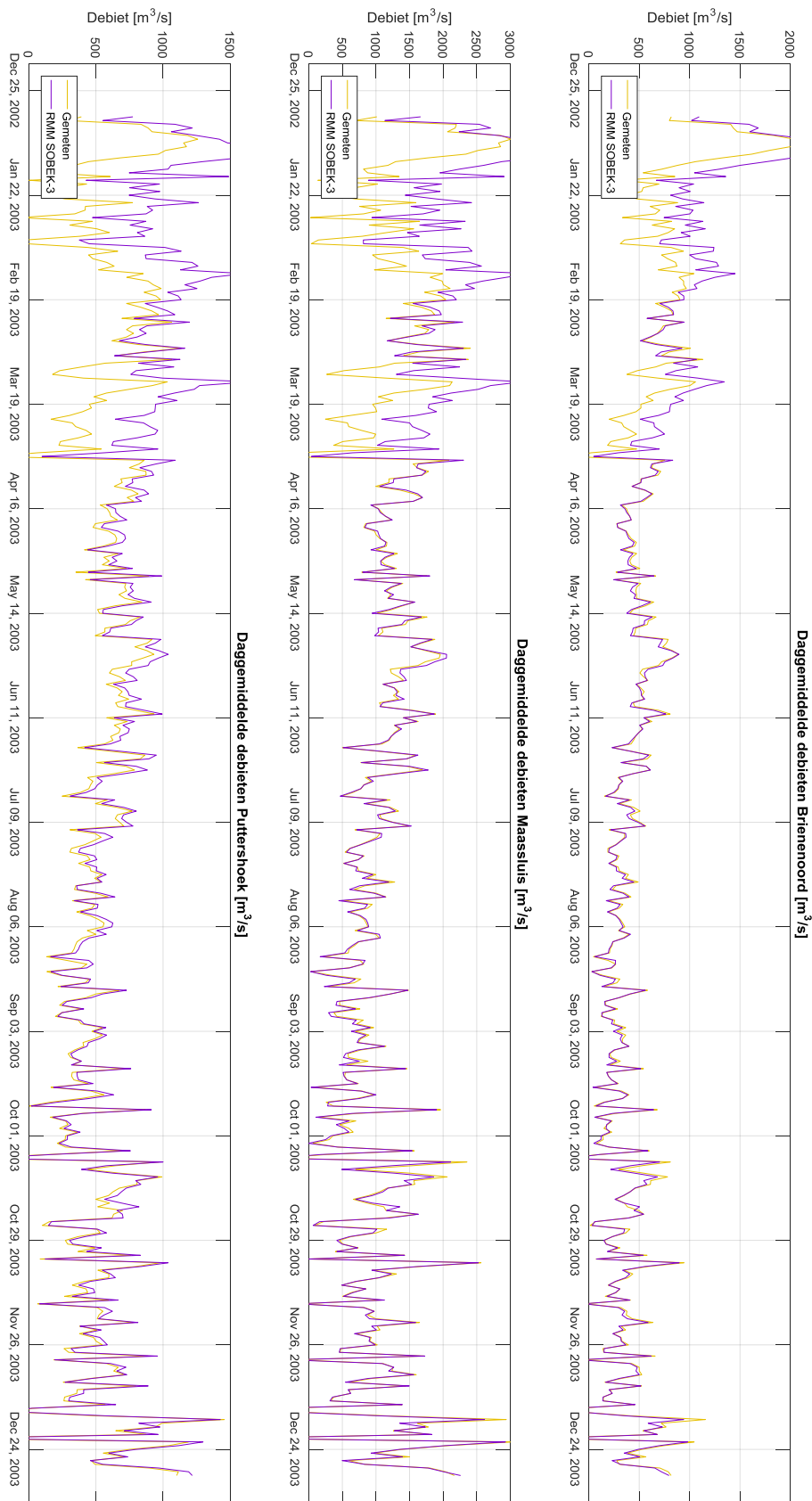
Tabel 5.1 Locaties waarvoor vergelijkingen zijn uitgevoerd

Debiet	Water level	Chloride gehalte
<b>Maassluis (Nieuwe Waterweg)</b>	Hoek van Holland (Nieuwe Waterweg)	Hoek van Holland (Nieuwe Waterweg)
<b>Brienoord (Nieuwe Maas)</b>	Maassluis (Nieuwe Waterweg)	Lekhaven (Nieuwe Maas)
<b>Puttershoek (Oude Maas)</b>	Rotterdam (Nieuwe Maas)	Brienoord (Nieuwe Maas)
	Spijkenisse (Oude Maas)	Spijkenisse (Oude Maas)
		Beerenplaat (Oude Maas)

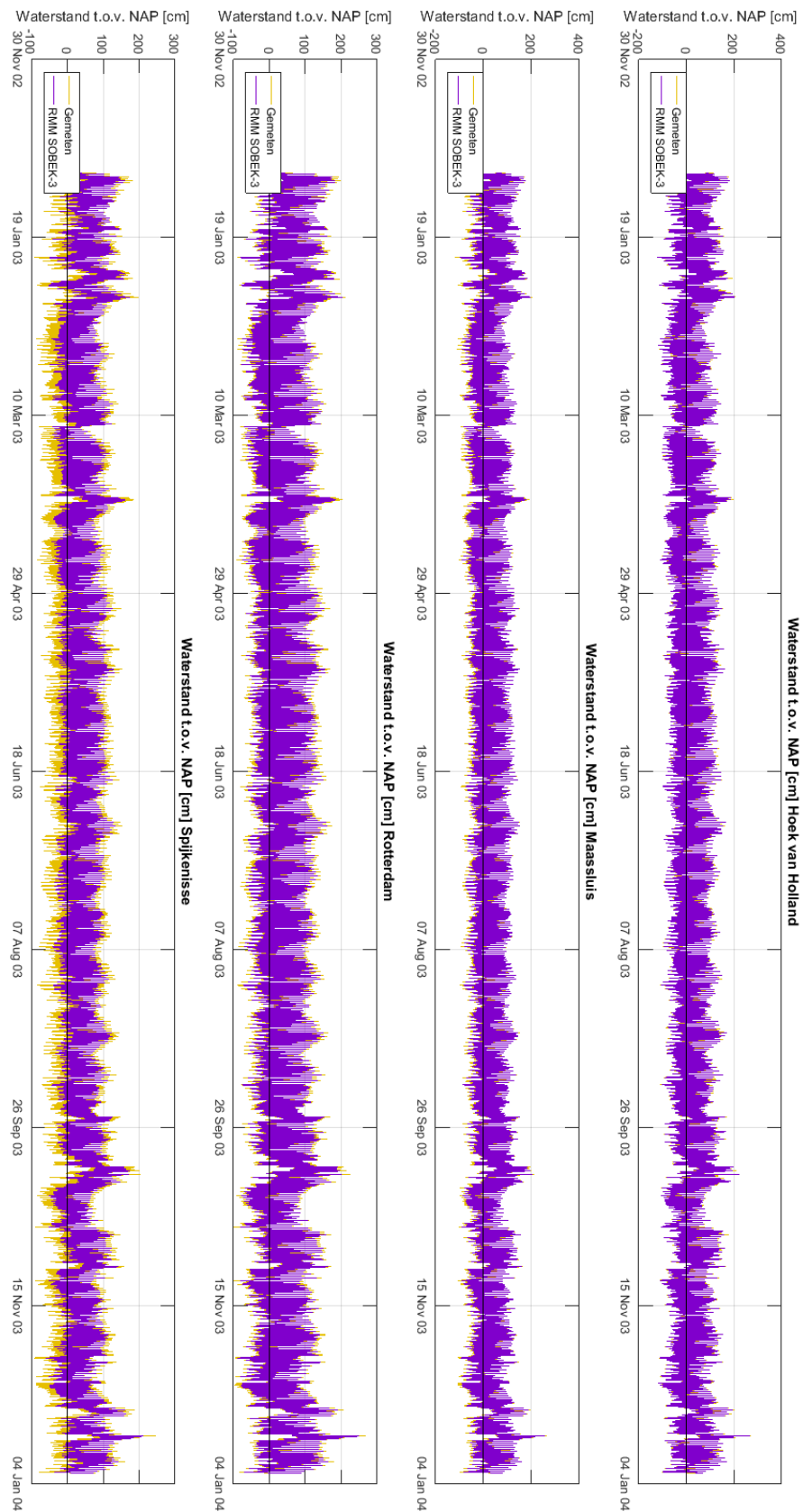
### 5.2 Hydrodynamica

#### 5.2.1 Evaluatie 2003

In Figuur 5.1 kan men zien dat de gesimuleerde debieten tijdens verhoogde afvoeren overschat worden door het model (periode januari t/m maart). De gesimuleerde debieten tijdens lagere afvoeren komen goed overeen (april t/m december). Alleen het debiet bij Puttershoek in de Oude Maas wordt lichtelijk overschat door het model. Figuur 5.2 toont de waterstanden in het systeem. In de Nieuwe Waterweg, bij Hoek van Holland en Maassluis, komen de gemeten en gesimuleerde waterstanden goed overeen.



Figuur 5.1 Daggemiddelde debieten 2003



Figuur 5.2 Waterstanden 2003

In de Nieuwe Maas, bij Rotterdam, is de getij-invloed te sterk gedempt en worden de gemeten pieken in hoog en laag water onderschat door het model. Deze demping is nog sterker merkbaar in de Oude Maas, bij Spijkenisse. Hier worden de pieken in eb en vloed sterk onderschat. Dit wordt mogelijk veroorzaakt door de overschatting in rivierafvoer, waardoor het getij te veel is gedempt in het model.

Het verschil tussen gemeten en berekende hydrodynamica heeft naar verwachting drie gevolgen: 1) dat de chlorideconcentraties van januari tot en met maart onderschat zullen worden in de Nieuwe Waterweg, de Nieuwe en Oude maas, 2) dat de simulaties de chlorideconcentraties in de Oude Maas voor de hele periode onderschatten en 3) dat de gesimuleerde chlorideconcentraties in de Nieuwe en Oude Maas niet genoeg variëren tussen eb en vloed.

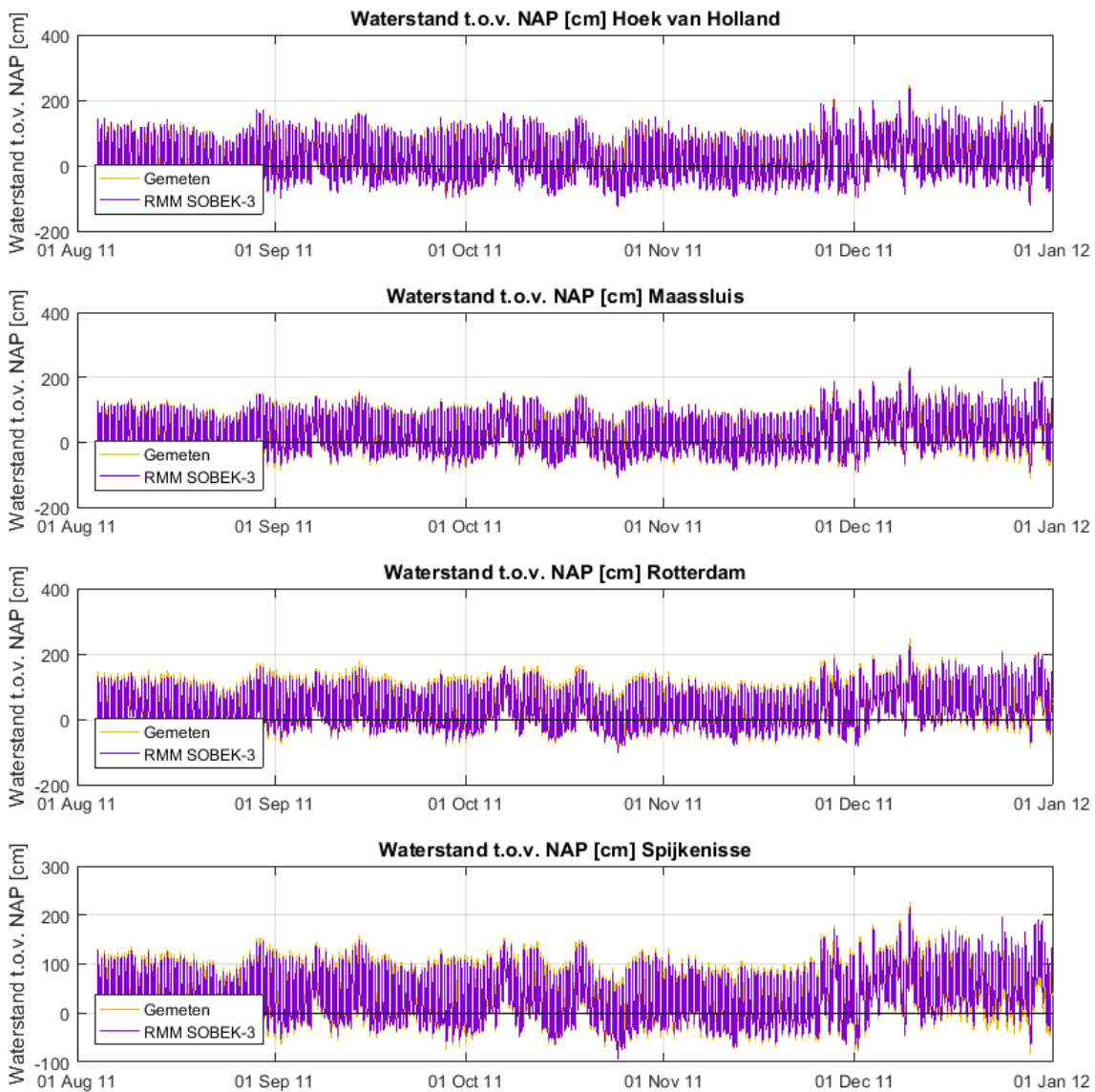
## 5.2.2 Evaluatie 2011

In Figuur 5.3 is te zien dat het model de gemeten debieten lichtelijk onderschat voor het jaar 2011. Alleen wanneer de afvoer toeneemt, ziet men een overschatting van de gemeten debieten (december 2011). De waterstanden worden wederom goed benaderd. Net als voor 2003 is er sprake van een te sterke demping van het getij, zie Figuur 5.4, welke zich het beste zien bij Rotterdam en Spijkenisse. Omdat voor 2011 de afvoeren juist enigszins worden onderschat op de Oude Maas, kan dit niet de verklaring zijn voor de sterke demping en moet de verklaring ergens anders worden gezocht.

Het gevolg van een onderschatting van het debiet op de zoutindringing is dat deze naar verwachting te groot is in de simulaties. In december, wanneer het debiet overschat wordt, worden de zoutgehalten naar verwachting onderschat.



Figuur 5.3 Debieten 2011



Figuur 5.4 Waterstanden 2011



### 5.3 Chloride concentraties

#### 5.3.1 Evaluatie 2003

In Figuur 5.5 worden de chlorideconcentraties in het systeem weergegeven voor het jaar 2003. Daarbij zijn de opzet bij Hoek van Holland en het debiet bij Lobith geplot. De eerste indruk is dat trends tussen gemeten en berekende chloride concentraties overeenkomen. De verwachte onderschatting van de chlorideconcentraties ten gevolge van de overschatting van de rivierafvoer in januari-maart treedt niet op. Wel is de variatie in chlorideconcentratie tussen eb en vloed te klein in de Nieuwe Waterweg (Hoek van Holland) en de Nieuwe Maas (Lekhaven en Brienoord), zoals werd verwacht op basis van onderschatting van de variatie van de waterstanden. De variatie in chlorideconcentraties is te groot in de Oude Maas (Spijkenisse), wat niet direct uit de hydrodynamica verklaard kan worden. Tot slot valt op dat de chlorideconcentratie in zijn algemeen onderschat wordt in de Nieuwe Maas (Lekhaven) en overschat wordt in de Oude Maas (Spijkenisse). In de discussie §0 wordt hier nader op ingegaan. Om te verifiëren of de formulering voor verschillende type condities in staat is de zoutconcentraties te reproduceren zijn een aantal onderscheidende periodes geselecteerd, waarvoor de zoutconcentraties in meer detail zijn geëvalueerd. Het gaat hierbij om

- 3 maart – 8 april: periode van verhoogde afvoer (d.w.z. meer dan de gemiddelde Bovenrijnafvoer van ongeveer 2200 m<sup>3</sup>/s) met op het eind een windopzet,
- 13 juli – 22 augustus: periode van lage rivierafvoer ( $Q_{\text{Lobith}} < 1700 \text{ m}^3/\text{s}$ ) en geen windopzet.
- 9 december – 25 december: periode van overwegend lage rivierafvoer en tweemaal windopzet.

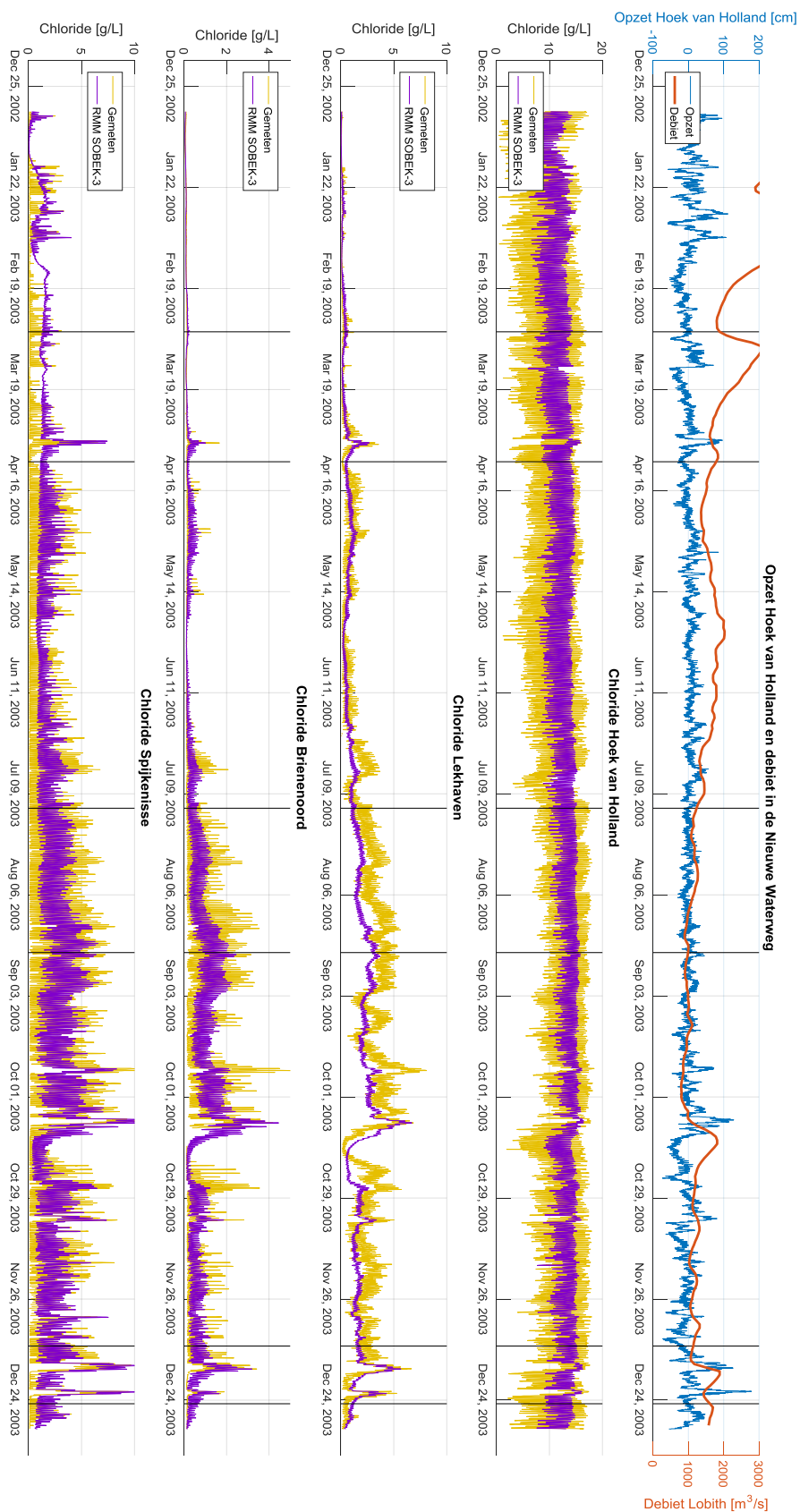
Voor een objectieve evaluatie van de berekende chlorideconcentraties binnen die periodes zijn in Tabel 5.2 de bias (gemiddelde fout) en RMSE opgenomen. Daarnaast worden in Tabel 5.3 de drie periodes nader beschreven en geanalyseerd. Tot slot worden in §5.4 detailfiguren gegeven voor deze drie periodes. Een nadere discussie volgt in §5.4 en §0.

Tabel 5.2 Objectieve, kwantitatieve criteria voor de prestatie van berekende chlorideconcentraties voor het jaar 2003

	Totaal 2003		3 mrt - 8 apr		13 jul - 22 aug		9 dec - 25 dec	
	Bias	RMSE	Bias	RMSE	Bias	RMSE	Bias	RMSE
<b>Hoek van Holland</b>	-0.0876	0.3244	-0.0257	0.4371	-0.0281	0.4371	-0.2656	0.4200
<b>Lekhaven</b>	-1.5086	2.8807	-1.9876	2.1025	-0.5492	2.1025	-1.8989	3.2888
<b>Brienoord</b>	0.3807	0.8734	-0.0638	1.3395	1.1870	1.3395	-0.0944	0.8181
<b>Spijkenisse</b>	0.1395	1.4242	-0.9715	1.8976	0.8832	1.8976	0.1947	1.3257

Tabel 5.3 Hydrodynamica en chlorideconcentraties in specifieke periodes.

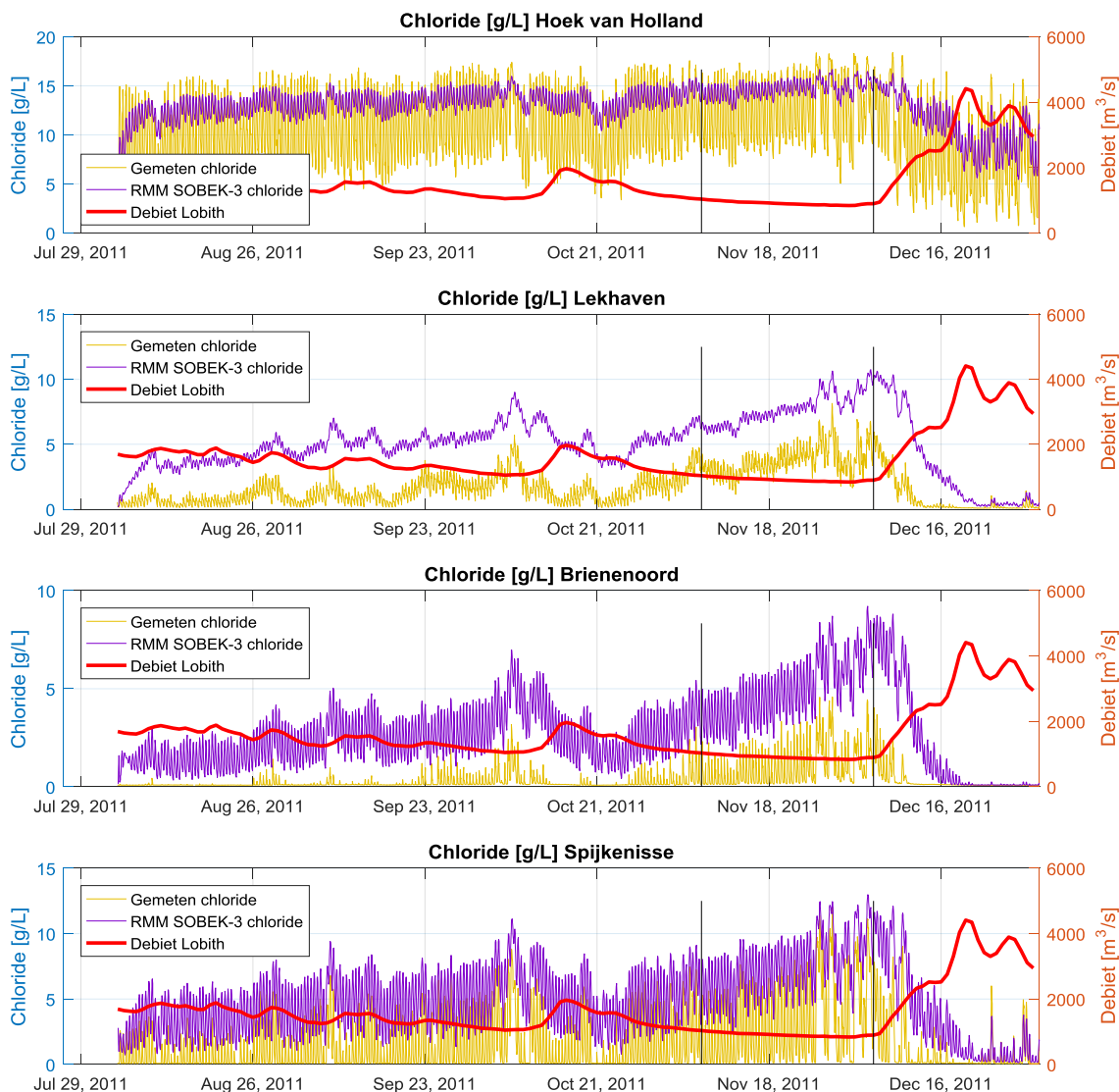
		3 maart – 8 april	13 juli – 22 augustus	9 december -25 december
<b>Hydrodynamica</b>	Randvoorwaarden	Periode van verhoogde rivierafvoer bij Lobith met op het einde van de periode opzet bij Hoek van Holland.	Periode met globaal een lichte afname van de toch al lage rivierafvoer bij Lobith en geen opzet bij Hoek van Holland.	Periode met in het begin een toename van de afvoer bij Lobith en twee opzet pieken bij Hoek van Holland.
<b>Hoek van Holland</b>	Nieuwe Waterweg	Net na de piek in de afvoer en opzet die flink afneemt is een dip te zien in zowel gesimuleerde als gemeten chlorideconcentratie. Tijdens de opzet op het einde van de periode is een toename van de minimum chlorideconcentratie te zien in zowel meting als simulatie. Trends worden goed weergegeven, amplitude wordt onderschat.	Gemeten zoutconcentraties variëren met de getijcyclus en vertonen daarbovenop enkel lichte variaties, welke niet in de simulaties te zien zijn.	Tijdens de opzet pieken treedt er duidelijk verzilting op. Dit is terug te zien in zowel meting als simulatie.
<b>Lekhaven</b>	Nieuwe Maas	Tijdens de afvoerpiek gebeurt er weinig met de chlorideconcentratie. Deze is laag voor zowel meting als simulatie. Tijdens de opzet op het einde van de periode is een toename in de gemeten en gesimuleerde chlorideconcentratie te zien.	Zowel de gemeten als gesimuleerde chlorideconcentraties nemen lichtelijk toe met het lichtelijk afnemende debiet. De gesimuleerde toename onderschat de gemeten toename.	Tijdens de grootste opzet tonen zowel de gemeten als gesimuleerde chlorideconcentraties pieken. Na de piek heeft het model echter net wat meer tijd nodig om het zout af te voeren dan het systeem, zoals de vergelijking met de metingen toont. In de aanloop naar de eerste piek onderschat het model de gemeten waarden.
<b>Brieneoord</b>	Nieuwe Maas	Zie uitleg Lekhaven.	De gesimuleerde pieken onderschatten de gemeten pieken.	Het systeem vertoont het zelfde gedrag als bij Lekhaven. Enig verschil is dat in de aanloop naar de eerste opzet piek de gemeten chlorideconcentraties beter worden nagebootst.
<b>Spijkenisse</b>	Oude Maas	Zoals eerder aangegeven, over heel 2003 gezien komt er teveel zout in de Oude Maas. Tijdens de opzet bij Hoek van Holland is er in de metingen een kleine piek in de chlorideconcentratie te zien, in de simulatie is deze piek overschat.	De juiste trends zijn zichtbaar. De gesimuleerde chlorideconcentratie is iets te hoog en varieert iets teveel tussen laag en hoog water. De metingen laten waarschijnlijk wederom een achtergrond concentratie zien (laag water), welke in de simulaties niet bereikt wordt.	De simulaties geven hogere chlorideconcentraties dan de metingen en vertonen daarbij meer variatie tussen laag en hoog water.



Figuur 5.5 Chloride concentraties 2003

## 5.3.2 Evaluatie 2011

Figuur 5.6 toont de gemeten en gesimuleerde chlorideconcentraties voor augustus tot en met december 2011. Te zien is dat de simulaties de gemeten chlorideconcentraties flink overschatten voor de hele periode en voor alle locaties. Tot halverwege december kan deze onderschatting gedeeltelijk worden toegeschreven aan de overschatting van de afvoeren, maar de mate van overschatting suggereert ook een andere (nog onbekende) oorzaak. De trend in de metingen komt goed overeen met de trend in de simulaties. Wat wederom opvallend is, is dat de variatie tussen maximale en minimale chloridegehalten bij Hoek van Holland en Lekhaven weer flink onderschat worden in de simulaties. In Figuur 6.6 staat ook het debiet bij Lobith geplot. Het is duidelijk te zien dat wanneer het debiet toeneemt (december), zowel de gemeten als gesimuleerde concentraties afnemen en dat de twee chloridepieken bij Spijkenisse een stuk beter gesimuleerd worden dan tijdens de periodiek lage afvoer in de periode daarvoor (periode tussen zwarte lijnen). In Tabel 6.3 zijn wederom de bias en RMSE opgenomen, om een kwantitatief beeld te genereren van de kwaliteit van de simulaties.



Figuur 5.6 Chloride concentraties 2011

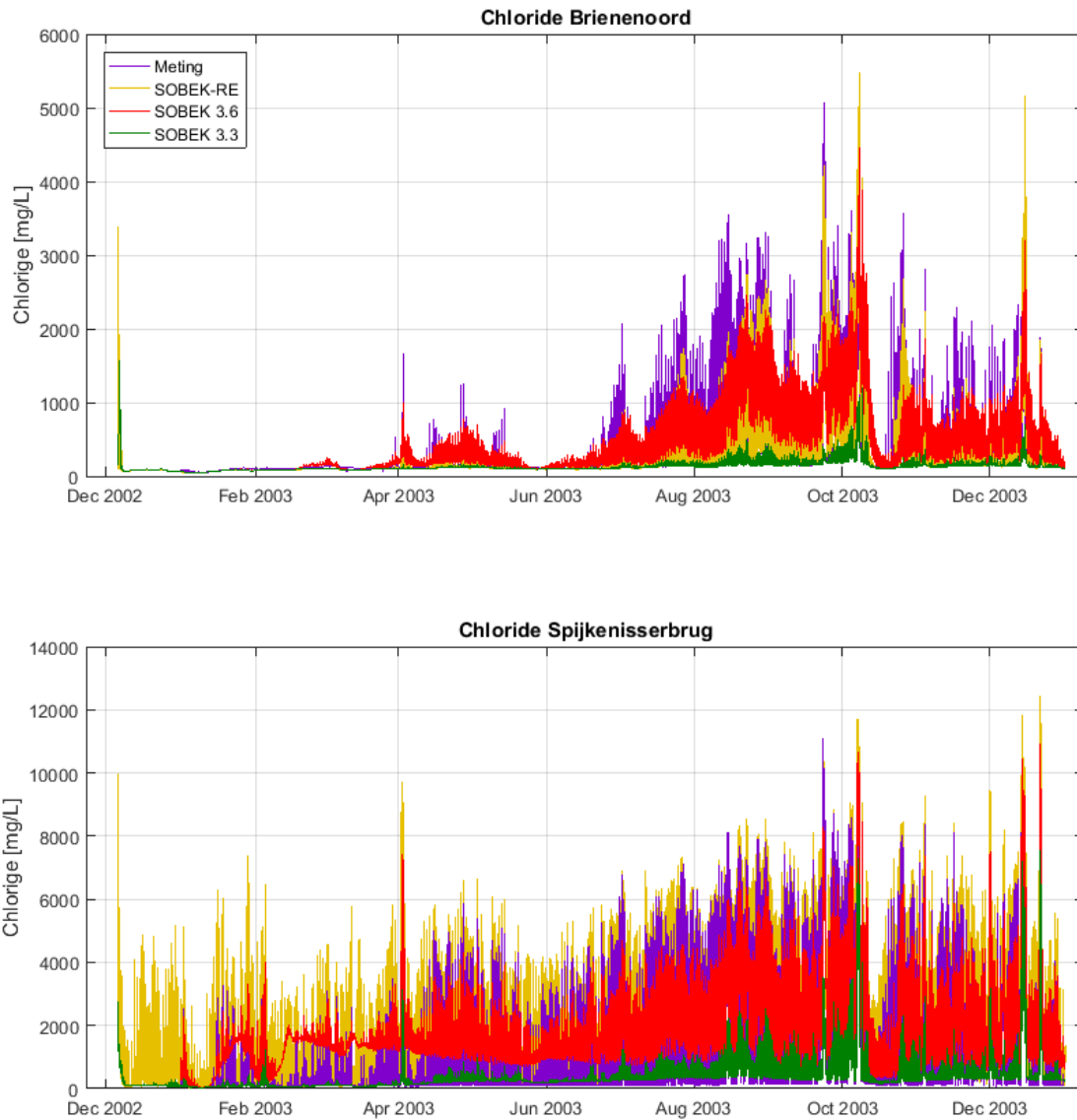
	Totaal 2011		7 nov - 5 dec	
	Bias	RMSE	Bias	RMSE
<b>Hoek van Holland</b>	-2.4399	2.8984	-3.9487	1.6291
<b>Lekhaven</b>	-2.4678	3.5419	-2.1772	3.6130
<b>Brienoord</b>	-3.4381	3.6938	-4.0183	2.9320
<b>Spijkenisse</b>	-3.3971	3.8044	-4.3711	4.6020

Tabel 5.4 Objectieve, kwantitatieve criteria voor de prestatie van berekende chlorideconcentraties voor het jaar 2011

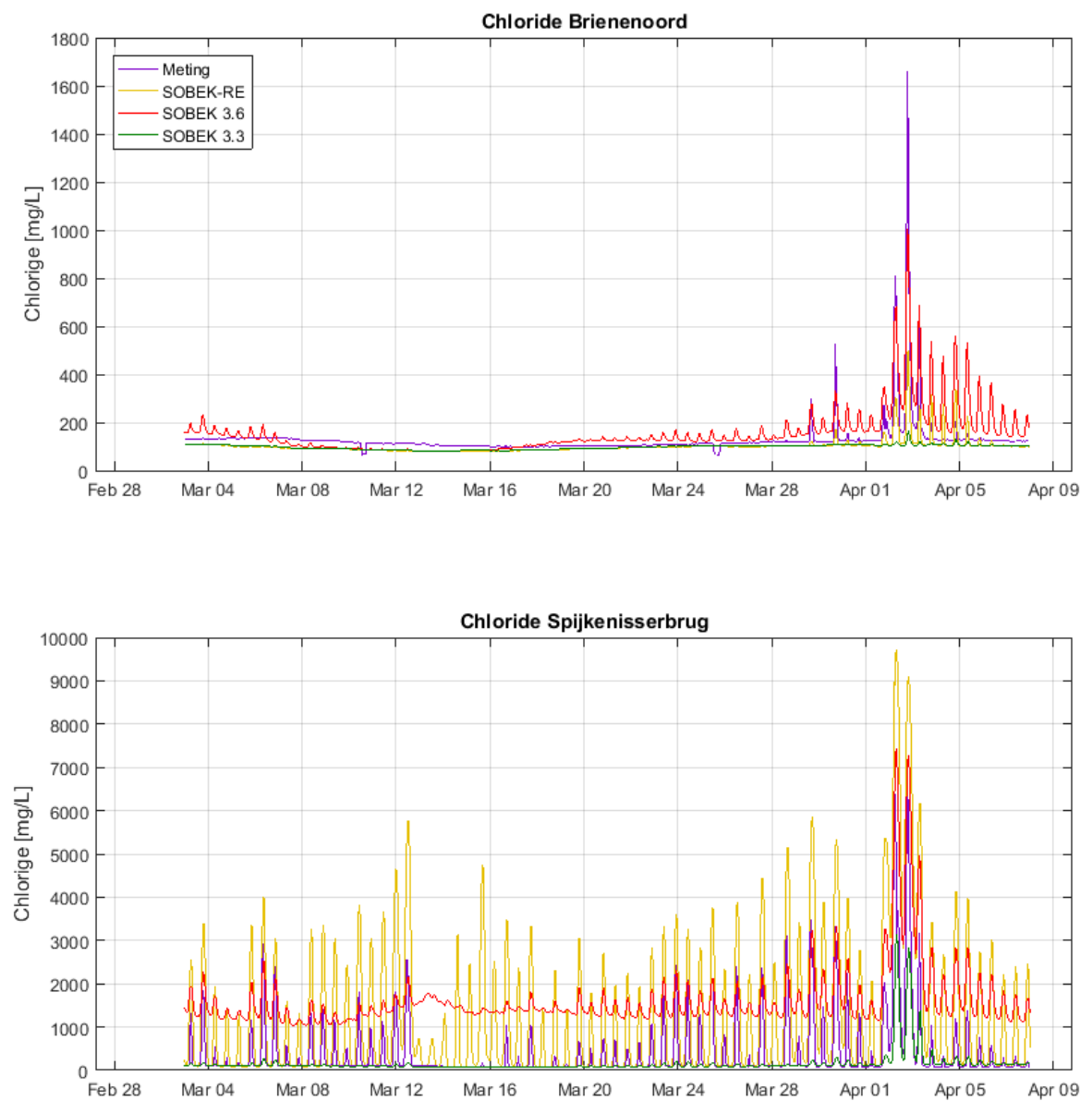
#### 5.4 Vergelijking SOBEK-RE en SOBEK 3

Figuur 5.7 - Figuur 5.10 tonen voor 2003 bij Brienoord en Spijkenisserbrug de vergelijking tussen de gemeten concentraties en de verschillende SOBEK-berekeningen: SOBEK-RE met de voor f4 de Thatcher Harleman formulering, SOBEK 3.3 met alleen f1 en f3 en SOBEK 3.6.2 met voor f4 de Kuijper en van Rijn formulering. Dit figuur bevestigt dat de f4-term essentieel is voor een betere reproductie van de metingen (zie resultaten in Bijlage A); zonder deze term is er duidelijk te weinig indringing. De resultaten van SOBEK NDB en SOBEK 3.6.2 liggen duidelijk dichterbij de metingen. Ze onderschatten beide de zoutindringing bij Brienoord en overschatten beide de zoutindringing bij Spijkenisserbrug.

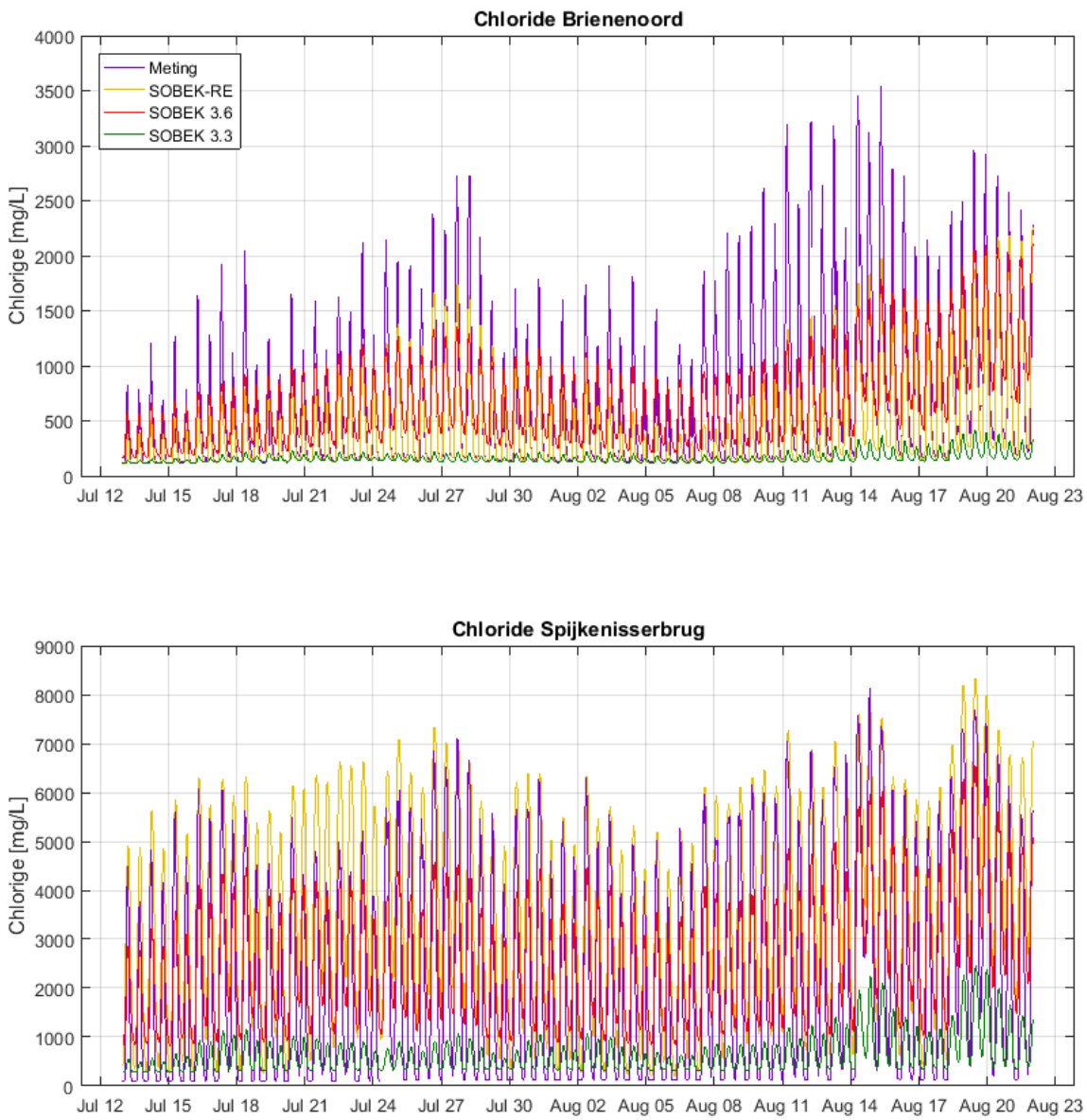
Het verschilt sterk per locatie en conditie welke van de twee modellen het beste presteert. Gemiddeld worden bij Spijkenisserbrug de maximale concentraties beter gesimuleerd met SOBEK 3.6.2, terwijl de maximale concentraties bij Brienoord door beide modellen min of meer even goed worden benaderd. Het grootste verschil tussen SOBEK NDB en SOBEK 3.6.2 is dat SOBEK NDB de minimale concentraties beter benaderd.



Figuur 5.7 Gemeten en berekende chlorideconcentratie bij Brienenoord (boven) en Spijkenisserbrug (onder), voor heel 2003.

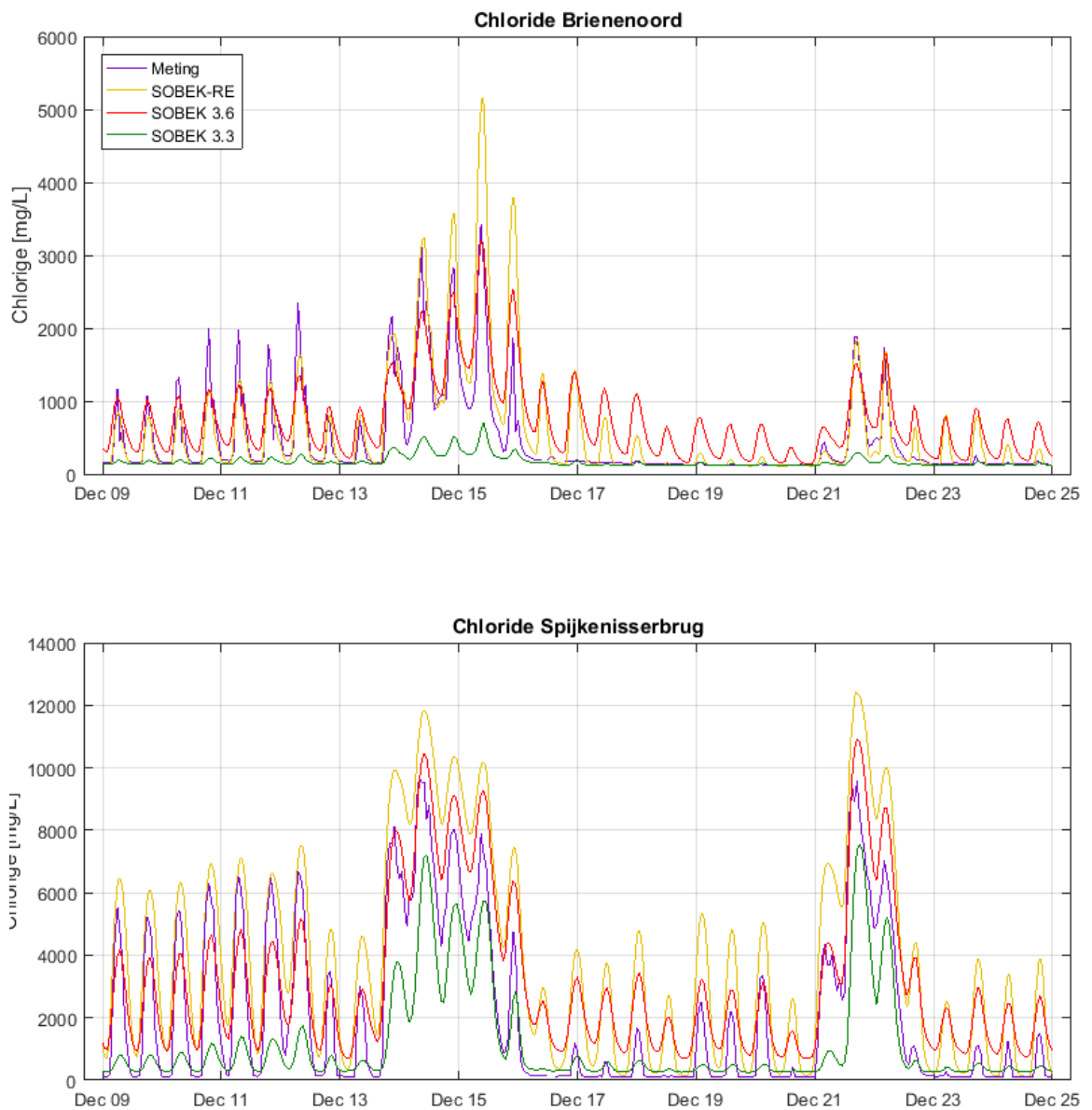


Figuur 5.8 Gemeten en berekende chlorideconcentratie bij Brienenoord (boven) en Spijkenisserbrug (onder), voor de periode 3 maart tot 8 april 2003.



Figuur 5.9 Gemeten en berekende chlorideconcentratie bij Brienenoord (boven) en Spijkenisserbrug (onder), voor de periode 13 juli tot 22 augustus 2003.





Figuur 5.10 Gemeten en berekende chlorideconcentratie bij Brienoord (boven) en Spijkenisserbrug (onder), voor de periode 9 tot 25 december 2003.

## 5.5 Discussie

De resultaten gebruikmakend van een f4-term geven duidelijk betere resultaten ten opzichte van de dispersieformulering bestaande uit enkel de f1 en f3-term. Het SOBEK 3.6.2 model met f4-term geeft een vergelijkbaar beeld als het SOBEK-RE model. Daarbij dient opgemerkt te worden dat het SOBEK 3.6.2 nog niet is gekalibreerd op zout en het SOBEK-RE model wel.

Wat meteen opvalt in Figuur 5.5 is dat de chlorideconcentratie in de Nieuwe Maas structureel te laag is en in de Oude Maas structureel te hoog in het jaar 2003. Voor het jaar 2011 is er voor alle locaties duidelijk een overschatting van de chlorideconcentraties te zien, zie Figuur 5.6. Daarbij is er een te kleine variatie in chlorideconcentratie tussen eb en vloed welke mogelijk het gevolg is van de randvoorwaarde. Bij Hoek van Holland, wat dicht bij de rand van het model licht, is deze variatie namelijk ook te klein.

In 2003 is er een overschatting van berekend debiet in de Oude Maas waar te nemen. Dit leidt niet tot een onderschatting van de chlorideconcentraties, in plaats daarvan wordt de chlorideconcentratie in de Oude Maas structureel overschat en de chlorideconcentraties in de Nieuwe Maas structureel onderschat. Hier zijn een aantal mogelijke verklaringen voor, waaronder:

- 1 effect van het splitsingspunt. Op het splitsingspunt spelen complexe 3D processen een rol in de verdeling van zout, welke niet ondervangen worden door de dispersieformulering. Mogelijk gaat hierdoor te veel zout richting de Oude Maas ten koste van de Nieuwe Maas.
- 2 Branch Mouth relatie. In de huidige opzet wordt de dispersie in een tak uitgerekend op basis de dispersie van de zeemonding (in dit geval Hoek van Holland). Mogelijk dat dit resulteert in bovengenoemde afwijkingen (verwijzing naar 4.2 en 5.5).

Voor het jaar 2011 is er te zien dat de chlorideconcentraties overschat worden tijdens periodes van lage afvoer. Dit is mogelijk deels het gevolg van de onderschatting van het debiet, die voor een overschatting van zoutindringing zorgt. De mate van overschatting suggereert ook een andere (nog onbekende) oorzaak.

## 6 Conclusies en aanbevelingen

### 6.1 Conclusies

In 1D hydrodynamische modellen wordt het transport van zout bepaald door advectie en dispersie. Advectie is de verspreiding van zout met de “hoofdstroom” mee. Onder dispersie van zout wordt in dit onderzoek verstaan: alle 2D en 3D verspreidingsprocessen die in 1D uitgemiddeld worden. Deze verspreidingsprocessen worden samengenomen in één dispersieterm. Hiervoor zijn verschillende dispersieformuleringen beschikbaar. De algemene vorm van deze formuleringen is afhankelijk van de menging (verhouding rivierafvoer en getijamplitude) en de zoutgradiënt langs het estuarium en kent daarmee een fysische basis.

SOBEK maakt gebruik van de formulering van Thatcher Harleman welke uit twee termen bestaat, de algemene vorm met een afhankelijkheid van de mate van menging en de zoutgradiënt (f4-term) en een term voor de zogenaamde Taylor dispersie (f3-term). In dit project is de f4-term uit de Thatcher Harleman formulering gevalideerd voor prismatische kanalen en convergente estuaria. In een tweede stap is deze formulering uitgebreid zodanig dat ook de recent ontwikkelde formuleringen van Savenije, Kuijper en van Rijn, Gisen en Zhang gevalideerd konden worden.

Voor prismatische kanalen is bij deze validatie gebruik gemaakt van de getijgootproeven van Rigter. Op basis van een vergelijking met metingen van getijgootproeven waarbij steeds één variabele (diepte, getijamplitude, ruwheid, relatieve dichtheid, lengte of afvoer) is gevarieerd, is geconcludeerd dat de formulering van Kuijper en van Rijn de zoutindringingslengte het beste beschrijft voor de doorgerekende situaties. Deze formulering heeft een directe afhankelijkheid met diepte en ruwheid. Voor convergente estuaria kwam er niet eenduidig één formulering als beste uit de analyse van 11 estuaria onder verschillende condities.

Ter validatie van de software voor een vertakt en werkelijk estuarium is het jaar 2003 doorgerekend voor de RMM schematisatie. Eerst zonder een f4-term, omdat deze toen niet beschikbaar was in SOBEK 3. De zoutgehalten berekend met dit SOBEK 3-RMM model, welke was gekalibreerd op een hoge afvoer, wijken fors af van de metingen in een droge periode in 2003. In die droge periode berekent het SOBEK-RE NDB model over het algemeen van vergelijkbare grootte als de metingen. Vervolgens is de RMM schematisatie ook doorgerekend met SOBEK 3 met f4-term. Omdat Kuijper en van Rijn het beste presteert voor prismatische kanalen, is voor de f4-term deze formulering gebruikt samen met de f3-term van de Thatcher Harleman formulering. Hieruit volgt dat (zelfs) zonder kalibratie de trend van de berekende zoutgehalten vergelijkbaar is met de metingen. Dit geeft vertrouwen in de formulering. Dit is een bevestiging dat de f4-term cruciaal is.

Wat opvalt, is dat de in de Oude Maas berekende zoutconcentraties te hoog zijn en in de Nieuwe Maas te laag. Hier zijn twee potentiële verklaringen voor: 1) of de 3D verspreidingsprocessen op het splitsingspunt worden niet goed weergegeven in het 1D model waardoor te veel zout naar de Oude Maas gaat en te weinig naar de Nieuwe Maas, of 2) de relatie van de dispersie in beide takken aan de zeemonding (Hoek van Holland) veroorzaakt dit probleem, omdat de dispersie in deze beide takken in werkelijkheid verschilt.

## 6.2 Aanbevelingen

### Testen Kuijper en van Rijn formulering op de Rijn-Maasmonding

Hoofdstuk 6 beschrijft een eerste analyse van het testen van de Kuijper en van Rijn formulering voor de RMM. Hierbij is voor een aantal verschillende condities (zogenaamde “hoekpunten”, zoals lage versus verhoogde rivierafvoer en wel en geen windopzet) geëvalueerd of de Kuijper en van Rijn formulering goed representeert voor een werkelijk estuarium. Aanbeveling is om de geobserveerde verschillen nader te duiden en een nadere analyse te doen ter validatie van de formulering voor vertakte systemen. Daarnaast wordt geadviseerd om deze hoekpunten (situaties uit 2003 en 2011) in de vervolgstappen te gebruiken om steeds de software aanpassingen (zoals formuleringen en branch-mouth relatie) mee te testen. Door het doorzetten van deze hoekpuntenanalyse kan uiteindelijk een definitieve keuze voor Kuijper en van Rijn (of een andere formulering) gemaakt worden.

### Kiezen juiste Branch-Mouth relatie

Onderzoek doen naar welke Branch-mouth relatie het beste werkt (zeemonding, eigen monding of lokaal). Deze relatie geeft aan op basis van welke monding de dispersiecoëfficiënt wordt bepaald. Hierbij verdient de optie “Lokaal” inhoudelijk de voorkeur omdat dit het opzetten van Branch Mouth relaties overbodig maakt en de nieuwste wetenschappelijke ontwikkelingen (Kuijper and van Rijn 2011; Zhang and Savenije 2016) uitgaan van deze optie. Hoe dit onderzoek zou kunnen worden opgezet is in detail uitgewerkt in het plan van aanpak voor 2017.

### Achtergronddispersie en afwijkende systemen

De dispersieformuleringen die hier zijn toegepast zijn niet bedoeld voor systemen waarin kunstwerken of wind een belangrijke invloed hebben op de zoutverspreiding, of in dode takken. Zoals besproken in §4.6.3 is er ook in systemen waar de rivierafvoer zeer klein is wel dispersie aanwezig. Omdat de meeste dispersieformuleringen (en daarmee ook de Kuijper en van Rijn formulering) bij een rivierdebiet van 0 ook een dispersiewaarde van 0 bereken, wordt geadviseerd wel een term te behouden voor de achtergronddispersie. Dit zou de Taylor dispersieterm van Thatcher en Harleman kunnen zijn (f3-term in SOBEK) of een constante achtergronddispersie (f1-term in SOBEK), of beide.

Omdat de diverse dispersieformuleringen geen uitdrukking bevatten voor de zoutverspreidingsprocessen in systemen met sluizen of stormvloedkeringen of in wind gedreven systemen, wordt geadviseerd SOBEK hier alleen voor in te zetten als gevalideerd kan worden dat dit toch tot juiste resultaten leidt.

### Onderzoeken van beste formulering voor convergente estuaria

Nader onderzoek doen naar het onderscheid in dispersieformuleringen voor prismatische en convergente estuaria. Hiermee kan meer duidelijkheid worden geschapen over welke formulering het beste kan worden toegepast in welke situatie. Dit kan door bijvoorbeeld 1) veld-data systematisch te ordenen en de variatie alleen getij, rivierafvoer en dergelijke te onderzoeken, 2) door data van de Nieuwe Waterweg/ Nieuwe Maas en Westerschelde nader te analyseren (afhankelijkheid indringingslengte met getij en afvoer, 3) de zoutindringingsprofielen nader te analyseren, 4) de data van de in deze studie buiten beschouwing gelaten estuaria hier ook in te betrekken 5) de dispersieformuleringen te kalibreren binnen de realistische limieten en 6) vergelijkingen uit te voeren met driedimensionale Delft3D berekeningen. Dit onderzoek zou een goed onderwerp voor een afstudeerder kunnen zijn.

### 6.3 Samenvatting plan van aanpak 2017

In november en december van dit jaar is een plan van aanpak opgesteld voor 2017 om SOBEK 3 geschikt te maken voor zoutverspreiding in vertakte estuaria, waarin ook convergente takken voorkomen. Samengevat zijn de volgende activiteiten voorgesteld, die leiden tot verbeterde SOBEK 3 software voor zoutverspreiding en een SOBEK 3 Rijn- en Maasmonding schematisatie die geschikt is voor de modellering van zoutverspreiding:

- 1 Opzetten van testbank voor 3-4 condities in het Rijn- en Maasmonding gebied en deze testbank gebruiken om de Kuijper en van Rijn formulering te valideren. Deze validatie is nodig, omdat grote verschillen aanwezig zijn tussen de Nieuwe Waterweg zoals die is geschematiseerd in de Rigter cases en in de werkelijkheid, zoals de aanwezigheid van bochten, variaties in de bodemligging en de aanwezigheid van havens. Voor volgende activiteiten kan de testbank ook gebruikt worden.
- 2 Bepalen welke Branch-Mouth relatie in SOBEK 3 toegepast en ontsloten dient te worden: zeemonding (nu), eigen monding of lokaal.
- 3 Validatie SOBEK 3 met Kuijper en van Rijn formulering en nieuwe geïmplementeerde branch-mouth relatie voor prismatische kanalen, op basis van de hoekpunten analyse van de in stap 1 opgezette testbank (al grotendeels uitgevoerd in Hoofdstuk 5).
- 4 Aansluiten op Deltashell GUI en documenteren van de vier dispersieformuleringen en branch-mouth oplossing in SOBEK 3. De default keuze zal beschreven worden.
- 5 Herkalibratie van SOBEK 3 RMM model voor zoutverspreiding.
- 6 Bepalen welke dispersieformulering het beste is (default) voor convergente estuaria. Daarmee wordt SOBEK 3 meer generiek toepasbaar voor zout.



## A Vergelijking SOBEK 3.3 (zonder f4-term) en SOBEK-RE

### A.1 Inleiding

Op basis van theorie werd verwacht dat met SOBEK 3 zonder f4-term zoutverspreiding niet goed gesimuleerd kon worden. Om te laten zien wat de verschillen met metingen en het Noordelijk Delta Bekken (NDB) model in SOBEK-RE met f4-term zijn, is 2003 doorgerekend met SOBEK 3.3 Rijn- en Maasmonding (RMM). In dit hoofdstuk worden de verschillen aangegeven en bediscussieerd. Het gaat daarbij om een quickscan.

Het SOBEK 3.3 RMM model is gekalibreerd en gevalideerd voor waterstanden en zoutgehalten [Berends, 2015]. Het model representeert het jaar 1998. Tijdens de kalibratie en validatie is voornamelijk gekeken naar situaties met gemiddelde en hoge rivierafvoer. Er ontbreekt een goede validatie van het model voor een droge situatie, terwijl dan juist verzilting optreedt.

### A.2 Werkwijze

Voor de berekening is aangesloten bij de jaarlijkse berekeningen die worden gemaakt in het kader van KPP Hydraulica modelschematisaties-zoet. Voor het SOBEK-RE NDB model is gebruik gemaakt van de berekening die in het kader hiervan zijn gemaakt.

Het SOBEK3-RMM model is opgevraagd via de helpdesk water. De randvoorwaarden vanuit het SOBEK-RE-NDB model voor 2003 zijn overgenomen in het SOBEK3-RMM model en deze is doorgerekend. Voor de dispersie zijn de waarden voor  $f1$  en  $f3$  gebruikt, zoals die zijn bepaald bij de kalibratie.

Metingen van chloride-concentraties zijn opgevraagd bij de helpdesk data. Hier zijn de chlorideconcentraties in het benedenriviereengebied voor het jaar 2003 opgevraagd voor de locaties: Spijkenisserbrug, Beerenplaat, Brienoordbrug, Krimpen a/d IJssel, Kinderdijk, Volkerak-Noord, en Zuidland. De SOBEK resultaten welke gemiddelden zijn over de dwarsdoorsnede zijn direct vergeleken met de metingen, welke op een gegeven diepte zijn gemeten. De aanname is dat hiermee slechts een kleine fout wordt gemaakt. Voor een quickscan is deze aanpak acceptabel. In Tabel A.1 worden de gebruikte locaties weergegeven.

Tabel A.1 *Vergeleken locaties*

Locatie	SOBEK-RE	SOBEK3	Meting
Brienoord	NIMA025_2265.00	BRIENOBRTOVR	brienobrtovr-250
Krimpen a/d IJssel	HOIJ029_18109.00	KRIMPADIJSL	krimpadijslk-400
Beerenplaat	OUMA_Spijk_747.00	BEERPLWL	beerplkovr-200
Spijkenisse	OUMA_Spijk_8203.00	SPIJKNSE	spijknsbwtk-250
Rak-Noord	Hodi052_.00	RAKND	Volkeraksluizen
Zuidland	SPUI084_13872.00	ZUIDLD	zuidld-300
Kinderdijk	VAK159_726.00	KINDDLKOV	kinddlkovr-500

## A.3 Resultaten

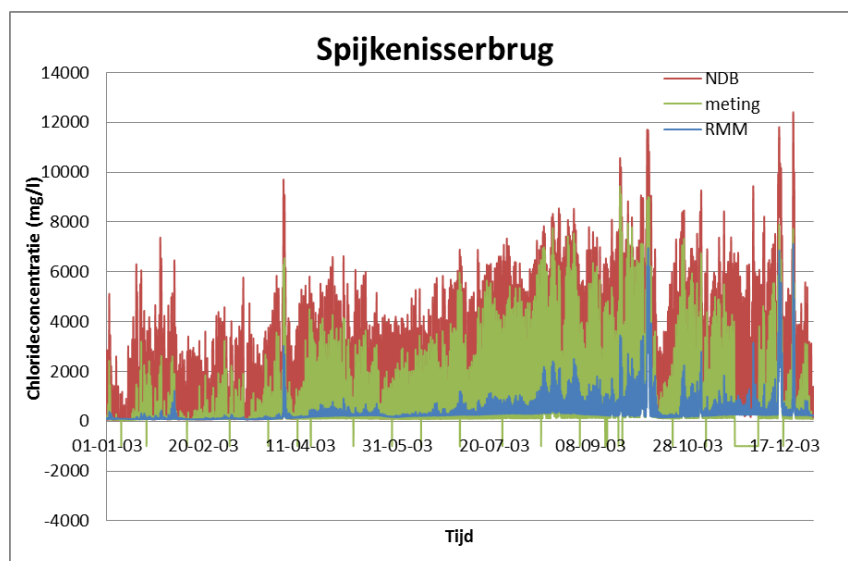
### A.3.1 Chlorideconcentraties

In Figuur A.1 - Figuur A.6 worden de resultaten voor een aantal locaties in de Rijn-Maasmondiging getoond. In de figuren worden soms negatieve waarden weergegeven. Dit zijn ontbrekende metingen.

Uit Figuur A.1 is te zien dat de chlorideconcentraties uit het RMM model duidelijk lager liggen dan de metingen. Het SOBEK3-RMM model onderschat de chlorideconcentraties ter hoogte van Spijkenisserbrug, wat niet het geval was in het SOBEK-RE NDB model. In beide gevallen wordt het tijdstip van de pieken wel goed gemodelleerd. Pieken in september en december komen voor het SOBEK3 model wel in de buurt van de gemeten waarden op dat moment, maar zijn nog duidelijk te laag. Het SOBEK-RE model overschat het de concentraties over het algemeen ten opzichte van de metingen, maar beschrijft de zelfde orde van grootte van verzilting als de metingen. Voor het SOBEK3 RMM model is de orde grootte van de resultaten over het algemeen verschillend van de metingen.

Ook op de locatie Krimpen aan den IJssel (Figuur A.2) is hetzelfde te zien als bij Spijkenisserbrug; de chlorideconcentraties worden structureel onderschat, evenals de getijfluctuaties en de verziltingspieken. Bij de overige locaties is hetzelfde te zien als in bovengenoemde locaties. Bij Zuidland en Beerenplaat wijken naast de orde grootte van de chloride-concentratie ook het gedrag af.

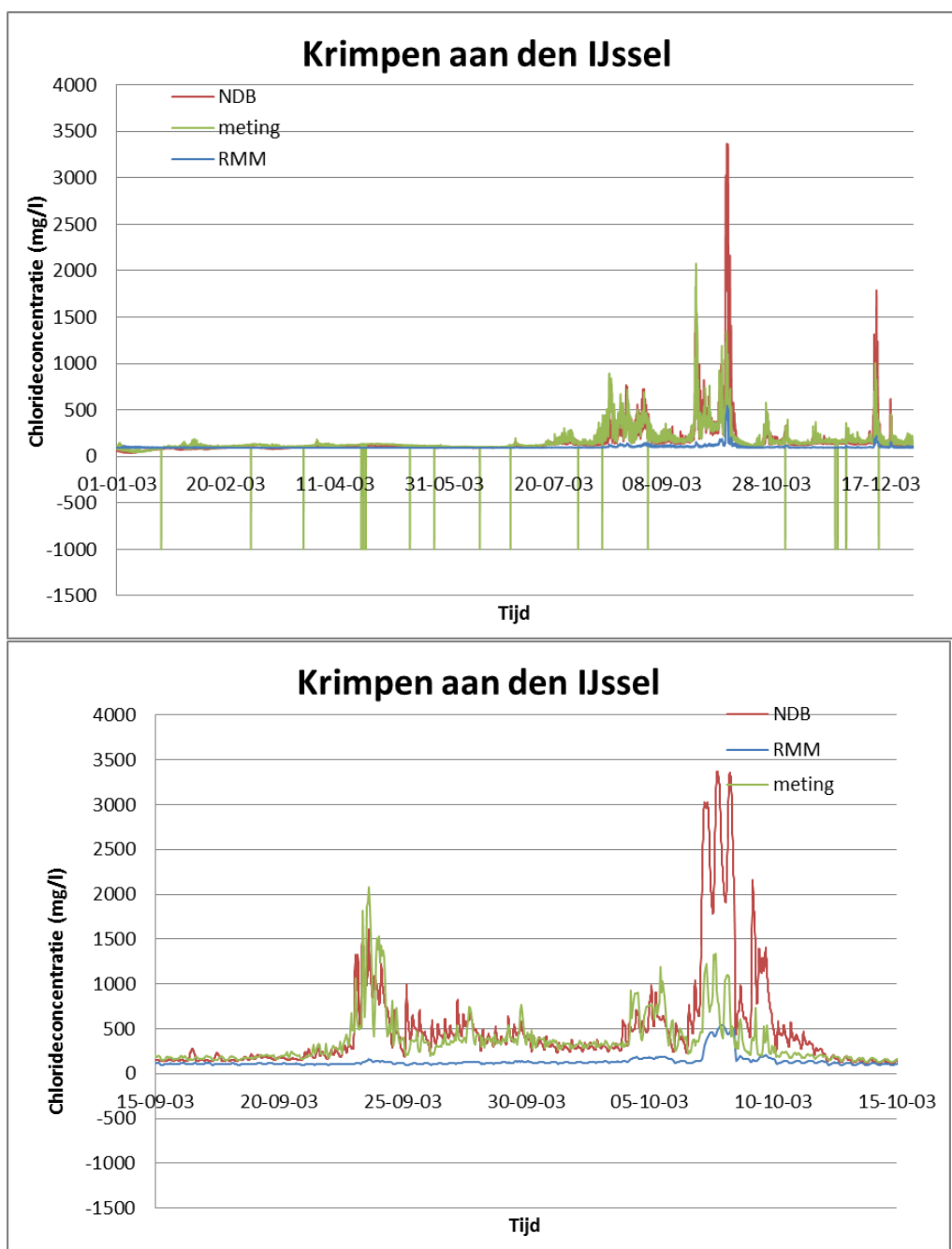
Om op een andere manier te verifiëren dat de SOBEK 3 berekening goed is gegaan, is een vergelijking gemaakt van de resultaten van januari 2003. Januari 2003 heeft een overlap met de kalibratieperiode van het model. De chloridegehalten blijken desondanks niet overeen te komen. Een verschil tussen beide berekeningen is, dat de kalibratie met versie 1 van het model is gedaan en de voorliggende berekening met versie 2 is uitgevoerd<sup>4</sup>. Een ander verschil is dat de randvoorwaarden van de kalibratie-berekening afkomstig zijn van het WAQUA-RMM model, terwijl bij voorliggende berekening de randvoorwaarden zijn overgenomen van de jaarsom 2003 (SOBEK-RE NDB). Met deze verschillen in randvoorwaarden zullen vooral op de rand de chlorideconcentraties verschillend zijn.



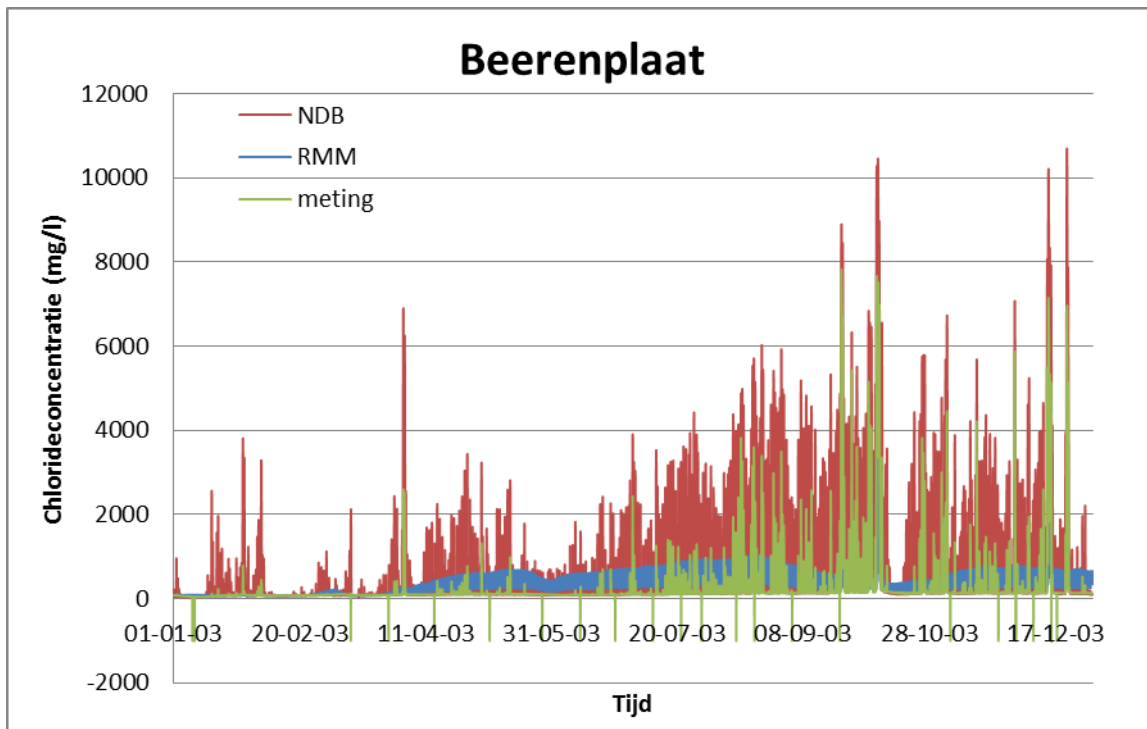
Figuur A.1 Resultaten van het SOBEK-RE NDB model (rood), het SOBEK 3-RMM model (blauw) en de metingen voor het jaar 2003 op de locatie Spijkenisserbrug

<sup>4</sup> Het verschil tussen beide versies is de achterliggende baseline schematisatie, respectievelijk baseline-rmm-j98\_5-v2 en -v3

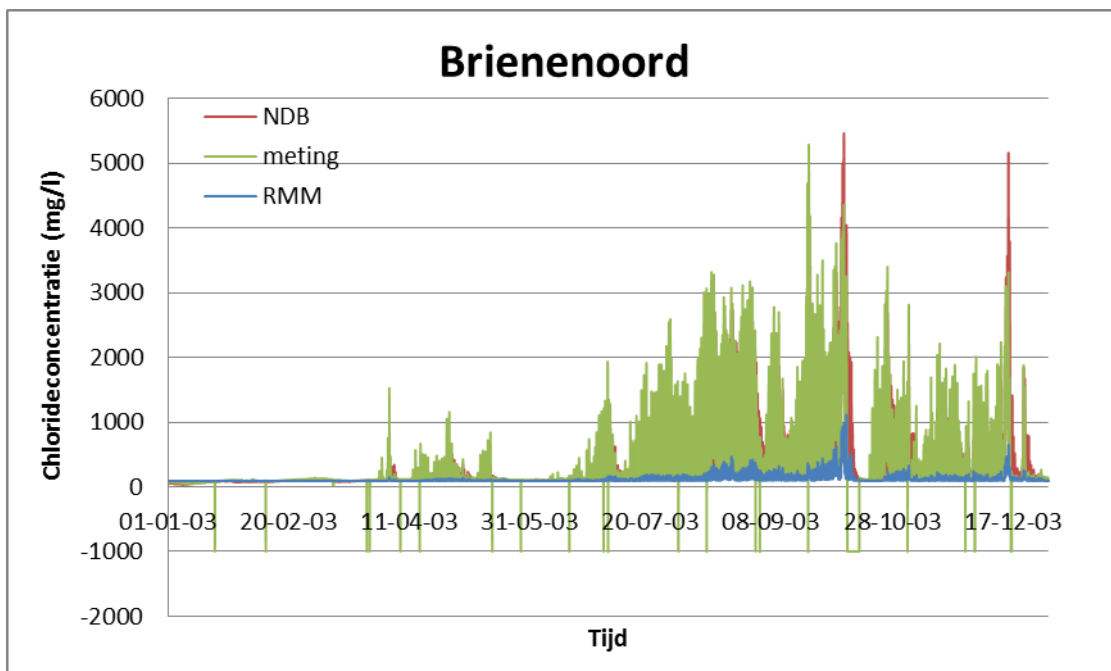




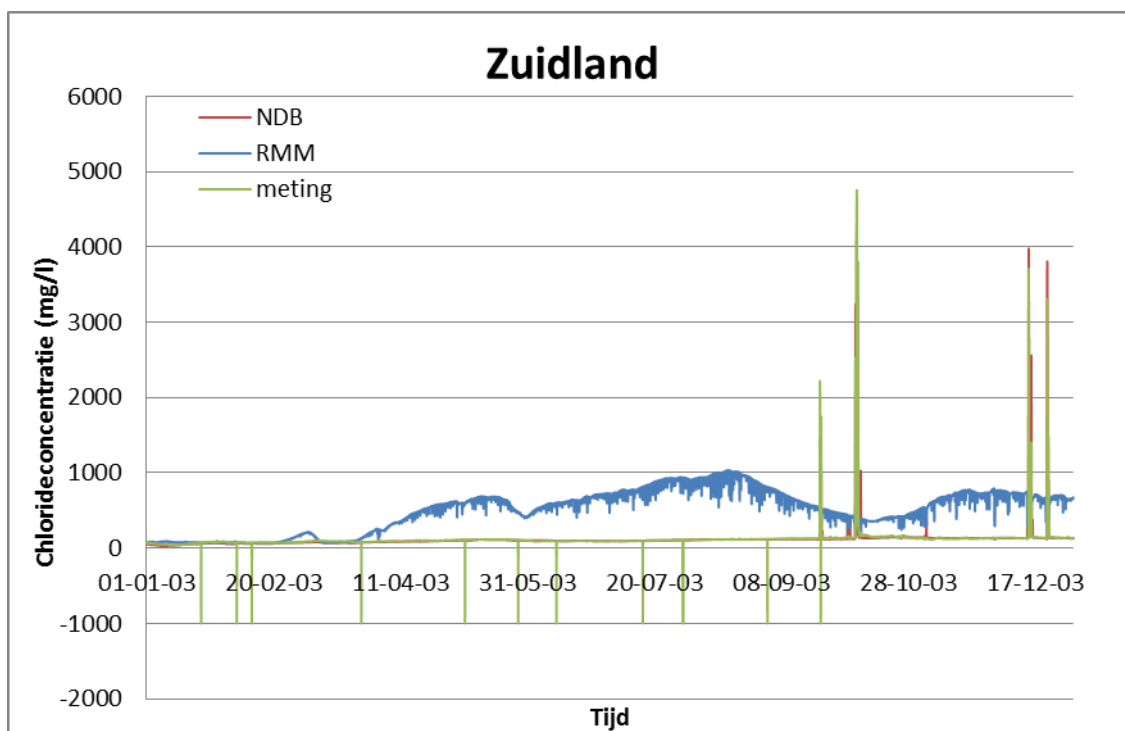
Figuur A.2 Resultaten van het SOBEK-RE NDB model (rood), het SOBEK 3-RMM model (blauw) en de metingen voor het jaar 2003 (boven) en de periode 15/9/2003-15/10/2003 (onder) op de locatie Krimpen aan den IJssel.



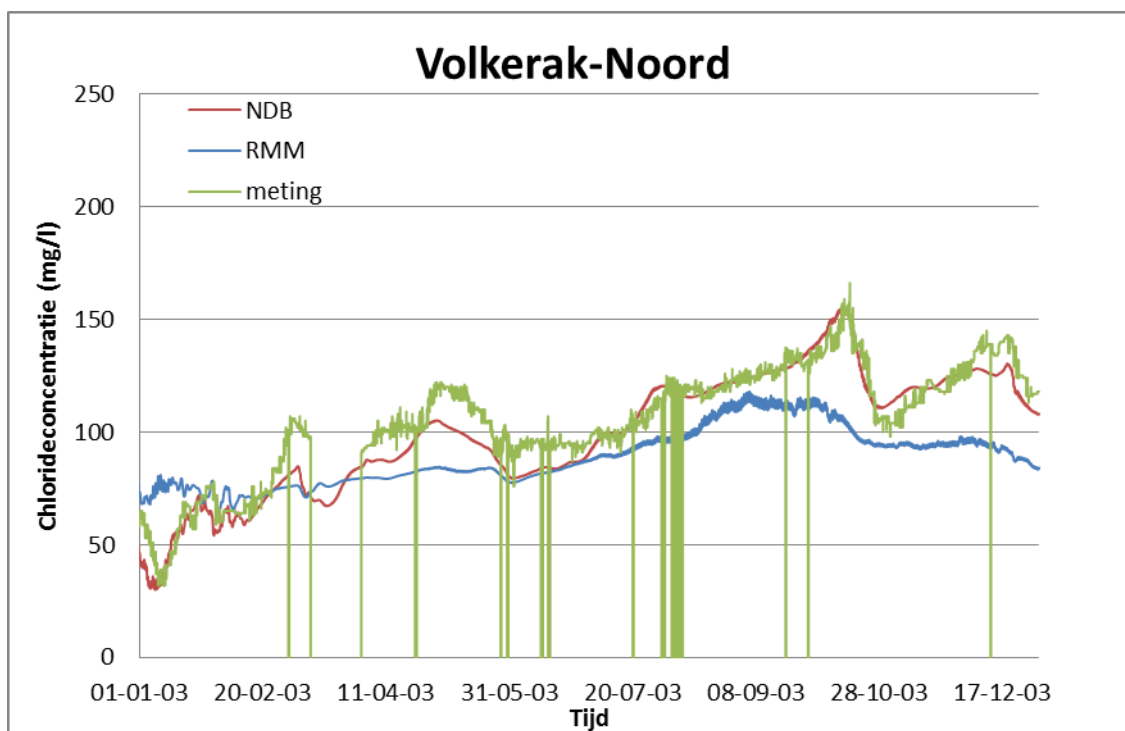
Figuur A.3 Resultaten van het SOBEK-RE NDB model (rood), het SOBEK 3-RMM model (blauw) en de metingen voor het jaar 2003 op de locatie Beerenplaat.



Figuur A.4 Resultaten van het SOBEK-RE NDB model (rood), het SOBEK 3-RMM model (blauw) en de metingen voor het jaar 2003 op de locatie Brienoord.



Figuur A.5 Resultaten van het SOBEK-RE NDB model (rood), het SOBEK 3-RMM model (blauw) en de metingen voor het jaar 2003 op de locatie Zuidland.



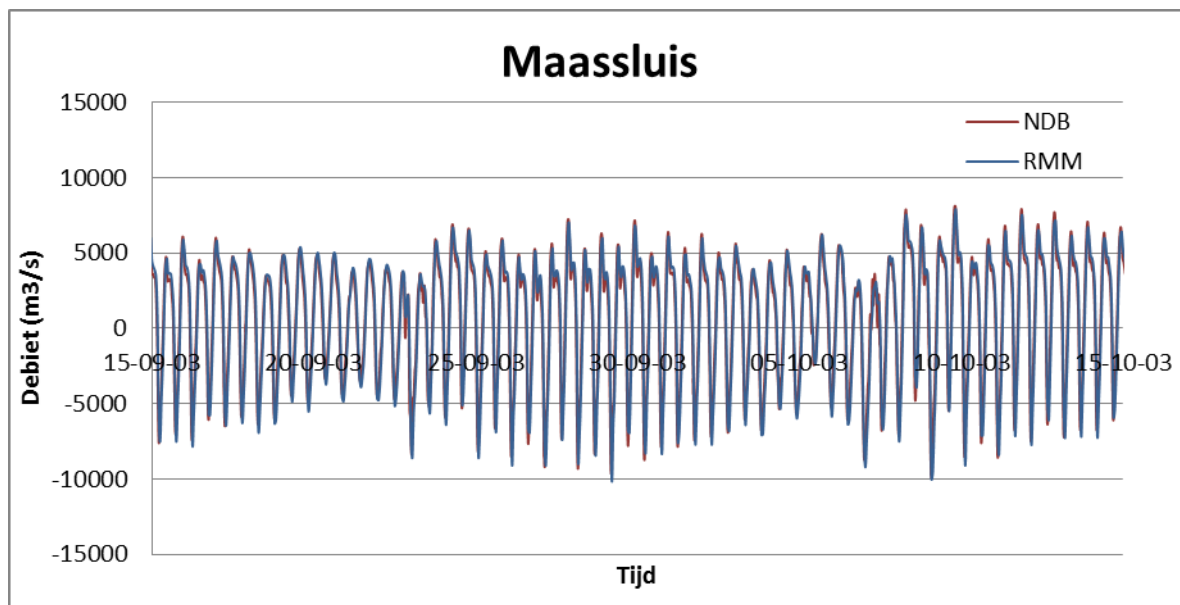
Figuur A.6 Resultaten van het SOBEK-RE NDB model (rood), het SOBEK 3-RMM model (blauw) en de metingen voor het jaar 2003 op de locatie Volkerak-Noord.

### A.3.2 Waterbeweging, waterstand en zoutgehalte bij Maassluis

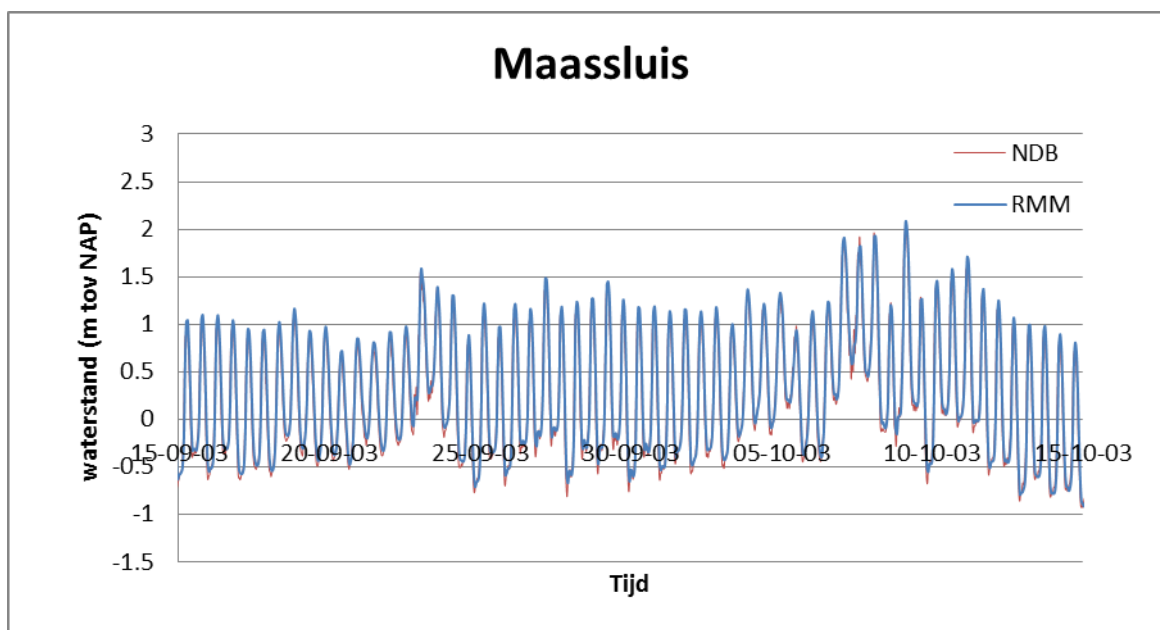
Om te kunnen verklaren waar de verschillen in SOBEK 3 vandaan komen zijn er enkele extra analyses uitgevoerd. Zo is er gekeken naar de waterbeweging en zoutconcentraties bij Maassluis.

Om naar de hoeveelheid zout dat door de Nieuwe Waterweg het systeem binnenkomt te vergelijken is voor beide modellen naar de locatie Maassluis gekeken. In Figuur A.7 worden de berekende debieten weergegeven. De debieten voor het SOBEK-RE NDB model en het SOBEK3-RMM komen goed met elkaar overeen. Ook de waterstanden (Figuur A.8) komen goed overeen. Het SOBEK3-RMM geeft iets hogere waterstanden dan het SOBEK-RE-NDB model. Het gaat hier om een klein verschil.

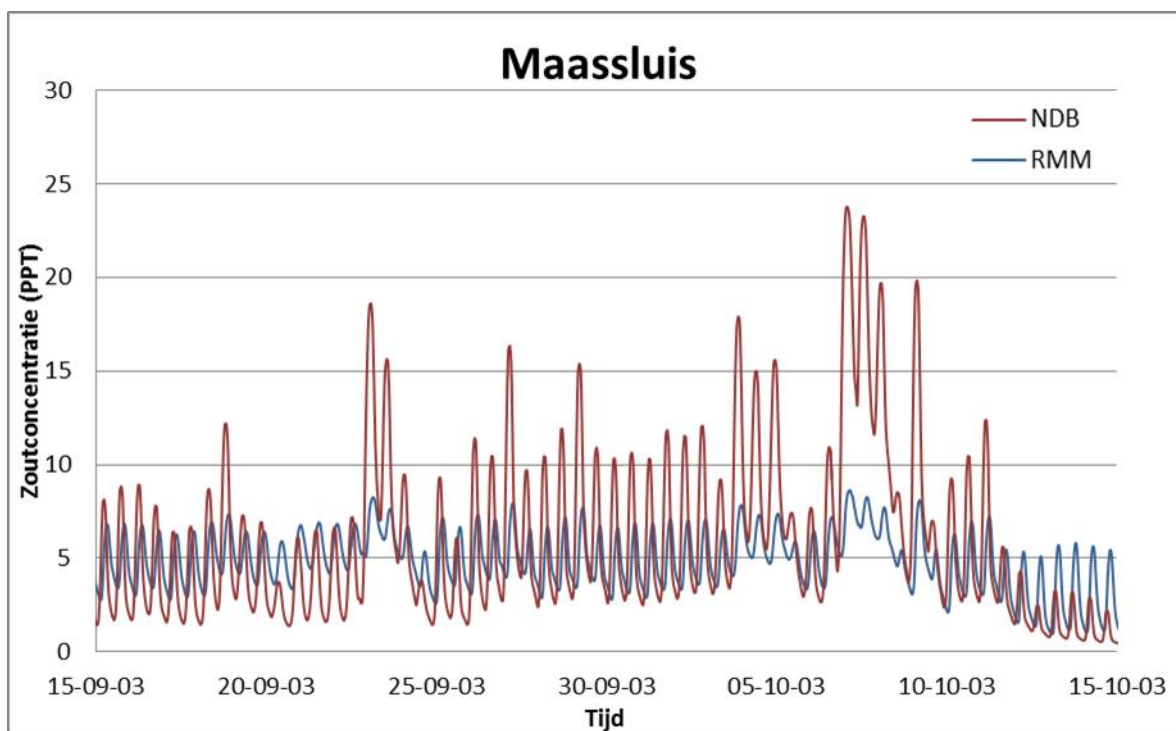
Wanneer echter naar de berekende zoutconcentraties wordt gekeken (Figuur A.9), is een duidelijk verschil zichtbaar. Dit verschil lijkt niet te wijten te zijn aan de waterbeweging, maar aan de dispersiecoëfficiënt. In de volgende paragraaf wordt een verdere vergelijking van de dispersiecoëfficiënt gedaan.



Figuur A.7 Debieten berekend door het SOBEK-RE NDB model (rood), het SOBEK3-RMM model (blauw) het jaar 2003 op de locatie Maassluis voor de periode 15/9/2003-15/10/2003.



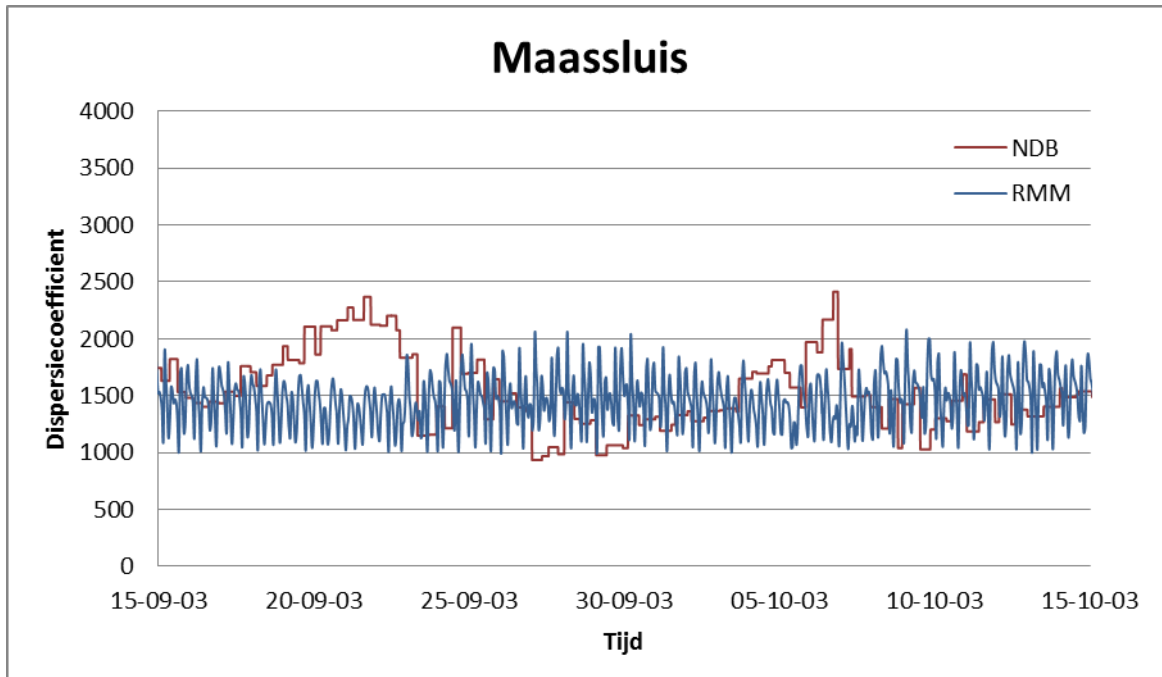
Figuur A.8 Waterstanden berekend door het SOBEK-RE NDB model (rood), het SOBEK3-RMM model (blauw) het jaar 2003 op de locatie Maassluis voor de periode 15/9/2003-15/10/2003.



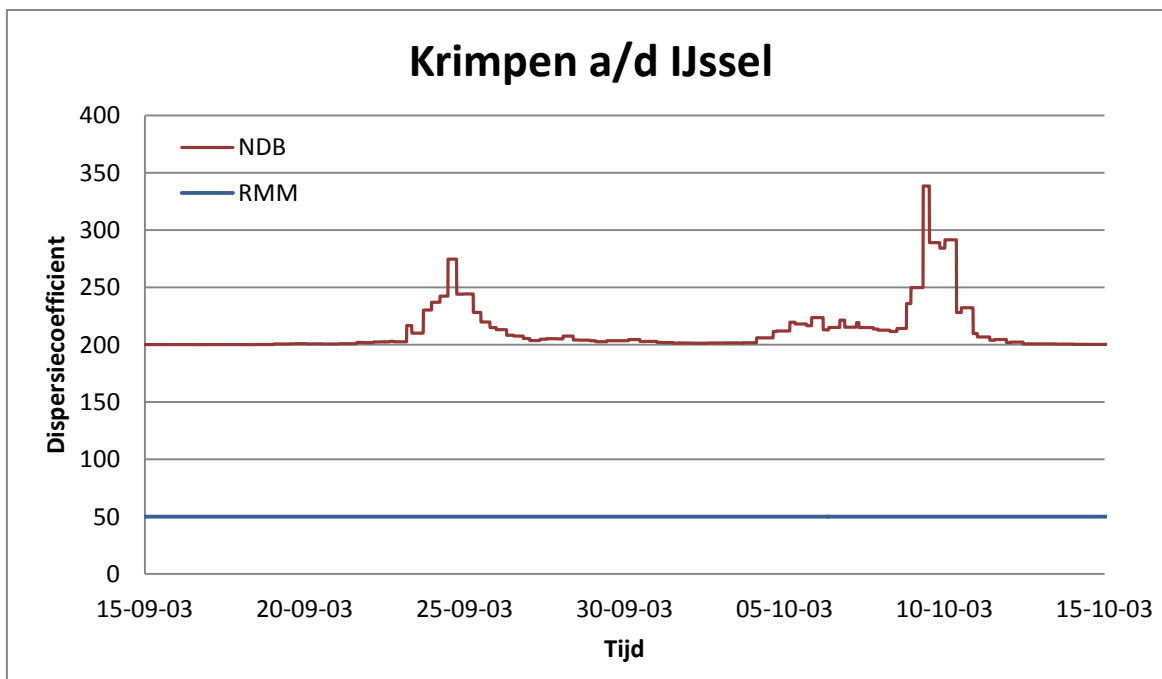
Figuur A.9 Chlorideconcentraties berekend door het SOBEK-RE NDB model (rood), het SOBEK3-RMM model (blauw) het jaar 2003 op de locatie Maassluis voor de periode 15/9/2003-15/10/2003.

### A.3.3 Dispersiecoëfficiënten

In Figuur A.10 worden de door SOBEK berekende dispersiecoëfficiënten voor Maassluis weergegeven. Figuur A.11 geeft de dispersiecoëfficiënten voor Krimpen aan den IJssel.



Figuur A.10 Dispersiecoëfficiënt berekend door het SOBEK-RE NDB model (rood), het SOBEK3-RMM model (blauw) het jaar 2003 op de locatie Maassluis.



Figuur A.11 Dispersiecoëfficiënt berekend door het SOBEK-RE NDB model (rood), het SOBEK3-RMM model (blauw) het jaar 2003 op de locatie Krimpen aan den IJssel.

Om een goede vergelijking te kunnen maken is het van belang dat de invoer bekend is. Hiermee kunnen verschillen in dispersiecoëfficiënt voor een groot deel al verklaard worden. In Tabel A.2 zijn daarom de gebruikte termen voor de Thatcher-Harleman dispersieformulering van de verschillende modellen weergegeven. Deze termen zijn de constanten waarmee de dispersieformulering wordt vermenigvuldigd, zie nadere toelichting in Hoofdstuk 2 en 3. De waarde voor de dispersie is dus niet identiek aan de waarde voor de f1, f3 en f4 term.

Tabel A.2 Gebruikte waarden voor coëfficiënten in SOBEK waarmee dispersie wordt bepaald

	F1	F3	F4
<b>SOBEK-RE: Maassluis NDB</b>	50	0	0.007
<b>SOBEK 3: Maassluis RMM</b>	1000	20000	-
<b>SOBEK-RE: Krimpen aan den IJssel NDB</b>	200	0	0.006
<b>SOBEK 3: Krimpen aan den IJssel RMM</b>	50	0	-

Voor het verschil in de gekozen termen voor Krimpen aan den IJssel is duidelijk terug te zien in Figuur A.11. Voor Maassluis is de bijdrage van de f4-term in het SOBEK-RE model duidelijk het grootst, aangezien de dispersiecoëfficiënt veel groter is dan 50. In het SOBEK 3 model is de dispersie in tijden met hoge rivierafvoer gemiddeld juist lager dan gemiddeld over andere perioden. Dat is in tegenspraak met de grotere dichtheidsgradiënten die op dat moment optreden, welke in werkelijkheid juist een grote dispersie veroorzaken.

#### A.4 Samenvatting

De zoutgehalten berekend met het SOBEK3-RMM model wijken fors af van de metingen in een droge periode. De zoutgehalten berekend met het SOBEK-RE-NDB model zijn over het algemeen van vergelijkbare grootte als de metingen.

Aangezien de waterbeweging in het SOBEK-RE NDB model en het SOBEK3-RMM model vrijwel overeenkomt, lijken de forse verschillen in zoutgehalten voornamelijk veroorzaakt te worden door verschillen in de waarde voor de dispersiecoëfficiënt. Vooral tijdens lage rivierafvoer eventueel gecombineerd met windopzet is de waarde voor de dispersiecoëfficiënt in het SOBEK 3.3 RMM model laag in vergelijking met de waarde voor de dispersiecoëfficiënt in SOBEK-RE. Dit verschil wordt vooral veroorzaakt door het ontbreken van de f4-term in SOBEK 3.3.





## B Aangepaste variant Thatcher Harleman in SOBEK-RE

### B.1 Afleiding formulering

De aangepaste Thatcher en Harleman formulering in SOBEK-RE luidt als volgt:

$$D = f_1(x, t) + f_3(x, t)d(x, t)\frac{\sqrt{g}}{C(x)}|u(x, t)| + \quad (B.2)$$

$$+ f_4(x, t)L_e^2 \left(\frac{T_p g}{\rho_w}\right)^{\frac{1}{4}} \frac{u_0^*(j)}{c_0^*(j)} [d_0(j)(\rho(j) - \rho_w)]^{\frac{1}{4}} \left[\frac{Q_f(j, t)}{P_e(j, t)u_0^2(j, t)}\right]^{\frac{1}{4}} \left\langle \frac{c(x, t)}{c_0} \frac{\partial c(x, t)}{\partial x} \right\rangle$$

Toelichting op de symbolen is te vinden in §3.1.1.

Hieronder wordt de formulering zodanig herschreven dat een vergelijking met de oorspronkelijke Thatcher Harleman formulering kan worden gemaakt.

#### Derde term

De derde term in SOBEK-RE luidt<sup>5</sup>:

$$f_3 d \frac{\sqrt{g}}{C} u$$

Met de volgende relatie tussen Chézy en Manning,  $C = \frac{1}{n} d^{\frac{1}{6}}$  kan deze term herschreven worden als:

$$f_3 u n d^{\frac{5}{6}} \sqrt{g}$$

#### F4-term

De f4-term in SOBEK-RE luidt:

$$f_4 L_e^2 \left(\frac{T_p g}{\rho_w}\right)^{\frac{1}{4}} \frac{u_0^*}{c_0^*} [d_0(\rho - \rho_w)]^{\frac{1}{4}} \left[\frac{Q_f}{P_e u_0^2}\right]^{\frac{1}{4}} \left\langle \frac{c}{c_0} \frac{\partial c}{\partial x} \right\rangle$$

Alle termen die tot de macht  $\frac{1}{4}$  gaan vormen samen het inverse estuariumgetal (zie vergelijking §2.2):

$$f_4 L_e^2 \frac{u_0^*}{c_0^*} E_d^{-\frac{1}{4}} \left\langle \frac{c}{c_0} \frac{\partial c}{\partial x} \right\rangle$$

Indien we de dimensieloze waarden voor het zoutgehalte en de afstand invullen ( $\dot{c}^* = c/c_0^*$  en  $\dot{x} = x/L$ ) reduceert de term tot:

$$f_4 u_0^* L_e E_d^{*-1/4} \left\langle \frac{c}{c_0} \frac{\partial \dot{c}^*}{\partial \dot{x}} \right\rangle$$

<sup>5</sup> Voor de leesbaarheid zijn de afhankelijkheden weggelaten.

## Alles termen

De resulterende vergelijking luidt nu:

$$D = f_1 + f_3 und^{\frac{5}{6}} \sqrt{g} + f_4 u_0^* L_e E_d^{*-1/4} \left\langle \frac{c}{c_0} \frac{\partial \dot{c}^*}{\partial \dot{x}} \right\rangle$$

In deze formule herkennen we – op een aantal verschillen na – de dispersieformulering van Thatcher-Harleman:

$$D = k u_0 L_e E_d^{-1/4} \left| \frac{\partial \dot{c}}{\partial \dot{x}} \right| + 77 und^{5/6}$$

De  $f_3$  term komt representeert met de tweede term uit Thatcher-Harleman, namelijk de dispersie in een volledig gemengd systeem. Verschillen zijn dat Thatcher Harleman de hydraulische straal gebruikt en SOBEK-RE de waterdiepte en de introductie van  $\sqrt{g}$ , wat een constante is.

De  $f_4$  term komt grotendeels overeen met de eerste term uit Thatcher-Harleman en representeert de dispersie ten gevolge dichtheidsgradiënten. De grootste verschillen zijn de introductie van  $c/c_0$  en de middeling over twee getijperiodes van  $\partial \dot{c}^*/\partial \dot{x}$ . In de volgende paragraaf worden alle grootheden één voor één vergeleken, waarbij ook andere verschillen duidelijk worden. Een discussie ten aanzien van alle verschillen volgt in §B.3

## **B.2 Vergelijking grootheden Thatcher Harleman dispersieformulering met implementatie in SOBEK-RE**

### **B.2.1 F4-term: longitudinale dispersie ten gevolge van dichtheidsgradiënten.**

Voor het overzicht worden hieronder de uitdrukking voor Thatcher Harleman en SOBEK-RE herhaald.

Zoals gedefinieerd in Thatcher Harleman (Thatcher and Harleman 1972, pg. 58, 83, 99, 148, 187, 204):

$$D_{stratificatie} = k u_0 L E_d^{-\frac{1}{4}} \left| \frac{\partial \dot{s}}{\partial \dot{x}} \right|$$

Zoals gedefinieerd in SOBEK-RE (Sobek-RE 2.52.008 2012):

$$D_{stratificatie} = f_4(x, t) L_e^2 \frac{u_0^*(j)}{c_0^*(j)} E_d^{-\frac{1}{4}} \left\langle \frac{c(x, t)}{c_0(j, t)} \frac{\partial c(x, t)}{\partial x} \right\rangle$$

Tabel B.1 Vergelijking grootheden uit de f4-term (Longitudinale dispersie). Definities voor Thatcher Harleman komen uit (Thatcher and Harleman 1972) en voor de volledigheid worden de paginanummers gegeven in deze tabel. De tabel is in het Engels omdat de definities in de SOBEK handleiding en de documentatie van Thatcher Harleman ook in het Engels zijn.

en Harleman		SOBEK-RE		
	Definition		Definition	Units
$k$	Longitudinal dispersion parameter, 0.0015 and 0.002 for Delaware and Hudson. (Pg. 187, 204)	$f_4(x, t)$	User defined. Only space or time dependent. For the Nieuwe Waterweg Winterwerp (1980) derived a value of 0.006.	-
$u_0$	Max. cross-sectional velocity at the entrance. Same as $u_0$ in $E_d$ , see Tabel B.2. (pg. 147)	$u_0^*(j)$	Characteristic flow velocity at the mouth(s) of the estuary related to branch $j$ , user defined. In case of more than one estuary mouth, the average of the flow velocities is taken.	[m/s]
<p><i>Remark: it is not clear whether in Thatcher Harleman it is time-dependent or taken as a system-constant. Furthermore note that SOBEK-RE makes a distinction between <math>u_0^*(j)</math> in this part of the expression and <math>u_0(j, t)</math> in the Estuarine Richardson number, see Tabel B.2, while Thatcher Harleman uses the same symbol for both. Furthermore note the "characteristic flow velocity" may be interpreted differently than the maximum cross sectional velocity. See discussion in §0.</i></p>				
$L$	Length estuary (Pg. 229)	$L_e$	Estuary length. This is the length from a mouth of the estuary to the ultimate location of tidal influence. User defined.	[m]
<p><i>Remark: The definition of the Length of the estuary is not clear in TH. The definition given for SOBEK-RE is not unambiguous as the tidal influence in a multi-branch system may reach further in one branch than in the other.</i></p>				
$E_d$	See Tabel B.2.			[-]
$\hat{s}$	Dimensionless one dimensional salinity, $\hat{s} = s/s_0$ (Pg 230)	-	Not expressed as dimensionless in the SOBEK formula.	[-]
$s$	local salinity $s(x, t)$ (Pg 229)	$c(x, t)$	Concentration	[kg/m <sup>3</sup> ]
$s_0$	Ocean salinity or maximum salinity at the downstream entrance. (Pg 229)	$c_0^*(j)$	reference concentration related to branch $j$ In case of more than one estuary mouth, the average is taken.	[kg/m <sup>3</sup> ]
<p><i>Remark: it is not clear whether in Thatcher Harleman it is time-dependent or taken as a system-constant (check page 65-70).</i></p>				
$\hat{x}$	Dimensionless longitudinal distance $\hat{x} = x/L$ , with the longitudinal axis $x$ and the length of the estuary $L$ (pg. 230)	-	Not expressed as dimensionless in the SOBEK formula.	
$x$	Longitudinal axis (pg. 230)	$x$	Longitudinal axis	[m]
-	No equivalent due the extra term $\frac{c(x,t)}{c_0(j,t)}$ in SOBEK, which is not incorporated in TH.	$c_0(j, t)$	Reference concentration in the mouth(s) of the estuary related to branch $j$ . In case of more than one estuary mouth, the average is taken.	[kg/m <sup>3</sup> ]

## B.2.2 Estuarium Richardson getal

Zoals gedefinieerd in Thatcher Harleman (Thatcher and Harleman 1972, pg, 83, 145-147):

$$E_d = \frac{\rho u_0^2 P_T}{\Delta\rho gh Q_f T}$$

Zoals gedefinieerd in SOBEK-RE (Sobek-RE 2.52.008 2012):

$$E_d = \frac{\rho_w u_0^2(j, t) P_e(j, t)}{(\rho(j) - \rho_w) g d_0(j) Q_f(j, t) T_P}$$

Tabel B.2 Vergelijking grootheden uit het estuarine Richardson getal. Definities voor Thatcher Harleman komen uit (Thatcher and Harleman 1972) en voor de volledigheid worden de paginanummers gegeven in deze tabel. De tabel is in het Engels omdat de definities in de SOBEK handleiding en de documentatie van Thatcher Harleman ook in het Engels zijn.

Thatcher Harleman		SOBEK-RE		
	Definition		Definition	Units
$\rho$	Density of fluid Pg. 147	$\rho_w$	Density of the fresh water. User defined.	kg/m <sup>3</sup>
<i>Remark: not clear in Thatcher Harleman whether it is the density of the upstream or downstream fluid.</i>				
$\Delta\rho$	Max. density difference from the fresh water end to ocean or estuary mouth. Pg. 147	$\Delta\rho = \rho(j) - \rho_w$	With $\rho(j)$ density of sea water at the mouth related to branch $j$ . User defined. In case of more than one estuary mouth, the average is taken.	kg/m <sup>3</sup>
$u_0$	Max. cross-sectional velocity at the entrance. Pg. 147	$u_0(j, t)$	maximum <i>flood</i> velocity at the mouth(s) of the estuary related to branch $j$ , so the maximum velocity at <i>inflow</i> . $u_0^2(j, t)$ $= \max(Q_j(t)/A)_{2 TP \text{ during inflow}}$	m/s
<i>Remark: see discussion in Tabel B.1.</i>				
$g$	Gravitational acceleration			m/s <sup>2</sup>
$h$	Depth at estuary entrance Pg. 147	$d_0(j)$	Reference water depth at mouth of the estuary related to branch $j$ . User defined. In case of more than one estuary mouth, the average of the water depth is taken.	m
$P_T$	Tidal prism (water volume entering on flood tide). Pg 147	$P_e(j, t)$	$P(j, t) = \int_{2 TP \text{ during inflow}} Q_j(t) dt$ Calculated at the estuary mouth	m <sup>3</sup>
$Q_f$	Fresh water inflow (sum of upstream fresh water discharges of salinity intrusion region) (Pg. 147, 161)	$Q_f(j, t)$	$Q_f(j, t) = \frac{1}{T_P} \int_{2 TP} Q_j(t) dt$	m <sup>3</sup> /s
T	Tidal period (Pg 147)	$T_P$	Hardcoded to 12.417 hours	s

- B.2.3 Derde term: dispersie in een volledig gemengd systeem (Taylor dispersie coëfficiënt)  
Zoals gedefinieerd in Thatcher Harleman (Thatcher and Harleman 1972, pg, 62):

$$D_{Taylor\ dispersie} = 77nuR_h^{5/6}$$

Zoals gedefinieerd in SOBEK-RE (Sobek-RE 2.52.008 2012):

$$D_{Taylor\ dispersie} = f_3(x, t)d(x, t)\frac{\sqrt{g}}{C(x)}|u(x, t)|$$

Tabel B.3 Vergelijking grootheden uit de derde term (Taylor dispersie). Definities voor Thatcher Harleman komen uit (Thatcher and Harleman 1972) en voor de volledigheid worden de paginanummers gegeven in deze tabel. De tabel is in het Engels omdat de definities in de SOBEK handleiding en de documentatie van Thatcher Harleman ook in het Engels zijn.

Thatcher Harleman		SOBEK-RE		
	Definition		Definition	Units
$n$	Manning's resistance coefficient (Pg. 229)	$C = \frac{1}{n}d^{1/6}$	Chézy coefficient [m <sup>1/2</sup> /s]	
$u$	Velocity at location $x$ and time $t$ , $u(x, t)$ (Pg. 62)	$u(x, t)$	Flow velocity	[m/s]
$R_h$	Hydraulic radius at location $x$ and time $t$ , $R_h(x, t)$ (Pg. 62)	$d(x, t)$	Water depth	[m]
		$f_3(x, t)$	User defined, make note	

### B.3 Toelichting verschillen

- B.3.1 Extra term  $c/c_0$   
In SOBEK-RE wordt er een extra term toegevoegd aan de longitudinale dispersie, namelijk  $c/c_0$ . Deze term zorgt ervoor dat de dispersie landinwaarts afneemt. Deze extra term wordt geïntroduceerd in een ijkingstudie met ZWENDL (Rijkswaterstaat 1984, pg 21), één van de voorlopers van SOBEK-RE. Er werden betere resultaten behaald wanneer de waarde voor  $f_4$  ( $k$  in Thatcher Harleman) van buiten naar binnen afnam. In Thatcher Harleman wordt deze term constant genomen. Door de term  $c/c_0$  te introduceren konden redelijke resultaten worden behaald zonder de waarde voor  $f_4$  te variëren. Voor een onderbouwing van de introductie van  $c/c_0$  wordt aangedragen dat de dispersie ten gevolge van gravitatiecirculatie veeleer evenredig is met  $(\partial c/\partial x)^2$  en dat in verband hiermee in (Tingsanchali and Apichatvullop 1980)<sup>6</sup> de suggestie wordt gedaan om  $c/c_0$  te introduceren (zie Rijkswaterstaat 1984, pg.12 en 15).

- B.3.2 Middeling over twee getij perioden van  $\partial c/\partial x$   
In dezelfde studie wordt op basis van de ijking gesteld dat er betere resultaten verkregen worden met een getijgemiddelde waarde voor de  $\partial c/\partial x$  (Rijkswaterstaat 1984, pg 20, 21).

<sup>6</sup> Deze studie hebben we niet kunnen traceren.

### B.3.3 Onderscheid $u_0^*(j)$ en $u_0(j, t)$

In SOBEK-RE wordt onderscheid gemaakt tussen  $u_0^*(j)$  en  $u_0(j, t)$ . Beide komen voor in de f4-term, waarbij  $u_0^*(j)$  in het eerste deel van de term voorkomt en  $u_0(j, t)$  in het estuarine Richardson getal:

$$f_4 u_0^* L_0 E_d^{*-1/4} \left\langle \frac{c}{c_0} \frac{\partial c^*}{\partial x} \right\rangle$$

Het argument voor de introductie van een tijdonafhankelijke variant van de maximale vloedsnelheid is als volgt. Wanneer de invloed van getij toeneemt, neemt menging toe en zou de dispersie af moeten nemen. Deze neemt echter toe, door een toename van de vloedsnelheid. Omdat de  $u_0$  in het estuarium getal omgekeerd evenredig is met de dispersie, werkt deze wel de juiste kant op.

Hoe er in Thatcher Harleman wordt omgegaan met  $u_0$  is niet helemaal duidelijk. Het lijkt erop dat  $u_0$  in het eerste deel van de term als constante wordt beschouwd. Of dit ook het geval is voor het estuariumgetal is niet duidelijk. Symbolen voor beide zijn gelijk. De definitie bij de symbolenlijst is "Max. cross-sectional velocity at the entrance" en geeft dus ook geen uitsluitsel over wel of geen tijdafhankelijkheid. Het lijkt echter niet zinvol om een constante waarde voor  $u_0$  te kiezen in het estuariumgetal, omdat dan de tijdafhankelijkheid van de dispersie met variaties in het getijvolume en rivierdebiet wordt beperkt.

Argument dat met tijdafhankelijke  $u_0$  de dispersie juist toeneemt met toenemende getij-invloed, terwijl deze juist af zou moeten nemen, is interessant. Dit lijkt de dispersie-uitdrukking van Thatcher Harleman onderuit te halen. De vele dispersieformuleringen die recent getoetst zijn (Gisen 2015), zijn echter allen van deze vorm (zie ook §2.3), met uitzondering van de Kuijper en van Rijn formulering voor prismatische kanalen.

### B.3.4 Hydraulische straal versus de waterdiepte

In de Taylor dispersie (f3-term) wordt voor SOBEK-RE de waterdiepte gebruikt, terwijl in de Thatcher Harleman formulering de hydraulische straal wordt gebruikt. Voor brede rivieren met bij benadering rechthoekig doorstroomoppervlak is deze aanname gerechtvaardigd, en daarmee ook voor de (meeste) rivieren in de Rijn-Maasmonding. Omdat het qua SOBEK implementatie eenvoudiger is om met de waterdiepte te werken, de aanname voor takken in de Rijn Maasmonding gerechtvaardigd is, is vooralsnog het voorstel om met de waterdiepte te blijven rekenen. Voor een generieke toepassing van de dispersie in SOBEK wordt geadviseerd om na te gaan of deze aanname ook voor andere estuaria gerechtvaardigd is.

### B.3.5 Lengte estuarium

In Thatcher Harleman wordt er geen eenduidige definitie van de estuariumlengte gegeven (Thatcher and Harleman 1972), in SOBEK-RE wordt deze gedefinieerd als de lengte waarover het getij volledig is gedempt. Dit kan echter sterk verschillen per tak en is daarom ook geen eenduidige definitie. Omdat het hier gaat om een systeemconstante, kan deze bij een verkeerde keuze eenvoudig worden gecompenseerd door een andere waarde voor  $f_4$  ( $k$  in Thatcher Harleman) te kiezen. Nadeel is uiteraard dat de standaard waarden voor  $k$ , zoals afgeleid door Thatcher Harleman, minder betekenis hebben.

**B.3.6** Tijd(on)afhankelijkheid  $u_0$ ,  $h_0$  en  $s_0$ .

In Thatcher Harleman is het niet duidelijk of de waarden voor  $u_0$ ,  $h_0$  en  $s_0$  afhankelijk zijn van de tijd, zie ook discussie ten aanzien van  $u_0$  in 0. Op basis van de waarden die gepresenteerd worden voor de verschillende estuaria die Thatcher Harleman doorrekenen, lijkt het dat deze waarden als systeemconstanten worden gekozen en daarmee niet variëren in de tijd.

**B.3.7**  $f_1$  en  $f_3$ 

In SOBEK-RE is de term  $f_1$  beschikbaar. Dit is een constante waarde die door de gebruiker wordt opgegeven, en representeert een achtergronddispersie. Omdat een vergelijkbare term niet voorkomt in Thatcher Harleman zou voor  $f_1$  in principe 0 moeten worden gekozen. Om kalibratievrijheid te behouden lijkt het gerechtvaardigd deze term te behouden, maar met een standaardwaarde 0 en een duidelijke toelichting in de handleiding.

Het is hierbij goed om op te merken dat voor het huidige SOBEK-RE model van de Rijn-Maasmonding juist hoge waarden voor  $f_1$  zijn gekozen en  $f_3$  (de Taylor dispersie) altijd op 0 is gezet. Hiermee wijkt de huidige uitdrukking voor de dispersie sterk af van Thatcher Harleman.

**B.3.8** Branch Mouth relatie

In SOBEK-RE wordt de dispersie in de monding bepaald in de zeemonding en worden alle takken in het systeem gerelateerd aan die zeemonding(en). Dit leidt ertoe dat de waarde voor de dispersiecoëfficiënt van een tak verderop in het estuarium grotendeels bepaald wordt door de karakteristieken van de tak die uitmondt in zee. Omdat elke tak in het estuarium een hele andere menging kan hebben lijkt dit een onlogische keuze. Thatcher en Harleman lijken overigens gebruikt te hebben gemaakt van een andere Branch Mouth relatie. Zij bepalen de dispersie in de eigen monding van de betreffende tak (daar waar de tak uitmondt in een andere tak), en niet aan de zeemonding. Dit lijkt fysisch meer correct. Meer hierover is te vinden in §4.4.5.





## C Details Branch Mouth relaties in SOBEK-RE

### C.1 Branch-mouth relaties in de SOBEK-RE handleiding

De SOBEK-RE handleiding bestaat in principe uit 2 onderdelen: de *User Manual* en de *Technical Reference*.

In de *User Manual* wordt het volgende over de Branch-Mouth relations gezegd (vertaald naar Nederlands):

(...)

Wanneer wordt gekozen voor Thatcher-Harleman of empirisch krijg je de volgende vensters

- Fresh Water Discharge (alleen empirical)

(...)

- Mouth parameters

Afhankelijk van de gekozen dispersie-formule, wordt de volgende data gevraagd voor alle randvoorwaarden die onderdeel zijn van een Estuarium-monding. The monding selecteren in de lijst "monding"

- o Referentie waterdiepte
- o Referentie Zoutconcentratie
- o Karakteristieke stroomsnelheid
- o Dichtheid zeewater
- o Initieel zoetwater debiet

De volgende parameters zijn alleen nodig voor de optie dispersie type 'Empirisch'

- o  $P_0$ ,  $P_1$ ,  $U_0$ ,  $U_1$  (zie technical reference)
- Branch/Mouth relations

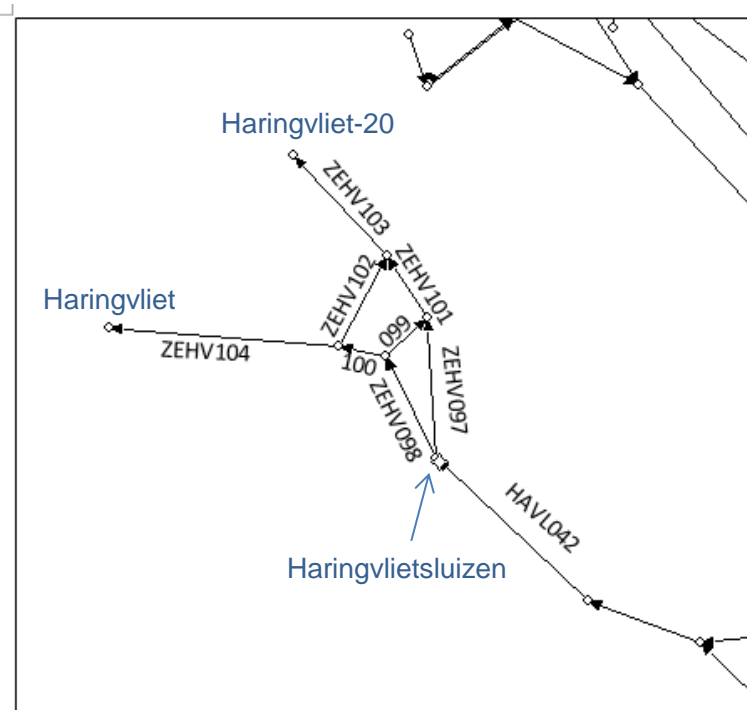
Onder deze optie kun je selecteren welke monding en welke tak zijn gerelateerd. (...) Elke tak behoort tot minstens 1 monding.

### C.2 Gebruik branch-mouth relaties in SOBEK-RE NDB model

In het SOBEK-RE NDB model worden vrijwel alle taken gerelateerd aan de monding Maasmond. Alleen de takken aan de zeezijde van de Haringvlietsluizen en de eerste tak aan de rivierzijde (HAVL042) van de Haringvlietsluizen zijn gerelateerd aan de monding Haringvliet/Haringvliet-20. In tabel 1 zijn de relaties naar deze mondingen weergegeven. In figuur 1 zijn deze takken weergegeven.

Tabel C.1 Branch/Mouth relations in SOBEK-RE NDB voor de Haringvlietmonding

Haringvliet	Haringvliet-20
HAVL042	HAVL042
ZEHV098	ZEHV097
ZEHV099	ZEHV098
ZEHV100	ZEHV099
ZEHV102	ZEHV101
ZEHV104	ZEHV102
	ZEHV103



Figuur C.1 Schematisatie SOBEK-RE NDB van de takken gerelateerd aan monding Haringvliet en Haringvliet-20

Uit tabel 1 maken we op dat voor de takken waar een duidelijke link is naar de bijbehorende monding (ZEHV104 en ZEHV103), alleen gelinkt wordt aan deze monding. De overige takken, waar niet geheel duidelijk is welke monding leidend is, worden gerelateerd aan meerdere mondingen.

Voor de verschillende mondingen kan invoer opgegeven worden. In tabel 2 is deze invoer, en de verschillende invoerparameters voor de mondingen van het SOBEK-RE NDB weergegeven.

Tabel C.2 Invoer voor de Branch/mouth relations

Invoer	Parameter	Haringvliet/Haringvliet-20	Maasmond
Mouth parameters	Ref water depth (m)	17	17
	Ref salt conc. (kg/m3)	34	34
	Char Flow veloc (m/s)	1	1
	Rho Seawater (kg/m3)	1035	1035
	Init Fresh water disch. (m3/s)	6000	1000
	Branches (Relatie naar de takken)*	(zie tabel 1)	
Branch/Mouth relations	Relatie tak naar mouth*		

\* Opvallend is dat je 2 maal hetzelfde op moet geven

## D Data convergente estuaria

Per estuarium de geïdealiseerde geometrie en ruwheid:

	$A_0$	$A_1$	$a_1$	$a_2$	$B_0$	$B_1$	$B_f$	$b_1$	$b_2$	$h_0$	$h_1$	$h_f$	$x_1$	$C$
	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	$\frac{m^{\frac{1}{2}}}{s}$
Maputo	47500	4700	2200	16000	11700	1150	100	2200	16000	4,06	4,06	4,06	5100	60
Pungue	14500	-	18500	-	5200	-	50	18500	-	2,79	-	2,79	0	52,5
Delaware	255000	-	41000	-	37655	-	120	42000	-	6,77	-	5,88	0	60
ChaoPhya	4600	3084	30000	130000	860	472	200	20000	130000	5,35	6,53	6,53	12000	55
Schelde	150000	-	27000	-	16000	-	50	27000	-	9,38	-	9,38	0	57,5
Landak	2000	-	60000	-	230	-	100	60000	-	8,7	-	8,7	0	60
Perak	20500	9210	5000	37000	9100	2068	130	2700	21000	2,25	4,45	14,74	4000	60
ThaChin	20000	1439	1900	87000	3600	259	45	1900	8700	5,56	5,56	5,56	5000	45
Limpopo	1700	1143	50400	115000	550	181	90	18000	115000	3,09	6,31	6,31	20000	57,5
Lalang	2880	-	167000	-	360	-	130	94000	-	8	-	12,5	0	60
Sinnamary	3300	1121	2500	39000	2300	470	95	1700	12000	1,43	2,39	7,23	2700	50

Per situatie de karakteristieken voor de waterdiepte ( $H$ ), rivierafvoer ( $Q_f$ ), zoutconcentratie in de monding ( $\hat{S}_0$ ), getijperiode ( $T$ ), de maximale zoutindringingslengte ( $L_{max}$ ) en de waarden voor de van den Burgh coëfficiënten ( $K$ ).

Estuary	Date	$H$	$Q_f$	$\hat{S}_0$	$T$	$L_{max}$	$K_{Gisen}$	$K_{Savenije}$	$K_{Zhang}$
	<i>dd - mm - yyyy</i>	[m]	$[\frac{m^3}{s}]$	[ppt]	[s]	[km]	[-]	[-]	[-]
Maputo	28-04-1982	2,8	25	35	44400	32	0,32	0,38	0,70
Maputo	15-07-1982	1,5	8	35	44400	44	0,32	0,38	0,69
Maputo	19-04-1984	3,3	120	28	44400	27	0,32	0,38	0,57
Maputo	17-05-1984	3,3	50	30	44400	31	0,32	0,38	0,65
Maputo	29-05-1984	2,8	40	31	44400	30	0,32	0,38	0,63
Pungue	26-05-1982	5	50	32	44400	58	0,22	0,30	0,52
Pungue	22-09-1982	5,2	26	34	44400	65	0,22	0,30	0,53
Pungue	31-01-2002	6,2	262	25	44400	47	0,22	0,30	0,50
Pungue	01-03-2002	6,7	150	27	44400	56	0,22	0,30	0,50
Pungue	12-10-1993	3,8	10	36	44400	70	0,22	0,30	0,55
Delaware	23-08-1932	1,7	120	32	44400	146	0,09	0,22	0,63
Delaware	04-10-1932	1,7	72	32	44400	159	0,09	0,22	0,64
ChaoPhya	05-06-1962	2,2	63	28,5	86400	50	0,71	0,75	0,65
ChaoPhya	16-01-1987	2,5	180	16	86400	27	0,71	0,75	0,51
ChaoPhya	23-02-1983	1,6	100	27	86400	43	0,71	0,75	0,62
ChaoPhya	29-01-1983	2,4	90	32	86400	52	0,71	0,75	0,62
Schelde	01-07-1987	3	90	34	44400	120	0,10	0,25	0,64
Schelde	02-11-2000	4	220	34	44400	124	0,10	0,25	0,61
Landak	15-09-2009	1,6	10	18	86400	55	0,69	0,69	0,58
Perak	13-03-2013	2,5	316	24	44400	29	0,24	0,24	0,54
ThaChin	16-04-1981	1,6	55	25	86400	50	0,31	0,35	0,51
ThaChin	27-02-1986	2,6	40	31	44400	56	0,31	0,35	0,45
ThaChin	01-03-1986	1,8	40	32	86400	57	0,31	0,35	0,45
ThaChin	13-08-1987	2	39	25	44400	39	0,31	0,35	0,45
Limpopo	04-04-1980	1,1	150	29	44400	25	0,38	0,5	0,58
Limpopo	31-12-1982	1,1	2	37	44400	64	0,38	0,5	0,72
Limpopo	24-07-1994	0,9	5	37	44400	55	0,38	0,5	0,61
Limpopo	10-08-1994	1	3	36	44400	64	0,38	0,5	0,64
Lalang	20-10-1989	2,6	120	26	86400	48	0,57	0,65	0,74
Sinnamary	12-11-1993	2,6	168	26	44400	12	0,46	0,45	0,52
Sinnamary	27-04-1994	2,9	148	22	44400	12	0,46	0,45	0,54
Sinnamary	03-11-1994	2,9	112	27	44400	15	0,46	0,45	0,52