

us 1952

September 1952

MIN. PH	MAX. No. 02	
	AM	PM
19.00	6.10	—
20-30	6.00	6.05
21.40	5.75	5.40
23.00	5.80	6.85
23-55	7.00	7.25
—	7.15	7.85
12-48	9.20	8.15
13-17	8.20	8.20
13-59	8.60	8.20
15-00	9.20	9.40

DAT.	TIIJ MAX.		TIIJ MIN.		MAX. No. 02		MIN. No. 02	
	A.H.	P.H.	A.H.	P.H.	A.H.	P.H.	A.H.	P.H.
1	1.15	14.35	—	21.45	5.20	5.55	1.38	1.42
2	3.15	15.35	9.29	—	5.95	6.10	1.68	1.75
3	—	16.13	10.55	20.15	6.15	6.20	1.79	1.65
4	4.50	—	—	—	—	—	—	—
5	5.50	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—
7	7.10	19.10	—	—	—	—	—	—
8	7.55	20.10	—	—	—	—	—	—
9	8.45	20.10	—	—	—	—	—	—



Vlaanderen  
is wetenschap



19\_081\_2  
WL rapporten

# Saliniteitsgradiënt in het Schelde-estuarium

Deelrapport 2 – Scenario analyse numerieke modellering

DEPARTEMENT  
MOBILITEIT &  
OPENBARE  
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

# Saliniteitsgradiënt in het Schelde-estuarium

## Deelrapport 2 – Scenario analyse numerieke modellering

Smolders, S.; Kaptein, S.

### Juridische kennisgeving

Het Waterbouwkundig Laboratorium is van mening dat de informatie en standpunten in dit rapport onderbouwd worden door de op het moment van schrijven beschikbare gegevens en kennis.  
De standpunten in deze publicatie zijn deze van het Waterbouwkundig Laboratorium en geven niet noodzakelijk de mening weer van de Vlaamse overheid of één van haar instellingen.  
Het Waterbouwkundig Laboratorium noch iedere persoon of bedrijf optredend namens het Waterbouwkundig Laboratorium is aansprakelijk voor het gebruik dat gemaakt wordt van de informatie uit dit rapport of voor verlies of schade die eruit voortvloeit.

### Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2024  
D/2024/3241/083

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

**Smolders, S.; Kaptein, S.** (2024). Saliniteitsgradiënt in het Schelde-estuarium: Deelrapport 2 – Scenario analyse numerieke modellering. Versie 4.0. WL Rapporten, 19\_081\_2. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Overname uit en verwijzingen naar deze publicatie worden aangemoedigd, mits correcte bronvermelding.

### Documentidentificatie

Oprachtgever:	Laurens Hermans, afdeling Maritieme Toegang	Ref.:	WL2024R19_081_2
Trefwoorden (3-5):	Numerieke modellering; TELEMAC; zoutinrusie; scenario analyse		
Kennisdomeinen:	Hydraulica en sediment > Hydrodynamica > Zouttong > Numerieke modelleringen		
Tekst (p.):	37	Bijlagen (p.):	5
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

Auteur(s):	Smolders, S.
------------	--------------

### Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Kaptein, S.	Getekend door: Steven Kaptein (Signatur) Getekend op: 2024-06-21 10:08:01 +02:00 Reden: lk keur dit document goed  
Projectleider:	Smolders, S.	Getekend door: Sven Smolders (Signature) Getekend op: 2024-06-23 09:33:03 +02:00 Reden: lk keur dit document goed  

### Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door: Abdelkarim Bellafkih (Sign) Getekend op: 2024-06-23 20:56:33 +02:00 Reden: lk keur dit document goed  
-----------------	---------------	---

## Abstract

Zoutindringing in het Schelde estuarium wordt in dit rapport bestudeerd door het vergelijken van verschillende scenario's met een referentie simulatie. Als referentie werd een afgeslankte versie van het SCALDIS Schelde model genomen. Van dat model is aangetoond dat het in staat is de saliniteit en de variaties ervan in het estuarium goed te reproduceren. Via scenario's wordt onderzocht wat het effect van zeespiegelstijging (0,5 en 1 m), verschillende debieten bovenafvoer en een andere bathymetrie (die van 1960) op de zoutindringing in vergelijking met de referentiesimulatie. Zoveel mogelijk modelparameters worden constant gehouden en enkel voor de te onderzoeken effecten worden parameters aangepast.

De scenario's met een zeespiegelstijging van 0,5 en 1 m tonen aan dat het zout in vergelijking met de referentie situatie verder in het estuarium binnen dringt. Hierbij moet de kanttekening gemaakt worden dat deze oefening gemaakt werd op de huidige bathymetrie (SCALDIS model 2013). Zo kan een meegroeivende bathymetrie met de zeespiegel er mogelijks voor zorgen dat het getij niet noodzakelijk verder in het estuarium zal doordringen en dan zal ook de zoutgradiënt mogelijks minder opschuiven.

Verder blijkt dat bovenafvoer een zeer grote invloed heeft op zoutindringing. Er is een duidelijke relatie tussen het volume bovenafvoer en de lengte van zoutindringing. Echter, hoe verder afwaarts, des te ruimer het estuarium zal zijn, en des te meer volume zoetwater nodig is om het zout verder afwaarts te verplaatsen/uit te spoelen. Er is dus telkens veel meer zoetwater nodig om het zout nog verder afwaarts uit te spoelen.

Als laatste scenario werd de bathymetrie van 1960 in het model geïmplementeerd. Deze kent een geringere diepgang in het algemeen, vooral in de Zeeschelde. Op deze manier kan de invloed van diepgang ende daarmee gepaard gaande getijvolume, op zoutindringing bekeken worden. Het zout drong minder ver door in het estuarium in het model met de bathymetrie van 1960.

Tenslotte werd nog een korte oefening gemaakt door de jaren 1947 en 1949 ruw te simuleren door de randvoorwaarden (getij en bovenafvoer) naar deze jaren aan te passen in het model met de bathymetrie van 1960. Deze ruwe oefening toont aan dat de saliniteitswaarden te Antwerpen wel degelijk de hoge gemeten waarden benaderen die in die jaren opgemeten zijn. Enkele maanden met minimale of geen bovenafvoer zorgden voor de hoogst gemeten saliniteitswaarden te Antwerpen in de laatste honderd jaar en de modeloefening bevestigt dit in grootteorde.

# Inhoudstafel

Abstract .....	III
Inhoudstafel.....	IV
Lijst van de tabellen.....	V
Lijst van de figuren .....	VI
1 Eenheden en referentievlakken .....	1
2 Inleiding .....	2
3 Modelbeschrijving .....	3
3.1 Het originele SCALDIS model .....	3
3.2 SCALDIS aangepast voor zoutscenario's .....	11
4 Scenario analyse .....	13
4.1 Referentie simulatie .....	13
4.1.1 Opbouw referentie simulatie .....	13
4.1.2 resultaten referentie simulatie.....	14
4.1.3 Effect springtij of doodtij .....	17
4.1.4 Effect springtij-doodtij cyclus .....	19
4.1.5 Effect zoutconcentratie van de afwaartse rand .....	21
4.2 Zeespiegelstijging .....	23
4.3 Effect bovenafvoer .....	25
4.4 Effect bathymetrie .....	28
4.5 Saliniteit 1947 en 1949 .....	31
4.5.1 modelbeschrijving.....	31
4.5.2 resultaten.....	31
5 Conclusies .....	36
Referenties .....	37
Bijlage 1 Model parameter waarden SCALDIS .....	B1
Bijlage 2 Diffusie in een numeriek model .....	B3

## Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Bias en RMSE waarden voor de volledige tijdreeks (3 maanden) model versus gemeten waarden voor de verschillende meetpunten langsheen het estuarium. (Run SCALDIS_039_2) (Tabel overgenomen uit Smolders et al., 2016).....	6
Tabel 2 – Karakteristieken voor de bovenafvoer voor het jaar 2013.....	14
Tabel 3 – Overzicht opgelegde constante bovendebiet per rand en per scenario .....	25
Tabel 4 – parameter waarden van het originele SCALDIS model van Smolders et al. (2016).....	1
Tabel 5 – Overzicht van de verschillende vormen van diffusie .....	5

## Lijst van de figuren

Figuur 1 – Overzichtsk kaart met afstandsmeting t.o.v. monding Schelde met 1 km interval .....	1
Figuur 2 – Saliniteitswaarden uit het ZUNO model zijn weergegeven als de oranje punten en de locaties van de puntmetingen langsheen het estuarium zijn weergegeven door middel van rode punten. Het betreft de meetstations (van afwaarts naar opwaarts) Vlake van de Raan, Overloop van Hansweert, Baalhoek, Prosperpolder, Liefkenshoek, Boei 84, Hemiksem en Driegoten. (figuur overgenomen uit Smolders et al., 2016)	4
Figuur 3 – Voorbeeld van een initieel zoutveld voor de start van een nieuwe modelsimulatie met het SCALDIS model. (figuur overgenomen uit Smolders et al., 2016) .....	5
Figuur 4 – Vergelijking gemeten en gemodelleerde saliniteitswaarden aan meetpaal Vlake van de Raan. (figuur overgenomen uit Smolders et al., 2016) .....	7
Figuur 5 – Vergelijking gemeten en gemodelleerde saliniteitswaarden aan meetpunt Overloop van Hansweert. (figuur overgenomen uit Smolders et al., 2016) .....	7
Figuur 6 – Vergelijking gemeten en gemodelleerde saliniteitswaarden aan meetpunt Baalhoek. (figuur overgenomen uit Smolders et al., 2016) .....	8
Figuur 7 – Vergelijking gemeten en gemodelleerde saliniteitswaarden aan meetpunt Prosperpolder. (figuur overgenomen uit Smolders et al., 2016) .....	8
Figuur 8 – Vergelijking gemeten en gemodelleerde saliniteitswaarden aan meetpunt Boei 84. (figuur overgenomen uit Smolders et al., 2016) .....	9
Figuur 9 – Vergelijking gemeten en gemodelleerde saliniteitswaarden aan meetpunt Liefkenshoek. (figuur overgenomen uit Smolders et al., 2016) .....	9
Figuur 10 – Vergelijking gemeten en gemodelleerde saliniteitswaarden aan meetpunt Oosterweel. (figuur overgenomen uit Smolders et al., 2016) .....	10
Figuur 11 – Vergelijking gemeten en gemodelleerde saliniteitswaarden aan meetpunt Hemiksem. (figuur overgenomen uit Smolders et al., 2016) .....	10
Figuur 12 – Vergelijking gemeten en gemodelleerde saliniteitswaarden aan meetpunt Driegoten. (figuur overgenomen uit Smolders et al., 2016) .....	11
Figuur 13 – SCALDIS modeldomein: in blauw het originele SCALDIS model; in het rood het verkleinde modeldomein voor de zout scenario's .....	12
Figuur 14 – Hoog- en laagwater voor een gemiddeld, spring- en doottij in de referentie simulatie.....	15
Figuur 15 – Tijdreeks saliniteit ter hoogte van Antwerpen Loodsgebouw (km 106) in de referentie simulatie .....	15
Figuur 16 – Tijdreeks saliniteit ter hoogte van Temse (km 130) in de referentie simulatie .....	16
Figuur 17 – Maximale saliniteit amplitude op het einde (na 210 dagen) van de referentie simulatie langsheen het estuarium .....	16
Figuur 18 – maximum saliniteit na 210 dagen in de referentie simulatie langsheen het estuarium. ....	17
Figuur 19 – Maximale saliniteit amplitude op het einde (na 210 dagen) van de referentie simulatie langsheen het estuarium vergeleken met deze tijdens enkel doottij en enkel springtij .....	18
Figuur 20 – Maximum saliniteit na 210 dagen in de referentie simulatie langsheen het estuarium vergeleken met deze bij enkel doottij en enkel springtij. ....	18

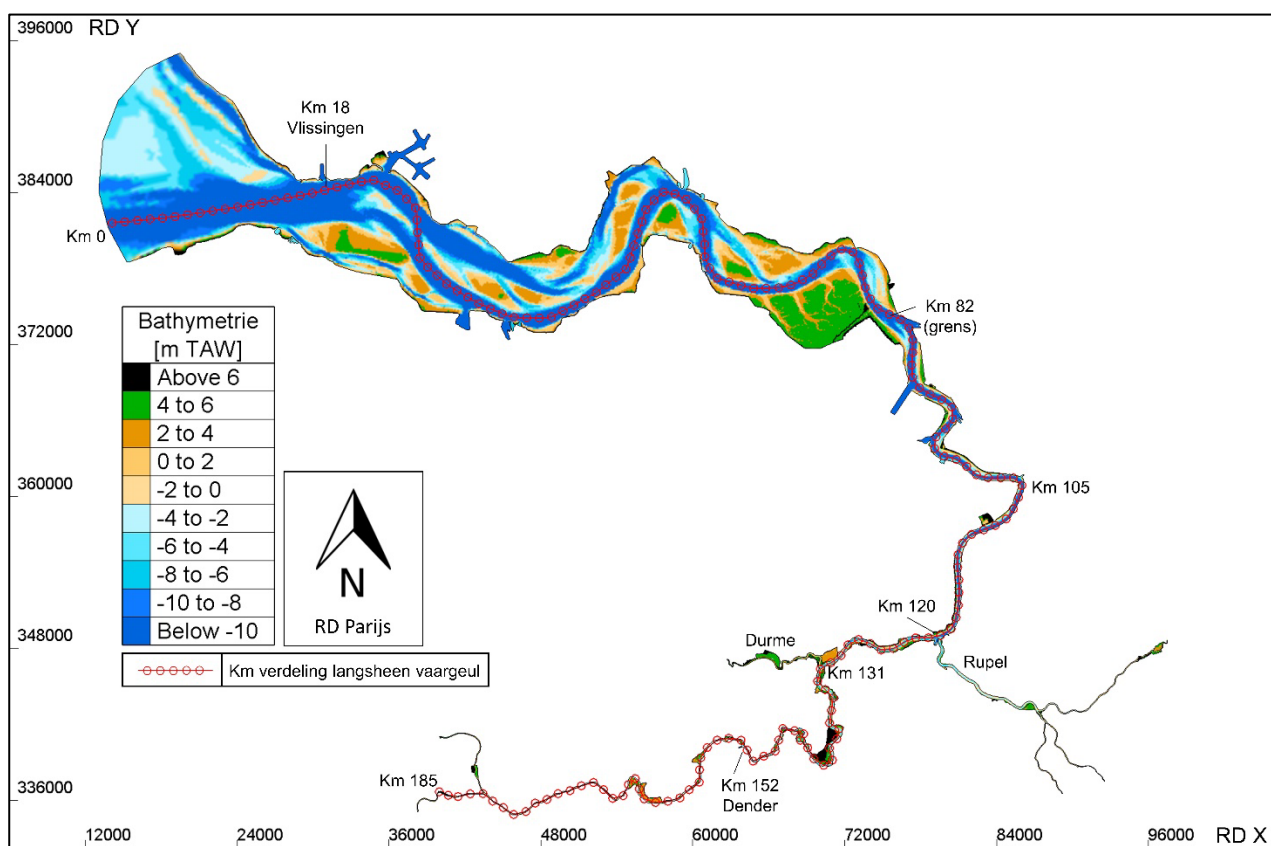
Figuur 21 – Tijdreeks saliniteit ter hoogte van Antwerpen Loodsgebouw (km 106) in de simulatie met een springtij-doodtij cyclus aan de afwaartse rand opgelegd. ....	20
Figuur 22 – Maximale saliniteit amplitude op het einde (na 210 dagen) van de simulatie met springtij-doodtij cyclus langsheen het estuarium vergeleken met deze tijdens enkel gemiddeld (REF) getij, enkel doortij en enkel springtij. ....	20
Figuur 23 – Maximum saliniteit na 210 dagen in de simulatie met een springtij-doodtij cyclus langsheen het estuarium vergeleken met deze bij enkel gemiddeld getij (REF), doortij en enkel springtij. ....	21
Figuur 24 – Maximum saliniteit na 210 dagen in de simulatie met een randvoorwaarde (RV) van een constante saliniteit van 28 aan de afwaartse rand, langsheen het estuarium vergeleken met deze bij enkel gemiddeld getij (REF). ....	22
Figuur 25 – Maximale saliniteit amplitude op het einde (na 210 dagen) van de simulatie met een constante saliniteit van 28 aan de afwaartse rand langsheen het estuarium vergeleken met deze in de referentie simulatie. ....	22
Figuur 26 – Hoogwater- en laagwaterstanden voor de simulaties met zeespiegelstijging (SLR) vergeleken met de referentie simulatie. ....	23
Figuur 27 – Maximale saliniteitswaarden langsheen het estuarium op het einde van de simulaties met zeespiegelstijging (SLR) vergeleken met de referentie simulatie. ....	24
Figuur 28 – Maximale amplitude van saliniteit langsheen het estuarium op het einde van de simulaties met zeespiegelstijging (SLR) vergeleken met de referentie simulatie. ....	24
Figuur 29 – Maximale saliniteitswaarden langsheen het estuarium op het einde van de simulaties met verschillende bovenafvoer (Q) vergeleken met de referentie simulatie (Q48). ....	26
Figuur 30 – Maximale amplitude van saliniteit langsheen het estuarium op het einde van de simulaties met verschillend bovendebiet (Q) vergeleken met de referentie simulatie (Q48). ....	27
Figuur 31 – Maximale afstand tot waar een saliniteitswaarde van 1 kan teruggevonden worden in het estuarium in functie van het totale bovendebiet. ....	27
Figuur 32 – bodemprofiel bathymetrie model 2013 en 1960 volgens de vaargeul aangegeven in de inzet figuur. ....	28
Figuur 33 – Vergelijking tussen hoog- en laagwaterstanden in de referentie simulatie en de simulatie met de bathymetrie van 1960. ....	29
Figuur 34 – Maximale saliniteitswaarden langsheen het estuarium op het einde van de simulatie met de bathymetrie van 1960 vergeleken met de referentie simulatie (bathymetrie 2013). ....	30
Figuur 35 – Maximale amplitude van saliniteit langsheen het estuarium op het einde van de simulatie met de bathymetrie van 1960 vergeleken met de referentie simulatie (bathymetrie 2013). ....	30
Figuur 36 – Tijdreeks saliniteit te Schelle uit model simulatie 1947 met gemeten saliniteitswaarden erbij geplot. Onderaan het in het model opgelegde debiet te Gentbrugge. ....	32
Figuur 37 – Modelresultaten voor Saliniteit ter hoogte van Antwerpen Loodsgebouw voor simulatie 1947. Het debiet te Gentbrugge is ter referentie erbij geplot. ....	32
Figuur 38 – Modelresultaten voor saliniteit ter hoogte van Antwerpen Loodsgebouw in het grijs weergegeven. De gemeten data bij Kentering Hoogwater (KHW) zijn als rode bolletjes geplot. Het maandgemiddelde debiet te Schelle is in het blauw weergegeven. ....	33
Figuur 39 – Het gekalibreerde bodem ruwheidsveld van SCALDIS: de Manning coëfficiënt is uitgedrukt in [ $m^{1/3}s$ ]. (overgenomen uit Smolders et al., 2016). ....	B2



# 1 Eenheden en referentievlakken

Als horizontaal referentievlak wordt in dit rapport het coördinatenstelsel RD Parijs gebruikt. Als verticaal referentievlak wordt m TAW gebruikt; waarbij TAW staat voor Tweede Algemene Waterpassing (in gebruik sinds 1946). Het gemiddelde zeeniveau bij laagwater te Oostende wordt gebruikt als nulpeil. Bathymetrie en waterstanden zijn positief boven dit nulpeil.

In figuren in dit rapport wordt in de x as vaak gebruik gemaakt van de afstand tot de monding van de Schelde. Voor dit rapport werd de afstand berekend vanaf de rand van het model in de monding (ongeveer ter hoogte van de Vlakke van de Raan) tot aan de stuw ter hoogte van Merelbeke. Hieronder is dit duidelijk te zien in Figuur 1. Deze afstand zal in de figuren in dit rapport vaak in de x-as gehanteerd worden.



Figuur 1 – Overzichtskartaal met afstandsmeting t.o.v. monding Schelde met 1 km interval

De saliniteitswaarden die in dit rapport gebruikt worden, zijn zowel voor de Zeeschelde (door HIC) als voor de Westerschelde (door HMCZ) berekend op basis van de gemeten conductiviteit en temperatuur door middel van de UNESCO formule toe te passen (De Boeck *et al.*, 2014). Saliniteit is een dimensieloze eenheid. Soms wordt toch de eenheid PSU (Practical Salinity Unit) toegevoegd, maar die heeft geen fysische betekenis.

## 2 Inleiding

In het kader van de Evaluatie Verdrag Beleid & Beheer 2014-2018 werd door de beheerders van het Schelde estuarium een lijst openstaande onderzoeksvragen geformuleerd. Deze lijst ligt aan de basis van het onderzoeksprogramma Agenda voor de Toekomst II.

De Onderzoeksgroep WatSed van het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) heeft uit deze lijst 3 topics geselecteerd waarvoor zij een actieve bijdrage in onderzoek kunnen leveren. Deze topics zijn:

1. Zeespiegelstijging
2. Saliniteit
3. Sedimentbalans

Het topic “saliniteit” tracht antwoord te geven op volgende onderzoeksvragen, die door de beheerders als prioritair werden geïdentificeerd:

- Wat is het effect van zeespiegelstijging op verzilting?
- Wat is het minimale zoetwaterdebiet nodig om ecologische schade te beperken in Schelde-estuarium?
- Hoe robuust/gevoelig is zoutindringing?
- Wat is het effect van droogteperiodes op zoutindringing?
- Zijn er andere opties om zoutindringing te verminderen?
- Is er sprake van een significante verschuiving in de saliniteit gradiënt in het Schelde-estuarium in de afgelopen 50 jaar? Zo ja, wat is de verklaring en wat zijn de effecten op het hele estuarium?

Om antwoord te bieden op bovenstaande onderzoeksvragen wordt het project opgedeeld in twee grote delen:

1. Inventarisatie van data over zoutmetingen in het Schelde-estuarium en de analyse daarvan.
2. Onderzoek met behulp van het numerieke model SCALDIS specifiek voor saliniteit: scenario analyses.

Dit rapport beschrijft de resultaten van het scenario analyse onderzoek met behulp van het SCALDIS model. Numerieke modellen bieden de mogelijkheid om allerhande parameters en scenario's te testen zonder dat deze zich in werkelijkheid hebben moeten voordoen. Binnen het WL is er een state-of-the-art Scheldemodel, i.e. SCALDIS 3D, aanwezig. Voor het modelleren van zout in estuaria zijn echter zeer lange tijdsperiodes nodig en het SCALDIS 3D model is zeer gedetailleerd en vraagt veel rekentijd voor langere periodes. Daarom zal een afgeslankte versie van dit model ingezet worden: alle gebieden die niet noodzakelijk zijn zullen uit het rekenrooster verwijderd worden. Dit model werd eerder al gebruikt voor onderzoek naar slibtransport in de Schelde binnen project 17\_088 AvdT Sedimentstrategie Schelde-estuarium. Binnen dit project zullen volgende zaken via scenario analyse onderzocht worden:

1. Effect van zeespiegelstijging op indringing van zout;
2. Effect boven debiet of droogteperiode op verschuiving saliniteitsgradiënt en wat is de minimale zoetwaterinput nodig om verder zoutindringing tegen te gaan?
3. Effect bathymetrie op saliniteitsgradiënt (indien getijgolf gemakkelijker verder in het estuarium kan binnendringen, verwachten we ook dat de saliniteitsgradiënt volgt).

Dit rapport zal enkel de resultaten van de scenario's bespreken en tonen. In het rapport literatuur en data analyse zal ook een link gemaakt worden tussen de gemeten data en de resultaten van de numerieke oefening beschreven in dit rapport.

## 3 Modelbeschrijving

### 3.1 Het originele SCALDIS model

Voor de scenario analyse zal het SCALDIS 3D model (Smolders et al., 2016) ingezet worden. Dit model werd ontwikkeld om zowel in de kustzone als in het estuarium zelf een grote nauwkeurigheid na te streven en werd uitvoering gekalibreerd en getest (zie kalibratierapport Smolders et al., 2016). De kalibratieresultaten voor de waterbeweging worden hier niet herhaald, maar deze voor saliniteit wel.

Dit model maakt gebruik van de TELEMAC software suite en saliniteit wordt in het SCALDIS model als actieve tracer toegepast. Dit wil zeggen dat de aanwezigheid van zout effect heeft op de hydrodynamica. Dit gebeurt via de densiteit van het water die afhangt van de concentratie zout dat aanwezig is. De densiteit van het water wordt op zijn beurt meegenomen in de vergelijking van de hydrostatische druk gradiënt (vergelijking 2) en kan zo de hydrodynamica beïnvloeden. Voor de Westerschelde, waar hogere zoutwaarden aanwezig zijn, kan het wel of niet meenemen van zout als actieve tracer een effect tot 10 cm hebben op de waterstanden (zie voorbeeld Smolders et al., 2016).

De drie dimensionele tracer vergelijking die in TELEMAC opgelost wordt ziet er als volgt uit:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} + W \frac{\partial T}{\partial z} = \text{Div}(v * \text{Grad}(T)) + Q \quad (1)$$

met:	U,V,W	de drie-dimensionele componenten van de stroomsnelheid [m/s]
	T	de actieve of passieve tracer [tracer unit]
	$\nu$	de kinematische viscositeit [m <sup>2</sup> /s]
	t	de tijd [s]
	Q	een extra bron van tracer [tracer unit]
	x,y	horizontale ruimtelijke componenten [m]
	z	verticale ruimtelijke component [m]

De druk op elk punt wordt gegeven door volgende vergelijking:

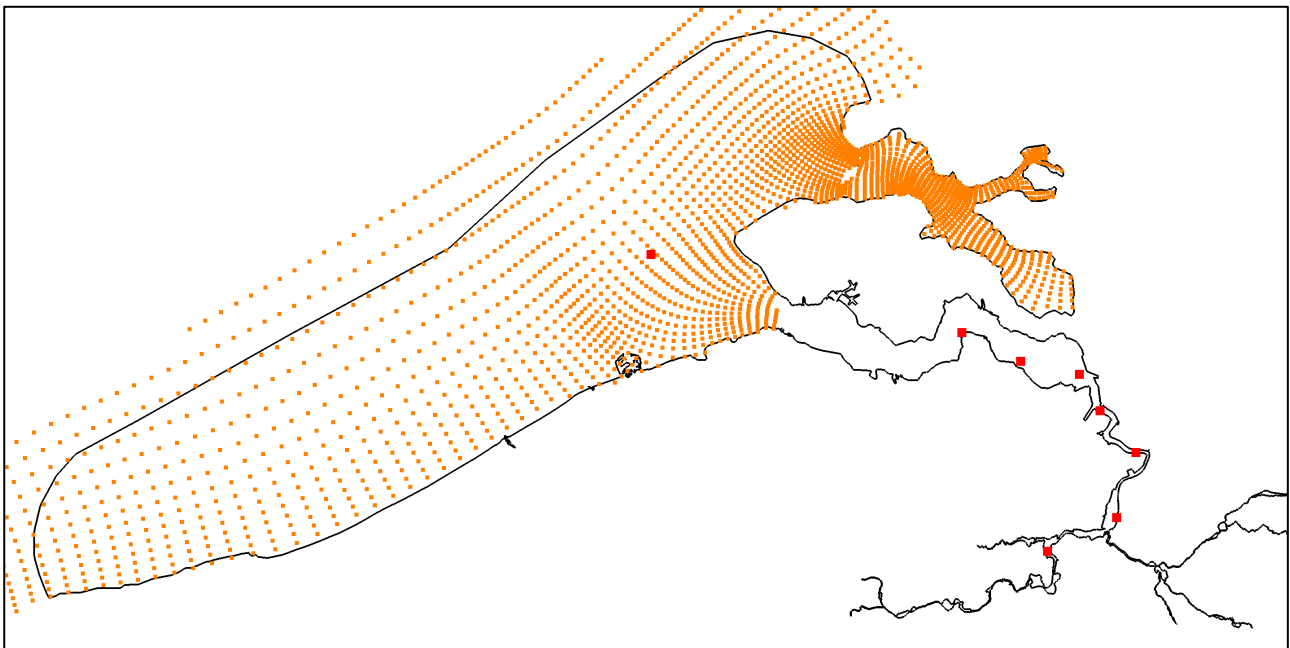
$$p = p_{atm} + \rho_0 g (Z_s - z) + \rho_0 g \int_z^{Z_s} \frac{\Delta \rho}{\rho_0} dz + p_d \quad (2)$$

met:	p	de druk [N/m <sup>2</sup> ]
	$p_{atm}$	de atmosferische druk [N/m <sup>2</sup> ]
	g	de zwaartekrachtversnelling [m/s <sup>2</sup> ]
	$\rho_0$	referentie densiteit water [kg/m <sup>3</sup> ]
	$Z_s$	hoogte van het vrije wateroppervlak [m]

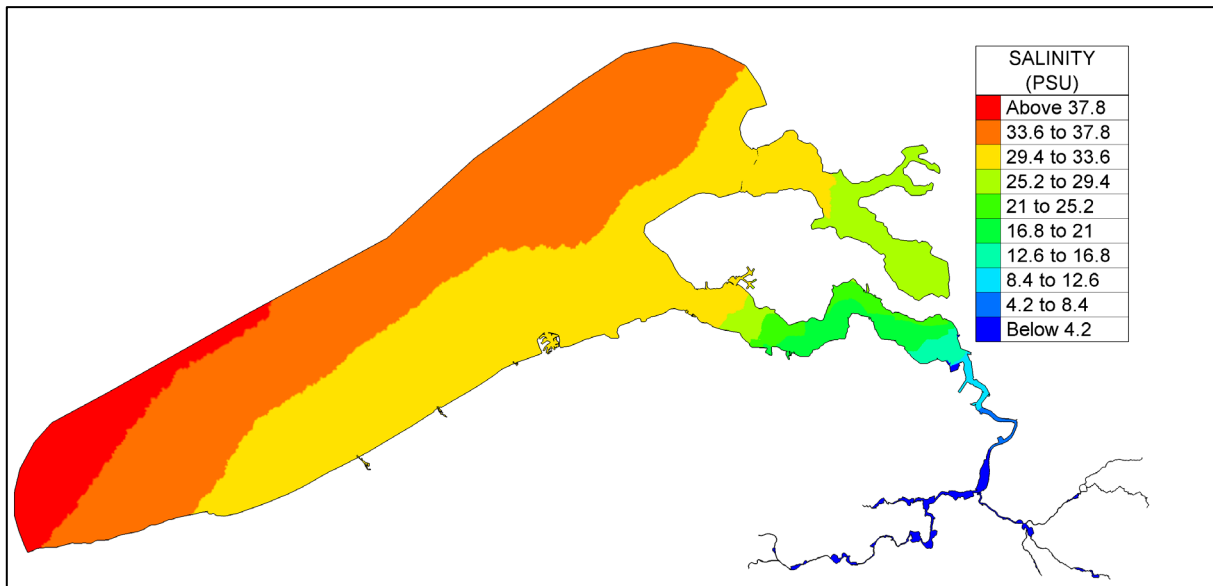
$z$	verticale ruimtelijke component [m]
$\Delta\rho$	variatie van dichtheid water rond de referentie dichtheid [ $\text{kg/m}^3$ ]
$p_d$	de dynamische druk (in het geval van non-hydrostatische versie van de Navier-Stokes vergelijkingen [ $\text{N/m}^2$ ])

Saliniteit wordt in het SCALDIS model geïnitieerd door middel van een geïnterpoleerd zoutveld op basis van puntmetingen. Verder wordt aan de afwaartse rand een zoutwaarde opgelegd die overgenomen wordt (zoals de waterstanden en stroomsnelheden) van een moedermodel, in dit geval het CSM-ZUNO model (Maximova et al., 2015). Aangezien de saliniteitsverdeling in het estuarium sterk afhankelijk is van de opgelegde waarden aan de afwaartse modelrand en aangezien CSM-ZUNO modellen niet nauwkeurig genoeg zijn hiervoor ter hoogte van de rand van het SCALDIS model, werden deze randvoorwaarden gecorrigeerd op basis van de metingen ter hoogte van de Vlake Van De Raan. De correctie bedraagt het verschil tussen de gemeten daggemiddelde waarde en de gemodelleerde waarde.

Voor de startwaarde van het initieel saliniteitsveld in het model, werden voor de gekozen startdatum, de overeenkomstige saliniteitswaarden uit het ZUNO model getrokken, aangevuld met meetwaarden van puntmetingen langsheen het estuarium (zie Figuur 2). De saliniteitswaarden uit ZUNO worden nog gecorrigeerd zoals hierboven reeds beschreven. Alle waarden worden geïnterpoleerd om een initieel zoutveld te genereren voor heel het SCALDIS modeldomein. Een voorbeeld is weergegeven in Figuur 3.



Figuur 2 – Saliniteitswaarden uit het ZUNO model zijn weergegeven als de oranje punten en de locaties van de puntmetingen langsheen het estuarium zijn weergegeven door middel van rode punten. Het betreft de meetstations (van afwaarts naar opwaarts) Vlake van de Raan, Overloop van Hansweert, Baalhoek, Prosperpolder, Liefkenshoek, Boei 84, Hemiksem en Driegoten. (figuur overgenomen uit Smolders et al., 2016)



Figuur 3 – Voorbeeld van een initieel zoutveld voor de start van een nieuwe modelsimulatie met het SCALDIS model. (figuur overgenomen uit Smolders et al., 2016)

Een simulatie van drie maanden werd uitgevoerd om gemodelleerde en gemeten saliniteitswaarden te vergelijken. Onderstaande figuren geven per meetstation een vergelijking tussen de gemodelleerde en gemeten saliniteitswaarden (Figuur 4 - Figuur 13 ). Ondanks de correctie aan de rand met behulp van de gemeten waarden ter hoogte van de Vlakte van de Raan blijft het moeilijk voor modellen om de gemeten waarden in de kustzone accuraat te benaderen. In het estuarium zelf volgt het model de metingen wel mooi. Dit wordt aangetoond met de gemiddelde afwijking (bias = het verschil tussen het gemiddelde van de test en het gemiddelde van de referentie) en de root mean square error (RMSE<sup>1</sup>) waarden voor elke meetstation te bepalen. Deze waarden zijn gegeven in Tabel 1. Het station Baalhoek geeft de grootste afwijkingen, maar dit kan voor een groot stuk verklaard worden door de grotere amplitude in saliniteitswaarden die bij dit station voorkomen.

De saliniteitsgradiënt in het estuarium wordt vooral bepaald door de mate van menging en advectie van het water en in mindere mate door kinematische diffusie. Daardoor kan de saliniteit in het model maar beperkt beïnvloed en dus gekalibreerd worden met de diffusiviteitsparameter (i.e. de kinematische diffusiviteit). Bovendien zijn de advectieve oplossingschema's van het numeriek model (TELEMAC gebruikt de eindige elementen methode) zelf ook heel diffusief. Dit maakt dat de enkele parameter die door de gebruiker kan ingesteld worden voor zouttransport, i.e. de diffusiviteit, in het SCALDIS model weinig of geen invloed heeft op de verdeling van de saliniteit in het estuarium. In het kalibratierapport van Smolders et al. (2016) is er een test uitgevoerd met een diffusiviteitswaarde tot 1 m<sup>2</sup>/s en deze simulatie geeft nagenoeg geen andere saliniteitswaarden dan de referentiesimulatie waar deze parameter standaard op 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s staat. Dit geeft aan dat de turbulente diffusie samen met de numerieke diffusie (gegenereerd door het advectie oplossingschema) groter is dan 1 m<sup>2</sup>/s. Meer info over het effect van numerieke diffusie op de resultaten van het SCALDIS model en hoe hier het best mee omgegaan kan worden, staat in de conferentie paper van Smolders (2022) en een overzicht over diffusie in een numeriek model staat in bijlage 2. Concreet komt het er op neer dat hoe beter de

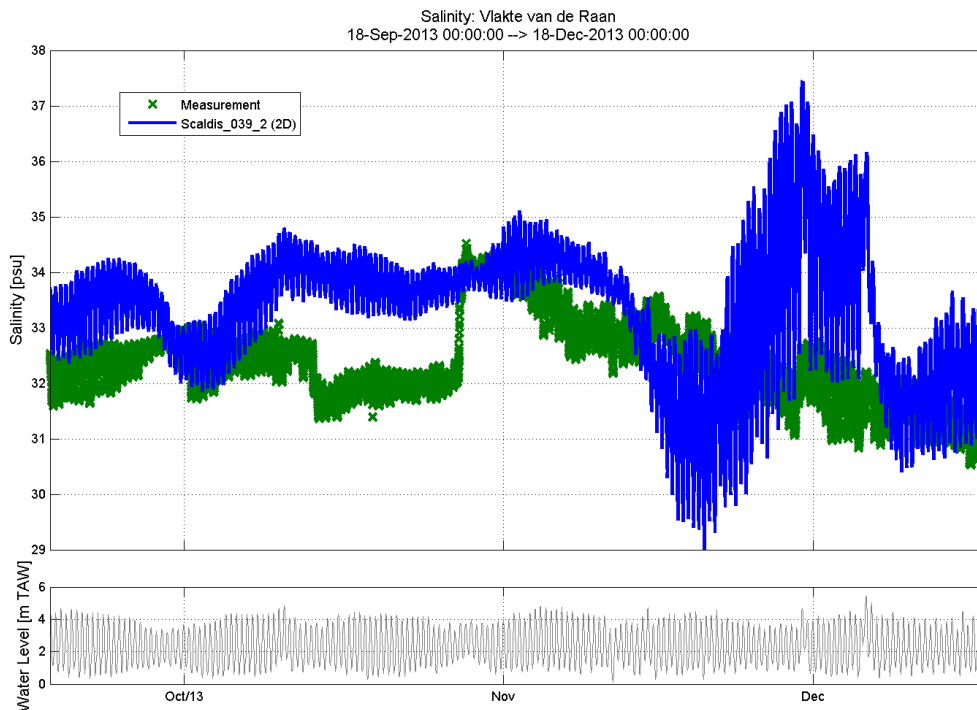
$$^1 RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{N}}$$

waterbeweging in het model wordt weergegeven, hoe beter de zoutverdeling in het model zal zijn.

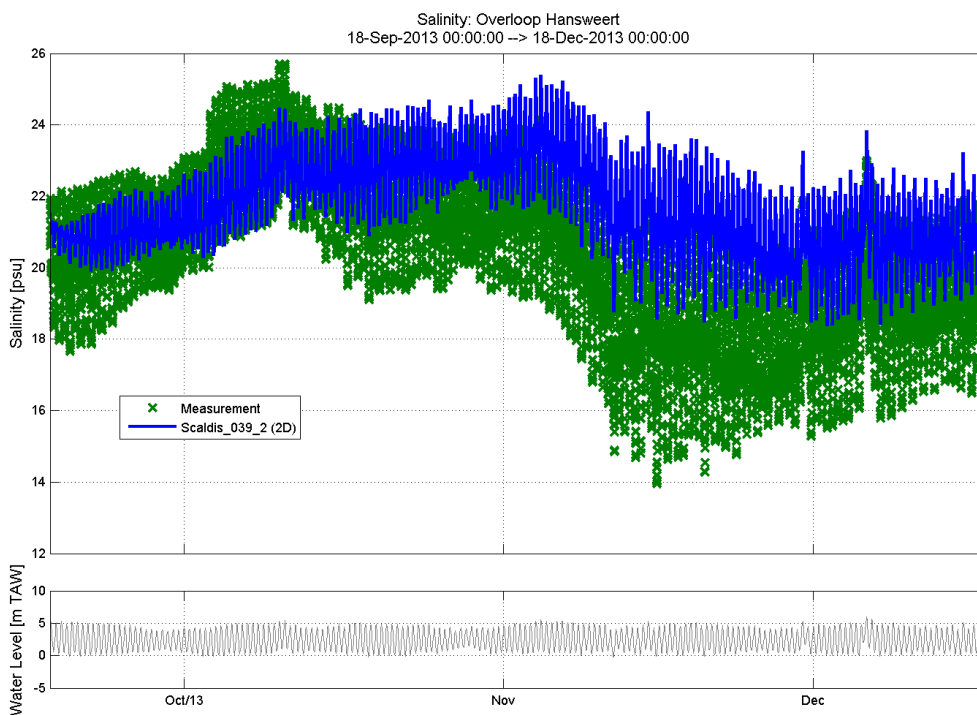
Het SCALDIS model is uitvoering gekalibreerd op waterstanden, debieten en stroomsnelheden en geeft voor allen goede overeenkomsten met de gemeten waarden (Smolders et al., 2016) en dat is dan ook terug te zien in de zoutverdeling in het estuarium zelf in Figuur 4 tot en met Figuur 13.

Tabel 1 – Bias en RMSE waarden voor de volledige tijdreeks (3 maanden) model versus gemeten waarden voor de verschillende meetpunten langsheen het estuarium. (Run SCALDIS\_039\_2) (Tabel overgenomen uit Smolders et al., 2016)

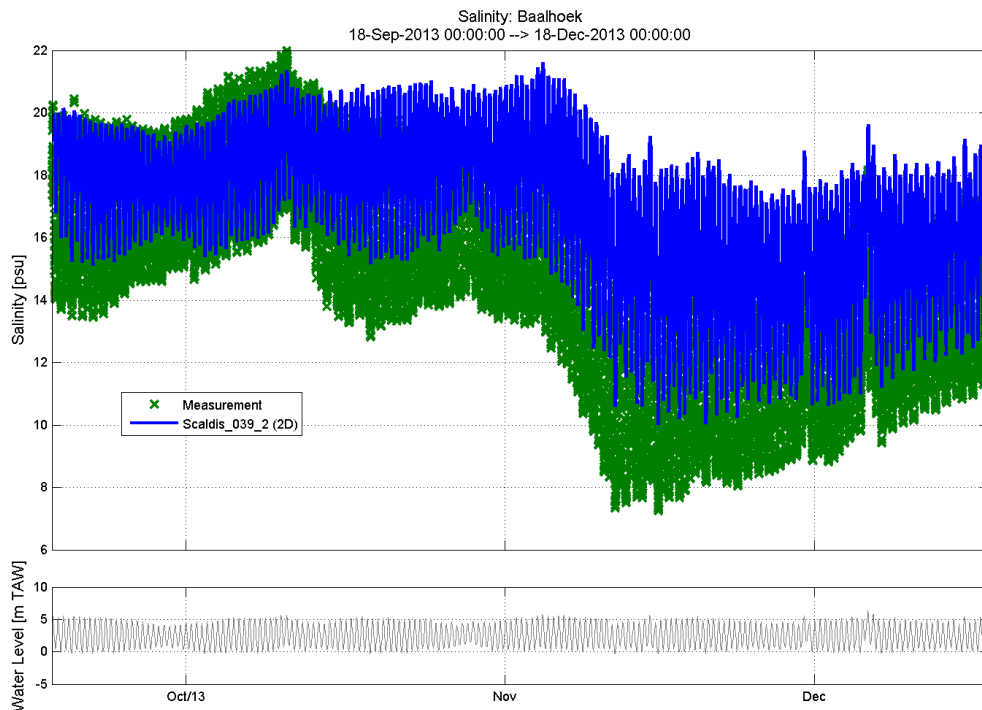
meetplaats	SCALDIS vs. Meetwaarde	
	bias	RMSE
Vlakte van de Raan	0.82	1.49
Overloop van Hansweert	1.28	1.93
Baalhoek	1.96	2.41
Prosperpolder	1.07	1.28
Boei 84	0.54	0.84
Liefkenshoek	0.63	0.88
Oosterweel	-0.04	0.50
Hemiksem	-0.36	0.44
Driegoten	-0.41	0.42



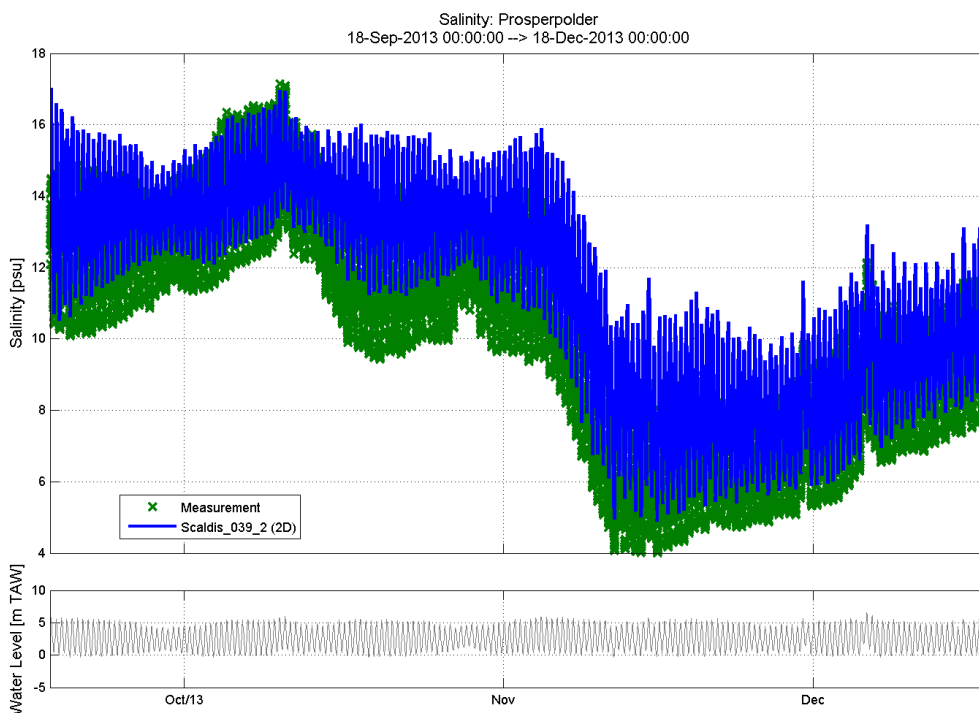
Figuur 4 – Vergelijking gemeten en gemodelleerde saliniteitswaarden aan meetpaal Vlake van de Raan. (figuur overgenomen uit Smolders et al., 2016)



Figuur 5 – Vergelijking gemeten en gemodelleerde saliniteitswaarden aan meetpunt Overloop van Hansweert. (figuur overgenomen uit Smolders et al., 2016)

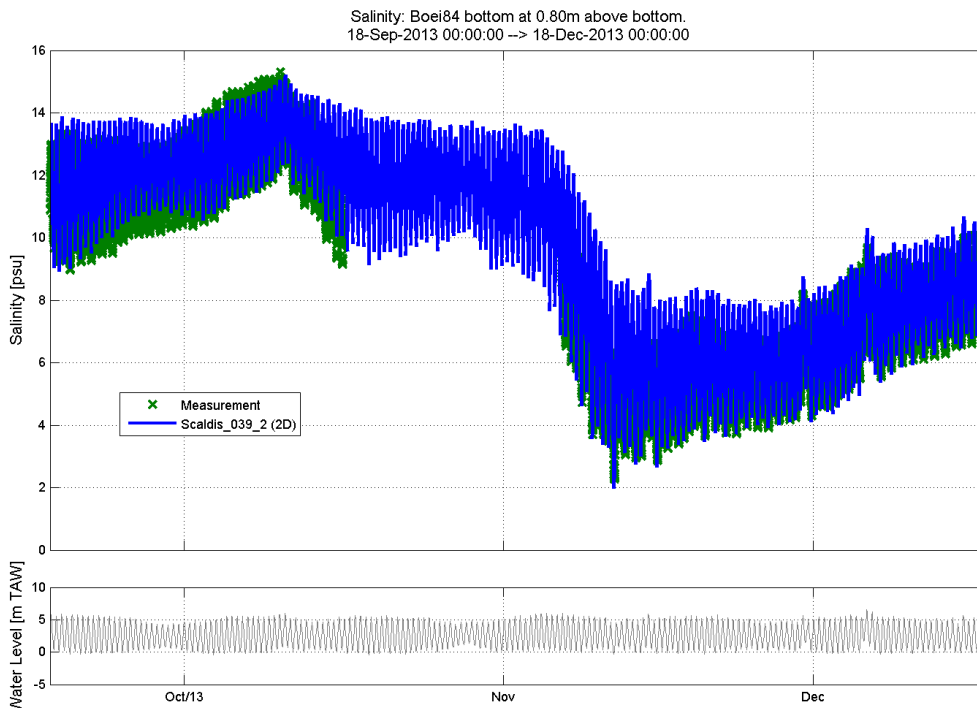


Figuur 6 – Vergelijking gemeten en gemodelleerde saliniteitswaarden aan meetpunt Baalhoek. (figuur overgenomen uit Smolders et al., 2016)

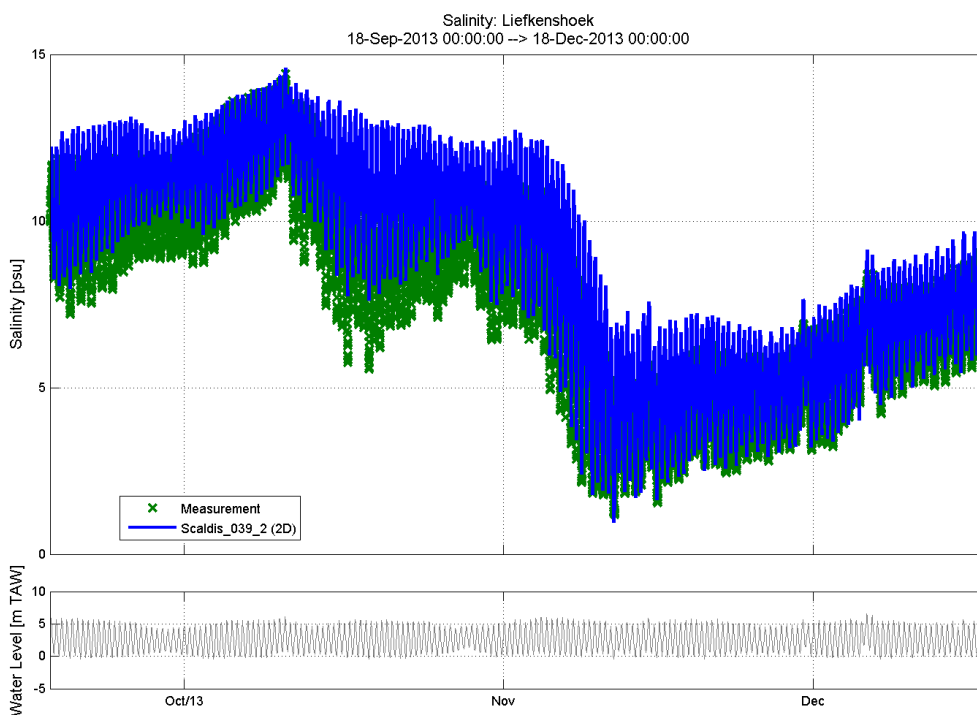


Figuur 7 – Vergelijking gemeten en gemodelleerde saliniteitswaarden aan meetpunt Prosperpolder. (figuur overgenomen uit Smolders et al., 2016)

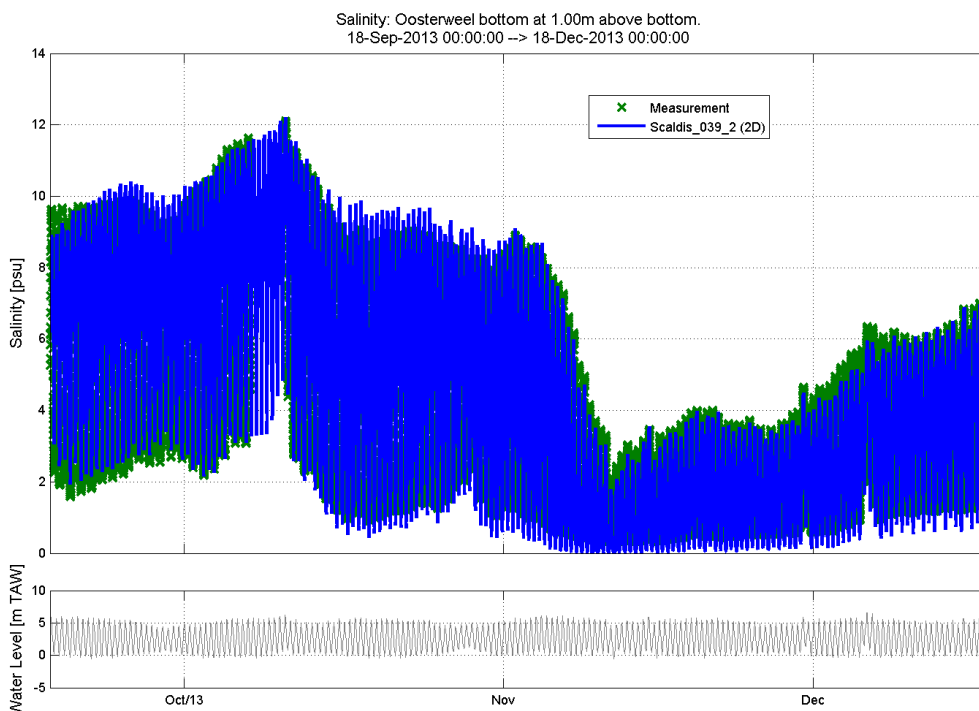




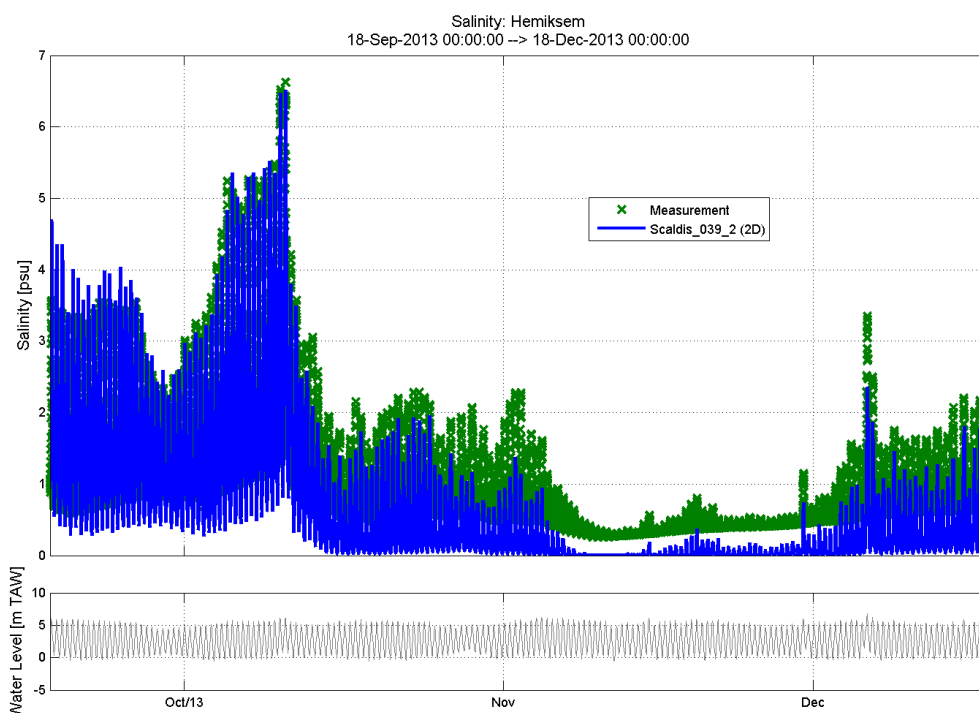
Figuur 8 – Vergelijking gemeten en gemodelleerde saliniteitswaarden aan meetpunt Boei 84. (figuur overgenomen uit Smolders et al., 2016)



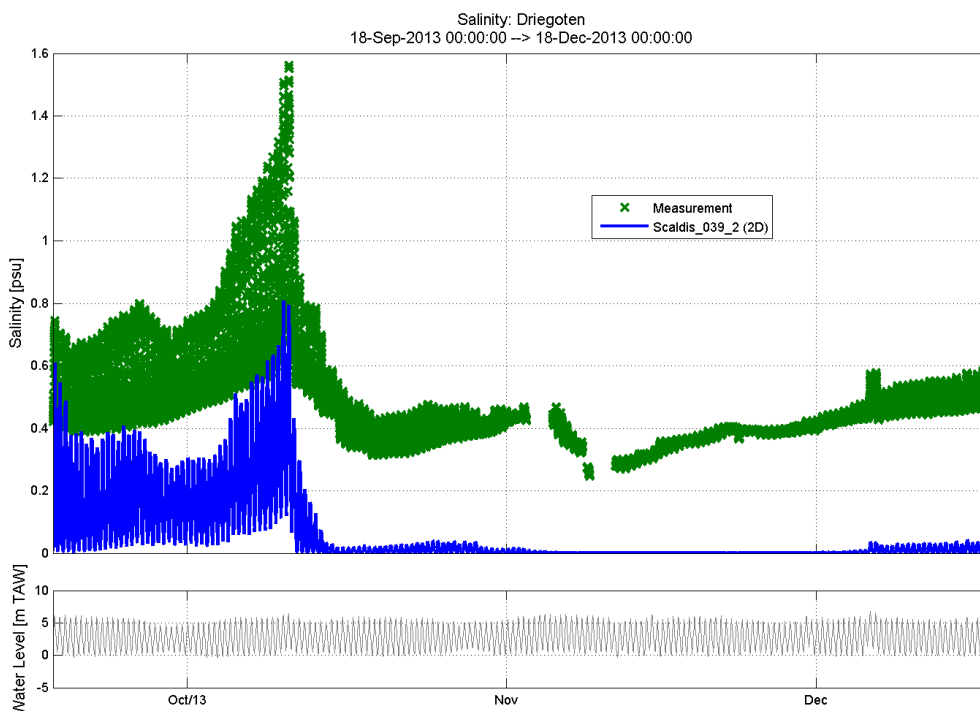
Figuur 9 – Vergelijking gemeten en gemodelleerde saliniteitswaarden aan meetpunt Liefkenshoek. (figuur overgenomen uit Smolders et al., 2016)



Figuur 10 – Vergelijking gemeten en gemodelleerde saliniteitswaarden aan meetpunt Oosterweel. (figuur overgenomen uit Smolders et al., 2016)



Figuur 11 – Vergelijking gemeten en gemodelleerde saliniteitswaarden aan meetpunt Hemiksem. (figuur overgenomen uit Smolders et al., 2016)



Figuur 12 – Vergelijking gemeten en gemodelleerde saliniteitswaarden aan meetpunt Driegoten. (figuur overgenomen uit Smolders et al., 2016)

## 3.2 SCALDIS aangepast voor zoutscenario's

Voor de scenario berekeningen voor zout willen we controle hebben over zo veel mogelijk invloeden op de saliniteitsverdeling in het estuarium. Idealiter worden scenario's doorgerekend tot een soort evenwichtssituatie. Aangezien zout zich traag verspreid in het estuarium worden dus langere simulaties verwacht. Om de rekentijd te beperken werd het modeldomein van SCALDIS voor deze oefening verkleind van 459.692 rekenpunten naar 295.100 rekenpunten in een 2D vlak. Dit werd gedaan door de afwaartse rand van het model ter hoogte van de raai Westkapelle – Cadzand te leggen. Het hele kustgebied en de Oosterschelde vallen hierdoor weg uit het modeldomein. Deze locatie van de afwaartse rand geeft ook meer controle over de opgelegde saliniteitswaarde hier. Verder werden niet gebruikte overstromingsgebieden weggeknipt en werden de bijrivieren stroomopwaarts ingekort: de Nete stopt in het model net voor Lier ter hoogte van Duffel sluis; de Dijle stopt nu aan de stuw in Mechelen en de Zenne werd ook een klein stukje ingekort. Aan de Zeeschelde zelf werd niet geraakt. Het rekenrooster werd ook niet aangepast, enkel bijgeknipt. Figuur 14 geeft duidelijk het verschil weer tussen het originele en het ingekorte modeldomein. De overstromingsgebieden worden in de simulaties niet mee genomen om verder rekentijd te sparen. Zij hebben slechts een heel beperkte invloed op de lokale waterstanden (Smolders et al., 2016).

Een springtij-doodtij cyclus veroorzaakt teveel variatie in waterbeweging en daarmee ook in saliniteitswaarde en daarom werd er gekozen om een gemiddeld getij op te leggen aan de afwaartse rand. Dit gemiddelde getij wordt telkens weer herhaald. Het gemiddelde getij is een M2 getij en heeft de amplitude en frequentie van een gemiddelde getij te Vlissingen. Dit getij werd als volgt in de subroutine SL3 in TELEMAC ingevoerd:

$$SL = Z0 + A\_M2 * \sin(FREQ\_M2 * t + \Phi\_M2)$$

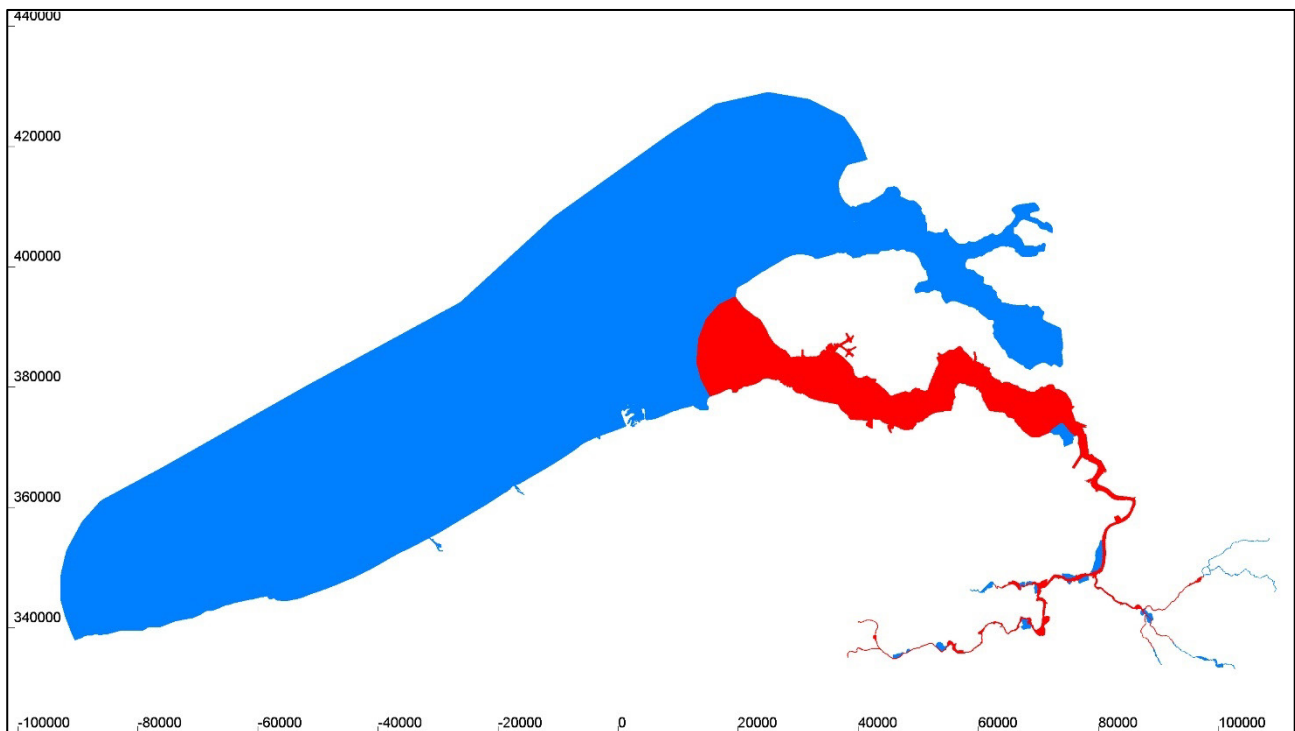
waarbij:

- SL staat voor Surface Level [m TAW]
- Z0 = de gemiddelde waterstand [m TAW]
- A\_M2 = de amplitude [m]
- FREQ\_M2 = frequentie [1/s]
- Phi\_M2= fase =  $90 \text{ Pi} / 180$  (zo gekozen dat start bij maximum waterstand ligt = stabiel voor start simulatie)

Aan de opwaartse randen werd een constant bovendebiet opgelegd.

Alle andere modelparameters werden behouden van het originele SCALDIS model. Zij zijn raadpleegbaar in bijlage 1 van dit rapport. Voor de duidelijkheid worden hier wel nog de turbulentie instellingen herhaald. Het verticaal turbulentiemodel is het mixing length model van Nezu en Nakagawa. Het horizontaal turbulentiemodel is het Smagorinski model.

Het ruwheidsveld voor de bodem, uitgebreid gekalibreerd in het originele SCALDIS model, is hier onveranderd overgenomen.



Figuur 13 – SCALDIS modeldomein: in blauw het originele SCALDIS model; in het rood het verkleinde modeldomein voor de zout scenario's

## 4 Scenario analyse

In de scenario analyse zullen alle scenario simulaties vergeleken worden met een referentie simulatie. Dit laat toe om enkel het effect van het scenario te bestuderen. Naast de referentie simulatie zullen drie types scenario's onderzocht worden: 1. scenario's met betrekking tot zeespiegelstijging; 2. scenario's met betrekking tot het bovendebiet; en 3. scenario's met betrekking tot de bathymetrie.

### 4.1 Referentie simulatie

#### 4.1.1 Opbouw referentie simulatie

Voor de referentiesimulatie wordt aan de afwaartse rand een M2-getij opgelegd met de amplitude en gemiddelde waterstand van een gemiddeld getij te Vlissingen. Volgende vergelijking:

$$SL = Z_0 + A_{M2} * \sin(FREQ_{M2} * t + \Phi_{M2})$$

wordt dan ingevuld met:

- $Z_0 = 2,3 \text{ m TAW}$
- $A_{M2} = 1,95 \text{ m}$
- $FREQ_{M2} = 2 \text{ PI} / (3600 * 12.42) \text{ s}$
- $\Phi_{M2} = 90 \text{ PI} / 180$  (zo gekozen dat start bij maximum waterstand ligt = stabiel voor start simulatie)

Aan de opwaartse randen werd een constant bovendebiet opgelegd. Voor de referentie simulatie werd beslist om het gemiddeld bovendebiet voor de zomerperiode te nemen. Dit is het gemiddeld debiet over de maanden mei tot en met september. De karakteristieken voor de bovendebieten voor het jaar 2013 worden weergegeven in Tabel 2. Voor spuikanaal Bath en sluis Terneuzen werd de waarde  $0 \text{ m}^3/\text{s}$  opgelegd. Voor de andere opwaartse randen werd voor de referentie simulatie volgende waarden opgelegd:

- Melle:  $20 \text{ m}^3/\text{s}$
- Dender:  $7 \text{ m}^3/\text{s}$
- Zenne:  $7 \text{ m}^3/\text{s}$
- Dijle:  $4 \text{ m}^3/\text{s}$
- Nete:  $10 \text{ m}^3/\text{s}$

Tabel 2 – Karakteristieken voor de bovenafvoer voor het jaar 2013

2013	Melle	Dender	Duffel	Eppegem	Sint-Joris-Weert
	Q [m <sup>3</sup> /s]	Q [m <sup>3</sup> /s]	Q [m <sup>3</sup> /s]	Q [m <sup>3</sup> /s]	Q [m <sup>3</sup> /s]
Gemiddelde (jaar)	48	13	16	9	5
maximum (jaar)	302	81	53	42	17
minimum (jaar)	0	2	2	4	0
Gemiddelde zomer (mei-september)	20	7	10	7	4
Gemiddelde winter (oktober-april)	69	18	21	11	5

Een jaargemiddelde saliniteitswaarde gemeten aan de meetpaal Vlake van de Raan bedraagt ongeveer 32. Deze waarde werd dan ook als constante afwaartse randvoorwaarde voor zout opgelegd. Aan de opwaartse randen werd een saliniteit van 0,1 opgelegd. Aangezien we proberen te rekenen tot een zeker evenwicht zal een initieel zoutveld dat dicht bij dit evenwicht ligt zorgen voor een kortere simulatietijd. aangezien er nog niet geweten is hoe dit evenwicht er zal uitzien, werd vertrokken van het initieel zoutveld van het origineel SCALDIS model.

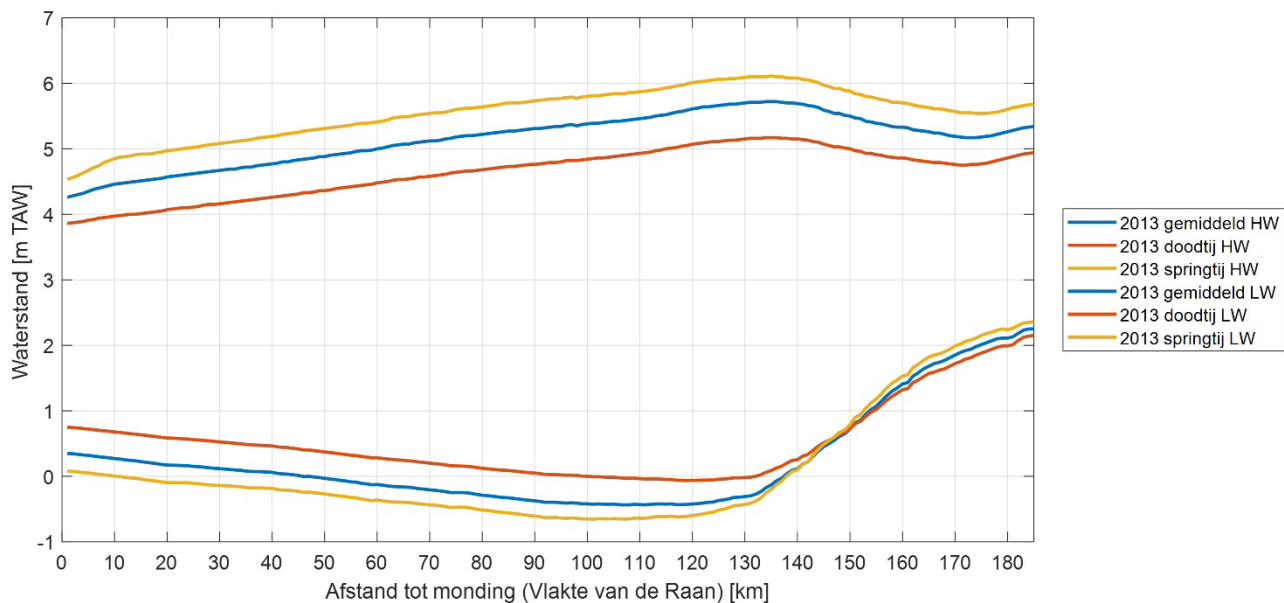
Voor de referentie simulatie werd eerst een simulatie gestart van 30 dagen. Deze werd gevolgd door twee simulaties van 90 dagen. In totaal werden dus 210 dagen doorgerekend. De opsplitsing zorgde er enkel voor dat de resultaten files niet te groot werden. Elk half uur werd voor heel het modeldomein een saliniteitswaarde weggeschreven naar de resultatenfile.

Alle andere modelparameters werden hetzelfde gehouden als in het originele SCALDIS model en zijn beschikbaar in bijlage 1.

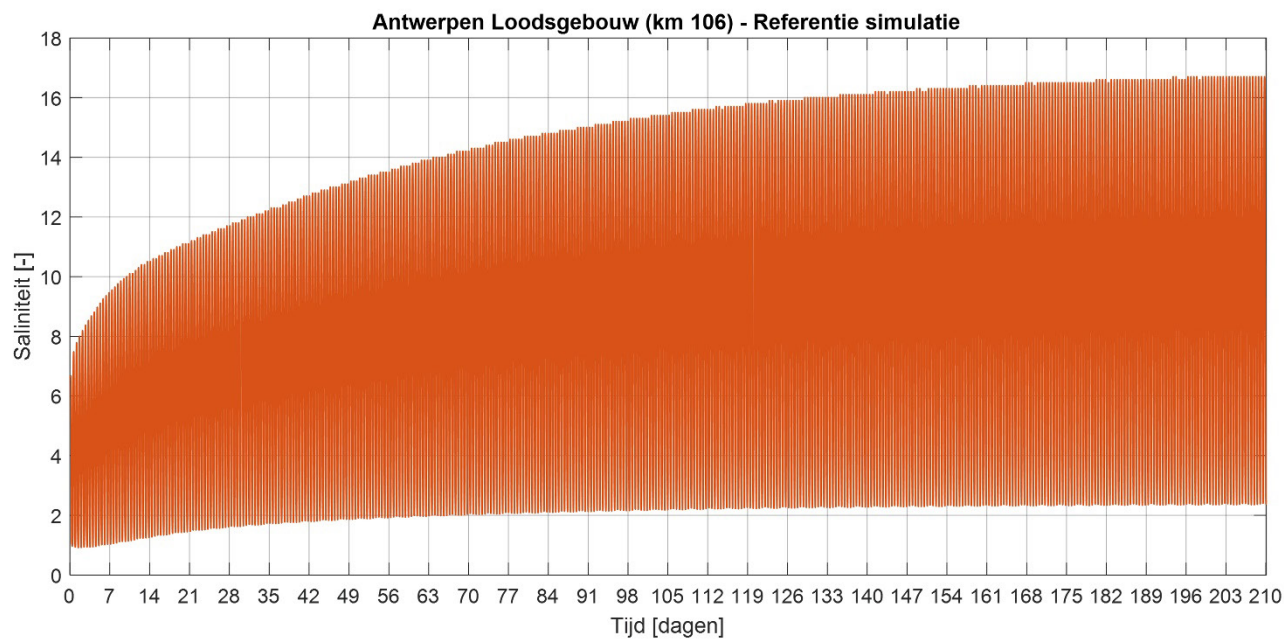
#### 4.1.2 resultaten referentie simulatie

De hoog- en laagwaterstanden langsheen het estuarium werden geplot in Figuur 14. Zoals verwacht stijgen de hoogwaters tot de regio Temse (km 130) en nemen ze daarna af om weer kort voor de sluizen te Merelbeke terug even te stijgen. In deze figuur zijn ook de resultaten voor een doortij en springtij geplot. Deze komen later aan bod. Ook het laagwater vertoont een herkenbaar verloop met waarden die dicht bij de langjarige gemiddelden liggen.

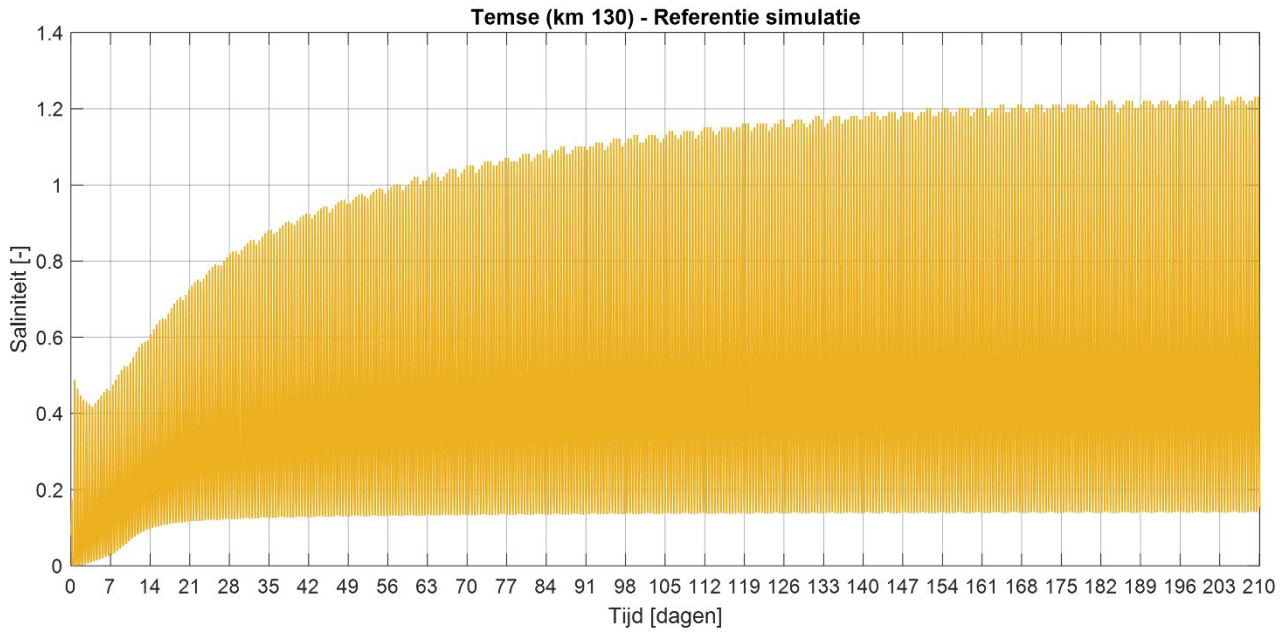
Wanneer de saliniteit voor een bepaalde locatie, in dit geval Antwerpen Loodsgebouw, km 106 in het model, wordt uitgezet over de tijd (Figuur 15) is te zien dat na 210 dagen in de simulatie de saliniteit een quasi vaste waarde aanhoudt. In een detailanalyse blijkt dat de saliniteit nog heel licht stijgt, maar we beschouwen dit punt als een quasi evenwicht voor de modellering van de saliniteit in de referentie simulatie. Wat verder opvalt is de grote amplitude van de saliniteit voor deze locatie. Wanneer we 24 km verder opwaarts kijken, i.e. km 130 te Temse (Figuur 16) dan is te zien dat hier de amplitude nog slechts 1 saliniteitseenheid bedraagt. Als voor elke km langsheen het Schelde estuarium de amplitude van de saliniteit op het einde van de referentie simulatie wordt berekend, wordt de grafiek in Figuur 17 verkregen. In deze grafiek is te zien dat ter hoogte van Antwerpen, km 106, de amplitude net zijn maximale waarde bereikt. Vanaf dat het zout de Zeeschelde bereikt (rond km 80) is te zien dat de amplitude fel omhoog gaat. Na het maximum rond Antwerpen (km 106) is terug een felle afname van de amplitude te zien.



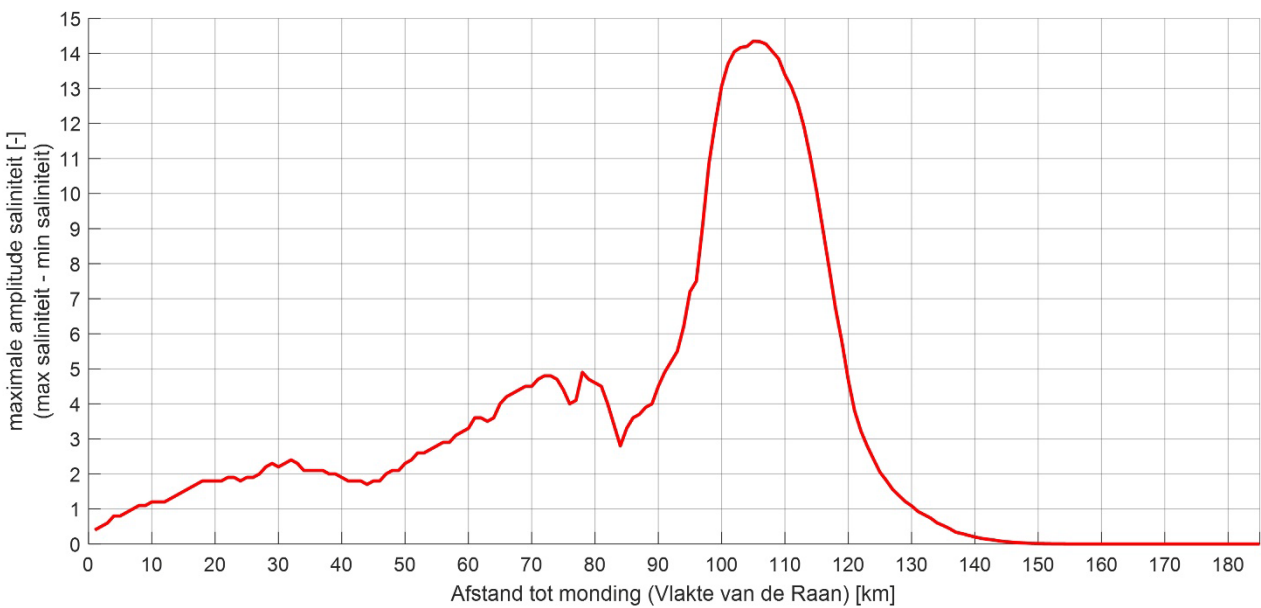
Figuur 14 – Hoog- en laagwater voor een gemiddeld, spring- en doottij in de referentie simulatie



Figuur 15 – Tijdreeks saliniteit ter hoogte van Antwerpen Loodsgebouw (km 106) in de referentie simulatie



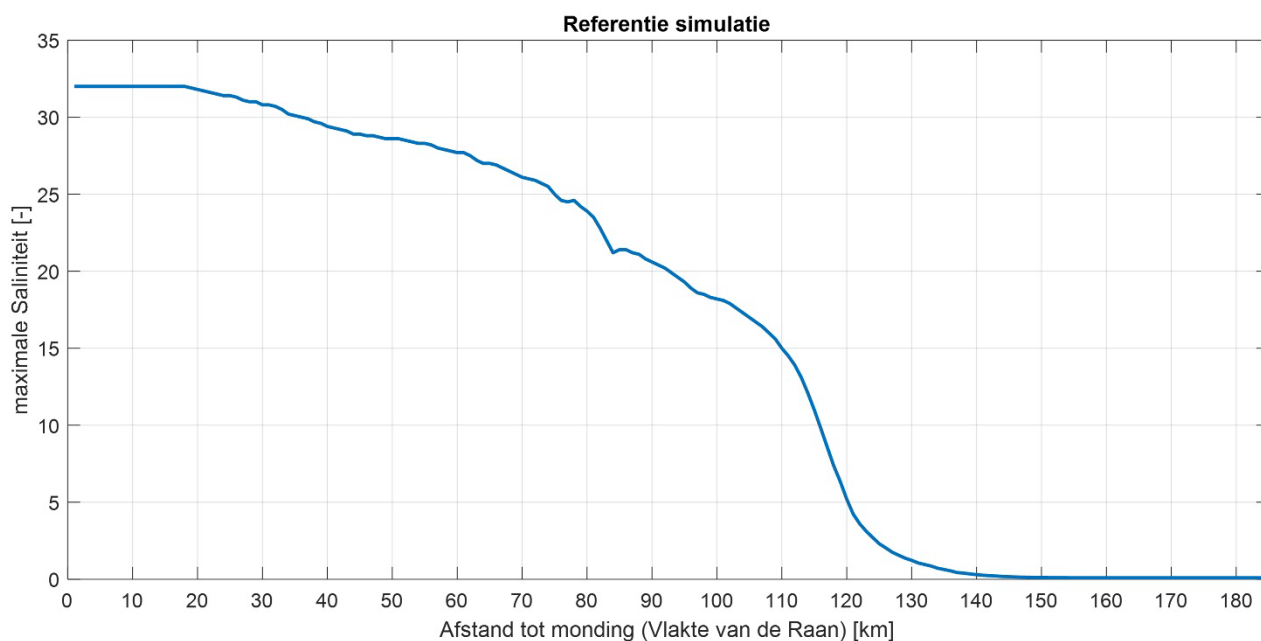
Figuur 16 – Tijdreeks saliniteit ter hoogte van Temse (km 130) in de referentie simulatie



Figuur 17 – Maximale saliniteit amplitude op het einde (na 210 dagen) van de referentie simulatie langsheen het estuarium

Wanneer we voor elke locatie langsheen het estuarium de maximale saliniteit bepalen op het einde van de referentie simulatie, wordt de grafiek in Figuur 18 verkregen. Deze grafiek vertoont een gestage afname van de saliniteit vanaf de afwaarts rand van het model naar opwaarts. Vanaf km 106 ter hoogte van Antwerpen en dus ook ter hoogte van de maximale amplitude in saliniteit is een sterkere afname merkbaar. Pas na km 131 duikt de saliniteit onder waarde 1.





Figuur 18 – maximum saliniteit na 210 dagen in de referentie simulatie langsheen het estuarium.

#### 4.1.3 Effect springtij of doortij

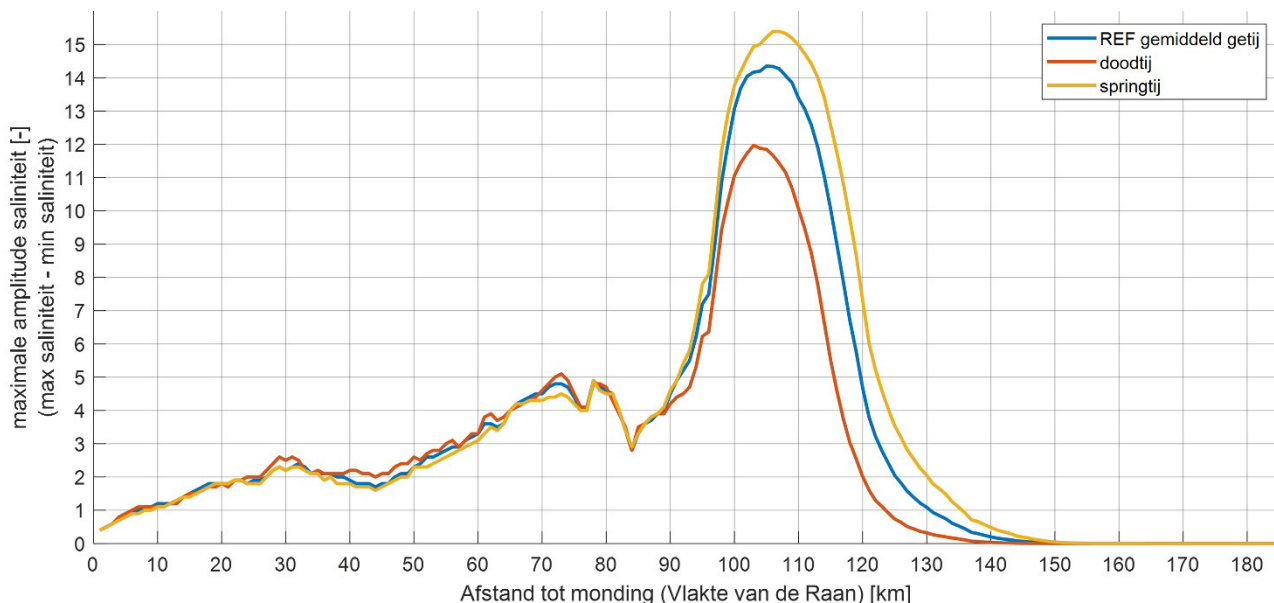
De referentie simulatie is uitgevoerd met een gemiddeld M2 getij aan de afwaartse rand. Dit ene getij wordt dan telkens weer herhaald om zo weinig mogelijk invloed van de variatie (doortij-springtij) in het getij de saliniteit in deze modelscenario's te laten beïnvloeden en zo een duidelijker evenwichtssituatie te kunnen onderscheiden. Maar wat zou het effect op de saliniteit zijn als we een gemiddeld doortij of springtij zouden opleggen aan de afwaartse rand? Voor zowel dood- als springtij werden weer de waarden voor amplitude te Vlissingen gebruikt:

Voor een springtij werd enkel de amplitude aangepast naar 2,22 m en voor een doortij werd de amplitude aangepast naar 1,55 m. Alle andere parameters bleven hetzelfde. Enkel de initiële waterhoogte in het model bij de opstart werd aangepast naar 4,52 m TAW en 3,85 m TAW voor het spring en doortij respectievelijk. Het initieel opgelegd zoutveld blijft gelijk in alle simulaties tenzij expliciet anders vermeld.

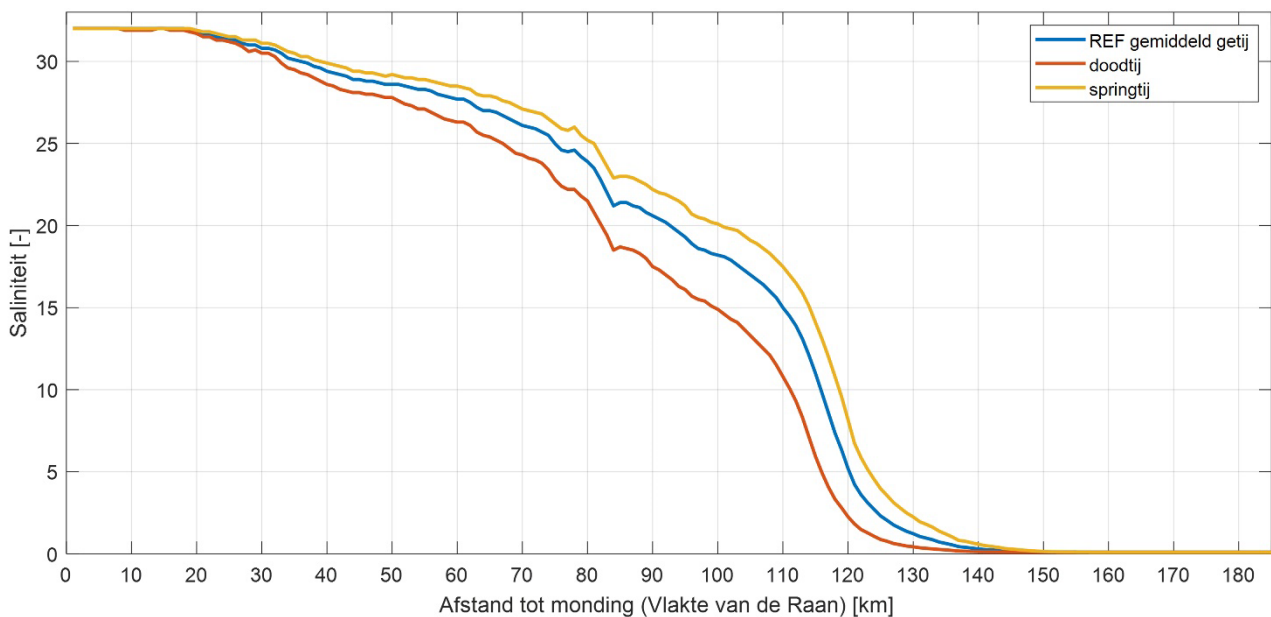
De hoog- en laagwaterstanden voor een spring- en doortij werden reeds gegeven hierboven in dezelfde figuur (Figuur 14) als voor het gemiddeld getij om de vergelijking visueel beter te maken. De hoogwaterstanden bij springtij en doortij zijn respectievelijk hoger en lager dan bij een gemiddeld getij. De laagwaterstanden voor springtij zijn lager dan bij een gemiddeld getij tot km 145. Verder opwaarts zijn de laagwaterstanden voor een springtij hoger dan voor een gemiddeld getij. Het omgekeerde geldt voor doortij.

De hogere waterstanden bij een springtij vertalen zich in een hogere amplitude van de saliniteit in de Zeeschelde en een kleine verschuiving opwaarts van het maximum in de amplitude (Figuur 19). Voor doortij geldt het omgekeerde: de amplitude in de Zeeschelde neemt af ten opzichte van een gemiddeld getij. Het maximum in amplitude verschuift ook licht afwaarts (Figuur 19). De amplitude in de Westerschelde blijft vrij gelijk voor de drie types getij.

Bij een springtij kan het zout ook iets verder in het estuarium binnendringen gegeven de randvoorwaarden van de referentie simulatie. Dit is weergegeven in Figuur 20. Bij doortij kan het zout minder ver in het estuarium binnendringen vergeleken met een gemiddeld getij en gegeven de randvoorwaarden van de referentie simulatie.



Figuur 19 – Maximale saliniteit amplitude op het einde (na 210 dagen) van de referentie simulatie langsheen het estuarium vergeleken met deze tijdens enkel dootij en enkel springtij



Figuur 20 – Maximum saliniteit na 210 dagen in de referentie simulatie langsheen het estuarium vergeleken met deze bij enkel dootij en enkel springtij.

#### 4.1.4 Effect springtij-doodtij cyclus

Na spring- en doodtij apart bekeken te hebben bekijken we hier wat het effect is als we een volwaardige springtij-doodtij cyclus opleggen als randvoorwaarde. Hiervoor werd bij het M2 getij een M4 en S2 component toegevoegd. Het gemiddelde waterniveau aan de afwaartse rand blijft op 2,3 m TAW.

Volgende vergelijking werd gebruikt om de waterstanden op de afwaartse rand te genereren:

$$SL=Z0+A\_M2*\text{SIN}(\text{FREQ\_M2}*T+\text{PHI\_M2})+A\_M4*\text{SIN}(\text{FREQ\_M4}*T+\text{PHI\_M4})+A\_S2*\text{SIN}(\text{FREQ\_S2}*T+\text{PHI\_S2})$$

waarbij:

$Z0 = 2.3$  m TAW ( gemiddeld waterniveau)

$A\_M2 = 1.6$  m (amplitude M2 component)

$A\_M4 = 0.13$  m (amplitude M4 component)

$A\_S2 = 0.55$  m (amplitude S2 component)

$\text{PHI\_M2} = 57*\text{PI}/180$  (fase M2 component)

$\text{PHI\_M4} = 108*\text{PI}/180$  (fase M4 component)

$\text{PHI\_S2} = 104*\text{PI}/180$  (fase S2 component)

$\text{FREQ\_M2} = 2*\text{PI}/(3600*12.42)$  [1/s] (frequentie M2 component)

$\text{FREQ\_M4} = 2.00*\text{FREQ\_M2}$  [1/s] (frequentie M4 component)

$\text{FREQ\_S2} = 2*\text{PI}/(3600*12)$  [1/s] (frequentie S2 component)

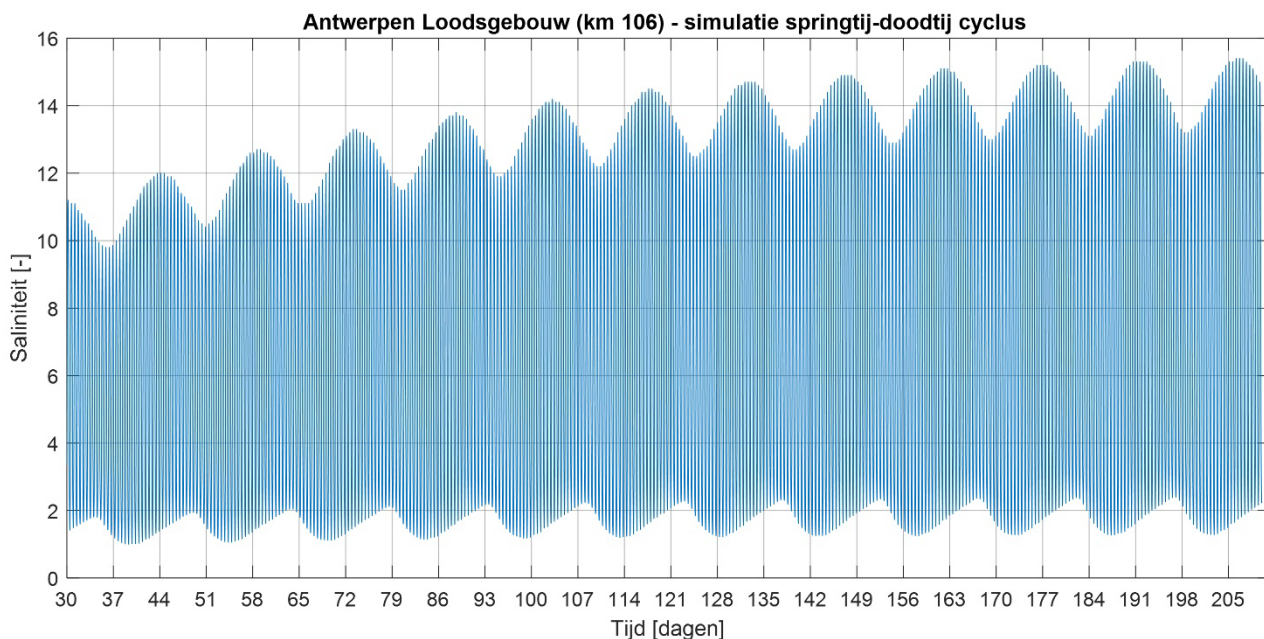
$T$  = tijd in de simulatie [s]

Alle andere parameters bleven hetzelfde als in de referentie simulatie.

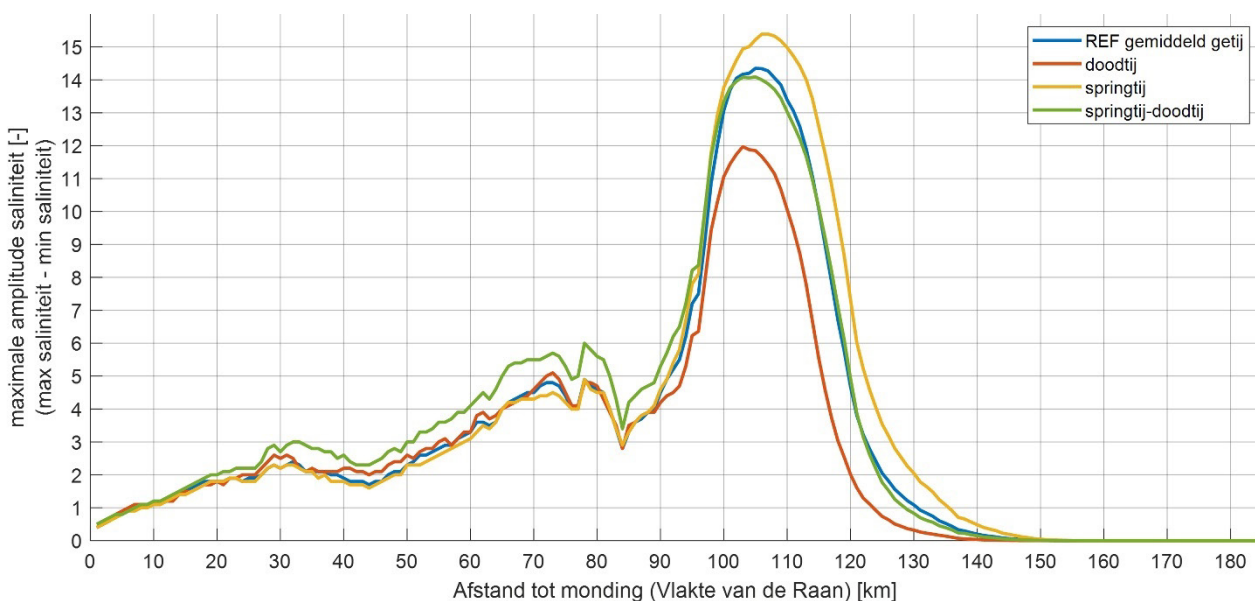
Een tijdreeks van de saliniteitswaarden ter hoogte van Antwerpen Loodsgebouw (km 106) laat duidelijk de springtij-doodtij cyclus zien (Figuur 21). Deze figuur maakt ook meteen duidelijk dat het bij een springtij-doodtij simulatie moeilijker is om een evenwichtstoestand waar te nemen.

Wanneer de amplitude van de saliniteit langsheen het estuarium wordt uitgezet en vergeleken met de resultaten van een doodtij, gemiddeld tij en springtij, zoals in Figuur 22, dan ligt de amplitude het dichtst bij die van de referentie simulatie met enkel een gemiddeld getij opgelegd aan de afwaartse rand. Wel valt op dat bij het opleggen van de cyclus de amplitude in de Westerschelde wel hoger ligt dan in de drie andere simulaties (gemiddeld getij, doodtij, springtij).

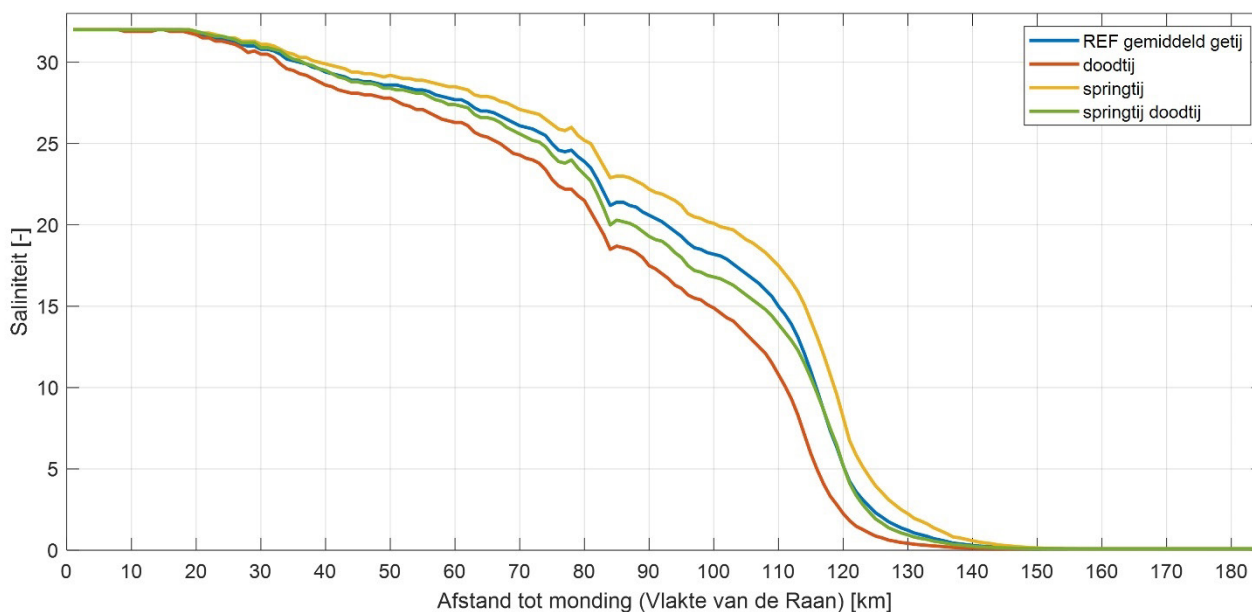
Naar maximale zoutindringing in het estuarium liggen de waarden net onder deze van de referentie simulatie met enkel een gemiddeld getij, maar dringt het zout wel even ver in het estuarium binnen (Figuur 23) en dit in tegenstelling tot wanneer enkel een springtij werd opgelegd of enkel een doodtij, want dan drong het zout verder en minder ver door in het estuarium respectievelijk.



Figuur 21 – Tijdreeks saliniteit ter hoogte van Antwerpen Loodsgebouw (km 106) in de simulatie met een springtij-doodtij cyclus aan de afwaartse rand opgelegd.



Figuur 22 – Maximale saliniteit amplitude op het einde (na 210 dagen) van de simulatie met springtij-doodtij cyclus langsheen het estuarium vergeleken met deze tijdens enkel gemiddeld (REF) getij, enkel doottij en enkel springtij.



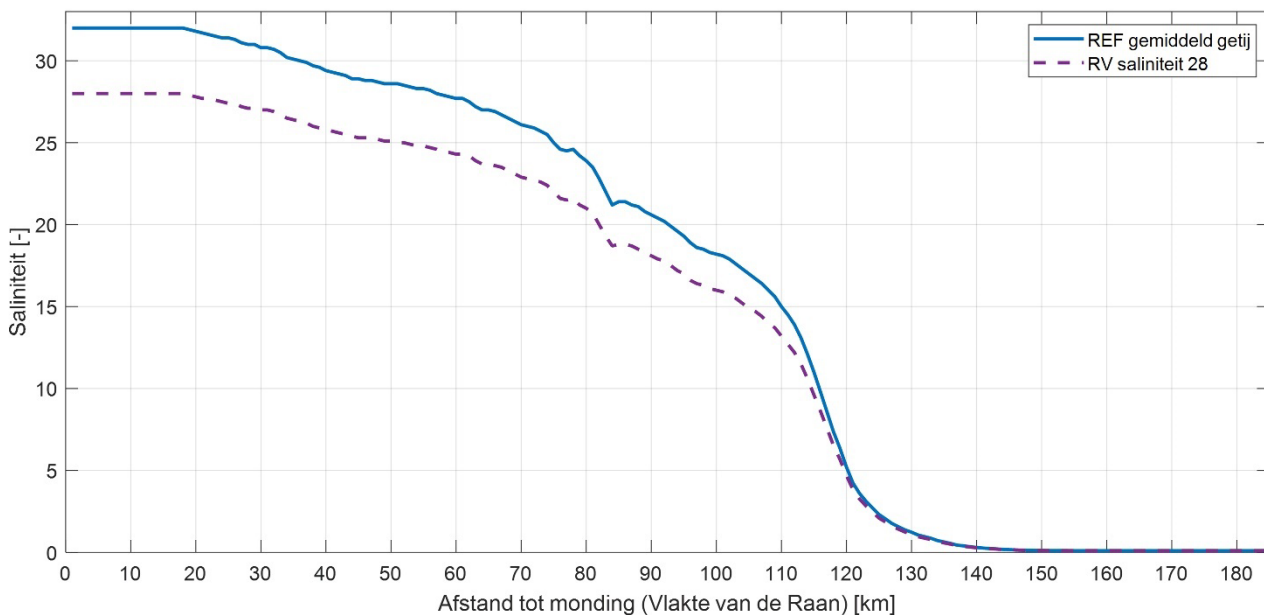
Figuur 23 – Maximum saliniteit na 210 dagen in de simulatie met een springtij-dooftij cyclus langsheen het estuarium vergeleken met deze bij enkel gemiddeld getij (REF), doottij en enkel springtij.

#### 4.1.5 Effect zoutconcentratie van de afwaartse rand

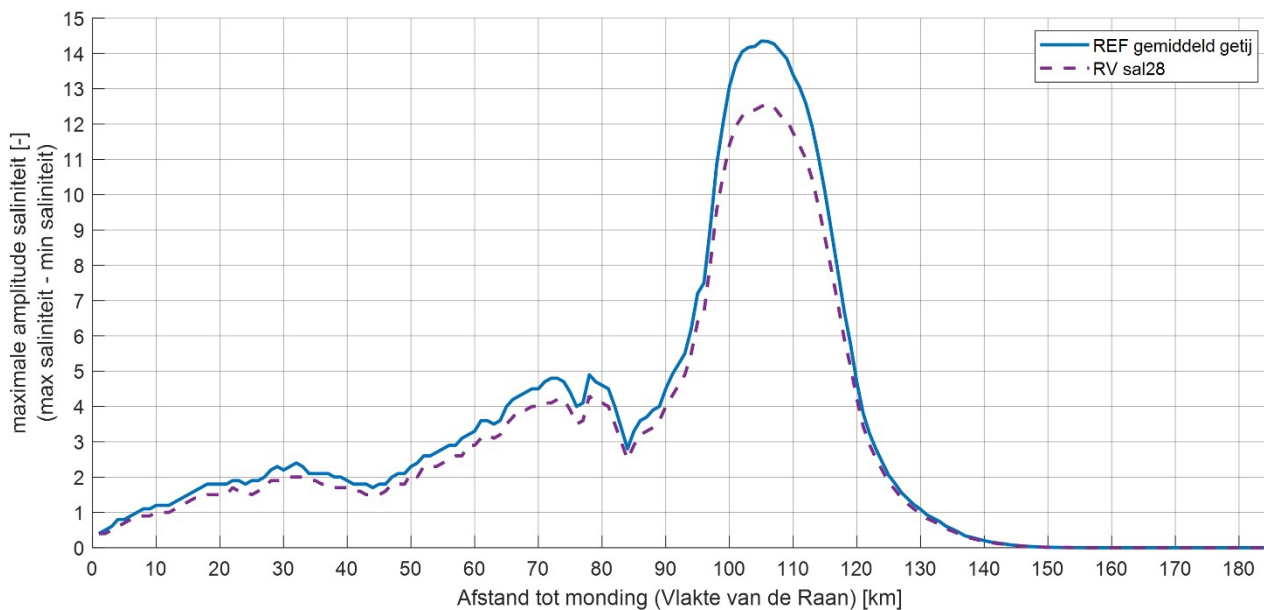
Wanneer de meetreeks van de meetpaal aan de Vlakte van de Raan van 2013 bekeken wordt valt op dat de saliniteit varieert tussen een minimum van 28 en een maximum van 34,5. Daarom werd ook een simulatie gestart met een constante saliniteit van 28 opgelegd aan de afwaartse rand. Alle andere parameters werden hetzelfde gehouden als in de referentie simulatie.

De maximale saliniteit op het einde van de simulatie langsheen het estuarium ligt lager dan bij de referentie simulatie, maar het zout dringt wel even ver door in het estuarium. Dit wordt getoond in Figuur 24. Men zou kunnen verwachten dat bij een lagere saliniteit aan de rand het zout minder ver in het estuarium doordringt, maar het lijkt erop dat de concentraties in de Zeeschelde voldoende hoog zijn en dat het evenwicht hier bepaald wordt door het bovendebiet.

Zoals de maximale saliniteitswaarden uit Figuur 24 al deden vermoeden ligt de amplitude van de saliniteit ook lager zoals getoond in Figuur 25.



Figuur 24 – Maximum saliniteit na 210 dagen in de simulatie met een randvoorwaarde (RV) van een constante saliniteit van 28 aan de afwaartse rand, langsheen het estuarium vergeleken met deze bij enkel gemiddeld getij (REF).



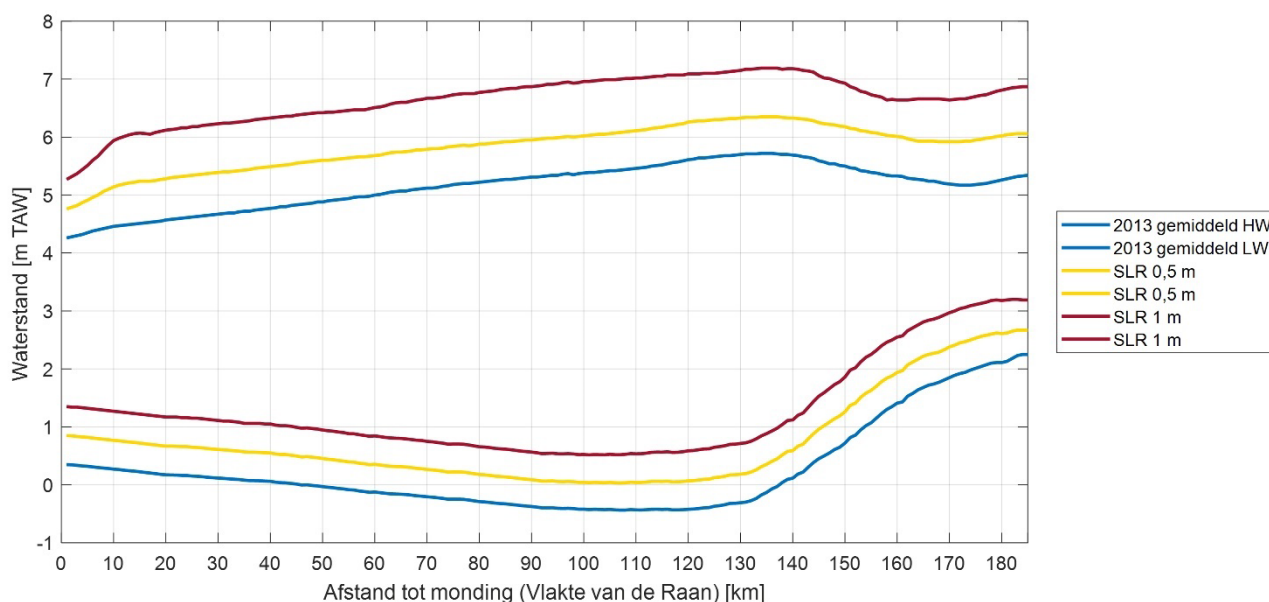
Figuur 25 – Maximale saliniteit amplitude op het einde (na 210 dagen) van de simulatie met een constante saliniteit van 28 aan de afwaartse rand langsheen het estuarium vergeleken met deze in de referentie simulatie.

## 4.2 Zeespiegelstijging

Er werden twee scenario's zeespiegelstijging doorgerekend. Een eerste scenario betreft een zeespiegel stijging van een halve meter. Hiervoor werd in de referentie simulatie de Z0 waarde of het gemiddelde waterniveau aan de afwaartse rand opgelegd verhoogd van 2,3 m TAW naar 2,8 m TAW. In een tweede scenario werd een zeespiegelstijging van 1 m doorgerekend. Hiervoor werd de Z0 waarde verhoogd tot 3,3 m TAW. Grotere zeespiegelstijgingen werden niet doorgerekend gezien deze met de huidige bathymetrie minder realistische resultaten zouden geven. Bij een zeespiegelstijging wordt verwacht dat de bathymetrie zich continu aanpast aan de nieuwe omstandigheden.

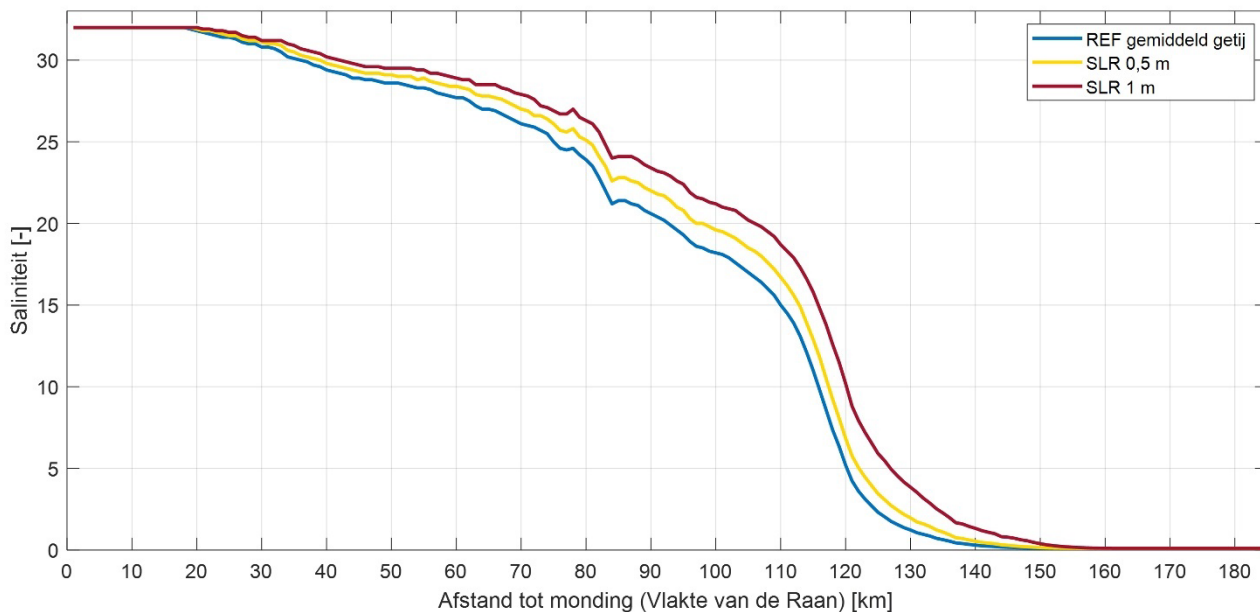
Alle andere parameters bleven behouden zoals in de referentie simulatie. Verder moet wel nog opgemerkt worden dat de overstromingsgebieden niet actief zijn in deze simulaties. Bij hogere waterniveaus opwaarts in het estuarium zouden de overstromingsgebieden met gecontroleerde gereduceerd getij (GGG's) wel een hogere impact kunnen hebben. Maar aangezien de bathymetrie voor deze scenario's ook niet aangepast werd, verwaarlozen we hier ook de mogelijke impact van de GGG's.

Bij beide zeespiegelscenario's stijgen de hoogwaterstanden sterker dan enkel de opgelegde Z0 verhoging (Figuur 26). Bij de laagwaterstanden is de stijging wel in grootteorde van de Z0 stijging.

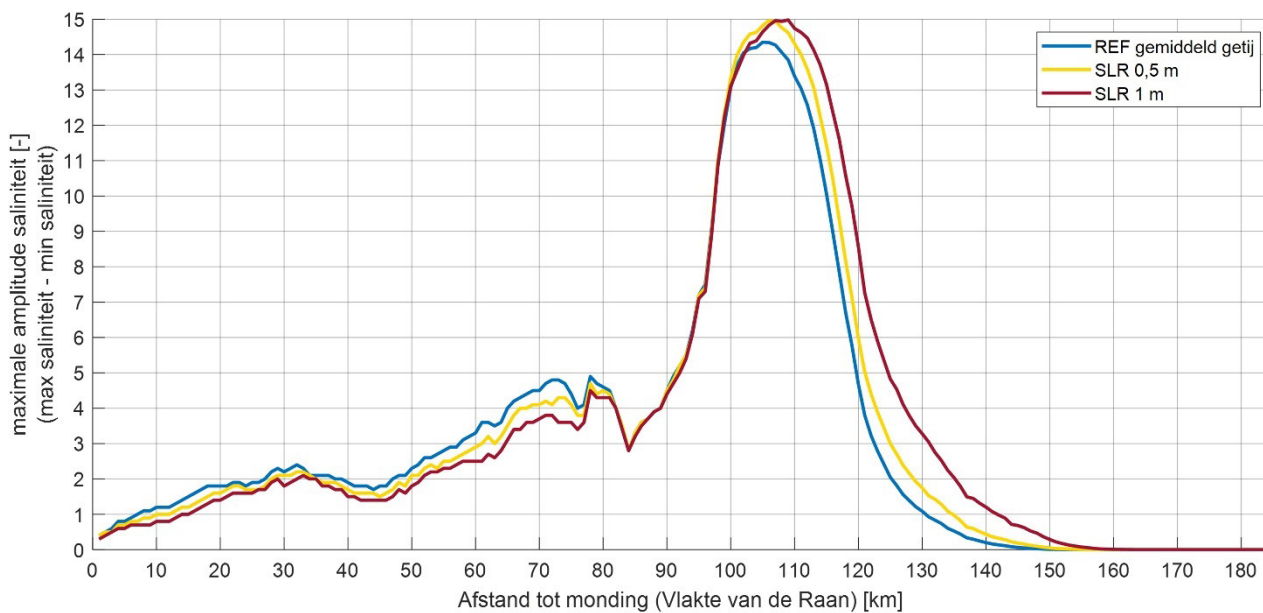


Figuur 26 – Hoogwater- en laagwaterstanden voor de simulaties met zeespiegelstijging (SLR) vergeleken met de referentie simulatie.

In de modelresultaten stijgen de maximale saliniteitswaarden langsheen het estuarium met een stijgende zeespiegel. Dit wordt getoond in Figuur 27. Het zout dringt ook verder in het estuarium binnen. Samen met de stijging van de saliniteitswaarden stijgt ook de amplitude in de Zeeschelde (Figuur 28). In de Westerschelde zien we een daling van de saliniteitsamplitude. Bovendien verschuift de locatie van de maximale amplitude opwaarts. Daar waar het opleggen van een enkel springtij ook de amplitude deed stijgen, was dit enkel zichtbaar in de Zeeschelde. Het verschil zit in de verhoging van de amplitude van de waterstand (= springtij) en een verhoging van de gemiddelde waterstand (= Z0 bij zeespiegelstijging).



Figuur 27 – Maximale saliniteitswaarden langsheen het estuarium op het einde van de simulaties met zeespiegelstijging (SLR) vergeleken met de referentie simulatie.



Figuur 28 – Maximale amplitude van saliniteit langsheen het estuarium op het einde van de simulaties met zeespiegelstijging (SLR) vergeleken met de referentie simulatie.



### 4.3 Effect bovenafvoer

Het effect van de bovenafvoer op de indringing van zout wordt onderzocht door in verschillende scenario's verschillende constante waarden van bovenafvoer op te leggen. Alle andere parameters blijven behouden zoals in de referentie simulatie. Voor de naamgeving van de simulaties wordt de hoofdletter Q gebruikt voor debiet gevolgd door een getal dat de som van alle bovendebieten weergeeft in m<sup>3</sup>/s. Zo werden Q10, Q20, Q30, Q40, Q60, Q70, Q100, Q150 en Q200 als scenario's doorgerekend. In de referentie simulatie bedraagt de som van alle bovendebieten 48 m<sup>3</sup>/s vandaar dat er geen Q50 scenario werd doorgerekend. De aparte debieten per bovengrens en per scenario zijn samengevat in Tabel 3. De verdeling van het totale bovendebiet werd constant gehouden over alle boven randen van het model. Om toch het effect van deze verhouding te bekijken werd er nog een scenario Q100A toegevoegd waar de verhoudingen anders verdeeld werden over de bovengrenzen.

Tabel 3 – Overzicht opgelegde constante bovendebiet per rand en per scenario

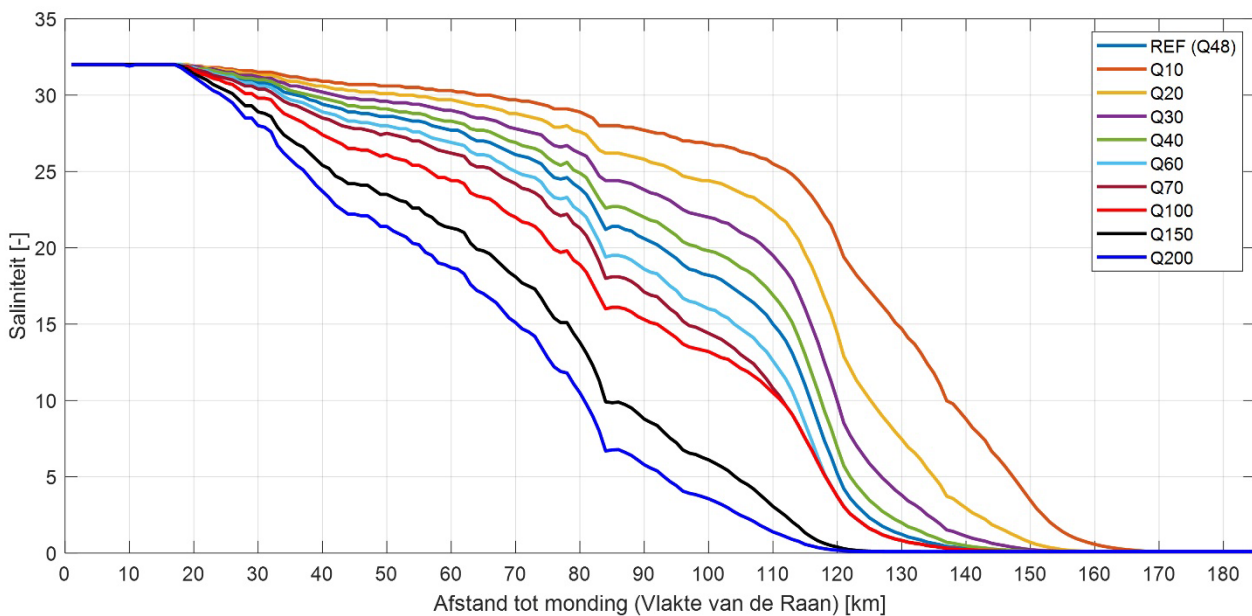
Scenario rand	Q10 [m <sup>3</sup> /s]	Q20 [m <sup>3</sup> /s]	Q30 [m <sup>3</sup> /s]	Q40 [m <sup>3</sup> /s]	Q60 [m <sup>3</sup> /s]	Q70 [m <sup>3</sup> /s]	Q100 [m <sup>3</sup> /s]	Q150 [m <sup>3</sup> /s]	Q200 [m <sup>3</sup> /s]	Q100A [m <sup>3</sup> /s]
Nete	2	4	6	8	12	14	20	30	40	40
Dijle	1	2	3	4	6	7	10	15	20	24
Zenne	1	2	3	4	6	7	10	15	20	24
Dender	2	4	6	8	12	14	20	30	40	2
Merelbeke	4	8	12	16	24	28	40	60	80	4

De resultaten van de verschillende bovenafvoer scenario's op zoutindringing worden in Figuur 29 getoond. In het algemeen geldt dat hoe lager het bovendebiet hoe hoger de saliniteitswaarden in heel het estuarium liggen en hoe verder opwaarts het zout kan indringen. De effecten van bovenafvoer reiken helemaal tot in Vlissingen. De verhoudingen zijn echter niet lineair. Hoe hoger het debiet hoe verder het zout afwaarts wordt gehouden, maar hoe verder afwaarts des te hoger het bovendebiet moet zijn om een vergelijkbaar grootte van effect of terugdringing te verkrijgen dan meer opwaarts bij lagere debieten. Dit is logisch aangezien stroomafwaarts het estuarium steeds breder en dieper is en er dus meer zoutwater door zoetwater vervangen moet worden.

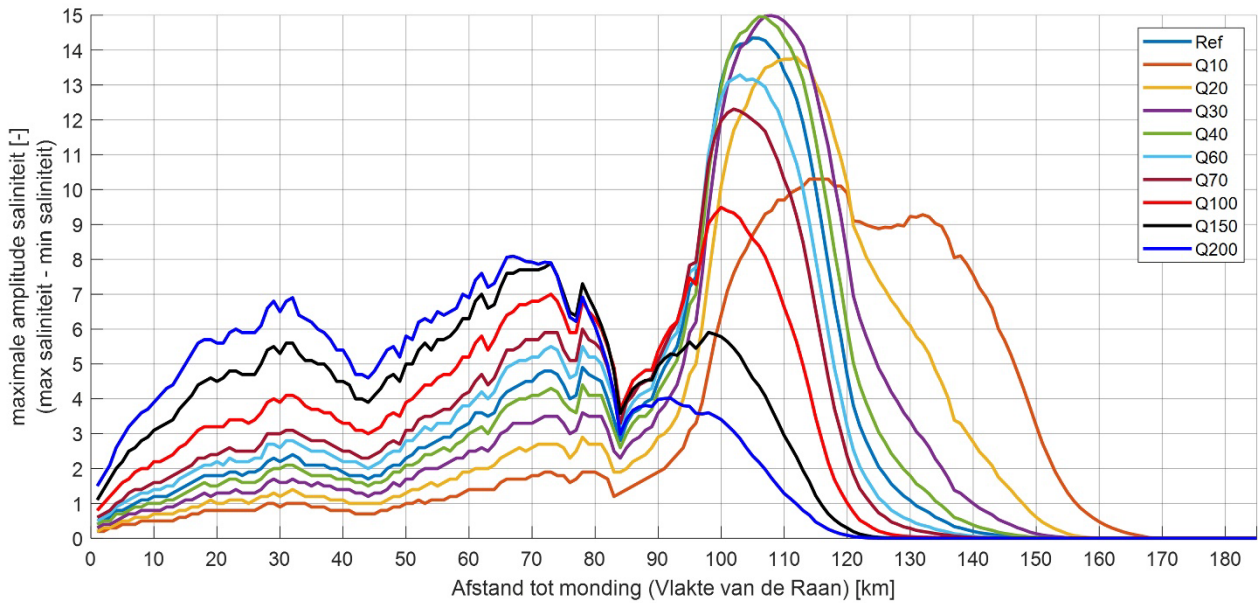
Bij de saliniteitsamplitude ligger de resultaten minder rechtlijnig ten opzichte van elkaar. Figuur 30 toont dat bij lagere bovendebieten (Q10) de amplitude lager ligt en meer uitgesmeerd is richting opwaarts in het estuarium. Naarmate het bovendebiet toeneemt wordt er een maximale amplitude over de scenario's waargenomen. Deze ligt bij een totale bovenafvoer van 30 m<sup>3</sup>/s. Hogere bovenafvoer leidt tot een verlaging van de piek in amplitude ter hoogte van Antwerpen, maar verhoogt de amplitude in de Westerschelde. Het effect van de bovenafvoer op de amplitude van saliniteit is ook merkbaar tot aan de afwaartse rand.

Een andere verhouding van verdeling van de bovendebieten (scenario Q100A) had geen effect op de resultaten. De resultaten waren gelijk aan de resultaten van het Q100 scenario en zijn dan ook niet apart in een figuur weergegeven. Het zout in de Schelde bevindt zich grotendeels afwaarts Rupelmonde, daar waar alle bovenafvoer samenkomt. Dat is waarschijnlijk de belangrijkste reden dat deze verhouding weinig effect heeft op de zoutindringing bij het Q100 scenario.

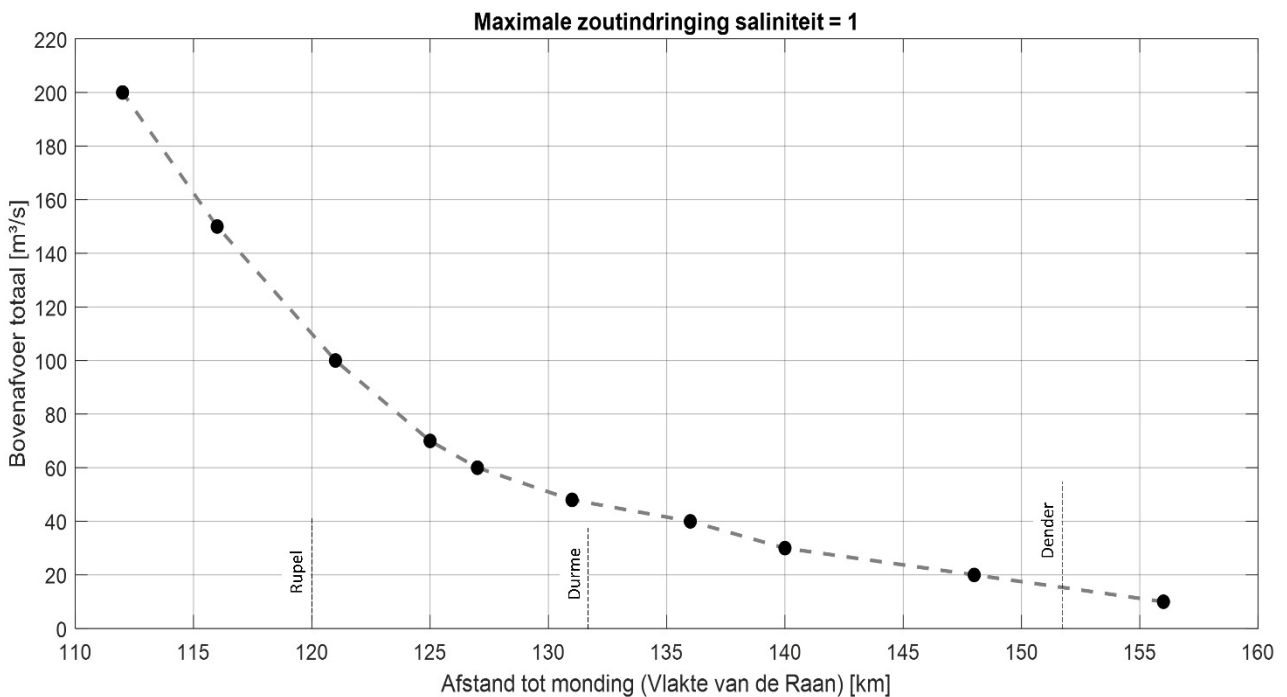
Wanneer we een grenswaarde van saliniteit 1 nemen, kan de afstand van indringing uitgezet worden in functie van het opgelegde bovendebiet. Dit is getoond in Figuur 31. Hoe hoger het bovendebiet, hoe minder ver het zout kan indringen. Maar de figuur toont ook dat er sneller meer bovenafvoer nodig is om het zout nog verder afwaarts terug te dringen. Zoals eerder reeds vermeld is dit logisch gezien er afwaarts in het estuarium (breder, dieper) een groter volume water te verplaatsen is. De waarden van bovenafvoer die in deze scenario's gehanteerd werden zijn misschien nog niet groot genoeg om te zien waar de limieten liggen op het terugdringen van het zout naar afwaarts. Bij een Q200 bedraagt het bovendebiet te Merelbeke 80 m<sup>3</sup>/s, een waarde die in realiteit voor korte periode veel hogere kan liggen. Dit zou onderzocht kunnen worden in bijkomende simulaties. Ook het effect van een korte piek in zeer hoge bovenafvoer is in deze scenario's nog niet onderzocht.



Figuur 29 – Maximale saliniteitswaarden langsheen het estuarium op het einde van de simulaties met verschillende bovenafvoer (Q) vergeleken met de referentie simulatie (Q48).



Figuur 30 – Maximale amplitude van saliniteit langsheen het estuarium op het einde van de simulaties met verschillend bovendebiet (Q) vergeleken met de referentie simulatie (Q48).



Figuur 31 – Maximale afstand tot waar een saliniteitswaarde van 1 kan teruggevonden worden in het estuarium in functie van het totale bovendebiet.

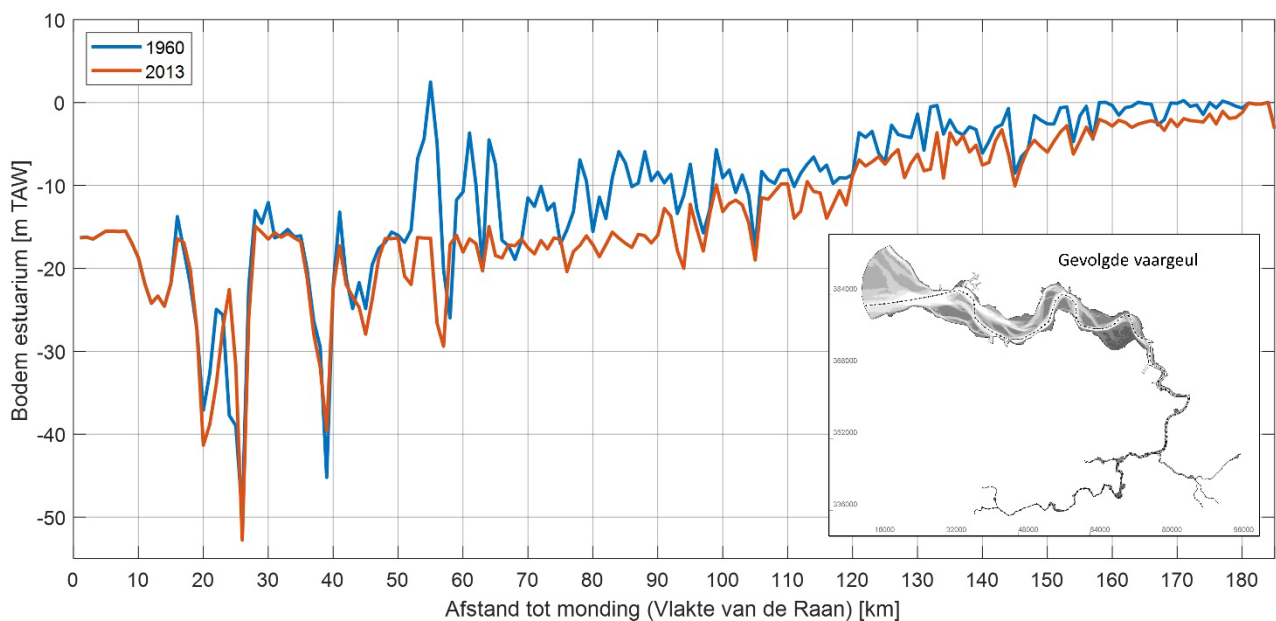
## 4.4 Effect bathymetrie

Het effect van bathymetrie op zoutindringing werd onderzocht door in een scenario de bathymetrie in Westerschelde en Zeeschelde te vervangen door de bathymetrie van het Schelde estuarium in 1960. Het estuarium was toen minder diep op vele plaatsen wat zijn effect heeft op de getijndringing en de menging van het water. Dit zal op zijn beurt effect hebben op de zoutindringing. Buiten de bathymetrie werd er niets meer aangepast en bleven alle parameters hetzelfde als in de referentie simulatie.

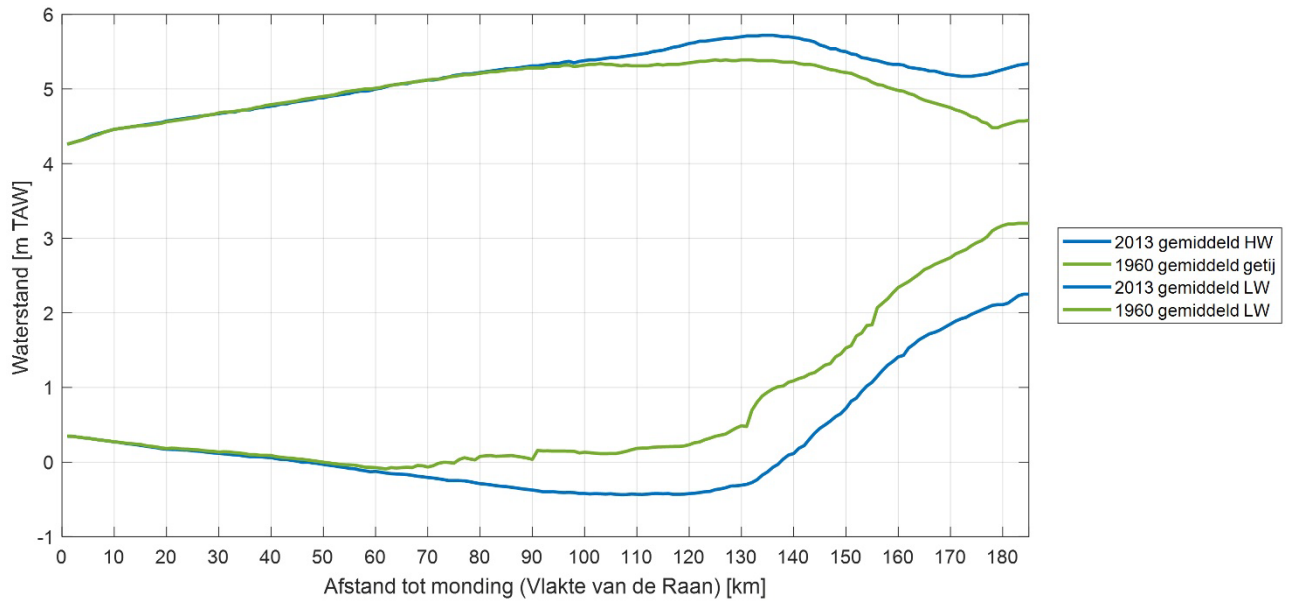
Om een idee te geven van het verschil in bathymetrie werd langs de hoofdvaargeul de bathymetrie opgemeten in het scenario met de bathymetrie van 1960 en deze in de referentie simulatie (Figuur 32). De afstanden langs deze vaarweg zijn hetzelfde als deze die in heel dit rapport gehanteerd worden. Deze figuur geeft een idee van de grootteorde verschillen in diepte langsheen de vaarweg.

Voor dit scenario en het referentie scenario werden de hoogwater- en laagwaterstanden geplot in Figuur 33. Voor de Westerschelde blijven de verschillen nog beperkt. In de Zeeschelde zijn de hoogwaters lager en de laagwaters hoger in 1960 vergeleken met de referentie simulatie met de bathymetrie van 2013. Dit resulteert ook in een minder diepe zoutindringing zoals getoond in Figuur 34. De amplitude van de saliniteit stijgt in de Westerschelde en is lager in de Zeeschelde (Figuur 35). De piek in amplitude ligt in het scenario ook verder afwaarts vergeleken met de referentie simulatie.

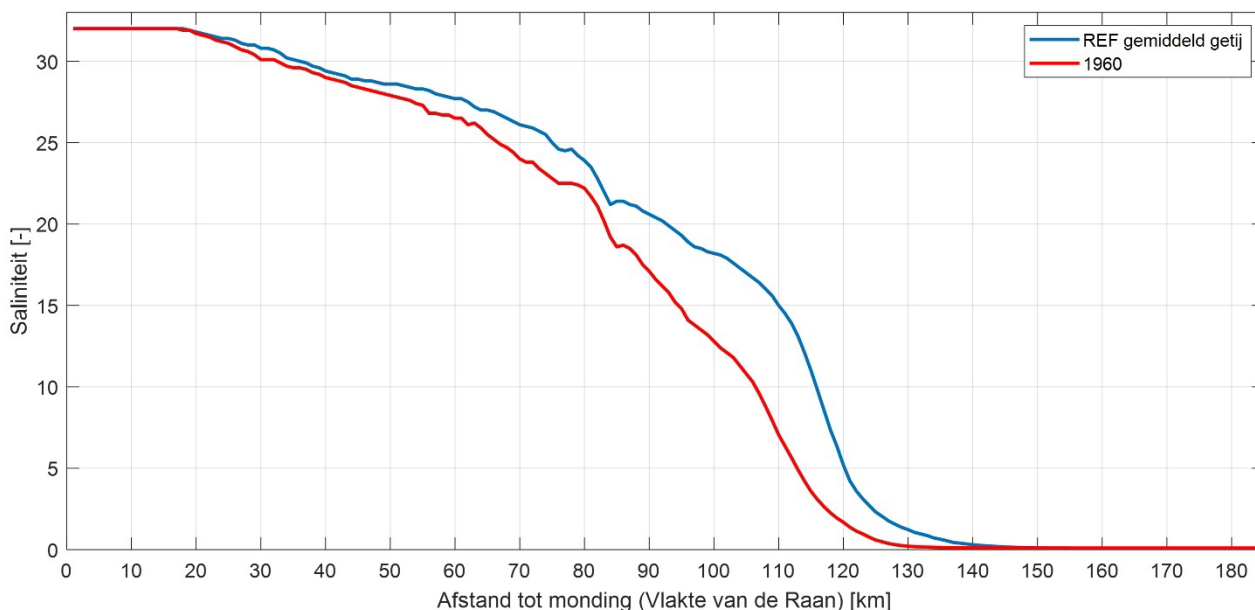
De bathymetrie heeft zijn effect op de getijndringing en de menging in het estuarium. Dit vertaald zich door naar de zoutverdeling. Hoe minder de getij-indringing hoe minder de zoutindringing.



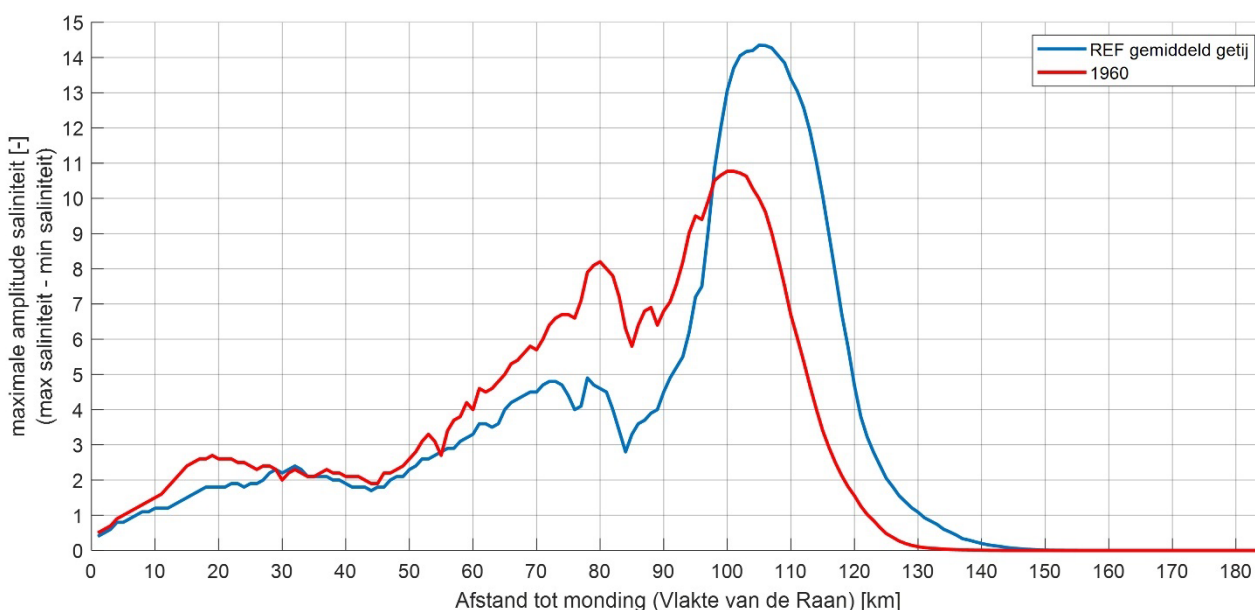
Figuur 32 – bodemprofiel bathymetrie model 2013 en 1960 volgens de vaargeul aangegeven in de inzet figuur.



Figuur 33 – Vergelijking tussen hoog- en laagwaterstanden in de referentie simulatie en de simulatie met de bathymetrie van 1960.



Figuur 34 – Maximale saliniteitswaarden langsheen het estuarium op het einde van de simulatie met de bathymetrie van 1960 vergeleken met de referentie simulatie (bathymetrie 2013).



Figuur 35 – Maximale amplitude van saliniteit langsheen het estuarium op het einde van de simulatie met de bathymetrie van 1960 vergeleken met de referentie simulatie (bathymetrie 2013).

## 4.5 Saliniteit 1947 en 1949

### 4.5.1 modelbeschrijving

In de jaren 1949 en 1950 werden hoge maxima van saliniteit te Antwerpen opgemeten, 17,5 en 15,2 respectievelijk. Ter vergelijking, het maximum van de laatste 20 jaar ligt op saliniteit 13. Uit 1947 zijn er enkel metingen te Schelle, maar deze geven voor die locatie ook zeer hoge saliniteitswaarden aan. Het maximum dat in 1947 te Schelle werd opgemeten bedraagt 9,2. Om een eerste idee te krijgen hoe realistisch deze waarden zijn werden twee simulaties opgestart, één voor het jaar 1947 en één voor het jaar 1949. Omdat dit slechts een oefening is om de grootteorde van saliniteit te bekijken, werd er de modelversie met de bathymetrie van 1960 genomen, zoals deze in vorige sectie werd beschreven. Verder werden de karakteristieken van het M2 getij aangepast aan de periode 1947-1949. Hiervoor werd het ZO niveau op 2,47 m TAW (i.p.v. 2,3 m TAW in de referentie) gezet en werd de amplitude verlaagd naar 1,8 m (i.p.v. 1,95 m in de referentie). Er wordt dus enkel met een gemiddeld M2 getij gewerkt. Een nauwkeurige reproductie van het getij van beide jaren zou op dit moment teveel werk zijn aangezien de gemeten tijdreeksen niet direct voorhanden zijn.

Verder werd het bovendebiet aangepast aan de waarden die gemeten werden voor beide jaren. Voor 1947 is er een gedetailleerde meetreeks voorhanden voor de debieten te Gentbrugge. Voor 1949 waren er enkel maandgemiddelde debieten te Schelle beschikbaar. Voor 1947 werd het debiet van Gentbrugge genomen en volgens de verhoudingen van de debieten in de referentie werden hieruit de debieten voor de Nete, Dijle, Zenne en Dender berekend. Voor 1949 werden de maandgemiddelde debieten van Schelle volgens de verhoudingen van de referentie verdeeld over de verschillende bovendebieten zodat de som van deze gelijk is aan het maandgemiddelde debiet te Schelle.

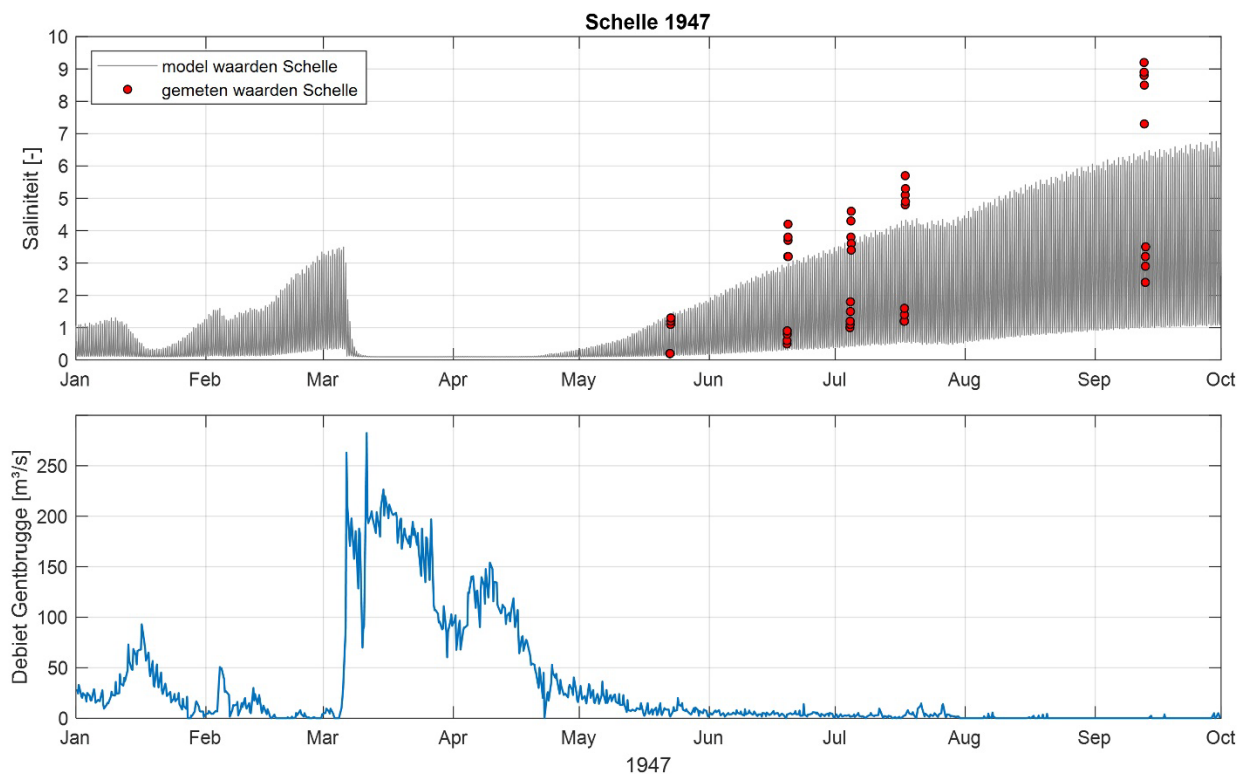
Als initieel zoutveld werd het bestaande initieel zoutveld van de referentie simulatie verlaagd met 6 eenheden en deze waarden werden voor 1947 en 1949 opgelegd als startwaarden.

De andere parameters werden gelijk gehouden aan de referentie simulatie.

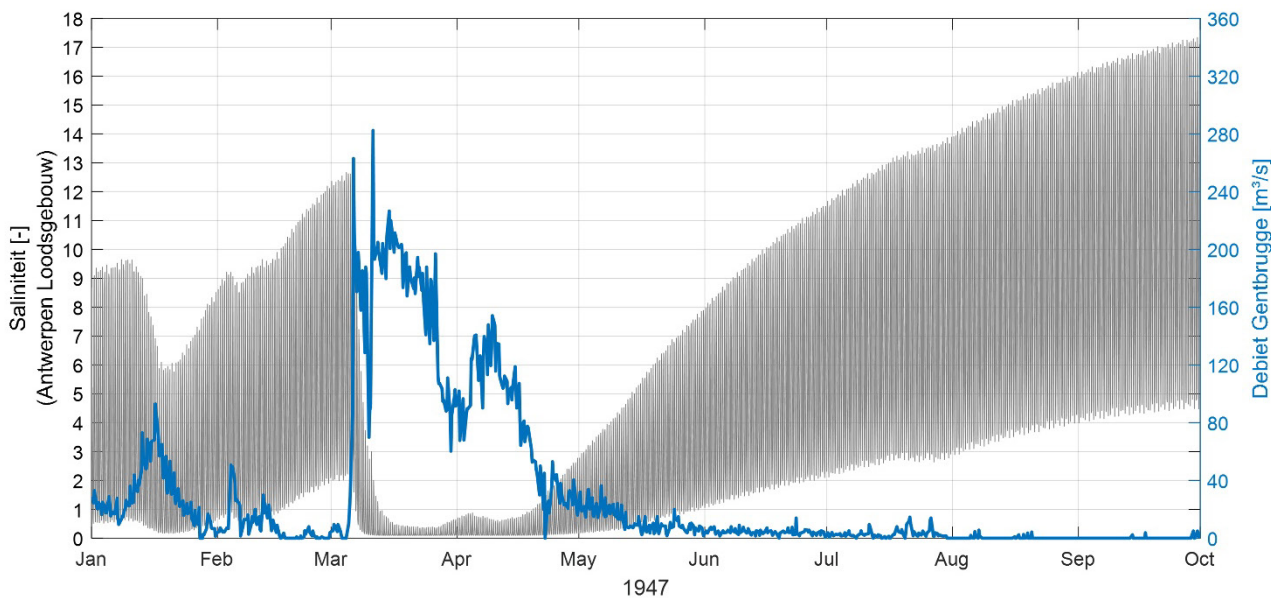
### 4.5.2 resultaten

Voor 1947 onderschat het model de maximale saliniteit te Schelle. Het model haalt maximum saliniteit 6 (Figuur 36). In 1947 werd half september echter een maximum saliniteit van 9,2 gemeten. De onderschatting van het model kan liggen aan de groffe modeloefening met al zijn aannames. Een model dat dichter bij de werkelijkheid van 1947 ligt, kan hier uitsluitsel geven. Echter de debieten te Gentbrugge dalen sterk vanaf half mei en in augustus en september is het debiet vaak onbestaande. Wanneer de resultaten voor de locatie Antwerpen Loodsgebouw bekeken worden in Figuur 37 tonen die een maximale saliniteit van 17 eind september. Dat is een waarde die zelfs de laatste droge zomers niet werd gehaald en volgens de meetgegevens te Schelle zou het model de werkelijkheid nog onderschatten.

Het model van 1949 onderschat ook licht de gemeten saliniteit te Antwerpen Loodsgebouw. Het model bereikt een maximale saliniteit van 15,5 daar waar de gemeten maximale saliniteit 17,5 bedraagt (Figuur 38). Maar wat grootteorde betreft doet het model het wel goed en gezien de beperkingen van deze oefening (maandgemiddeld debiet, gemiddeld M2 getij, geen doortij-springtij variatie, niet de juiste bathymetrie,...) toont deze oefening aan dat de gemeten hoge waarden in saliniteit zeer realistisch zijn en dat de metingen dan ook betrouwbaar zijn.

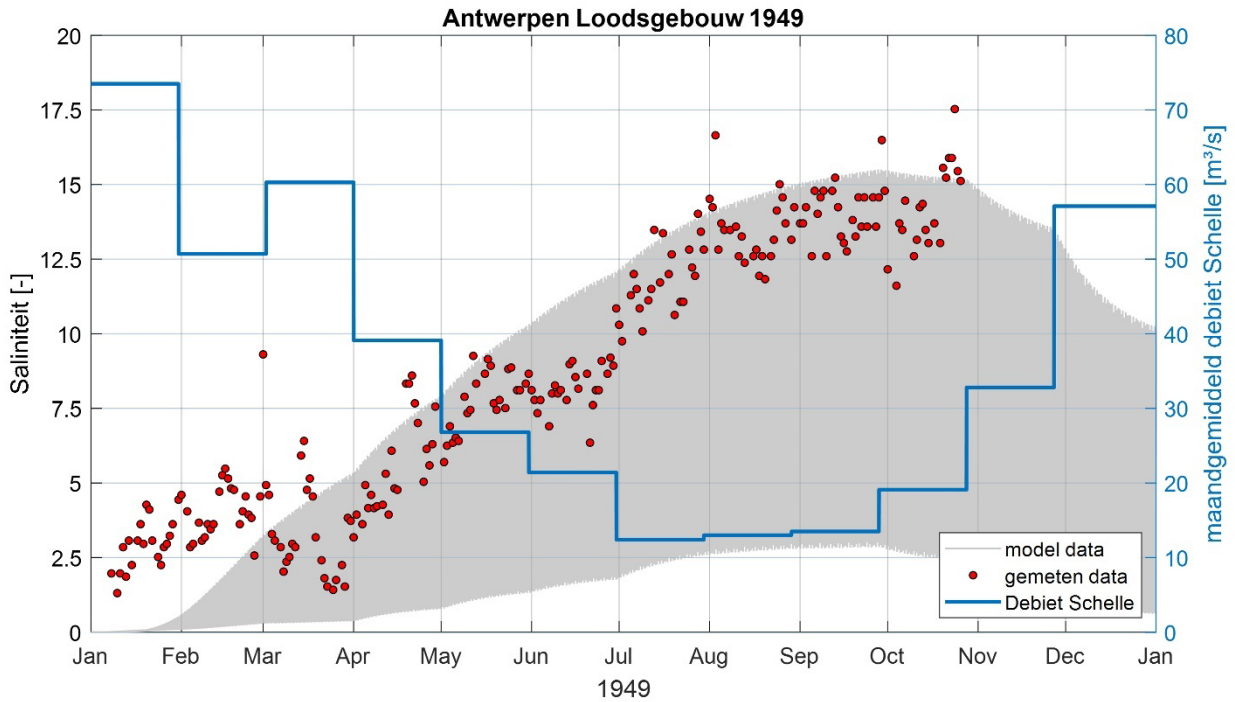


Figuur 36 – Tijdreeks saliniteit te Schelle uit model simulatie 1947 met gemeten saliniteitswaarden erbij geplot. Onderaan het in het model opgelegde debiet te Gentbrugge.

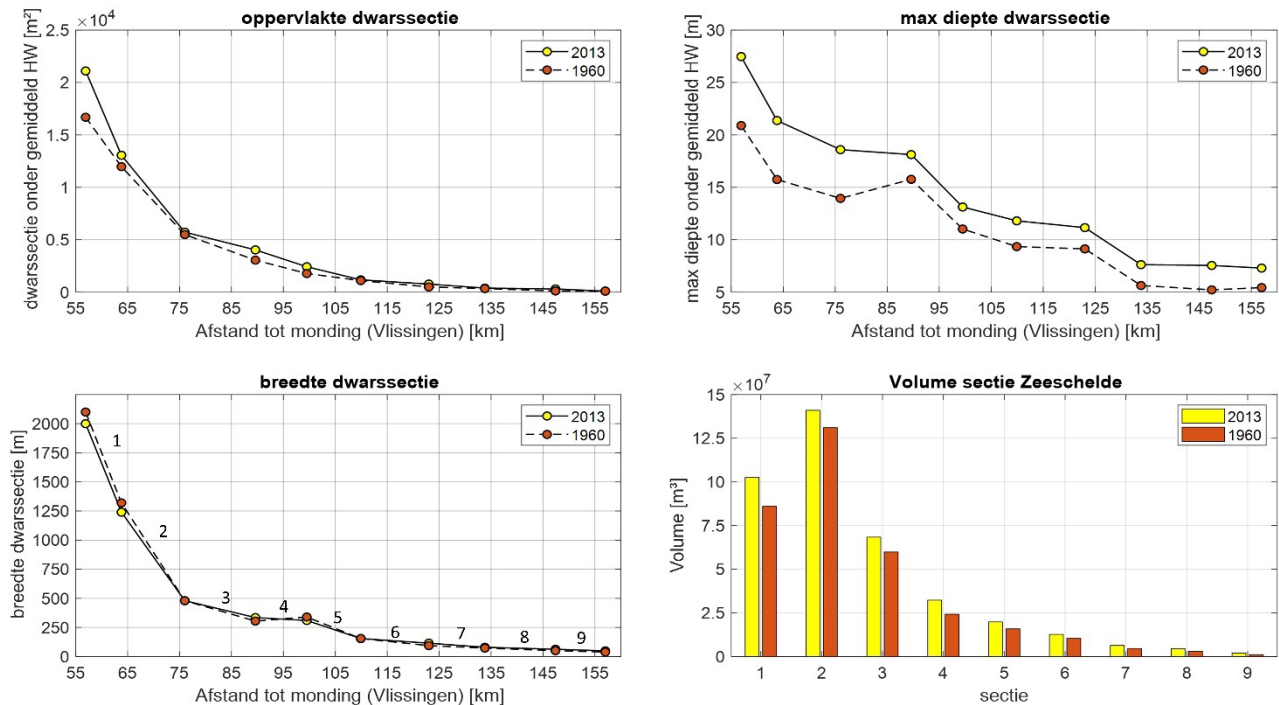


Figuur 37 – Modelresultaten voor Saliniteit ter hoogte van Antwerpen Loodsgebouw voor simulatie 1947. Het debiet te Gentbrugge is ter referentie erbij geplot.





Figuur 38 – Modelresultaten voor saliniteit ter hoogte van Antwerpen Loodsgebouw in het grijs weergegeven. De gemeten data bij Kentering Hoogwater (KHW) zijn als rode bolletjes geplot. Het maandgemiddelde debiet te Schelle is in het blauw weergegeven.



1960	Afstand tot Vlissingen	Gemiddeld HW	dwarssectie	Volume sectie opwaarts	Max diepte	Max diepte onder gem HW	Breedte dwarssectie
locatie	[km]	[m TAW]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m TAW]	[m]	[m]
Prosperpolder	56,9	4,9	16693	86022000	-16	20,9	2100
Lillo	63,8	4,95	11981	131085000	-10,8	15,75	1320
Oosterweel	76	5,02	5497	59885000	-8,93	13,95	480
Hemiksem	89,6	5,09	3058	24205000	-10,68	15,77	305
Temse	99,5	5,19	1783	15884000	-5,84	11,03	340
St.-Amands	109,9	5,12	1105	10419500	-4,23	9,35	155
Dendermonde	123	4,9	498	4631000	-4,23	9,13	94
Schoonaarde	133,8	4,7	344	3009500	-0,94	5,64	73
Wetteren	147,4	4,68	119	1110000	-0,54	5,22	51
Gentbrugge	158	4,77	103		0,67	5,44	39

2013	Afstand tot Vlissingen	Gemiddeld HW	dwarssectie	Volume sectie opwaarts	Max diepte	Max diepte onder gem HW	Breedte dwarssectie
locatie	[km]	[m TAW]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m TAW]	[m]	[m]
Prosperpolder	56,9	5,12	21111	102528000	-22,36	27,48	2000
Lillo	63,8	5,14	13065	140947500	-16,24	21,38	1240
Oosterweel	76	5,3	5728	68355000	-13,3	18,6	480
Hemiksem	89,6	5,43	4037	32320000	-12,7	18,13	335
Temse	99,5	5,55	2427	19833000	-7,58	13,13	310
St.-Amands	109,9	5,57	1179	12688000	-6,24	11,81	155

Dendermonde	123	5,3	773	6391000	-5,86	11,16	115
Schoonaarde	133,8	5,12	389	4530500	-2,51	7,63	80
Wetteren	147,4	5,09	308	2040000	-2,46	7,55	63
Merelbeke	157	5,06	100	102528000	-2,24	7,3	49

## 5 Conclusies

Door in dit rapport voor de oefening met verschillende scenario's gebruik te maken van een numeriek model heeft als belangrijkste voordeel dat vele parameters onder controle gehouden kunnen worden. Zo werd er getracht in de scenario's steeds naar een evenwicht in saliniteit te rekenen. Dit kon bereikt worden door enkel een gemiddeld getij op te leggen en dit getij steeds weer te herhalen. Ook voor de bovenafvoer werd steeds een constante waarde opgelegd. Dergelijke omstandigheden komen in realiteit natuurlijk niet voor en het is daarom zeer moeilijk om de effecten van bepaalde ingrepen of aanpassingen in het estuarium uit metingen te destilleren. Daar ligt dan de meerwaarde van de numerieke modellen

1. Op de eerste vraag of zeespiegelstijging een verdere indringing van de zoutgradiënt zal veroorzaken, kan positief op geantwoord worden. De scenario's met 0,5 en 1 m zeespiegelstijging tonen duidelijk een verdere indringing van de zoutgradiënt vast. Hierbij moet de kanttekening gemaakt worden dat deze oefening gemaakt werd op de huidige bathymetrie. Zo kan een meegroeiende bathymetrie met de zeespiegel er mogelijks voor zorgen dat het getij niet noodzakelijk verder in het estuarium zal doordringen en dan zal ook de zoutgradiënt minder opschuiven.
2. Het effect van bovenafvoer op de lengte van indringing van de zoutgradiënt werd ook onderzocht en hier is ook een duidelijke relatie te vinden tussen het volume bovenafvoer en lengte van indringing van het zout. Hierbij kan vermeld worden dat hoe verder afwaarts, des te ruimer het estuarium lokaal zal zijn, des te meer volume nodig is om het zout nog verder afwaarts te verplaatsen/uit te spoelen. Als bekend is welke saliniteitswaarden op welke locaties in het estuarium (en dan vooral opwaarts) ongewenst zijn om ecologische redenen, kan hiervoor een nodig volume bovenafvoer voor bepaald worden om zoutindringing tot aan die locatie te vermijden.
3. Als laatste werd aangetoond dat de laatste decennia gemiddeld gezien de zoutgradiënt verder opwaarts verschoven is. Door de bathymetrie van 1960 in het model in te brengen en alle andere parameters gelijk te houden, werd aangetoond dat voor die simulatie het zout minder ver het estuarium binnendrong. De grote variatie in bovenafvoer zorgt echter dat het effect van bathymetrie in de gemeten data zelf moeilijk zichtbaar zal zijn.

De scenario's tonen in het algemeen aan dat zoutindringing toeneemt met stijgende zeespiegel, kleinere bovenafvoer en ruimere bathymetrie. Echter is de interactie tussen dichtheidsstromingen, getijstromingen, turbulentie, etc. een zeer complex proces. Er is nog niet precies geweten welke processen in welke situaties de bovenhand nemen. Een beter begrip van het effect van de verschillende deelprocessen op de zoutindringing is wenselijk op langere termijn.

De grootste variatie in zoutindringing wordt echter veroorzaakt door de bovenafvoer of door het gebrek eraan. In dat opzicht zijn de andere effecten ondergeschikt, maar de scenario's tonen aan dat ze er wel zijn. De oefening met de modellen voor de jaren 1947 en 1949 toont aan dat met een lager getij en minder diepe bathymetrie er toch de hoogste saliniteitswaarden van de laatste honderd jaar geregistreerd worden te Antwerpen. En dat wordt veroorzaakt door de lange periode met lage of geen bovenafvoer in die jaren.

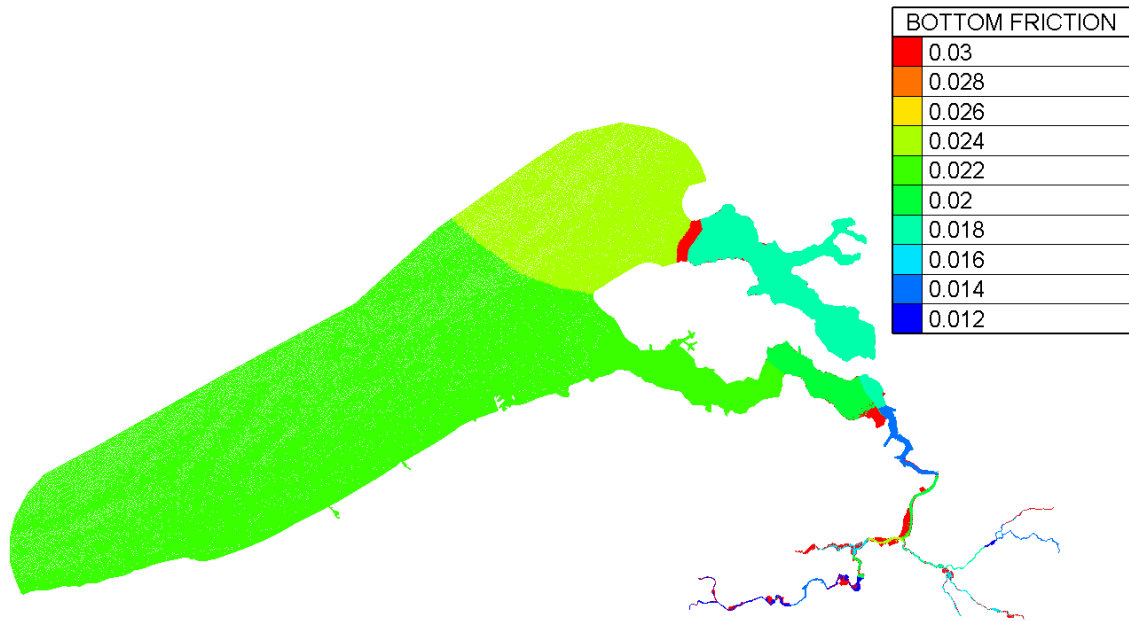
## Referenties

- De Boeck, K., Van Hoestenbergh, T., Vanlierde, E., Deschamps, M., Verwaest, T., & Mostaert, F. (2014). Saliniteit – chloriniteit – chlorositeit: relaties in gebruik in zeewater en in de Beneden-Zeeschelde: Vol. 12\_076 (WL Rapporten). Waterbouwkundig Laboratorium.
- Maximova, T.; Vanlede, J.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2015). Vervolgonderzoek bevaarbaarheid Bovenzeeschelde: Subreport 4 – Modellentrein CSM – ZUNO: validatie 2013. WL Rapporten, 13\_131. Flanders Hydraulics Research: Antwerp, Belgium
- Nieuwstadt, F.T.M. (2008). Turbulentie
- Smolders, S.; Maximova, T.; Vanlede, J.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016). Integraal Plan Bovenzeeschelde: Subreport 1 – SCALDIS: a 3D Hydrodynamic Model for the Scheldt Estuary. Version 5.0. WL Rapporten, 13\_131. Flanders Hydraulics Research: Antwerp, Belgium.
- Smolders, S. (2022). How a flow aligned mesh improves Telemac model results. Proceedings of the XXVIIIth Telemac User Conference, pp. 45-50, 18-19 October 2022, EDF R&D, Paris-Saclay.

## Bijlage 1 Model parameter waarden SCALDIS

Tabel 4 – parameter waarden van het originele SCALDIS model van Smolders et al. (2016)

Parameter	Value
Time step	4 s
Initial condition	constant elevation
Number of layers in the vertical	5 (3D model)
Version TELEMAC	TELEMAC V7P1
Salt transport	On
Wind	On
Roughness formula	Manning
Bed roughness value	varying roughness field
Option for the treatment of tidal flats	1: equations solved everywhere with correction on tidal flats
Treatment of negative depths	2: flux control
Free surface gradient compatibility	0.9
Vertical turbulence model	2: mixing length
Mixing length model	3: Nezu and Nakagawa
Horizontal turbulence model	4: Smagorinski
Scheme for advection of velocities	1: characteristics
Scheme for advection of depth	5: conservative scheme
Scheme for advection of tracers	13: Leo Postma for tidal flats
Scheme for diffusion of velocities	1: implicit (1 is default; 0 cancels the diffusion)
Scheme for diffusion of tracers	1: implicit
Solver	7: GMRES



Figuur 39 – Het gekalibreerde bodem ruwheidsveld van SCALDIS: de Manning coëfficiënt is uitgedrukt in  $[m^{-1/3}s]$ .  
(overgenomen uit Smolders et al., 2016)

## Bijlage 2 Diffusie in een numeriek model

Diffusie in een numeriek model is een complex begrip dat bestaat uit ten minste drie bijdragen: de kinematische bijdrage, de turbulente (eddy) bijdrage en de numerieke bijdrage. Over het algemeen is het moeilijk om a priori in te schatten welke bijdrage het grootst is. Dit is met name problematisch omdat de numerieke diffusie niet fysisch is, maar een artefact van de numerieke simulatie. Om inzicht te krijgen in de bovengenoemde drie bijdragen kan een vereenvoudigde diffusie vergelijking worden gebruikt

$$\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} = \kappa \frac{\partial^2 s}{\partial x^2}. \quad (3)$$

De hier bovenstaande vergelijking is een eendimensionale (1D) advection-diffusie (transport) vergelijking voor de saliniteit  $s$ , waarin  $t$  staat voor tijd  $u$  voor snelheid,  $x$  de langsrichting van het estuarium en  $\kappa$  de kinematische (dus moleculaire) diffusiviteit. De tijdsvariatie van  $s$  (eerste term aan de linkerkant) wordt dus bepaald door het evenwicht tussen advection (tweede term aan de linkerkant) en diffusie (term aan de rechterkant). In deze vergelijking zijn zowel  $u$  als  $s$  totale grootheden, dat wil zeggen dat ze zowel de gemiddelde waarden als fluctuerende waarden bevatten. Als het volgt kunnen zowel de snelheid als de saliniteit geschreven worden als de som van een gemiddelde snelheid en een fluctuerend deel, i.e.

$$u = \bar{u} + u', \quad (4)$$

$$s = \bar{s} + s', \quad (5)$$

waarin een streep een gemiddelde aanduidt en een accent een fluctuatie. De fluctuerende waarden worden over het algemeen geproduceerd door turbulentie, al kunnen (interne) golven daar ook verantwoordelijk voor zijn<sup>2</sup>. Om de volledige snelheid en saliniteit (inclusief fluctuaties) in een estuarium op te lossen, is een heel fijn rekenrooster nodig dat voor onmogelijk lange rekestijden zou zorgen. Om deze reden worden in Telemac niet de totale snelheid en saliniteit opgelost, maar de gemiddelde. Om deze variabelen op te lossen wordt vergelijking (3) gemiddeld met behulp van Reynolds middeling, zie Nieuwstadt (2008, p. 53) voor meer informatie over het middelingsproces en de uitkomst. De vergelijking voor de gemiddelde saliniteit is

$$\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{s}}{\partial x} = \kappa \frac{\partial^2 \bar{s}}{\partial x^2} - \frac{\partial \overline{u's'}}{\partial x}. \quad (6)$$

We herkennen dezelfde termen als in vergelijking (3), d.w.z. de tijdsvariatie van  $\bar{s}$ , de advection term en de diffusie term alsmede nog een andere term (laatste term aan de rechterkant), de reynoldsterm. Deze andere term weergeeft de bijdrage aan de gemiddelde saliniteit van de correlatie tussen fluctuerende snelheid en fluctuerende saliniteit. Met andere woorden, de reynoldsterm weergeeft de bijdrage van turbulentie aan de zoutverdeling. De reynoldsterm is over het algemeen een onbekende in de vergelijking. Om de vergelijking toch sluitend te maken wordt er gebruikt gemaakt van sluitingshypothese van 'Boussinesq' (niet te verwarren met de Boussinesq benadering van dichtheidseffecten). In de sluitingshypothese van Boussinesq wordt er aangenomen dat de reynoldsterm herschreven kan worden als

$$-\overline{u's'} = K_H \frac{\partial \bar{s}}{\partial z} \quad (7)$$

<sup>2</sup> Aangezien turbulentie een driedimensionaal proces is een 1D vergelijking niet gepast om turbulente processen te beschrijven. Echter, aangezien deze vergelijking een puur illustratief doel heeft, laten we de drie dimensionaliteit van turbulentie buiten beschouwing.



waarin  $K_H$  de ‘eddy viscositeit’ is. De 1D transport vergelijking kan dus herschreven worden als

$$\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{s}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( (\kappa + K_H) \frac{\partial \bar{s}}{\partial x} \right), \quad (8)$$

waarin meteen duidelijk wordt dat het diffusie proces uit zowel een moleculaire (kinematische) als een turbulente (eddy) diffusiviteit bestaat. Over het algemeen wordt de eddy viscositeit berekend aan de hand van een turbulentie model, het  $k-\varepsilon$  model. Naast de moleculaire viscositeit en de turbulente viscositeit bestaat er nog de numerieke viscositeit. De numerieke viscositeit komt voort uit het feit dat vergelijking (8) in een numeriek model in zijn gediscretiseerde vorm wordt opgelost. Dat wil zeggen dat partiele afgeleiden van variabelen worden benaderd aan de hand van de waarde van die variabelen op de omringende roostercellen. Door een Taylorexpansie toe te passen kan men uitdrukkingen vinden van deze partiele afgeleiden. Hieronder volgt een voorbeeld waarin de advectie term van vergelijking (8) wordt benaderd door een eerste orde upwind discretisatie en de diffusie term door een tweede orde centrale differenties. Het is zeker niet vanzelfsprekend dat Telemac ook deze discretisatie keuzes hanteert, echter is het voor de discretisatie schema’s erg eenvoudig om het begrip numerieke diffusie uit te leggen. De discretisatie van (8) luidt<sup>3</sup>

$$\frac{\bar{s}^{n+1} - \bar{s}^n}{\Delta t} + \bar{u} \frac{\bar{s}_i^n - \bar{s}_{i-1}^n}{\Delta x} = (\kappa + K_H) \frac{\bar{s}_{i+1}^n - 2\bar{s}_i^n + \bar{s}_{i-1}^n}{\Delta x^2}. \quad (9)$$

Hierbij worden termen met superscript  $n$  en  $n + 1$  gescheiden door een tijdstap lengte  $\Delta t$ , terwijl termen met een subscript  $i$  en  $i - 1$  gescheiden worden door een gridcel lengte  $\Delta x$ . De discretisatie van de advectie term kan herschreven worden als

$$\begin{aligned} \bar{u} \frac{\bar{s}_i^n - \bar{s}_{i-1}^n}{\Delta x} &= \frac{\bar{u}}{\Delta x} \left( \bar{s}_i^n - \frac{1}{2} \bar{s}_{i-1}^n - \frac{1}{2} \bar{s}_{i-1}^n + \frac{1}{2} \bar{s}_{i+1}^n - \frac{1}{2} \bar{s}_{i+1}^n \right) \\ &= \frac{\bar{u}}{\Delta x} \left( \frac{1}{2} \bar{s}_{i+1}^n - \frac{1}{2} \bar{s}_{i-1}^n \right) \\ &\quad - \frac{\bar{u}}{\Delta x} \left( \frac{1}{2} \bar{s}_{i+1}^n - \bar{s}_i^n + \frac{1}{2} \bar{s}_{i-1}^n \right) \\ &= \frac{\bar{u}}{\Delta x} \left( \frac{1}{2} \bar{s}_{i+1}^n - \frac{1}{2} \bar{s}_{i-1}^n \right) - \frac{1}{2} \bar{u} \Delta x \frac{\bar{s}_{i+1}^n - 2\bar{s}_i^n + \bar{s}_{i-1}^n}{\Delta x^2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Ofwel, het eerste orde discretisatie schema kan herschreven worden als een tweede orde discretisatie schema plus een diffusief discretisatie schema. Dit diffusieve discretisatie schema bevat een ‘numeriek’ diffusie coëfficiënt dat afhangt van het oorspronkelijke discretisatie schema en de gridcel grootte (hoe fijner het rooster, hoe kleiner de numerieke diffusie). Vergelijking (10) kan vervolgens ingevuld worden in vergelijking (9), waarna de limieten  $\Delta x \rightarrow 0$  en  $\Delta t \rightarrow 0$  leiden tot de effectief opgeloste vergelijking in het numerieke model

$$\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{s}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \left( \kappa + K_H + \frac{1}{2} \bar{u} \Delta x \right) \frac{\partial \bar{s}}{\partial x} \right). \quad (11)$$

<sup>3</sup> Normaal gesproken zou de eddy viscositeit  $K_H$  ook gediscretiseert moeten worden. Aangezien deze exercitie enkel ter illustratie dient, en de discretisatie van  $K_H$  voor onnodige complicaties zorgt, hebben we het buiten beschouwing gelaten.

De drie diffusiviteiten en hun eigenschappen worden samengevat in Tabel 1. Het is belangrijk om te vermelden dat deze exercitie heeft plaatsgevonden voor de diffusiviteit, maar dat deze ook toepasbaar is op de viscositeit zoals deze voorkomt in de momentum vergelijkingen.

Tabel 5 – Overzicht van de verschillende vormen van diffusie

Diffusiviteit	Symbool expressie	Afhankelijkheid	Waarde
Moleculaire of kinematische <sup>4</sup>	$\kappa$	Eigenschap van stof	$1.60 \cdot 10^{-9} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$
Turbulente of 'eddy'	$K_{\{H\}}$	Eigenschap van de stroming	Via turbulentie model (vaak $k - \varepsilon$ model)
Numerieke	$\frac{1}{2} \bar{u} \Delta x$ (enkel voor eerste orde upwind)	Eigenschap van het numerieke schema en het rooster	Afhankelijk van het numerieke schema en het rooster

<sup>4</sup> Volgens Ramsing and Gundersen (2011), is het Schmidt getal (i.e. de verhouding tussen de kinematische viscositeit en de kinematische diffusiviteit) van water met een saliniteit van 35.0 en een temperatuur van 15.0°C 699. Tegelijkertijd is de kinematische viscositeit voor deze waarden van de saliniteit en de temperatuur  $1.19 \cdot 10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ . At the same time the kinematic viscosity at these salinity and temperature is

DEPARTEMENT **MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN**  
Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115, 2140 Antwerpen

T +32 (0)3 224 60 35

F +32 (0)3 224 60 36

[waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be](mailto:waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be)

[www.waterbouwkundiglaboratorium.be](http://www.waterbouwkundiglaboratorium.be)