

Effect zoute spui Bath op saliniteit, slibdynamica en ecologie Zeeschelde

ir. C. Kuijper
dr.ir. T. van Kessel
prof. dr. P. Meire

1208863-000

Titel

Effect zoute spui Bath op saliniteit, slibdynamica en ecologie Zeeschelde

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving	1208863-000	1208863-000-ZKS-0022	71

Trefwoorden

Bathse spuisluis, Schelde, estuarium, zoutconcentratie, slib, ecologie, Volkerak-Zoommeer

Samenvatting

Om de waterkwaliteit van het Volkerak-Zoommeer structureel te verbeteren wordt overwogen dit bekken weer zout te maken. Eén van de gevolgen is dat via de Bathse spuisluis met een groter debiet en een hogere saliniteit op de Westerschelde zal worden gespuid ten opzichte van de huidige situatie. De invloed van de gewijzigde spui op de zoutconcentraties en slibhuishouding is middels simulaties vastgesteld met het driedimensionale NEVLA-model dat het gehele estuarium incl. kustzone en bovenrivieren omvat. Op basis van de simulaties is vervolgens een deskundigenoordeel gegeven over de effecten op (i) het netto slibtransport naar de Antwerpse havendokken en (ii) de ecologie in het estuarium.

De simulatie-opzet bestond uit een inlooperperiode van 3 maanden met een continu bovendebiet van 50 m³/s, plus een analysemaand met eerst hetzelfde debiet en vervolgens afnemend tot ongeveer 20 m³/s. Deze lage debieten komen voor maar situaties dat dit 4 maanden lang onafgebroken voortduurt zijn uitzonderlijk. De simulaties geven daarom de effecten op de zoutverdeling en slibhuishouding bij maximale zoutindringing hetgeen het doel was van deze studie. Ze geven *geen* indicatie van het mogelijke effect op de gemiddelde of modale zoutverdeling en slibhuishouding in de Schelde. Aangezien de effecten op ecologie niet enkel bepaald worden door de maximale zoutindringing, kunnen de effecten bij gemiddelde zoutverdeling mogelijk anders (en wellicht groter) zijn dan hier weergegeven.

De gemiddelde saliniteit zal maximaal toenemen bij Bath en Liefkenshoek met 2 tot 2,5 PSU (chloride-concentraties met 1 tot 1,5 g/l) ofwel 13%. Afwaarts van Bath neemt de saliniteitsvariatie (het verschil tussen de maximale en minimale saliniteit per getijperiode) af terwijl dit in Liefkenshoek en opwaarts toeneemt.

De netto aanslibbing in de toegangsgeul naar de Zandvliet- en Berendrechtshuis neemt met enkele procenten toe terwijl deze in de toegangsgeul naar de Kallosluis vrijwel niet verandert (geringe afname). De berekende toename van de netto aanslibbing in het Deurganckdok bedraagt 8% als gevolg van een geringe toename van de suspensie-concentratie van slib in combinatie met een versterkte wateruitwisseling tussen rivier en dok.

Geschat wordt dat het slibtransport naar de havendokken in het Antwerps Kanaalpand toe kan nemen met maximaal een paar procent maar ook iets kan afnemen afhankelijk van de te bereiken zoutconcentratie in het Kanaalpand in de nieuwe situatie. De toename van de slibconcentratie ter hoogte van de Kallosluis is nihil zodat hierdoor het netto slibtransport via de sluis naar het havendok vrijwel niet zal veranderen. Wel kan de toename van de saliniteitsvariatie op de Zeeschelde leiden tot een toename van het slibtransport door de Kallosluis met 7% maar alleen als dit leidt tot een grotere wateruitwisseling tussen rivier en havendok.

De gewijzigde zoute spui Bath heeft effecten op de saliniteit en de zwevende stof in het estuarium. Beide effecten hebben een significante invloed op de ecologie. De gemiddelde saliniteit stijgt, waardoor alle ecotopen opwaarts verschuiven. De zoutstress neemt af in de

Titel

Effect zoute spui Bath op saliniteit, slibdynamica en ecologie Zeeschelde

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving	1208863-000	1208863-000-ZKS-0022	71

polyhaliene zone, maar neemt toe in opwaartse gebieden. In een groot deel van de Westerschelde neemt de concentratie zwevende stof toe wat een negatief effect zal hebben op de primaire productie. In de grote delen van de brakke Zeeschelde is er een afname, zij het beperkter. In de zoete Zeeschelde worden geen effecten verwacht. De effecten gelden enkel bij de uitgangssituatie van de modelstudie d.w.z. een uitzonderlijk langdurige periode van lage debieten.

De effecten van een groter spuidebiet met een hogere saliniteit bij Bath op de zoutconcentraties, slibhuishouding en ecologie zijn vastgesteld voor de situatie met een relatief lage rivierafvoer gedurende een lange periode. Om te komen tot een representatief jaargemiddeld beeld van de effecten dienen ook simulaties met hogere afvoeren te worden uitgevoerd.

Referenties

Raamovereenkomst 31078379
Zaaknummer 31086872/4500

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.0	dec. 2013	ir. C. Kuijper dr.ir. T. van Kessel prof. dr. P. Meire		Ir. M.D. Taal		drs. F.M.J. Hoozemans	
2.0	26 jan. 2014	ir. C. Kuijper dr.ir. T. van Kessel prof. dr. P. Meire		Ir. M.D. Taal		drs. F.M.J. Hoozemans	
2.1	30 jan. 2014	ir. C. Kuijper dr.ir. T. van Kessel prof. dr. P. Meire		Ir. M.D. Taal		drs. F.M.J. Hoozemans	

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond van de studie	1
1.2 Onderzoeksvragen	1
1.3 Gevolgde aanpak en scenario's	1
1.4 Definities	2
1.5 Bijdragen	3
2 Effecten op de waterbeweging en zoutverdeling	5
2.1 Verwachte effecten	5
2.1.1 Waterbeweging	5
2.1.2 Zoutverdeling	5
2.2 NEVLA-model	6
2.3 Spuidebiet en chloride-gehalte Bathse spuisluis	8
2.4 Rivierafvoeren en overige lozingen	11
2.5 Uitvoering van de berekeningen	12
2.6 Resultaten	13
2.6.1 Waterstanden	13
2.6.2 Zoutverdeling	14
2.6.3 Vergelijking NEVLA-model (3D) met SCALDIS400-model (2D)	25
3 Effecten op de slibhuishouding	27
3.1 Aanslibbing in de toegangsgeulen naar de schutsluizen en in het Deurganckdok.	27
3.1.1 Modelbeschrijving	27
3.1.2 Resultaten	28
3.2 Verandering slibtransport via Zandvliet-, Berendrecht- en Kallosluis	35
3.2.1 Beschrijving situatie	35
3.2.2 Wateruitwisseling tussen rivier en havendokken	35
3.2.3 Slibconcentraties in de toegangsgeulen bij de schutsluizen	44
4 Effecten op de ecologie	47
4.1 Inleiding	47
4.2 Ecologische effecten: saliniteit	47
4.2.1 Pelagiaal	49
4.2.2 Intertidaal	50
4.3 Ecologische effecten: zwevende stof	52
4.3.1 Pelagiaal	52
4.3.2 Intertidaal	53
4.4 Indirecte effecten - amplificerend effect vaargeulonderhoud.	53
5 Conclusies	55
6 Referenties	59

Bijlage(n)

A Water- en zoutbalans Antwerps Kanaalpand	A-1
B Tijdseries saliniteiten	B-1
C Representativiteit uitgevoerde simulaties	C-1

1 Inleiding

1.1 Achtergrond van de studie

Het Volkerak-Zoommeer (VZM) kampt met een slechte waterkwaliteit en jaarlijks treedt blauwalgoverlast op. Binnen de milieueffectrapportage *Waterkwaliteit Volkerak-Zoommeer* (Rijkswaterstaat, 2012) en eerdere studies is vastgesteld dat het weer zout maken de enige duurzame maatregel is om de waterkwaliteit van het Volkerak-Zoommeer structureel te verbeteren. Eén van de gevolgen is een gewijzigde spui op de Westerschelde bij Bath ten opzichte van de huidige situatie met een zoet VZM. Indien de plannen tot verzilting doorgaan zal dit resulteren in een groter spuidebiet met een hoger zoutgehalte bij de Bathse spuisluis. Het spuidebiet en zoutgehalte voor de situatie met een zout Volkerak-Zoommeer, zoals toegepast in dit rapport, zijn gebaseerd op genoemde eerder uitgevoerde studies.

1.2 Onderzoeksvragen

De doelstelling van de studie is antwoord te geven op de volgende vragen:

- 1 Wat is de invloed van een toename in debiet en zoutgehalte door de Bathse Spuisluis richting de Westerschelde op de waterbeweging, de slibhuishouding en de zoutgradiënt in de Zeeschelde? Meer specifiek:
 - Hoe verschuift de zoutgradiënt?
 - Wat is de verandering in zoutconcentratie nabij de sluizen van Antwerpen (rivierzijde)?
 - Wat is het effect op het Estuarien Turbiditeitsmaximum (ETM)?
- 2 Wat is de invloed van een toename in debiet en zoutgehalte door de Bathse Spuisluis richting de Westerschelde op de baggerinspanning in het Antwerpse havengebied? Meer specifiek:
 - Wat is de aanslibbing in de toegangsgeulen naar de Antwerpse sluizen (Zandvliet, Berendrecht en Kallo), in het Deurganckdok en het gebied achter de sluizen (havendokken)?
- 3 Wat is de invloed op de ecologie in het Schelde-estuarium? Meer specifiek:
 - Wat zijn de effecten van de verschuivende saliniteitszones?
 - Wat zijn de effecten van veranderingen in zwevend stofconcentraties van slib?

1.3 Gevolgde aanpak en scenario's

Onderzoeksvraag 1 wordt beantwoord op basis van berekeningen met numerieke modellen (Delft3D en WAQ). Onderzoeksvraag 2 wordt deels op basis van modelresultaten (aanslibbing in de toegangsgeulen naar de sluizen en in het Deurganckdok) beantwoord en deels op basis van een deskundigenoordeel (aanslibbing achter de sluizen in de havendokken). Ook onderzoeksvraag 3 wordt op basis van een deskundigenoordeel beantwoord, gebruik makend van de door het model berekende veranderingen van de zoutconcentratie.

1. Invloed gewijzigd spuiregime Bath op waterbeweging, zoutverdeling en slibhuishouding in de Zeeschelde.

Er wordt gebruik gemaakt van het 3D-NEVLA model. Dit model vormt een driedimensionale schematisatie van het Schelde-estuarium waardoor de effecten van de horizontale en verticale verdelingen van de zoutconcentraties op de waterbeweging en de slibtransporten expliciet worden meegenomen. Het modeldomein bestrijkt het gehele Schelde-estuarium incl. monding, Westerschelde, Zeeschelde en overige bovenrivieren (Kleine en Grote Nete, Dijle, Zenne, Dender en Durme).

Voor de simulaties wordt gebruik gemaakt van de bestaande instellingen van het model zoals dat operationeel draait voor het jaar 2006. Deze instellingen betreffen de randvoorwaarden op de zeeranden, ruwheden, hydrodynamische en slibparameters. De bathymetrie is die van 2011. Het Deurganckdok in zijn volledige vorm is onderdeel van de schematisatie.

2. Invloed gewijzigd spuiregime Bath op baggerbezwaar havengebied Antwerpen.

Er wordt gekeken naar het verwachte effect van een toename in spuidebiet en zoutgehalte door de Bathse Spuisluis op de aanslibbing in het Deurganckdok, in de toegangsgeulen naar de schutsluizen en het netto slibtransport via de schutsluizen naar de Antwerpse havendokken. Voor de bepaling van de aanslibbing in de toegangsgeulen en het Deurganckdok wordt een procentuele verandering ten opzichte van de referentie aangegeven. Deze relatieve verandering is gebaseerd op modelresultaten. De verandering van het netto slibtransport door de sluizen wordt op basis van een deskundigenoordeel bepaald. Hierbij worden de berekende verschillen in zoutgradiënt over de sluizen en het slibaanbod vóór de sluizen (Zeeschelde) beschouwd.

3. Invloed van verhoogde saliniteit in de Zeeschelde op de zoetwatergetijde ecotopen.

Op basis van de modelresultaten wordt een uitspraak gedaan over de invloed van een gewijzigd spuiregime bij Bath op de zoetwater-getijde ecotopen.

De onderzochte scenario's zijn vermeld in Tabel 1.1.

Tabel 1.1: Onderzochte scenario's.

Scenario	Aanduiding	Spuidebiet ¹⁾ [m ³ /s]	Saliniteit [PSU]	Chloride- concentratie [g/l]
Huidig	T0	20	0,3	0,2
Toekomstig	T1	95	24	13,5

¹⁾ Daggemiddelde.

1.4 Definities

In Delft3D wordt het transport van opgeloste zouten berekend. De totale massa hiervan per massa-eenheid oplossing vormt de saliniteit en kan worden uitgedrukt als gram per kilogram of ppt. De massa opgeloste zouten bepaalt de dichtheid van het water en is daarmee van invloed op de waterbeweging. Bij de berekening van de dichtheid wordt de UNESCO-vergelijking gebruikt welke geldig is voor "standaard zeewater". Dit betekent dat impliciet wordt uitgegaan van een vaste ionen-samenstelling zodat voor de verhouding tussen saliniteit S en chloriniteit Cl geldt:

$$S = 1,80655 Cl \quad (1.1)$$

en waarbij de chloriniteit Cl [g/kg] het totale gewicht aan chloorionen per gewichtseenheid zeewater is, als alle broom- en jodiumionen zijn vervangen door een equivalente hoeveelheid chloorionen. Voor de omrekening van massaconcentratie naar volume-concentratie moet de chloriniteit met de dichtheid van het water worden vermenigvuldigd.

In dit rapport wordt de zoutconcentratie zoals verkregen met het model gepresenteerd als saliniteit. De eenheid voor saliniteit is PSU (Practical Salinity Unit) welke globaal overeenkomt met g/kg of ppt. Voor de omrekening naar chloride-concentraties [g/l] moeten deze waarden, als benadering, worden gedeeld door 1,8.

1.5 Bijdragen

De volgende personen hebben bijgedragen aan deze studie: ir. Kees Kuijper¹ (waterbeweging en zoutverdeling, Hoofdstuk 2, en slibtransport naar de Antwerpse havendokken, Par. 3.2), dr. ir. Thijs van Kessel¹ (slibdynamica, Hoofdstuk 3) en prof. dr. Patrick Meire², ir. Tom Maris² en dr. ir. Tom Cox² (ecologie, Hoofdstuk 4 en Bijlage C). De hydrodynamische simulaties zijn uitgevoerd door Dick Verploegh¹. Verder heeft Jan van Beek¹ geassisteerd met het koppelen van het hydrodynamische model met het slibtransportmodel. De kwaliteitsborging was in handen van ir. Marcel Taal¹ en ir. Joris van Lede³. Ir. Loana Arentz¹ was betrokken tijdens de voorbereidende fase. Vanuit Rijkswaterstaat is het onderzoek begeleid door ir. Neeltje Kielen en ir. René Boeters.

¹ Deltares

² Universiteit van Antwerpen

³ Waterbouwkundig Laboratorium Antwerpen

2 Effecten op de waterbeweging en zoutverdeling

2.1 Verwachte effecten

2.1.1 Waterbeweging

Het daggemiddelde spuidebiet via het Bathse spuikanaal zal in de toekomstige situatie orde $100 \text{ m}^3/\text{s}$ bedragen (van Pagee et al., 2009). Dit resulteert in een gespuid watervolume per getijperiode van $4,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. In van Pagee et al. (2009) wordt als getijvolume⁴ in de Westerschelde bij Bath $0,3 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ vermeld. Het lozingsvolume bedraagt dan ongeveer 1,5% van het getijvolume en de effecten op de grootschalige waterbeweging zullen daarom gering zijn. Lokaal kunnen de stroomsnelheden wel toenemen. Als het maximale lozingsdebiet een factor twee groter is dan het daggemiddelde debiet (er wordt gedurende de helft van de getijperiode gespuid) zal nabij het lozingspunt op een waterdiepte van 6 meter de invloed op de stroomsnelheid orde $0,3 \text{ m/s}$ bedragen bij een pluimbreedte van 100 m (de breedte van de spuisluis). In werkelijkheid zal de snelheid van de pluim door 'entrainment' van het omringende water snel afnemen met de afstand tot de lozing, zodat de effecten op de stroomsnelheden in de vaargeul niet meer merkbaar zullen zijn. Deze gevolgtrekking is in overeenstemming met de bevindingen in van Pagee et al. (2009), waar mede op basis van simulaties met SCALDIS400 wordt geconcludeerd dat de kans op hinderlijke dwarsstromingen klein is.

2.1.2 Zoutverdeling

De effecten van een groter spuidebiet met een hogere zoutconcentratie op de zoutverdeling in het estuarium worden beschouwd in twee stappen:

1. Effecten van het grotere spuidebiet;
2. Effecten van een hogere zoutconcentratie.

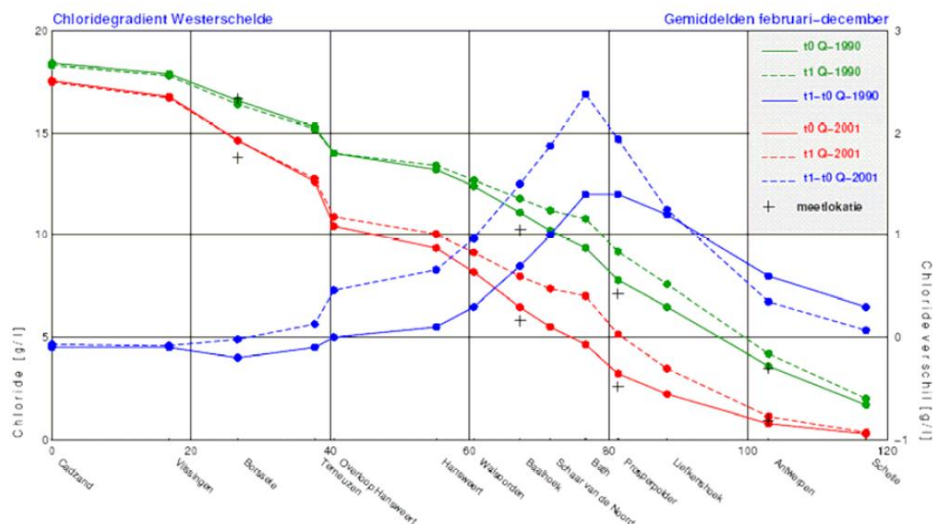
Een toename van het spuidebiet alleen zal tot gevolg hebben dat de afvoer door de mond van de Westerschelde toeneemt en de zoutconcentraties in het estuarium afnemen. Naargelang de zoutconcentratie van het gespuid water groter wordt zal deze reductie kleiner worden en uiteindelijk resulteren in een toename van de zoutconcentratie in het estuarium.

In van Pagee et al. (2009) worden resultaten gepresenteerd van simulaties met het numerieke model Scaldis400. Het model is diepte-gemiddeld zodat effecten van veranderingen van snelheid en zoutconcentratie over de waterdiepte op het zouttransport niet expliciet worden gemodelleerd maar worden verdisconteerd in een dispersiecoëfficiënt. Voor een gemengd estuarium als de Schelde kan een gekalibreerd diepte-gemiddeld model een redelijke tot goede benadering vormen van de werkelijkheid. De uitkomsten met het 3D-NEVLA model moeten uitwijzen hoe goed deze benadering is⁵. De grootste beperking van het toegepaste SCALDIS400 model is dat de bovenstroomse rand ter plaatse van Schelle ligt, zodat het model niet goed voor lage afvoeren kan worden gebruikt als de zoutindringing vanuit zee tot voorbij Schelle reikt. De effecten op de chloride-concentraties langs de Boven-Zeeschelde (en andere bovenrivieren) konden met dit model niet worden vastgesteld.

⁴ Het getijvolume is de som van het eb- en vloedvolume.

⁵ Een exacte vergelijking tussen beide modellen wordt niet uitgevoerd, omdat de randvoorwaarden (waterstanden op zee en rivierafvoeren) voor de modellen verschillend zijn. Wel kunnen de berekende effecten worden vergeleken.

Figuur 2.1 toont de resultaten van het SCALDIS400 model voor de jaarsimulaties die zijn uitgevoerd voor 1990 en 2001. De gemiddelde jaarafvoer bij Schelle was in 1990 relatief laag ($62 \text{ m}^3/\text{s}$) en in 2001 relatief hoog ($165 \text{ m}^3/\text{s}$). Ter vergelijking: voor de periode 1990 t/m 2011 is de mediane afvoer bij Schelle $69 \text{ m}^3/\text{s}$, de afvoer met een 90% onderschrijding $199 \text{ m}^3/\text{s}$ en de gemiddelde afvoer $96 \text{ m}^3/\text{s}$.



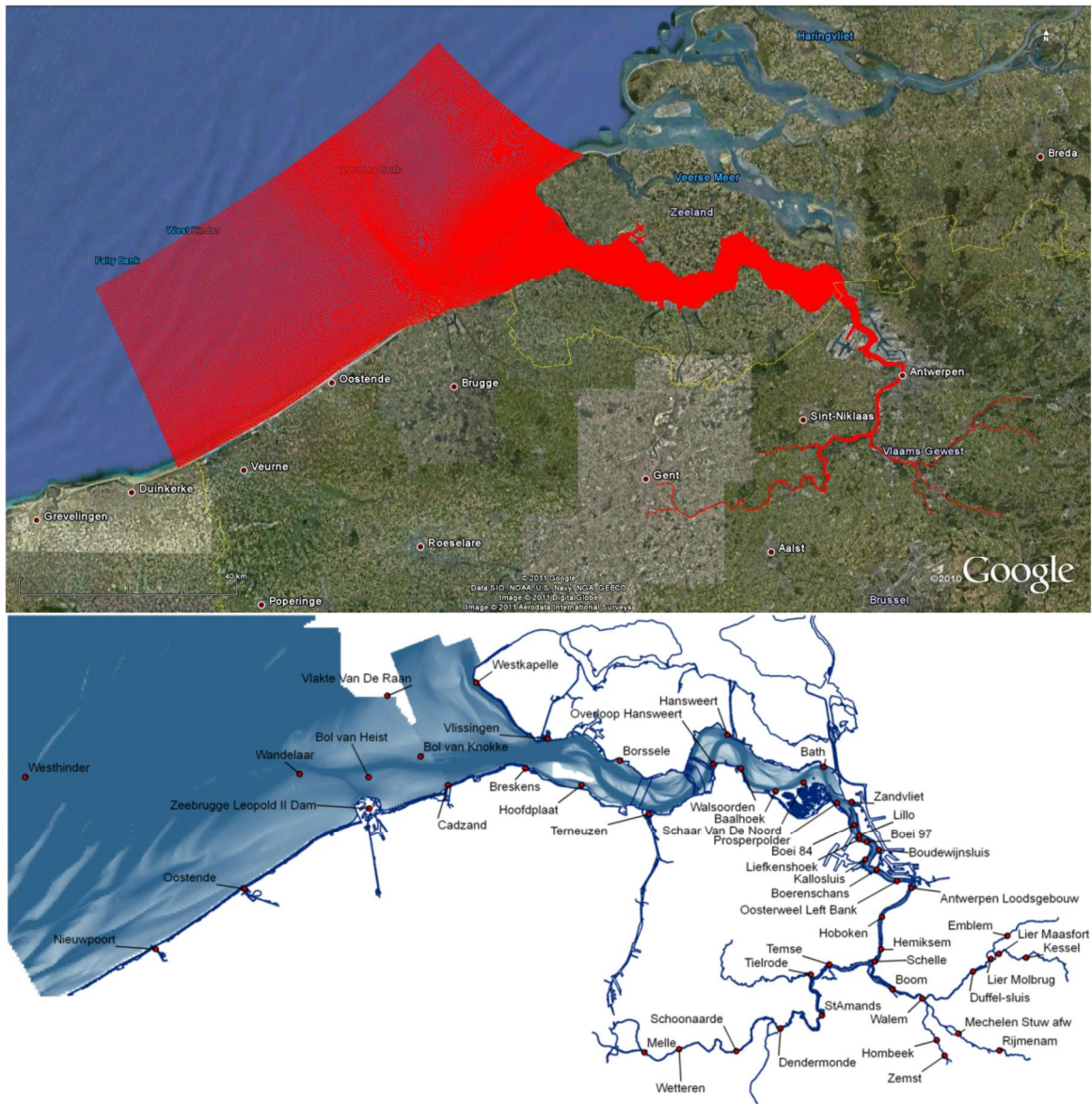
Figuur 2.1: Jaargemiddelde chloride-concentraties [$\text{g Cl}^-/\text{l}$] en veranderingen ten gevolge van een toename van het spuidebiet en zoutgehalte via de Bathse spuisluis (van Pagee et al., 2009).

De door Scaldis400 berekende tijdsgemiddelde veranderingen van de chloride-concentratie bij Bath bedragen 1,2 tot 2,2 $\text{g Cl}^-/\text{l}$, resp. voor de 1990- en 2001-simulatie. De effecten bij een hoge afvoer zijn op de Westerschelde groter maar op de Beneden-Zeeschelde opwaarts van Liefkenshoek kleiner dan die bij een lage afvoer. Voor de lage afvoer van 1990 reikt de zoutindringing tot voorbij de bovenstroomse begrenzing van het model, zodat de resultaten voor deze situatie minder betrouwbaar zijn.

2.2 NEVLA-model

Het NEVLA-model vormt een afbeelding van het getijgebied van de Schelde en berekent de waterbeweging en zoutverdeling onder invloed van getij, rivierafvoeren, dichtheidsverschillen ten gevolge van gradiënten in saliniteit en wind. Het modeldomein bestrijkt een gebied dat de kustzone, de Westerschelde en de bovenrivieren in Vlaanderen omvat, zie Figuur 2.2. Het NEVLA-model is ontwikkeld en wordt beheerd door het Waterbouwkundig Laboratorium van de Vlaamse Overheid – Departement Mobiliteit en Openbare Werken en wordt door hen gebruikt binnen de SIMONA software omgeving⁶. Het kan zowel voor 2D- (diepte-gemiddelde) als 3D-simulaties worden toegepast. In deze studie zijn 3D-simulaties uitgevoerd met het rekenprogramma Delft3D van Deltares. De belangrijkste stations in het modelgebied zijn eveneens weergegeven in Figuur 2.2.

⁶ Waterbouwkundig Laboratorium (2013) Nevla3D. Een gekalibreerd 3D stromingsmodel van het tijgebied van het Schelde-estuarium. Vlaamse Overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, afdeling Waterbouwkundig Laboratorium.



Figuur 2.2: Boven: domein NEVLA-model. Onder: stations in het Schelde-estuarium (Verheyen et al., 2013).

Aan de zeezijde worden de randvoorwaarden ontleend aan het ZUNO-grof model van de zuidelijke Noordzee. Langs de randen loodrecht op de kust worden stroomsnelheden voorgeschreven en langs de westelijke rand evenwijdig aan de kust wordt een combinatie van waterstanden en stroomsnelheden gebruikt (zogenaamde Riemann-randen). Ter plaatse van de bovenstroomse rivierranden worden afvoeren als randvoorwaarden gebruikt: Zeeschelde (Merelbeke), Dender (Dendermonde), Zenne (Zemst), Dijle (Haacht), Grote Nete (Itegem) en Kleine Nete (Grobendonk), zie Figuur 2.3. De afvoer van de Durme wordt verwaarloosd. In het modelgebied worden bij Bath (Bathse spuisluis) en Terneuzen (Kanaal Gent-Terneuzen) spuidebieten voorgeschreven.



Figuur 2.3: Rivierranden Zeescheldebekken (Taverniers en Mostaert, 2009).

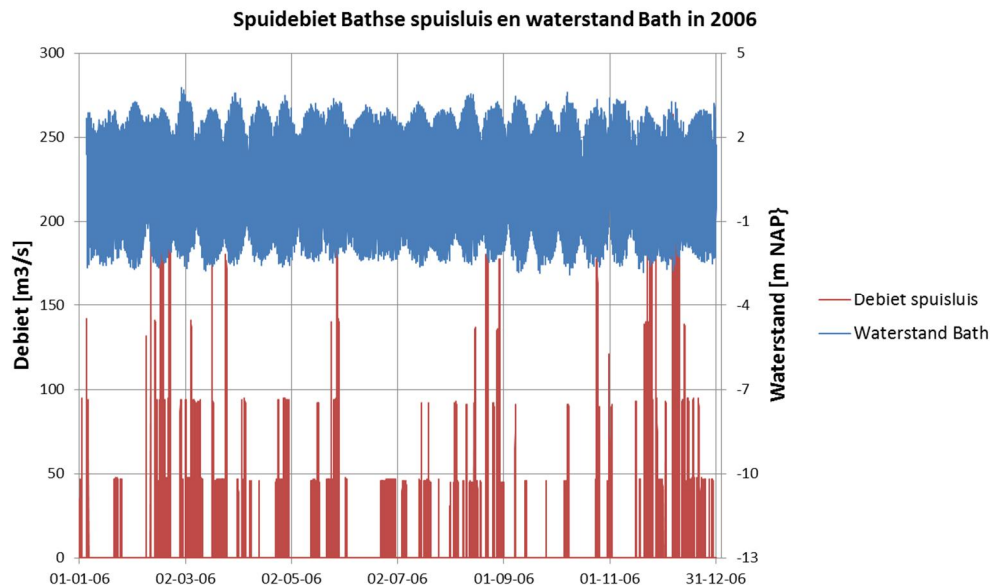
De 3D-simulaties in dit project zijn uitgevoerd met zes rekenlagen. De dikte van elke rekenlaag bedraagt een vast percentage van de waterdiepte: vanaf het wateroppervlak (rekenlaag 1) tot de bodem (rekenlaag 6) resp. 10%, 20%, 30%, 20%, 15% en 5%.

Uitgangspunt van de berekeningen vormt de beschikbare jaarsimulatie voor 2006. Voor dat jaar is het model gekalibreerd en zijn de zeerandvoorwaarden bekend. Een uitgebreide beschrijving van de meest actuele kalibratie wordt gegeven in Verheyen et al. (2013). Naast de werkelijk opgetreden waterstanden zijn tijdens de simulatie eveneens de werkelijk opgetreden windsnelheden en –richtingen als forcering gebruikt. De jaargemiddelde afvoer bij Schelle, als totaal van de afvoeren van de bovenrivieren, bedroeg in 2006 $80 \text{ m}^3/\text{s}$. Deze afvoer was enigszins lager dan de gemiddelde afvoer van $96 \text{ m}^3/\text{s}$ voor de periode 1990 t/m 2011. In het modelgebied wordt in twee locaties water geloosd: in 2006 gemiddeld $12 \text{ m}^3/\text{s}$ via de Bathse spuisluis en gemiddeld $18 \text{ m}^3/\text{s}$ vanuit het Kanaal Gent-Terneuzen. In het laatste geval was gedurende een groot deel van het jaar sprake van een constant spuidebiet van $13 \text{ m}^3/\text{s}$.

De bodem voor de huidige simulaties representeert de situatie van 2011. Dit is de meest recente, beschikbare modelbodem en bevat het Deurganckdok in zijn huidige vorm. Gecontroleerde overstromingsgebieden (GOG's), zoals bij Kruibeke-Bazel-Rupelmonde, zijn niet opgenomen in de modelschematisatie (Vanlede et al., 2008).

2.3 Spuidebiet en chloride-gehalte Bathse spuisluis

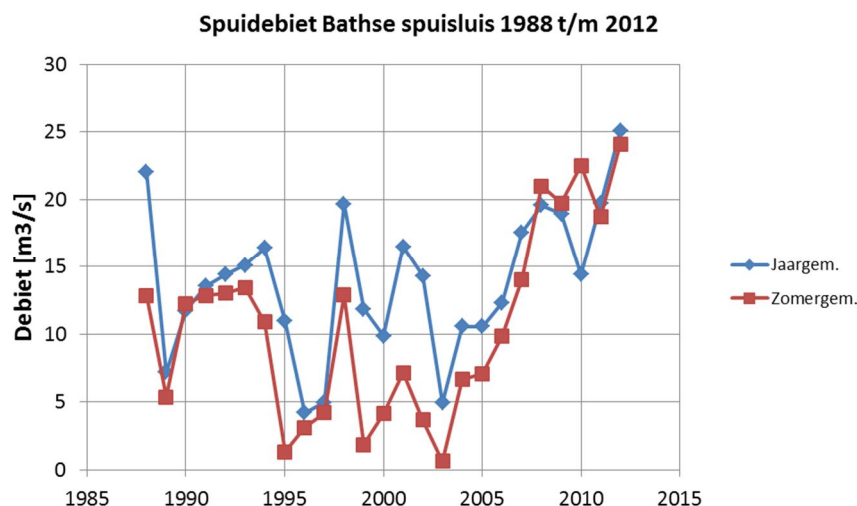
In de beschikbare jaarsimulatie voor 2006 zijn de spuidebieten via de Bathse spuisluis gebaseerd op gemeten waarden. Er wordt gespuid als de waterstand bij Bath beneden 0 m NAP is. De grootte van het spuidebiet varieert tijdens het getij afhankelijk van de grootte van het verval over de sluis. Ook is er sprake van een variatie van het debiet over de getijden afhankelijk van bijvoorbeeld de doottij-springtij variatie en meteorologische invloeden en beheer (doorstroomoppervlak van de sluis), zie Figuur 2.4.



Figuur 2.4: Spuidebiet Bathse spuisluis (rode lijn) en waterstand te Bath (blauwe lijn) in 2006.

Voor de simulaties in deze studie wordt uitgegaan van een synthetisch spuidebiet. Indien de waterstand bij Bath lager is dan NAP wordt gespuid met een constant debiet; indien de waterstand hoger is dan NAP wordt niet gespuid⁷. Het gemiddelde spuidebiet is op deze wijze constant gedurende de simulatieperiode wat aansluit op de quasi-stationaire instelling van de rivierafvoeren (zie hierna)⁸.

Figuur 2.5 toont het opgetreden jaargemiddelde en zomergemiddelde (april t/m september) spuidebiet voor de periode 1988 t/m 2012.



Figuur 2.5: Jaargemiddeld en zomergemiddeld spuidebiet Bathse spuisluis.

⁷ Er wordt geen rekening gehouden met het ontstaan van een gedempt getij in het Volkerak-Zoommeer, een eventuele verlaging van de gemiddelde waterstand in het Volkerak-Zoommeer en de effecten hiervan op de tijdstippen, dat gespuid wordt.

⁸ In werkelijkheid kan het getijgemiddelde spuidebiet nog iets variëren omdat de duur dat de waterstand bij Bath lager is dan NAP verschillend kan zijn voor de verschillende getijperioden (doodtij-springtij, meteorologische effecten).

Volgens Figuur 2.5 zijn de gemiddelde spuidebieten de afgelopen jaren groter geweest dan voorheen met waarden van 20-25 m³/s, zowel jaar- als zomergemiddeld. De T0-simulatie wordt daarom gedaan met een gemiddeld spuidebiet van 20 m³/s (het gemiddelde is incl. de perioden zonder spui als de waterstand boven NAP is). Het debiet tijdens het spuien bedraagt 43 m³/s. De saliniteit van het gespuide water tijdens de simulatie is 0,3 PSU⁹ wat overeenkomt met een chloride-concentratie van 0,17 g/l.

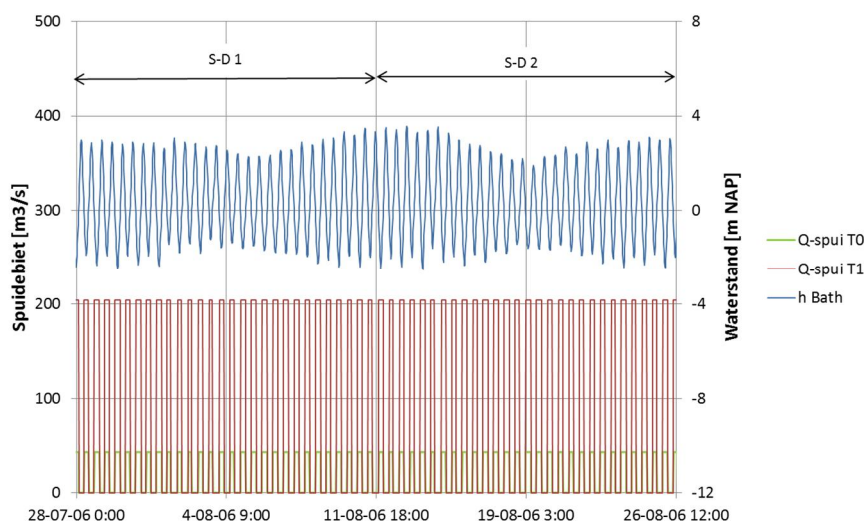
In de toekomstige situatie met een zout Volkerak-Zoommeer (T1) zal min of meer gelijkmatig over het jaar worden gespuid met een jaargemiddeld debiet van 90 tot 100 m³/s (Rijkswaterstaat, 2012). Dit gemiddelde is incl. de perioden tijdens hoog water wanneer er niet wordt gespuid. De T1-simulatie wordt daarom uitgevoerd met een gemiddeld spuidebiet van 95 m³/s. Het debiet tijdens het spuien, als de waterstand bij Bath beneden NAP is, bedraagt dan 204 m³/s. De chloride-concentratie in de toekomstige situatie zal 13 tot 14 g/l bedragen (van Pagee et al., 2009). In het model wordt uitgegaan van 13,5 g Cl⁻/l wat overeenkomt met een saliniteit van 24 PSU.

De spuiarakteristieken voor de simulaties zijn samengevat in Tabel 2.1.

Tabel 2.1: Spuiarakteristieken Bathse spuisluis voor T0 en T1 simulaties.

Scenario	Aanduiding	Spuidebiet [m ³ /s]	Spuidebiet (daggemiddeld) [m ³ /s]	Chloride- concentratie [g/l]	Saliniteit [PSU]
Huidig	T0	43	20	0,17	0,30
Toekomstig	T1	204	95	13,5	24,0

De spuidebieten voor de T0 en de T1 zijn weergegeven in Figuur 2.6 gedurende de laatste maand van de simulatie, welke bestaat uit twee springtij-doodtij cycli.

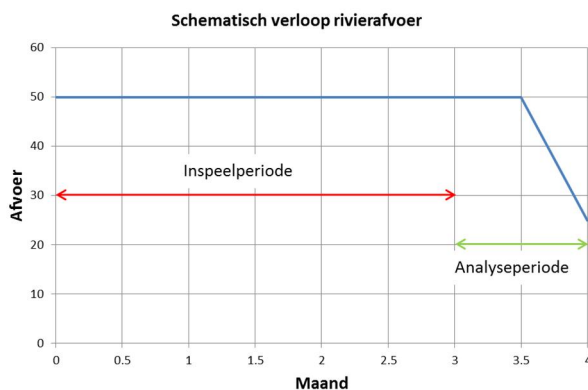


Figuur 2.6: Spuidebiet Bathse spuisluis tijdens laatste maand van de simulatie voor T0 (groene lijn) en T1 (rode lijn). Blauwe lijn: gemodelleerde waterstand bij Bath. S-D 1 is de eerste springtij-doodtij cyclus; S-D 2 is de tweede springtij-doodtij cyclus.

⁹ In het model wordt gerekend met saliniteit ofwel de totale massa aan opgeloste zouten per kg oplossing.

2.4 Rivierafvoeren en overige lozingen

De afvoeren ter plaatse van de rivieranden, zie Figuur 2.3, worden als volgt geschematiseerd (Figuur 2.7):

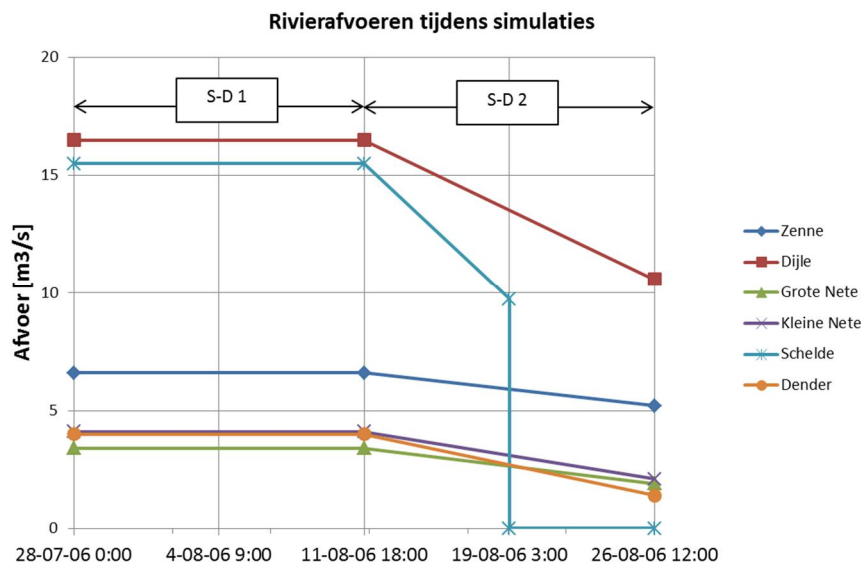


Figuur 2.7: Schematisch verloop rivierafvoeren.

De totale simulatieperiode van vier maanden bestaat uit een inspeelperiode van drie maanden, die vooral nodig is voor het inspelen van de zoutverdeling, gevolgd door een analyseperiode van één maand. De analyseperiode wordt gevormd door twee springtij-doodtij cycli van elk 14,75 dagen. Tijdens het inspelen van het model én de eerste springtij-doodtij cyclus zijn de afvoeren van elk van de bovenrivieren gelijk aan de mediane waarde (50% onderschrijdingswaarde). Gedurende de tweede springtij-doodtij cyclus nemen de afvoeren lineair af totdat aan het einde van de simulatieperiode een afvoer wordt bereikt met een onderschrijdingswaarde van 10%. De afvoer van de Boven-Zeeschelde kan in tijden van waterschaarste reduceren tot vrijwel 0 m³/s als ervoor gekozen wordt om het beschikbare water via het Kanaal van Gent naar Terneuzen richting Westerschelde te leiden. Daarom wordt tijdens de simulatie gedurende de laatste week van de tweede springtij-doodtij cyclus de afvoer bij Merelbeke op 0 m³/s gezet. Tenslotte geldt dat zowel voor de 10%- als de 50%-onderschrijdingswaarden wordt uitgegaan van afvoeren tijdens de zomerperiode (april t/m september) zoals afgeleid uit waarnemingen voor de periode 1990 t/m 2011. De hiervoor beschreven keuzes leiden tot de rivierafvoeren zoals vermeld in Tabel 2.2 voor de gehele simulatieperiode en weergegeven in Figuur 2.8 voor de analyseperiode. Opgemerkt wordt dat als begintijd van de simulatie is gekozen voor 29 april 2006 00:00 uur. Deze starttijd is arbitrair aangezien het getij zich min of meer herhaalt op een tijdschaal van 14,8 dagen.

Tabel 2.2: Ingestelde afvoeren bovenrivieren [m^3/s] tijdens model simulaties.

	Inspelen	1 ^e S-D-tij cyclus	2 ^e S-D-tij cyclus
Begin:	29-04-06 00:00	28-07-06 00:00	11-08-06 18:00
Eind:	28-07-06 00:00	11-08-06 18:00	26-08-06 12:00
Duur periode [dagen]	90	14,75	14,75
Dijle: Haacht	16,5	16,5	16,5 → 10,6
Zeeschelde: Merelbeke	15,5	15,5	1 ^e week: 15,5 → 9,8 2 ^e week: 0
Zenne: Epepegem	6,6	6,6	6,6 → 5,2
Kleine Nete: Grobbendonk	4,1	4,1	4,1 → 2,1
Dender: Appels	4,0	4,0	4,0 → 1,4
Grote Nete: Itegem	3,4	3,4	3,4 → 1,9
Totaal	50,1	50,1	50,1 → 21,2



Figuur 2.8: Ingestelde afvoeren bovenrivieren tijdens analyseperiode.

Ter plaatse van Terneuzen wordt gedurende het gehele getij water geloosd met een constant debiet van $13 \text{ m}^3/\text{s}$.

De saliniteit van de rivierafvoeren en de lozing bij Terneuzen wordt gelijk genomen aan $0,3 \text{ PSU}$ ($\sim 0,17 \text{ g Cl}^-/\text{l}$).

2.5 Uitvoering van de berekeningen

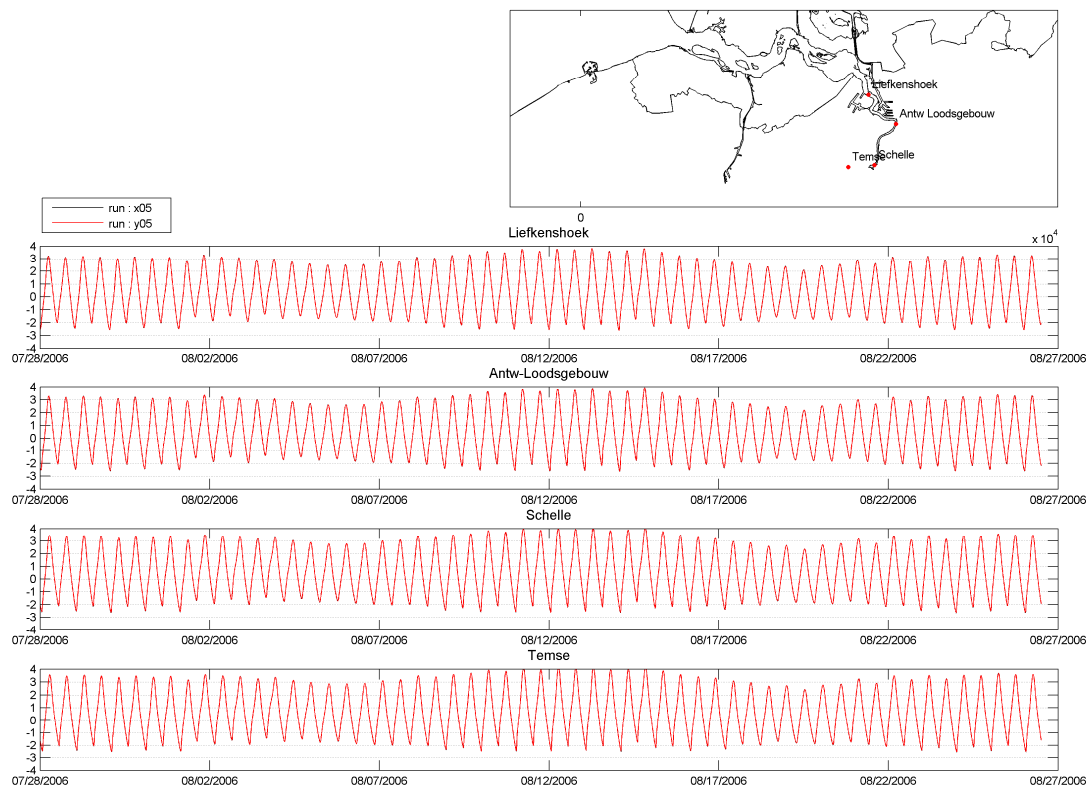
Het NEVLA-model is met 231015 actieve rekencellen, zes lagen en een rekestijdstap van $7,5 \text{ s}$ een rekenintensief model. De simulaties zijn daarom uitgevoerd op de rekenclusters van zowel SARA (Stichting Academisch Rekencentrum Amsterdam) als Deltares, gebruik makend van de parallelle versie van Delft3D. Dit betekent dat op meerdere processoren tegelijk wordt gerekend om de doorlooptijd van de simulaties te verkorten. De versnelling die hiermee kon worden bereikt was bijna 9 bij SARA (d.w.z. 9 dagen simulatie kost 1 dag rekenen) en 6 bij Deltares.

De laatste maand van de simulatieperiode is gebruikt voor de analyse van de waterbeweging, zoutverdeling en slibhuishouding. De slibtransporten zijn berekend met het numerieke model WAQ. Hierbij zijn de resultaten van de hydrodynamische simulatie gebruikt als invoer voor het slibtransportmodel¹⁰. Bij deze koppeling is tegelijk ruimtelijk geaggregeerd, d.w.z. in beide horizontale richtingen is het rekenrooster een factor twee grover gemaakt, zie Par. 3.1.1.

2.6 Resultaten

2.6.1 Waterstanden

Het effect van het grotere en zoutere spuidebiet bij Bath op de waterstanden in het estuarium is nihil. Figuur 2.9 geeft als voorbeeld de waterstanden langs de Zeeschelde in Liefkenshoek, Antwerpen, Schelle en Temse. De zwarte lijn voor de T0 (runid x05) valt geheel achter de lijn voor de T1 (runid y05).



Figuur 2.9: Waterstanden langs de Zeeschelde voor T0 en T1.

De veranderingen van de gemiddelde waterstanden zijn voor een aantal stations weergegeven in Tabel 2.3.

¹⁰ 'Offline' koppeling d.w.z. het slibtransportmodel is gebruikt na het waterbewegingsmodel.

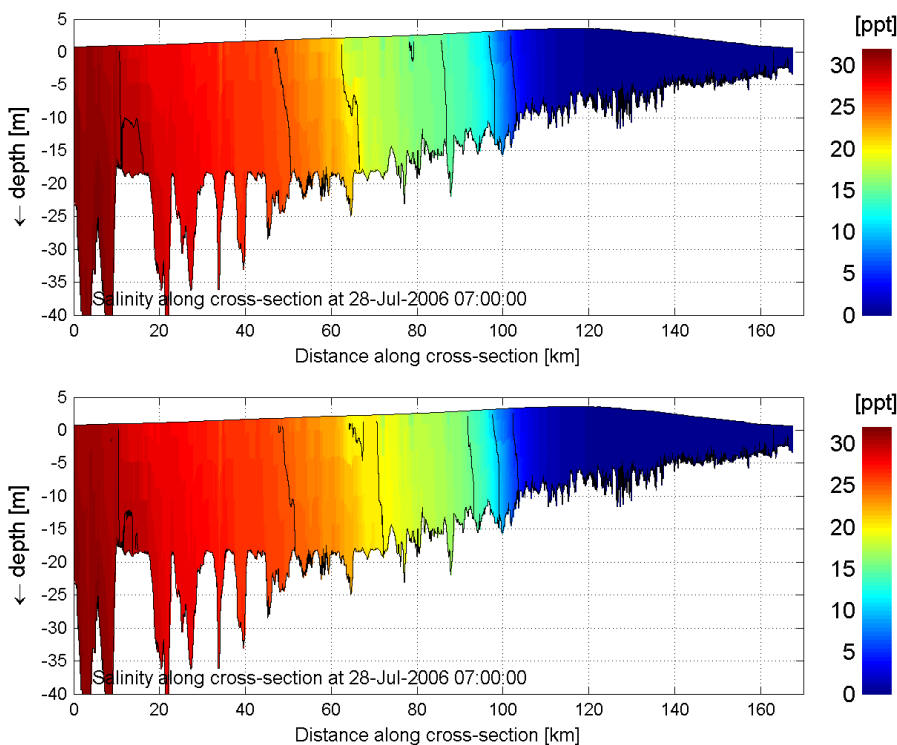
Tabel 2.3: Verandering gemiddelde waterstand (T1-T0).

Station	Waterstandsverandering [m]
Vlissingen	+0,001
Bath	-0,004
Schelle	+0,002
Melle	-0,001

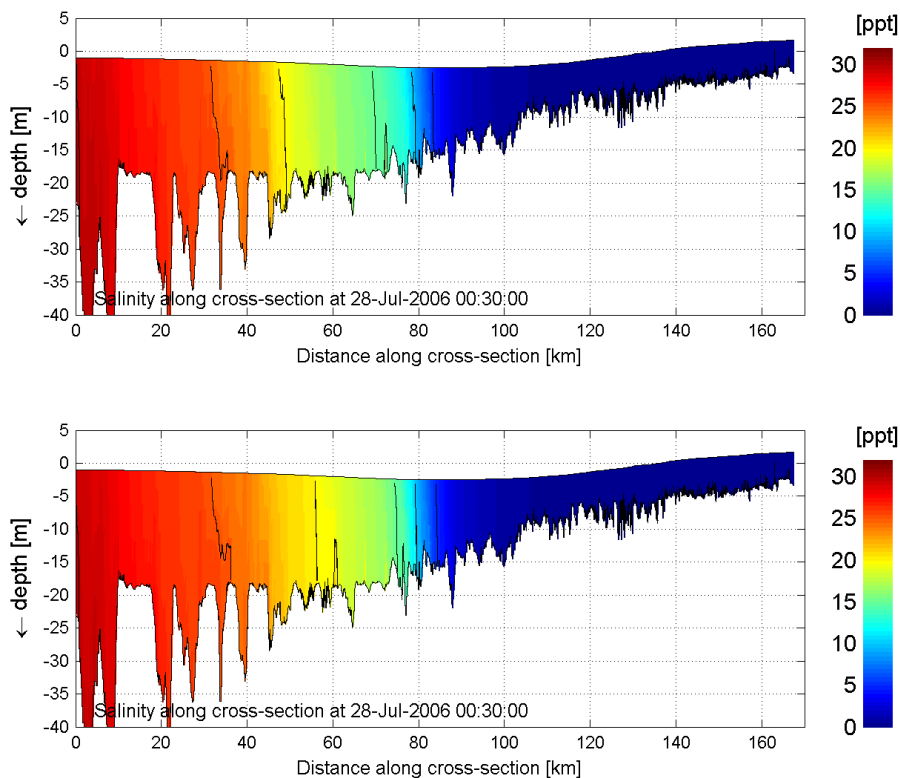
De verlaging van de gemiddelde waterstand bij Bath is vermoedelijk het gevolg van de toename van de saliniteit; bij een hogere zoutconcentratie en dus ook een grotere dichtheid in de T1-situatie is een kleinere waterdiepte nodig om tot dezelfde waterdruk te komen als in de T0.

2.6.2 Zoutverdeling

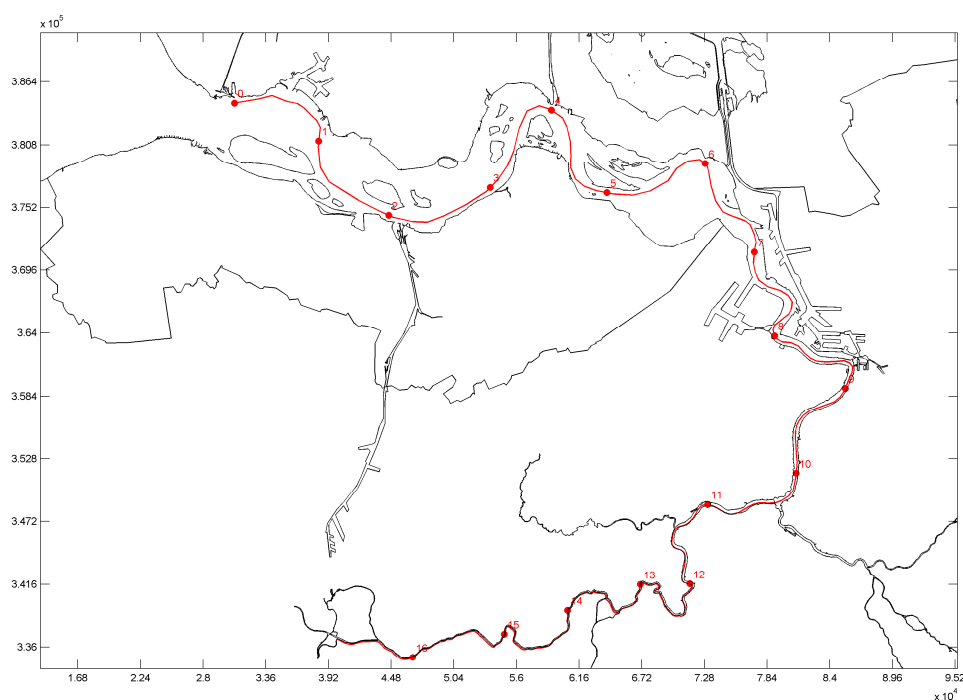
De verticale zoutverdeling (saliniteit) langs een lijn van Vlissingen tot Melle tijdens maximale zoutindringing gedurende het eerste getij van de eerste springtij-doodtij cyclus is voor T0 en T1 weergegeven in Figuur 2.10a. Figuur 2.10b geeft de verdeling tijdens minimale zoutindringing. De zwarte contourlijnen betreffen de saliniteiten van 5, 10, 15, 20, 25 en 30 PSU. De langsraai is weergegeven in Figuur 2.10c.



Figuur 2.10a: Saliniteit tijdens maximale zoutindringing gedurende het eerste getij van de eerste springtij-doodtij cyclus voor T0 (boven) en T1 (onder). Langsraai: zie Figuur 2.10c.



Figuur 2.10b: Saliniteit tijdens minimale zoutindringing gedurende het eerste getij van de eerste springtij-dootij cyclus voor T0 (boven) en T1 (onder). Langsraai: zie Figuur 2.10c.

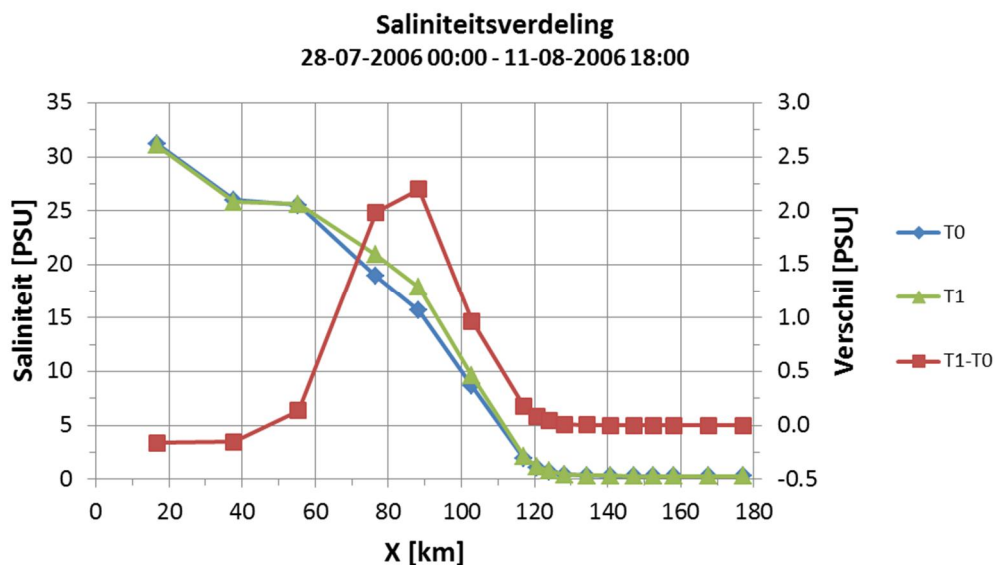


Figuur 2.10c: Langsraai voor contourfiguren 2.9a en 2.9b. Afstanden langs de raai zijn weergegeven per 10 km (rode bolletjes) vanaf Vlissingen.

De langsverdeling van de diepte-gemiddelde saliniteit en tijdsgemiddeld over de eerste springtij-doodtij cyclus is voor T0 en T1 weergegeven in Figuur 2.11a. Voor de tweede springtij-doodtij cyclus met de afnemende rivierafvoeren is de verdeling weergegeven in Figuur 2.11b. De verschillen tussen T0 en T1 (rode lijn) worden getoond t.o.v. de rechter verticale as. De stations met bijbehorende kilometerraaien zijn vermeld in Tabel 2.4¹¹.

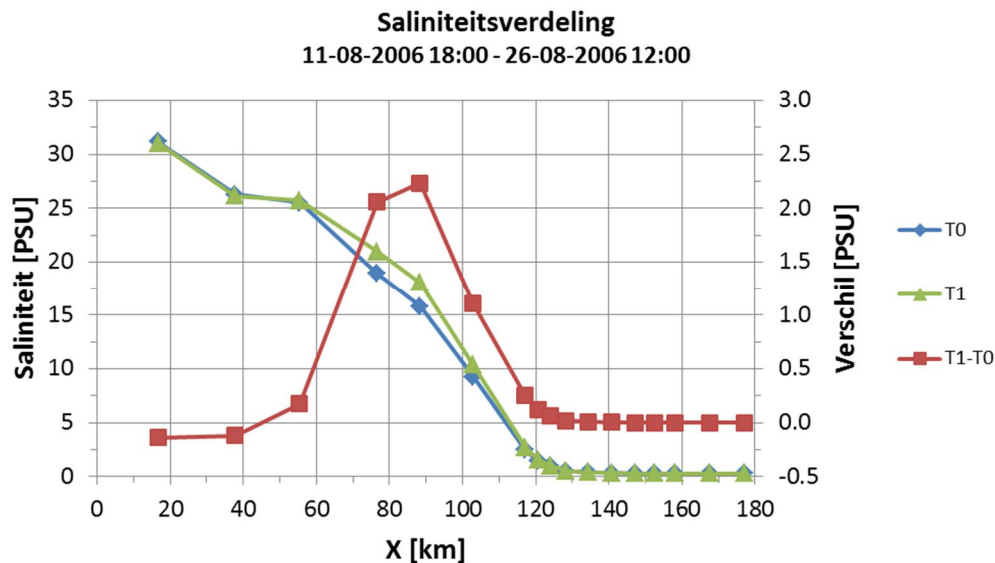
Tabel 2.4: Stations en afstand langs het estuarium.

Km.	Station	Km.	Station
17	Vlissingen	124	Temse
38	Terneuzen	129	ST
55	Hansweert	134	St. Amands
77	Bath	141	DS
88	Liefkenshoek	147	Dendermonde
103	Antwerpen	153	SD
117	Schelle	158	Schoonaarde
121	TS	177	Melle



Figuur 2.11a: Tijdsgemiddelde saliniteitsverdeling langs het estuarium voor de eerste springtij-doodtij cyclus. Afstanden zijn volgens Tabel 2.4.

¹¹ De stations TS (Temse→Schelle), ST (Sint-Amands→Temse), DS (Dendermonde→Sint-Amands) en SD (Schoonaarde→Dendermonde) zijn in deze studie toegevoegd.

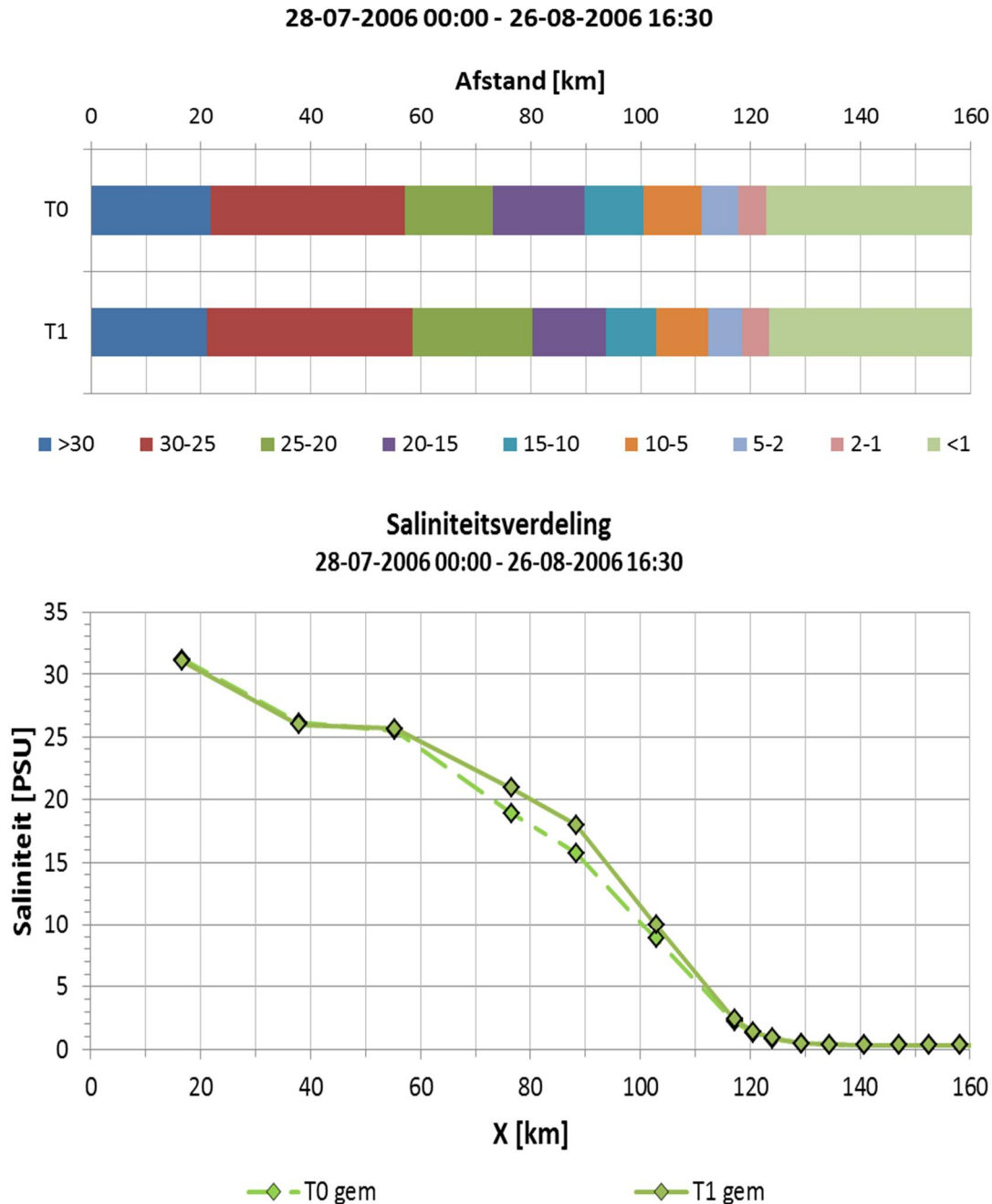


Figuur 2.11b: Tijdsgemiddelde saliniteitsverdeling langs het estuarium voor de tweede springtij-doodtij cyclus. Afstanden zijn volgens Tabel 2.4.

Het effect van de grotere en zoutere spui bij Bath (kmr. 77) is maximaal 2,2 PSU bij Liefkenshoek (kmr. 88) en vrijwel even groot voor beide perioden. Tijdens de T1-situatie is de longitudinale saliniteitsgradiënt tussen Hansweert (kmr. 55) en Liefkenshoek kleiner en tussen Liefkenshoek en Schelle (kmr. 117) groter dan tijdens de T0-situatie. Deze verandering in de zoutgradiënt zal via de dichtheid van invloed zijn op de stroomsnelheden.

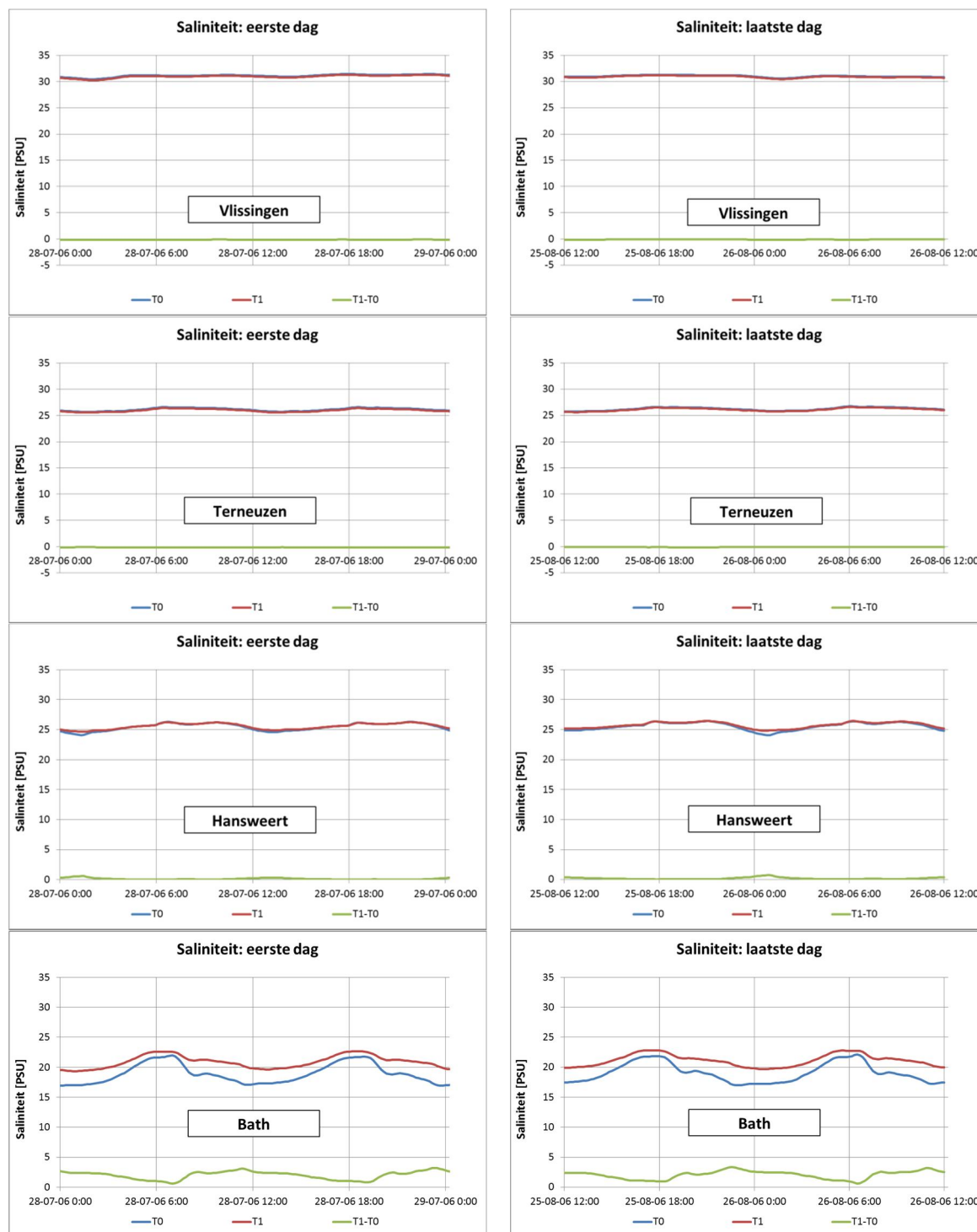
Saliniteitszones en bijbehorende tijdsgemiddelde saliniteitsverdeling zijn voor T0 en T1 weergegeven in Figuur 2.12. De saliniteitszones zijn bepaald voor de klassen > 30, 30-25, 25-20, 20-15, 15-10, 10-5, 5-2, 2-1 en < 1 PSU. De klassegrenzen zijn bepaald door lineaire interpolatie vanuit de saliniteitswaarden in de stations zoals vermeld in Tabel 2.4. Hierbij is gebruik gemaakt van de berekende tijdsgemiddelde saliniteiten voor de volledige analyseperiode, d.w.z. inclusief de eerste springtij-doodtij cyclus met een constante rivierafvoer en de tweede springtij-doodtij cyclus met een afnemende rivierafvoer. Figuur 2.12 laat zien dat vooral de zone met een saliniteit tussen 20 en 25 PSU groter wordt (de lozing in T1 is met een saliniteit van 24). De verschuivingen van de contourgrenzen van de saliniteitszones zijn:

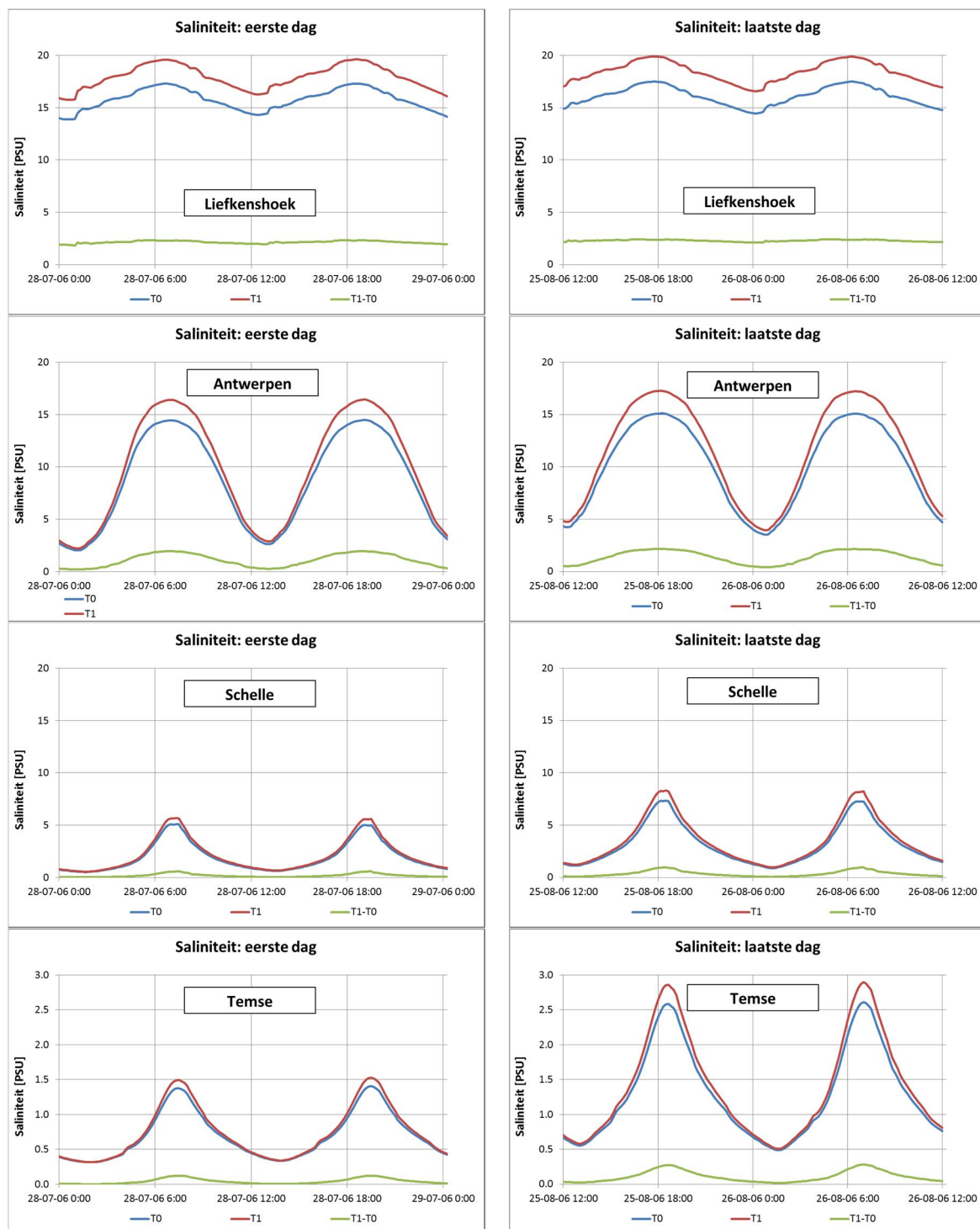
- 30 PSU: -0,6 km
- 25 PSU: +1,4 km
- 20 PSU: +7,2 km
- 15 PSU: +3,8 km
- 10 PSU: +2,4 km
- 5 PSU: +1,1 km
- 2 PSU: +0,7 km
- 1 PSU: +0,5 km.

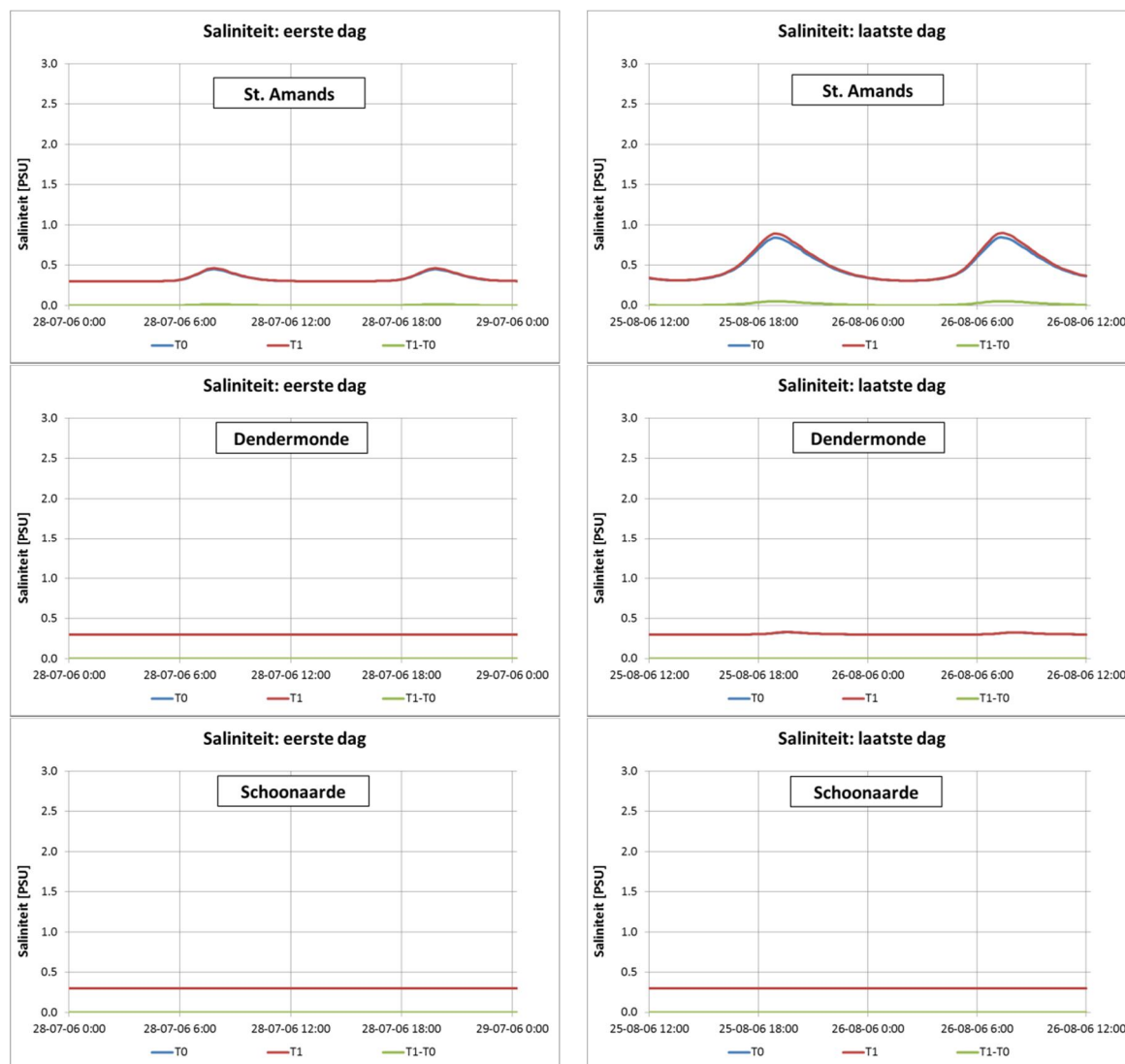


Figuur 2.12: Tijdsgemiddelde saliniteitszones (boven) en saliniteitsverdeling (onder) voor de analyseperiode. Afstanden zijn volgens Tabel 2.4.

Tijdseries voor de saliniteit in de boven- en onderlaag (resp. laag 1 en 6) gedurende de gehele maandsimulatie zijn voor een groot aantal stations opgenomen in Bijlage B. Voor Bath en stations langs de Zeeschelde is het saliniteitsverloop gedurende de eerste en laatste dag van de maandsimulatie weergegeven in Figuur 2.13.



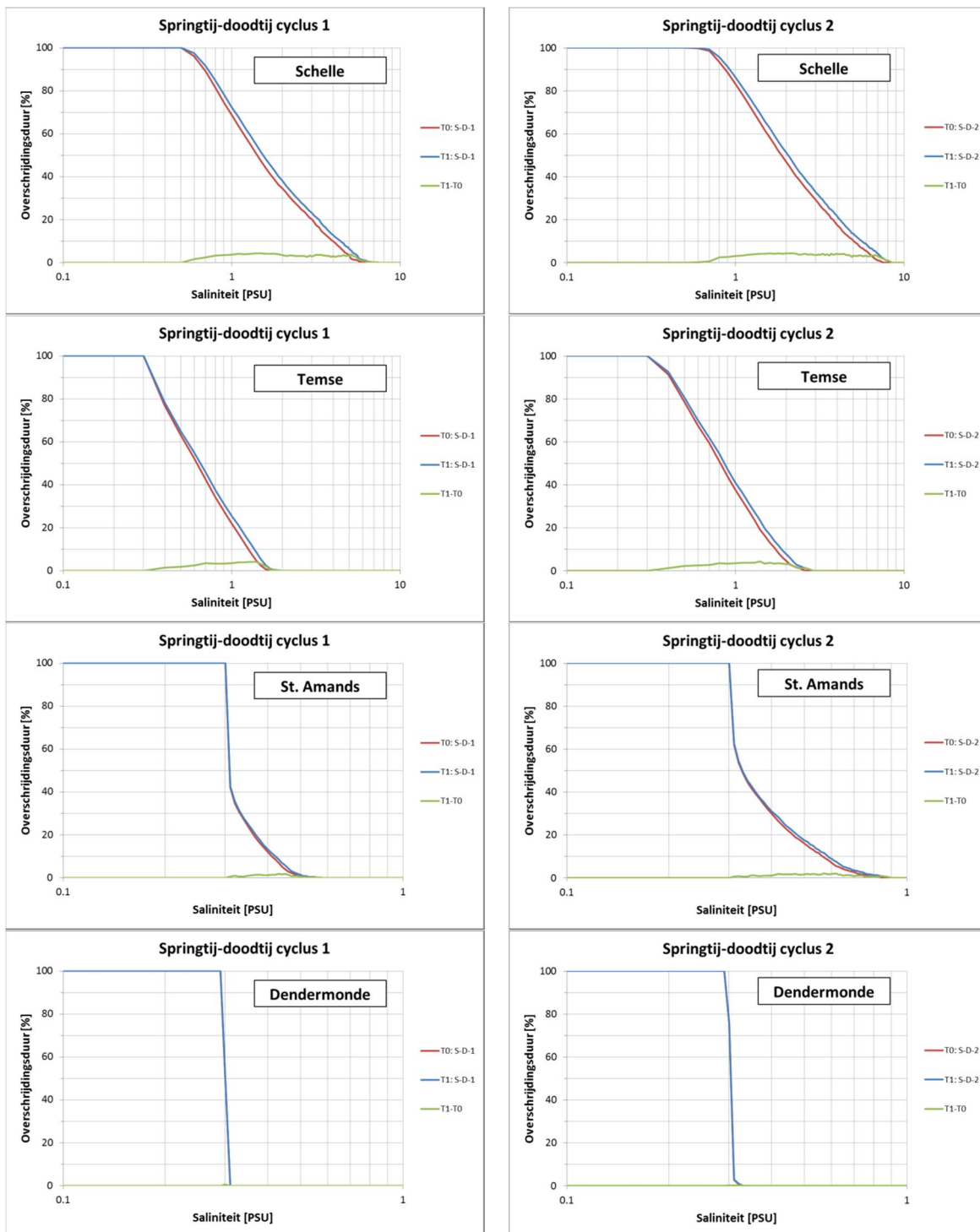




Figuur 2.13: Saliniteitsverloop langs het Schelde-estuarium voor T0 en T1 voor de eerste dag (links) en laatste dag (rechts) van de maandsimulatie. De verticale schaal verschilt voor Westerschelde, Beneden- en Boven-Zeeschelde.

Uit Figuur 2.13 volgt dat zowel de saliniteit als de absolute toename aan het eind van de simulatie, bij een lagere rivierafvoer, groter is dan aan het begin van de simulatie.

De overschrijdingsduren van opvolgende waarden van de saliniteit zijn voor de locaties langs de Boven-Zeeschelde weergegeven in Figuur 2.14, zowel voor de eerste als de tweede springtij-doodtij cyclus. De minimale en maximale opgetreden saliniteit worden respectievelijk 100% en 0% van de beschouwde tijdsperiode overschreden. Vanaf Temse is de minimale saliniteit gelijk aan de achtergrond waarde van 0,3 PSU.



Figuur 2.14: Overschrijdingsduren van saliniteit langs de Boven-Zeeschelde voor T0 en T1 voor de eerste springtij-doodtij cyclus (links) en tweede springtij-doodtij cyclus (rechts).

De saliniteit die in de T0 gedurende 50% van de tijdsduur wordt overschreden, wordt in de T1 langer overschreden, zie Tabel 2.5.

Tabel 2.5: Overschrijdingsduren voor T0 en T1.

Station	S-D 1				S-D 2			
	Sal. [PSU]	Overschrijdingsduur [%]			Sal. [PSU]	Overschrijdingsduur [%]		
	T0	T0	T1	T1-T0	T0	T0	T1	T1-T0
Schelle	1,42	50	54,3	+4,3	1,88	50	54,2	+4,2
Temse	0,62	50	52,7	+2,7	0,81	50	53,5	+3,5
Sint-Amands	0,31	50	50,6	+0,6	0,33	50	50,6	+0,6

De toenames in Tabel 3.5 betreffen absolute veranderingen (zgn. procentpunten) van overschrijdingsduren die zijn uitgedrukt als percentage van de beschouwde periode. In *relatieve* zin zijn de veranderingen verhoudingsgewijs klein bij lage saliniteiten en groot bij hoge saliniteiten. Bijvoorbeeld voor Schelle geldt:

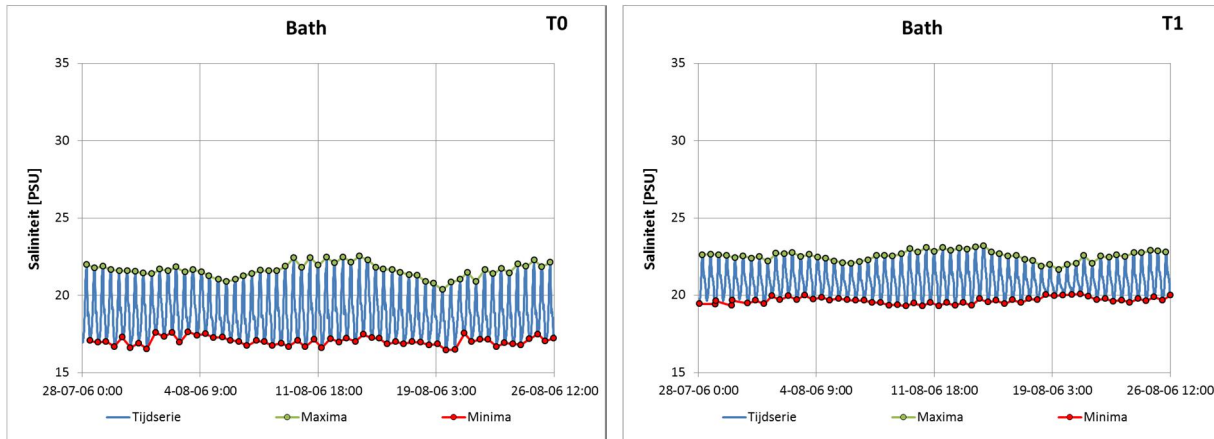
- De overschrijdingsduur van een saliniteit van 1 PSU neemt tijdens de eerste springtij-doodtij cyclus toe van 68,7% naar 72,5% ofwel een toename van 3,8%-punt. De relatieve toename is in dit geval $3,8/68,7 \times 100\% = 6\%$.
- De overschrijdingsduur van een saliniteit van 5 PSU neemt tijdens de eerste springtij-doodtij cyclus toe van 3,2% naar 6,3% ofwel een toename van 3,1%-punt. De relatieve toename is in dit geval $3,1/3,2 \times 100\% = 97\%$.
- Voor de tweede springtij-doodtij cyclus, d.i. bij lagere afvoeren, is de relatieve toename van de overschrijdingsduur van een saliniteit van 1 PSU 4% en van 5 PSU 33%. De absolute veranderingen van de overschrijdingsduren (procentpunten) zijn ongeveer gelijk aan die voor de eerste springtij-doodtij cyclus maar door de grotere zoutindringing zijn de relatieve veranderingen kleiner. Hierbij geldt wel, dat tijdens de tweede springtij-doodtij cyclus vermoedelijk nog geen dynamische evenwichtstoestand voor de zoutverdeling is bereikt.
- De veranderingen in mediane saliniteit gaan samen met een toename van de maximale en minimale saliniteit van resp. 13% en 4% in Schelle, 10% en 0,6% in Temse en 5% en 0% in St. Amands, waarbij de relatieve veranderingen tijdens de tweede springtij-doodtij cyclus iets groter zijn dan tijdens de eerste springtij-doodtij cyclus. De toename van de maximale saliniteit is groter dan de toename van de minimale saliniteit.

De absolute veranderingen in overschrijdingsduren zijn dus gelijk voor een groot bereik van de optredende saliniteiten (in Figuur 2.13 worden de "pulsen" breder). De relatieve veranderingen nemen toe met de saliniteit omdat de overschrijdingsduren dan afnemen.

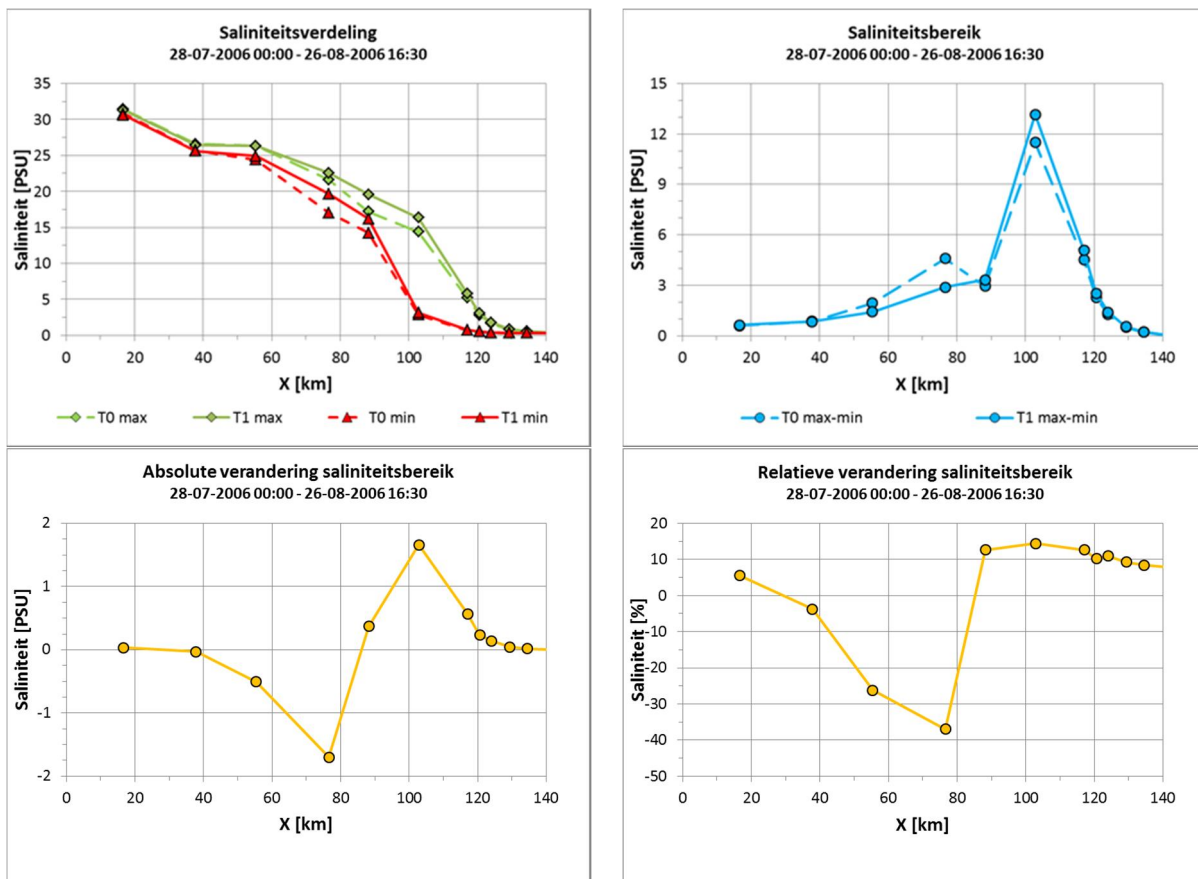
Bovengenoemde waarden voor de overschrijdingsduren van saliniteiten gelden voor de condities zoals die met het NEVLA-model zijn gesimuleerd. De afvoeren variëren van gemiddeld (50% onderschrijding) tot laag (10% onderschrijding). Indien ook de hogere afvoeren worden meegenomen, bijvoorbeeld als onderdeel van een jaarreeks, zullen er perioden voorkomen waarbij de zoutindringing niet reikt tot het beschouwde station. De veranderingen in de overschrijdingsduren (T1 minus T0) zijn dan nul zodat gemiddeld over het gehele jaar de veranderingen in overschrijdingsduren wat kleiner zullen zijn dan volgend uit de simulatie met de 50%- en 10%-rivierafvoeren. Een volledige jaarsimulatie met het driedimensionale NEVLA-model is momenteel niet praktisch uitvoerbaar gelet op de grote rekentijden.

Tenslotte wordt de variatie in saliniteit tijdens de getijperiode voor T0 en T1 met elkaar vergeleken. Deze variatie is van belang voor de ecologie ('zoutstress', zie Hoofdstuk 4) maar ook voor de uitwisseling van water tussen rivier en havendokken als gevolg van dichtheidsverschillen, zie Hoofdstuk 3. Voor de gehele analyseperiode is per station voor T0

en T1 de gemiddelde maximale en gemiddelde minimale saliniteit bepaald, zie bijv. Figuur 2.15 voor station Bath. De variatie in saliniteit en de absolute en relatieve veranderingen langs het estuarium zijn weergegeven in Figuur 2.16.



Figuur 2.15: Maximale en minimale saliniteiten in Bath voor T0 (links) en T1 (rechts).



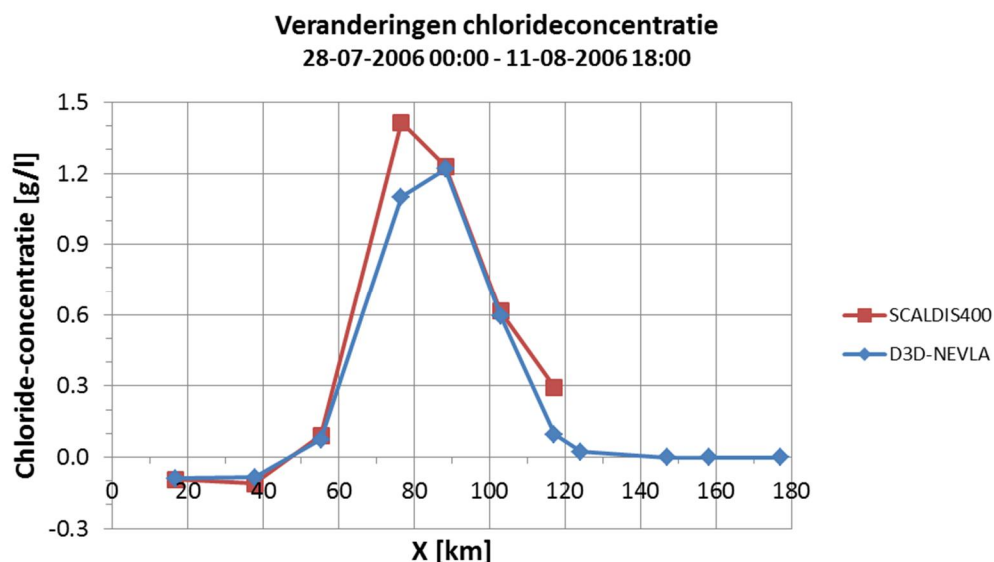
Figuur 2.16: Maximale en minimale saliniteit (linksboven), saliniteitsvariatie (rechtsboven; verschil tussen gemiddelde maximale en minimale saliniteit), absolute verandering (linksonder) en relatieve verandering (rechtsonder) van de saliniteitsvariatie. Afstanden zijn volgens Tabel 2.4.

In Bath en afwaarts hiervan is sprake van een afname van de saliniteitsvariatie; langs de Beneden- en Boven-Zeeschelde neemt de variatie toe.

2.6.3 Vergelijking NEVLA-model (3D) met SCALDIS400-model (2D)

De toename van de zoutconcentratie, zoals berekend met het driedimensionale NEVLA-model, wordt vergeleken met de toename welke door Rijkswaterstaat is berekend met het tweedimensionale (diepte-gemiddelde) Scaldis400 model (van Pagee et al., 2009). Omdat de resultaten van het Scaldis-model zijn gegeven in chloride-concentraties zijn de saliniteiten volgens het NEVLA-model gedeeld door 1,80 om (globaal) chloride-concentraties te verkrijgen. Figuur 2.17 toont voor beide modellen het tijdsgemiddelde chloride-concentratieverschil tussen de T0- en de T1-situatie. De Scaldis-resultaten reiken tot Schelle, zijnde de bovenrand van het SCALDIS400-model. De resultaten van het NEVLA-model hebben betrekking op de eerste springtij-doottij cyclus met constante rivieraftoeren. De afvoercondities voor beide modellen zijn vergelijkbaar: SCALDIS400 gemiddeld 62 m³/s en NEVLA 50 m³/s.

De resultaten van beide modellen komen goed overeen. Voor de chloride-concentraties is dit niet onverwacht, omdat het Schelde-estuarium goed gemengd is en een gekalibreerd diepte-gemiddeld model ook tot goede resultaten moet kunnen komen. Met het NEVLA-model kunnen echter ook resultaten worden gegeven voor de Boven-Zeeschelde. Verder is het voor slibs simulaties noodzakelijk een driedimensionaal model te gebruiken omdat slibconcentratieprofielen niet uniform over de waterdiepte zijn zodat ook rekening moet worden gehouden met de verandering van de stroomsnelheid met de diepte.

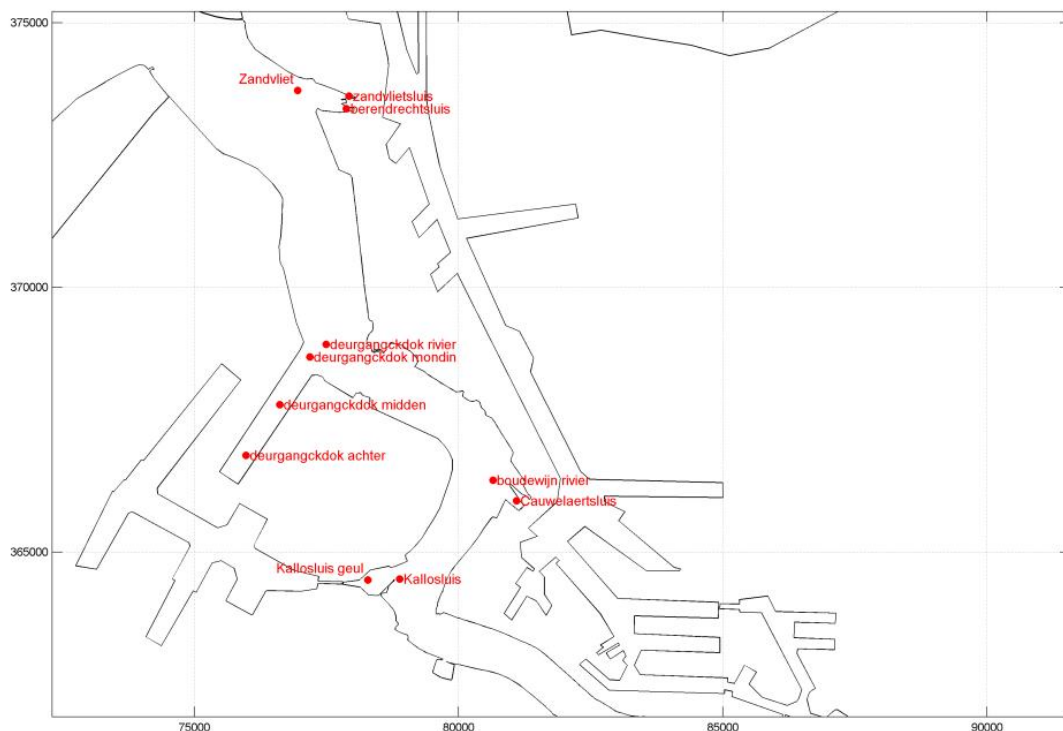


Figuur 2.17: Veranderingen in chloride-concentratie (T1-T0) volgens Scaldis400 (jaar 1990) en NEVLA. Afstanden zijn volgens Tabel 2.4.

3 Effecten op de slibhuishouding

3.1 Aanslibbing in de toegangsgeulen naar de schutsluizen en in het Deurganckdok.

Langs de Beneden-Zeeschelde bevinden zich diverse schutsluizen die de scheepvaart toegang geven tot de Antwerpse havendokken. De kunstwerken zijn door toegangsgeulen met de rivier verbonden. De belangrijkste complexen zijn (gaande vanaf de Belgisch-Nederlandse grens opwaarts): de naast elkaar gelegen Zandvlietsluis en Berendrechtlsuis (rechteroever), de naast elkaar gelegen Boudewijnsluis en Van Cauwelaertsluis (rechteroever), de Kalloisluis (linkeroever), de Royerssluis en de Kattendijksluis (beiden rechteroever). Verder ligt langs de linkeroever van de Beneden-Zeeschelde het Deurganckdok dat in open verbinding staat met de rivier. Figuur 3.1 geeft een overzicht van een aantal uitvoerlocaties in het gebied. In dit hoofdstuk is de aandacht gericht op de veranderingen van de suspensieconcentraties van slib en de netto aanslibbing in het Deurganckdok en de toegangsgeulen naar de Zandvliet-, Berendrecht- en Kalloisluis.



Figuur 3.1: Uitvoerlocaties van het NEVLA-model in het Antwerps havengebied.

3.1.1 Modelbeschrijving

Voor de analyse van de effecten van het veranderde spuiregime zijn twee berekeningen uitgevoerd met het LTV-slibmodel op basis van de twee hydrodynamische berekeningen met het huidige en nieuwe spui-beheer bij Bath. Met uitzondering van de verandering van het spui-beheer zijn deze berekeningen identiek.

Het LTV-slibmodel is ontwikkeld in het kader van het project LangeTermijnVisie voor het Schelde-estuarium, een gemeenschappelijk Nederlands-Vlaams project. Het model is ontwikkeld door Deltares in samenwerking met het WL te Antwerpen. Het is gebaseerd op hetzelfde rooster en dezelfde bodem als het 3D NEVLA hydrodynamische model, maar in de horizontaal is een roosteraggregatie toegepast van 2×2 om meerjarige simulaties mogelijk te maken binnen korte tijd. Het model is ontwikkeld om de grootschalige slibdynamiek in de Schelde te berekenen en het effect van menselijke ingrepen en autonome ontwikkelingen hierop (onder meer het effect van havenaanslibbing, specieverspreiding, uitbreiding van havens, vaargeulverdieping en veranderingen in de zoetwaterafvoer).

Dergelijke ingrepen kunnen niet alleen een direct effect hebben op de slibdynamiek (bijvoorbeeld meer resuspensie door toegenomen stroomsnelheid), maar ook een indirect effect hebben door een aanpassing van de bodemsamenstelling, die geleidelijk slibrijker of – armer kan worden. Door de veel grotere hoeveelheid slib in de bodem ten opzichte van de hoeveelheid slib in de waterkolom, kan deze aanpassingstijd maanden tot jaren duren. Dit verklaart het belang dat het slibmodel op lange termijn efficiënt kan rekenen. Uitgegaan is van een ingespeelde situatie qua slibverdeling voor 2006 die is ontleend aan een eerder onderzoek voor het Schelde-estuarium (Van Kessel et al., 2011). De huidige resultaten zijn verkregen door vervolgens twee maanden door te rekenen. Het berekende effect aan het einde van de tweede maand is bijna gelijk aan het effect aan het einde van de eerste maand. Na twee maanden is het effect van het nieuwe spuibeheer van Bath blijkbaar voldoende ingespeeld.

De opzet, kalibratie en validatie van het LTV-slibmodel is in een aantal via internet vrij toegankelijke rapporten uitgebreid beschreven (www.scheldemonitor.be), zie bijvoorbeeld Van Kessel et al. (2011). Ook zijn resultaten in enkele tijdschriftartikelen gepubliceerd (Van Kessel et al., 2010, Van der Wal et al., 2010).

3.1.2 Resultaten

Hierna worden acht figuren gepresenteerd van berekeningen met het huidige (T0) en nieuwe (T1) spuibeheer. Figuren 3.2 t/m 3.5 tonen de berekende tijdgemiddelde slibconcentratie (in mg/l) aan de oppervlakte en aan de bodem voor beide spuiregimes. De concentraties zijn gemiddeld over één maand (beide springtij-doodtij cycli). Hieruit is evident dat de slibconcentratie sterk toeneemt vanaf de Westerschelde in de richting van Antwerpen, waar zich het troebelingsmaximum bevindt. Ook is het evident dat de slibconcentratie aan de bodem aanmerkelijk hoger is dan aan de oppervlakte. Beide waarnemingen zijn niet nieuw of verrassend, dit zijn bekende kenmerken van de waargenomen slibdynamiek in de Schelde die het slibmodel kan reproduceren. Op het eerste oog heeft een verandering van het spuibeheer bij Bath niet of nauwelijks invloed op de slibdynamiek: Figuur 3.2 en 3.3 zijn bijna identiek, evenals Figuur 3.4 en 3.5.

Om het kleine verschil tussen beide berekeningen beter zichtbaar te maken, wordt ook het absolute $(T1-T0)$ en relatieve $2(T1-T0)/(T1+T0)$ verschil tussen beide berekeningen getoond. Figuur 3.6 is dus niets anders dan het verschil tussen Figuur 3.3 en 3.2 en Figuur 3.7 het verschil tussen Figuur 3.5 en 3.4. Tenslotte zijn in de Figuren 3.8 en 3.9 de concentratieverschillen genormaliseerd met het gemiddelde van de absolute concentraties. Uit Figuur 3.6 blijkt dat het nieuwe spuiregime resulteert in een lichte toename van de slibconcentratie bij de oppervlakte ten westen van Bath en een lichte afname ten zuiden van Bath. Bijna overal blijft de concentratieverandering beperkt tot minder dan 5 mg/l. Aan de bodem wijkt dit effect af (Figuur 3.7): in de buurt van Bath neemt de concentratie sterker af

(lokaal met meer dan 10 mg/l), maar ten westen van Saeftinghe en ten zuiden van Deurganckdok neemt de concentratie juist toe. De toename is vrijwel overal minder dan 5 mg/l (lokaal maximaal 25 mg/l maar daar zijn al van nature de concentraties relatief hoog, zie hierna). De toename ten zuiden van Deurganckdok is waarschijnlijk te verklaren door de toegenomen zoutindringing en het daaraan gerelateerde troebelingsmaximum.

Vanwege de van nature sterk toenemende slibconcentratie in bovenstroomse richting geven de figuren met het absolute concentratieverschil geen goed beeld van de relatieve concentratieverandering. Een concentratieverandering van 5 mg/l bij Hansweert is in relatieve zin immers veel groter dan een concentratieverandering van 5 mg/l bij Antwerpen. Figuren 3.8 en 3.9 bevestigen dit beeld: terwijl het absolute effect van het gewijzigde spuibeheer zich ongeveer even sterk manifesteert in boven- en benedenstroomse richting, manifesteert het relatieve effect zich vooral aan de Nederlandse zijde en veel minder aan Vlaamse zijde. Tussen Hansweert en Saeftinghe neemt de oppervlakte-concentratie lokaal toe met 15%. Bij Bath neemt de bodem-concentratie lokaal af met 20%. In Vlaanderen blijven relatieve concentratieveranderingen bijna overal beperkt tot minder dan 5% (uitgezonderd het Deurganckdok).

Het LTV-slibmodel berekent niet alleen de slibconcentratie in de waterkolom, maar ook de afzetting van slib op de bodem. Slib dat zich in havens en toegangsgeulen afzet wordt op periodieke basis verwijderd en weer teruggestort op loswallen. Deze hoeveelheden worden door het model bijgehouden en opgeslagen. Tabel 3.1 toont het effect van het nieuwe spuibeheer op de aanslibbing in de toegangsgeul van Zandvliet/Berendrecht, het Deurganckdok en de toegangsgeul van Kallo.

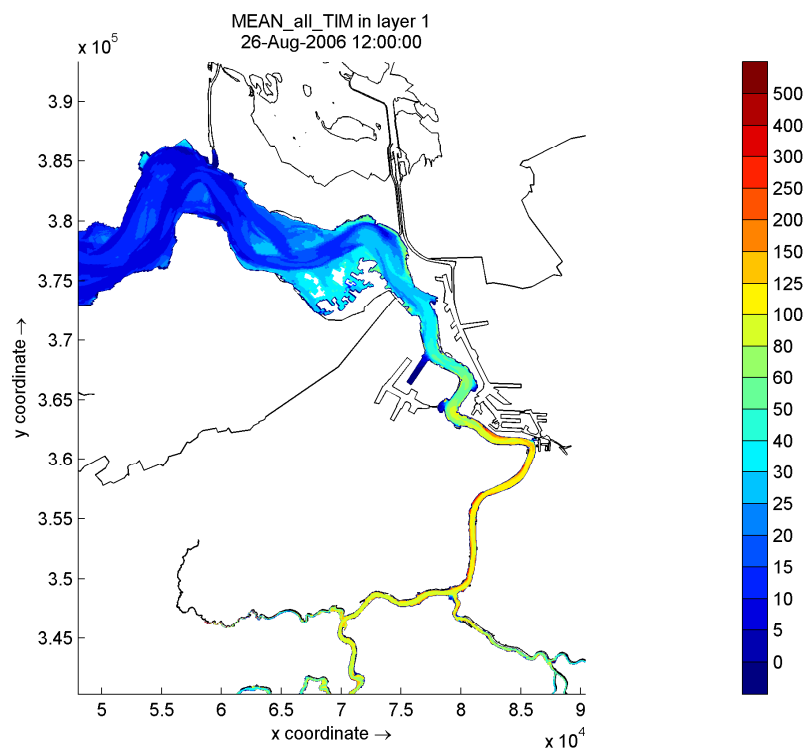
Tabel 3.1: Relatieve verandering [%] van de aanslibbing in toegangsgeulen en havens.

Locatie	Verandering in aanslibbing
Zandvliet / Berendrecht	+3,5%
Deurganckdok	+8%
Kallo	-1,5%

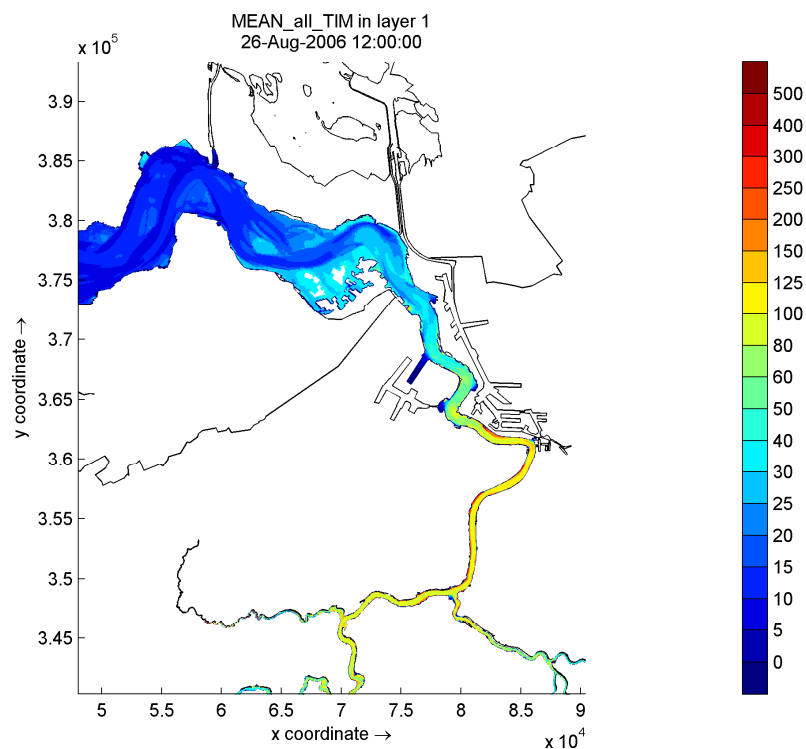
Uit de tabel blijkt dat het effect bij Zandvliet/Berendrecht en Kallo beperkt is, maar dat de aanslibbing in Deurganckdok toeneemt met 8%. Dit is in eerste instantie het gevolg van een toename van de wateruitwisseling tussen de Beneden-Zeeschelde en het dok. Het verschil tussen de saliniteit in de ingang in het dok en achterin het dok is in de T1-situatie gemiddeld 12% groter dan in de T0. Omdat de grootte van de dichtheidsstroming evenredig is met de wortel van het dichtheidsverschil (zie Par. 3.2) zal het uitwisselingsvolume door de dichtheidsstroming in de T1 6% groter zijn. Een toename van ongeveer deze grootte volgt ook direct uit de berekende veranderingen van de stroomsnelheden halverwege het Deurganckdok: aan het oppervlak en bij de bodem een toename van resp. 7 en 11% voor T1 t.o.v. T0. Samen met een slibconcentratie die, gemiddeld over de diepte en in de tijd, met ongeveer 3% groter wordt, resulteert dit in de berekende toename van de netto sedimentatie in het Deurganckdok.

Het slibmodel is niet alleen gekalibreerd op basis van de slibconcentratie in de waterkolom, maar ook op basis van waargenomen aanslibbingssnelheden in havenbekkens. Typisch ligt de berekende aanslibbingssnelheid binnen een factor twee van de waargenomen aanslibbingssnelheid. Voor Deurganckdok berekent het model een aanslibbing van enkele MT per jaar, wat iets lager dan de waargenomen aanslibbing. Met een hogere resolutie neemt de absolute aanslibbing weliswaar toe, maar de relatieve verandering ten gevolge van een veranderd spuibeheer is hiervoor veel minder gevoelig. De berekende relatieve toename

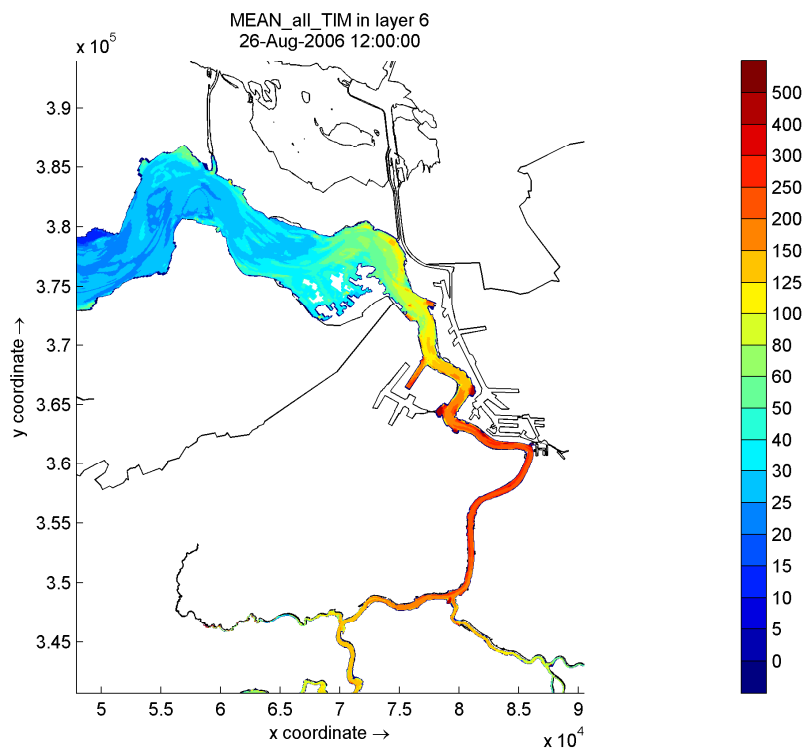
van 8% in het Deurganckdok is daarom te beschouwen als een significant effect. De grootste onzekerheid hier heeft betrekking op de specifieke condities (relatief lage rivierafvoeren gedurende meerdere maanden) waarvoor de verandering van de netto aanslibbing is bepaald. Onder dynamische condities met afwisselend hoge en lage afvoeren kan de verandering van de netto aanslibbing anders zijn dan hierboven is aangegeven.



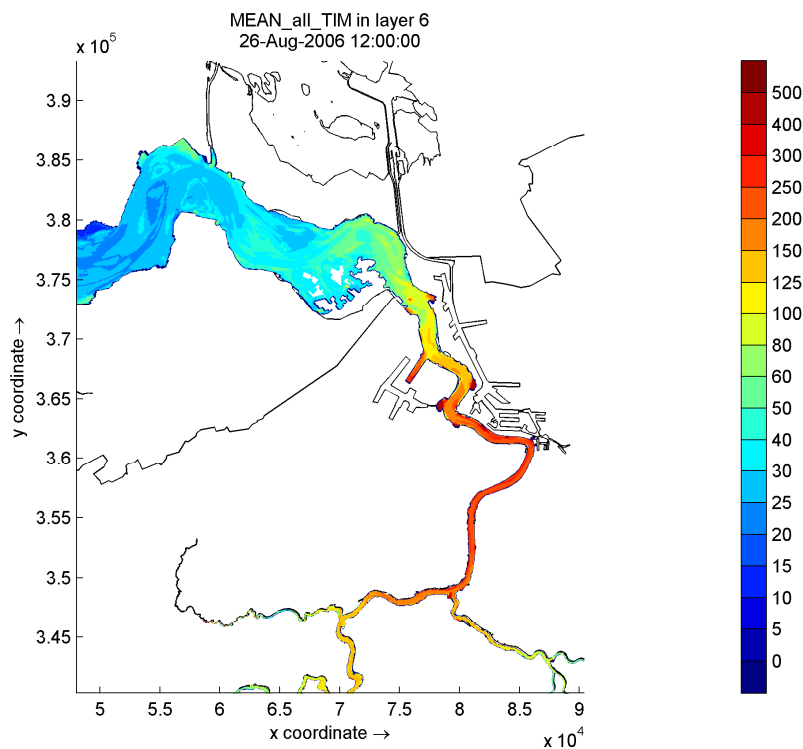
Figuur 3.2: Berekende tijdgemiddelde slibconcentratie (mg/l) aan de oppervlakte T0 (huidig).



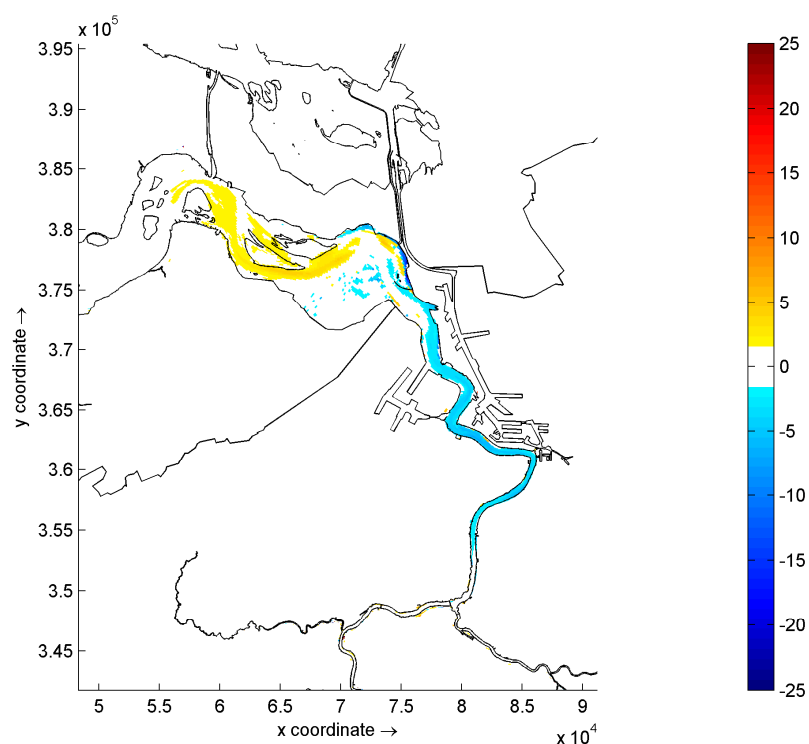
Figuur 3.3: Berekende tijdgemiddelde slibconcentratie (mg/l) aan de oppervlakte T1 (nieuw).



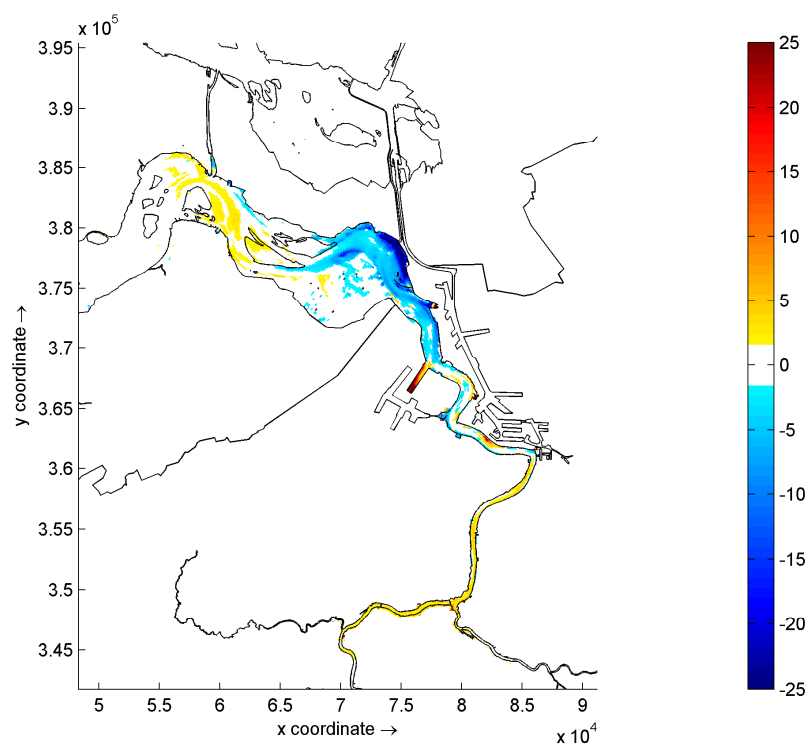
Figuur 3.4: Berekende tijdgemiddelde slibconcentratie (mg/l) aan de bodem. T0 (huidig).



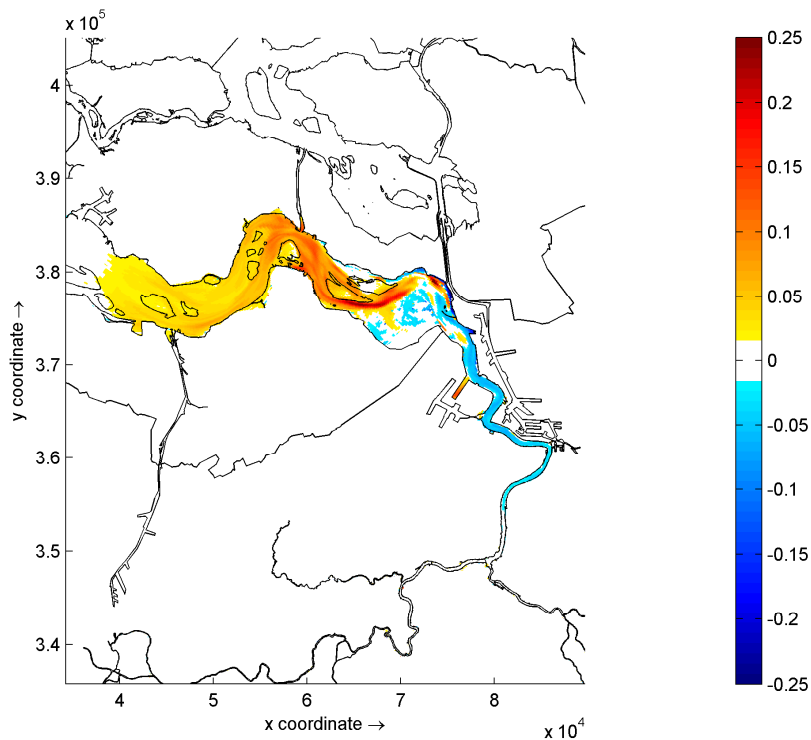
Figuur 3.5: Berekende tijdgemiddelde slibconcentratie (mg/l) aan de bodem. T1 (nieuw).



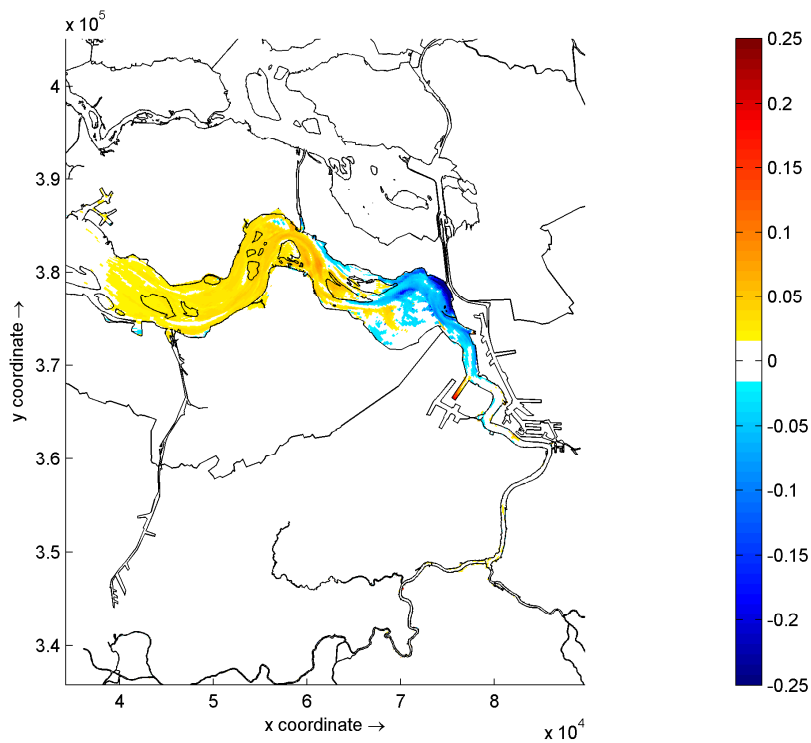
Figuur 3.6: Absoluut verschil (mg/l) in tijdgemiddelde slibconcentratie aan de oppervlakte. T1-T0.



Figuur 3.7: Absoluut verschil (mg/l) in tijdgemiddelde slibconcentratie aan de bodem. T1-T0.



Figuur 3.8: Relatief verschil (-) in tijdgemiddelde slibconcentratie aan de oppervlakte. $2(T1-T0)/(T1+T0)$.



Figuur 3.9: Relatief verschil (-) in tijdgemiddelde slibconcentratie aan de bodem. $2(T1-T0)/(T1+T0)$.

3.2 Verandering slibtransport via Zandvliet-, Berendrecht- en Kallosluis

3.2.1 Beschrijving situatie

Tussen de Beneden-Zeeschelde en de havendokken *langs de rechteroever* wordt water uitgewisseld als gevolg van (i) het schutten van schepen en (ii) de toe- en afvoer van water via de sluisriolen ten behoeve van het peilbeheer van het Antwerps Kanaalpand. Bij een verandering van de slibconcentratie op de Beneden-Zeeschelde ten gevolge van de gewijzigde spui bij Bath zal dus ook het slibtransport naar de havendokken kunnen veranderen. Verder is de zoutconcentratie op de rivier van invloed op het dichtheidsverschil tussen rivier en havendok en daarmee op de uitwisseling van water per schutting ten gevolge van dichtheidsstromingen. Hierbij moet ook rekening worden gehouden met een verandering van de zoutconcentratie in het Antwerps Kanaalpand die het gevolg is van (i) een toestroom van zouter water vanuit een toekomstig verzilt Volkerak-Zoommeer via de Kreekraksluizen en (ii) de inname van zouter water vanuit de Beneden-Zeeschelde via de schutsluizen en de riolen.

Het havendok achter de Kallosluis is momenteel alleen via deze sluis met de rivier verbonden¹². Achter de sluis, in het dok, wordt zoet water geloosd afkomstig uit de polders¹³. Ook voor dit havendok geldt dat de zout- en slibconcentratie in de toegangsgeul naar het dok van invloed is op de grootte van de wateruitwisseling tussen rivier en dok en de slibflux naar het bekken. Als het effect van de zoetwaterlozing in het dok wordt verwaarloosd zal de tijdsgemiddelde zoutconcentratie in het dok zich zo instellen dat deze gelijk is aan de gemiddelde concentratie op de Schelde ter plaatse van de toegang tot het havendok. Hierop wordt terug gekomen Par. 3.2.2. Bij veranderende omstandigheden vindt deze aanpassing vertraagd plaats tot weer sprake is van een evenwicht. In werkelijkheid veranderen de omstandigheden voortdurend (springtij-doodtij, afvoer variaties en meteo effecten) waardoor nooit een evenwicht zal worden bereikt.

3.2.2 Wateruitwisseling tussen rivier en havendokken

De uitwisseling van water tussen de rivier en een havendok verloopt in twee stappen: (i) de uitwisseling tussen de rivier en de toegangsgeul naar de schutsluis en (ii) de uitwisseling tussen toegangsgeul en havendok via de schutsluis. De wateruitwisseling tussen een getijrivier en een kombergingsgebied, bijvoorbeeld een haven of zoals in dit geval een toegangsgeul, wordt bepaald door de volgende mechanismen: (i) de vulling en lediging door het getij, (ii) een neer in de overgang van rivier naar kombergingsgebied ten gevolge van snelheidsverschillen en (iii) zout-zoet gedreven dichtheidsstromingen. De uitwisseling door dichtheidseffecten is in een getijstelsysteem vaak dominant omdat deze betrekking heeft op de volledige waterdiepte terwijl de komvulling- en lediging alleen het watervolume betreft tussen hoog- en laagwater. Het effect van een neer op de wateruitwisseling is dikwijls ondergeschikt aan de beide andere mechanismen. De uitwisseling in de schutkolk van een sluis verloopt via een dichtheidsgedreven stroming welke wordt bepaald door de dichtheden van het water aan weerszijden van de sluis. In de hierna volgende analyse wordt eerst uitgegaan van tijdsgemiddelde condities als benadering van de dynamische omstandigheden zoals bepaald door de saliniteitsvariatie ten gevolge van het getij in de rivier. Deze benadering is conform de aanpak van Winterwerp (1997) zoals gevolgd voor de Zandvliet- en Berendrecht-luis bij de bepaling van het slibtransport door deze sluizen naar het Antwerps

¹² Dit is een tijdelijke situatie; een tweede sluis achterin het dok is in aanbouw (pers. comm. WL Antwerpen).

¹³ De grootte van deze lozing is niet bekend. Bij de modelsimulaties is deze lozing niet meegenomen.

Kanaalpand. Vervolgens wordt de mogelijke invloed van een verandering van de saliniteitsvariatie (verschil tussen maximale en minimale saliniteit tijdens een getijperiode) nagegaan.

3.2.2.1 Zandvliet- en Berendrechtshuis

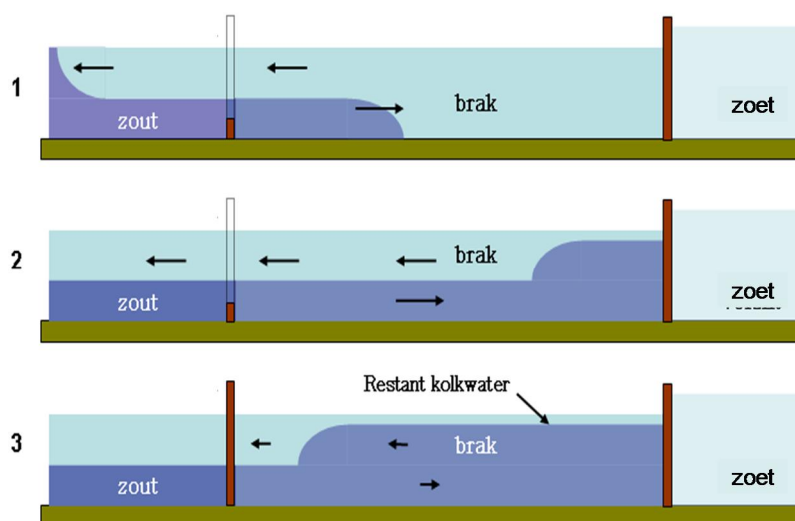
Het schutten kan in principe op elk moment van het getij plaatsvinden, d.w.z. van laagwater tot hoogwater. Voor het traject Bath-Liefkenshoek is dit tussen NAP-2,2 m en NAP+2,9 m (Tabel 3.2) al zal de waterstand in de schutkolk tijdens het naar binnen schutten niet hoger zijn dan de waterstand in het Antwerps Kanaalpand (gemiddeld NAP+1,85 m).

Tabel 3.2: Gemiddeld hoog- en laagwater en getijslag nabij de sluiscomplexen. Gegevens 2010.

	GHW [m NAP]	GLW [m NAP]	Getijslag [m]	Halftij [m NAP]
Bath	2,7	-2,2	4,9	0,3
Liefkenshoek	2,9	-2,3	5,2	0,3
Antwerpen	3,0	-2,3	5,3	0,3

Zoals eerder gesteld is de uitwisseling van water tussen rivier en schutkolk ten gevolge van dichtheidsstromingen efficiënter dan die ten gevolge van het getij. Verder geldt dat de waterstanden in de nieuwe situatie (T1) gelijk zijn aan die in de oorspronkelijke situatie (T0), zodat de uitwisseling door het getij niet zal veranderen. De aandacht zal zich daarom richten op de effecten die het gevolg zijn van veranderingen in de zoutconcentraties.

Tijdens een schutting van het Kanaalpand in de richting van de Beneden-Zeeschelde bevat de schutkolk initieel water met een zoutgehalte gelijk aan dat van het Kanaalpand. De grootte van het dichtheidsverschil tussen het water van de Schelde en dat in de schutkolk en de tijd dat de buitendeuren open staan bepalen samen het uitwisselingsvolume, zie Figuur 3.10 voor een schematische weergave.



Figuur 3.10: Schematische weergave dichtheidsstroming in een schutkolk. Het zoute compartiment betreft de Beneden-Zeeschelde; het 'zoete' compartiment het Antwerps Kanaalpand. 1. Instroming zoute onderlaag en uitstroming zoete bovenlaag na openen buitendeuren. 2. Reflectie van de dichtheidsstroming tegen de binnendeuren. 3. Verder vullen

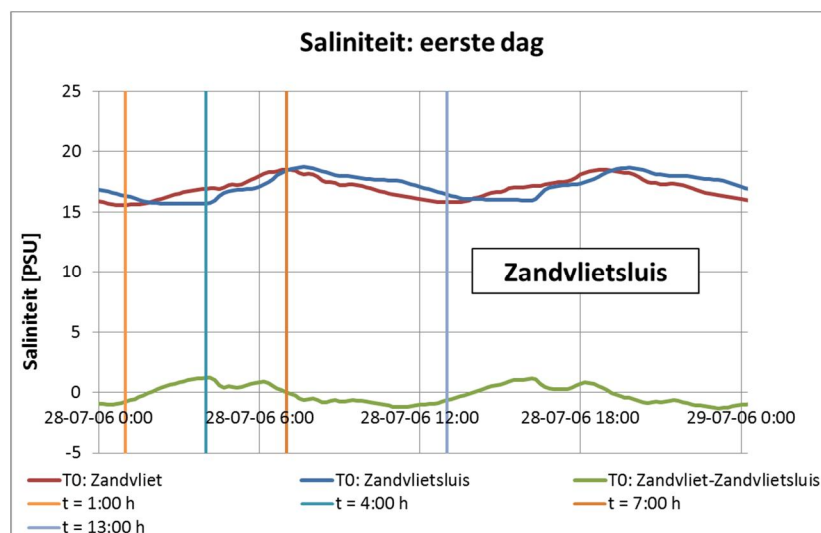
van de schutkolk tot moment van sluiten van de buitendeuren, zoals aangegeven met de linker bruine staaf.

De stroomsnelheid u van de dichtheidsstroming wordt gegeven door (zie bv. Huppert en Simpson, 1980):

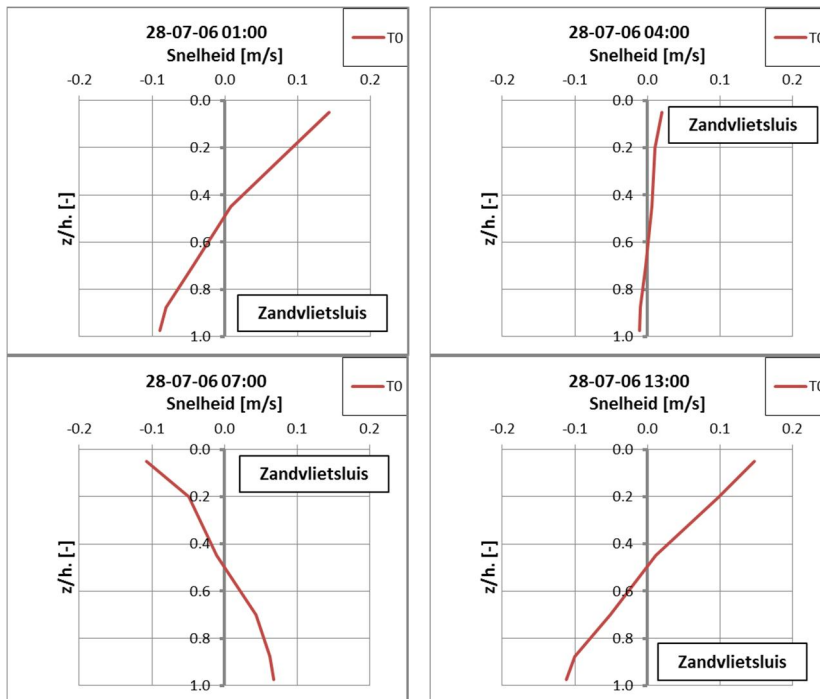
$$u = 0,5 \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} gh} \quad (3.1)$$

met $\Delta\rho$ [kg/m³] het dichtheidsverschil tussen Schelde en schutkolk, ρ de referentiedichtheid van het water [~ 1000 kg/m³], h de waterdiepte [m] en g de gravitatieversnelling [m/s²].

Omdat het Antwerps Kanaalpand en de schutsluizen geen deel uitmaken van de schematisatie van het NEVLA-model volgt het uitwisselingsvolume niet direct uit de resultaten van de simulaties. Wel kan het mechanisme van de uitwisseling ten gevolge van het saliniteitsverschil tussen rivier en toegangsgeul met het model worden geïllustreerd. Figuur 3.11a toont voor de T0-situatie het saliniteitsverloop gedurende de eerste dag van de maandsimulatie in de stations Zandvliet en Zandvlietluis, resp. in de ingang van de toegangsgeul en achterin bij de schutsluis (zie Figuur 3.1 voor de locaties). Gedurende de getijperiode is er vrijwel voortdurend sprake van een saliniteitsverschil tussen beide stations waarbij afwisselend de saliniteit achterin groter en kleiner is dan de saliniteit in de ingang. De snelheidsprofielen op een viertal karakteristieke momenten zijn in Figuur 3.11b weergegeven. Op tijdstip $t = 1:00$ h is de saliniteit achterin de toegangsgeul bij de schutsluis (Zandvlietluis) groter dan die in de ingang (Zandvliet), zoals dat ook in de uren hieraan voorafgaand het geval was. Op dat moment vindt de stroming in de onderste helft van de waterlaag in de richting van de rivier plaats en bovenin in de richting van de sluis. Op tijdstip $t = 4:00$ uur is de saliniteit in de ingang groter geworden dan die bij de sluis waardoor de dichtheidsstroming kentert. Na enkele uren, op $t = 7:00$ uur, heeft de stroming zich zo ontwikkeld dat bij de bodem sprake is van een stroomsnelheid in de richting van de sluis en aan het oppervlak in de richting van de rivier. Tijdens de opvolgende periode is de saliniteit bij de sluis weer groter dan in de ingang en wordt op $t = 13:00$ uur weer de situatie verkregen van 12 uur eerder ($t = 01:00$ uur). Dichtheidseffecten spelen dus bij de uitwisseling tussen rivier en toegangsgeul een dominante rol.

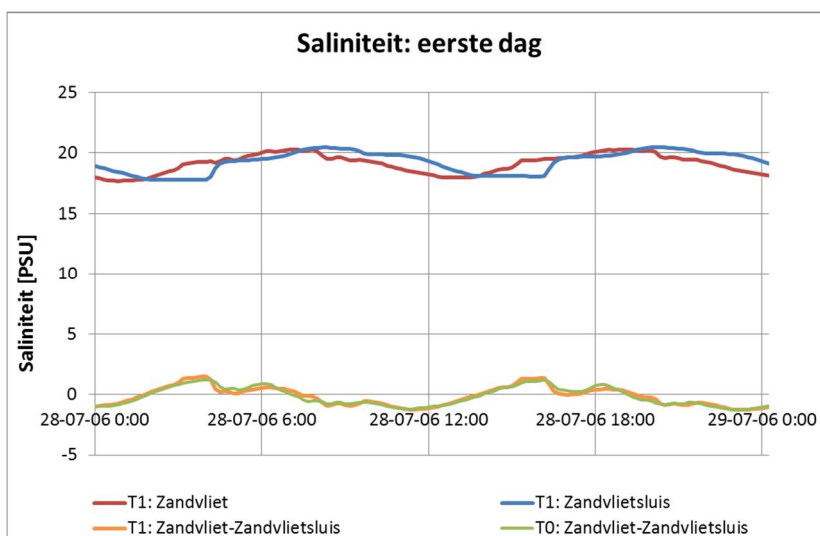


Figuur 3.11a: Saliniteit in Zandvliet en Zandvlietluis. T0-situatie.

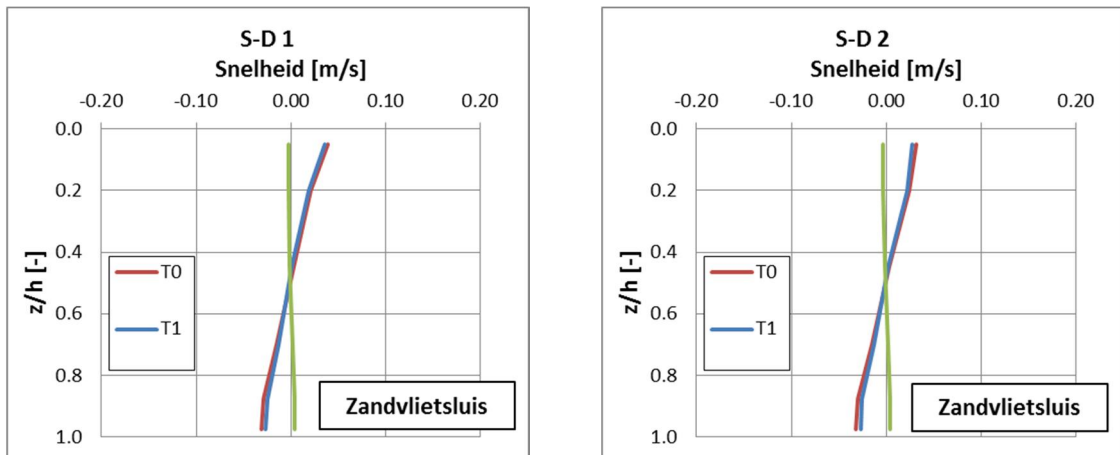


Figuur 3.11b: Snelheidsprofielen in Zandvlietsluis. T0-situatie.

Figuur 3.12a geeft voor de T1-situatie op dezelfde wijze als voor T0 (Figuur 3.11a) de saliniteit in de stations Zandvliet en Zandvlietsluis tijdens de eerste dag van de maandsimulatie. Het saliniteitsverschil tussen Zandvliet en Zandvlietsluis is in deze figuur voor zowel T0 als T1 weergegeven. Het saliniteitsverschil tussen Zandvliet en Zandvlietsluis is voor beide situaties vrijwel identiek ondanks dat de saliniteit tijdens T1 ongeveer 2 PSU hoger is dan tijdens T0. De uitwisseling van water ten gevolge van dichtheidsverschillen tussen rivier en toegangsgeul zal dus voor beide situaties gelijk zijn. Dit wordt bevestigd door de met het model berekende tijdsgemiddelde snelheidsvertikalen in station Zandvlietsluis, zie Figuur 3.12b.



Figuur 3.12a: Saliniteit in Zandvliet en Zandvlietsluis. T1-situatie.
Saliniteitsverschillen tussen Zandvliet en Zandvlietsluis voor T0 en T1.



Figuur 3.12b: Tijds gemiddelde snelheidsvertikalen voor T0 en T1 in station Zandvlietsluis. Links SD-1, rechts S-D 2. Positief is in de richting van de sluis.

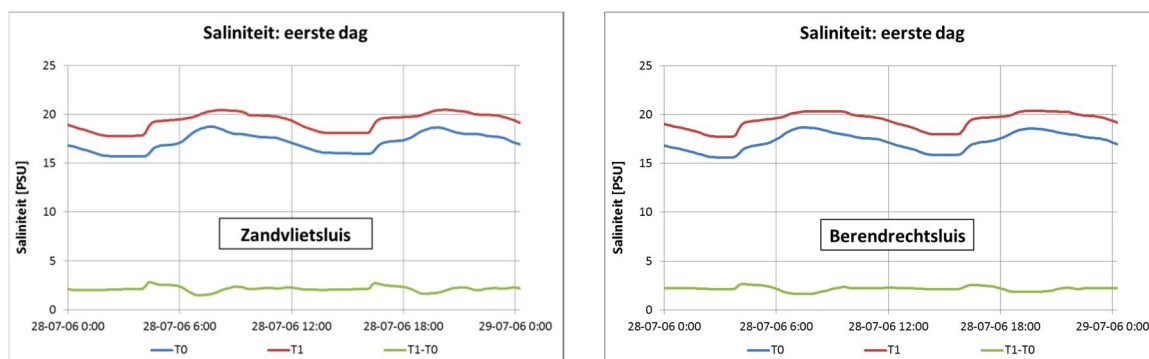
Voor de analyse hoe het uitwisselingsvolume tussen de rivier en het havendok verandert worden de volgende (uiterste) gevallen onderscheiden:

- Geval 1: In de huidige situatie (T0) wordt het water in de schutkolk volledig uitgewisseld met de rivier en een toe- of afname van het dichtheidsverschil in de nieuwe situatie (T1) leidt niet tot een verandering van het uitwisselingsvolume.
- Geval 2: In de huidige situatie wordt het water in de schutkolk onvolledig uitgewisseld (de deuren worden gesloten voordat al het water in de kolk is vervangen) en een toe- of afname van het dichtheidsverschil leidt tot een toe- of afname van het uitwisselingsvolume.

In het eerste geval bepalen uitsluitend de veranderingen van de slibconcentraties in de Beneden-Zeeschelde de veranderingen van het slibtransport. Als het uitwisselingsvolume ook verandert (geval 2) kan dit tot gevolg hebben dat het slibtransport hierdoor wordt vergroot of verkleind.

Verandering tijds gemiddelde saliniteit

Voor de T1-situatie verschilt bij de Zandvliet- en Berendrecht sluis de zoutconcentratie aan weerszijden van de sluis (in de Schelde en in het Kanaalpand) van die voor de T0. De saliniteit aan de rivierzijde van beide sluizen is voor de eerste dag weergegeven in Figuur 3.13.



Figuur 3.13: Saliniteit in station Zandvlietsluis (links) en Berendrechtshuis (rechts) voor T0 en T1 en verschil tijdens eerste dag.

Ook hier geldt, dat de saliniteit met een constante waarde van ongeveer 2 PSU toeneemt, zie Tabel 3.3a en Tabel 3.3b voor resp. de eerste en tweede springtij-doodtij cyclus (S-D 1 en S-D 2). De tijdsgemiddelde zoutconcentratie op de rivier verschilt vrijwel niet van die in de toegangsgeulen naar de sluizen al is zowel bij de T0 als de T1 sprake van een faseverschil (zie Figuren 3.11a en 3.12a voor de Zandvlietsluis).

Tabel 3.3a: Saliniteit [PSU] bij de Zandvliet- en Berendrechtshuis tijdens springtij-doodtij cyclus 1 voor T0 en T1.

S-D 1	Zandvliet rivier	Zandvlietsluis	Berendrechtshuis
T0	16,9	17,0	17,1
T1	19,1	19,2	19,3
T1-T0	2,2	2,2	2,2

Tabel 3.3b: Saliniteit [PSU] bij de Zandvliet- en Berendrechtshuis tijdens springtij-doodtij cyclus 2 voor T0 en T1.

S-D 2	Zandvliet rivier	Zandvlietsluis	Berendrechtshuis
T0	17,0	17,2	17,3
T1	19,3	19,4	19,5
T1-T0	2,3	2,2	2,2

De saliniteit in het Kanaalpannd kan niet worden ontleend aan het model omdat het gebied geen onderdeel vormt van de modelschematisatie. Voor een schatting van deze zoutconcentratie wordt gebruik gemaakt van de water- en zoutbalans voor het Antwerps Kanaalpannd zoals opgesteld door van Pagee et al. (2009). Bijlage A geeft de resultaten van de balans voor de T0- en de T1-situatie in termen van saliniteiten¹⁴. De resultaten zijn vermeld in Tabel 3.4 samen met de saliniteiten ter plaatse van de Zandvliet- en Berendrechtshuis (ontleend aan Tabellen 3.3a en 3.3b als gemiddelde voor beide sluizen en deelperioden). Deze laatste waarden zijn berekend met het NEVLA-model en gebruikt als invoer voor de zoutbalans: 17,2 PSU voor T0 en 19,4 PSU voor T1.

¹⁴ De water- en zoutbalans is door van Pagee et al. (2009) opgesteld voor chloride-concentraties.

Tabel 3.4: Saliniteit [PSU] bij de Zandvliet- en Berendrechtstuizen (rivierzijde) volgens NEVLA-model en in het Antwerps Kanaalpand volgens water- en zoutbalans (Bijlage A).

S-D 1 en S-D 2	Zandvliet- en Berendrechtstuiz: NEVLA-model	Antwerps Kanaalpand: water- en zoutbalans	Vershil
T0	17,2	11,4	+5,8
T1	19,4	14,5	+4,9
T1-T0	+2,2	+3,1	-0,9

Uit Tabel 3.4 volgt dat de saliniteit in het Kanaalpand voor T1 toeneemt ten opzichte van T0. Deze toename is het gevolg van de grotere zoutlast voor het Kanaalpand via de Kreekraksluizen, de inname van zouter water uit de rivier via de schutsluizen ten behoeve van het peilbeheer van het Kanaalpand en de uitwisseling van zouter water tussen rivier en Kanaalpand ten gevolge van het schutten. Het verschil tussen de saliniteit in de Beneden-Zeeschelde en het Kanaalpand in de T1-situatie (+4,9 PSU) is 0,9 PSU kleiner dan het verschil in de T0-situatie (+5,8 PSU). Voor Geval 2 ("onvolledige uitwisseling") betekent dit dat het uitwisselingsvolume dan afneemt. Een afname van $0,9/5,8 \cdot 100\% = 16\%$ van het chloride-concentratieverschil geeft een even grote relatieve afname in het dichtheidsverschil resulterend in een afname van 8% voor de stroomsnelheid u , zie vgl. (3.1), en dus ook in een afname van 8% voor het uitwisselingsvolume. Deze schatting moet beschouwd worden als indicatief, omdat de bepaling van de zoutconcentratie in het Kanaalpand op basis van een globale water- en zoutbalans zonder ruimtelijke variatie onzekerheden heeft. Andere vereenvoudigingen betreffen:

- Bij de simulaties met het NEVLA-model wordt geen rekening gehouden met een lozing en onttrekking van water en bijbehorende saliniteit ter plaatse van de schutsluizen als gevolg van het schutproces en ten behoeve van het peilbeheer van het Kanaalpand. Feitelijk worden het numerieke model en de water- en zoutbalans ontkoppeld van elkaar toegepast.
- In de waterbalans voor het Kanaalpand is conform van Pagee et al. (2009) uitgegaan van een wateruitwisseling ten gevolge van het schutproces van gemiddeld $30 \text{ m}^3/\text{s}$ (Bijlage A). Als bij elke schutting de volledige kolkvolumes van de Zandvliet- en Berendrechtstuiz worden uitgewisseld volgt met het aantal schuttingen voor 1995 (Stad Antwerpen, 1995) een uitwisselingsdebiet dat een factor twee groter is. De afname van het saliniteitsverschil tussen rivier en Kanaalpand (T1 vs. T0) wordt dan 0,5 PSU i.p.v. 0,9 PSU.
- De uitwisselingen via de andere schutsluizen (Boudewijn- en Van Cauwelaertstuiz) zijn niet meegenomen.

Verandering saliniteitsvariatie

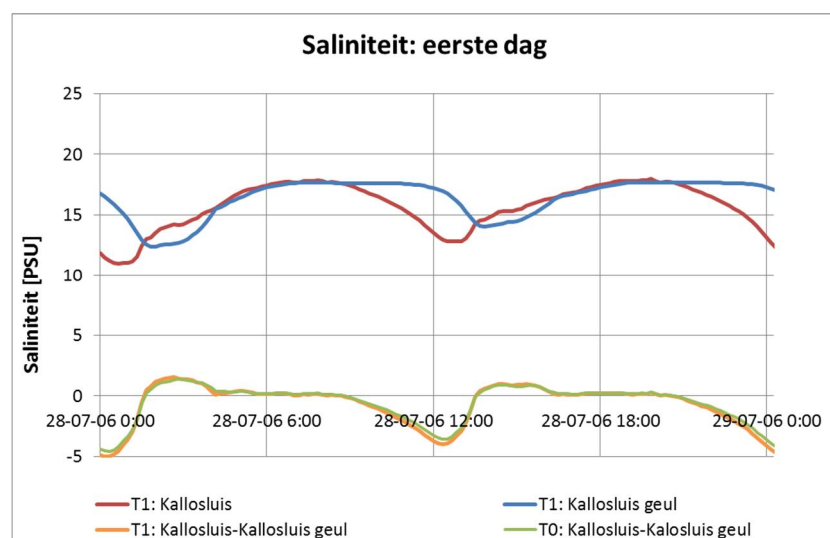
De minimale saliniteit op de rivier bij de Zandvliet- en Berendrechtstuiz is zowel bij T0 als T1 groter dan de saliniteit in het Kanaalpand. In de T1-situatie neemt de saliniteitsvariatie in station Zandvliet ter hoogte van de Zandvliet- en Berendrechtstuiz met bijna 10% af ten opzichte van T0. Hierdoor wordt rond de periode met maximale saliniteit het saliniteitsverschil met het Kanaalpand kleiner en rond de periode met minimale saliniteit groter. Het netto effect zal globaal nul zijn zodat veranderingen in het uitwisselingsvolume vooral bepaald worden door veranderingen in het gemiddelde saliniteitsverschil tussen rivier en Kanaalpand zoals hiervoor beschreven.

Geconcludeerd wordt dat de uitwisseling van water tussen de rivier en de toegangsgeul voor de T0 en T1 gelijk zijn ondanks de toename van de gemiddelde saliniteit. Het uitwisselingsvolume via de schutsluizen zal waarschijnlijk iets afnemen, omdat de toename

van de saliniteit in het Kanaalpand groter is dan de toename in de rivier resulterend in een afname van het saliniteitsverschil. De onzekerheid hierin betreft de bepaling van de saliniteit in het Kanaalpand op basis van een water- en zoutbalans. Een eventuele toename van het slibtransport naar de havendokken kan dan alleen het gevolg zijn van een toename van de slibconcentraties bij de sluizen (zie Par. 3.2.3).

3.2.2.2 Kallosluis

Op dezelfde wijze als voor de stations Zandvliet (rivier) en Zandvlietluis (toegangsgedul) is in Figuur 3.14 het saliniteitsverschil tussen de stations Kallosluis (in de rivier) en Kallosluis geul (in de toegangsgedul) voor T1 weergegeven. Ook hier zijn de saliniteitsverschillen tussen beide stations voor T0 en T1 hetzelfde en dus ook de grootte van de dichtheidsgevoerde stroming van rivier naar toegangsgedul en vice versa.



Figuur 3.14: Saliniteit in Kallosluis en Kallosluis geul. T1-situatie. Saliniteitsverschillen tussen Kallosluis en Kallosluis geul voor T0 en T1.

Verandering tijdsgemiddelde saliniteit

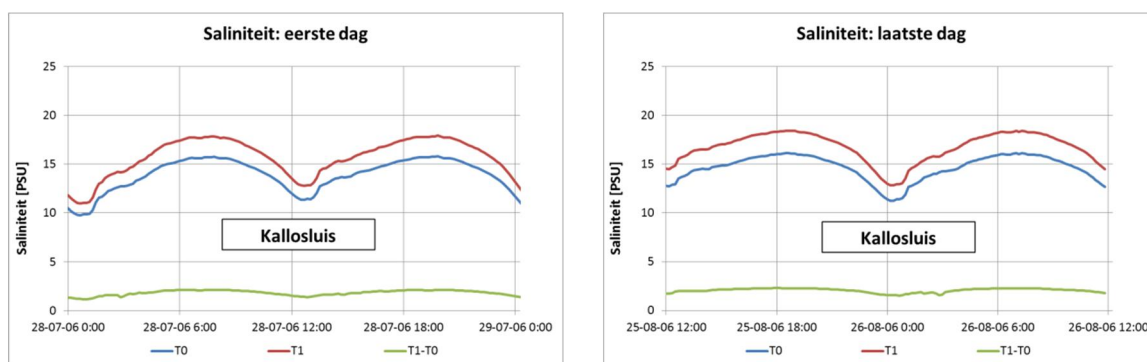
Figuur 3.15 toont voor de eerste en laatste dag van de maandsimulatie dat de saliniteit op de rivier (station Kallosluis) toeneemt met gemiddeld 2 PSU. In Tabellen 3.5a en 3.5b zijn de tijdsgemiddelde saliniteiten voor beide springtij-doodtij cycli (S-D 1 en S-D 2) vermeld voor stations Kallosluis (in de rivier) en Kallosluis geul (in de toegangsgedul), zie Figuur 3.1 voor de locaties.

Tabel 3.5a: Saliniteit [PSU] bij de Kallosluis tijdens springtij-doodtij cyclus 1 voor T0 en T1.

S-D 1	Kallosluis (rivier)	Kallosluis (toegangsgedul)
T0	13,8	14,4
T1	15,7	16,4
T1-T0	1,9	2,0

Tabel 3.5b: Saliniteit [PSU] bij de Kallosluis tijdens springtij-doodtij cyclus 2 voor T0 en T1.

S-D 2	Kallosluis (rivier)	Kallosluis (toegangsgedul)
T0	14,1	14,6
T1	16,0	16,6
T1-T0	1,9	2,0



Figuur 3.15: Saliniteit in station Kallosluis voor T0 en T1 en verschil. Eerste dag (links) en laatste dag (rechts) van de maandsimulatie.

De tijdsgemiddelde en gebiedsgemiddelde saliniteit in het havendok achter de Kallosluis volgt uit de water- en zoutbalans voor dit bekken. Als sprake is van een zoetwaterlozing Q_{loz} [m³/s] met saliniteit S_{loz} [PSU] in het dok volgt voor de gemiddelde saliniteit in het havendok S_{dok} [PSU]:

$$S_{dok} = \frac{Q_{schut} S_{riv} + Q_{loz} S_{loz}}{Q_{schut} + Q_{loz}} \quad (3.2)$$

met Q_{schut} [m³/s] het gemiddelde schutdebiet naar en vanuit het havendok en S_{riv} [PSU] de gemiddelde saliniteit op de rivier ter plaatse van de Kallosluis. Vgl. (3.2) kan worden geschreven als:

$$S_{riv} - S_{dok} = \alpha (S_{riv} - S_{loz}) \quad (3.3)$$

$$\alpha = \frac{Q_{loz}}{Q_{schut} + Q_{loz}}$$

Uit vgl. (3.3) volgt dat zonder lozing in het havendok ($\alpha=0$) het saliniteitsverschil tussen havendok en rivier gemiddeld nul is: een toename van de saliniteit op de rivier gaat gepaard met een even grote toename in het havendok. Als wel water wordt geloosd in het havendok ($0 < \alpha < 1$) is het saliniteitsverschil volgens vgl. (3.3) afhankelijk van de saliniteit in de rivier. Een toename van S_{riv} resulteert dan in een toename van het saliniteitsverschil en dus in een toename van het uitwisselingsvolume tussen rivier en havendok. Dit effect kan worden verwaarloosd als het gemiddelde lozingsdebiet klein is ten opzichte van het gemiddelde schutdebiet ($\alpha \ll 1$) en/of als in de uitgangssituatie (T0) sprake is van een volledige uitwisseling ten gevolge van dichtheidsverschillen zoals in Par. 3.2.2.1 beschreven voor de Zandvliet- en Berendrechtshuis.

Verandering saliniteitsvariatie

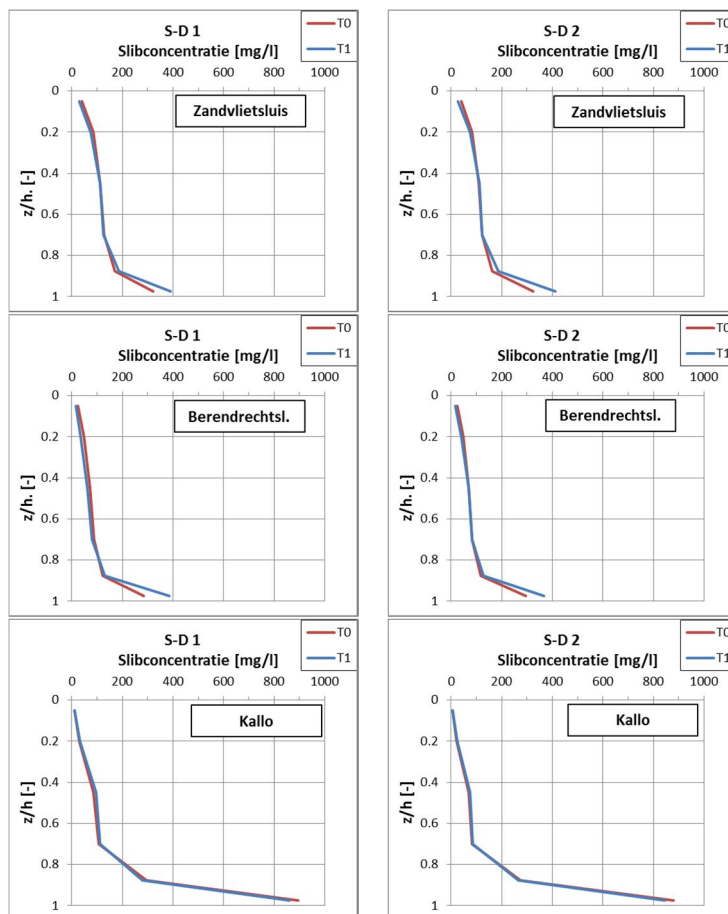
De toename van de saliniteitsvariatie op de rivier ter hoogte van de Kallosluis kan leiden tot een versterkte uitwisseling tussen rivier en havendok aannemende dat de variatie in het havendok sterk gedempt wordt. Deze versterkte uitwisseling treedt alleen op als in de uitgangssituatie (T0) sprake is van een onvolledige uitwisseling in de schutsluis. Uit Figuur 2.16 volgt dat op de Beneden-Zeeschelde de saliniteitsvariatie tijdens het getij, en dus ook de variatie van het dichtheidsverschil tussen rivier en havendok, met ongeveer 15% toeneemt.

De dichtheidsgedreven stroming neemt dan volgens vgl. (3.1) met 7% toe en dus ook de wateruitwisseling tussen rivier en havendok.

Geconcludeerd wordt dat in de T1-situatie de wateruitwisseling tussen de rivier en het havendok achter de Kallosluis potentieel kan toenemen. Dit is dan het gevolg van (i) een groter tijdsgemiddeld dichtheidsverschil tussen rivier en havendok maar alleen in de situatie dat substantieel water wordt geloosd in het havendok en (ii) een grotere variatie van de saliniteit op de rivier. Van een toename zal alleen sprake zijn als in de T0-situatie de schutkolk onvolledig wordt uitgewisseld. Een kwantitatief oordeel kan niet worden gegeven.

3.2.3 Slibconcentraties in de toegangsgeulen bij de schutsluizen

In Figuur 3.16 worden de tijdsgemiddelde slibconcentratieprofielen getoond in de stations Zandvlietsluis, Berendrecht-sluis en Kallosluis voor de eerste en tweede springtij-doodtij cyclus (resp. S-D 1 en S-D 2). Bij de Zandvliet- en Berendrecht-sluis is de suspensieconcentratie bij de bodem voor de T1-situatie groter dan voor de T0-situatie maar op geringere diepten is de concentratie iets lager. Bij de Kallosluis is er nagenoeg geen verschil tussen T0 en T1.



Figuur 3.16: Tijdsgemiddelde slibconcentratieverticalen bij de Zandvliet-, Berendrecht- en Kallosluis voor de eerste en tweede springtij-doodtij cyclus (resp. linker- en rechterkolom). z is de diepte t.o.v. het wateroppervlak en h is de waterdiepte.

In Tabel 3.6a en 3.6b zijn de tijd- en dieptegemiddelde slibconcentraties¹⁵ vermeld voor de beide deelperioden (S-D 1 en S-D 2).

Tabel 3.6a: Tijds- en dieptegemiddelde slibconcentratie [mg/l] voor de eerste springtij-doodtij cyclus.

S-D 1	Zandvlietsluis	Berendrechtshuis	Kallo
T0	121	84	142
T1	123	82	144
T1-T0	+2 (+1%)	-2 (-2%)	+2 (+1%)

Tabel 3.6b: Tijds- en dieptegemiddelde slibconcentratie [mg/l] voor de tweede springtij-doodtij cyclus.

S-D 2	Zandvlietsluis	Berendrechtshuis	Kallo
T0	118	82	127
T1	123	84	127
T1-T0	+5 (+4%)	+2 (+2%)	0 (0%)

Hierbij wordt het volgende opgemerkt:

- De slibconcentratie bij de Berendrechtshuis is laag ten opzichte van de naburige Zandvlietsluis en ook de Kallosluis. De oorzaak hiervan is niet duidelijk. Omdat de stations Zandvlietsluis en Berendrechtshuis dicht bij de modelbegrenzing liggen kunnen de stroomsnelheden sterk worden beïnvloed door de lokale geometrie. Dit kan vervolgens leiden tot verschillen in horizontale transporten en erosie en sedimentatie en dus ook slibconcentraties. Een bepaling van de effecten op de slibhuishouding met een ruimtelijk en temporeel geïntegreerde grootheid, zoals de netto sedimentatie in de toegangsgeulen en het Deurganckdok (Par. 3.1), wordt minder beïnvloed door lokale effecten.
- Bij de Zandvliet- en Berendrechtshuis verschillen de slibconcentraties tijdens de tweede springtij-doodtij cyclus (S-D 2) maximaal 2% van de concentraties tijdens de eerste springtij-doodtij cyclus (S-D 1). Bij de Kallosluis is het verschil tussen de gemiddelde slibconcentraties voor S-D 1 en S-D 2 groter, waarbij de concentraties tijdens S-D 2 10% lager zijn, zowel voor T0 als T1.
- De genoemde verschillen kunnen het gevolg zijn van de lagere (afnemende) rivierafvoer tijdens de tweede springtij-doodtij cyclus maar ook als oorzaak hebben de niet volledig identieke getijforcering tijdens beide springtij-doodtij cycli (het werkelijk opgetreden getij tijdens 2006 is als randvoorwaarde voor de simulaties gebruikt).
- Het effect van de grotere en zoutere spui bij Bath (T1-T0) op de gemiddelde slibconcentraties is het grootst bij Zandvlietsluis voor S-D 2 (toename van 4%). In de overige gevallen is de toename 2% of minder. Bij de Berendrechtshuis wordt voor S-D 1 een geringe afname van de slibconcentratie berekend.
- Als voor de bepaling van het slibtransport van de Beneden-Zeeschelde naar het Antwerps Kanaal wordt uitgegaan van de gemiddelde slibconcentratie bij de Zandvliet- en Berendrechtshuis en ook van de gemiddelde concentratie van beide deelperioden (S-D 1 en S-D 2) volgt een toename van 1-2%. Bij de Kallosluis bedraagt de toename ongeveer 0-1%.

De diepte-gemiddelde suspensieconcentraties bij de drie sluizen nemen dus toe met 0-2% (als gemiddelde van beide deelperioden). Als het uitwisselingsvolume tussen rivier en havendokken niet verandert dan zal het slibtransport naar de havendokken in dezelfde mate toenemen. De berekende toename van de slibconcentratie bij de Zandvliet- en Berendrechtshuis in combinatie met een potentiële afname van het uitwisselingsvolume

¹⁵ De diepte-gemiddelde waarden zijn afgeleid uit de afzonderlijke rekenlagen rekening houdend met de verschillende laagdiktes.

tussen Beneden-Zeeschelde en Kanaalpand van 8% (indien sprake is van onvolledige uitwisseling in de T0, zie Par. 3.2.2) zou zelfs kunnen leiden tot een afname van het slibtransport. Bij de Kallosluis kan het slibtransport naar het havendok toenemen als gevolg van een potentiële toename van het uitwisselingsvolume in combinatie met een geringe toename van de slibconcentratie.

4 Effecten op de ecologie

4.1 Inleiding

De modelsimulatie T1 toont dat een wijziging van de spui te Bath effecten zal hebben op saliniteit en zwevende stof in het estuarium. De gevolgen hiervan op het ecosysteem worden in dit hoofdstuk ingeschat, zowel voor organismen in de waterfase, de waterbodem als de intertidale gebieden. Bij deze inschatting dient een belangrijke bemerking gemaakt te worden: de simulaties T0 en T1 werd uitgevoerd met een zeer uitzonderlijke Ausgangssituatie, namelijk bij een periode van 4 opeenvolgende maanden met lage debieten ($40\text{m}^3/\text{s}$). Deze scenario-studie geeft dus enkel een indicatie van het mogelijke effect van de zoute spui in Bath op de zoutconcentraties in de Schelde bij deze uitzonderlijke Ausgangssituatie, en mag niet zomaar veralgemeend worden naar een gemiddelde zomersituatie.

Het gesimuleerde bovenstrooms debiet van $40\text{m}^3/\text{s}$ is wel representatief voor een modale zomermaand, maar vier opeenvolgende maanden een debiet van $40\text{m}^3/\text{s}$ is echter zeer uitzonderlijk. De keuze voor een simulatie bij lage debieten werd ingegeven door de keuze om extreme effecten te bekijken. Door te focussen op het effect van het spuidebiet te Bath bij deze langdurige lage debieten, kan een maximale zoutintrusie, bij deze extreme omstandigheden, ingeschat worden. Echter, de effecten op ecologie worden niet enkel ingegeven door de maximale zoutintrusie. Bijgevolg zijn de effecten van zoute spui te Bath bij langdurige lage debieten zoals hier gesimuleerd, zeer waarschijnlijk niet de maximaal te verwachten effecten voor ecologie.

Een simulatiestudie met hogere afvoeren tijdens de aanloopperiode is daarom nodig om het effect op een meer gemiddelde of modale zomersituatie in te schatten. Dit is in het bijzonder nodig voor de effecten op de mesohaliene zone van het estuarium. Maar ook de algemene impact op de zoutgradiënt en de gemiddelde zoutconcentraties in de oligohaliene en zoete zone is waarschijnlijk groter dan wat volgt uit de huidige simulatiestudie met uitzonderlijk lage debieten.

Bij deze bijzondere Ausgangssituatie zijn de T0 simulatieresultaten ook afwijkend voor de oligohaliene en zoete zone van het estuarium. Daarom moeten we een voldoende grote veiligheidsmarge inbouwen wanneer we het gesimuleerde effect van de zoute spui Bath willen vertalen naar een verwacht effect in andere situaties dan deze met langdurig lage debieten. Details van de beperkingen van de Ausgangssituatie en modeloutput voor het inschatten van ecologische effecten zijn weergegeven in Bijlage C: *Representativiteit uitgevoerde simulaties*.

4.2 Ecologische effecten: saliniteit

De gesimuleerde effecten van het gewijzigd spuiregime van de zoute spui Bath op de zoutconcentraties in het estuarium kunnen opgedeeld worden in twee categorieën:

1. Een verhoging van de gemiddelde zoutconcentraties
2. Een wijziging van de zoutstress (= het bereik van zoutconcentraties waaraan organismen blootgesteld worden).

De ecologische effecten daarvan moeten worden bekeken zowel voor de ecologie van de waterfase (pelagiaal) als de ecologie van de waterbodem, waarbij vooral de

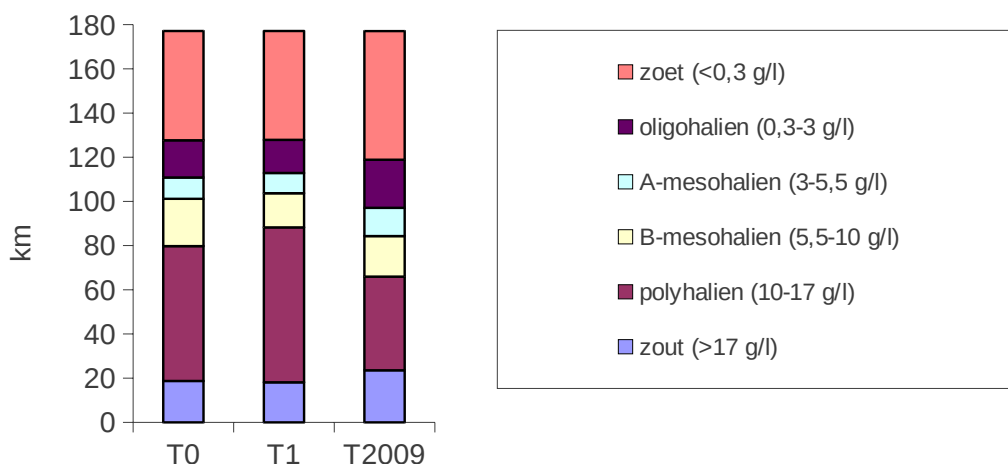
intergetijdengebieden van belang zijn (intertidaal). Pelagiale organismen ervaren zoutstress wanneer ze vanuit een zoetere zone in een zoutere zone terechtkomen, of omgekeerd. Dit kan doordat ze meegenomen worden door de netto waterbeweging (advectief transport), doordat ze door de tijbeweging het estuarium worden binnengebracht (dispersief transport, of advectief transport van partikels door tij-asymmetrie), of doordat ze op eigen kracht migreren. Benthische en intertidale organismen en vegetatie ondervinden zoutstress doordat ze bij vloed overspoeld worden met zouter water, en bij eb met zoeter water.

Wat betreft de intertidale gebieden dient opgemerkt te worden dat er weinig gegevens beschikbaar zijn over het voorkomen van benthische organismen (schelpdieren, wormen, ...) bij verschillende zoutconcentraties langsheen de estuariene gradiënt van het Schelde-estuarium. In wat volgt, wordt gefocust op vegetatie, maar verwacht kan worden dat ook benthische organismen sterk bepaald worden door zoutconcentratie.

De gesimuleerde impact op de zoutverdeling beschouwen we als significant in een aanzienlijk deel van het estuarium, maar niet overal (Figuren 2.11a en b):

- 1 In de zoete zone opwaarts Dendermonde zijn de gesimuleerde effecten verwaarloosbaar. Zelfs wanneer het bovendebiet naar 0 m³/s gaat, is het effect gering. We verwachten niet dat die kleine toename van de saliniteit een significant effect zal hebben op het ecosysteem. Hierbij dient wel opgemerkt dat in deze zone de T0 simulatie de zoutconcentraties onderschat in vergelijking met de observaties in september 2009 (Figuur C.3, Bijlage C), en dat dus ook het effect van de zoute spui Bath mogelijk onderschat wordt.
- 2 In de meest zoute zone van de Schelde, stroomafwaarts Hansweert, is het gesimuleerde effect ook gering. Ook hier geldt de kanttekening dat de simulatie-opzet niet uitsluit dat er bij modale debieten toch een significant effect gesimuleerd zou worden.

Volgens de Venice-schaal worden volgens chloride concentratie 6 zones onderscheiden langsheen de estuariene gradiënt. Zout (>17 g/l), polyhalien (10-17 g/l), α -mesohalien (5.5 – 10 g/l), β -mesohalien (3-5.5 g/l), oligohalien (0.3-3g/l), en zoet (<0.3 g/l). Figuur 4.1 geeft de ligging van deze zones voor het Schelde-estuarium weer, zowel voor de gesimuleerde zoutconcentraties (T0, T1) als voor de geobserveerde zoutconcentraties tijdens de zomermaanden in 1996-2009 (T2009).



Figuur 4.1: Zones volgens chloride concentratie (Classificatie volgens het Venice systeem). De opdeling "T2009" is gebaseerd op de geobserveerde zoutconcentraties in de zomermaanden in de periode 1996-2009 (OMES-data). Klassegrenzen zijn berekend uitgaande van de gesimuleerde tijdsgemiddelde saliniteiten voor de volledige analyseperiode, d.w.z. inclusief de eerste springtij-doodtij cyclus met een constante rivierafvoer en de tweede springtij-doodtij cyclus met een afnemende rivierafvoer. De klassegrenzen zijn bepaald door lineaire interpolatie vanuit de saliniteitswaarden in de stations waar modeloutput werd gegenereerd.

Echter, voor een zone van niet minder dan 40 km wordt een gemiddelde toename van meer dan 1 PSU gesimuleerd (Figuur 2.11a en b). In de zone tussen km 50 en 80-90 neemt de saliniteitsfluctuatie echter af. De minimale waarden lijken immers sterker toegenomen dan de maximale waarden. Deze zone wordt met andere woorden zouter maar de zoutstress neemt af. Meer stroomopwaarts (km 80-90 tot 120) neemt de saliniteitsgradiënt dan weer toe. In deze zone verhoogt m.a.w. zowel de gemiddelde zoutconcentratie als de zoutstress.

4.2.1 Pelagiaal

4.2.1.1 Verhoging zoutconcentraties en zoutstress

Veel organismen hebben een voorkeur voor ofwel zout ofwel zoet water. In de overgangszone komen enkel soorten voor die een grote tolerantie hebben voor zoutschommelingen. De grote uitbreiding van de polyhaliene zone door de zoute spui Bath zal enerzijds voor gevolg hebben dat (voornamelijk fytoplankton- en zoöplankton-) soorten met een voorkeur voor hogere zoutconcentraties dieper het estuarium binnendringen. Anderzijds wordt de overgang tussen zoet en zout abrupter: de zoutgradiënt neemt toe. Dit kan ervoor zorgen dat sommige pelagiale soorten het moeilijker kunnen krijgen. De gedetailleerde studie naar deze effecten valt buiten het bestek van deze studie.

4.2.1.2 Vergroten van zone met sterke (zout) stress

De zone tussen km 80-90 en 120 wordt, behalve door een sterke saliniteitsgradiënt, gekenmerkt door hoge turbiditeit. Dit, in combinatie met nog een relatief grote mengdiepte, zorgt voor een ongunstig lichtklimaat. Deze zone is kenmerkend de zone waar veel organismen uit het zoete en zoute door zoutstress afsterven en de brakke algenpopulaties onvoldoende tot bloei komen om de zuurstofvraag voor decompositie te compenseren. Deze

zone kampt dus nu reeds met lagere zuurstofwaarden. Met het verhoogde spuidebiet breidt deze zone op het eerste zicht uit: ze zal wellicht meer opwaarts uitbreiden dan ze aan afwaartse kant inkrimpt. Door de stresszone uit te breiden, is er een potentieel langer traject waarin respiratie domineert en dus zuurstof in dalende lijn is. Dit kan resulteren in een lagere zuurstofconcentraties in een meer uitgebreide zone, met bijhorende negatieve effecten op populaties zoöplankton en vis.

Dit effect wordt mogelijk deels gemilderd door het effect van verlaagde gesimuleerde concentraties zwevende stof (zie verder Par. 4.3).

De zoutstress, ofwel de sterke schommeling in saliniteit tussen hoog- en laagwater is een gevolg van de tijbeweging in een zone met sterke zoutgradiënt. De simulaties tonen dat na langdurige droogte niet enkel de gemiddelde saliniteit, maar ook de zoutgradiënt in de oligohaliene zone langzaam toeneemt. Wanneer echter de debieten na enkele zomeronweders plots sterk toenemen, kan op korte tijd het zout uit de zoete zone teruggedrongen worden. Als dit gebeurt wanneer de meer afwaartse zones in de Zeeschelde een verhoogde saliniteit kennen (T1 situatie), kan ook dit, tijdelijk, leiden tot een sterkere gradiënt in saliniteit en dus meer stress.

4.2.2 Intertidaal

4.2.2.1 Verhoging van de zoutconcentraties

Figuur 4.1 geeft de gesimuleerde wijziging weer van de saliniteitszones langsheen het estuarium. De ruimtelijke uitgestrektheid van de polyhaliene zone neemt toe met bijna 10 km of ongeveer 15% (ruimtelijke uitgestrektheid T0: ~60 km, T1: ~70 km). Dit gaat grotendeels ten koste van de zoetere zones, al verschuift ook de grens van de zoute zone.

Gelijkaardig aan pelagiale organismen, hebben de meeste benthische organismen een voorkeur voor ofwel zout ofwel zoet water. In de overgangszone komen enkel soorten voor die een grote tolerantie hebben voor zoutconcentraties. De grote uitbreiding van de polyhaliene zone door de zoute spui Bath zal enerzijds voor gevolg hebben dat soorten met een voorkeur voor hogere zoutconcentraties dieper het estuarium binnendringen.

Er wordt zowel een verschuiving als een verkleining van de zoetere zones gesimuleerd. We leiden hieruit af dat zoute ecotopen en bijhorende fauna en flora enerzijds opschuiven in opwaartse richting. Die gesimuleerde verschuiving is maximaal 10 km, afgaande op de verschuiving van de gemiddelde saliniteit. Anderzijds worden alle minder zoute tot zoete zones kleiner. Dit is het meest uitgesproken voor de mesohaliene zone (-6 km) maar ook de oligohaliene (-2 km) en zoete zone (-0.1 km) worden kleiner. Hierbij hoort de belangrijke kanttekening dat een uitzonderlijke situatie van aaneengesloten periode van lage debieten gesimuleerd werd. De zones gebaseerd op de gesimuleerde zoutconcentraties zijn dan ook sterk afwijkend van de zones gebaseerd op de observaties (Figuur 4.1). Voorgaande getallen kunnen dus niet zomaar geïnterpreteerd worden als het werkelijke effect van de zoute spui.

De grens van de kenmerkende zoetwatersoorten zoals wilg en spindotterbloem ligt ongeveer bij Kruibeke (km 110). Op deze locatie worden deze soorten nog slechts sporadisch waargenomen. Het eerstvolgende schorgebied (de Notelaer) ligt enkele kilometer stroomopwaarts. Op de Notelaer zijn de kenmerkende zoetwatersoorten abundant aanwezig. We beschouwen km 110 dan ook als kritische grenswaarde voor het voorkomen van zoetwatersoorten. Deze locatie komt overeen met de benedenstroomse grens van de gesimuleerde oligohaliene zone. Op basis van de simulatieresultaten zou met de zoute spui

Bath, de benedenstroomse grens voor het voorkomen van zoetwaterschorren met zo'n 2 km opschuiven. Dit is gebaseerd op de hypothese dat het voorkomen van zoetwatersoorten voornamelijk bepaald wordt door de maximale zoutconcentraties waaraan ze blootgesteld worden tijdens een zomerperiode van lage debieten.

Deze benedengrens bevindt zich ter hoogte van het geplande GOG-GGG Kruibeke-Bazel-Rupelmonde. Het is dus mogelijk dat de zoute spui Bath het onmogelijk maakt om binnen dit gebied de kenmerkende intertidale zoetwatervegetatie te ontwikkelen.

Het zoetwaterschor De Notelaer ligt dichtbij de benedenstroomse grens. Daar waar de gemiddelde zoutconcentratie in de zomermaanden in 1996-2012 bij de benedenstroomse grens 0,69 g/l is (Kruibeke) is, is deze ter hoogte van de Notelaer 0,35 g/l (Steendorp). Het verschil tussen voorkomen en niet voorkomen van kenmerkende zoetwatervegetatie bedraagt dus minder dan 0,34 g/l. Dit stelt hoge eisen naar modelnauwkeurigheid. Gegeven het verschil tussen observaties en simulatieresultaten (Figuur C.2 en C.3 in Bijlage C) zijn we van mening dat niet kan uitgesloten worden dat ook de zoetwatervegetatie in De Notelaer negatieve invloed kan ondervinden van de zoute spui Bath.

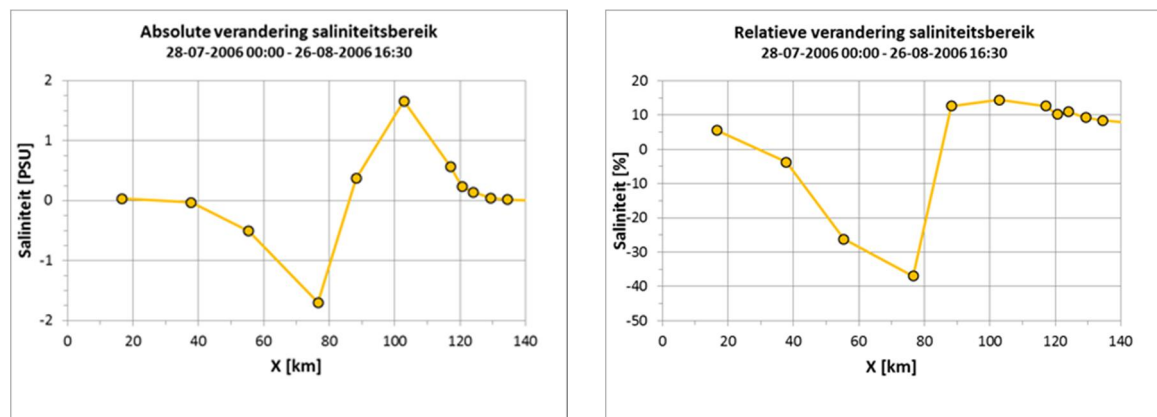
Hierbij dient de kanttekening gemaakt dat het onvoldoende geweten is of het de gemiddelde zoutconcentratie tijdens de zomermaanden dan wel de maximale zoutconcentratie of de zoutstress (zie verder) bepalend is. Alle drie spelen ze waarschijnlijk een rol.

In de zoete en oligohaliene zone is de invloed van lage debieten ook merkbaar. Naar het einde van de week met bovendebiet nul is er een duidelijke stijging van het zoutgehalte op verschillende locaties. Het is niet duidelijk of de stijging in zoutconcentraties zich sterker doorzet wanneer er langere perioden van nuldebet optreden.

Tot slot werd hierboven enkel gekeken naar de effecten in de zoete Zeeschelde. Om al de effecten op zoetwater intergetijdengebieden te kennen moet in hetzelfde detail gekeken worden naar het Rupelbekken.

4.2.2.2 Wijziging van de zoutstress

Het gewijzigd spuidebiet wijzigt ook de zoutstress, i.e. het bereik aan zoutconcentraties waaraan vegetatie en benthische organisme blootgesteld worden. Figuur 4.2 geeft de absolute en relatieve verandering weer in gemiddelde zoutstress langsheen het estuarium (in de simulatie met langdurig lage debieten).



Figuur 4.2 Absolute (links) en relatieve verandering (rechts) in gemiddelde zoutstress langsheen het estuarium. De gemiddelde zoutstress is hier berekend als het gemiddelde verschil tussen de maximale en minimale zoutconcentratie tijdens de analyseperiode van 1 maand.

De gemiddelde zoutstress is berekend als het gemiddelde verschil tussen de gesimuleerde maximale en minimale zoutconcentratie in een tijdbeweging gedurende een volledige maand (twee springtij-doodtij cycli). In de zone tussen km 40 en km 80-90 wordt een afname van de zoutstress gesimuleerd van 30-40% met een gesimuleerde maximale afname van de zoutstress van ca. 1,7 PSU. Dit betekent dat benthische organismen en schorvegetatie aan een aanzienlijk lager bereik aan zoutconcentraties blootgesteld worden. De toename van de gemiddelde zoutconcentratie in deze zone kan er voor zorgen dat benthische soorten met een voorkeur voor hogere zoutconcentraties dieper het estuarium binnendringen. De afname van de zoutstress kan er voor zorgen dat ook minder tolerante soorten kunnen voorkomen.

In de zone tussen km 80-90 en 120 neemt de gesimuleerde zoutstress toe met 10-15%, met een maximale toename van de zoutstress van ca. 1,7 PSU. In deze zone, die een deel van de zoete en de oligohaliene zone omvat, worden schorvegetatie en benthische organismen dus blootgesteld aan een hoger bereik aan zoutconcentraties. In deze zone is het daarom mogelijk dat soorten (benthos en vegetatie) die minder tolerant zijn aan fluctuaties in zoutconcentratie het moeilijker krijgen.

Omwille van de uitzonderlijke situatie van aaneengesloten periode van lage debieten die gesimuleerd werd, dient een belangrijke kanttekening gemaakt. Zoals in Bijlage C wordt uiteengezet, is waarschijnlijk het effect bij gemiddelde debieten op enerzijds de zoutconcentratie in de mesohaliene zone, en anderzijds op de zoutgradiënt groter dan gesimuleerd. We kunnen niet uitsluiten dat bij meer gemiddelde debieten de gradiënt en daarbij ook de zoutstress in de zone tussen km 40 en km 80-90 toeneemt in plaats van afneemt. In deze zone is het ecologisch belangrijke gebied van Saeftinge gelegen. Om de ecologische impact van de zoute spui Bath op dit gebied in te schatten is een simulatie met meer realistische debieten onontbeerlijk.

4.3 Ecologische effecten: zwevende stof

Het effect van de zoute spui Bath op de slibdynamica en het gehalte zwevende stof in de waterfase werd doorgerekend met het LTV-slibmodel. Resultaten worden weergegeven in Figuren 3.2 tot 3.9. De gesimuleerde effecten zijn zorgwekkend vanuit ecologisch standpunt.

4.3.1 Pelagiaal

Autotrofe primaire productie door microscopische algen vormt de basis van de voedselketen in het Schelde-estuarium. Deze algen, voornamelijk diatomeeën, zijn de voedselbron van zoöplankton en benthische organismen, die op hun beurt voedsel zijn voor vis en vogels.

De primaire productie door fytoplankton is in het Schelde-estuarium beperkt door de hoeveelheid licht die in de waterkolom kan doordringen. Het hoge gehalte zwevende stof is bepalend voor de beperkte lichtindringing. Een wijziging in de zwevende stof concentraties in de bovenste zone van de waterkolom heeft effect op de primaire productie in het estuarium.

In Figuur 3.8 wordt het gesimuleerde effect van de zoute spui Bath op de slibconcentratie aan de oppervlakte weergegeven. In een groot deel van de Westerschelde neemt de concentratie zwevende stof toe met meer dan 10%, in sommige zones tot 25%. Ook in de Beneden-Zeeschelde nabij de grens ontstaat een zone met gesimuleerde toename aan zwevende stofconcentratie. Dit zal onmiskenbaar een negatief effect hebben op de primaire productie.

In een groot deel van de Zeeschelde (ruwweg van Liefkenshoek tot Kruibeke) wordt een afname van de concentratie zwevende stof aan de oppervlakte gesimuleerd. Deze afname verhoogt de lichtbeschikbaarheid in de waterkolom en heeft in principe een positief effect op de primaire productie. Gezien de afname van de concentratie zwevende stof beperkt is (minder dan 5%) zal ook de toename in productie beperkt zijn. De licht verhoogde lichtbeschikbaarheid zal echter wel ten dele het effect van verhoogde zoutstress op de zuurstofdynamiek milderen.

De verhoging in zwevende stofconcentraties is groter in de Westerschelde dan de daling in de Zeeschelde. Bovendien is het relatieve belang van de Westerschelde in de totale productie groter dan dat van de Beneden-Zeeschelde, wegens de grote oppervlakte en watervolumes en de grotere lichtbeschikbaarheid. In de zoete Zeeschelde, waar ook hoge jaarlijkse primaire productie wordt waargenomen, worden geen effecten op zwevende stofconcentraties gesimuleerd. Daarom zal de totale netto jaarlijkse productie over het hele estuarium waarschijnlijk dalen.

4.3.2 Intertidaal

4.3.2.1 *Morfodynamiek schorren*

De verandering aan concentraties zwevende stof zal ook resulteren in een gewijzigde sedimentatiesnelheid op de slikken en schorren. Slikken en schorren zullen sneller aanslibben en ophogen bij hogere zwevende stofconcentraties, en mogelijk van vorm veranderen. Op Figuur 3.8 en 3.9 is dit effect goed te zien voor het slik- en schorgebied van Saeftinge. Binnen dat gebied zijn er zones waar de gesimuleerde slibconcentratie toeneemt, en waar de gesimuleerde slibconcentratie afneemt. Een wijziging in de morfodynamiek van schorren zal zich vertalen in een wijziging van de oppervlaktes slik, laag schor en hoog schor en de daarbij behorende habitats.

4.3.2.2 *Benthos*

Een verhoging van de sedimentconcentraties kan een verhoogde stress betekenen voor bepaalde soorten benthos. "Filter feeders" filteren hun voedsel (fytoplankton, zoöplankton) uit het overliggend water. "Suspension feeders" plukken hun voedsel selectief uit het overliggende water. De gesimuleerde toename van de concentratie zwevende stof bestaat uit een toename van het aantal minerale, inerte partikels in de waterfase, terwijl het aantal organische, eetbare partikels in de waterfase niet zal toenemen. Beide groepen benthische organismen zullen daarom nadeel ondervinden van de toegenomen zwevende stofconcentraties in de Westerschelde.

4.4 Indirecte effecten - amplificerend effect vaargeulonderhoud.

De verhoogde concentratie zwevende stof in het Deurganckdok (+8%) en aan de andere toegangen tot de Antwerpse haven, zal leiden tot een verhoogde baggeractiviteit. In dit opzicht zal de zoute spui Bath een amplificerend effect hebben op verschillende ecologische effecten die gepaard gaan met het onderhoud van de vaargeul naar de Antwerpse haven en de havendokken.

5 Conclusies

De simulatie-opzet bestond uit een inlooperperiode van 3 maanden met een continu bovendebiet van 50 m³/s, plus een analysemaand met eerst hetzelfde debiet en vervolgens afnemend tot ongeveer 20 m³/s. Deze lage debieten komen voor maar situaties dat dit 4 maanden lang onafgebroken voortduurt zijn uitzonderlijk. De simulaties geven dientengevolge de effecten op de zoutverdeling en slibhuishouding bij maximale zoutindringing. Ze geven *geen* indicatie van het mogelijke effect op de gemiddelde of modale zoutverdeling en slibhuishouding in de Schelde. De conclusies van de modelstudie samen met de gevolgtrekkingen voor de netto slibtransporten naar de havendokken en de ecologie moeten dan ook in dat opzicht geïnterpreteerd worden.

Het grotere spuidebiet via de Bathse spuisluis met een hogere zoutconcentratie heeft voor de onderzochte lage afvoerconditie de volgende effecten op de waterbeweging, zoutverdeling, slibhuishouding en ecologie:

- 1 De invloed op de waterstanden in het estuarium is verwaarloosbaar (enkele millimeters voor de gemiddelde waterstand).
- 2 De toename van de saliniteit in het estuarium is maximaal 2 tot 2,5 PSU (1 tot 1,5 g Cl/l). Deze toename treedt op bij Bath en Liefkenshoek en is 13% van de tijdsgemiddelde saliniteit van 15-20 PSU ter plaatse (8-11 g Cl/l). Hierbij neemt de gemiddelde longitudinale zoutgradiënt tussen Hansweert en Liefkenshoek af en opwaarts van Liefkenshoek toe. De zoutgradiënt is van invloed op de stroomsnelheden in het estuarium en daarmee op de slibtransporten.
- 3 De door het driedimensionale NEVLA-model berekende veranderingen in de tijdsgemiddelde zoutconcentratie komen goed overeen met de resultaten zoals die eerder door Rijkswaterstaat zijn verkregen met het tweedimensionale (dieptegemiddelde) Scaldis400-model. Deze uitkomst is in lijn met de verwachting, omdat het Schelde-estuarium voor wat betreft de zoutconcentraties goed gemengd is.
- 4 In de Westerschelde neemt de saliniteitsvariatie (het verschil tussen maximale en minimale saliniteit tijdens een getijperiode) af; in de Beneden-Zeeschelde neemt deze toe met 10-15%. De saliniteitsvariatie kan van invloed zijn op de wateruitwisseling met de havendokken en daarmee op het slibtransport.
- 5 Op de Boven-Zeeschelde neemt de maximale zoutconcentratie toe (13% in Schelle en afnemend in opwaartse richting) terwijl de minimale concentraties minder (4% toename in Schelle) of niet veranderen. De saliniteit opwaarts van Dendermonde wordt niet meer merkbaar beïnvloed door de gewijzigde spui bij Bath. De saliniteit die in Schelle in de T0 gedurende 50% van de tijdsduur wordt overschreden wordt in de T1 4 procentpunt langer overschreden, in Temse 3 procentpunt en in Sint-Amands 0,6 procentpunt. De getalsmatige veranderingen gelden voor de onderzochte condities (constante lage afvoeren gedurende enkele maanden) en kunnen anders zijn voor de gemiddelde condities gedurende een geheel jaar met ook hogere afvoeren en kleinere zoutindringing. Enige onzekerheid hier heeft betrekking op het feit dat het model wel is gecalibreerd met zoutmetingen langs de Beneden-Zeeschelde maar niet met metingen langs de Boven-Zeeschelde. Echter, verwacht wordt dat voor de relatieve effecten de modelvoorspellingen realistisch zijn.
- 6 De toename van de aanslibbing in de toegangsgeul naar de Zandvliet- en Berendrechtsluis is 3-4%. In de toegangsgeul naar de Kallosluis is sprake van een geringe afname van 1-2%. Deze veranderingen zijn vooral het gevolg van

veranderingen in de slibconcentratie omdat de wateruitwisseling tussen rivier en toegangsgeulen voor de T0 en de T1 niet verschilt.

- 7 In het Deurganckdok wordt een significante toename van de netto aanslibbing van 8% berekend. Deze toename is het gevolg van een sterkere wateruitwisseling tussen rivier en dok en een hogere slibconcentratie op de rivier voor de ingang van het dok. De aanslibbing en veranderingen hierin kunnen bij andere afvoercondities verschillen van bovengenoemde waarde. Jaarsimulaties met variërende afvoeren kunnen een representatiever beeld geven van de veranderingen in de jaarlijkse netto aanslibbing maar het uitvoeren van dergelijke langdurige simulaties is momenteel niet praktisch gelet op de grote rekentijden die hiermee gemoeid zouden zijn.
- 8 De bepaling van de verandering van het netto slibtransport van de Beneden-Zeeschelde via de Zandvliet- en Berendrechtssluisen naar het Antwerps Kanaalpand heeft een aantal onzekerheden. De veranderingen zijn waarschijnlijk klein (enkele procenten) waarbij sprake kan zijn van een toename of een afname. Door de iets grotere slibconcentraties op de rivier neemt het netto slibtransport toe maar deze toename kan worden gecompenseerd, of zelfs leiden tot een afname, door een kleiner watervolume dat in de nieuwe situatie wordt uitgewisseld tussen Zeeschelde en Kanaalpand. De onzekerheid hierin heeft betrekking op de bepaling van de saliniteit in het Kanaalpand en de grootte van de uitwisseling via de sluisen tijdens het schutten (wel of niet volledig per schutcyclus). Daarnaast zijn de effecten bij andere, vooral hogere, afvoeren niet bekend zodat de effecten op jaarbasis niet kunnen worden aangegeven.
- 9 De slibconcentratie op de Beneden-Zeeschelde ter hoogte van de Kallosluis verandert vrijwel niet zodat het netto slibtransport via de Kallosluis naar het havendok hierdoor ook weinig zal veranderen. Door de grotere saliniteitsvariatie op de Beneden-Zeeschelde kan wel het uitwisselingsvolume tussen rivier en havendok met 7% toenemen maar alleen als in de huidige situatie de sluiskolk niet volledig uitwisselt. Als dit laatste het geval is kan het netto slibtransport naar het havendok eveneens met maximaal 7% toenemen. Als er in de huidige situatie al sprake is van volledige uitwisseling zal er geen verdere toename plaatsvinden. Onzekerheden hebben betrekking op de grootte van de effecten bij hogere afvoeren (saliniteitsvariatie en slibconcentratie) en de grootte van de wateruitwisseling via de Kallosluis (wel of niet volledig in de huidige situatie).
- 10 De gewijzigde zoute spui Bath heeft effecten op de saliniteit en de zwevende stof in het estuarium. Beide effecten hebben een significante invloed op de ecologie. Zo stijgt de gemiddelde saliniteit, waardoor alle ecotopen opwaarts verschuiven. De polyhaliene zone breidt uit, zo'n 10 km, ten koste van de mesohaliene zone (-6 km) maar ook de oligohaliene (-2km) en zoete zone (-0.1km). Zo kan de grens voor het voorkomen van typische zoetwaterflora met 2 km opwaarts verschuiven, waardoor Kruibeke-Bazel-Rupelmonde mogelijks brakke vegetatie krijgt. Effecten in het zoete schor "De Notelaer" zijn ook niet uit te sluiten.
- 11 De zoutstress, zijnde het verschil tussen maximale en minimale saliniteit, neemt af in de polyhaliene zone, maar neemt toe in opwaartse gebieden. Tussen km 90 en 120 breidt de reeds aanwezige stresszone uit en is er potentieel een langer traject waarin respiratie domineert en dus zuurstof in dalende lijn is. Dit kan resulteren in een zuurstofdip.
- 12 In een groot deel van de Westerschelde neemt de concentratie zwevende stof toe met meer dan 10%, in sommige zones tot 25%. Dit zal een negatief effect hebben op de primaire productie, die in hoofdzaak lichtgelimiteerd is. In de grote delen van de brakke Zeeschelde is er een afname, zij het beperkter (minder dan 5%) van de zwevende stof nabij het oppervlak. Een toename van primaire productie kan hier verwacht worden (maar kan deels teniet gedaan worden door vergrote zoutstress). In de zoete

Zeeschelde worden geen effecten verwacht. Gezien de sterkere stijging van zwevende stof in de Westerschelde en het relatief grotere aandeel van de Westerschelde in de totale productie, kan de totale netto jaarlijkse productie over het hele estuarium zorgwekkend dalen.

- 13 Bovenvermelde effecten voor de ecologie (conclusie 10 t/m 12) gelden enkel bij de uitgangssituatie van de modelstudie: een uitzonderlijk langdurige periode van lage debieten. Bij meer gemiddelde uitgangssituaties zullen de effecten anders zijn. Tijdens perioden met hogere debieten liggen de saliniteitszones op andere locaties en de veranderingen hierin kunnen verschillen van die voor de lage afvoersituatie. Zo schuift de bovengrens van de oligohaliene zone ($3 \text{ g Cl}^-/\text{l}$) voor de hoge afvoersituatie, zoals bestudeerd met SCALDIS400 (2001), meer op dan voor het jaar 1990 met een gemiddeld lage afvoer al is de zone zelf wel meer afwaarts gelegen. Verder zal een grotere saliniteitsgradiënt tijdens een periode met hogere debieten leiden tot een grotere saliniteitsvariatie en daardoor tot meer zoutstress. Wat de kwantitatieve effecten op de zwevende stof concentratie bij hoge afvoeren zullen zijn, kunnen a priori niet worden aangegeven. Het estuarine turbiditeitsmaximum zal meer afwaarts komen te liggen en mogelijk schuiven de gebieden met een toe- of afname in zwevende stof concentratie mee.

6 Referenties

Huppert, Herbert E., John E. Simpson, 1980. The slumping of gravity currents. J. Fluid Mech., vol. 99, part 4, pp. 785-799.

Rijkswaterstaat, dienst Zeeland, 2012. Milieueffectrapportage Waterkwaliteit Volkerak-Zoommeer. Ontwerp-MER.

Stad Antwerpen – Havenbedrijf – Technische Dienst, Havenwerktuigen, 1995. Samenvatting waterhuishouding 1995. Notitie JDB\TR\Wh000010.

Taverniers, ir. Eric, dr. Frank Mostaert (heruitgave oktober 2009). Overzicht van de Tijwaarnemingen in het Zeescheldebekken gedurende het decennium 1991-2000: T.O. Tijwaarnemingen Zeescheldebekken 1991-2000. Versie 2_0. WL Rapporten, 833_01. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België

Van Kessel, T., J. Vanlede, A. Bruens, 2006. Development of a mud transport model for the Scheldt estuary in the framework of LTV. WL | Delft Hydraulics & WL Borgerhout report Z4210.

Van Kessel, T., J. Vanlede, J. de Kok, 2007. Development of a mud transport model for the Scheldt estuary in the framework of LTV. Phase 1. WL | Delft Hydraulics & WL Borgerhout report Z4375.

Van Kessel, T., J. Vanlede, M. Eleveld, D. van der Wal, 2008. Mud transport model for the Scheldt estuary in the framework of LTV. Deltares report Z4594, Delft, The Netherlands.

Van Kessel, T., J. Vanlede, 2009. Impact of harbour basins on mud dynamics Scheldt estuary In the framework of LTV. Deltares & WL Borgerhout report 1200253.

Van Kessel, T., J. Vanlede, J.M. de Kok, 2010. Development of a mud transport model for the Scheldt estuary. Continental Shelf Research. doi: 10.1016/j.csr.2010.12.006.

Van Kessel, T. J. Vanlede, M.A. Eleveld, D. van der Wal, B. De Maerschalck, 2011. Validation and Application of Mud Model Scheldt Estuary in the framework of LTV. Deltares & WL Borgerhout & NIOO & IVM report no. 1202021

Vanlede, J., Decrop, B., De Clercq, B., Ides, S., De Mulder, T., Mostaert, F., 2008. Permanente verbetering modelinstrumentarium: verbetering randvoorwaardenmodel. Deel 1: gevoeligheidsonderzoek. WL Rapporten, 753_09. Flanders Hydraulics Research, Antwerp, Belgium.

Van Pagee, Hans, Leen Dekker, Piet Lievense, 2009. Gevolgen van een zout Volkerak-Zoommeer voor het Antwerps Kanaalpand en het Schelde Estuarium. Planstudie Waterkwaliteit Volkerak-Zoommeer. Rijkswaterstaat-Waterdienst. Eind-concept.

Verheyen, B.; Vanlede, J.; Decrop, B.; Verwaest, T.; Mostaert, F., 2013. Verbetering randvoorwaardenmodel: Deelrapport 5 – Actualisatie van het 3D Scheldemodel. Version 2_0. WL Rapporten, 00_018. Flanders Hydraulics. Research & IMDC: Antwerp, Belgium.

Wal D. van der, T. van Kessel, M.A. Eleveld, J. Vanlede, 2010. Spatial heterogeneity in estuarine mud dynamics. . Ocean Dynamics doi:10.1007/s10236-010-0271-9.

Winterwerp, J.C., 1997. Slibtransport via zeesluizen; Zandvlietsluis en Berendrechtlsuis. Rapport Z2320. Waterloopkundig Laboratorium | WL.

A Water- en zoutbalans Antwerps Kanaalpand

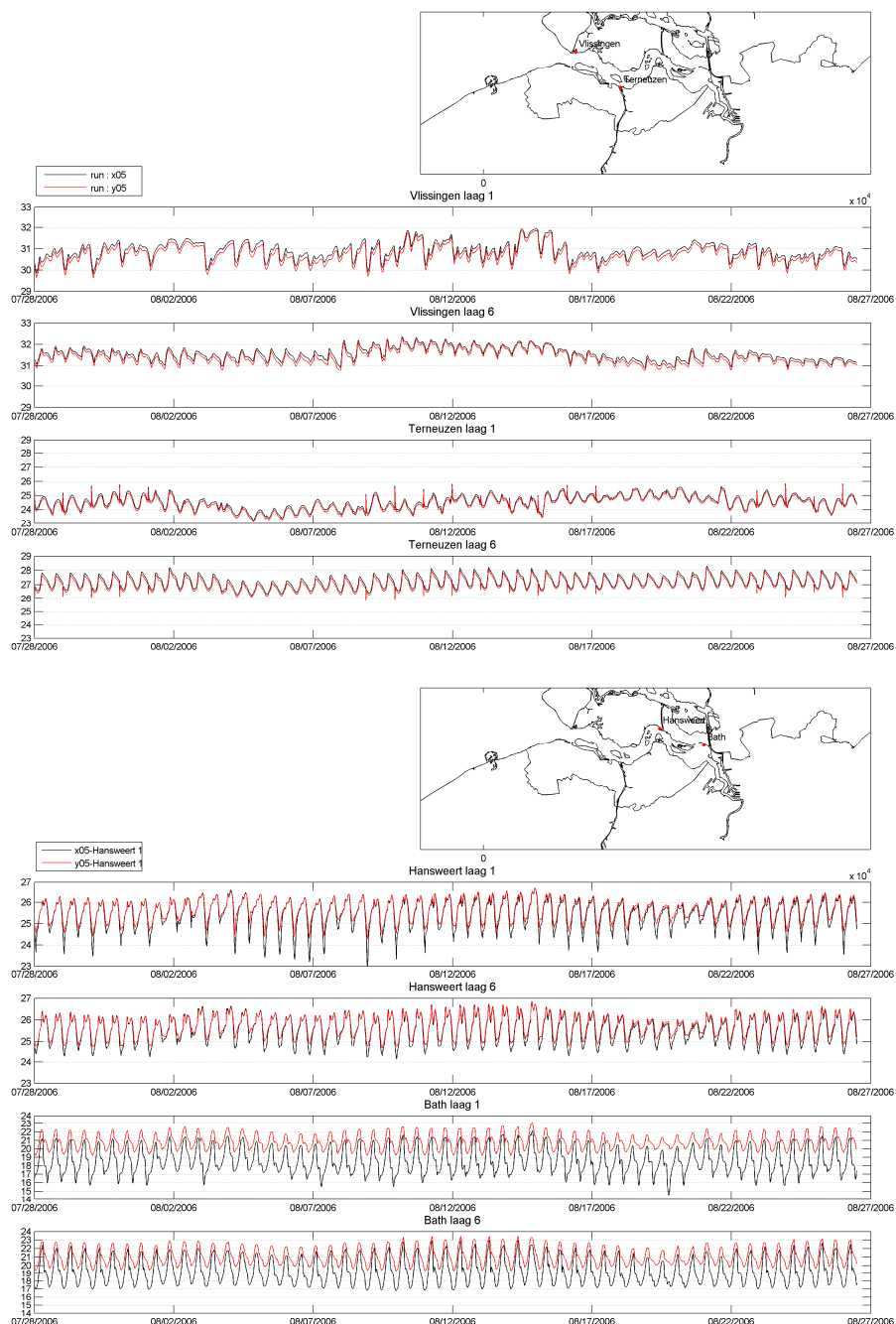
Tabel A.1: Water- en zoutbalans voor T0 (gebaseerd op van Pagee et al., 2009).

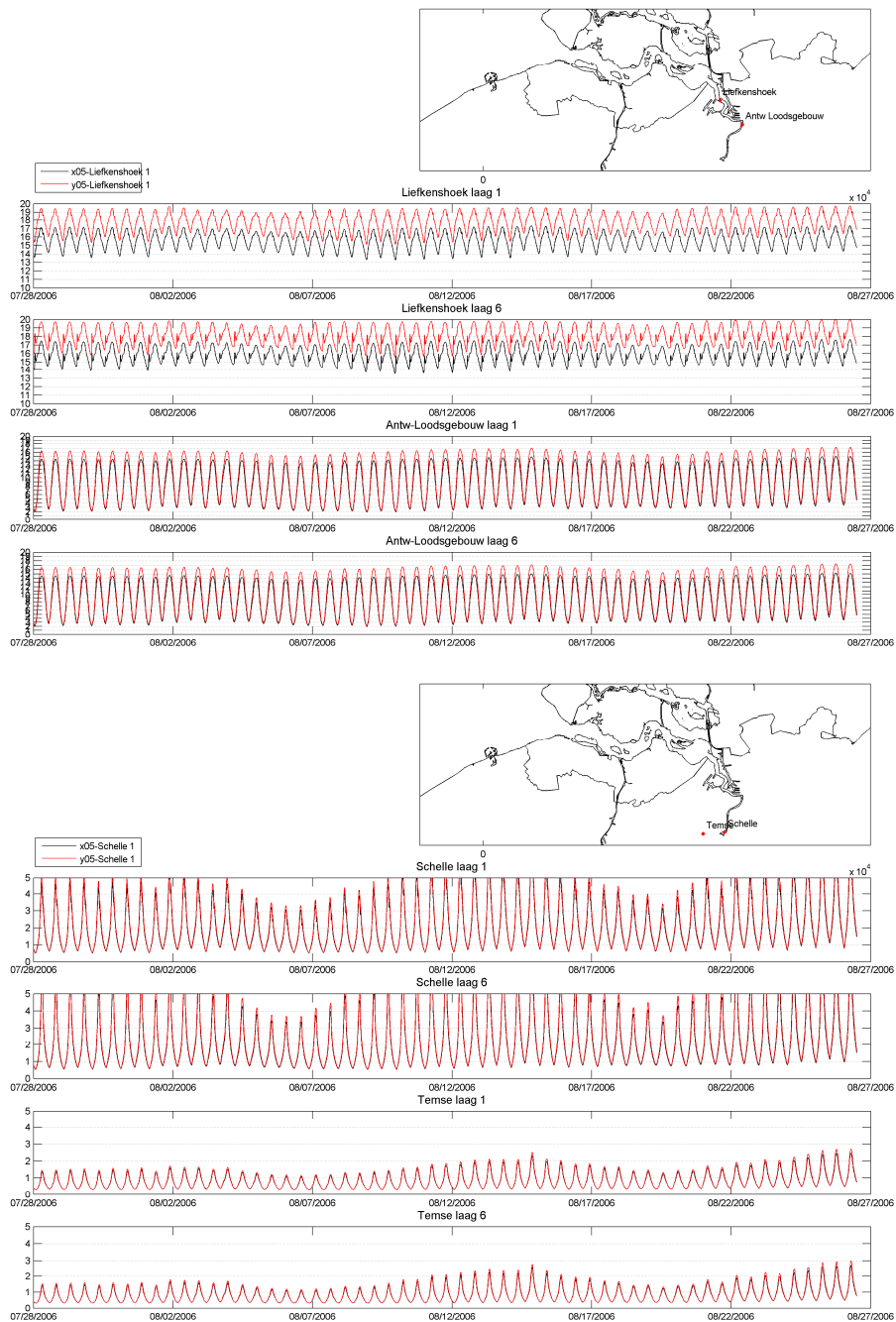
T0: huidige situatie						
	water-in	water-in	Sal-in	Sal-in	water-uit	water-uit
Bron	[Mm3/jr]	[m3/s]	[PSU]	[g/s]	[Mm3/jr]	[m3/s]
Kreekraksluis		-9.0	0.7	-6480		
Zoommeer (pomp)		12.5	0.7	9000		
Berendrechtlsuis	110	3.5	17.2	59712	-169.2	-5.4
Zandvlietlsuis	3	0.1	17.2	1740	-194.1	-6.2
Boudewijnsuis	2	0.0	17.2	816	-90.0	-2.9
Van Cauwelaertsluis	0	0.0	17.2	0	-59.5	-1.9
Royerssluis	0	0.0	17.2	0	-30.3	-1.0
lozingen	71	2.2	0.2	404		
Albertkanaal	363	11.5	0.2	2073		
extra in-/uitlaat (sluitpost)						-3.7
uitwisseling via schutten Beneden-ZS: chloride-concentratie uit NEVLA-model		30.0	17.2	514500		-30.0
Totaal		50.9		581765		-50.9
Berekende saliniteit Kanaalpand:			11.4	PSU		

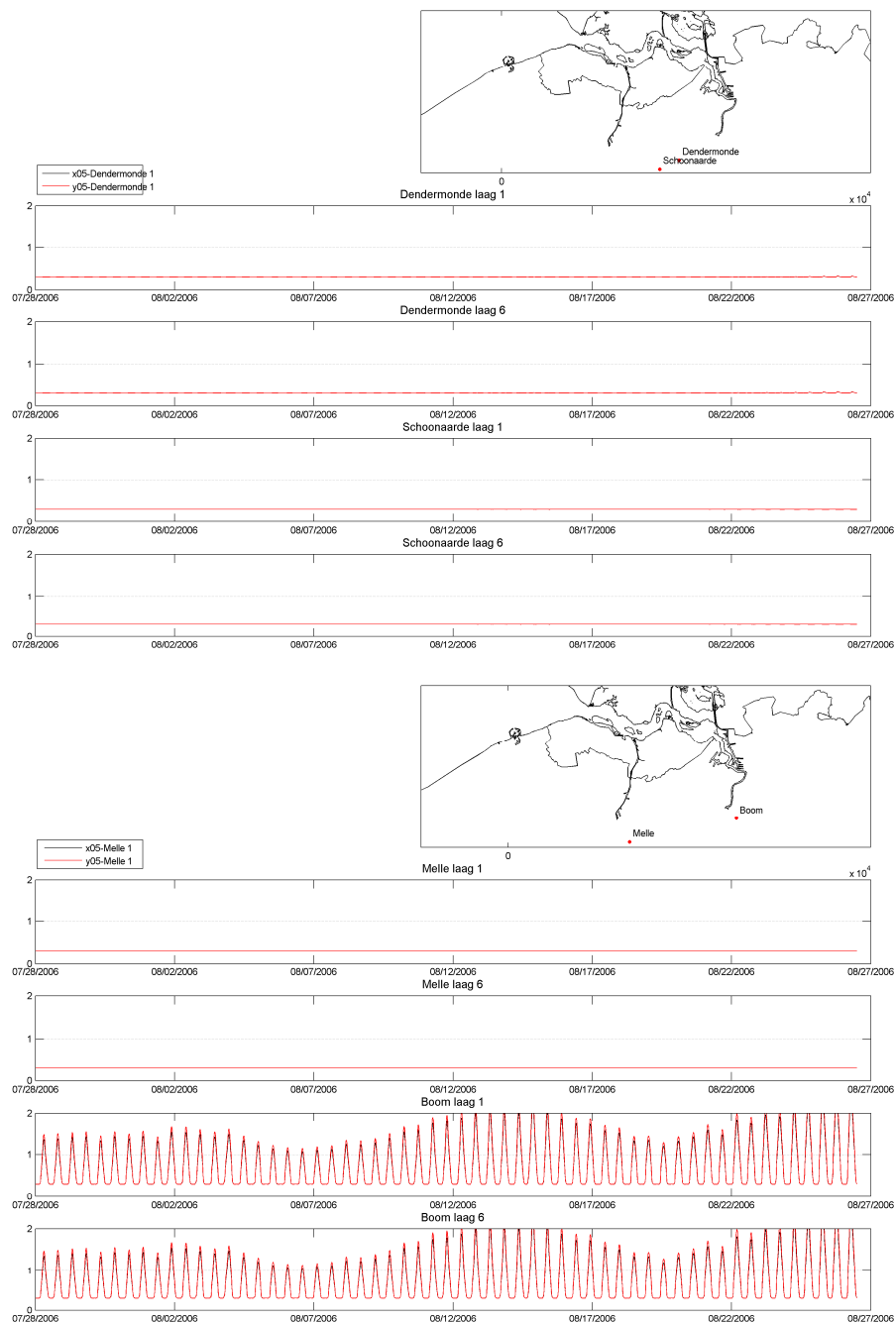
Tabel A.2: Water- en zoutbalans voor T1 (gebaseerd op van Pagee et al., 2009).

T1: zout VZM						
	water-in	water-in	Sal-in	Sal-in	water-uit	water-uit
Bron	[Mm3/jr]	[m3/s]	[PSU]	[g/s]	[Mm3/jr]	[m3/s]
Kreekraksluis		-9.0	24.0	-216000		
Zoommeer (pomp)		12.5	24.0	300000		
Berendrechtlsuis	110	3.5	19.4	67372	-169.2	-5.4
Zandvlietlsuis	3	0.1	19.4	1963	-194.1	-6.2
Boudewijnsuis	2	0.0	19.4	920	-90.0	-2.9
Van Cauwelaertsluis	0	0.0	19.4	0	-59.5	-1.9
Royerssluis	0	0.0	19.4	0	-30.3	-1.0
lozingen	71	2.2	0.2	404		
Albertkanaal	363	11.5	0.2	2073		
extra in-/uitlaat (sluitpost)						-3.7
uitwisseling via schutten Beneden-ZS: chloride-concentratie uit NEVLA-model		30.0	19.4	580500		-30.0
Totaal		50.9		737233		-50.9
Berekende saliniteit Kanaalpand:			14.5	PSU		

B Tijdsreeksen saliniteiten



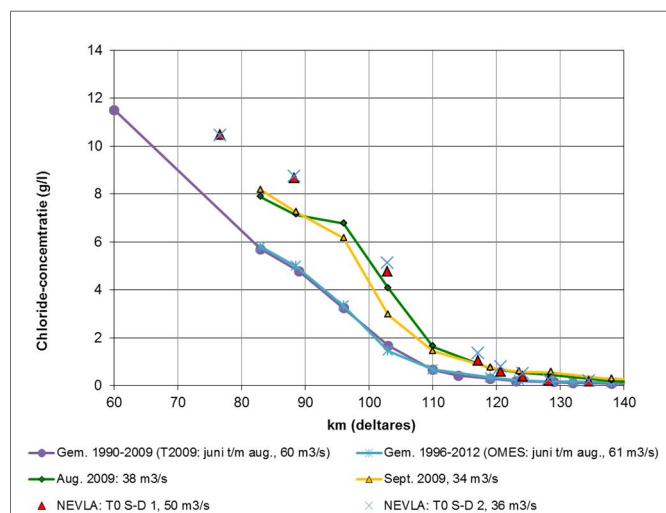




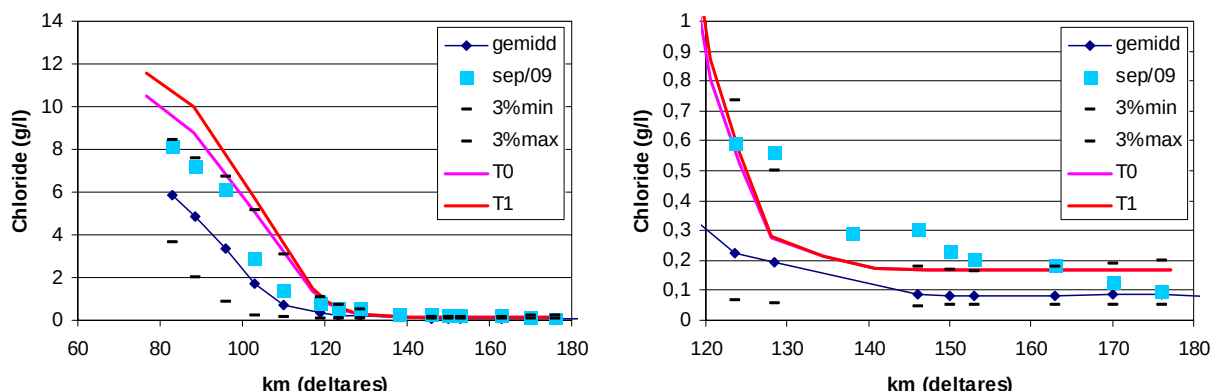
C Representativiteit uitgevoerde simulaties

De simulatie-opzet bestond uit een inlooperperiode van 3 maanden met een continu bovendebiet van 50 m³/s, plus een analysemaand met eerst hetzelfde debiet en vervolgens afnemend tot ongeveer 20 m³/s. M.a.w. dit is een scenario met een lange, aaneengesloten periode van lage bovendebieten, een situatie waarin zout spontaan reeds ver stroomopwaarts zal migreren in het estuarium. Deze situatie komt in werkelijkheid voor, maar slechts zelden. In de periode 1996-2012 komen slechts 2 perioden voor met langdurige (4 maanden) lage debieten: 2009 en 2010, waarbij enkel 2009 de situatie uit de simulatie benadert. De resultaten van de scenariostudie (T0, T1) moeten dan ook in dat opzicht geïnterpreteerd worden. Ze geven een indicatie van het mogelijke effect van verhoging van debiet en saliniteit van zoute spui te Bath op de zoutconcentraties in de Schelde *na een aaneengesloten periode van lage bovendebieten*. Anders gezegd: de simulatie geeft een indicatie voor het effect op de maximale zoutindringing in geval van een langdurig minimaal bovendebiet. Ze geeft *geen* indicatie van het mogelijke effect op de gemiddelde of modale zoutverdeling in de Schelde.

De vuistregel zegt dat modellen goed zijn in het simuleren van normale of gemiddelde omstandigheden, maar niet goed in het simuleren van uitzonderlijke situaties. Daarom bekijken we meer in detail hoe de model-output zich verhoudt tot de observaties. Zoals te verwachten zijn de waargenomen langetermijngemiddelde zoutconcentraties veel lager dan de gesimuleerde zoutconcentraties in T0 (Figuren C.1 en C.2).



Figuur C.1: Overeenkomst tussen gesimuleerde (symbolen). langetermijngemiddelde waargenomen chlorideconcentraties (paarse en blauwe lijn) en observaties augustus en september 2009 (groene en gele lijn).

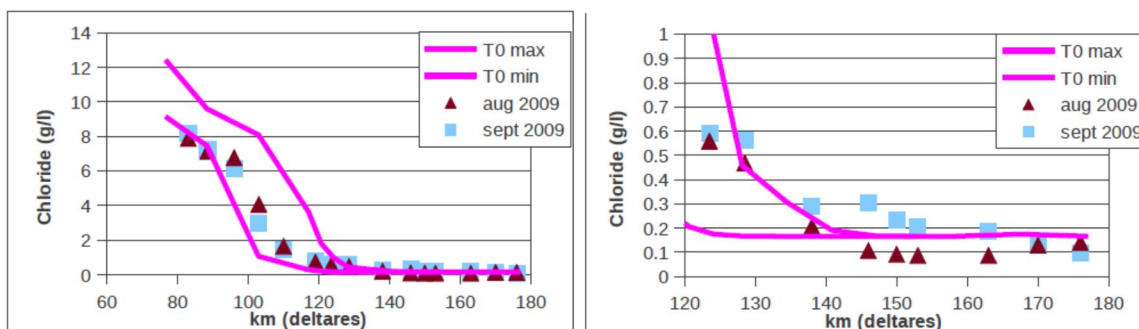


Figuur C.2 Overeenkomst tussen gesimuleerde en waargenomen chlorideconcentraties. Gemiddelde en 3%-percentielen werden bepaald op alle OMES-data uit de zomermaanden (jun-sep) van 1996-2012. Omdat de debieten van juni tot september 2009 representatief waren voor het gesimuleerde continue lage debiet van 40 m³/s (resp. 57, 54, 37, 34 m³/s te Schelle), worden ook observaties van september 2009 weergegeven. Links: de hele Zeeschelde. Rechts: ingezoomd op het oligohaliene en zoete deel van de Zeeschelde.

Om de geldigheid van de simulatieresultaten na te gaan moeten ze vergeleken worden met de waargenomen concentraties in een gelijkaardige situatie, d.w.z. een periode met een aantal opeenvolgende maanden van laag bovendebiet. In Figuur C.2 worden gesimuleerde concentratieprofielen vergeleken met geobserveerde waarden in september 2009. De debieten te Schelle bedroegen van juni tot september 2009 respectievelijk 57, 54, 37, 34 m³/s. Dit kan als representatief beschouwd worden voor het gesimuleerde continue lage debiet van gemiddeld 40 m³/s tijdens de gehele simulatieperiode incl. inspelen. In Figuur C.2 worden gesimuleerde concentraties eveneens vergeleken met de langetermijngemiddelde observaties en met de 3%-percentielen. Immers, gezien de simulatie-opzet zouden de gesimuleerde zoutconcentraties representatief moeten zijn voor de maximaal waargenomen zoutconcentraties langsheen de hele zoutgradiënt.

Hierbij dient opgemerkt te worden wat betreft de simulatieresultaten dat de tijdsgemiddelde zoutconcentratie over de analyseperiode van 1 maand wordt weergegeven. De observaties zijn afkomstig uit een ongekende fase van het getij, dus ergens tussen hoog water en laag water concentratie gelegen. Gezien uitgemiddeld wordt over verschillende jaren van minstens maandelijkse tij-onafhankelijke metingen, wordt dit tij-effect onbelangrijk wanneer we kijken naar gemiddelde concentraties tussen 1996 en 2012. Wat betreft de 3%-percentielen kunnen we ervan uitgaan dat observaties nabij hoog tij of laag tij plaats vonden. Dat de simulatieresultaten voor gemiddeld getij eerder gelijk lopen met het bovenste 3% percentiel van de observaties bevestigt dat de simulatie-opzet een uitzonderlijke situatie voorstelt.

Gezien de metingen op een willekeurig moment in de tijbeweging gebeurden, kunnen we ze moeilijk vergelijken met de gemiddelde gesimuleerde zoutconcentratie. Indien de simulatie representatief is voor de situatie in 2009, moeten de opgemeten zoutconcentraties wel tussen de gesimuleerde maximale en minimale zoutconcentratie in een tijbeweging liggen. In Figuur C.3 worden de metingen weergegeven samen met de maximale en minimale gesimuleerde zoutconcentratie. De metingen in augustus 2009 werden 2 à 3 dagen na springtij uitgevoerd: in de Beneden-Zeeschelde gemiddeld 3 uur na HW, in de Boven-Zeeschelde ca 3 uur voor HW. De metingen in september geschieden rond springtij: in de Beneden-Zeeschelde gemiddeld 3 uur voor LW, in de Boven-Zeeschelde ca 1 uur na HW.



Figuur C.3 Overeenkomst tussen gesimuleerde en waargenomen zoutconcentraties. Gesimuleerde minimale en maximale zoutconcentraties binnen een tijdbeweging worden getoond. Metingen gebeurden op een willekeurig moment binnen een tijdbeweging. Links: de hele Zeeschelde. Rechts: ingezoomd op het oligohaliene en zoete deel van de Zeeschelde

We kunnen een aantal besluiten trekken uit Figuren C.2 en C.3. In de mesohaliene zone (3-11 g Cl/l) worden hogere zoutconcentraties gesimuleerd dan degene die geobserveerd werden in 2009 (km 80 – km 100). Dit geldt zowel wanneer we kijken naar de maximaal waargenomen concentraties in de periode 1996-2012 (3% percentielen), als voor de situatie 2009 waarbij de werkelijke afvoerdebieten gelijkaardig zijn aan de gemodelleerde afvoerdebieten (Figuur C.2).

Wanneer we inzoomen op de oligohaliene (0,3-3 g Cl/l) en zoete zone (<0,3 g Cl/l) zien we een gemengd beeld. Ten eerste vertoont de gesimuleerde zoutconcentratie een afvlakking, ruwweg vanaf km 140, een afvlakking naar een waarde van ongeveer 0.18 g/l. In 2009 was de chlorideconcentratie aan de bovengrens lager, zowel in augustus en september. We stellen ook vast dat de waarnemingen in tegenstelling tot de simulaties niet monotoon stijgen. Dit zou kunnen wijzen op een bovenstroomse randvoorwaarde die niet overeenstemt met de werkelijkheid. Het zou er ook op kunnen wijzen dat het model een stationaire toestand simuleert die in de werkelijkheid nooit bereikt wordt. In ieder geval wijst dit er op dat het model minder nauwkeurig is in de oligohaliene en zoete zone.

Ten tweede worden in de oligohaliene en zoete zone de zoutconcentraties mogelijk onderschat. In september 2009, dat qua debietsregime het dichtst in de buurt zou moeten komen met de gesimuleerde debieten, worden concentraties onderschat over een zone van 30 km (van km 125 tot 155). De maximale onderschatting van de gemiddelde concentratie is ongeveer 0.3 g/l of 100% van de geobserveerde concentratie (rond km 130, Figuur C.2). Rond km 130 werd de chloridemeting immers rond halftij uitgevoerd, dit is wanneer de chloride waarden ook ergens halfweg de minima van laagwater en de maxima van hoogwater liggen.

Figuren C.1 en C.2 illustreren ook dat het gesimuleerde verschil tussen T0 en T1 veel kleiner is dan de natuurlijke variatie, bijvoorbeeld het verschil tussen de langjarig-gemiddelde zoutverdeling en de zoutverdeling in de maanden augustus en september 2009. Hierbij dienen twee kanttekeningen gemaakt. Ten eerste is voor sommige ecologische processen de maximale zoutconcentratie van belang. De simulatie-opzet was onder meer in dit opzicht gekozen en had tot doel het effect op de maximale zoutconcentratie in de oligohaliene en zoete zone van de Schelde te bestuderen.

Ten tweede echter wordt door deze simulatie-opzet waarschijnlijk het verschil tussen T0 en T1 onderschat. Immers, in een meer typische of modale situatie zijn de T0-zoutconcentraties in het estuarium veel lager dan de zoutconcentratie die door de zoute spui in het estuarium zal worden gebracht (24 PSU). Met de huidige simulaties is de T0 concentratie nabij Bath ongeveer 18 PSU, de T1 concentratie nabij Bath ongeveer 21 PSU. Gemiddeld echter is de zoutconcentratie nabij Bath eerder van de grootte-orde van 15 PSU (of een chloride-gehalte van 8 g/l, Figuur C.1). Indien we er in een eerste benadering vanuit gaan dat het om de menging van twee watervolumes met verschillende saliniteit gaat, dan leiden we hieruit af dat bij een gemiddelde situatie, de T1-concentratie nabij Bath ongeveer 19,5 PSU wordt, of een stijging in absolute termen van 4,5 PSU. Deze back-of-the-envelope berekening is uiterst benaderend, maar geeft wel het principe weer: in absolute termen zal de zoutconcentratie gemiddeld gezien (veel) sterker stijgen dan met het huidige simulatie-opzet berekend wordt, en zal de mesohaliene zone (veel) meer uitbreiden dan gesimuleerd.

Dit heeft ook gevolgen voor het verwacht effect op de zoutgradiënt, de overgang van zoet naar zout. De gesimuleerde zoutgradiënt in de Beneden-Zeeschelde is groter in T1 dan in T0 (Figuur C.2, km 80 tot km 120). M.a.w. de overgang van zoet naar zout vindt plaats over een kortere afstand; voor organismen die met de stroming mee worden genomen vindt deze overgang dus plaats in een kortere tijd. Binnen dezelfde back-of-the-envelope berekening zal de toename van de gradiënt voor modale condities groter zijn dan gesimuleerd. Ook wat betreft de zoutgradiënt is het verschil tussen T0 en T1 voor modale condities gemiddeld waarschijnlijk groter dan gesimuleerd bij de lage afvoeren.

Dit heeft op zijn beurt gevolgen voor de zoutconcentraties in de oligohaliene en zoete zones. Als de gradiënt groter is, dan zal ook de stroomopwaartse dispersie van zout groter zijn. Het gevolg hiervan is dat bij minder uitzonderlijke debieten de verschuiving (tussen T0 en T1) van de ruimtelijke grenzen van de oligohaliene en zoete zone groter kan zijn dan met de huidige simulatie-opzet. Ook de gemiddelde zoutconcentratie in de zoete zone kan sterker toenemen dan in de huidige studie. De meer realistische, hogere debieten werken anderzijds de verhoogde dispersieve zoutindringing tegen. Het netto-effect kunnen we niet inschatten met een back-of-the-envelope berekening. Uit bovenstaande leren we dat de modelresultaten met de nodige omzichtigheid geïnterpreteerd moeten worden, gelet op de uitzonderlijkheid van de uitgangssituatie, om algemene uitspraken te doen. Dit geldt voor de zoutconcentraties, maar evenzeer voor de hieruit afgeleide berekeningen voor zwevende stof.

Eenzijds geeft de scenario-studie enkel een indicatie van het mogelijke effect van de zoute spui in Bath op de zoutconcentraties in de Schelde na een aaneengesloten periode van lage bovendebieten. De ecologische impact van de gesimuleerde effecten van de zoute spui Bath op deze uitzonderlijke situatie wordt in Hoofdstuk 4 besproken.

Een gesimuleerd bovenstrooms debiet van $40\text{ m}^3/\text{s}$ is wel degelijk representatief voor een modale zomermaand. Vier opeenvolgende maanden met een debiet van $40\text{ m}^3/\text{s}$ is echter zeer uitzonderlijk. Een simulatiestudie met hogere afvoeren tijdens de aanloopperiode is nodig om het effect op een meer gemiddelde of modale zomersituatie in te schatten. Dit is in het bijzonder nodig voor de effecten op de mesohaliene zone van het estuarium. Maar ook de impact op de zoutgradiënt en de gemiddelde zoutconcentraties in de oligohaliene en zoete zone is waarschijnlijk groter dan wat volgt uit de huidige simulatiestudie. De T0 simulatiresultaten zijn specifiek afwijkend voor de oligohaliene en zoete zone van het estuarium: de gesimuleerde maximale zoutconcentraties liggen onder de waargenomen maxima bij gelijkaardig debiet. Het verschil is van de grootte-orde van 0.1 g/l. Het

gesimuleerde effect van zoute spui Bath is veel kleiner dan het verschil tussen gesimuleerde zoutconcentraties in de T0 referentieberekening en waargenomen zoutconcentraties. Daarom moeten we een voldoende grote veiligheidsmarge inbouwen wanneer we het gesimuleerde effect van de zoute spui Bath op de oligohaliene en zoete zone willen vertalen naar een verwacht effect.