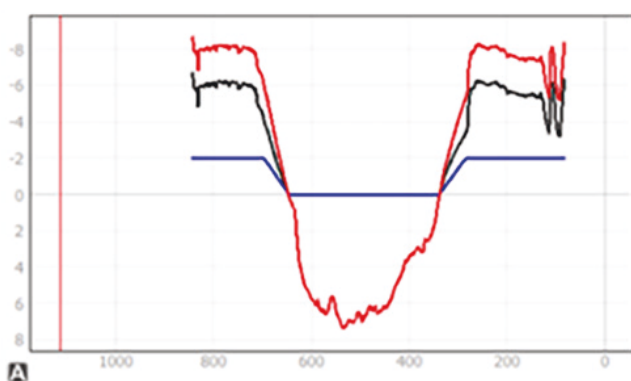




Vlaanderen
is wetenschap



Original bathymetry

Increase

New bathymetry

24_095_1
WL rapporten

Morfologische evoluties onder zeespiegelstijging

Scenario analyse en hydrodynamische modelberekeningen

Morfologische evoluties onder zeespiegelstijging

Scenario analyse en hydrodynamische modelberekeningen

Stark, J.; Meire, D.; Vos, G.; Vanlede, J.

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 2026
D/2026/3241/092

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Stark, J.; Meire, D.; Vos, G.; Vanlede, J. (2026). Morfologische evoluties onder zeespiegelstijging: Scenario analyse en hydrodynamische modelberekeningen. Versie 4.0. WL Rapporten, 24_095_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

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

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	dVW	Ref.:	WL2026R24_095_1
Trefwoorden (3-5):	Hydrodynamische modellering; Telemac; Scaldis, Schelde estuarium, zeespiegelstijging		
Kennisdomeinen:	Hydraulica en sediment > Klimaatverandering > Getij > Numerieke modelleringen Hydraulica en sediment > Klimaatverandering > Zeespiegelstijging > Numerieke modelleringen Hydraulica en sediment > Morfologie > Intergetijdengebieden > Numerieke modelleringen		
Tekst (p.):	55	Bijlagen (p.):	25
Vertrouwelijk:	☒ Nee ☒ Online beschikbaar		

Auteur(s):	Stark, J.; Meire, D.; Vos, G.
------------	-------------------------------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Vanlede, J.	Getekend door: Vanlede Joris Dries S Getekend op: 2026-06-16 09:13:19 +02:0 Reden: Ik keur dit document goed  
Projectleider:	Meire, D.	Getekend door: Meire Dieter Willy S Getekend op: 2026-06-23 11:02:34 +02:0 Reden: Ik keur dit document goed  

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door: Bellafkih Abdelkarim Getekend op: 2026-06-15 17:33:17 +02:0 Reden: Ik keur dit document goed  
-----------------	---------------	---

Abstract

Deze studie onderzoekt de impact van zeespiegelstijging (in een range van 0,3 m tot 2 m zeespiegelstijging) op het gemiddeld getij in het Schelde-estuarium, onder verschillende morfologische scenario's. Tot op heden werd de impact van zeespiegelstijging beschouwd met de huidige morfologie van het Schelde estuarium. In deze studie werden verschillende bathymetrieën gegenereerd, waarbij zowel intergetijdengebieden (slik en schor) en geulen volledig of deels meegroeien met de beschouwde zeespiegelstijging. Verschillende hydrodynamische variabelen (getijslag, hoog- en laagwater, getijvolume en enkele parameters voor getij-asymmetrie) werden vergeleken tussen de verschillende scenario's. Het Scaldis model, opgebouwd binnen de Telemac software, werd gebruikt voor het uitvoeren van de simulaties in deze gevoeligheidsanalyse.

De modelresultaten bevestigen dat zeespiegelstijging de getijslag in het Schelde-estuarium vergroot, met vooral een sterke toename stroomopwaarts (tot >1 m bij +2 m SLR). Deze resultaten worden sterk beïnvloed door de (onzekere) morfologische ontwikkeling van inter- en subtidale zones, waarbij de gevoeligheid van dezelfde grootte orde is als de effecten van de zeespiegelstijging zelf. Zeespiegelstijging leidt tot een sterke toename van het getijprisma in de Zeeschelde—vooral stroomopwaarts—waarbij de grootte van de toename sterk afhangt van de morfologische ontwikkeling van inter- en subtidale gebieden. Zeespiegelstijging versnelt de voortplanting van het getij, vermindert de vloeddominantie en versterkt de ebdominantie. Het effect op de getij-asymmetrie is echter sterk afhankelijk van de gehanteerde indicator en van de mate waarin intergetijdengebieden meegroeien, wat de interpretatie van morfologische gevolgen complex maakt.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VII
Lijst van de figuren	VIII
1 Inleiding	1
1.1 Situering	1
1.2 Morfologie en getijvoortplanting in estuaria.....	1
1.2.1 Theoretische achtergrond	1
1.2.2 Eerdere modelstudies naar effect zeespiegelstijging op het getij in het Schelde estuarium.....	3
1.3 Hypothese	6
1.4 Doelstellingen	6
2 Methodiek	7
2.1 Opstellen meegroeiscenario's.....	7
2.2 GIS verwerking	8
2.2.1 Aanmaak referentiescenario	8
2.2.2 Aanmaak meegroeiscenario's.....	8
2.3 Numerieke modellering	18
2.3.1 Software.....	18
2.3.2 Modelbeschrijving	18
2.3.3 Randvoorwaarden	19
2.3.4 Overige modelinstellingen.....	20
2.3.5 Modelvalidatie	21
2.4 Scenario's	22
2.5 Verwerking van de modelresultaten.....	23
2.5.1 Getijkarakteristieken	23
2.5.2 Observatiepunten en transecten.....	24
3 Resultaten meegroeiscenario's	26
3.1 Oppervlaktes	26
3.2 Volumes	28
3.2.1 Per zone	28
3.2.2 Per scenario	29

4	Modelresultaten	30
4.1	Overzicht scenarioberekeningen	30
4.2	Verticaal getij	30
4.2.1	Getijslag	30
4.2.2	Hoogwaters.....	33
4.2.3	Laagwaters.....	36
4.2.4	Getijvertraging	38
4.3	Getijprisma.....	39
4.4	Getijasymmetrie.....	41
4.4.1	Verticale asymmetrie.....	41
4.4.2	Horizontale asymmetrie	43
5	Conclusies	48
5.1	Effect van zeespiegelstijging en morfologische ontwikkeling op het getij in het Schelde estuarium	48
5.1.1	Amplificatie van het getij.....	48
5.1.2	Toename getijvolumes	48
5.1.3	Verandering getij-asymmetrie	49
6	Aanbevelingen	50
6.1	Implicaties voor beheer	50
6.2	Suggesties voor vervolgonderzoek	51
6.2.1	Uitbreiding morfologische scenario's	51
6.2.2	Impact bij extreme hydrodynamische condities	52
6.2.3	Doorvertaling effecten naar andere parameters	52
	Referenties	53
	Bijlage 1 – Resultaat modelvalidatie	B1
	Bijlage 2 – Modelresultaten scenario's +30 cm zeespiegelstijging	B2
	Bijlage 3 – Modelresultaten scenario's +100 cm zeespiegelstijging	B10
	Bijlage 4 – Modelresultaten scenario's +200 cm zeespiegelstijging	B18

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Bovenstroomse randvoorwaarden.	20
Tabel 2 – Overzicht modelscenario's.	22
Tabel 3 – Overzicht van benodigde sedimentvolumes (10^6 m^3) per scenario, voor de verschillende scenario's van zeespiegelstijgingen.	29
Tabel 4 – Getijvertraging HW t.o.v. monding voor scenario's met 30cm, 100cm of 200cm zeespiegelstijging, mét en zonder meegroeien van slikken en schorren en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01.	39
Tabel 5 – Getijvertraging LW t.o.v. monding voor scenario's met 30cm, 100cm of 200cm zeespiegelstijging, mét en zonder meegroeien van slikken en schorren en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01.	39
Tabel 6 – Representatie van het verticaal getij in de referentierun SC000_R01.	B1
Tabel 7 – Getijvertraging HW t.o.v. monding voor scenario's met 30cm zeespiegelstijging.	B5
Tabel 8 – Verschil in getijvertraging HW in minuten t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 voor scenario's met 30cm zeespiegelstijging.	B5
Tabel 9 – Getijvertraging LW t.o.v. monding voor scenario's met 30cm zeespiegelstijging.	B6
Tabel 10 – Verschil in getijvertraging LW in minuten t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 voor scenario's met 30cm zeespiegelstijging.	B6
Tabel 11 – Getijvertraging HW t.o.v. monding voor scenario's met 100cm zeespiegelstijging.	B13
Tabel 12 – Verschil in getijvertraging HW in minuten t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 voor scenario's met 100cm zeespiegelstijging.	B13
Tabel 13 – Getijvertraging LW t.o.v. monding voor scenario's met 100cm zeespiegelstijging.	B14
Tabel 14 – Verschil in getijvertraging LW in minuten t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 voor scenario's met 100cm zeespiegelstijging.	B14
Tabel 15 – Getijvertraging HW t.o.v. monding voor scenario's met 200cm zeespiegelstijging.	B21
Tabel 16 – Verschil in getijvertraging HW in minuten t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 voor scenario's met 200cm zeespiegelstijging.	B21
Tabel 17 - Getijvertraging LW t.o.v. monding voor scenario's met 200cm zeespiegelstijging.	B22
Tabel 18 – Verschil in getijvertraging LW in minuten t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 voor scenario's met 200cm zeespiegelstijging.	B22

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Waterhoogte te Vlissingen, berekend met verschillende ZSS scenario's. Uit: Chu <i>et al.</i> (2020).	3
Figuur 2 – Breedtegemiddelde diepteligging (boven) en berekende M2 amplitude (onder) uit iFlow berekeningen zonder intertidale komberging (links) en waarin de diepte in de zeespiegelstijgingsscenario's werd aangepast op basis van additionele intertidale komberging (rechts). Uit: Schramkowski & Kaptein (2023).	4
Figuur 3 – Invloed van bathymetrie en zeespiegelstijging op HW en LW t.o.v. referentie Uit: Smolders <i>et al.</i> (2017).	5
Figuur 4 – Gemiddeld hoog- en laagwater in een scenario met 120 cm SLR, voor verschillende scenario's van meegroeien IGG in de Westerschelde. Uit: De Meerleer (2023).	5
Figuur 5 – Overzicht van ruimtelijke zones ophogingsscenario's.....	7
Figuur 6 – Ecotopenkaart Zeeschelde 2019 ter hoogte van Wintam.....	9
Figuur 7 – Voorbeeld van geul, slik en schor na samenvoegen van ecotopenklassen (t.h.v. Wintam)	10
Figuur 8 – Toevoeging Hedwige-Prosperpolder aan mask totaal	10
Figuur 9 – Overzicht van masks voor de Beneden-Zeeschelde	11
Figuur 10 – Overzicht van masks voor de Boven-Zeeschelde	12
Figuur 11 – Overzicht van masks voor de Westerschelde.....	13
Figuur 12 – Voorbeeld van ophoging schor tot 2 m en geul die niet opgehoogd wordt	14
Figuur 13 – Contourlijn wordt gebruikt om afwijkingen in ophoging te voorkomen waar geen schor aan de oever voorkomt	15
Figuur 14 – Ophogingsraster na interpolatie van slik (blauwe lijn op profiel) voor combinatie met originele bathymetrie (zwart op profiel)	16
Figuur 15 – Uiteindelijk resultaat (rode lijn op profiel) na sommatie van ophogingsraster (blauwe lijn op profiel) met originele bathymetrie (zwarte lijn op profiel)	16
Figuur 16 – Scadis2020 modeldomein. Uit: Vanlede <i>et al.</i> (2025).	18
Figuur 17 – Modelverfijning t.h.v. Verdrongen Land van Saeftinghe en Hedwige-Prosperpolder. Uit: Vanlede <i>et al.</i> (2025).	19
Figuur 18 – Uitvoerpunten model: observatiepunten (boven) en transecten (onder).....	25
Figuur 19 – Verdeling van het oppervlak van het Schelde estuarium over de verschillende delen.	26
Figuur 20 – Verdeling van areaal slik, geul en schor voor de verschillende delen van het Schelde estuarium: Westerschelde, Beneden-Zeeschelde, Boven-Zeeschelde, Boven-Zeeschelde (enkel Zeeschelde), Rupel & Durme	27
Figuur 21 – Volumes sediment nodig voor de ophoging van scenario's (1m SLR) met intergetijdengebied (IGG) en volledige ophoging (ToT) in de Boven-Zeeschelde, Rupel & Durme	28
Figuur 22 – Volumes sediment nodig voor de ophoging van scenario's met intergetijdengebied (IGG) en volledige ophoging (ToT) in de Beneden-Zeeschelde	29

Figuur 23 – Gemiddelde getijslag in scenario's met 30cm (dash-dot), 100cm (dash) of 200cm (dot) zeespiegelstijging, mét (rood) en zonder (blauw) meegroeien van slikken en schorren en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 (zwart).	32
Figuur 24 – Gemiddelde getijslag in verschillende morfologische meegroeiscenario's met 100cm zeespiegelstijging en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 (zwart).	33
Figuur 25 – Gemiddeld hoogwaterniveau in scenario's met 30cm (dash-dot), 100cm (dash) of 200cm (dot) zeespiegelstijging, mét (rood) en zonder (blauw) meegroeien van slikken en schorren en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 (zwart).	35
Figuur 26 – Verschil in gemiddeld hoogwaterniveau in verschillende morfologische meegroeiscenario's met 100cm zeespiegelstijging t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 (zwart).	36
Figuur 27 – Gemiddeld laagwaterniveau in scenario's met 30cm, 100cm of 200cm zeespiegelstijging, mét en zonder meegroeien van slikken en schorren en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01.	37
Figuur 28 – Verschil in gemiddeld laagwaterniveau in verschillende morfologische meegroeiscenario's met 100cm zeespiegelstijging t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01.	38
Figuur 29 – Gemiddeld getijprisma in scenario's met 30cm, 100cm of 200cm zeespiegelstijging, mét en zonder meegroeien van slikken en schorren en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01.	40
Figuur 30 – Verschil in gemiddeld getijprisma in morfologische meegroeiscenario's met 100cm zeespiegelstijging t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01.	41
Figuur 31 – Asymmetrie op basis van ratio $T_{daling} / T_{stijging}$ in scenario's met 30cm (dash-dot), 100cm (dash) of 200cm (dot) zeespiegelstijging, mét (rood) en zonder (blauw) meegroeien van slikken en schorren en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 (zwart). Een ratio groter dan 1 duidt op een vloed-dominante asymmetrie (boven). Een negatief verschil duidt op een afname van vloeddominantie (onder)	42
Figuur 32 – Asymmetrie op basis van ratio $T_{daling} / T_{stijging}$ in meegroeiscenario's met 100cm zeespiegelstijging.	43
Figuur 33 – Asymmetrie op basis van ratio V_{vloed} / V_{eb} in scenario's met 30cm, 100cm of 200cm zeespiegelstijging, mét en zonder meegroeien van slikken en schorren en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01. Een ratio groter dan 1 duidt op vloeddominantie (boven). Een negatief verschil duidt op een afname van vloeddominantie (onder).....	44
Figuur 34 – Asymmetrie op basis van ratio V_{vloed} / V_{eb} in meegroeiscenario's met 100cm zeespiegelstijging. Een ratio groter dan 1 duidt op vloeddominantie.....	45
Figuur 35 – Asymmetrie op basis van derde-orde snelheidsmoment (γ_0) in scenario's met 30cm, 100cm of 200cm zeespiegelstijging, mét en zonder meegroeien van slikken en schorren en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01. Negatieve waarden duiden op eb-dominantie (boven). Een negatief verschil duidt op een toename van de ebdominantie (onder).....	46
Figuur 36 – Asymmetrie op basis van derde-orde snelheidsmoment (γ_0) in meegroeiscenario's met 100cm zeespiegelstijging. Negatieve waarden duiden op eb-dominantie	47
Figuur 37 – Gemiddelde getijslag in verschillende morfologische meegroeiscenario's met 30cm zeespiegelstijging en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 (zwart).	B2
Figuur 38 – Gemiddeld hoogwaterniveau in verschillende morfologische meegroeiscenario's met 30cm zeespiegelstijging (boven) en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 (onder).	B3
Figuur 39 – Gemiddeld laagwaterniveau in verschillende morfologische meegroeiscenario's met 30cm zeespiegelstijging (boven) en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 (onder).	B4
Figuur 40 – Gemiddeld getijprisma in morfologische meegroeiscenario's met 30cm zeespiegelstijging (boven) en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01.	B7

Figuur 41 – Asymmetrie op basis van ratio $T_{daling} / T_{stijging}$ in meegroeiscenario's met 30cm zeespiegelstijging.	B8
Figuur 42 – Asymmetrie op basis van ratio V_{vloed} / V_{eb} in meegroeiscenario's met 30cm zeespiegelstijging.	B8
Figuur 43 – Asymmetrie op basis van derde-orde snelheidsmoment (γ_0) in meegroeiscenario's met 30cm zeespiegelstijging.	B9
Figuur 44 – Gemiddelde getijslag in verschillende morfologische meegroeiscenario's met 100cm zeespiegelstijging en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 (zwart).	B10
Figuur 45 – Gemiddeld hoogwaterniveau in verschillende morfologische meegroeiscenario's met 100cm zeespiegelstijging (boven) en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 (onder).	B11
Figuur 46 – Gemiddeld laagwaterniveau in verschillende morfologische meegroeiscenario's met 100cm zeespiegelstijging (boven) en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 (onder).	B12
Figuur 47 – Gemiddeld getijprisma in morfologische meegroeiscenario's met 100cm zeespiegelstijging (boven) en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01.	B15
Figuur 48 – Asymmetrie op basis van ratio $T_{daling} / T_{stijging}$ in meegroeiscenario's met 100cm zeespiegelstijging.	B16
Figuur 49 – Asymmetrie op basis van ratio V_{vloed} / V_{eb} in meegroeiscenario's met 100cm zeespiegelstijging.	B16
Figuur 50 – Asymmetrie op basis van derde-orde snelheidsmoment (γ_0) in meegroeiscenario's met 100cm zeespiegelstijging.	B17
Figuur 51 – Gemiddelde getijslag in verschillende morfologische meegroeiscenario's met 200cm zeespiegelstijging en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 (zwart).	B18
Figuur 52 – Gemiddeld hoogwaterniveau in verschillende morfologische meegroeiscenario's met 200cm zeespiegelstijging (boven) en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 (onder).	B19
Figuur 53 – Gemiddeld laagwaterniveau in verschillende morfologische meegroeiscenario's met 200cm zeespiegelstijging (boven) en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 (onder).	B20
Figuur 54 – Gemiddeld getijprisma in morfologische meegroeiscenario's met 200cm zeespiegelstijging (boven) en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01.	B23
Figuur 55 – Asymmetrie op basis van ratio $T_{daling} / T_{stijging}$ in meegroeiscenario's met 200cm zeespiegelstijging.	B24
Figuur 56 – Asymmetrie op basis van ratio V_{vloed} / V_{eb} in meegroeiscenario's met 200cm zeespiegelstijging.	B24
Figuur 57 – Asymmetrie op basis van derde-orde snelheidsmoment (γ_0) in meegroeiscenario's met 200cm zeespiegelstijging.	B25

1 Inleiding

1.1 Situering

De Vlaamse Waterweg is momenteel bezig met de uitwerking van het Sigma 3 programma, i.e., de opvolger van het momenteel lopende Geactualiseerd Sigmaplan. Binnen Sigma 3 worden de potentiële effecten van verschillende zeespiegelstijgingen nagegaan, waarbij gezocht wordt naar beheersmaatregelen (GOG, GGG's, ontpolderingen,...) om de overstromingsrisico's in de toekomst te beperken, rekening houdende met alle functies van het estuarium (ecologie, bevaarbaarheid, enz.)

Een belangrijke ontbrekende bij het bepalen van toekomstige beheersmaatregelen is hoe de morfologie van het Schelde estuarium zal evolueren met deze zeespiegelstijging. De toekomstige morfologische ontwikkeling heeft namelijk een belangrijke invloed op de getijvoortplanting in het estuarium.

Op dit moment zijn er geen numerieke modellen beschikbaar die de morfologische ontwikkeling van het Schelde estuarium en met name van de Zeeschelde op een termijn van enkele decennia adequaat kunnen reproduceren of voorspellen. Een inschatting van de potentiële veranderingen in getijvoortplanting is echter zeer belangrijk. Daarom wordt binnen deze studie geopteerd voor een gevoeligheidsanalyse waarbij de gecombineerde impact van zeespiegelstijging en van de morfologische ontwikkeling op het getij in de Schelde in een afgebakende set van modelscenario's wordt berekend. Hiermee kan inschatting worden gemaakt van potentiële veranderingen in het getij en van de relatieve invloed van de verschillende processen of morfologische kenmerken zoals de toename van de geuldiepte of de verandering in intertidaal volume.

1.2 Morfologie en getijvoortplanting in estuaria

1.2.1 Theoretische achtergrond

De geometrie en morfologie van estuaria beïnvloedt de getijvoortplanting (e.g. getijslag, getijprisma en getijasymmetrie) door verschillende factoren zoals geuldiepte, convergentie, de aanwezigheid van intergetijdengebieden en de hoogte van deze platen of slikken en schorren. De invloed van estuariene morfologie, of wijzigingen in de morfologie, kan naar analogie met Stark (2016) in een theoretisch of conceptueel model worden uiteengezet aan de hand van de ééndimensionale ondiep-water vergelijkingen (i.e., de continuïteitsvergelijking (1.1) en de impulsvergelijking (1.2) in de lengterichting van het estuarium):

$$b_{tot} \frac{\delta \zeta}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x} \{b_g(h + \zeta)u\} = 0 \quad (1.1)$$

(A) (B)

$$\frac{\delta Q}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x} \left(\frac{Q^2}{b_g(h + \zeta)} \right) + g b_g(h + \zeta) \frac{\delta \zeta}{\delta x} + \frac{g Q |Q|}{C^2 b_g(h + \zeta) R} = 0 \quad (1.2)$$

(C) (D) (E) (F)

waarin:

- | | | | |
|---|-----------|--------------------------|-----|
| • | t | tijd | [s] |
| • | x | afstand vanaf de monding | [m] |
| • | b_g | stroomvoerende breedte | [m] |
| • | b_{tot} | totale breedte | [m] |

• ζ	waterniveau ten opzichte van het referentieniveau	[m]
• h	waterdiepte ten opzichte van het referentieniveau	[m]
• u	stroomsnelheid	[m/s]
• g	valversnelling	[m/s ²]
• Q	debiet	[m ³ /s]
• R	hydraulische straal (i.e., $R \approx h + \zeta$)	[m]
• C	Chézy bodemwrijvingscoëfficiënt	[m ^{1/2} /s]

De continuïteitsvergelijking (1.1) bestaat uit een kombergingsterm (A) en een afvoerterm (B). De impulsvergelijking (1.2) bestaat uit de lokale acceleratie of traagheidsterm (C), de advectieterm (D), de verhangterm (E), een wrijvingsterm (F). Er wordt in bovenstaande vergelijking overigens aangenomen dat het effect van horizontale diffusie klein is.

Getijvolumes en getijslag

De getijslag en getijvolumes in een estuarium worden beïnvloed door de geuldiepte, convergentie en door de aanwezigheid van intergetijdengebieden. Estuaria met diepere geulen worden over het algemeen gekenmerkt door een hoger getijprisma en een hogere getijslag omdat de bodemwrijving lager is, zoals aangegeven door term (F) in de impulsvergelijking, en waardoor de getijgolf sneller en met grotere amplitude kan propageren (Speer & Aubrey, 1985; Wang *et al.*, 2002). Convergentie, waarbij de geul stroomopwaarts smaller wordt, comprimeert de getijgolf, wat eveneens de amplitude vergroot (Friedrichs & Aubrey, 1988), zoals blijkt uit de afvoerterm (B) in de continuïteitsvergelijking. Intergetijdengebieden dempen juist de getijgolf in opwaartse richting, enerzijds via de kombergingsterm (A) en anderzijds via de wrijvingsterm (F). Het wrijvingseffect is enkel van belang als de intergetijdengebieden ook deel uitmaken van de stroomvoerende sectie (Stark *et al.*, 2017). Zijbekkens zoals ontpolderingen of GGG's beïnvloeden de getijvoortplanting enkel via komberging. De hoogteligging van de intergetijdengebieden is eveneens van belang. Lager gelegen gebieden geven relatief meer komberging dan hoger gelegen intergetijdengebieden, maar de hoger gelegen gebieden kunnen afhankelijk van hun geometrische ligging ten opzichte van de stroomvoerende sectie wel meer wrijving uitoefenen op de getijgolf. Intergetijdengebieden hebben daarnaast een tweeledig effect op de getijvolumes in het estuarium. De extra komberging verhoogt de getijvolumes afwaarts van het intertidaal, terwijl opwaarts van een intergetijdengebied juist sprake is van een afname van het getijprisma door het dempend effect dat deze gebieden hebben op de getij-indringing. Het effect van intergetijdengebieden op de getijamplificatie in estuaria is dus afhankelijk van de locatie langs het estuarium (Li *et al.*, 2016; Roos & Schuttelaars, 2015; Stark *et al.*, 2017), maar in bestaande literatuur wordt ook aangetoond dat andere factoren zoals de bodemwrijving in het estuarium zelf (Li *et al.*, 2016; Zhu *et al.*, 2025), de lengte van het estuarium (Roos & Schuttelaars, 2015; Zhu *et al.*, 2025) en de omvang van de opening tussen een intertidaal sub-bassin en de estuariene geul (Roos & Schuttelaars, 2015).

Getijasymmetrie

Getijasymmetrie, het verschil in duur en sterkte tussen vloed en eb, wordt het meest beïnvloed door de wisselwerking van geuldiepte en de aanwezigheid van intergetijdengebieden. De relatieve getijamplitude (i.e. de verhouding tussen de getijamplitude en de geuldiepte) en de relatieve omvang van het intertidaal bepalen de getijasymmetrie in estuariene geulen (Friedrichs & Madsen, 1992; Speer & Aubrey, 1985). Over het algemeen hebben ondiepe geulen met weinig intertidale komberging de neiging om vloed-dominant te zijn, terwijl estuaria met diepe geulen en een groot intertidaal kombergingsvolume de neiging hebben om eb-dominant te zijn (Dronkers, 1986; Friedrichs & Aubrey, 1988; Friedrichs & Madsen, 1992; Speer & Aubrey, 1985). Meer specifiek ontstaat in ondiepe estuaria een vloed-dominante asymmetrie uit de wrijvingsterm (F) en de advectieterm (D) in de impulsvergelijking. Lanzoni & Seminara (2002) toonden zelfs eendimensionaal aan dat estuaria zonder intergetijdengebieden altijd vloed-dominant zijn.

De aanwezigheid van intergetijdengebieden langs estuaria bevordert juist een eb-dominante asymmetrie omdat de voortplanting van de hoogwatergolf erdoor wordt afgeremd. Dit kan worden geïllustreerd aan de hand van de kombergingsterm (A) in de continuïteitsvergelijking en de bodemwrijvingsterm (F) in de impulsvergelijking (Friedrichs & Aubrey, 1988; Friedrichs & Madsen, 1992). De wrijving neemt namelijk toe tijdens hoogwater wanneer het intertidaal overstroomt, terwijl de gebieden tijdens laagwater droogvallen en dus geen additionele wrijving uitoefenen. Laaggelegen intergetijdengebieden kunnen echter ook wrijving uitoefenen en kombergings gebieden bieden voor het voortplantende laagwater, vooral als hun positie in het estuarium zodanig is dat ze bijdragen aan de stroomvoerende sectie. De aanwezigheid van getijdenvlakten oefent dan wrijving uit en vermindert de gemiddelde geuldiepte tijdens het grootste deel van de getijcyclus, wat zelfs vloed-dominantie kan versterken omdat de voortplanting van het laagwater meer vertraagt (Fortunato & Oliveira, 2005; Stark *et al.*, 2017).

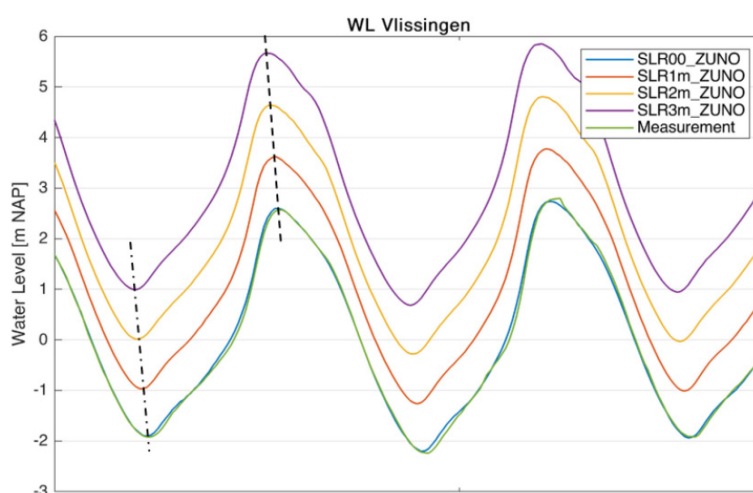
1.2.2 Eerdere modelstudies naar effect zeespiegelstijging op het getij in het Schelde estuarium

Het effect van zeespiegelstijging op het getij in het Schelde estuarium werd in een aantal eerdere studies al onderzocht met behulp van verschillende numerieke modellen. Tot nu zijn echter geen simulaties doorgerekend waarbij variaties in morfologische ontwikkeling van het Schelde estuarium en de Zeeschelde specifiek mee in beschouwing zijn genomen.

Hieronder wordt een beknopt overzicht gegeven van eerdere modelstudies in relatie tot de zeespiegelstijging voor het Schelde estuarium:

Agenda voor de Toekomst II

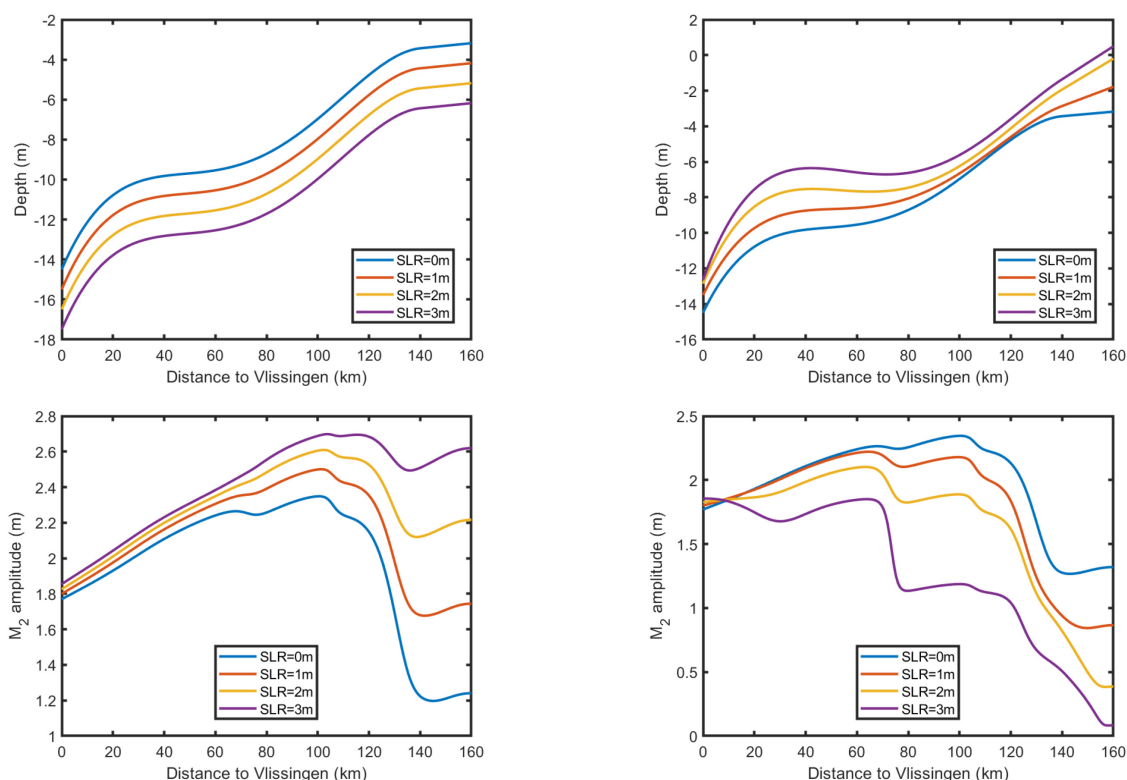
Binnen Agenda voor de Toekomst II werden door Chu *et al.* (2020) verschillende zeespiegelstijging (SLR) scenario's doorgerekend, met name 1 m, 2 m en zelfs 3 m ter hoogte van Vlissingen, zoals ook weergegeven in Figuur 1. In Chu *et al.* (2020) werden deze scenario's doorgerekend met een modellentrein van Scaldis 2013, een 3D hydrodynamisch model opgebouwd binnen de Telemac software, dat werd genest in een Noordzee model. Scaldis omvat de volledige Westerschelde, Zeeschelde en bijrivieren. Voor alle scenario's werd de actuele bathymetrie gebruikt. Er werden in deze studie verschillende getijparameters bepaald. In dit onderzoek werd ook aandacht besteed aan de invloed van zeespiegelstijging op de getijvoortplanting in de Noordzee.



Figuur 1 – Waterhoogte te Vlissingen, berekend met verschillende ZSS scenario's. Uit: Chu *et al.* (2020).

Door Schramkowski & Kaptein (2023) werd in het kader van hetzelfde Agenda voor de Toekomst II project het effect van zeespiegelstijging in een geïdealiseerde setting onderzocht met een 2DV iFlow model van het Schelde-estuarium. Het effect van de intergetijdengebieden werd meegenomen door de breedtegemiddelde waterdiepte aan te passen naar gelang de hoeveelheid laterale komberging in de zeespiegelstijgings-scenario's (Figuur 2).

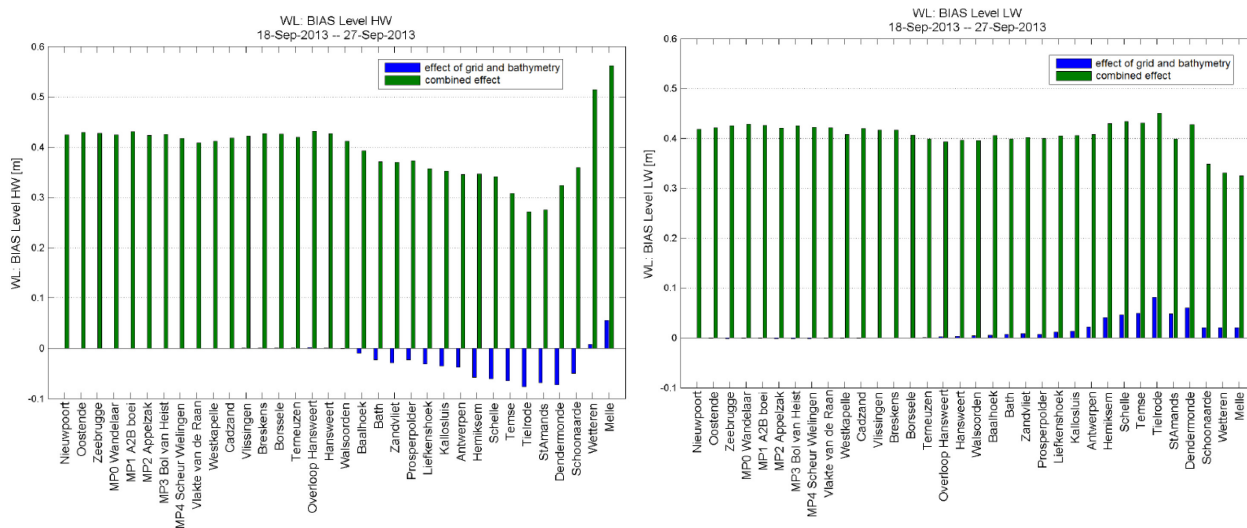
Als additionele komberging op intergetijdengebieden niet in rekening werd gebracht (i.e., intergetijdengebieden groeien mee) neemt de getijslag bij zeespiegelstijging sterk toe. Het mee in rekening brengen van extra komberging door toegenomen waterdiepte op de intergetijdengebieden (i.e., intergetijdengebieden groeien niet mee) leidt juist tot een tegengesteld effect en geeft een afname van de getijslag in de zeespiegelstijgingsscenario's. Dit komt doordat de breedtegemiddelde waterdiepte in het laatste geval kleiner is.



Figuur 2 – Breedtegemiddelde diepteligging (boven) en berekende M₂ amplitude (onder) uit iFlow berekeningen zonder intertidale komberging (links) en waarin de diepte in de zeespiegelstijgingsscenario's werd aangepast op basis van additionele intertidale komberging (rechts). Uit: Schramkowski & Kaptein (2023).

Integraal Plan Boven-Zeeschelde

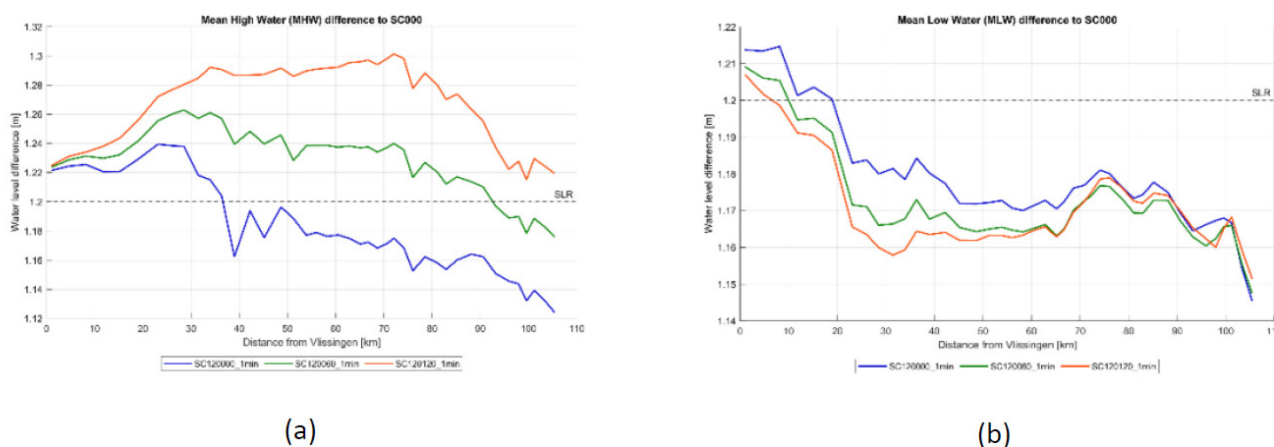
In het project “*Integraal Plan Boven Zeeschelde*” werd met behulp van een ophogingsmodel de te verwachten ophoging van ontpolderde gebieden berekend voor het jaar 2050. Daarnaast werden 2 zeespiegelstijgingsscenario's doorgerekend voor 2050, respectievelijk +0,15 m en +0,40 m (Figuur 3). Als bathymetrie werd het zogenaamd duurzaam profiel uit het project “*Integraal Plan Boven Zeeschelde*” geïmplementeerd, waarbij aan de intergetijdengebieden geen fundamentele wijzigingen werden uitgevoerd t.o.v. de huidige bathymetrie (Smolders *et al.*, 2017).



Figuur 3 – Invloed van bathymetrie en zeespiegelstijging op HW en LW t.o.v. referentie Uit: Smolders *et al.* (2017).

Thesis over impact hoogteligging platen Westerschelde bij zeespiegelstijging

In De Meerleer (2023) werd het effect van morfologische veranderingen in relatie tot zeespiegelstijging in de Westerschelde nagegaan aan de hand van numerieke modellering met het Delft3D-NeVla model. Hierbij werden de intergetijdengebieden opgehoogd met de volgende richtwaarden t.o.v. de zeespiegelstijging: 0%/50%/100% meegroeien. Er werden een aantal zeespiegelstijgingsscenario's tot +1,2 m gesimuleerd. De impact op de getijhydrodynamica werd geanalyseerd op basis van gemiddelde springtij-doodtij modelresultaten. In Figuur 4 zijn enkele resultaten weergegeven voor de gesimuleerde hoog- en laagwaters in het estuarium. De invloed van toekomstige morfologische veranderingen of meegroeiscenario's in de Zeeschelde werd niet onderzocht.



Figuur 4 – Gemiddeld hoog- en laagwater in een scenario met 120 cm SLR, voor verschillende scenario's van meegroeien IGG in de Westerschelde. Uit: De Meerleer (2023).

1.3 Hypothese

Er wordt op basis van de theoretische interacties tussen morfologie en getijvoortplanting en op basis van de eerder uitgevoerde studies verwacht dat zeespiegelstijging leidt tot een hogere getijslag en een hoger getijprisma omwille van de grotere waterdieptes, al is dit ook afhankelijk van de lange termijn morfologische ontwikkeling van de geulen. Het al dan niet meegroeien van de intertidale gebieden met de toekomstige zeespiegelstijging bepaalt de opslagcapaciteit tijdens hoogwater en de wrijving die op de getijgolf wordt uitgeoefend en daarmee de eventuele damping van het getij. Er wordt daarom verwacht dat het effect van zeespiegelstijging op het toekomstige getij in het Schelde estuarium ook sterk afhankelijk is van het al dan niet meegroeien van intergetijdengebieden. Daarnaast kan zeespiegelstijging de getijasymmetrie en daarmee de residuele sedimenttransporten beïnvloeden door de verhouding tussen vloed- en ebdominantie te veranderen. Ook van dit effect wordt verwacht dat het al dan niet meegroeien van intergetijdengebieden bepalend is. Uit eerder onderzoek naar de historische ontwikkeling van morfologie en getij in het Schelde estuarium is bijvoorbeeld al gebleken dat de invloed van veranderingen in intertidale gebieden op getijasymmetrie groot is (Stark *et al.*, 2020).

1.4 Doelstellingen

In dit rapport zullen verschillende potentiële topo-bathymetrieën worden uitgewerkt waarbij het al dan niet meegroeien van het estuarium met de te verwachten zeespiegelstijging in de komende decennia kan worden beschouwd. In een gevoeligheidsanalyse kan het potentiële effect van de morfologische ontwikkeling die gepaard gaat met deze zeespiegelstijging op de (toekomstige) getijbeweging inzichtelijk worden gemaakt.

Het doel van dit project is tweeledig:

- Opmaak van verschillende toekomstige topo-bathymetrieën / meegroeiscenario's onder zeespiegelstijging, inclusief een analyse van de benodigde hoeveelheid sediment en een inschatting van de sedimentbeschikbaarheid.
- Gevoeligheidsanalyse van de impact op de getijpropagatie doorheen het Schelde estuarium voor deze scenario's met behulp van numerieke modellering.

Scope

In deze studie wordt enkel de gevoeligheid van de grootschalige getijvoortplanting in het Schelde-estuarium voor verschillende meegroeiscenario's van slikken en schorren onder zeespiegelstijging geanalyseerd. De implementatie van empirische ophogingsmodellen voor de creatie van een toekomstige bathymetrie valt buiten scope van dit rapport, hier worden enkel scenario's gecreëerd. Effecten op saliniteit en slibdynamiek vallen buiten scope. Ook het effect op de voortplanting van stormtij valt in deze verkennende studie / gevoeligheidsanalyse nog buiten scope.

2 Methodiek

2.1 Opstellen meegroeiscenario's

In dit project wordt een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd van verschillende SLR scenario's en verschillende meegroeieinde morfologische scenario's.

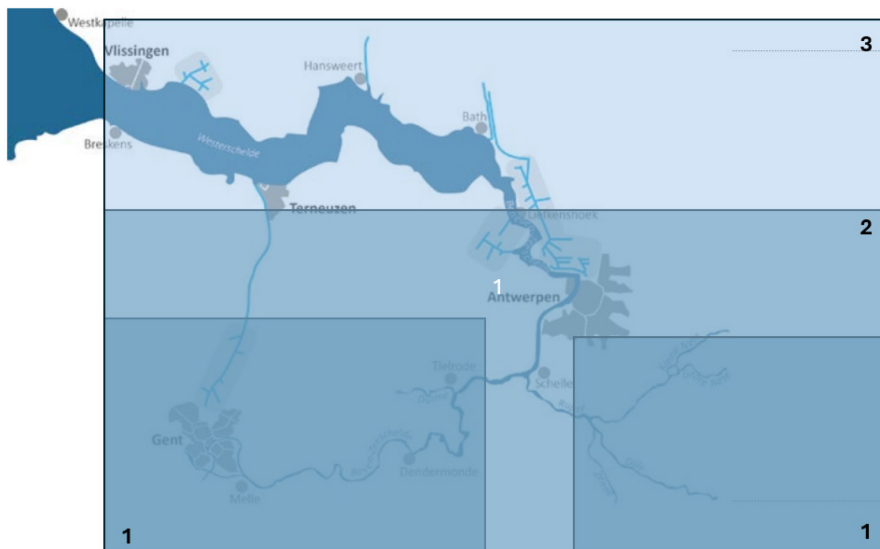
Volgende SLR scenario's worden vooropgesteld vanuit de Sigma 3 methodiek:

+ 0,3 m	tegen 2050
+ 1,0 m	tegen 2100
+ 2,0 m	tegen 2100

Vanuit de morfologische verandering wordt niet meegroeien (referentiesituatie), 50 % meegroeien en 100 % meegroeien van intergetijdengebieden vooropgesteld. Dit leidt tot de volgende 5 ophogingsscenario's:

+ 0,15 m / + 0,3 m / + 0,5 m / + 1,0 m / + 2,0 m

Deze ophogingsscenario's worden toegepast op verschillende delen van het Schelde estuarium. In eerste fase wordt enkel de Zeeschelde opwaarts Wintam en opwaarts de Rupel beschouwd (zone 1 in Figuur 5), in tweede fase zowel Boven- als Beneden-Zeeschelde (zone 2) en in een laatste fase ook de Westerschelde (zone 3).



Figuur 5 – Overzicht van ruimtelijke zones ophogingsscenario's.

2.2 GIS verwerking

2.2.1 Aanmaak referentiescenario

Inputdata

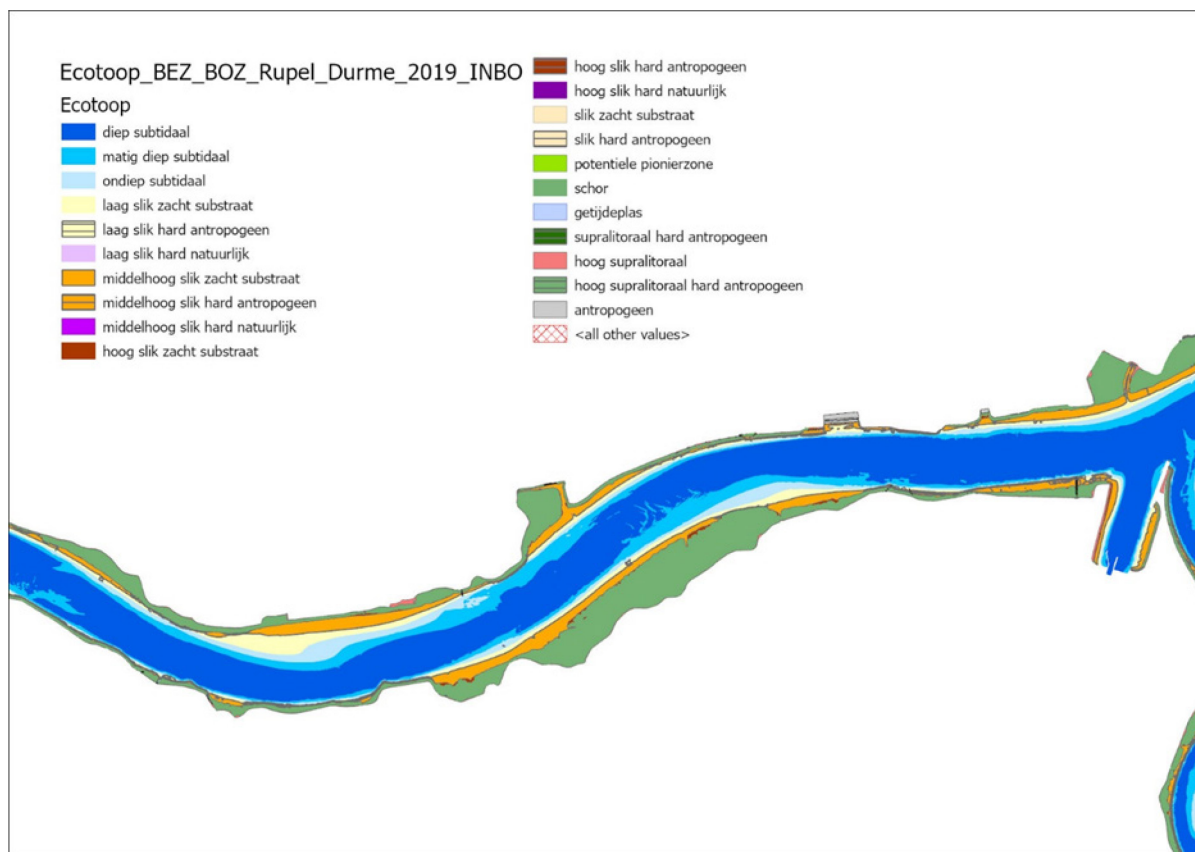
Voor de Westerschelde worden de vaklodingen van Rijkswaterstaat (RWS) gebruikt van 2023, gecombineerd met de lidar data voor de intergetijdengebieden. Voor de Beneden-Zeeschelde worden eveneens de data van 2023 gebruikt, zowel de peilgegevens als de lidargegevens. Voor de Boven-Zeeschelde worden zowel de peilingen als lidar data van 2022 gebruikt.

2.2.2 Aanmaak meegroeiscenario's

Voor het aanmaken van deze topo-bathymetrieën werden bestaande bathymetrieën aangepast in ArcGIS met behulp van python scripts. In wat volgt wordt beschreven welke stappen hiervoor doorlopen werden.

Aanmaken mask-bestanden

Bij het aanmaken van de topo-bathymetrieën is het meest eenvoudige scenario dit waarbij het profiel volledig meegroeit, maar daarnaast zullen tevens topo-bathymetrieën aangemaakt worden waar enkel de geul, enkel slik en/of enkel schor meegroeien. Voor het bepalen van de afbakening van schor, slik en geul werd gebruik gemaakt van de ecotopenkaarten, die door het INBO worden opgemaakt. Voor de Zeeschelde werd als basis de ecotopenkaart van 2019 (Van Ryckegem et al., 2022) van het INBO gebruikt (zie Figuur 6).



Figuur 6 – Ecotoopenkaart Zeeschelde 2019 ter hoogte van Wintam

Met behulp van de ecotoopenkaart van de Zeeschelde wordt onderscheid gemaakt tussen schor, geul en slik en worden 3 mask-bestanden aangemaakt:

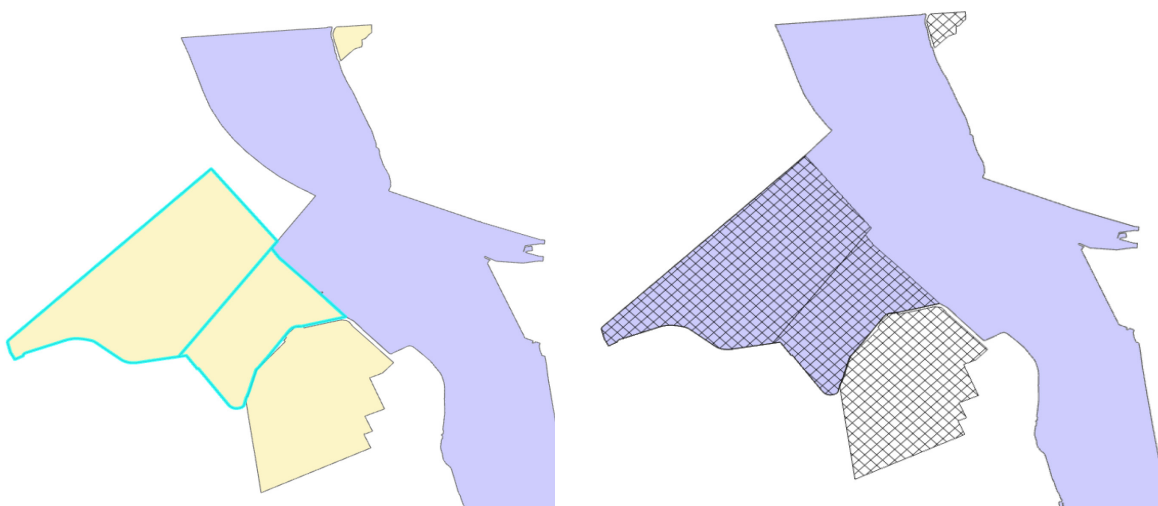
- Via dissolve (i.e. voeg samen tot 1 polygoon) wordt “*mask_totaal*” bekomen
- Alle fysiotopen die de term ‘supralitoraal’ bevatten worden geselecteerd en samengevoegd via Dissolve tot “*mask_schor*”
- Alle fysiotopen die de term ‘subtidaal’ bevatten worden geselecteerd samengevoegd via Dissolve tot “*mask_geul*”

De gebieden gelegen tussen geul en schor vormen het slik. Figuur 7 geeft een voorbeeld van het onderscheid tussen geul, slik en schor na het samenvoegen van de verschillende ecotoopklassen.



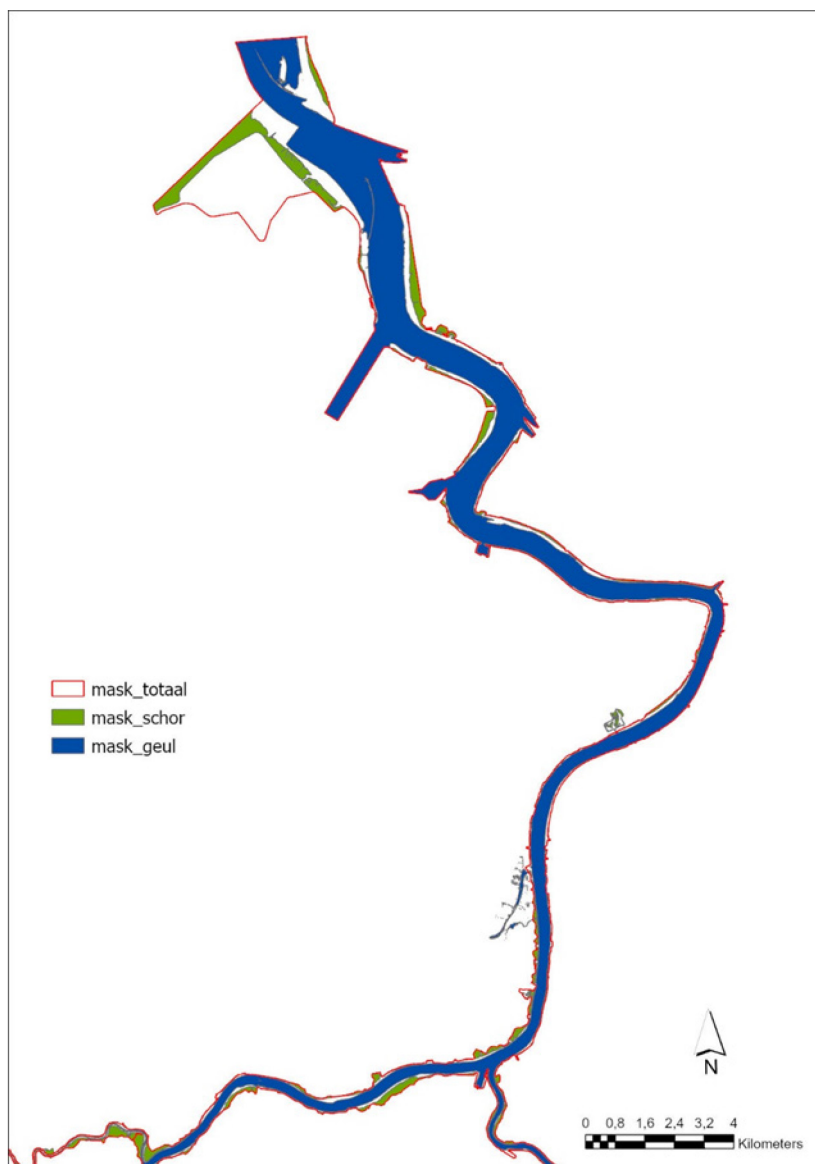
Figuur 7 – Voorbeeld van geul, slik en schor na samenvoegen van ecotopenklassen (t.h.v. Wintam)

Daarnaast werden enkele manuele aanpassingen uitgevoerd aan de masks. Hedwige Prosperpolder werd toegevoegd aan het onderzoeksgebied (zie Figuur 8). Sigmagebieden KBR, Burchtse Weel, Lippenbroek, Bergenmeersen en Groot Broek werden verwijderd omdat in Sigmagebieden (GGG/GOG) geen morfologische veranderingen beschouwd worden in dit onderzoek.

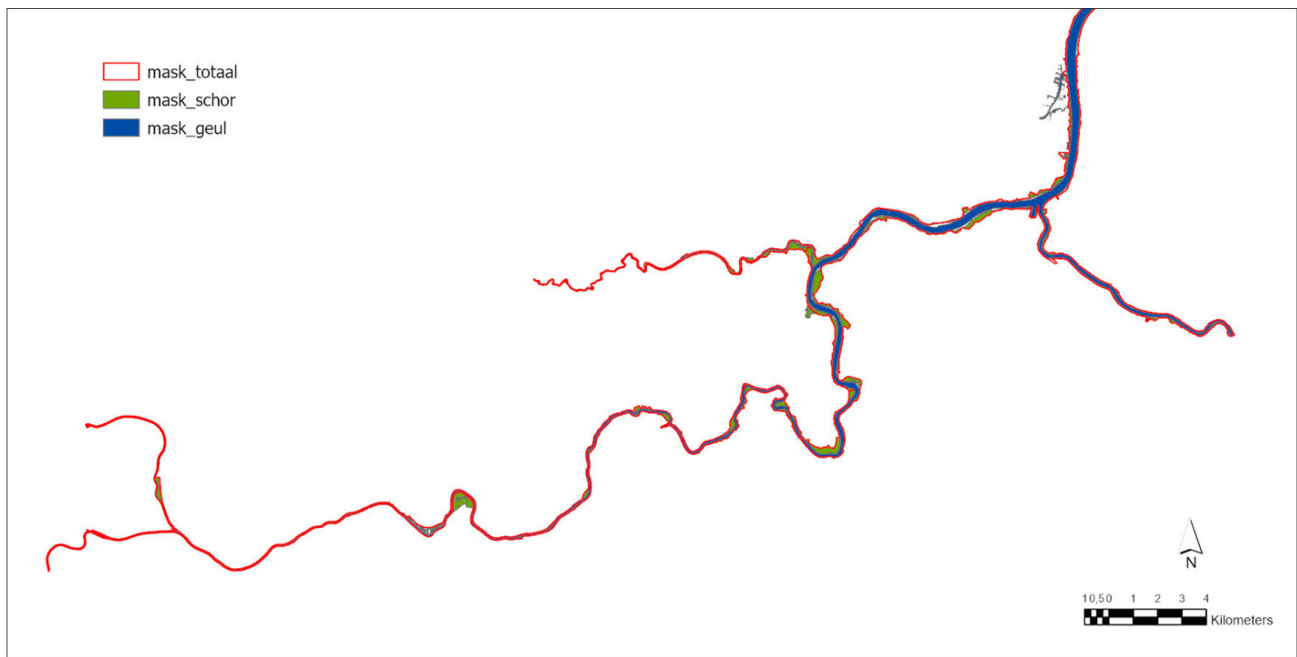


Figuur 8 – Toevoeging Hedwige-Prosperpolder aan mask totaal

Figuur 9 geeft een overzicht van de masks voor de Beneden-Zeeschelde, Figuur 10 voor de Boven-Zeeschelde.



Figuur 9 – Overzicht van masks voor de Beneden-Zeeschelde

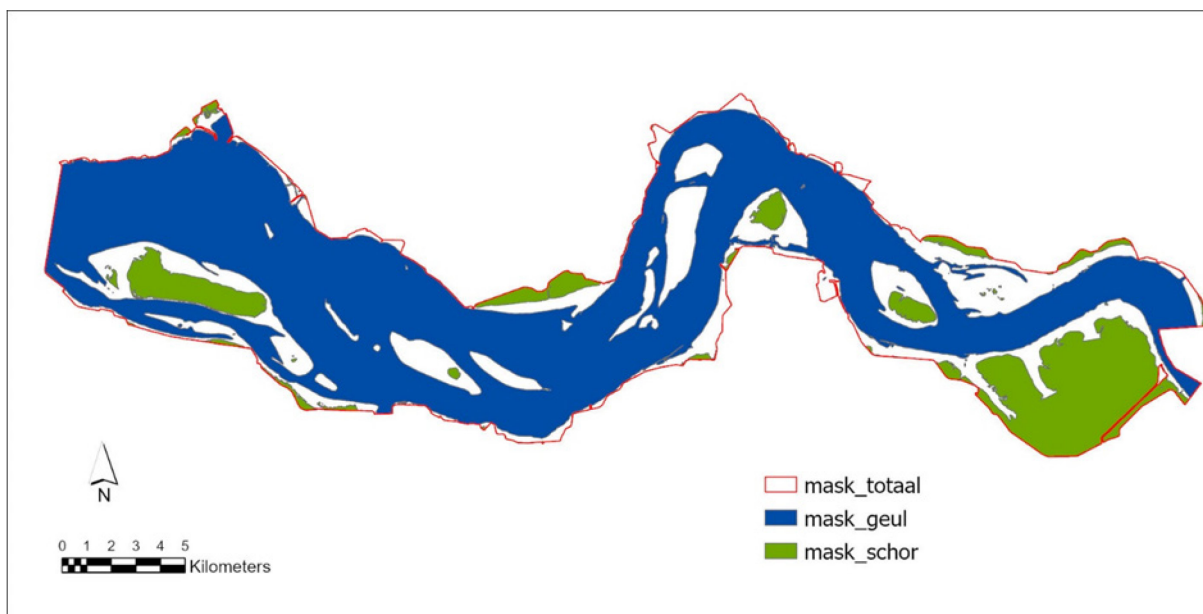


Figuur 10 – Overzicht van masks voor de Boven-Zeeschelde

Met behulp van de ecotopenkaart van de Westerschelde (RWS, 2022) werd onderscheid gemaakt tussen schor, geul en slik en werden 3 mask bestanden aangemaakt:

- Via dissolve (i.e. voeg samen tot 1 polygoon) wordt “*mask_totaal*” bekomen
- Alle polygoonen waarbij het attribuut “verkort” de term schor, hooglitoraal, overig of strand bevat of het attribuut “Omschrijving” de term supralitoraal bevat worden samengevoegd tot *mask_schor*
- Alle polygoonen waarbij het attribuut “verkort” de term sublitoraal bevat worden samengevoegd tot “*mask_geul*”

De gebieden tussen geul en schor vormen samen het slik. Figuur 11 geeft een overzicht van de masks voor de Westerschelde.



Figuur 11 – Overzicht van masks voor de Westerschelde

Ophoging van de topo-bathymetrien

De verschillende meegroeiscenario's zijn een combinatie van meegroeien met enerzijds een bepaalde zeespiegelstijging en anderzijds een bepaalde ruimtelijke extentie waarin dit meegroeien wordt gedefinieerd.

Om de scenario's samen te stellen werden voor Boven-Zeeschelde, Beneden-Zeeschelde en Westerschelde voor de 5 opvolgingsscenario's (+0,15 m / +0,3 m / +0,5 m / +1 m / +2 m) telkens 2 bathymetrieën gegenereerd. Enerzijds een bathymetrie die volledig opgehoogd wordt (geul, slik en schor) en anderzijds een bathymetrie waar de ophoging gebeurt binnen de schorgebieden, er geen ophoging plaats vindt in de geul en er een interpolatie gebeurt van de ophoging over het slik.

Case 1: ophoging over volledige bathymetrie

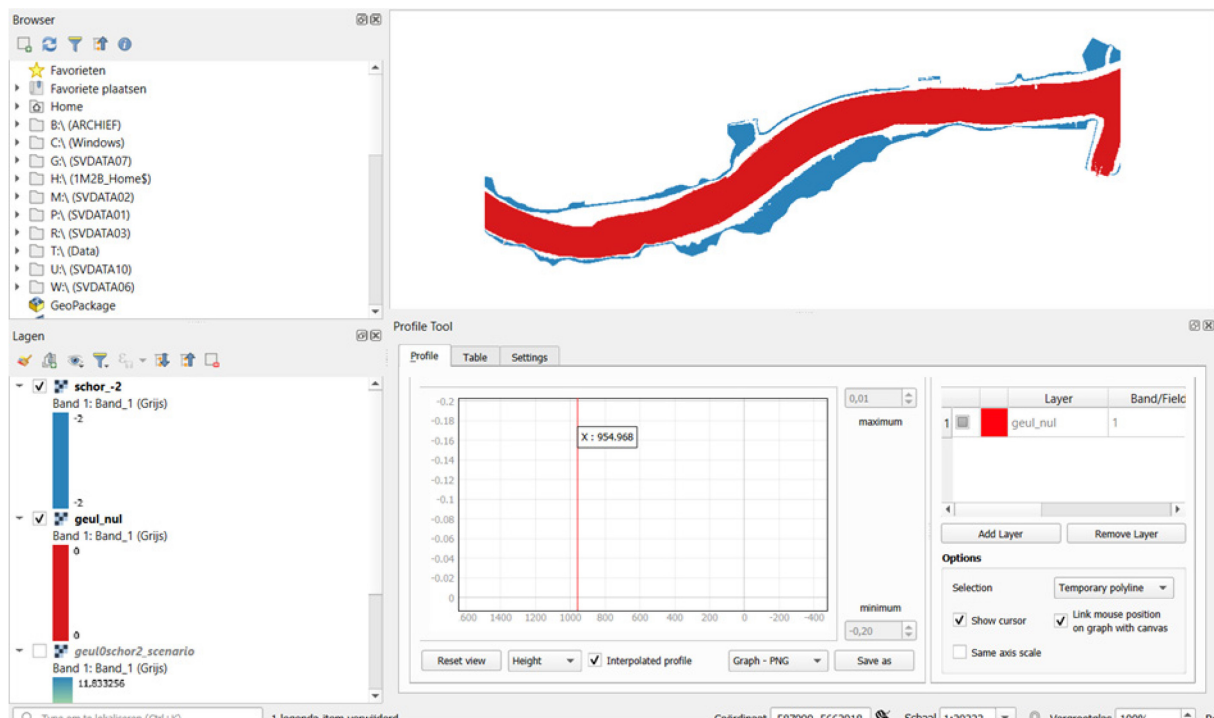
De waarde waarmee opgehoogd dient te worden wordt opgeteld bij de inputbathymetrie en afgeknipt op mask totaal. Vervolgens wordt dit resultaat vermenigvuldigd met -1 om negatieve downward dieptes te bekomen en opgeslaan in een tif- en txt-formaat.

Case 2: ophoging over schor en interpolatie over slik

Voor het ophogen van schor en interpoleren van slik wordt eerst een 'ophogingsbestand' aangemaakt dat vervolgens opgeteld wordt met de input bathymetrie:

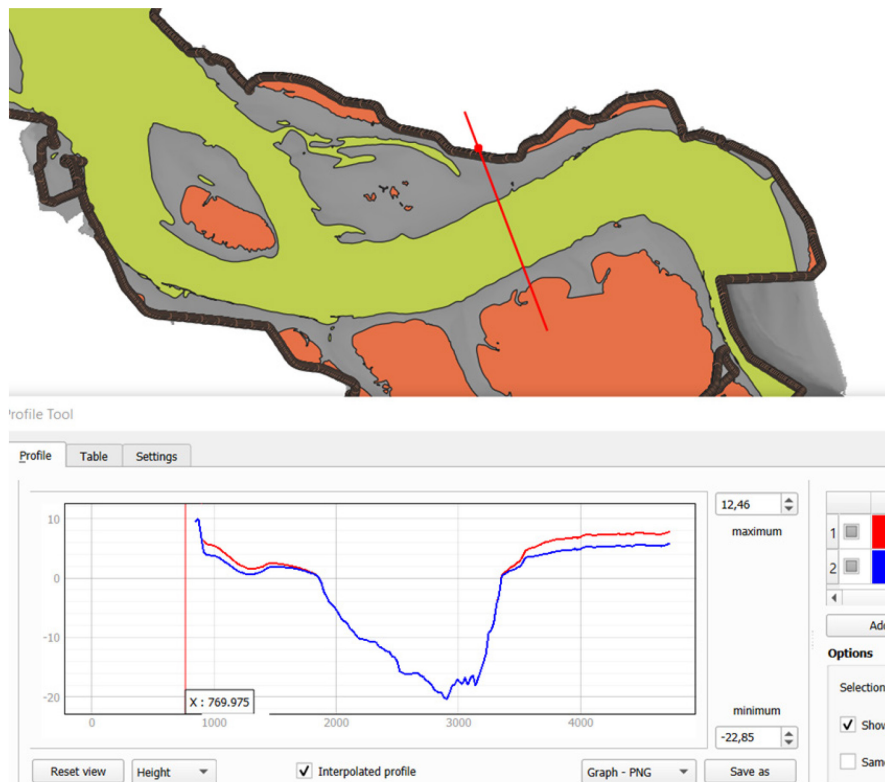
- De geul wordt niet opgehoogd, dus binnen "*mask_geul*" wordt de bathymetrie vermenigvuldigd met 0
- Binnen "*mask_schor*" wordt de bathymetrie eerst vermenigvuldigd met 0, daarna opgeteld met de betreffende ophogingswaarde

Figuur 12 geeft in blauw het schor weer dat waarde -2 heeft (negatieve waarde o.w.v. positieve downward bathy), dus voor een scenario van 100% meegroeien bij 2m ZSS.



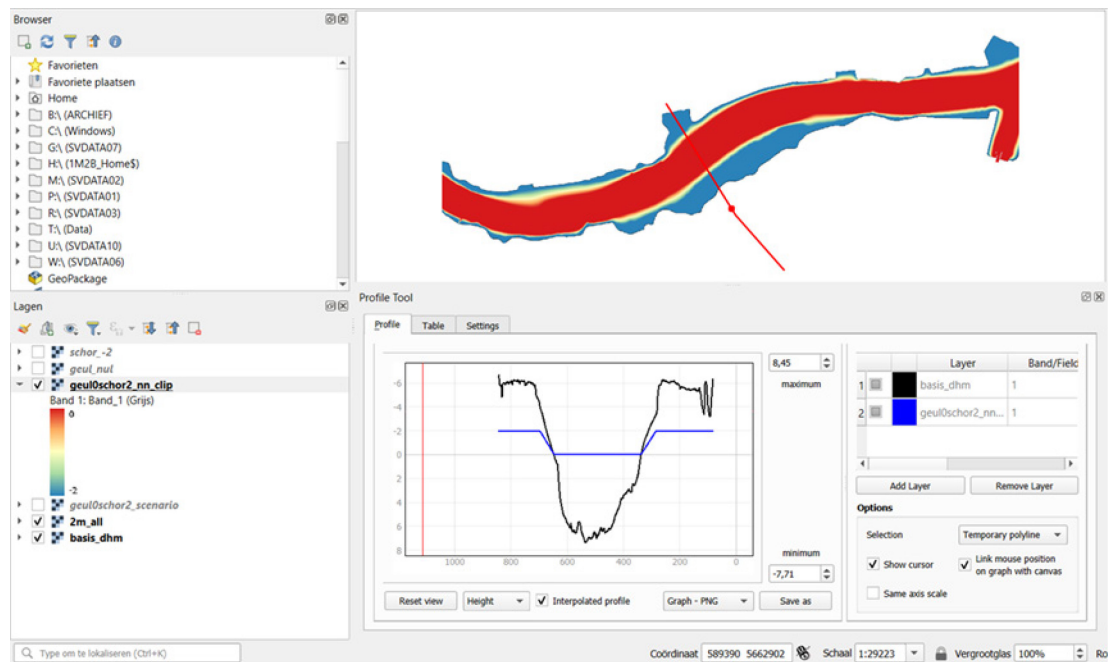
Figuur 12 – Voorbeeld van ophoging schor tot 2 m en geul die niet opgehoogd wordt

- Vervolgens worden de zo gecreëerde rasters voor geul en schor gecombineerd tot 1 raster (mosaic)
- Dit raster wordt omgezet naar een puntenfile
- Om te zorgen dat de interpolatie over het slik juist gebeurt op locaties waar geen schor voorkomt aan de oever (dijk) wordt de contour van “mask_totaal” omgezet naar een puntenfile. Aan deze diepte wordt de ophogingswaarde toegekend en deze wordt samengevoegd met de puntenfile uit de vorige stap (zie Figuur 13).

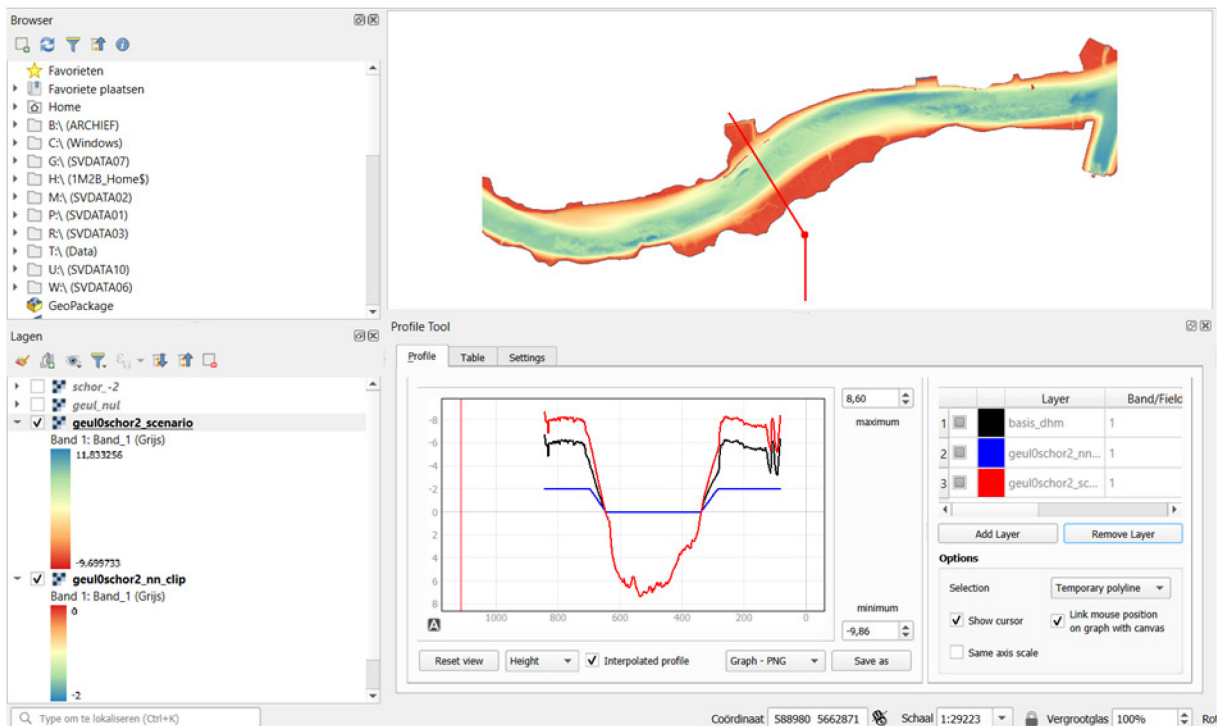


Figuur 13 – Contourlijn wordt gebruikt om afwijkingen in ophoging te voorkomen waar geen schor aan de oever voorkomt

- Hierna wordt een interpolatie (“Natural neighbour”) uitgevoerd binnen “*mask_totaal*”. Op die manier bekomt men een bestand waar de geul waarde 0 heeft, schor waarde ‘ophogingswaarde’ (een % van het beschouwde ZSS scenario) en slik een geleidelijke overgang tussen geul en schor (Figuur 14).
- Vervolgens worden binnen het geïnterpoleerde bestand de zones voor geul en schor opnieuw overschreven met de originele 0- en ophogingswaarde (binnen deze zone werd ook geïnterpoleerd waardoor er afwijkingen zouden ontstaan binnen geul en schorzone).
- Tenslotte wordt de originele bathymetrie opgeteld met bovenstaand ‘ophogingsbestand’ om tot de scenariobathymetrie te komen (zie Figuur 15).



Figuur 14 – Ophogingsraster na interpolatie van slik (blauwe lijn op profiel) voor combinatie met originele bathymetrie (zwart op profiel)



Figuur 15 – Uiteindelijk resultaat (rode lijn op profiel) na sommatie van ophogingsraster (blauwe lijn op profiel) met originele bathymetrie (zwarte lijn op profiel)

GOG's en GGG's

In deze studie zal gefocust worden op de gemiddelde getijvoortplanting in het Schelde estuarium. Hierbij zal dus niet specifiek gekeken worden naar storm events. Bijgevolg wordt geen rekening gehouden met GOG's. Door hun beperkte volume zullen GGG's slechts een zeer beperkt effect hebben op de getijvoortplanting. Deze worden geïmplementeerd in het model maar er worden geen specifieke meegroeiscenario's voor deze gebieden voorzien. Ontpolderde gebieden die werden aangetakt in het huidige geactualiseerde Sigmaplan worden wel voorzien in het model en in de meegroeiscenario's, evenals de ontpolderde gebieden die nog worden voorzien. Hierbij wordt ervan uit gegaan dat de evolutie van deze gebieden de grootschalige evoluties meevolgen. De ontpolderde gebieden in het Sigmaplan, welke nog niet in het numeriek model zijn opgenomen in het Sigmaplan, zijn volgende:

- Hedwige – Prosperpolder
- Groot Schoor

Nog voorziene (momenteel niet aangetakte) ontpolderingen in het huidige Sigmaplan zijn:

- Groot Broek
- Klein Broek
- Potpolder I
- Stort van Hingene
- Uiterdijk

2.3 Numerieke modellering

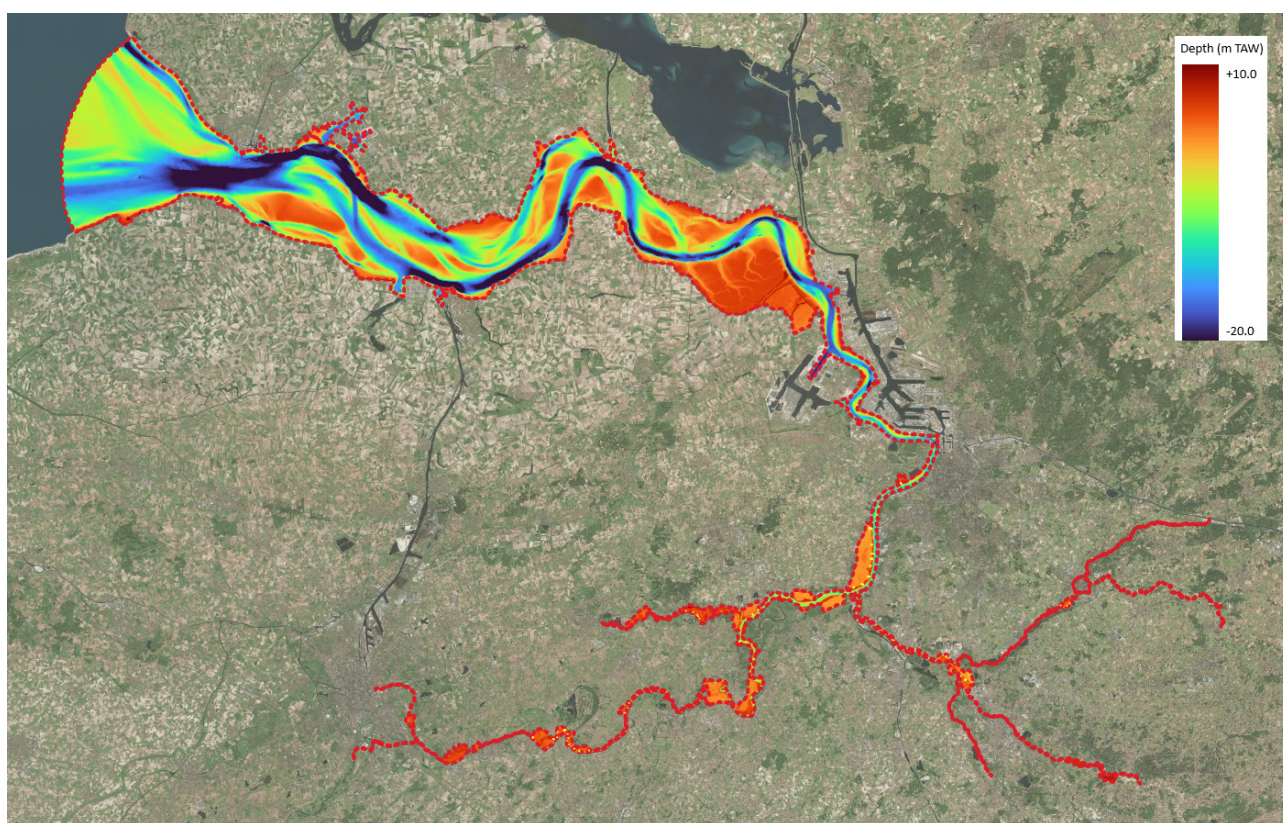
2.3.1 Software

De Telemac-3D software, versie v8p5r0 (Hervouet, 2007; openTelemac, 2023), is gebruikt om hydrodynamische numerieke simulaties uit te voeren. Deze software is gebaseerd op de eindig-elementenmethode.

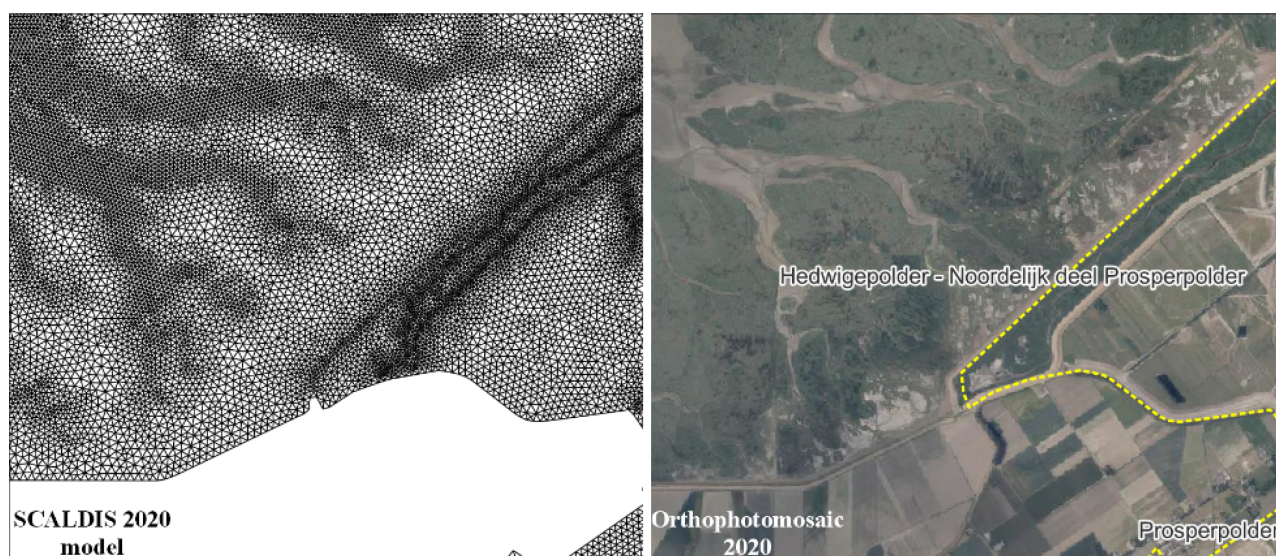
De Blue Kenue-software wordt ook gebruikt voor de implementatie van de bathymetrische gegevens en morfologische meegroeiscenario's.

2.3.2 Modelbeschrijving

Het Scaldis2020 model (Vanlede *et al.*, 2025) bestrijkt het gehele Schelde-estuarium vanaf de lijn Westkapelle - Cadzand in het mondingsgebied tot aan de opwaartse randen van het estuarium, inclusief de relevante Sigma-gebieden (Figuur 16). Het Scaldis2020 model heeft vijf verticale lagen en bestaat uit ongeveer 530.000 roosterpunten en 1.000.000 driehoekige elementen. De modelresolutie neemt geleidelijk toe van ongeveer 180 m nabij de afwaartse rand tot bijna 2 m in de bovenste riviersecties en intertidale krekken. Het raster is daarnaast lokaal verfijnd in gebieden met scherpe bathymetrische gradiënten, nabij havens en vertakkingen, in de belangrijkste krekken binnen overstromingsgebieden en in regio's die gekend zijn voor complexe stromingspatronen. Figuur 17 geeft een voorbeeld van een dergelijke modelverfijning.



Figuur 16 – Scaldis2020 modeldomein. Uit: Vanlede *et al.* (2025).



Figuur 17 – Modelverfijning t.h.v. Verdrongen Land van Saeftinghe en Hedwig-Prosperpolder. Uit: Vanlede *et al.* (2025).

Bathymetrie

In het Scaldis2020 model werd initieel bathymetrische data van de periode 2018-2020 geïmplementeerd (m.u.v. enkele gebieden waar geen bodemligging voor deze periode beschikbaar was). In het kader van de huidige studie is de bodemligging in een groot deel van het estuarium, m.n. Westerschelde, Zeeschelde en Rupel, geüpdatet naar die van het jaar 2022/2023 (zie sectie 2.2).

GOG's en GGG's

De actieve GOG en GGG gebieden zijn eveneens geïmplementeerd in het model. De GGG-werking is geschematiseerd met behulp van de specifiek voor het Schelde estuarium ontwikkelde duiker-functies in Telemac-3D (Smolders *et al.*, 2014).

Bodemwrijving

Ten tijde van het uitvoeren van de gevoeligheidsanalyse in dit rapport was de kalibratie van het Scaldis2020 model nog niet afgerond. De modelberekeningen in dit rapport worden daarom uitgevoerd met een constante coëfficiënt voor bodemwrijving. De toegepaste Nikuradse ruwheidshoogte is 0.016 m.

In het Scaldis2020 kalibratierapport is overigens een specifieke kalibratieoefening uitgevoerd waaruit blijkt dat deze waarde optimale resultaten biedt als met een constante bodemruwheid wordt gesimuleerd.

2.3.3 Randvoorwaarden

Afwaartse randvoorwaarden

Aan de afwaartse rand tussen Cadzand en Westkapelle, in het mondingsgebied van het estuarium, worden geobserveerde waterstanden als randvoorwaarde opgelegd. De modelrand bestaat uit 140 roosterpunten, waarbij de waterpeil-tijdreeksen voor elk punt worden berekend door lineaire interpolatie tussen de twee getijstations.

De simulatieperiode loopt van 7 juni 2020 tot 9 juli 2020 en duurt 32 dagen, overeenkomstig de simulatieperiode van de kalibratieruns voor kalme condities in het Scaldis2020 kalibratierapport (Vanlede *et al.*, 2025).

Implementatie zeespiegelstijging

De zeespiegelstijgingsscenario's worden geïmplementeerd door de zeespiegelstijging van +30 cm, +100 cm of +200 cm op te tellen bij de waterstandsrandvoorwaarde aan de afwaartse rand (Westkappele – Cadzand).

Uit het eerdere modelonderzoek door Chu *et al.* (2020) volgt dat zowel de getij-amplitude als de getijfase aan de monding van het estuarium enigszins beïnvloed worden door zeespiegelstijging. Deze effecten van zeespiegelstijging, die zich op de Noordzee buiten het Schelde estuarium ontwikkelen, worden echter marginaal geacht ten opzichte van de potentiële invloed van zeespiegelstijging en morfologische ontwikkeling in het estuarium zelf op de getijvoortplanting. Daarom zijn in deze studie geen verdere correcties toegepast op het getij aan de afwaartse rand.

Opwaartse randvoorwaarden

Aan de opwaartse randen wordt het model geforceerd met constante debieten die overeenstemmen met de P50-waarden uit het HIC jaarboek van 2023 (Bertels *et al.*, 2024). Tabel 1 geeft een overzicht van de geïmplementeerde debieten.

Tabel 1 – Bovenstroomse randvoorwaarden.

Rand	Debiet m ³ /s
Dender	3.0
Zenne	7.3
Dijle	11.1
Grote Nete	3.8
Kleine Nete	4.8
Bath	-
Terneuzen	31.1
Merelbeke	22.1

2.3.4 Overige modelinstellingen

In het Scaldis2020 model worden relevante fysische processen zoals saliniteitseffecten en bochtstroming mee in rekening gebracht. In de huidige analyse is de externe forcering door wind uitgezet.

Voor een overzicht van alle modelinstellingen, waaronder fysische parameters en numerieke instellingen, alsmede een meer gedetailleerde beschrijving van het Scaldis2020 model wordt verwezen naar het kalibratie- en validatierapport door Vanlede *et al.* (2025).

2.3.5 Modelvalidatie

De impact van de bathymetrische wijzigingen op de modelprestatie is geanalyseerd door een modelvalidatie uit te voeren voor de representatie van het verticaal getij. De resultaten van de validatieoefening zijn opgenomen in BIJLAGE 1. Hieruit blijkt dat het Scaldis2020 model de waterstanden goed reproduceert in de Westerschelde en het grootste deel van de Zeeschelde. De afwijkingen ten opzichte van het gemeten waterstandsverloop blijven beperkt tot minder dan 10 centimeter. Hoogwaters en laagwaters worden met eenzelfde precisie gereproduceerd. Enkel in het opwaartse deel van de Boven-Zeeschelde, i.e., opwaarts van Dendermonde, zijn de afwijkingen iets groter, tot 10 à 20 cm. Dit kan worden verklaard door de modelinstellingen, waarbij wordt gerekend met een constante bodemruwheid. Er wordt verwacht dat de modelprestatie in dit deel verbeterd na uitvoering van een volledige kalibratieoefening in Vanlede *et al.*, (2025). De fasering van de hoogwaters en laagwaters wordt in het gehele estuarium gerepresenteerd met een afwijking kleiner dan 10 minuten, i.e., dit is kleiner dan het uitvoerinterval van de modelberekening zelf.

Voor een volledig overzicht van de modelprestatie, met betrekking tot waterstanden (incl. zijrivieren), stroomsnelheden, saliniteit, wordt verwezen naar het uitgebreide kalibratierapport zelf (Vanlede *et al.*, 2025).

2.4 Scenario's

Tabel 2 geeft een overzicht van de uitgevoerde modelberekeningen (i.e., combinatie van zeespiegelstijging en morfologisch meegroeiscenario). In totaal worden 25 simulaties uitgevoerd. Hierbij wordt voor elke zeespiegelstijging een referentierun gelopen (*_R01 runs). Voor de Boven-Zeeschelde worden simulaties met 50% meegroeien opgenomen (*_R02 en *_R03 runs) t.o.v. de zeespiegelstijging, voor de andere deelgebieden (Westerschelde en Beneden-Zeeschelde) wordt enkel 0% en 100% meegroeien beschouwd.

Tabel 2 – Overzicht modelscenario's.

Scenario	Bathymetrie Westerschelde		Bathymetrie Beneden-Zeeschelde		Bathymetrie Boven-Zeeschelde		ZSS
	slik/schor	Geul	slik/schor	Geul	slik/schor	geul	
SC000_R01	-	-	-	-	-	-	+0.00 m
SC030_R01	-	-	-	-	-	-	+0.30 m
SC030_R02	-	-	-	-	+0.15 m	-	+0.30 m
SC030_R03	-	-	-	-	+0.15 m	+0.15 m	+0.30 m
SC030_R04	-	-	-	-	+0.30 m	-	+0.30 m
SC030_R05	-	-	+0.30 m	-	+0.30 m	-	+0.30 m
SC030_R06	+0.30 m	-	+0.30 m	-	+0.30 m	-	+0.30 m
SC030_R07	+0.30 m	-	+0.30 m	-	+0.30 m	+0.30 m	+0.30 m
SC030_R08	+0.30 m	-	+0.30 m	+0.30 m	+0.30 m	+0.30 m	+0.30 m
SC100_R01	-	-	-	-	-	-	+1.00 m
SC100_R02	-	-	-	-	+0.50 m	-	+1.00 m
SC100_R03	-	-	-	-	+0.50 m	+0.50 m	+1.00 m
SC100_R04	-	-	-	-	+1.00 m	-	+1.00 m
SC100_R05	-	-	+1.00 m	-	+1.00 m	-	+1.00 m
SC100_R06	+1.00 m	-	+1.00 m	-	+1.00 m	-	+1.00 m
SC100_R07	+1.00 m	-	+1.00 m	-	+1.00 m	+1.00 m	+1.00 m
SC100_R08	+1.00 m	-	+1.00 m	+1.00 m	+1.00 m	+1.00 m	+1.00 m
SC200_R01	-	-	-	-	-	-	+2.00 m
SC200_R02	-	-	-	-	+1.00 m	-	+2.00 m
SC200_R03	-	-	-	-	+1.00 m	+1.00 m	+2.00 m
SC200_R04	-	-	-	-	+2.00 m	-	+2.00 m
SC200_R05	-	-	+2.00 m	-	+2.00 m	-	+2.00 m
SC200_R06	+2.00 m	-	+2.00 m	-	+2.00 m	-	+2.00 m
SC200_R07	+2.00 m	-	+2.00 m	-	+2.00 m	+2.00 m	+2.00 m
SC200_R08	+2.00 m	-	+2.00 m	+2.00 m	+2.00 m	+2.00 m	+2.00 m

2.5 Verwerking van de modelresultaten

2.5.1 Getijkarakteristieken

Op basis van de verkregen modelresultaten uit de scenarioberekeningen wordt de gecombineerde invloed van zeespiegelstijging en de geïmplementeerde morfologische veranderingen (i.e., al dan niet meegroeien van slikken en schorren) op de getijvoortplanting geanalyseerd. Hierbij worden onderstaande parameters geanalyseerd:

- verloop van HW en LW langsheen het estuarium
 - hoog- en laagwaterstanden
 - getijslag
 - getijvertraging HW en LW t.o.v. de monding
- getijprisma of getijvolume (i.e., vloedvolume)
- getij-asymmetrie
 - asymmetrie verticaal getij o.b.v. ratio $T_{\text{dalig}} / T_{\text{stijging}}$
 - asymmetrie verticaal getij o.b.v. harmonische componenten M4 en M2:
 - faseverschil: $2\phi_{M2} - \phi_{M4}$
 - amplitude ratio: A_{M4}/A_{M2}
 - asymmetrie van het horizontaal getij o.b.v. ratio maximale vloed- en ebstroming (dwarssectiegemiddelde stroomsnelheid)
 - asymmetrie van het horizontaal getij o.b.v. genormaliseerd derde-orde snelheidsmoment (dwarssectiegemiddelde stroomsnelheid):
 - $\gamma_0 = \vec{u}^3 / (\vec{u}^2)^{3/2}$

Berekeningsmethoden

De hoog- en laagwaters, getijslag, getijvertraging, getijvolumes en stijging- en dalingsduur worden steeds per getij berekend en vervolgens gemiddeld over de simulatieperiode van twee springtij-doodtij-cycli. De getijslag wordt per getij berekend als het verschil tussen een laagwaterniveau en het daarop volgende hoogwaterniveau.

De horizontale asymmetrie wordt berekend op basis van dwarssectie-gemiddelde stroomsnelheden (zie Figuur 18). Het derde-orde snelheidsmoment wordt per tijdstap berekend uit dwarssectie-gemiddelde stroomsnelheden en over de volledige simulatieduur geïntegreerd.

Hieronder worden de verschillende indicatoren voor getij-asymmetrie nader toegelicht.

Indicatoren voor getij-asymmetrie

Getij-asymmetrie verwijst naar de ongelijke verdeling van de getijbewegingen tijdens vloed en eb. Dit kan zowel horizontaal (stromingen en snelheden) als verticaal (waterstanden) worden waargenomen. Er zijn dus verschillende indicatoren of parameters die de asymmetrie van het getij beschrijven. Op basis van de indicatoren voor getij-asymmetrie kan de eb- of vloed-dominantie van het getij worden beschouwd. Eb- en vloed-dominantie duiden op de residuele transportrichting die wordt gerelateerd aan een bepaald type asymmetrie.

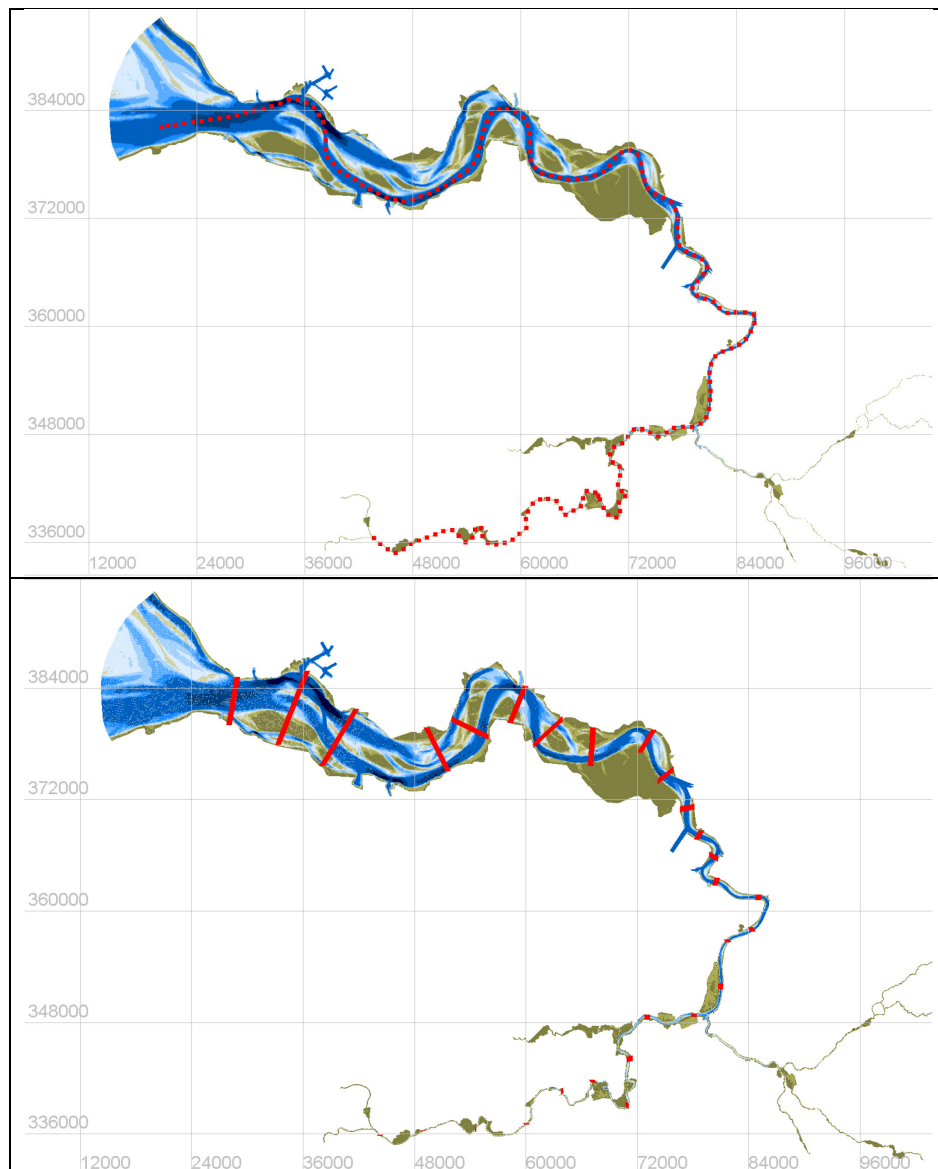
Verticale asymmetrie wordt bepaald door het verschil in duur tussen de stijging (vloedperiode) en daling (ebperiode) van het waterniveau. Een kortere stijgingsperiode wijst op vloed-dominantie, terwijl een kortere dalingsperiode op eb-dominantie wijst. De rationale hierbij is dat een kortere stijgingsperiode relatief hogere stroomsnelheden impliceert omdat het getijvolume in een kortere periode instroomt tijdens de vloedfase dan uitstroomt tijdens de ebfase. Horizontale asymmetrie kan bepaald worden door de verhouding tussen de pieksnelheden tijdens vloed en eb. Sterkere vloedstromen duiden op vloed-dominantie, terwijl sterkere ebstromen wijzen op eb-dominantie. Het genormaliseerde derde-orde snelheidsmoment (γ_o) geeft een indicatie van de asymmetrie op basis van de gehele tijdreeks van stroomsnelheden in plaats van louter de snelheidspieken. Deze parameter wordt berekend door het derde-orde snelheidsmoment te normaliseren met het tweede-orde snelheidsmoment tot de 1,5^e macht (Nidzieko & Ralston, 2012; Stark *et al.*, 2017). De derde macht of een andere hogere macht van de stroomsnelheid valt bovendien te relateren aan het bodemtransport, conform gekende sedimenttransportformules (e.g. Engelund & Hansen, 1967; Meyer-Peter & Müller, 1948; Van Rijn, 2007). Positieve waarden van γ_o duiden in dit rapport op vloed-dominantie, terwijl negatieve waarden op eb-dominantie wijzen.

Tot slot wordt opgemerkt dat de indicatoren voor getij-asymmetrie vooral betrekking hebben op residueel transport van niet-cohesief materiaal (zand). Voor het residueel transport van cohesief sediment (slib) spelen andere processen een rol. Een voorbeeld hiervan is de asymmetrie tussen de kenteringsduur bij laag- en hoogwater, waarbij een langere kenteringsduur bij LW sedimenttransport in ebrichting bevordert en een langere kenteringsduur bij HW in vloedrichting (e.g. Dronkers, 1986).

2.5.2 Observatiepunten en transecten

De gemodelleerde waterstanden worden geanalyseerd op een set van specifieke uitvoerpunten langs de thalweg, beginnende in het mondingsgebied en lopend tot aan Melle (Figuur 18). De uitvoerpunten hebben een onderlinge afstand van ongeveer één kilometer. In de Westerschelde wordt de vaargeul gevolgd, net zoals de thalweg in de Zeeschelde.

De gemodelleerde getijdebieten worden geanalyseerd op een set van transecten die om de 5 km tot 10 km zijn opgesteld (Figuur 18). Deze transecten werden voor dit project gedefinieerd. Op basis van deze debieten worden vervolgens getijvolumes en dwarssectiegemiddelde stroomsnelheden berekend. Die laatste vormen weer input voor de analyse van de horizontale getijasymmetrie.



Figuur 18 – Uitvoerpunten model: observatiepunten (boven) en transecten (onder).

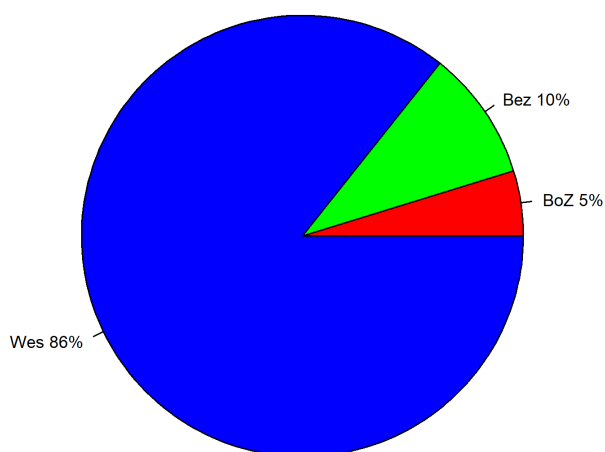
3 Resultaten meegroeiscenario's

3.1 Oppervlaktes

In eerste instantie worden een aantal karakteristieke waarden weergegeven voor de Westerschelde, Beneden-Zeeschelde en Boven-Zeeschelde, zoals ze gebruikt werden in deze studie.

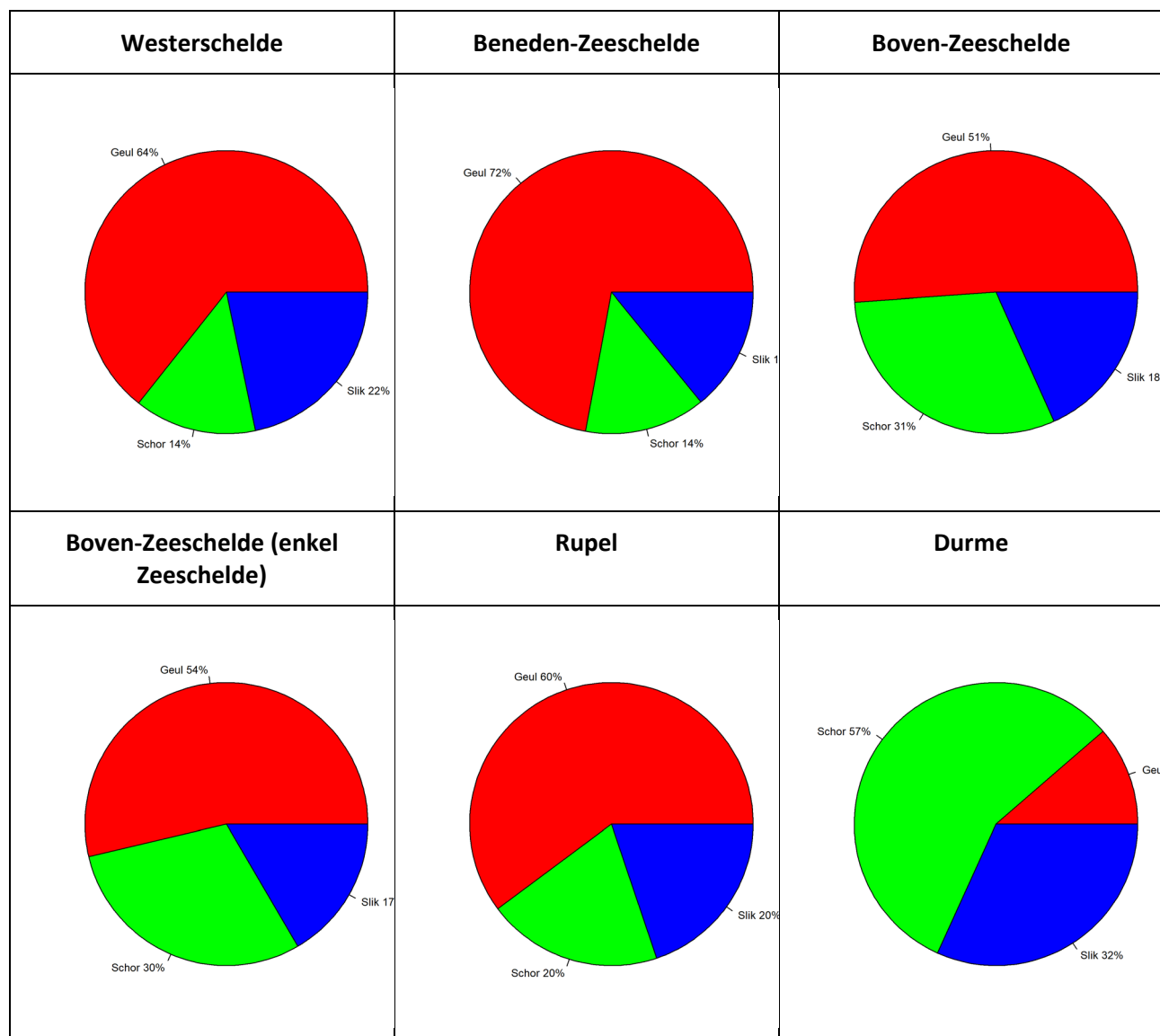
	OMES segmenten
Westerschelde	Segment 1 t.e.m. 8
Beneden – Zeeschelde	Segment 9 t.e.m. 13
Boven – Zeeschelde	Segment 14 t.e.m. 19; Rupel ; Durme

Het volledige Schelde estuarium kent volgende oppervlakteverdeling, volgens Westerschelde (WES), Beneden-Zeeschelde (BEZ) en Boven-Zeeschelde (BOZ), zoals weergegeven in Figuur 19. Hierbij worden de verschillende Sigmagebieden (GOG – GGG's) niet in rekening gebracht, enkel de geul en gebieden in direct contact ermee (slikken, schorren en recente ontpolderingen) worden hier weergegeven.



Figuur 19 – Verdeling van het oppervlak van het Schelde estuarium over de verschillende delen.

Wanneer men per zone de laterale verdeling beschouwd (weergegeven in Figuur 20), kan men opmerken dat voor de Westerschelde en de Beneden – Zeeschelde de verhouding voor de verschillende delen gelijkaardig is met 64 – 72 % subtidaal, ca. 14 % schor en het overige slik. Voor de Boven – Zeeschelde is deze verhouding duidelijk anders, met een kleiner aandeel voor het subtidale (ca. 50 %) en vooral een groter aandeel schor (ca. 30 %). Wanneer men deze verdeling voor de Boven-Zeeschelde nog verder verfijnt, met apart de Durme (ca. 10% van het oppervlak- en de Rupel (ca. 20 % van het oppervlak), valt op dat aan deze verhouding weinig verandert. Dit ondanks het feit dat bv. in de Durme het schoraandeel heel sterk doorweegt.



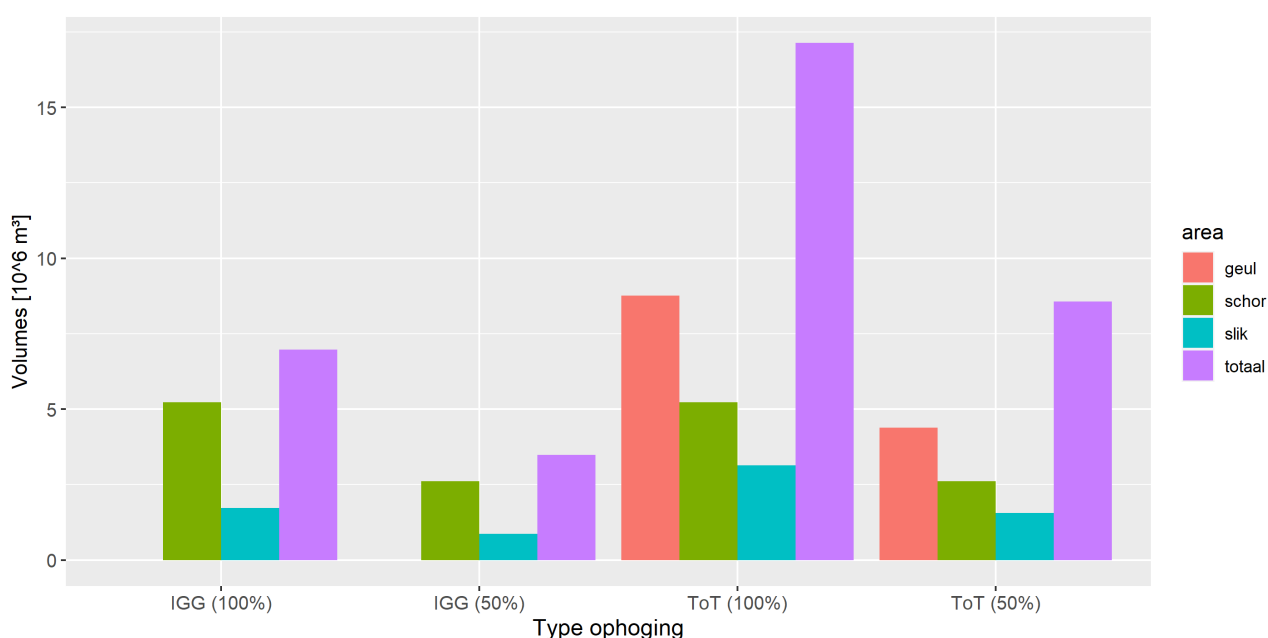
Figuur 20 – Verdeling van areaal slik, geul en schor voor de verschillende delen van het Schelde estuarium: Westerschelde, Beneden-Zeeschelde, Boven-Zeeschelde, Boven-Zeeschelde (enkel Zeeschelde), Rupel & Durme

3.2 Volumes

3.2.1 Per zone

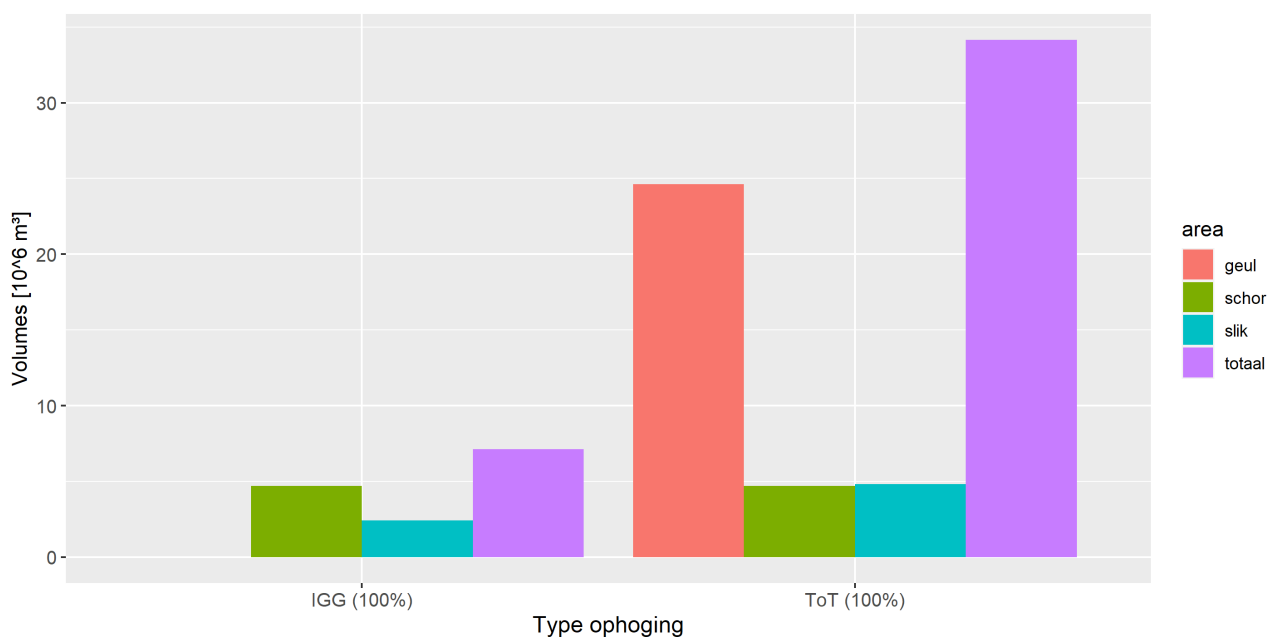
In deze sectie wordt in de figuren gefocust op de toename van een SLR van 100 cm, en al de scenario's hieromtrent. Een totaal overzicht van de benodigde volumes is weergegeven in sectie 3.2.2.

In de **Boven-Zeeschelde** zijn de volumeveranderingen weergegeven in Figuur 21 voor het meegroeien (50 en 100%) met de zeespiegelstijging, voor enkel intergetijdengebied (IGG) en voor een volledige verhoging. Hierbij valt op dat het grootte orde verschil tussen een totale verhoging met 50% ZSS en 100 % meegroeien van intergetijdengebied beperkt is. Het scenario met de kleinste sedimentbehoefte (IGG, 50%) en de hoogste sedimentbehoefte (ToT, 100%) verschillen ongeveer een factor 5. De verhouding van sedimenthoeveelheden bij uniforme verhoging ("ToT") is uiteraard volledig gerelateerd aan de verhouding van de oppervlaktes (zie Figuur 20). Voor enkel ophoging van intergetijdengebied weegt het aandeel van de schorophoging harder door, door de lineaire interpolatie op slikgebieden.



Figuur 21 – Volumes sediment nodig voor de ophoging van scenario's (1m SLR) met intergetijdengebied (IGG) en volledige ophoging (ToT) in de Boven-Zeeschelde, Rupel & Durme

In de **Beneden-Zeeschelde** zijn de volumeveranderingen weergegeven voor het meegroeien (enkel 100%) met de zeespiegelstijging, voor enkel IGG en voor een volledige verhoging (Figuur 22). De totale hoeveelheid sediment nodig voor het ophogen van intergetijdengebied is gelijkaardig aan de hoeveelheid nodig in de Boven-Zeeschelde (Figuur 21) en bedraagt ca. $7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ sediment. Voor een totale ophoging van zowel geulen als intergetijdengebied is de sedimentbehoefte ca. 2 maal deze van de Boven-Zeeschelde.



Figuur 22 – Volumes sediment nodig voor de ophoging van scenario's met intergetijdengebied (IGG) en volledige ophoging (ToT) in de Beneden-Zeeschelde

3.2.2 Per scenario

In Tabel 3 is een overzicht weergegeven van de benodigde sedimentvolumes per scenario. De verhouding tussen de verschillende zeespiegelstijgingen is eenvoudig de verhouding tussen de hoogteveranderingen, aangezien de oppervlaktes in elk scenario identiek zijn. Het incorporeren van de Westerschelde in de ophogingsscenario's impliceert een sterke verhoging van de benodigde sedimentvolumes, door de uitgestrekte oppervlakte van dit gebied (Figuur 19).

Tabel 3 – Overzicht van benodigde sedimentvolumes (10^6 m^3) per scenario, voor de verschillende scenario's van zeespiegelstijgingen.

Westerschelde		Beneden-Zeeschelde		Boven-Zeeschelde		ZSS +0.3m	ZSS +1m	ZSS +2m
slik/schor	geul	slik/schor	Geul	slik/schor	Geul			
-	-	-	-	-	-	0	0	0
-	-	-	-	+50%	-	1,04	3,48	6,96
-	-	-	-	+50%	+50%	2,57	8,57	17,14
-	-	-	-	+100%	-	2,09	6,97	13,94
-	-	+100%	-	+100%	-	4,23	14,10	28,2
+100%	-	+100%	-	+100%	-	24,50	81,66	163,32
+100%	-	+100%	-	+100%	+100%	27,55	91,82	183,64
+100%	-	+100%	+100%	+100%	+100%	35,65	118,83	237,66

4 Modelresultaten

4.1 Overzicht scenarioberekeningen

In dit hoofdstuk wordt de hydrodynamische impact van de zeespiegelstijging in verschillende meegroeiscenario's besproken aan de hand van verschillende getijkarakteristieken. Er wordt steeds een figuur getoond met modelresultaten voor de drie zeespiegelstijgingsscenario's mét en zonder het meegroeien van de intergetijdengebieden. Voor de modelberekeningen met 100 cm zeespiegelstijging worden vervolgens de verschillen tussen de morfologische meegroeiscenario's in meer detail getoond.

In algemene zin worden voor de verschillende zeespiegelstijgingsscenario's gelijkaardige resultaten gevonden. De resultaten voor alle meegroeiscenario's bij +30 cm, +100 cm en +200 cm zeespiegelstijging zijn daarom in onderstaande bijlages opgenomen:

- Bijlage 2 – Modelresultaten scenario's +30 cm zeespiegelstijging
- Bijlage 3 – Modelresultaten scenario's +100 cm zeespiegelstijging
- Bijlage 4 – Modelresultaten scenario's +200 cm zeespiegelstijging

4.2 Verticaal getij

4.2.1 Getijslag

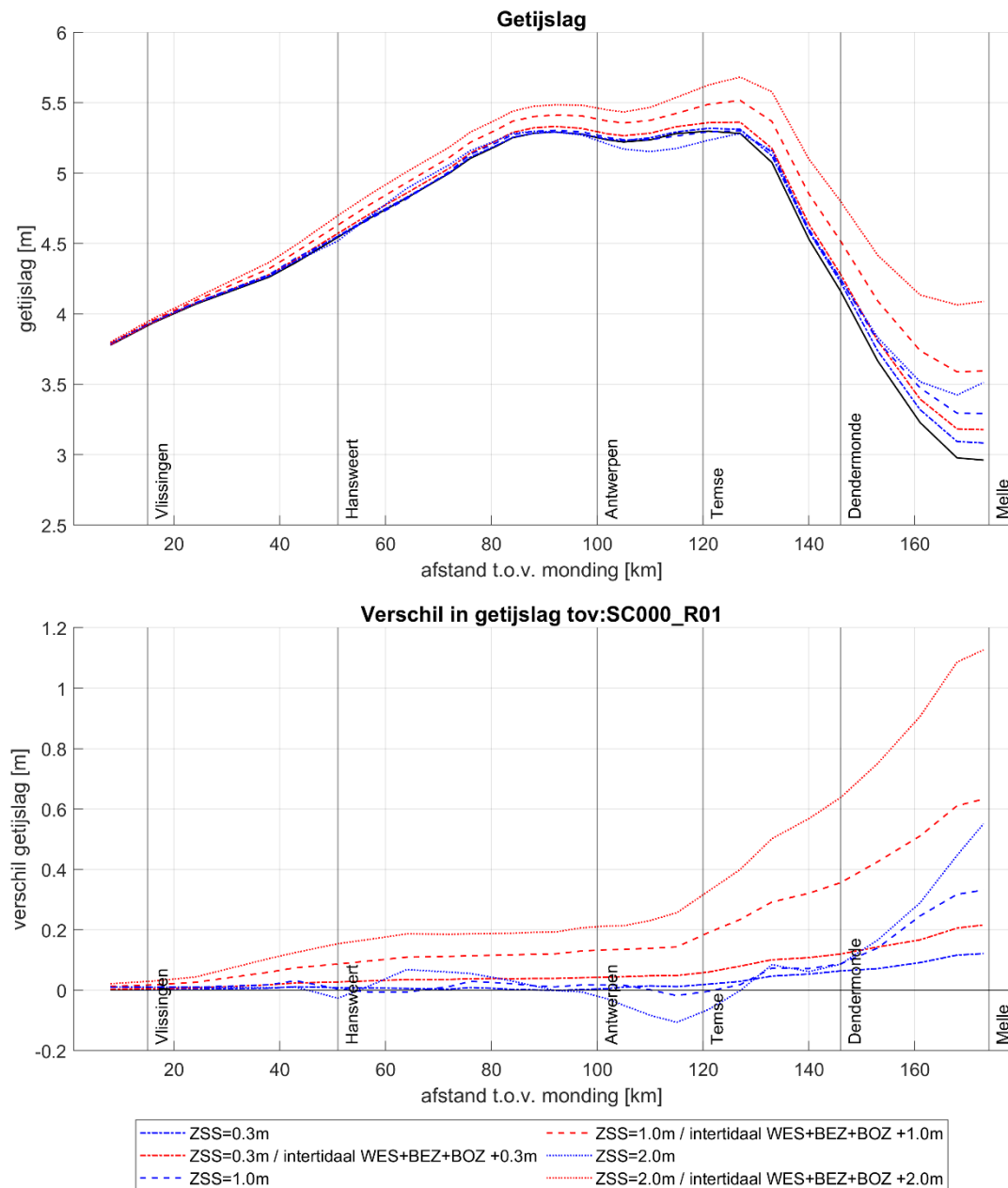
Het gecombineerd effect van zeespiegelstijging en het meegroeien van de intergetijdengebieden (slikken en schorren) op de getijslag in het estuarium wordt geïllustreerd in Figuur 23. Vervolgens toont Figuur 24 de invloed op de getijslag voor verschillende meegroeiscenario's bij een zeespiegelstijging van +1 m.

Uit de modelsimulaties volgt een toename van de getijslag in de Boven-Zeeschelde als gevolg van zeespiegelstijging in alle scenario's. Deze toename in getijslag is afhankelijk van de mate van zeespiegelstijging en van de morfologische ontwikkeling, i.e., het al dan niet meegroeien van de intergetijdengebieden. Op basis van de uitgevoerde modelscenario's (Figuur 24) heeft de morfologische ontwikkeling een impact op de getijslag die helemaal opwaarts tot +/- 60 cm oploopt bij een zeespiegelstijging van +1 m. Het meegroeien van de intergetijdengebieden versterkt de toename van de getijslag. In scenario's waarin de intergetijdengebieden in het gehele estuarium meegroeien met eenzelfde snelheid als de zeespiegelstijging gaat het (opwaarts) ongeveer om een verdubbeling van het effect dat enkel door zeespiegelstijging wordt veroorzaakt. De impact is vooral groot in de Boven-Zeeschelde. Hier neemt de getijslag met enkele decimeters toe afhankelijk van het modelscenario. In de meest extreme situatie (+2 meter zeespiegelstijging en volledig meegroeien intergetijdengebieden) is sprake van een getijslag die tot meer dan 1 m toeneemt aan de opwaartse rand. In het geval van +1 meter zeespiegelstijging en het meegroeien van de intergetijdengebieden is de berekende toename een toename van de getijslag in de Boven-Zeeschelde variërend van 20 cm bij Temse tot 60 cm aan de opwaartse rand. Als de intergetijdengebieden maar voor 50% meegroeien, i.e. +50 cm ophoging bij +1 m zeespiegelstijging, halveert de impact ten opzichte van het scenario zonder meegroei.

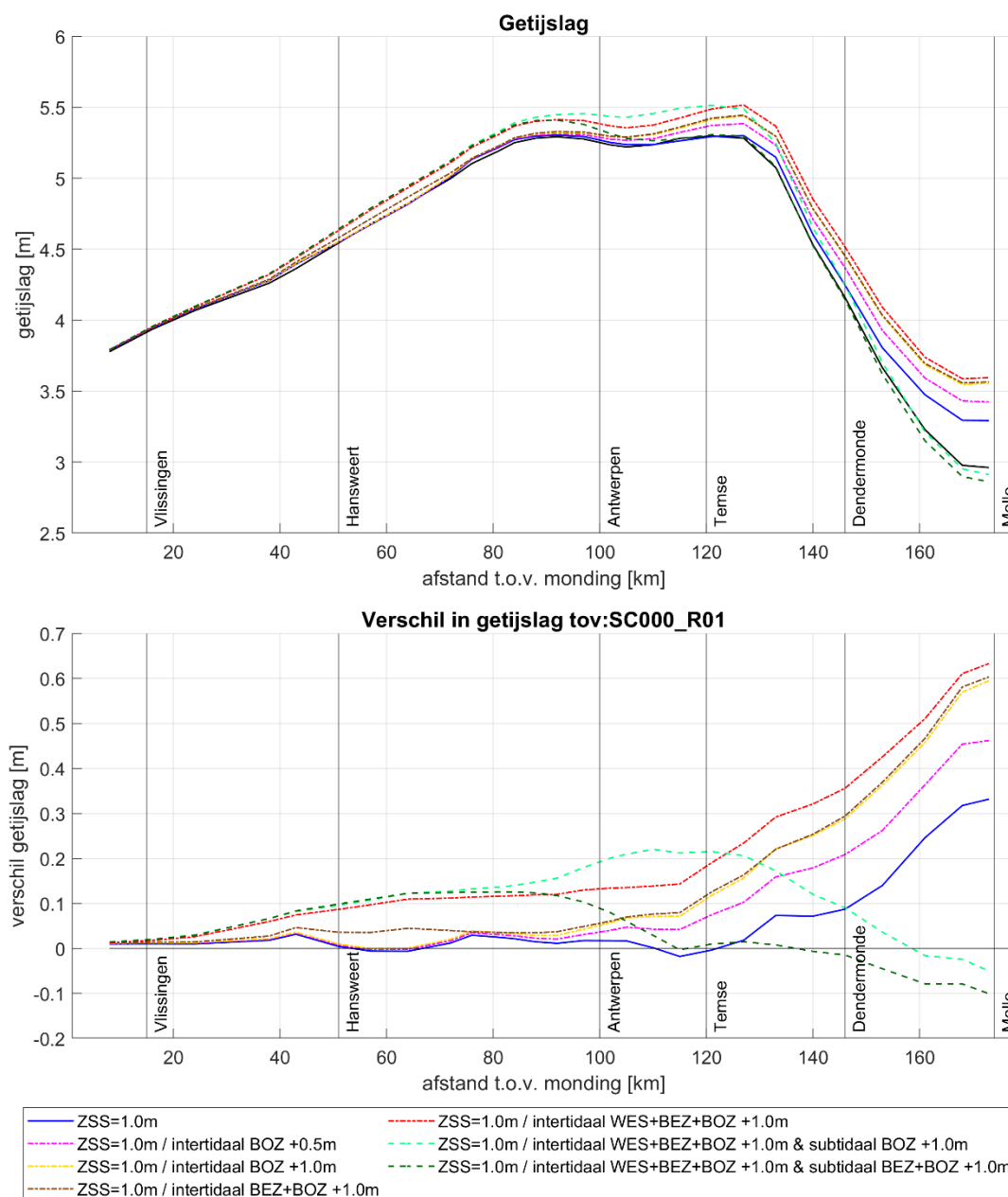
Opvallend is dat het meegroeien van het *intertidaal* in de Beneden-Zeeschelde slechts een marginaal effect heeft op de getijslag. Er is nauwelijks verschil tussen de modelresultaten van het scenario waarin het intertidaal in de Boven-Zeeschelde meegroeit en de modelberekening waarin het intertidaal in de volledige Zeeschelde meegroeit (Figuur 24 onder, verschil tussen gele en bruine lijn).

Het meegroeien van de intergetijdengebieden in de Westerschelde heeft daarentegen wel een versterkend effect op de getijslag in het gehele estuarium. Dit kan mogelijk gerelateerd worden aan het beperkte gewicht van de Beneden Zeeschelde in het systeem (10% van de totale oppervlakte, zie Figuur 19) samen met het relatief beperkt gewicht van intertidaal in de Beneden Zeeschelde (28%, in vergelijking met 49% in de Boven Zeeschelde, zie Figuur 20).

Uit de meegroeiscenario's volgt tot slot dat de diepteligging van de *geulen* in de Zeeschelde zeer belangrijk is voor de toekomstige ontwikkeling van de getijslag (Figuur 24 lichtgroene en donkergroene lijn). In de scenario's waarin de bodemligging van de geul ook 100% meegroeit met de zeespiegelstijging, en de waterdiepte in de geul dus niet significant toeneemt, is de toename van de getijslag in de Boven-Zeeschelde meer beperkt. Aan de opwaartse rand is in deze berekeningen zelfs sprake van een kleine afname. Hierbij wordt opgemerkt dat het 100% meegroeien van intertidaal en subtidaal in het gehele estuarium de facto neerkomt op de huidige situatie die in de referentieberekening wordt gesimuleerd.



Figuur 23 – Gemiddelde getijslag in scenario's met 30cm (dash-dot), 100cm (dash) of 200cm (dot) zeespiegelstijging, mét (rood) en zonder (blauw) meegroeien van slikken en schorren en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 (zwart).



Figuur 24 – Gemiddelde getijslag in verschillende morfologische meegroeiscenario's met 100cm zeespiegelstijging en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 (zwart).

4.2.2 Hoogwaters

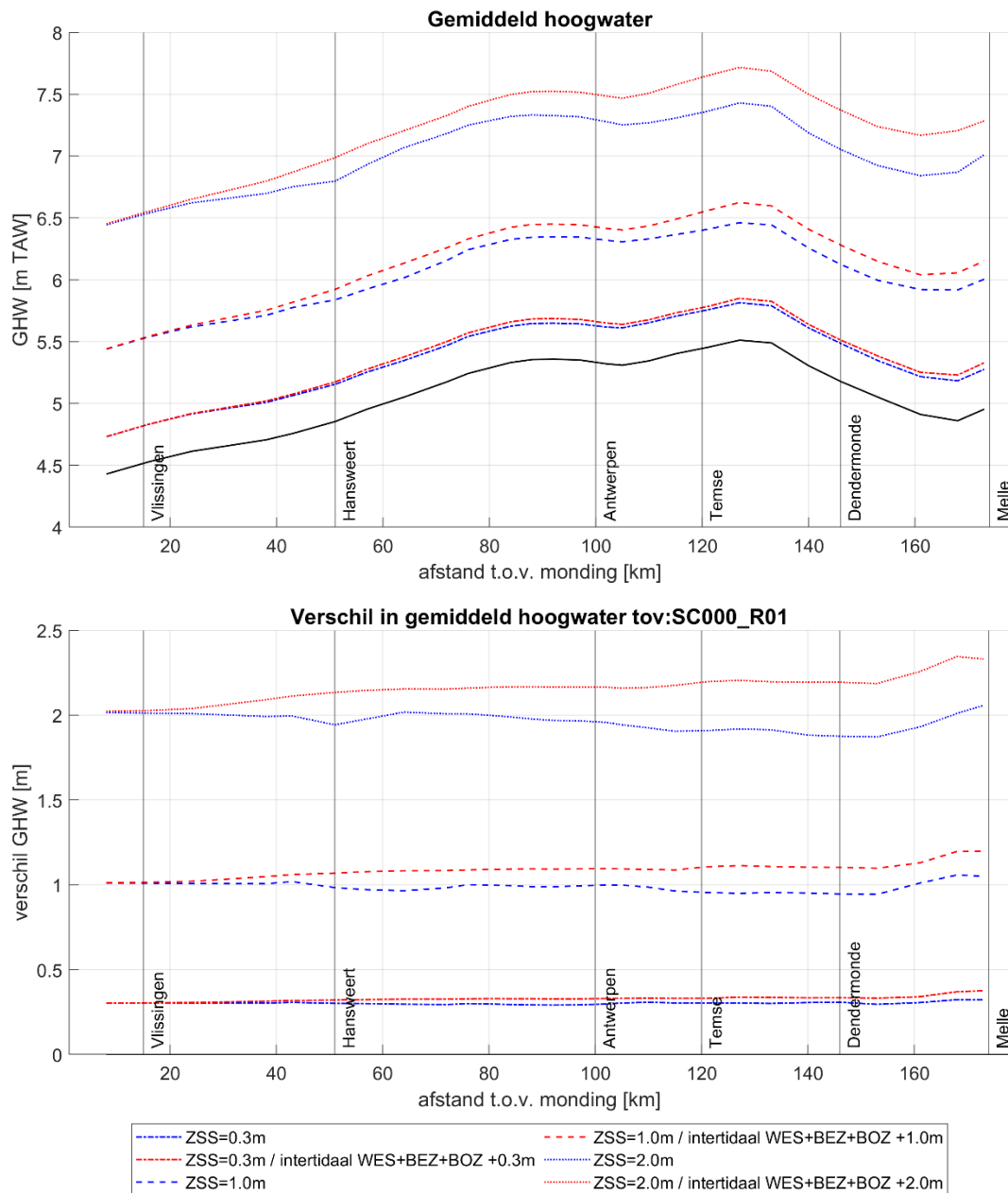
Het effect van een zeespiegelstijging van 30 cm, 100 cm en 200 cm en het meegroeien van de intergetijdengebieden op het gemiddelde hoogwaterniveau langs het estuarium wordt getoond in Figuur 25. Figuur 26 toont de invloed op het hoogwaterniveau voor de verschillende morfologische meegroeiscenario's bij een zeespiegelstijging van 100 cm.

Aan de afwaartse rand van het estuarium is de impact van de modelscenario's op de gemiddelde hoogwaterniveaus gelijk aan de zeespiegelstijging zelf. Als de intergetijdengebieden meegroeien met de zeespiegel is de toename van het hoogwaterniveau richting opwaarts iets groter dan de zeespiegelstijging.

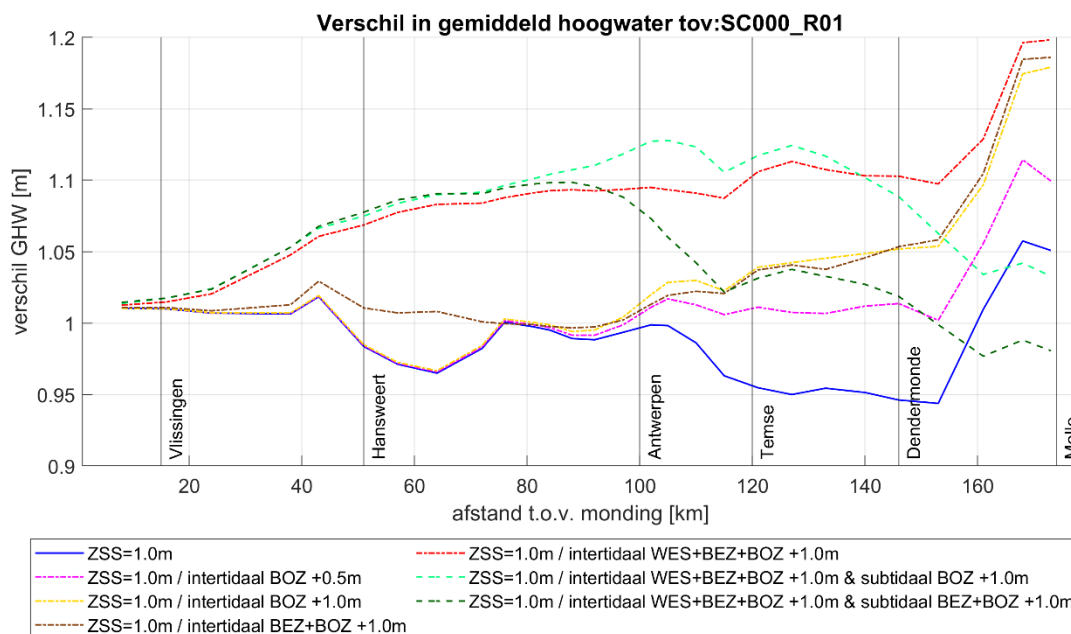
Afhankelijk van het morfologisch meegroeiscenario betreft dit bij +1 m zeespiegelstijging tot 20 cm extra toename van het gemiddeld hoogwaterniveau. Bij een zeespiegelstijging van +2 m is extra toename tot 30 cm en bij een zeespiegelstijging van +30 cm betreft het maximaal enkele centimeters extra.

Als het intertidaal niet meegroeit is de toename van de hoogwaters in een groot deel van het estuarium juist iets minder sterk dan de stijging van de zeespiegel, al blijft het verschil ten opzichte van de stijging van de zeespiegel beperkt tot enkele cm. Dit kan verklaard worden door de extra komberging boven slik en schor in deze situaties.

In de modelscenario's waarin het subtidaal in de Zeeschelde eveneens meegroeit met de zeespiegelstijging (lichtgroen en donkergroen op Figuur 26) neemt de impact van het meegroeien van de intergetijdengebieden op de hoogwaterniveaus in opwaartse richting weer af. Het verschil tussen de verschillende morfologische meegroeiscenario's bedraagt zodoende +/- 20 cm bij een zeespiegelstijging van +1 m. Hierbij wordt opgemerkt dat er geen scenario's zijn uitgevoerd waarin de geulen verder uitdiepen. In theorie zou dit tot een groter effect kunnen leiden.



Figuur 25 – Gemiddeld hoogwaterniveau in scenario's met 30cm (dash-dot), 100cm (dash) of 200cm (dot) zeespiegelstijging, mét (rood) en zonder (blauw) meegroeien van slikken en schorren en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 (zwart).



Figuur 26 – Verschil in gemiddeld hoogwaterniveau in verschillende morfologische meegroeiscenario's met 100cm zeespiegelstijging t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 (zwart).

4.2.3 Laagwaters

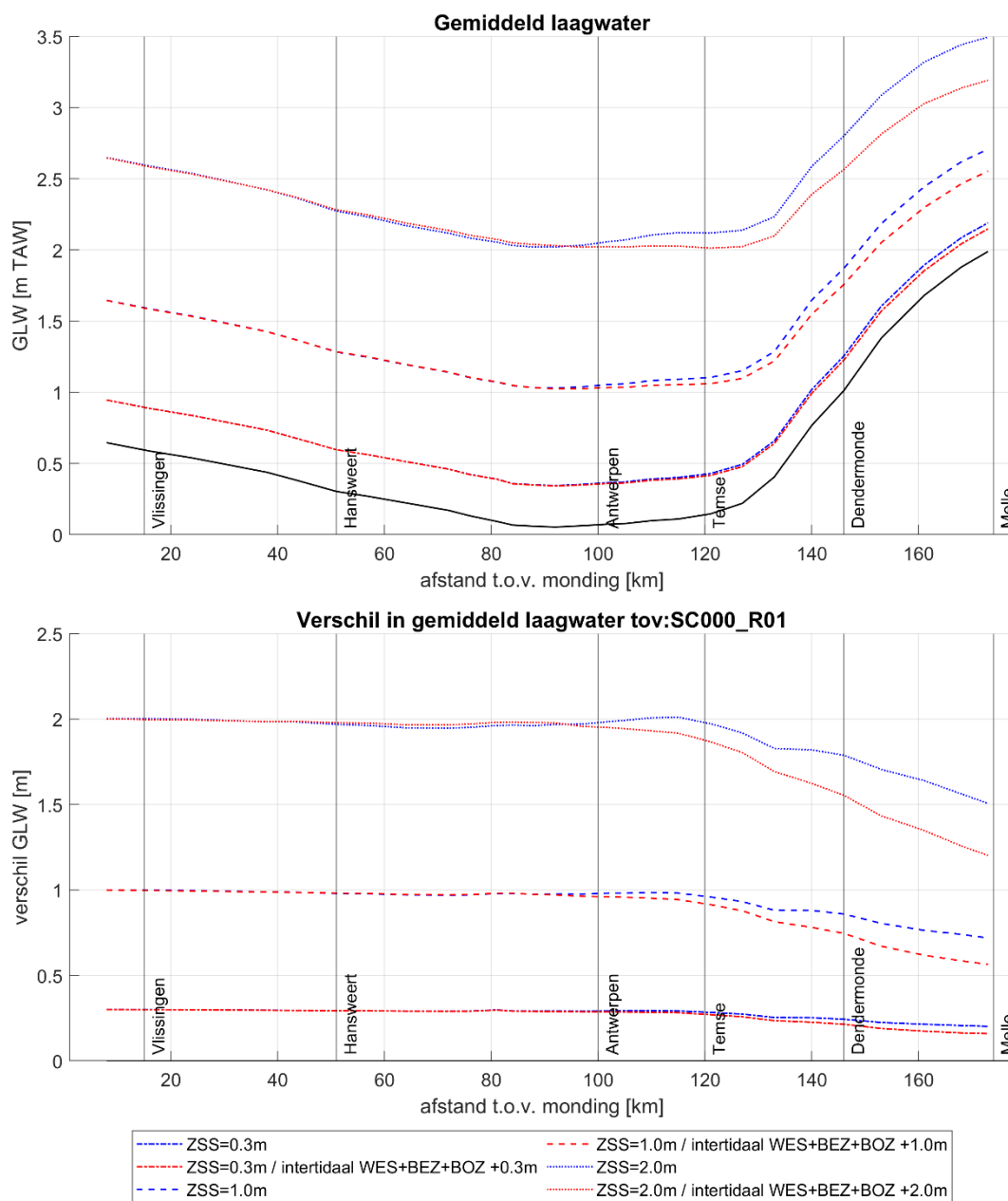
Het effect van zeespiegelstijging en het meegroeien van de intergetijdengebieden op het gemiddelde laagwaterniveau langs het estuarium wordt getoond in Figuur 27. In Figuur 28 wordt de impact op de laagwaters getoond voor de verschillende morfologische meegroeiscenario's bij 100 cm zeespiegelstijging.

In de Westerschelde en Beneden-Zeeschelde is het effect van de verschillende modelscenario's op het laagwaterniveau opnieuw gelijk aan de zeespiegelstijging, maar in de Boven-Zeeschelde is de impact anders. Opwaarts van Temse is de stijging van de laagwaterniveaus namelijk minder groot dan de zeespiegelstijging, wat neerkomt op een relatieve daling van de laagwaters. Bij een zeespiegelstijging van +1 m neemt deze stijging af van +1 m bij Temse naar +0,6 á +0,7 m aan de bovenstroomse rand. Dit betekent dat de grotere getijslag die in de Boven-Zeeschelde wordt gesimuleerd grotendeels kan worden gerelateerd aan een relatieve daling van de laagwaters (t.o.v. gemiddeld waterniveau na zeespiegelstijging).

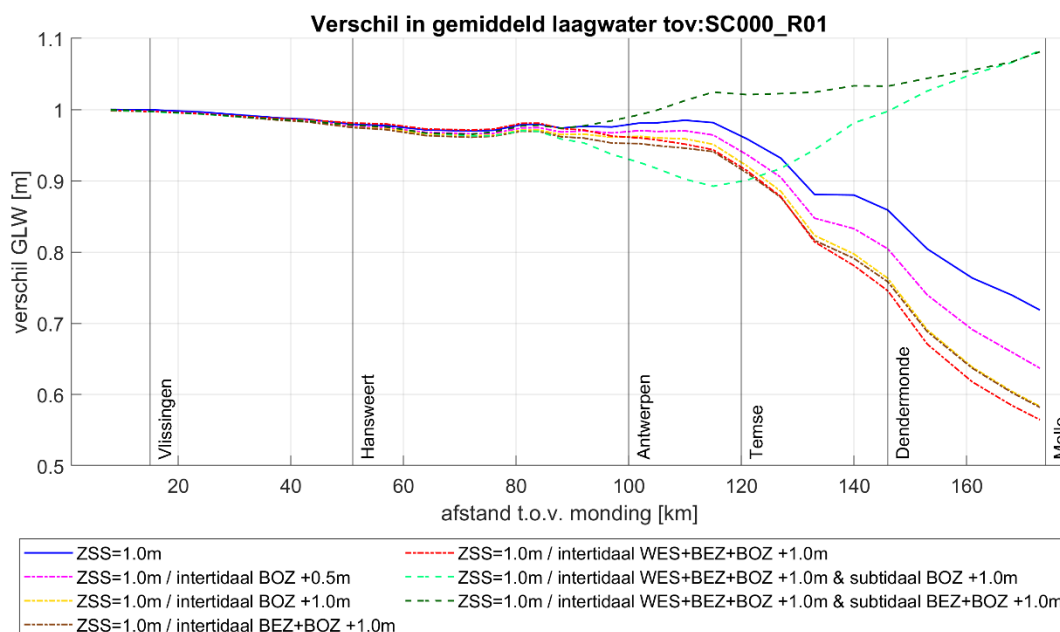
Naast de zeespiegelstijging zelf hebben de morfologische meegroeiscenario's ook een significante invloed op de laagwaters. In de Boven-Zeeschelde variëren de veranderingen in laagwaterniveau met +/-15 cm door het meegroeien van het intertidaal, waarbij het meegroeien van het intertidaal leidt tot relatief lagere laagwaters ten opzichte van de situatie waarin deze niet meegroeit (roos geel en bruine lijnen in Figuur 28). Het effect van het al dan niet meegroeien van het intertidaal op de getijslag is dus gelijkaardig verdeeld over de hoogwaters en de laagwaters.

De bodemligging van het subtidaal heeft een veel sterkere impact op de verandering van de laagwaterniveaus (lichtgroen en donkergroen in Figuur 28). Als het subtidaal meegroeit met de zeespiegelstijging wordt het effect van het meegroeien van het intertidaal teniet gedaan. Dit is een logisch resultaat aangezien het volledige meegroeien van subtidaal en intertidaal met de zeespiegelstijging de facto neerkomt op de huidige situatie of referentiesituatie.

Samenvattend is de impact van de morfologische scenario's op het laagwaterniveau +/- 50 cm bij een zeespiegelstijging van +1 m. De grote impact van de geuldiepte op de laagwaters impliceert uiteraard dat het verder *uitdiepen* van de geulen potentieel zou kunnen leiden tot een nog verdere daling van de laagwaters en daarmee verdere toename van de getijslag. Dergelijke morfologische scenario's zijn echter niet uitgevoerd binnen dit rapport.



Figuur 27 – Gemiddeld laagwaterniveau in scenario's met 30cm, 100cm of 200cm zeespiegelstijging, mét en zonder meegroeien van slikken en schorren en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01.



Figuur 28 – Verschil in gemiddeld laagwaterniveau in verschillende morfologische meegroeiscenario's met 100cm zeespiegelstijging t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01.

4.2.4 Getijvertraging

Het effect van zeespiegelstijging en het meegroeien van de intergetijdengebieden op de getijvertraging of celeriteit van hoog- en laagwater (i.e., tijdsverschil tussen de hoog- en laagwaterniveaus in de monding en elders in het estuarium) wordt respectievelijk getoond in Tabel 4 voor HW en Tabel 5 voor LW. De getijvertraging is uitgedrukt in minuten. Het verschil met de referentiesimulatie SC000_R01 zonder zeespiegelstijging is tussen haakjes mee opgenomen in beide tabellen.

In Bijlages 2, 3 en 4 wordt de gesimuleerde getijvertraging aanvullend weergegeven voor de overige morfologische meegroeiscenario's.

In de zeespiegelstijgingsscenario's zonder morfologische veranderingen is de getijvertraging van de hoogwaters gelijkaardig aan de referentiesituatie. De verschillen blijven dan beperkt tot <10 min, zelfs bij een zeespiegelstijging van +2 m. Dit impliceert dat het versnellend effect op de hoogwatergolf door een toegenomen geuldiepte min of meer in evenwicht is met het vertragend effect door de toegenomen kombergingsvolumes op het intertidaal. In de modelscenario's waarin het intertidaal meegroeit is sprake van een versnelling van de hoogwatergolf. Bij een zeespiegelstijging van +30 cm is deze versnelling nog beperkt tot enkele minuten, maar bij een zeespiegelstijging van +1 m of +2 m loopt de versnelling op tot respectievelijk -26 min en -45 min aan de opwaartse rand (Tabel 4). Ook voor deze parameter geldt dat de effecten kleiner zijn als het subtidaal eveneens meegroeit met de zeespiegelstijging (zie Bijlages 2, 3 en 4).

Het effect van zeespiegelstijging op de voortplantingssnelheid of celeriteit van de laagwaters in het estuarium is altijd aanwezig, ook als de intergetijdengebieden niet meegroeien. Enkel in de scenario's met een kleine zeespiegelstijging van +30 cm blijft de versnelling van de laagwatergolf beperkt tot ongeveer 10 min. Bij een zeespiegelstijging van +1 m of +2 m neemt de getijvertraging van de laagwaters sterk af, i.e. tot respectievelijk -35 min en -64 min in Melle in de scenario's waarin het intertidaal meegroeit (Tabel 5). De sterkere invloed van zeespiegelstijging op de celeriteit van de laagwatergolf kan worden verklaard door de kleinere diepte bij laagwater. Het relatieve effect van zeespiegelstijging is daardoor groter.

Het gecombineerde effect op de celeriteit van de hoogwatergolf en de laagwatergolf resulteert in een netto invloed op de getij-asymmetrie (i.e., ratio dalingsduur en stijgingsduur). Dit effect wordt besproken in §4.4.

Tabel 4 – Getijvertraging HW t.o.v. monding voor scenario's met 30cm, 100cm of 200cm zeespiegelstijging, mét en zonder meegroeien van slikken en schorren en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01.

Station	SC000_R01	SC030_R01	SC030_R06	SC100_R01	SC100_R06	SC200_R01	SC200_R06
		ZSS+0.3m	ZSS+0.3m IGG+0.3m	ZSS+1m	ZSS+1m IGG+1m	ZSS+2m	ZSS+2m IGG+2m
Antwerpen	+01h46	+01h47 (-)	+01h44 (-3 min)	+01h50 (+4 min)	+01h36 (-10 min)	+01h47 (+1 min)	+01h28 (-18 min)
Temse	+02h42	+02h42 (-)	+02h38 (-4 min)	+02h37 (-5 min)	+02h30 (-12 min)	+02h37 (-5 min)	+02h19 (-23 min)
Dendermonde	+03h41	+03h40 (-1 min)	+03h36 (-5 min)	+03h41 (-)	+03h26 (-15 min)	+03h36 (-4 min)	+03h12 (-29 min)
Melle	+05h13	+05h08 (-5 min)	+05h04 (-9 min)	+05h10 (-3 min)	+04h47 (-26 min)	+05h04 (-9 min)	+04h26 (-47 min)

Tabel 5 – Getijvertraging LW t.o.v. monding voor scenario's met 30cm, 100cm of 200cm zeespiegelstijging, mét en zonder meegroeien van slikken en schorren en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01.

Station	SC000_R01	SC030_R01	SC030_R06	SC100_R01	SC100_R06	SC200_R01	SC200_R06
		ZSS+0.3m	ZSS+0.3m IGG+0.3m	ZSS+1m	ZSS+1m IGG+1m	ZSS+2m	ZSS+2m IGG+2m
Antwerpen	+01:56	+01:55 (-2 min)	+01:53 (-3 min)	+01:50 (-6 min)	+01:47 (-10 min)	+01:46 (-10 min)	+01:36 (-21 min)
Temse	+02:56	+02:53 (-3 min)	+02:52 (-4 min)	+02:48 (-7 min)	+02:42 (-14 min)	+02:42 (-14 min)	+02:28 (-28 min)
Dendermonde	+04:21	+04:17 (-4 min)	+04:14 (-7 min)	+04:09 (-12 min)	+04:02 (-19 min)	+03:57 (-24 min)	+03:41 (-40 min)
Melle	+06:12	+06:03 (-9 min)	+06:00 (-12 min)	+05:46 (-26 min)	+05:37 (-35 min)	+05:29 (-43 min)	+05:08 (-64 min)

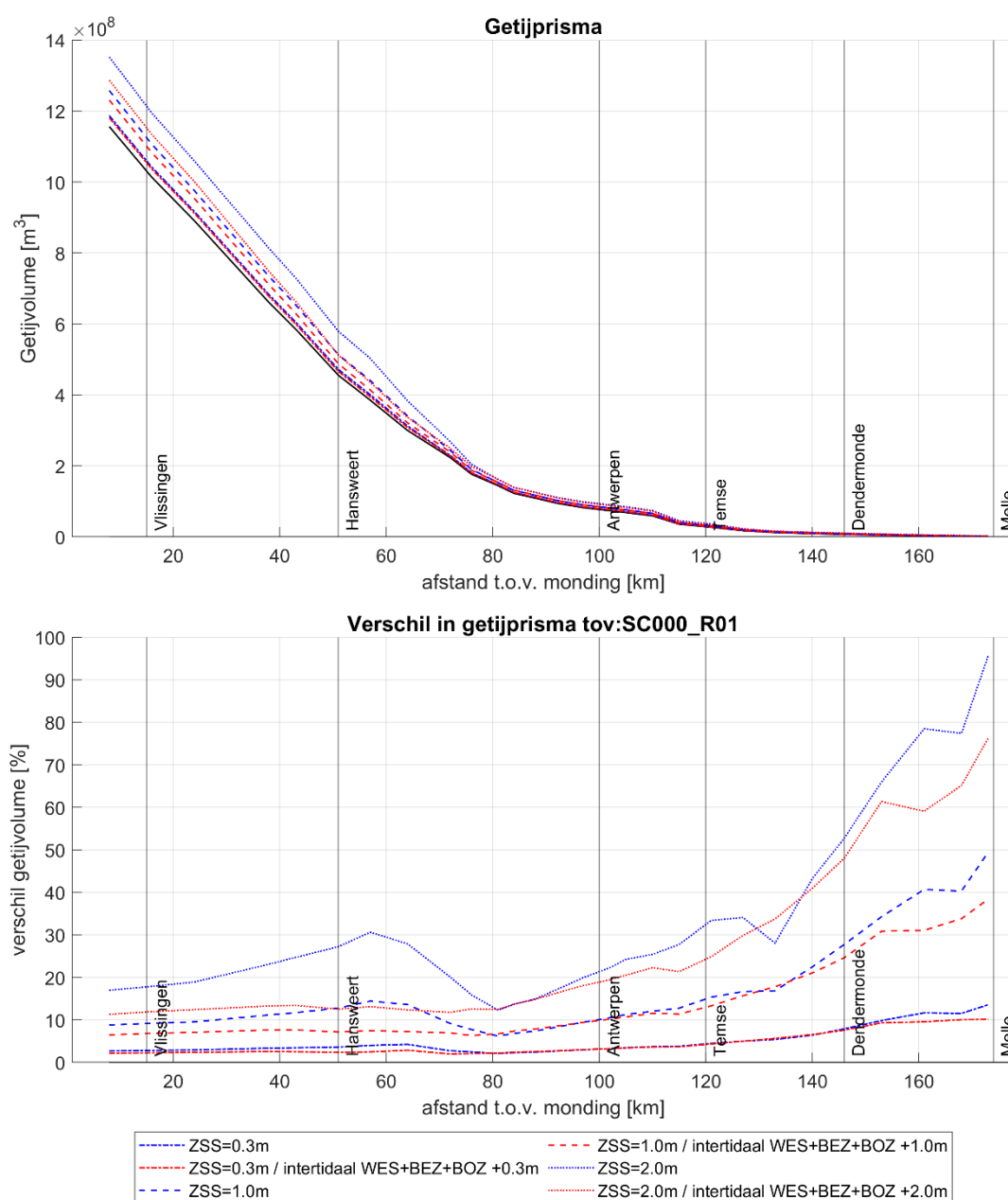
4.3 Getijprisma

Het gecombineerd effect van zeespiegelstijging en het meegroeien van de intergetijdengebieden op het getijprisma (berekend als het gemiddeld getijvolume tijdens vloed) wordt geïllustreerd in Figuur 29. Figuur 30 toont vervolgens de invloed op de getijslag voor verschillende meegroeiscenario's bij een zeespiegelstijging van 100 cm.

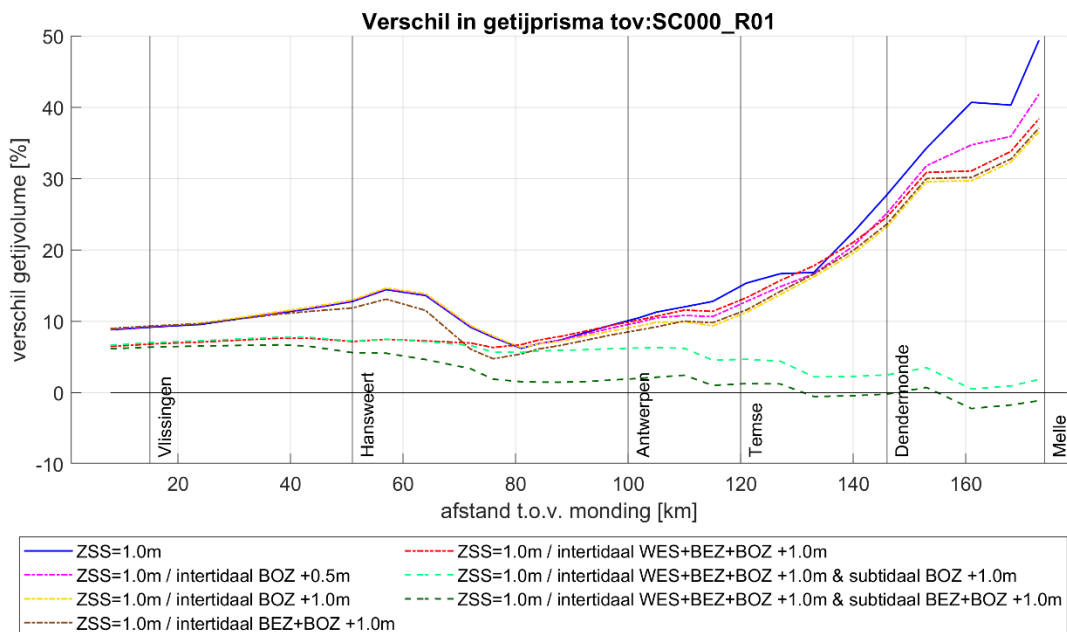
Het getijprisma op een bepaalde locatie langs het estuarium wordt bepaald door de komberging en de getijslag opwaarts van dat punt. Als gevolg van zeespiegelstijging neemt het getijprisma in het estuarium toe. De sterkte van deze toename hangt af van de zeespiegelstijging en van de morfologische ontwikkeling. Een sterkere zeespiegelstijging leidt logischerwijs tot een grotere toename van het getijprisma. Het meegroeien van de intergetijdengebieden leidt in de Boven-Zeeschelde (opwaarts van Dendermonde) tot een relatief kleiner getijprisma ten opzichte van het scenario zonder morfologische veranderingen. Ook het meegroeien van de geulen leidt tot een relatief kleiner getijprisma. Hierbij is het opvallend dat het meegroeien van het intertidaal leidt tot een verdere versterking van de getijslag in de Boven-Zeeschelde (§4.2.1), terwijl het getijprisma dus minder sterk toeneemt in deze meegroeiscenario's.

De kwantitatieve verschillen in getijprisma zijn groot tussen de zeespiegelstijgingsscenario's. Bij een zeespiegelstijging van +1 m nemen de getijvolumes in de Boven-Zeeschelde toe met +10% in Temse tot ongeveer +50% bij Melle, waarbij de exacte toename afhankelijk is van het morfologisch scenario. In de scenario's met een zeespiegelstijging van +2 m neemt het getijprisma in de Zeeschelde zelfs toe met respectievelijk +25% tot +95%, en dit dus afhankelijk van de locatie en het morfologisch scenario.

De modelresultaten laten verder zien dat het effect van de geuldiepte op het getijprisma eveneens groot is. Als het subtidaal namelijk meegroeit met de zeespiegelstijging wordt het effect van die zeespiegelstijging op het getijprisma in de Boven-Zeeschelde weer teniet gedaan. Dit effect werd ook al opgemerkt in de getijslag.



Figuur 29 – Gemiddeld getijprisma in scenario's met 30cm, 100cm of 200cm zeespiegelstijging, mét en zonder meegroeien van slikken en schorren en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01.



Figuur 30 – Verschil in gemiddeld getijprisma in morfologische meegroeiscenario's met 100cm zeespiegelstijging t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01.

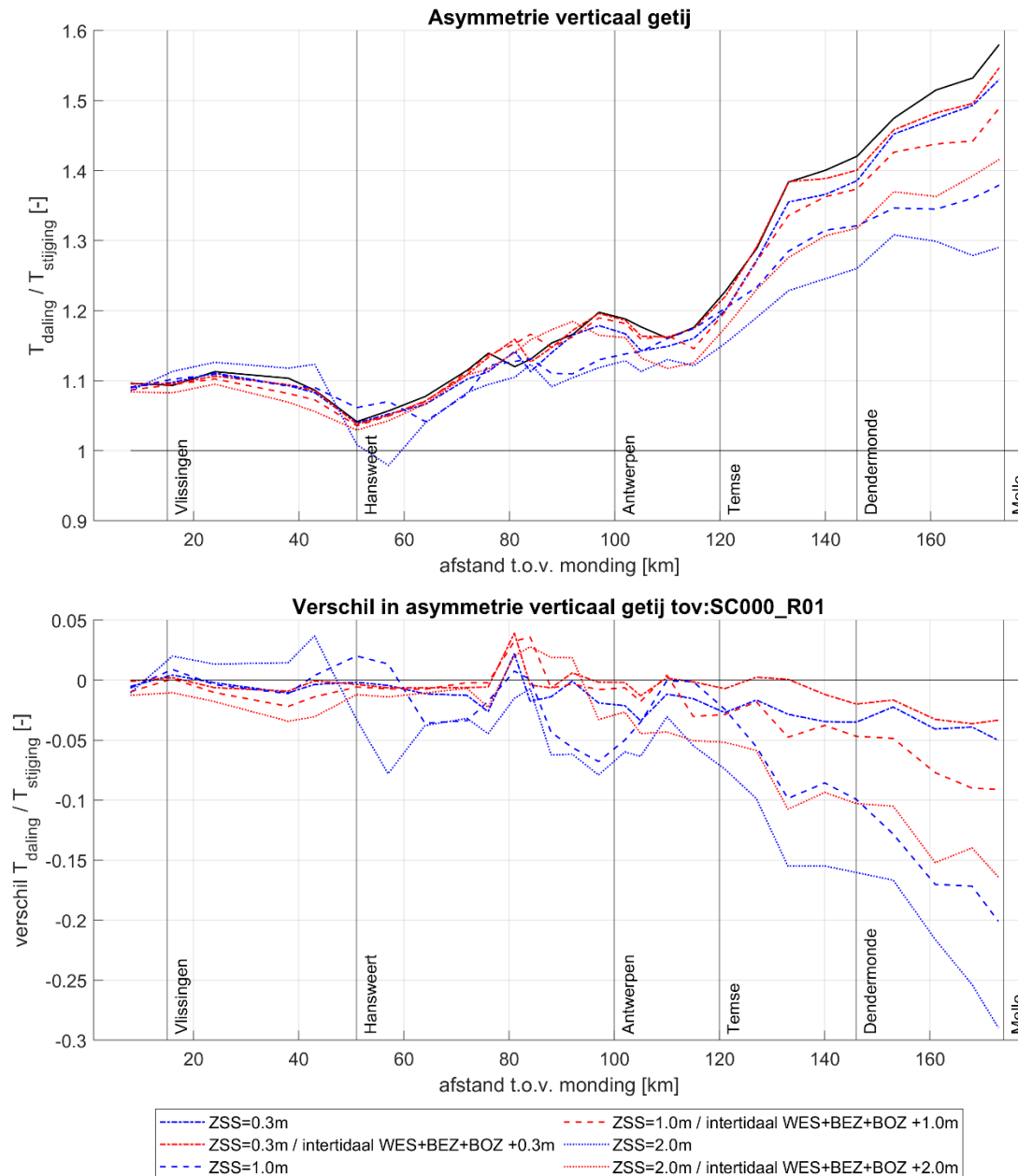
4.4 Getijasymmetrie

4.4.1 Verticale asymmetrie

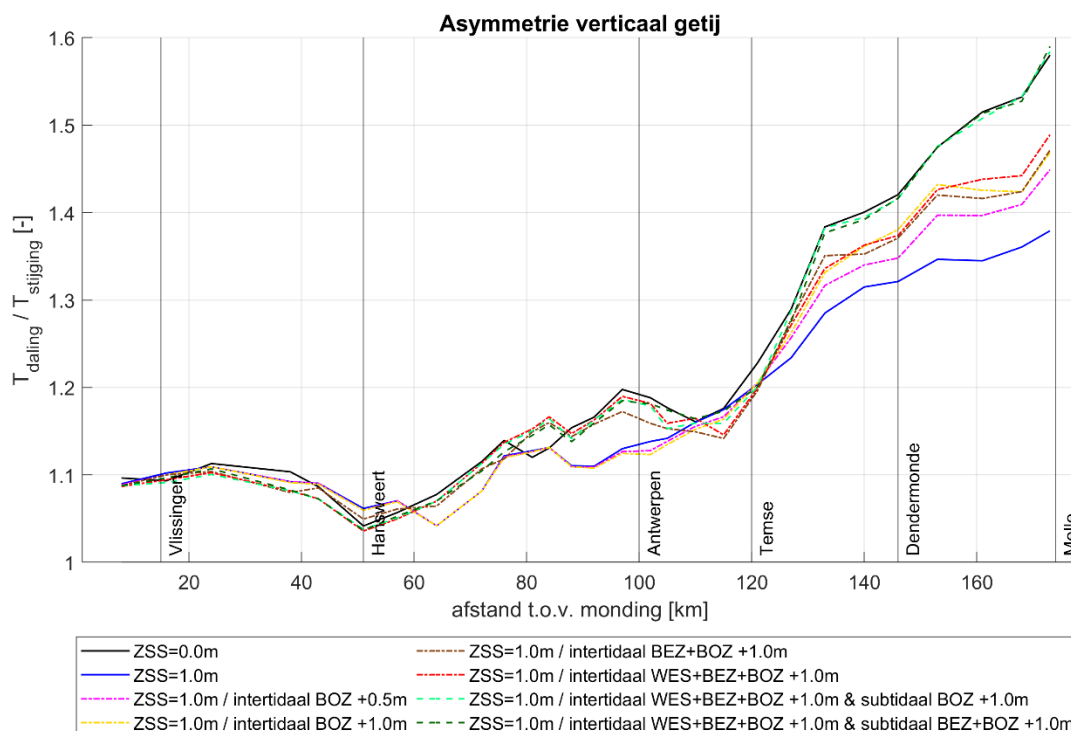
De verticale getij-asymmetrie, op basis van de verhouding tussen de dalingsduur en de stijgingsduur, wordt voor de verschillende zeespiegelstijgingen getoond in Figuur 31. De gesimuleerde verticale asymmetrie van het getij wordt in Figuur 32 getoond voor de meegroeiscenario's bij 100 cm zeespiegelstijging. Een ratio groter dan 1 duidt op een vloed-dominante asymmetrie met een kortere stijgingsduur en een ratio kleiner dan 1 duidt op een eb-dominante asymmetrie met een kortere dalingsduur.

In zowel de referentiesituatie als de verschillende scenario's is de stijgingsduur korter dan de dalingsduur in het volledige estuarium (ratio $T_{daling} / T_{stijging} > 1$). Dit duidt op een vloeddominante asymmetrie van het verticaal getij. Uit de verschilplot volgt dat zeespiegelstijging leidt tot een afname van deze vloeddominantie, waarbij de effecten opwaarts het grootst zijn. Op basis van de parameter $T_{daling} / T_{stijging}$ is echter geen sprake van ebdominantie. Deze verandering kan worden verklaard aan de hand van de eerder aangehaalde invloed op de celeriteit van de hoogwatergolf en de laagwatergolf. Doordat de celeriteit van de laagwatergolf door zeespiegelstijging en een grotere geuldiepte meer versnelt dan de hoogwatergolf neemt de stijgingsduur iets toe ten opzichte van de dalingsduur.

Het meegroeien van de intergetijdengebieden verkleint de afname van de vloeddominantie. Het verschil in intertidale komberging tussen scenario's met en zonder meegroeien van intergetijdengebieden vormt hier een verklarende factor. Als ook de geulen meegroeien met de zeespiegelstijging is er nauwelijks tot geen verschil in getij-asymmetrie met de referentiesituatie. Zoals eerder al aangehaald is dit een logisch resultaat aangezien het volledige meegroeien van subtidaal en intertidaal met de zeespiegelstijging de facto neerkomt op de referentiesituatie.



Figuur 31 – Asymmetrie op basis van ratio $T_{daling} / T_{stijging}$ in scenario's met 30cm (dash-dot), 100cm (dash) of 200cm (dot) zeespiegelstijging, mét (rood) en zonder (blauw) meegroeien van slikken en schorren en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 (zwart). Een ratio groter dan 1 duidt op een vloed-dominante asymmetrie (boven). Een negatief verschil duidt op een afname van vloeddominantie (onder)



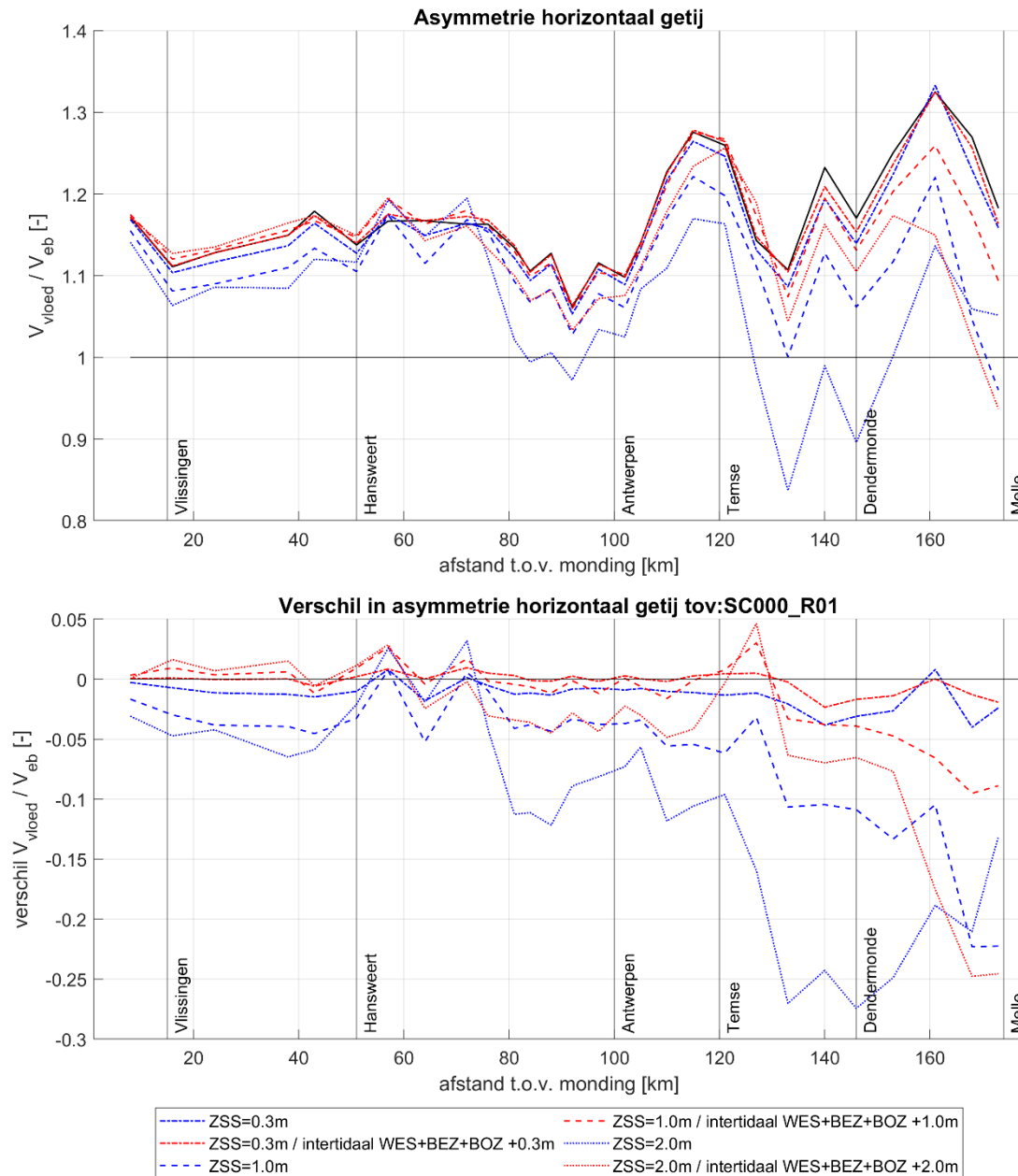
Figuur 32 – Asymmetrie op basis van ratio $T_{daling} / T_{stijging}$ in meegroeiscenario's met 100cm zeespiegelstijging.

4.4.2 Horizontale asymmetrie

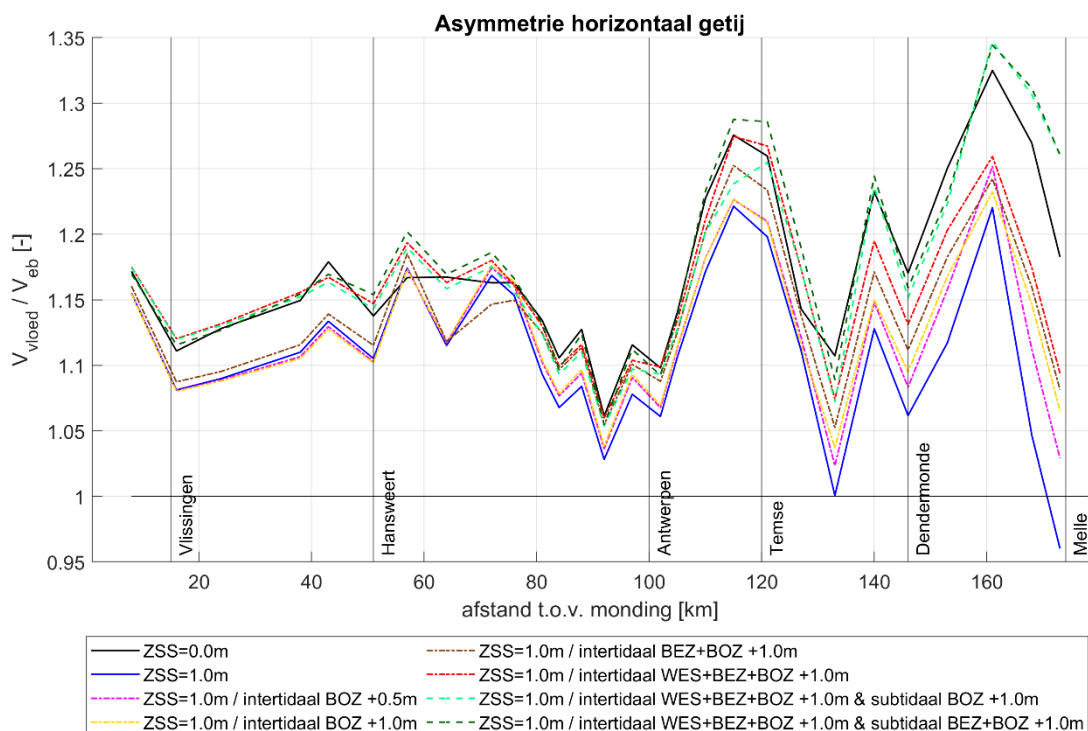
Ratio maximale vloed- en ebsnelheid

Figuur 33 geeft de asymmetrie tussen maximale vloodsnelheden en maximale ebsnelheden V_{vloed}/V_{eb} (beiden dwarssectie-gemiddeld) langs het estuarium weer voor modelsimulaties met verschillende zeespiegelstijging en met het al dan niet meegroeien van het intertidaal. De ratio wordt in Figuur 34 weergegeven voor de verschillende meegroeiscenario's bij 100 cm zeespiegelstijging. Een ratio groter dan 1 duidt op een vloed-dominante asymmetrie met sterkere maximum vloedpieken en een ratio kleiner dan 1 duidt op een eb-dominante asymmetrie met sterkere maximale ebpsnelheden.

In de referentiesimulatie, i.e. huidige situatie, zijn de maximale vloodsnelheden groter dan de maximale ebsnelheden, wat eveneens duidt op een vloeddominante asymmetrie van het getij. De ratio V_{vloed}/V_{eb} vertoont meer ruimtelijke variatie langs het estuarium doordat de dwarssectie gemiddelde snelheden ruimtelijk meer variëren dan de eerder getoonde stijgingsduur en dalingsduur. Net als bij de asymmetrie op basis van $T_{daling}/T_{stijging}$ neemt de ratio V_{vloed}/V_{eb} in algemene zin af in de zeespiegelstijgingsscenario's. Ook nu is de afname van de vloeddominantie sterker als de zeespiegelstijging groter is en minder sterk als de intergetijdengebieden of geulen mee ophogen. In enkele scenario's met +2 m zeespiegelstijging is lokaal zelfs sprake van een verandering naar ebdominantie, wat betekent dat de maximale ebsnelheden lokaal sterker zijn dan de maximale vloodsnelheden.



Figuur 33 – Asymmetrie op basis van ratio V_{vloed} / V_{eb} in scenario's met 30cm, 100cm of 200cm zeespiegelstijging, mét en zonder meegroeien van slikken en schorren en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01. Een ratio groter dan 1 duidt op vloeddominantie (boven). Een negatief verschil duidt op een afname van vloeddominantie (onder)

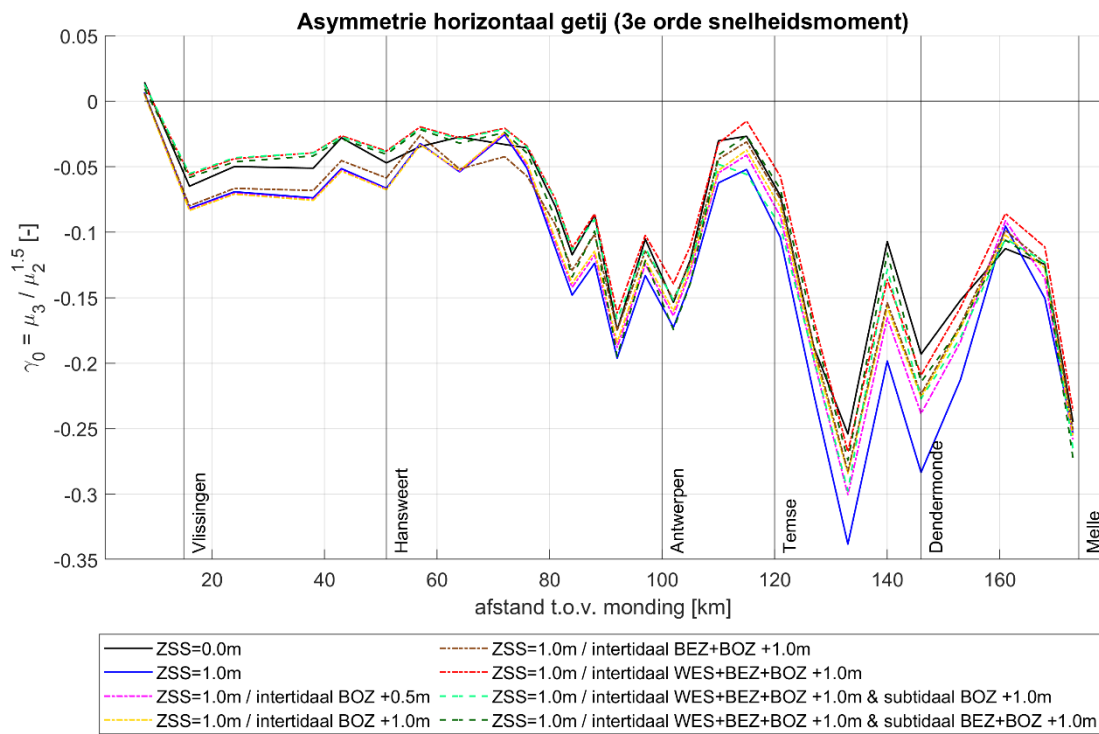


Figuur 34 – Asymmetrie op basis van ratio V_{vloed} / V_{eb} in meegroeiscenario's met 100cm zeespiegelstijging. Een ratio groter dan 1 duidt op vloeddominantie

Derde-orde snelheidsmoment

Het genormaliseerd derde-orde snelheidsmoment van de dwarssectie-gemiddelde snelheid, geïntegreerd over de volledige simulatieduur, wordt voor de zeespiegelstijgingsscenario's getoond in Figuur 35 en voor de morfologische meegroeiscenario's in Figuur 36. Positieve waarden duiden in deze figuren op vloeddominantie en negatieve waarden op ebdominantie.

In tegenstelling tot de ratio V_{vloed}/V_{eb} geeft $\gamma_0 = \bar{u}^3 / (\bar{u}^2)^{1.5}$ in de referentiesituatie en in de zeespiegelstijgingsscenario's, evenals in de verschillende morfologische meegroeiscenario's een ebdominante asymmetrie van het horizontaal getij in het gehele estuarium (i.e. $\gamma_0 < 0$). De impact van zeespiegelstijging en het al dan niet meegroeien van de intergetijdengebieden of subtidale geulen op de asymmetrie is wel gelijk aan de andere indicatoren voor getij-asymmetrie. Dit betekent dat ebdominantie toeneemt (cfr. vloeddominantie die afneemt) als gevolg van zeespiegelstijging (zonder morfologische verandering) en dat dit effect vermindert of zelfs teniet wordt gedaan in de meegroeiscenario's waarin het intertidaal mee ophoogt. Een verschil met de andere indicatoren voor getij-asymmetrie is dat er bij het derde-orde snelheidsmoment in sommige delen van het estuarium sprake is van een geringe toename van de vloeddominantie in de zeespiegelstijgingsscenario's waarin de intergetijdengebieden in het volledige estuarium meegroeien. De verschillen met het referentiescenario zijn echter beperkt.



Figuur 36 – Asymmetrie op basis van derde-orde snelheidsmoment (γ_0) in meegroeiscenario's met 100cm zeespiegelstijging. Negatieve waarden duiden op eb-dominantie

5 Conclusies

5.1 Effect van zeespiegelstijging en morfologische ontwikkeling op het getij in het Schelde estuarium

5.1.1 Amplificatie van het getij

De in dit rapport gepresenteerde modelresultaten bevestigen de eerdere bevindingen in Chu *et al.* (2020) dat zeespiegelstijging leidt tot een toename van de getijslag in het Schelde estuarium. De impact van zeespiegelstijging op getijslag is relatief beperkt in de Westerschelde en Beneden-Zeeschelde en neemt vooral opwaarts van Temse sterk toe. Bij een zeespiegelstijging van +1 meter kan de getijslag in de Boven-Zeeschelde toenemen met 20 tot 60 cm, afhankelijk van de morfologische ontwikkeling. Bij een zeespiegelstijging van +2 m kan de getijslag helemaal opwaarts in de Boven-Zeeschelde zelfs met +50 tot +110 cm toenemen afhankelijk van de morfologische ontwikkeling.

De invloed van het al dan niet meegroeien van de intergetijdengebieden op de getijslag is hierbij van eenzelfde orde grootte als de invloed van de zeespiegelstijging zelf. De grotere waterdiepte als gevolg van zeespiegelstijging vormt de belangrijkste verklaring voor de toename in getijslag (Dronkers, 1986; Friedrichs & Aubrey, 1988; Speer & Aubrey, 1985). Volledige meegroei van de slikken en schorren vergroot de getijslag verder, wat kan worden verklaard door een kleinere intertidale komberging.

Een opvallend resultaat is verder dat de hoogteligging van het intertidaal in de Beneden-Zeeschelde nauwelijks effect heeft op de getij-amplitudes, terwijl de hoogteligging van het intertidaal in de Boven-Zeeschelde en Westerschelde wel een significante invloed van enkele decimeters op de getijslag heeft.

De modelstudie laat ook zien dat het gelijktijdig meegroeien van de (subtidale) geulen in de Zeeschelde kan zorgen voor een minder sterke toename in getijslag. Dit is een logisch resultaat aangezien het volledig meegroeien van zowel subtidaal als intertidaal met de zeespiegelstijging de facto neerkomt op de (huidige) referentiesituatie.

De hoogwaterstanden stijgen sterker dan de zeespiegelstijging wanneer intertidale gebieden meegroeien. Bij een zeespiegelstijging van +1 meter kan de hoogwaterstand tot 20 cm extra stijgen (i.e., bovenop de ± 100 cm die door de zeespiegelstijging zelf wordt veroorzaakt), en bij +2 meter kan dit oplopen tot 30 cm extra. Dergelijke verschillen dienen mee in rekening te worden gebracht met het oog op veiligheid tegen overstromingen.

Voor de laagwaters, die van belang zijn voor de bevaarbaarheid, geldt dat de laagwaterstanden opwaarts minder sterk stijgen dan de zeespiegelstijging zelf. Bij een zeespiegelstijging van +1 meter zou de laagwaterstand in de Boven-Zeeschelde bijvoorbeeld slechts met 60 tot 70 cm stijgen.

5.1.2 Toename getijvolumes

Door zeespiegelstijging neemt het getijprisma in de Zeeschelde toe (voor de resultaten van getijprisma, zie bijlagen 2 tot 4). De toename varieert afhankelijk van de morfologische ontwikkeling van de intergetijdengebieden. Bij een zeespiegelstijging van 30 cm neemt het getijprisma toe met 5-10%, bij een zeespiegelstijging van 1 meter met 10-50%, en bij een zeespiegelstijging van 2 meter met 20-90%. Deze veranderingen impliceren significante verschillen in eb- en vloeddebieten, waarbij de grootste impact steeds in het opwaartse deel van het estuarium wordt waargenomen. Tot Antwerpen blijft de impact op deze parameter redelijk constant.

Het toekomstige getijprisma is afhankelijk van de combinatie van veranderingen in getijslag en veranderingen in de (intertidale) komberging. De verandering in komberging is uiteraard afhankelijk van het morfologisch scenario. Het meegroeien van het intertidaal betekent minder komberging, maar wel een hogere getijslag. Het netto effect van het meegroeien van het intertidaal is toch een afname van de getijvolumes ten opzichte van de situatie waarbij het intertidaal niet zou meegroeien.

De modelstudie laat zien dat het effect van de geuldiepte (subtidaal) op het getijprisma eveneens groot is. Het meegroeien van het subtidaal zou de verandering van het getijprisma bij zeespiegelstijging drastisch verminderen, omdat de waterdiepte dan kleiner is en de getijslag dan nauwelijks toeneemt. Echter, bij zeespiegelstijging zou een toename van het getijprisma juist eerder kunnen leiden tot een natuurlijke uitbreiding van de natte sectie (D'Alpaos *et al.*, 2010; Jarrett, 1976; O'Brien, 1931; Stive *et al.*, 2010). Een groter getijvolume door eenzelfde geulsectie impliceert immers hogere stroomsnelheden, die op lange termijn in het algemeen tot verdere verbreding en/of verdieping van de geulen leiden (uitschuring). Een dergelijke morfologische ontwikkeling vormt een potentieel risico, aangezien het uitschuren en verdiepen van de geulen op zijn beurt weer kan leiden tot een verdere toename in getijslag en getijvolumes. Het effect zou zichzelf dus via hydro-morfologische feedbackmechanismen kunnen versterken. Scenarioberekeningen waarin de bodemligging van het subtidaal is verdiept zijn echter niet uitgevoerd binnen deze studie.

5.1.3 Verandering getij-asymmetrie

Getij-asymmetrie vormt een indicator voor de richting en intensiteit van het (residuele) sedimenttransport in het estuarium. De verandering in de verhouding tussen de celeriteit van de hoog- en laagwatergolf door zeespiegelstijging vermindert de vloeddominantie en versterkt de ebdominantie. Zeespiegelstijging versnelt de voortplanting van het getij door de toegenomen waterdiepte. De versnelling van het getij kan afhankelijk van de mate van zeespiegelstijging en de morfologische ontwikkeling variëren van enkele minuten tot ongeveer een half uur bij +1 m zeespiegelstijging of zelfs bijna een uur bij +2 m zeespiegelstijging. De resultaten van de modelstudie zijn daarmee conform de hypothese die op basis van bestaande literatuur (e.g. Dronkers, 1986; Friedrichs & Aubrey, 1988; Speer & Aubrey, 1985) werd gesteld.

Modelscenario's waarin de intergetijdengebieden meegroeien met de zeespiegelstijging geven een minder sterk tot minimaal effect op getij-asymmetrie. De celeriteit van de hoogwaters versnelt minder dan de celeriteit van de laagwaters als de intergetijdengebieden niet meegroeien, wat kan worden verklaard door de toegenomen komberging ten opzichte van de huidige situatie (of de situatie waarin deze gebieden wél meegroeien).

Afhankelijk van de indicator voor asymmetrie die wordt geanalyseerd is de getijgolf in de referentiesituatie overigens vloeddominant (i.e., op basis van ratio tussen stijgingsduur- en dalingsduur of ratio tussen maximale vloed- en ebsnelheden) of ebdominant (op basis van de tijdsintegraal van het derde-orde snelheidsmoment). De trends die zeespiegelstijging en het meegroeien van het intertidaal veroorzaken zijn op basis van de verschillende indicatoren wel gelijkaardig.

De beschreven veranderingen in getij-asymmetrie hebben potentieel gevolgen voor de sedimentdynamiek, zoals een mogelijke toename van sedimentexport uit het estuarium. Voor de sedimentdynamica van fijn sediment spelen andere processen een rol, zoals de asymmetrie tussen de kenteringsfases bij hoog- en laagwater (Dronkers, 1986) of de ruimtelijke asymmetrie in stroomsnelheden (Dijkstra *et al.*, 2019).

6 Aanbevelingen

De impact van de morfologische ontwikkeling die gepaard gaat met zeespiegelstijging op de getijvoortplanting in het Schelde estuarium is groot. Het is belangrijk om deze effecten mee te nemen bij verder onderzoek binnen het Sigma3-programma. Toekomstige morfologische veranderingen kunnen leiden tot significante variaties in o.a. getijslag en getijvolumes, wat op zijn beurt invloed heeft op de getijhydrodynamica en sedimentdynamica binnen het estuarium. Het meenemen van deze effecten en onzekerheden in het Sigma3-onderzoek zal bijdragen aan een robuust en adaptief beheer van het estuarium, waardoor de risico's van ongewenste morfologische ontwikkelingen beter kunnen worden beheerst en de gewenste hydrodynamische en ecologische doelen kunnen worden bereikt.

6.1 Implicaties voor beheer

Verwachte getij-amplificatie

De verwachting van extra getij-amplificatie door zeespiegelstijging impliceert dat grootschalige maatregelen die het getij dempen binnen het Sigma3-programma noodzakelijk zullen zijn. Het voorkomen of tegengaan van een toename van de waterdiepte in de geul bij zeespiegelstijging (ophoging van het subtidaal) en het toevoegen van komberging zijn hierbij de meest voor de hand liggende oplossingsrichtingen.

Risico's van toename geuldiepte

Er bestaat een risico op toename van de geuldiepte door een potentieel zichzelf versterkend mechanisme, waarbij een toename van getijvolumes bij zeespiegelstijging leidt tot uitschuring en verdieping van de geulen. Dit kan worden meegenomen in het sedimentbeheer door sedimentonttrekkingen te beperken.

Hoogteligging intertidaal

Het al dan niet meegroeien van de intergetijdengebieden heeft een groot effect op de getijvoortplanting, waaronder de asymmetrie van de getijgolf. Het effect is tweeledig: het kombergingsvolume is lager bij hooggelegen intergetijdengebieden, maar hogere gebieden kunnen ook meer wrijving uitoefenen op het getij. Een mogelijke toekomstige beheerstrategie is om de hoogteligging van intergetijdengebieden slim te managen om de meest gewenste hydrodynamische effecten bij zeespiegelstijging te bereiken. Dit kan bijvoorbeeld door het meegroeien van intergetijdengebieden in strategisch gekozen locaties te stimuleren. Het is daarbij ook belangrijk om de ecologische waarde van deze gebieden te behouden en te versterken.

Sedimentbeschikbaarheid en sedimentvraag

Het beheer van sediment is cruciaal voor het behoud en de ontwikkeling van intergetijdengebieden onder zeespiegelstijging en eventueel zelfs voor het strategisch verondiepen van geulsecties om de negatieve effecten van zeespiegelstijging tegen te gaan. In de toekomst zal de sedimentbeschikbaarheid mogelijk onder druk komen te staan. Daarom is het belangrijk om in het sedimentbeheer een geïntegreerde aanpak te hanteren die zowel de toekomstige sedimentvraag als de sedimentbeschikbaarheid in acht neemt.

6.2 Suggesties voor vervolgonderzoek

Onderstaande suggesties voor vervolgonderzoek kunnen helpen om een beter begrip te krijgen van de complexe interacties binnen het estuariene systeem en om effectieve maatregelen te ontwikkelen binnen het Sigma3-programma.

6.2.1 Uitbreiding morfologische scenario's

Risico op verdere verdieping geulen

Op basis van de uitgevoerde modelstudie is het van belang om de impact van mogelijke verdieping van geulen verder te onderzoeken. De resultaten in §4.2.1 en §4.3 geven aan dat als de geul niet verdiept (morfostatisch), de getijamplitude (en dus het getijvolume) opwaarts zal toenemen. Morfologisch verwacht je echter dat een systeem waarin de getijvolumes toenemen, zal uitdiepen. Dit is relevant vanwege het risico op een zichzelf versterkend mechanisme, waarbij verdere verdieping leidt tot een toename van getijslag en getijvolumes, zeker als het netto sedimenttransport exporterend is.

Om meer inzicht te hebben op het effect van een (natuurlijke) uitdieping van de geulen stellen we voor om in een aanvullende gevoeligheidsanalyse additionele morfologische scenario's te definiëren waarin de geulen verder uitdiepen, ter aanvulling van de reeds beschouwde scenario's waarbij de geulen verondiepen onder SLR.

Meegroeiscenario's relateren aan sedimentbeschikbaarheid

Bij de definitie van een nieuwe set van meegroeiscenario's kan rekening worden gehouden met de sedimentbeschikbaarheid en/of gebruik worden gemaakt van een empirisch ophogingsmodel. Het doel is hierbij om te werken naar de meest waarschijnlijke of realistische scenario's die kunnen worden toegepast bij het onderzoeken van maatregelen binnen het Sigma3-programma.

Onderzoeken ruimtelijke variatie in meegroeiscenario's

Er zijn in de huidige modelstudie verschillen gevonden in de effecten van morfologische veranderingen tussen de Beneden-Zeeschelde en de Boven-Zeeschelde. Het is interessant om te onderzoeken in welke zones het meegroeien van intertidaal op basis van de hydrodynamische impact gewenst is (of juist niet). Dit kan het beheer van de verschillende gebieden langs het estuarium sturen. Specifiek kan worden onderzocht in welke zones het meegroeien van intergetijdengebieden de grootste impact op de getijslag en getijvolumes heeft.

Potentiële verandering in intertidaal areaal en volume

Het effect van veranderingen in komberging door het toevoegen van areaal intergetijdengebieden is nog niet onderzocht. Met oog op de te verwachten toename in getijslag lijkt het interessant om te onderzoeken waar en hoeveel intertidaal areaal gewenst is met het oog op reductie van de hoogwaterstanden.

Overigens zijn ook de veranderingen in de kombergingsvolumes in de huidige GGG's nog niet geanalyseerd voor de verschillende zeespiegelstijgingsscenario's. Het effect hiervan wordt echter kleiner verwacht in vergelijking met de kombergingsvolumes op slikken en schorren langsheen het estuarium.

6.2.2 Impact bij extreme hydrodynamische condities

Onderzoeken impact bij stormtij

De impact van zeespiegelstijging en het meegroeien van intergetijdengebieden op de voortplanting van stormtijen moet nog worden onderzocht. De efficiëntie voor het dempen van stormtij is waarschijnlijk anders dan bij een regulier springtij of gemiddeld tij, vanwege de grotere komberging op hoog intertidaal bij stormtij. Voor historisch opgetreden stormen is het Scaldis model voldoende gekalibreerd, voor synthetische (meer extreme) events is het 1D instrumentarium meer aangewezen.

Onderzoeken impact bij variabele bovenafvoer

De interactie met hoge bovenafvoer is in deze studie niet onderzocht, aangezien de huidige modelberekeningen enkel voor gemiddelde afvoercondities zijn uitgevoerd. Een beperkt aantal simulaties werden uitgevoerd in een masterthesis (De Vrij, 2025).

6.2.3 Doorvertaling effecten naar andere parameters

Zoutindringing

De toename van getijvolumes en getijslag kan leiden tot veranderingen in zoutindringing. De impact van zeespiegelstijging op zoutindringing werd reeds onderzocht door Smolders & Kaptein (2024), maar in deze studie werd geen rekening gehouden met morfologische veranderingen, zoals het meegroeien van de intergetijdengebieden.

Sedimentdynamica

Daarnaast kunnen er effecten zijn op sedimentdynamica, vooral in relatie tot sedimentvraag en sedimentbeschikbaarheid. Hierbij is de afweging tussen morfologische evoluties op basis van de huidige sedimentbeschikbaarheid en evoluties in deze beschikbaarheid op basis van de veranderende hydrodynamiek een uitdagend gegeven. Bovendien dient een onderscheid te worden gemaakt tussen zand en fijn sediment.

Referenties

- Bertels, J.; Van Goethem, S.; Michiels, S.; Boeckx, L.; Vereecken, H.; Deschamps, M.** (2024). Hydrologie bevaarbare waterlopen Vlaanderen: jaar 2023. Versie 4.0. *WL Rapporten*, PA026_7. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <https://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=395252>
- Chu, K.; Vanlede, J.; Smolders, S.; Decrop, B.; Mostaert, F.** (2020). Validation of North Sea models: sub report 2. The impact of sea level rise on hydrodynamics: North Sea and Scheldt estuary. Version 3.. *FHR reports*, 19_058_2. Flanders Hydraulics Research: Antwerp. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=334138>
- D'Alpaos, A.; Lanzoni, S.; Marani, M.; Rinaldo, A.** (2010). On the tidal prism-channel area relations. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* ISBN 0148-0227 115(1): 1–13. doi:10.1029/2008JF001243
- De Vrij, D.** (2025) Msc thesis: The impact of sea level rise, upstream discharges, and morphology on tidal propagation in the Scheldt estuary. University of Antwerp.
- De Meerleer, A.** (2023). MSc Thesis: The Impact of Morphology and of Sea Level Rise on Tidal Propagation in the Scheldt Estuary. University of Antwerp. 25 pp.
- Dijkstra, Y.M.; Schuttelaars, H.M.; Schramkowski, G.P.** (2019). Can the Scheldt river estuary become hyperturbid? *Ocean Dyn.* 69(7): 809–827. Available at: <https://dx.doi.org/10.1007/s10236-019-01277-z>
- Dronkers, J.** (1986). Tidal asymmetry and estuarine morphology. *Netherlands J. Sea Res.* ISBN 0077-7579 20(2–3): 117–131. doi:10.1016/0077-7579(86)90036-0
- Engelund, F.; Hansen, E.** (1967). A monograph on sediment transport in alluvial streams: Copenhagen. ISBN 9788578110796. doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- Fortunato, A.B.; Oliveira, A.** (2005). Influence of Intertidal Flats on Tidal Asymmetry. *J. Coast. Res.* ISBN 0749-0208n1551-5036 21(5): 1062–1067. doi:10.2112/03-0089.1
- Friedrichs, C.T.; Aubrey, D.G.** (1988). Non-linear Tidal Distortion in Shallow Well-Mixed Estuaries: a Synthesis. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* ISBN 0272-7714 27(6784): 521–545. doi:10.1016/0272-7714(90)90054-U
- Friedrichs, C.T.; Madsen, O.S.** (1992). Nonlinear diffusion of the tidal signal in frictionally dominated embayments. *J. Geophys. Res.* 97: 5637–5650. doi:10.1029/92JC00354
- Hervouet, J.-M.** (2007). Hydrodynamics of Free Surface Flows: Modelling with the finite element method. ISBN 9780470035580. 390 pp. doi:10.1002/9780470319628
- Jarrett, J.T.** (1976). Tidal Prism - Inlet Area Relationships: Vicksburg, MS, U.S. 55 pp. Available at: http://cirpteam.wes.army.mil/pubs/archive/GITI-Report_Number_3.pdf%5Cnpapers2://publication/uuid/6D807AAD-E847-4F87-A3C0-18A8F3AAAD73
- Lanzoni, S.; Seminara, G.** (2002). Long-term evolution and morphodynamic equilibrium of tidal channels. *J. Geophys. Res.* 107(C1). doi:10.1029/2000JC000468
- Li, C.; Schuttelaars, H.M.; Roos, P.C.; Damveld, J.H.; Gong, W.; Hulscher, S.J.M.H.** (2016). Influence of retention basins on tidal dynamics in estuaries: Application to the Ems estuary. *Ocean Coast. Manag.* 134: 216–225. doi:10.1016/j.ocecoaman.2016.10.010
- Meyer-Peter, E.; Müller, R.** (1948). Formulas for bed load transport, *in*: (1948). *Proceedings of the 2nd Congress IAHR, Stockholm, vol. 2.* pp.39–64
- Nidzieko, N.J.; Ralston, D.K.** (2012). Tidal asymmetry and velocity skew over tidal flats and shallow channels within a macrotidal river delta. *J. Geophys. Res. Ocean.* ISBN 0148-0227 117(3): 1–17.

doi:10.1029/2011JC007384

O'Brien, M.P. (1931). Estuary and tidal prisms related to entrance areas. *Civ. Eng.* 1(8): 738–739

openTelemac. (2023). Telemac-3D UserManual - Version v8p5. pp.113

Roos, P.C.; Schuttelaars, H.M. (2015). Resonance properties of tidal channels with multiple retention basins: role of adjacent sea. *Ocean Dyn.* ISBN 1023601508 65(3): 311–324. doi:10.1007/s10236-015-0809-y

Schramkowski, G.; Kaptein, S.J. (2023). Effecten van zeespiegelstijging in de Schelde: deelrapport 3. iFlow-simulaties van getij en sediment. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 19_058_3. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <https://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=363118>

Smolders, S.; Kaptein, S.J. (2024). Saliniteitsgradiënt in het Schelde-estuarium: deelrapport 2. Scenario analyse numerieke modellering. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 19_081_2. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <https://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=395768>

Smolders, S.; Maximova, T.; Vandenbruwaene, W.; Coen, L.; Vanlede, J.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2017). Integraal Plan Bovenzeesche: deelrapport 5. Scaldis 2050. versie 4.0. *FHR reports*, 13_131_5. Flanders Hydraulics Research: Antwerp. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=286390>

Smolders, S.; Maximova, T.; Vanlede, J.; Teles, M.J. (2014). Implementation of controlled reduced tide and flooding areas in the TELEMAC 3D model of the Scheldt Estuary, *in*: (2014). *Proceedings of the 21st TELEMAC-MASCARET User Conference*: Grenoble, France. pp.8

Speer, P.E.; Aubrey, D.G. (1985). A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems Part II: Theory. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* ISBN 0272-7714 21(2): 207–224. doi:10.1016/0272-7714(85)90097-6

Stark, J. (2016). Effects of intertidal ecosystems on estuarine hydrodynamics and flood wave attenuation: a multi-scale study. University of Antwerp. 166 pp.

Stark, J.; Smolders, S.; Meire, P.; Temmerman, S. (2017). Impact of intertidal area characteristics on estuarine tidal hydrodynamics: A modelling study for the Scheldt Estuary. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 198: 138–155. doi:10.1016/j.ecss.2017.09.004

Stark, J.; Smolders, S.; Vandenbruwaene, W.; Mostaert, F. (2020). Agenda for the Future – Historical evolution of tides and morphology in the Scheldt Estuary: Sub report 4. Hydrodynamic modelling of morphological scenarios. Version 3.. *FHR reports*, 14_147_4. Flanders Hydraulics Research: Antwerp. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=322162>

Stive, M.J.F.; Ji, L.; Brouwer, R.L.; van de Kreeke, J.; Ranasinghe, R. (2010). Empirical relationship between inlet cross-sectional area and tidal prism: a re-evaluation, *in*: (2010). *Coastal Engineering Proceedings*. pp.1–10

Van Rijn, L.C. (2007). Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. I: Initiation of Motion, Bed Roughness, and Bed-Load. *J. Hydraul. Eng.* 133(6): 649–667

Vanlede, J.; Nazarali, M.; Smolders, S. (2025). SCALDIS 2020: a 3D hydrodynamic model of the Scheldt Estuary - Calibration report: Antwerp

Van Ryckegem, G.; Vanoverbeke, J.; Van de Meutter, F.; Vandevoorde, B.; Mertens, W.; Mertens, A.; Van Braeckel, A.; Smeekens, V.; Thibau, K.; Bezdenjesnji, O.; Buerms, D.; De Regge, N.; Hessel, K.; Lefranc, C.; Soors, J.; Van Lierop, F. (2022). MONEOS - Geïntegreerd datarapport INBO: Toestand Zeeschelde 2021. Monitoringsoverzicht en 1ste lijnsrapportage Geomorfologie, diversiteit Habitats en diversiteit Soorten. Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2022 (Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2022 (26)). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel. DOI: 10.21436/inbor.85928183

Wang, Z.B.; Jeuken, M.C.J.L.; Gerritsen, H.; De Vriend, H.J.; Kornman, B.A. (2002). Morphology and asymmetry of the vertical tide in the Westerschelde estuary. *Cont. Shelf Res.* ISBN 0278-4343 22(17): 2599–2609. doi:10.1016/S0278-4343(02)00134-6

Zhu, R.; Zhang, W.; Wei, X. (2025). Impact of Intertidal Habitats on Hydrodynamics in Tidally Energetic, Well-Mixed Estuaries. *J. Phys. Oceanogr.*: 1–71. doi:10.1175/JPO-D-23-0172.1

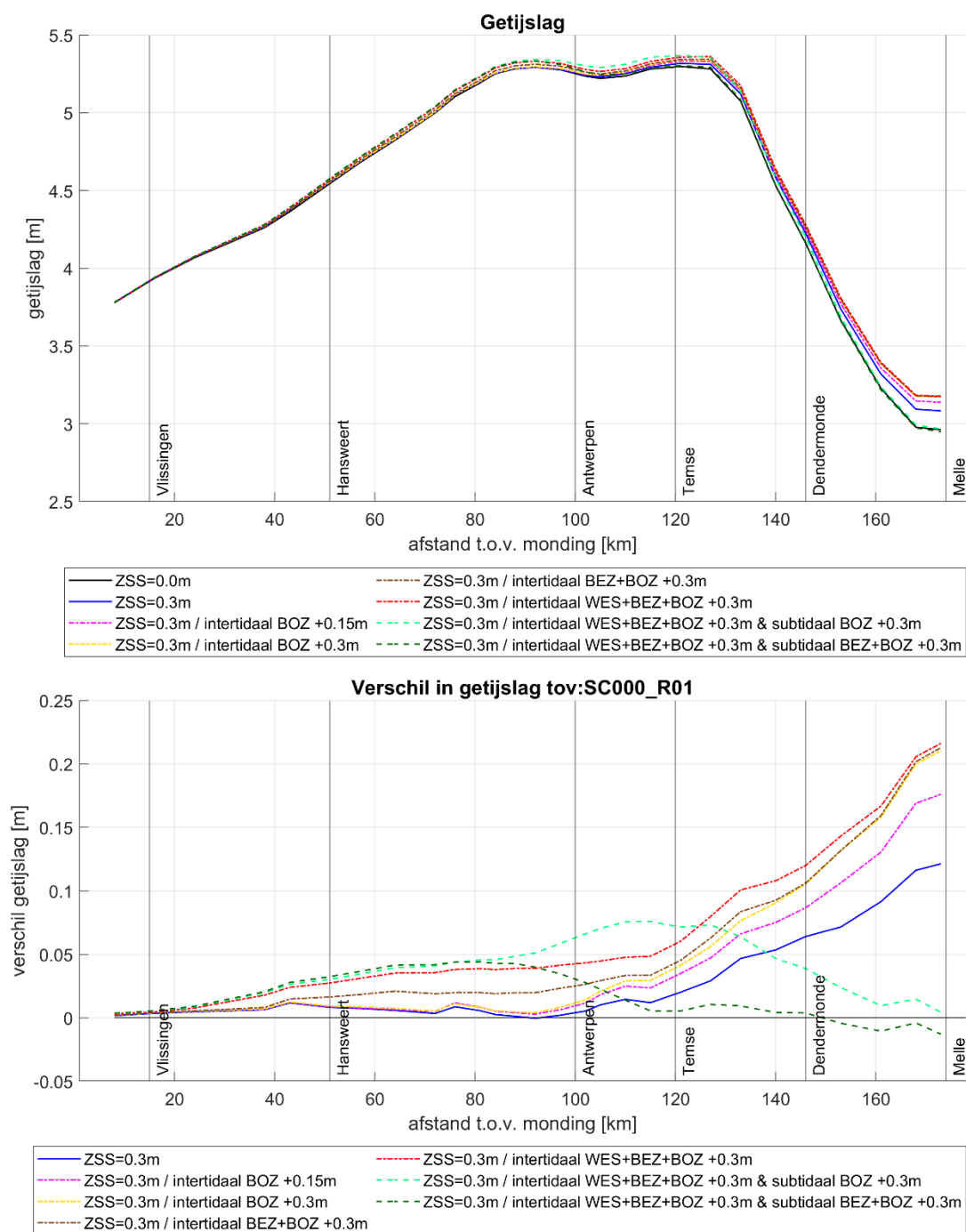
Bijlage 1 – Resultaat modelvalidatie

Tabel 6 – Representatie van het verticaal getij in de referentierun SC000_R01.

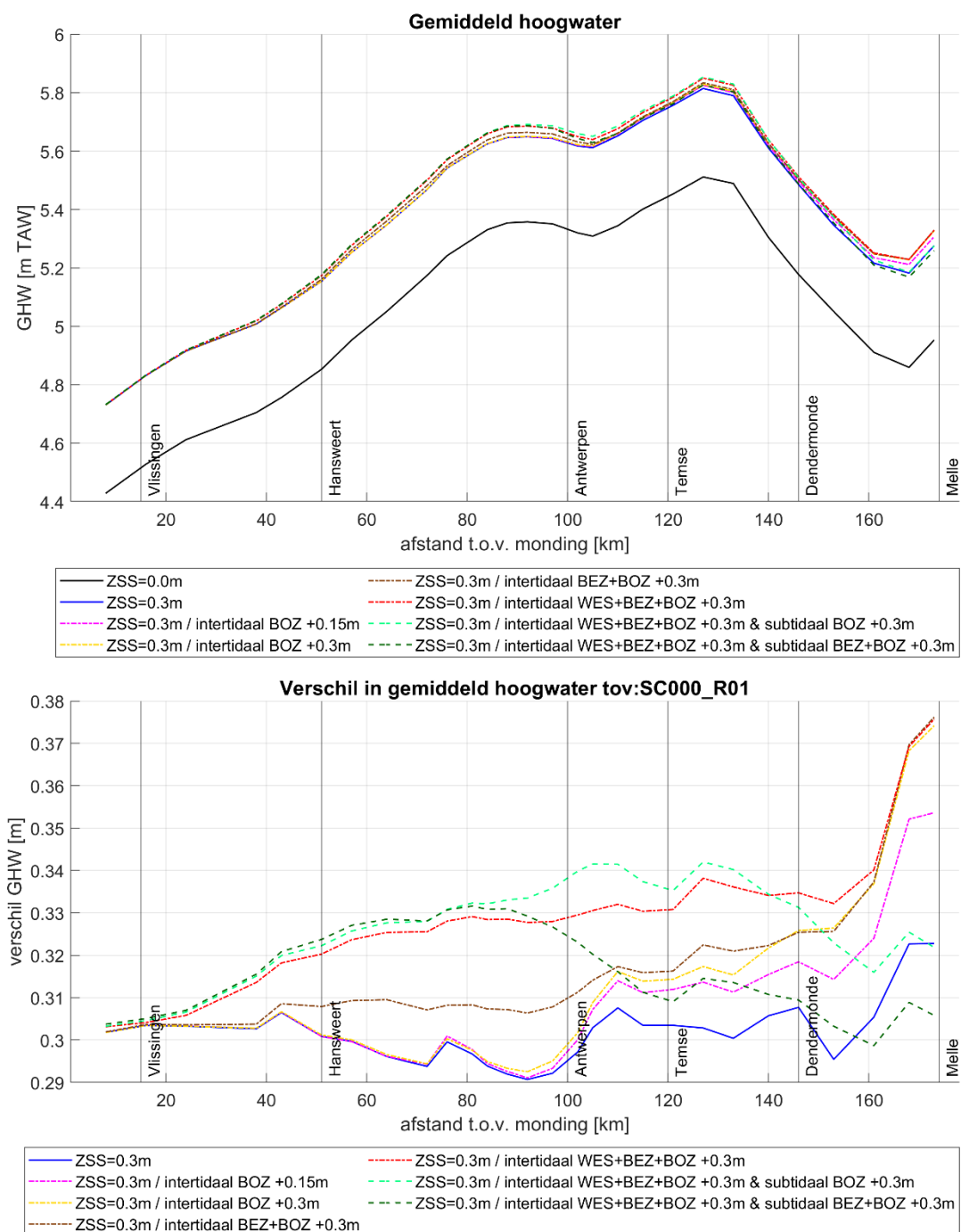
	Complete tijdreeks		HW			LW		
	BIAS [m]	RMSE [m]	BIAS [m]	RMSE [m]	BIAS [min]	BIAS [m]	RMSE [m]	BIAS [min]
Vlissingen	+0.01	0.03	+0.04	0.05	0	+0.01	0.02	-3
Breskens	-0.02	0.05	-0.01	0.02	-2	-0.01	0.02	-5
Borssele	+0.02	0.05	+0.06	0.07	-2	+0.02	0.02	-6
Terneuzen	-0.01	0.05	+0.06	0.07	-3	-0.04	0.05	-6
Overloop Hansweert	-0.02	0.06	+0.04	0.05	-10	-0.05	0.06	-5
Hansweert	-0.03	0.08	+0.04	0.06	-11	-0.06	0.07	-6
Walsoorden	-0.05	0.08	0.00	0.04	-7	-0.08	0.09	-6
Baalhoek	-0.03	0.07	+0.01	0.04	-6	-0.05	0.06	-7
Bath	0.00	0.07	+0.07	0.08	-3	-0.03	0.05	-6
Prosperpolder	+0.04	0.07	+0.11	0.11	+3	+0.02	0.04	-3
Liefkenshoek	+0.04	0.07	+0.13	0.14	+3	0.00	0.04	-4
Kallo	+0.02	0.06	+0.09	0.10	+4	+0.01	0.04	-2
Antwerpen	+0.02	0.08	+0.04	0.08	+4	+0.04	0.05	-2
Hemiksem	+0.06	0.10	-0.02	0.04	0	+0.10	0.11	-6
Temse	+0.07	0.10	-0.02	0.05	+2	+0.10	0.10	-7
Tielrode	+0.03	0.09	-0.08	0.10	+5	+0.07	0.08	-3
Driegoten	+0.01	0.08	-0.08	0.10	+4	+0.03	0.04	-6
St Amands	+0.04	0.09	-0.04	0.06	+3	+0.05	0.06	-5
Dendermonde	+0.06	0.11	-0.02	0.05	+3	+0.10	0.12	-4
Schoonaarde	+0.08	0.13	+0.01	0.06	0	+0.09	0.13	-4
Uitbergen	+0.10	0.15	+0.06	0.09	+1	+0.09	0.14	-4
Wetteren	+0.17	0.21	+0.18	0.21	0	+0.16	0.22	-2
Melle	+0.10	0.19	+0.09	0.15	-3	+0.11	0.22	0
Totaal	+0.03	0.10	+0.03	0.09	-1	+0.02	0.10	-5

Bijlage 2 – Modelresultaten scenario's +30 cm zeespiegelstijging

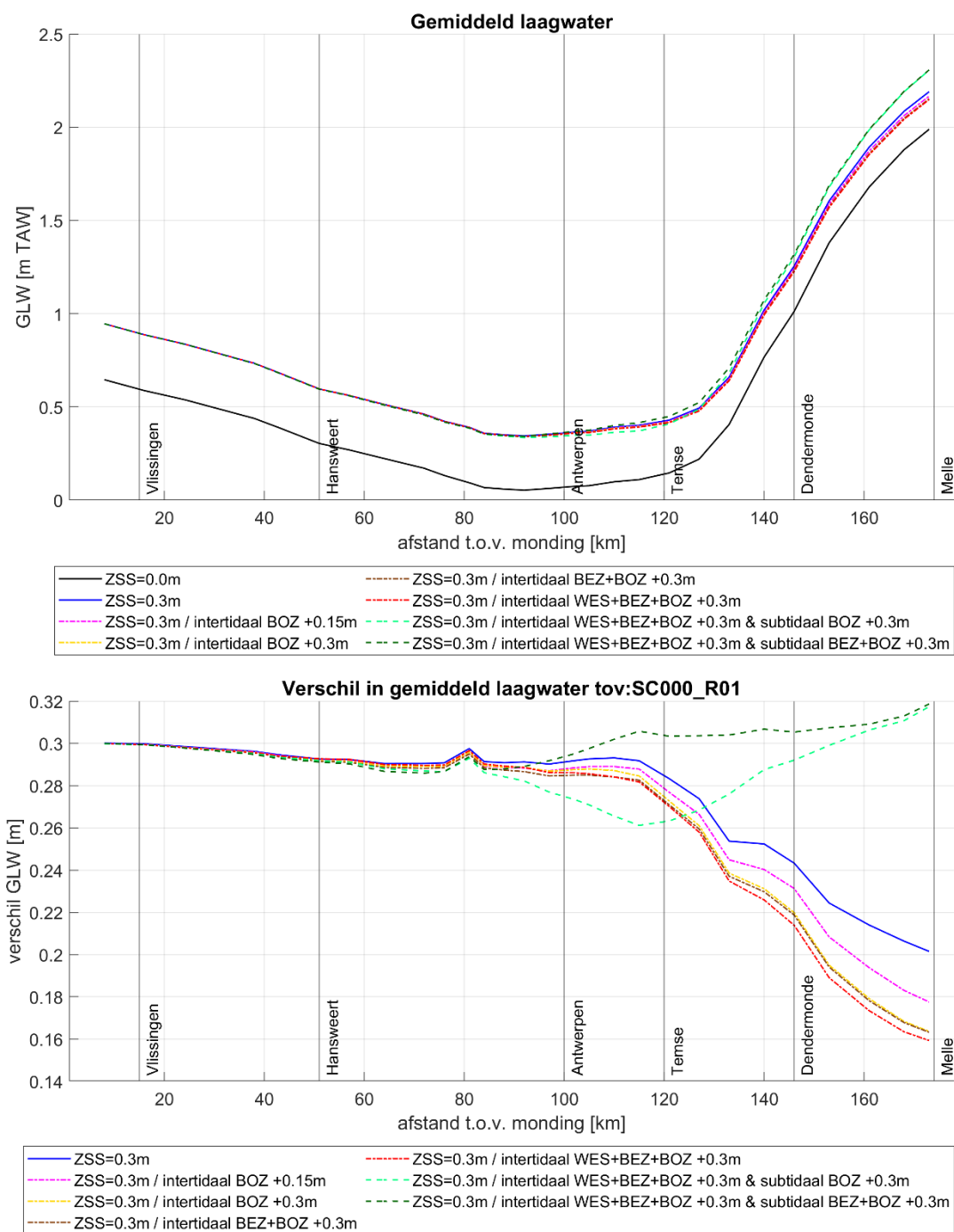
Verticaal getij



Figuur 37 – Gemiddelde getijslag in verschillende morfologische meegroeiscenario's met 30cm zeespiegelstijging en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 (zwart).



Figuur 38 – Gemiddeld hoogwaterniveau in verschillende morfologische meegroeiscenario's met 30cm zeespiegelstijging (boven) en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 (onder).



Figuur 39 – Gemiddeld laagwaterniveau in verschillende morfologische meegroeiscenario's met 30cm zeespiegelstijging (boven) en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 (onder).

Getijvertraging

Tabel 7 – Getijvertraging HW t.o.v. monding voor scenario's met 30cm zeespiegelstijging.

Simulatie	Antwerpen	Temse	Dendermonde	Melle
SC000_R01	+01:46	+02:41	+03:40	+05:12
SC030_R01	+01:46	+02:41	+03:40	+05:08
SC030_R02	+01:46	+02:41	+03:38	+05:06
SC030_R03	+01:46	+02:41	+03:38	+05:08
SC030_R04	+01:46	+02:41	+03:37	+05:05
SC030_R05	+01:43	+02:39	+03:36	+05:05
SC030_R06	+01:43	+02:38	+03:36	+05:04
SC030_R07	+01:43	+02:37	+03:36	+05:08
SC030_R08	+01:43	+02:39	+03:38	+05:09

Tabel 8 – Verschil in getijvertraging HW in minuten t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 voor scenario's met 30cm zeespiegelstijging.

Simulatie	Antwerpen	Temse	Dendermonde	Melle
SC000_R01	-	-	-	-
SC030_R01	0	0	0	0
SC030_R02	0	0	-1	-5
SC030_R03	0	0	-2	-6
SC030_R04	0	0	-2	-5
SC030_R05	0	0	-3	-7
SC030_R06	-3	-3	-4	-8
SC030_R07	-3	-4	-5	-9
SC030_R08	-3	-4	-4	-5

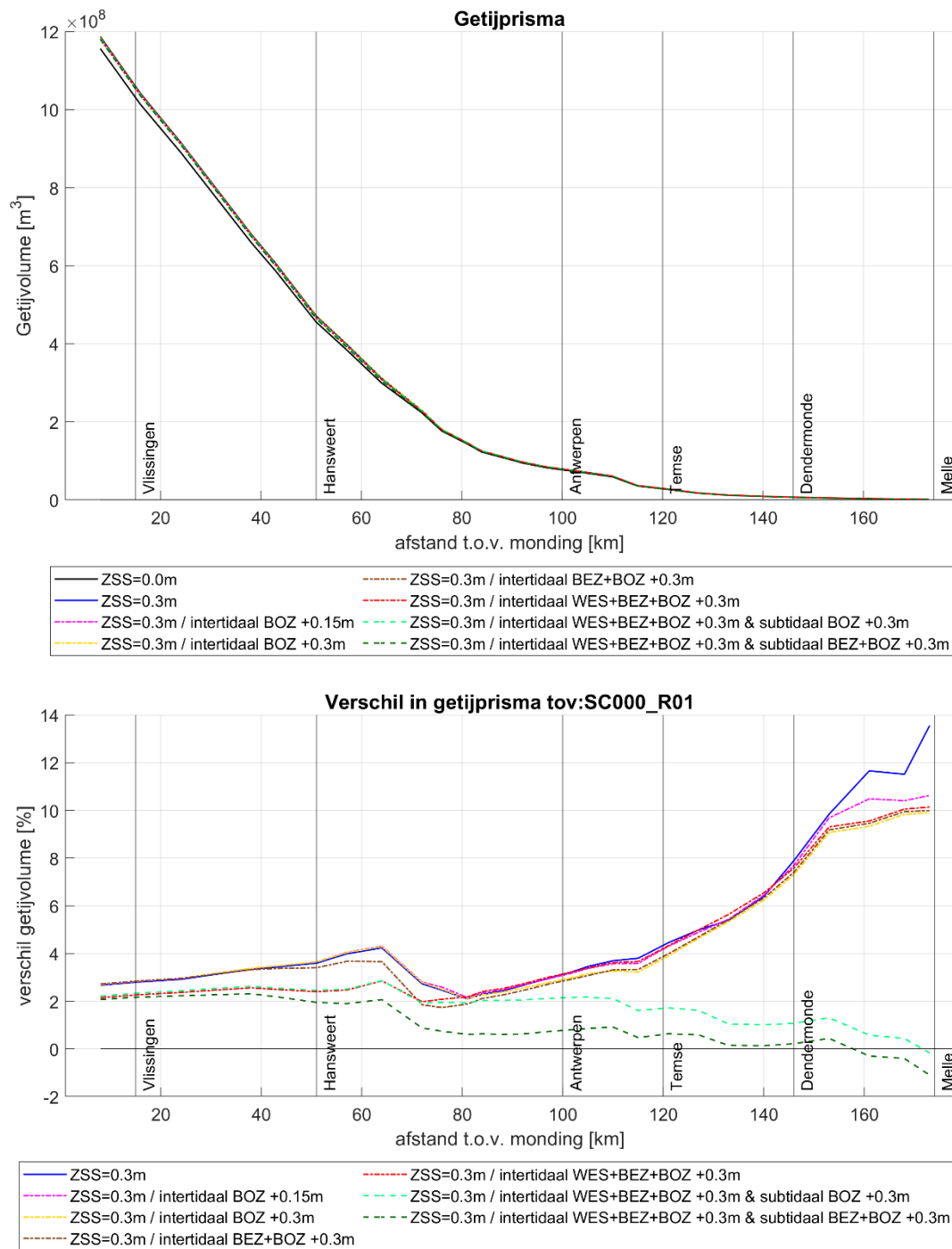
Tabel 9 – Getijvertraging LW t.o.v. monding voor scenario's met 30cm zeespiegelstijging.

Simulatie	Antwerpen	Temse	Dendermonde	Melle
SC000_R01	+01:56	+02:55	+04:21	+06:12
SC030_R01	+01:54	+02:53	+04:17	+06:02
SC030_R02	+01:54	+02:52	+04:16	+06:01
SC030_R03	+01:54	+02:52	+04:17	+06:05
SC030_R04	+01:54	+02:52	+04:15	+06:00
SC030_R05	+01:54	+02:52	+04:15	+06:00
SC030_R06	+01:53	+02:51	+04:14	+05:59
SC030_R07	+01:52	+02:51	+04:17	+06:07
SC030_R08	+01:53	+02:53	+04:18	+06:08

Tabel 10 – Verschil in getijvertraging LW in minuten t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 voor scenario's met 30cm zeespiegelstijging.

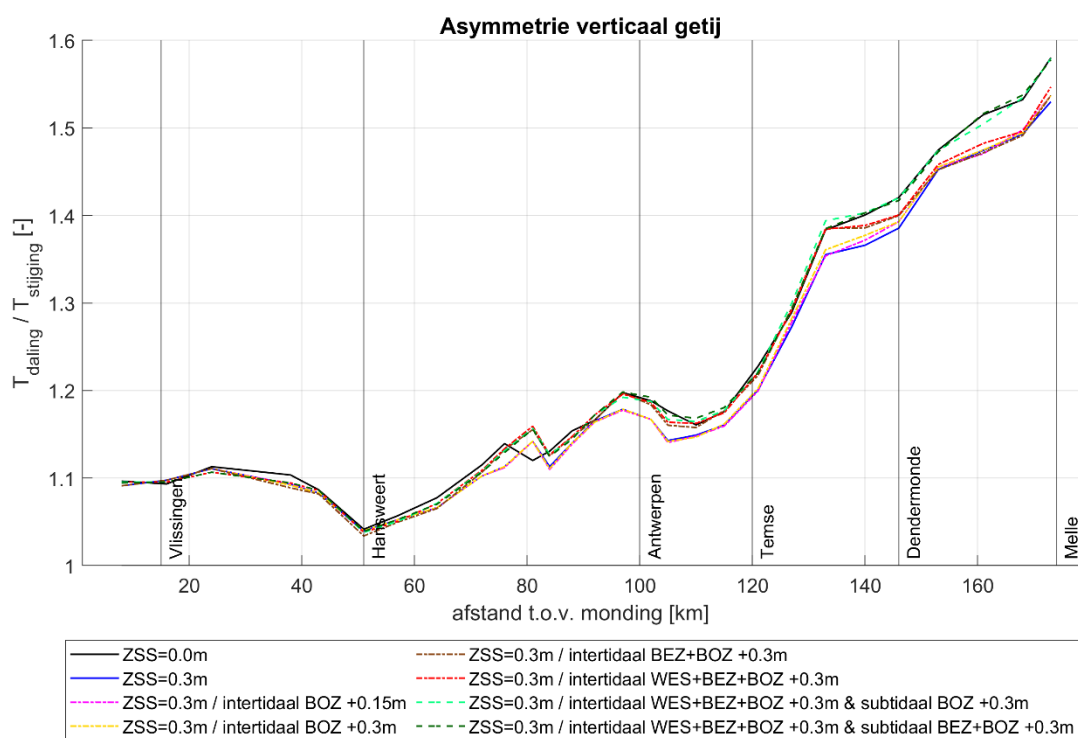
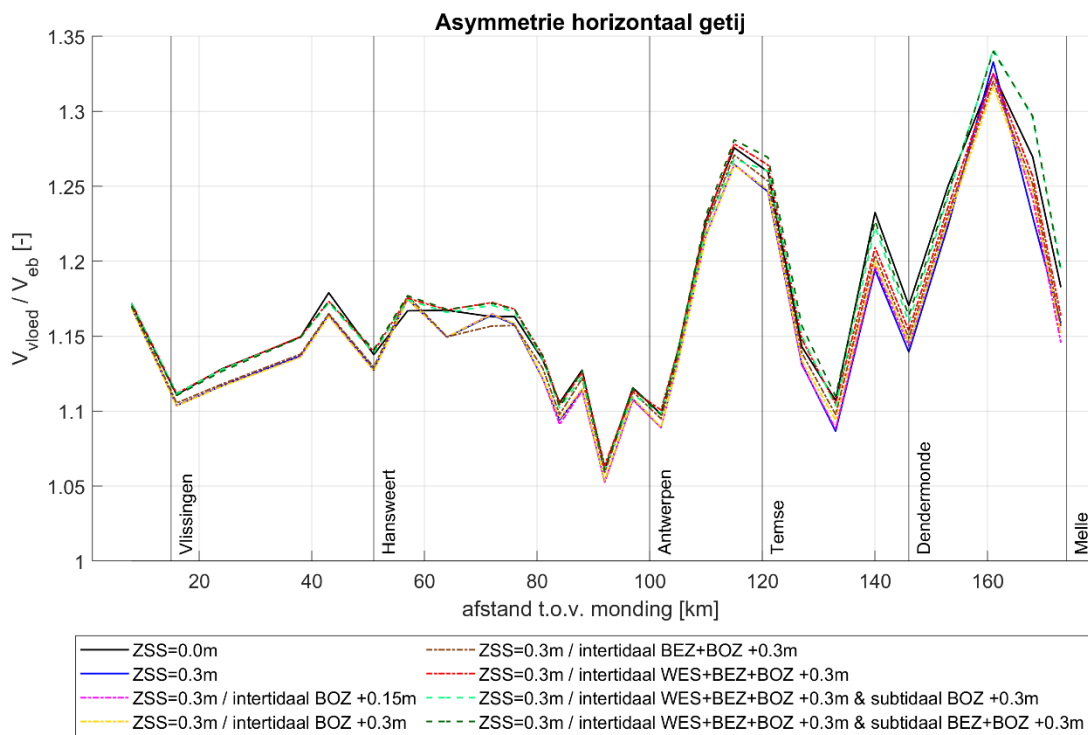
Simulatie	Antwerpen	Temse	Dendermonde	Melle
SC000_R01	-	-	-	-
SC030_R01	-2	-3	-4	-9
SC030_R02	-2	-3	-5	-10
SC030_R03	-2	-3	-4	-7
SC030_R04	-2	-3	-5	-11
SC030_R05	-2	-3	-6	-12
SC030_R06	-3	-4	-7	-12
SC030_R07	-4	-5	-4	-5
SC030_R08	-2	-2	-2	-4

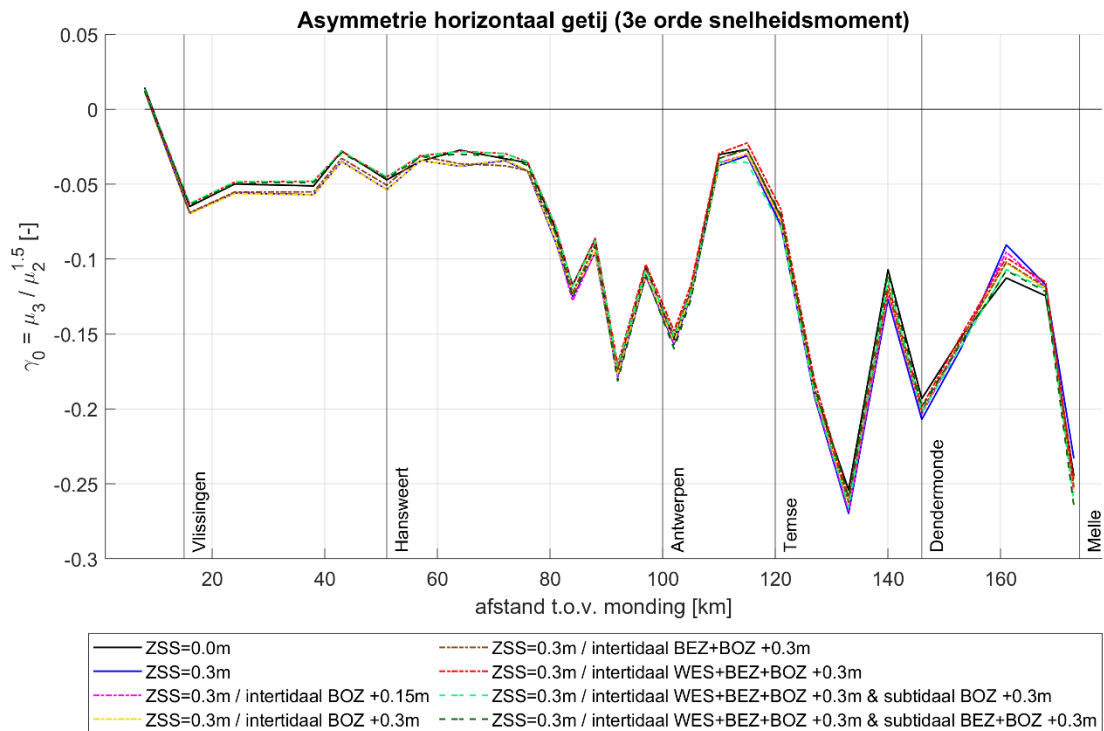
Getijprisma



Figuur 40 – Gemiddeld getijprisma in morfologische meegroeiscenario's met 30cm zeespiegelstijging (boven) en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01.

Getij-asymmetrie

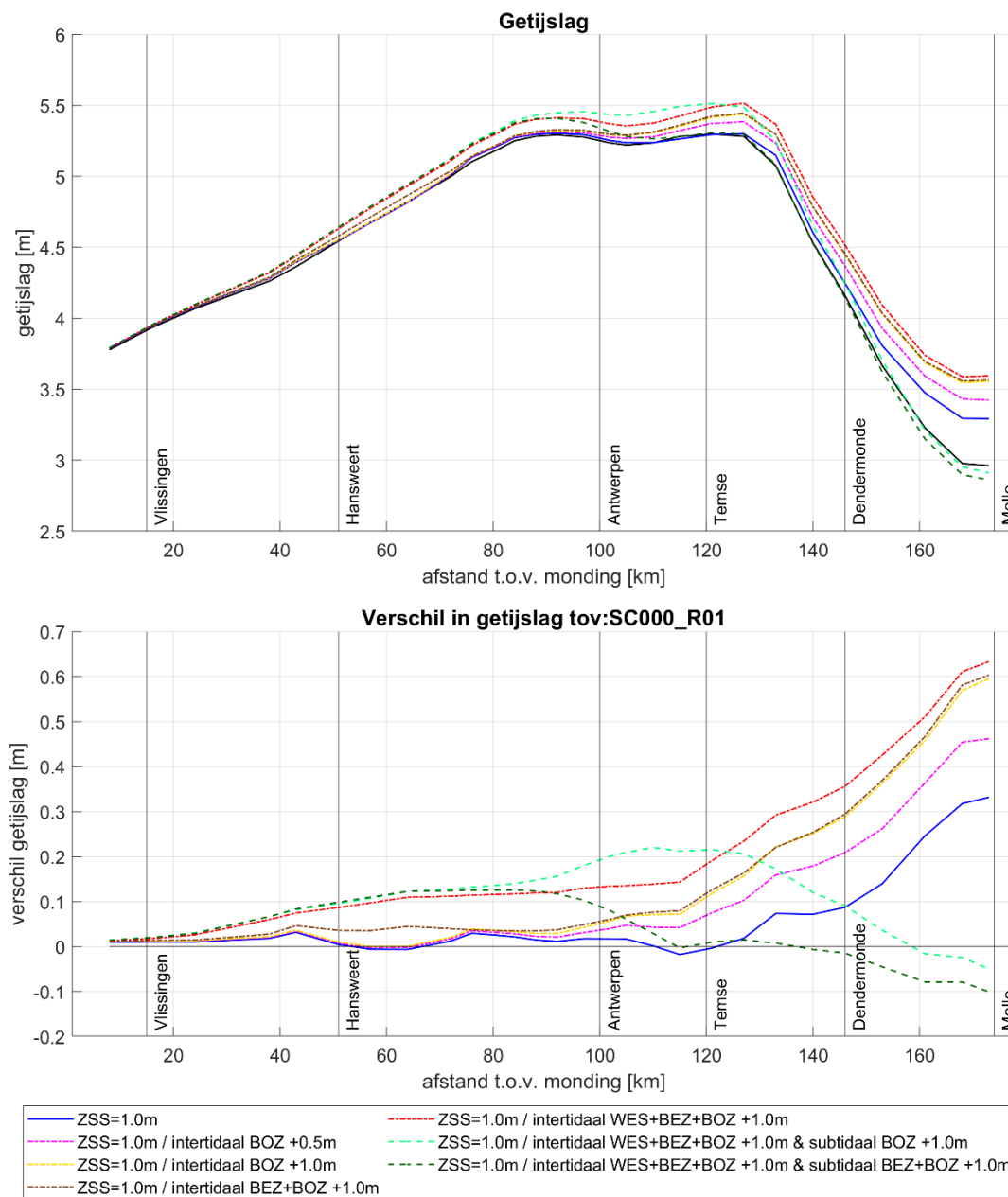
Figuur 41 – Asymmetrie op basis van ratio $T_{daling} / T_{stijging}$ in meegroeiscenario's met 30cm zeespiegelstijging.Figuur 42 – Asymmetrie op basis van ratio V_{vloed} / V_{eb} in meegroeiscenario's met 30cm zeespiegelstijging.



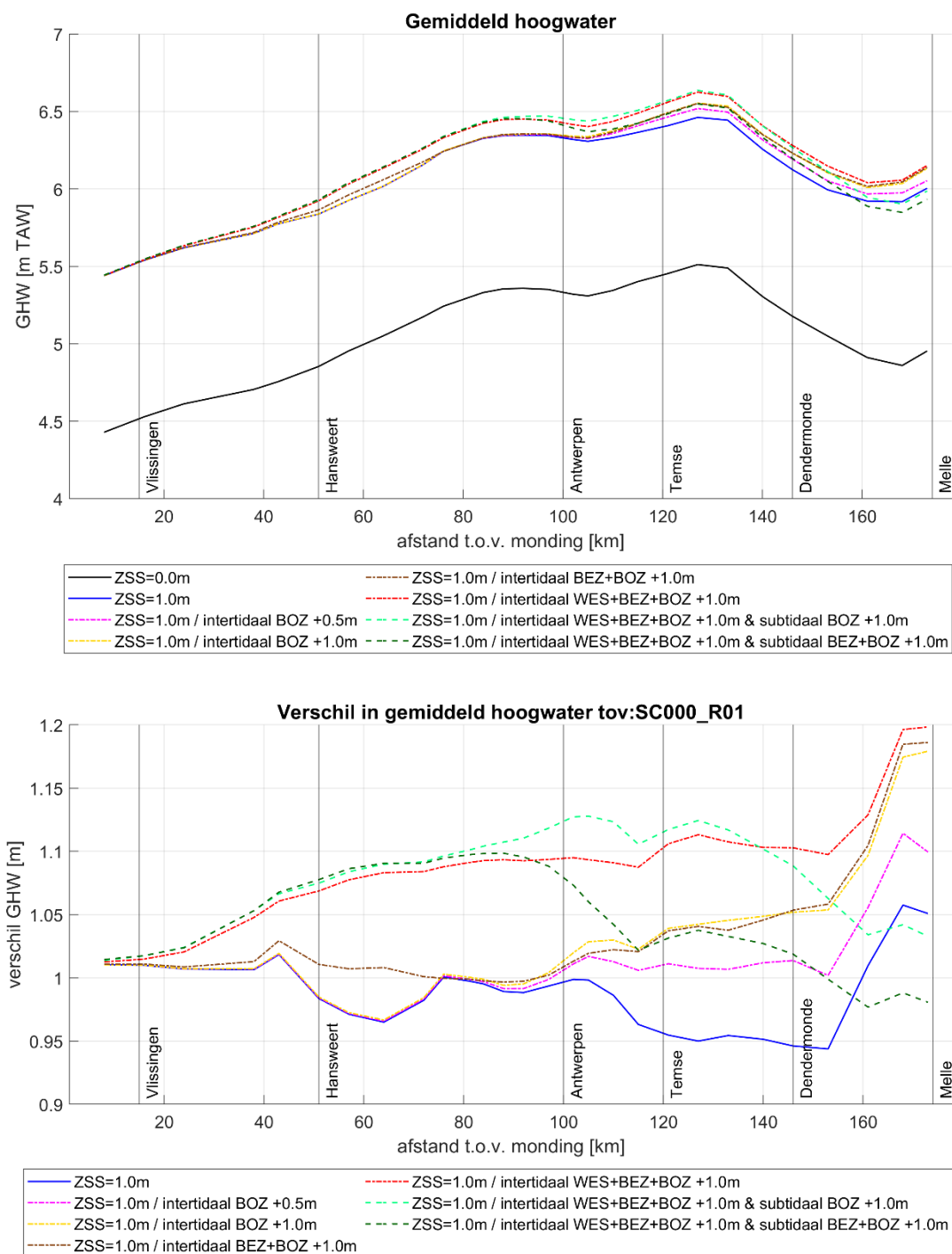
Figuur 43 – Asymmetrie op basis van derde-orde snelheidsmoment (γ_0) in meegroeiscenario's met 30cm zeespiegelstijging.

Bijlage 3 – Modelresultaten scenario's +100 cm zeespiegelstijging

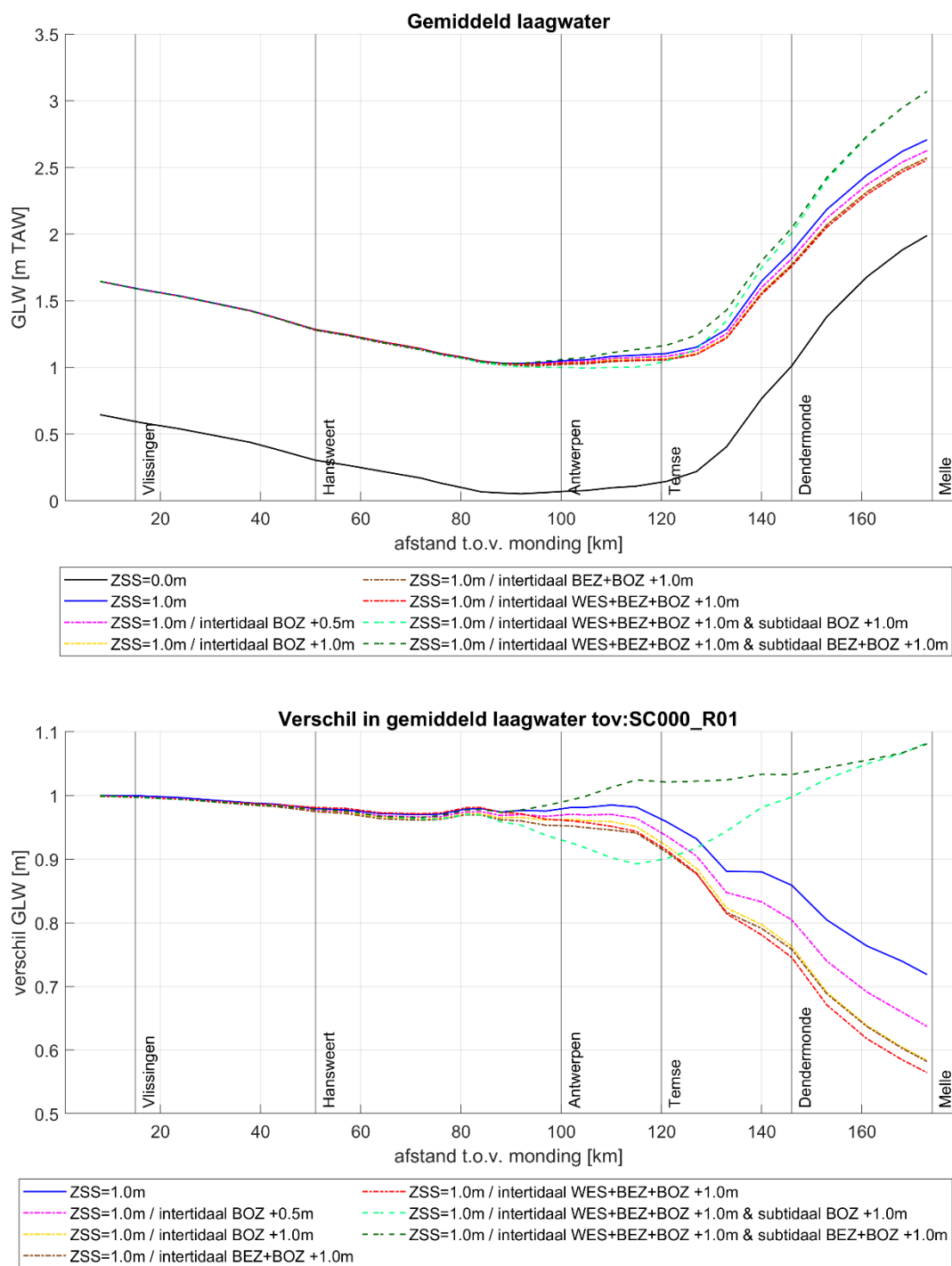
Verticaal getij



Figuur 44 – Gemiddelde getijslag in verschillende morfologische meegroeiscenario's met 100cm zeespiegelstijging en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 (zwart).



Figuur 45 – Gemiddeld hoogwaterniveau in verschillende morfologische meegroeiscenario's met 100cm zeespiegelstijging (boven) en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 (onder).



Figuur 46 – Gemiddeld laagwaterniveau in verschillende morfologische meegroeiscenario's met 100cm zeespiegelstijging (boven) en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 (onder).

Getijvertraging

Tabel 11 – Getijvertraging HW t.o.v. monding voor scenario's met 100cm zeespiegelstijging.

Simulatie	Antwerpen	Temse	Dendermonde	Melle
SC000_R01	+01:46	+02:41	+03:40	+05:12
SC100_R01	+01:50	+02:36	+03:40	+05:10
SC100_R02	+01:50	+02:34	+03:35	+04:58
SC100_R03	+01:50	+02:34	+03:35	+05:03
SC100_R04	+01:50	+02:34	+03:29	+04:54
SC100_R05	+01:41	+02:34	+03:29	+04:52
SC100_R06	+01:36	+02:30	+03:25	+04:46
SC100_R07	+01:36	+02:28	+03:27	+04:58
SC100_R08	+01:37	+02:35	+03:32	+05:03

Tabel 12 – Verschil in getijvertraging HW in minuten t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 voor scenario's met 100cm zeespiegelstijging.

Simulatie	Antwerpen	Temse	Dendermonde	Melle
SC000_R01	-	-	-	-
SC100_R01	+4	-5	0	-3
SC100_R02	+4	-7	-6	-15
SC100_R03	+4	-7	-5	-9
SC100_R04	+4	-8	-12	-19
SC100_R05	-5	-7	-12	-21
SC100_R06	-10	-12	-15	-26
SC100_R07	-10	-13	-14	-14
SC100_R08	-9	-6	-8	-10

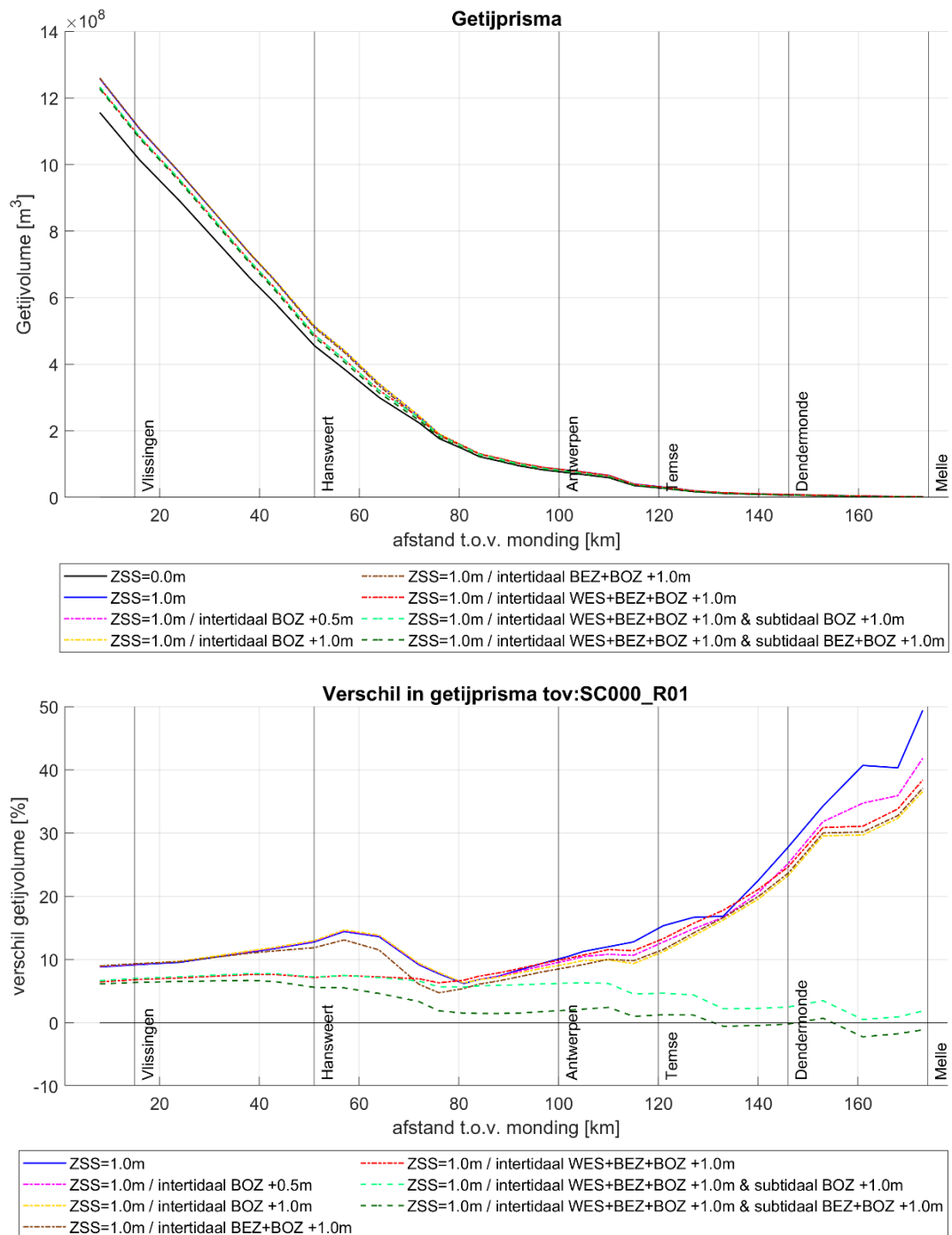
Tabel 13 – Getijvertraging LW t.o.v. monding voor scenario's met 100cm zeespiegelstijging.

Simulatie	Antwerpen	Temse	Dendermonde	Melle
SC000_R01	+01:56	+02:55	+04:21	+06:12
SC100_R01	+01:50	+02:48	+04:08	+05:46
SC100_R02	+01:50	+02:47	+04:07	+05:43
SC100_R03	+01:49	+02:46	+04:10	+05:53
SC100_R04	+01:50	+02:46	+04:06	+05:41
SC100_R05	+01:48	+02:45	+04:04	+05:40
SC100_R06	+01:46	+02:41	+04:02	+05:37
SC100_R07	+01:45	+02:40	+04:08	+05:59
SC100_R08	+01:47	+02:47	+04:13	+06:05

Tabel 14 – Verschil in getijvertraging LW in minuten t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 voor scenario's met 100cm zeespiegelstijging.

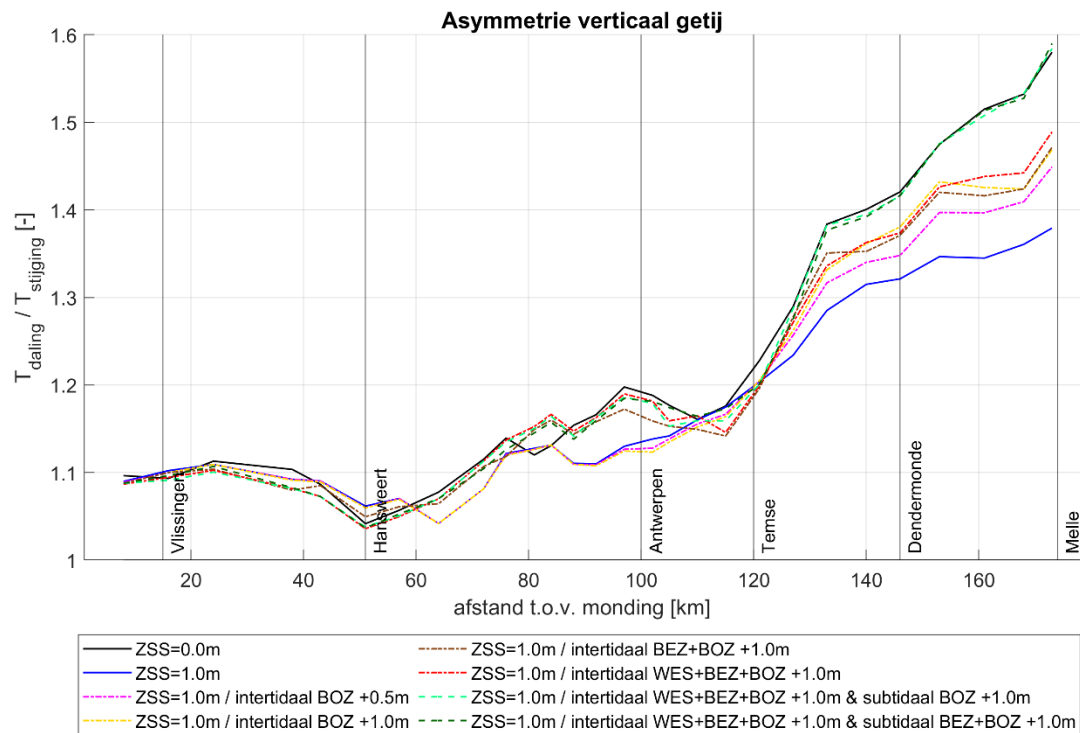
Simulatie	Antwerpen	Temse	Dendermonde	Melle
SC000_R01	-	-	-	-
SC100_R01	-6	-7	-12	-26
SC100_R02	-6	-9	-14	-29
SC100_R03	-7	-9	-10	-18
SC100_R04	-6	-9	-15	-30
SC100_R05	-7	-10	-16	-32
SC100_R06	-10	-14	-19	-35
SC100_R07	-10	-15	-12	-12
SC100_R08	-9	-8	-7	-7

Getijprisma

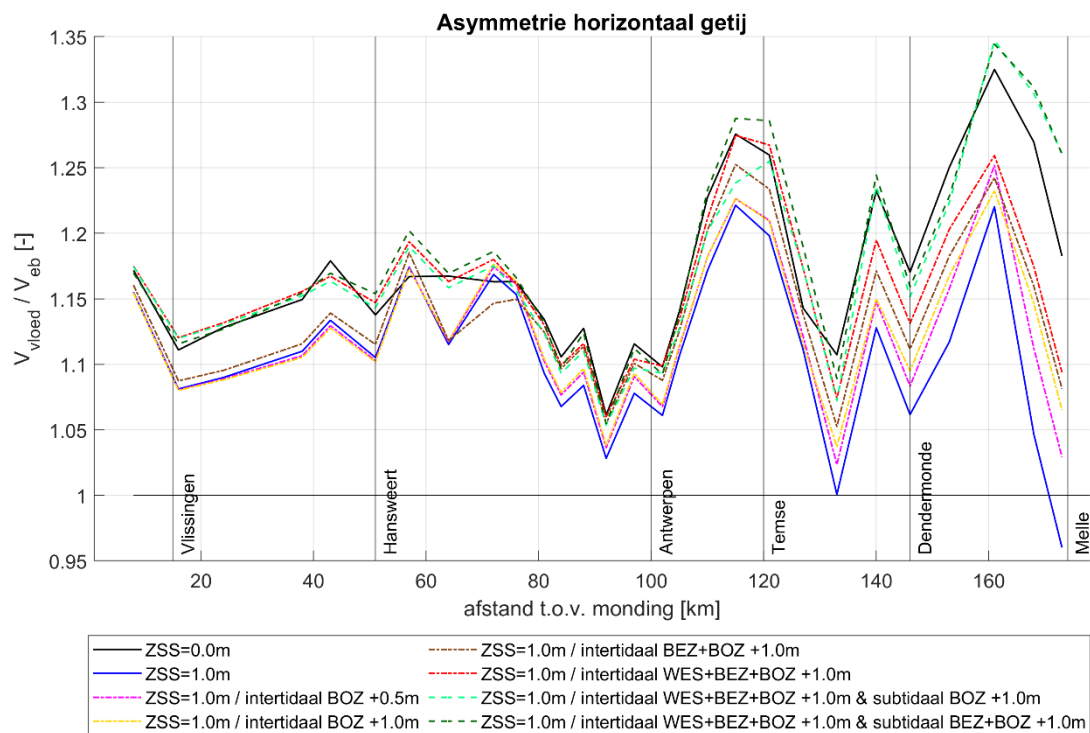


Figuur 47 – Gemiddeld getijprisma in morfologische meegroeiscenario's met 100cm zeespiegelstijging (boven) en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01.

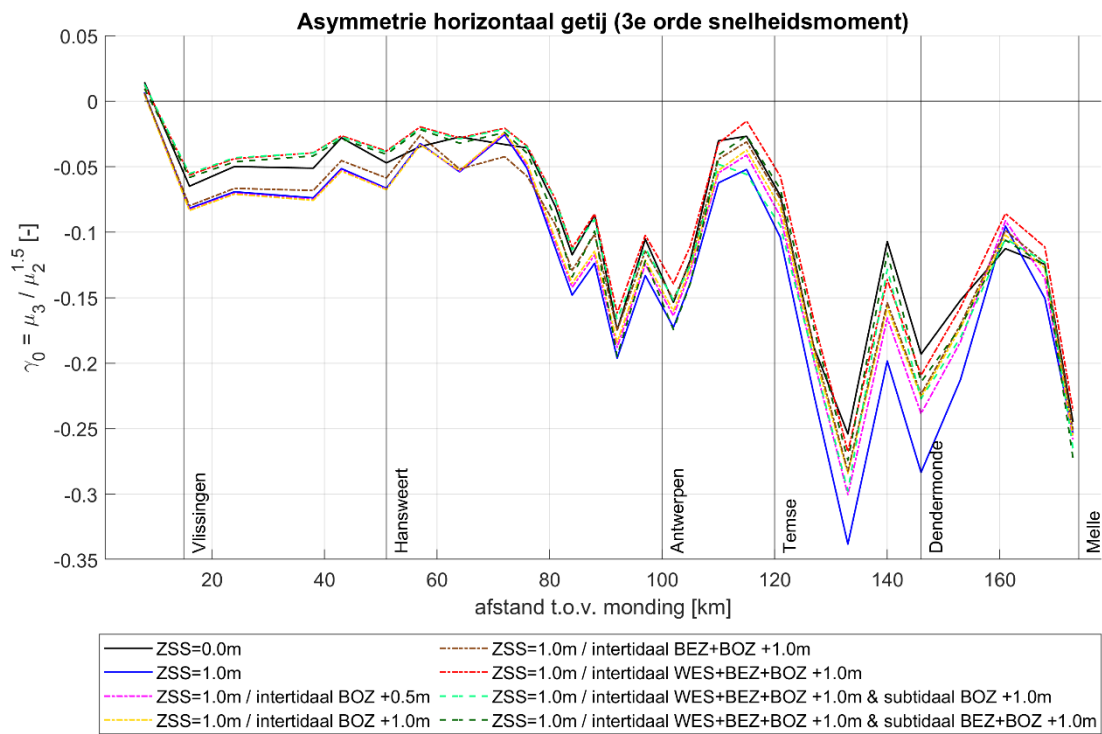
Getij-asymmetrie



Figuur 48 – Asymmetrie op basis van ratio $T_{daling} / T_{stijging}$ in meegroeiscenario's met 100cm zeespiegelstijging.



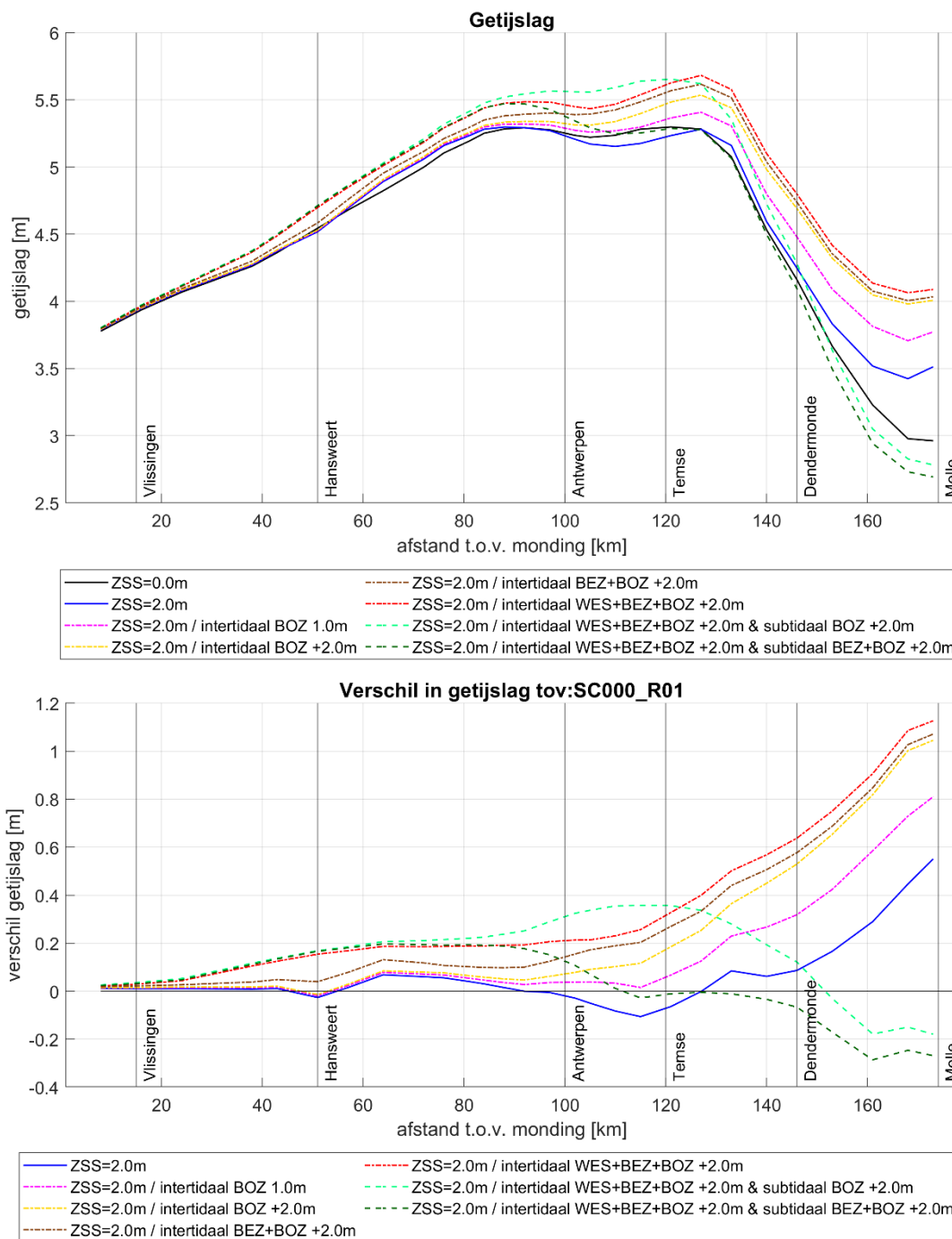
Figuur 49 – Asymmetrie op basis van ratio V_{vloed} / V_{eb} in meegroeiscenario's met 100cm zeespiegelstijging.



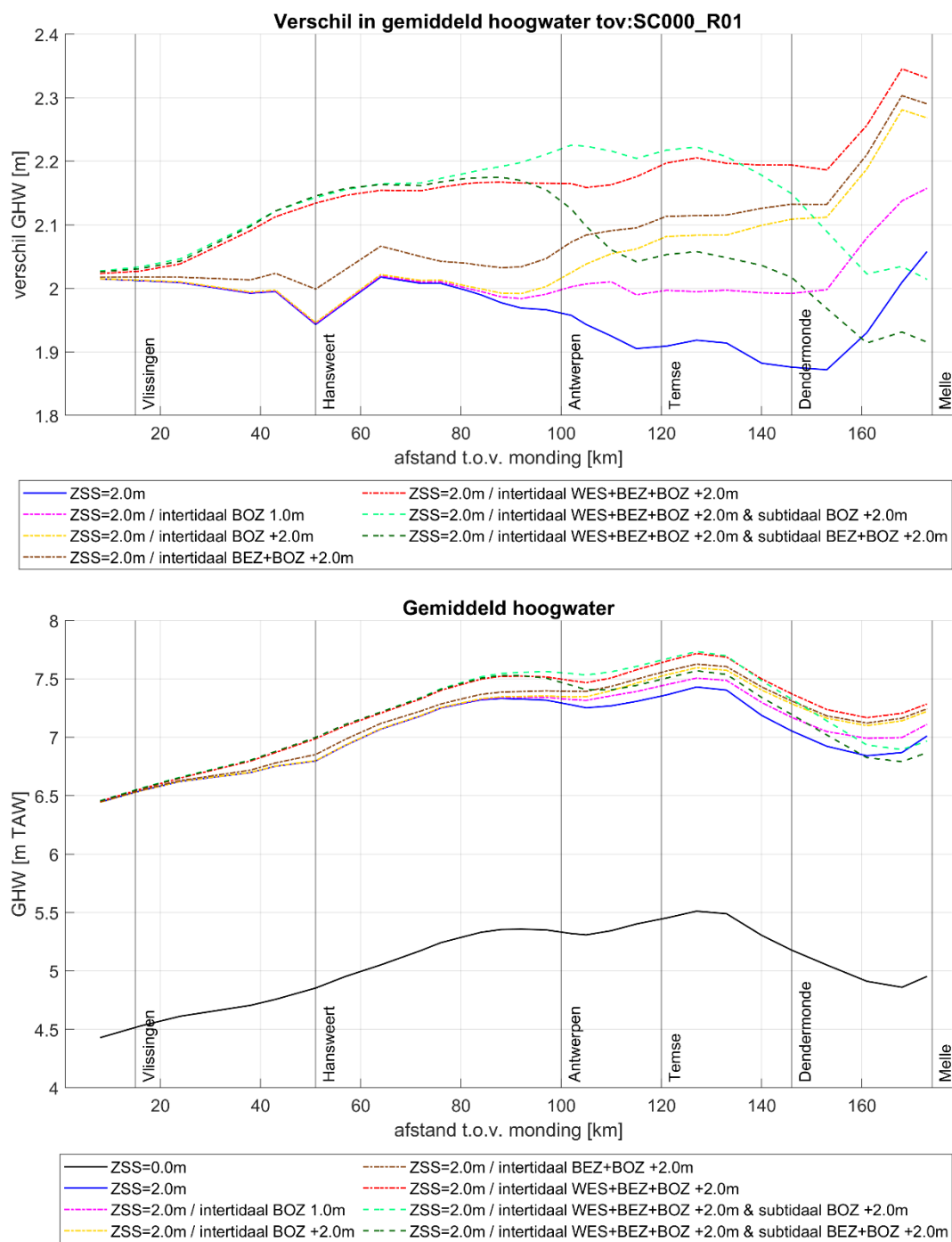
Figuur 50 – Asymmetrie op basis van derde-orde snelheidsmoment (γ_0) in meegroeiscenario's met 100cm zeespiegelstijging.

Bijlage 4 – Modelresultaten scenario's +200 cm zeespiegelstijging

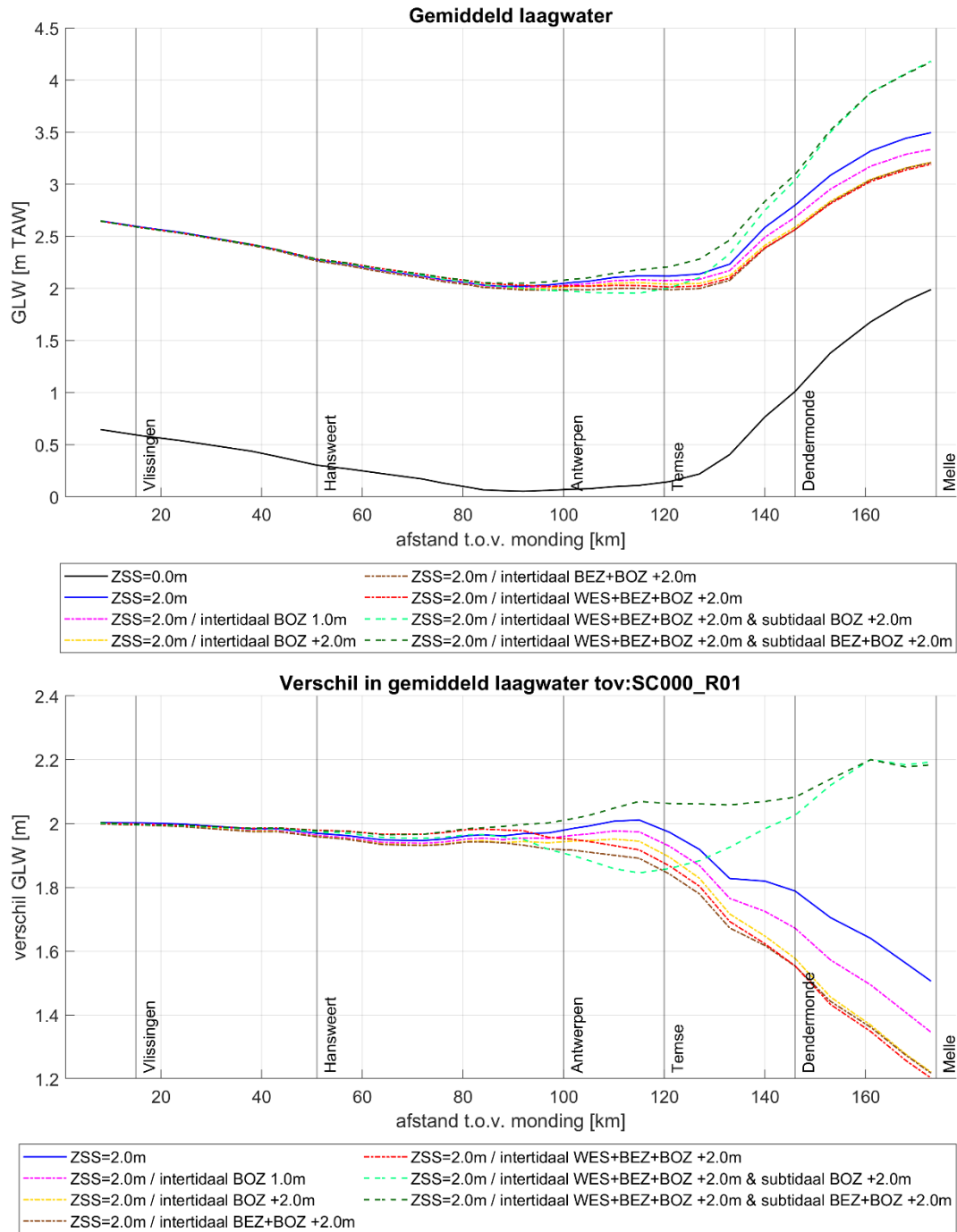
Verticaal getij



Figuur 51 – Gemiddelde getijslag in verschillende morfologische meegroeiscenario's met 200cm zeespiegelstijging en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 (zwart).



Figuur 52 – Gemiddeld hoogwaterniveau in verschillende morfologische meegroeiscenario's met 200cm zeespiegelstijging (boven) en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 (onder).



Figuur 53 – Gemiddeld laagwaterniveau in verschillende morfologische meegroeiscenario's met 200cm zeespiegelstijging (boven) en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 (onder).

Getijvertraging

Tabel 15 – Getijvertraging HW t.o.v. monding voor scenario's met 200cm zeespiegelstijging.

Simulatie	Antwerpen	Temse	Dendermonde	Melle
SC000_R01	+01:46	+02:41	+03:40	+05:12
SC200_R01	+01:47	+02:37	+03:36	+05:03
SC200_R02	+01:48	+02:34	+03:32	+04:56
SC200_R03	+01:48	+02:33	+03:33	+05:02
SC200_R04	+01:48	+02:32	+03:22	+04:36
SC200_R05	+01:45	+02:26	+03:17	+04:34
SC200_R06	+01:28	+02:19	+03:12	+04:26
SC200_R07	+01:27	+02:17	+03:16	+04:46
SC200_R08	+01:29	+02:26	+03:25	+04:55

Tabel 16 – Verschil in getijvertraging HW in minuten t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 voor scenario's met 200cm zeespiegelstijging.

Simulatie	Antwerpen	Temse	Dendermonde	Melle
SC000_R01	-	-	-	-
SC200_R01	+1	-5	-4	-9
SC200_R02	+2	-8	-8	-17
SC200_R03	+2	-8	-7	-11
SC200_R04	+2	-9	-18	-37
SC200_R05	-1	-15	-23	-39
SC200_R06	-18	-23	-29	-47
SC200_R07	-19	-24	-25	-26
SC200_R08	-17	-15	-15	-17

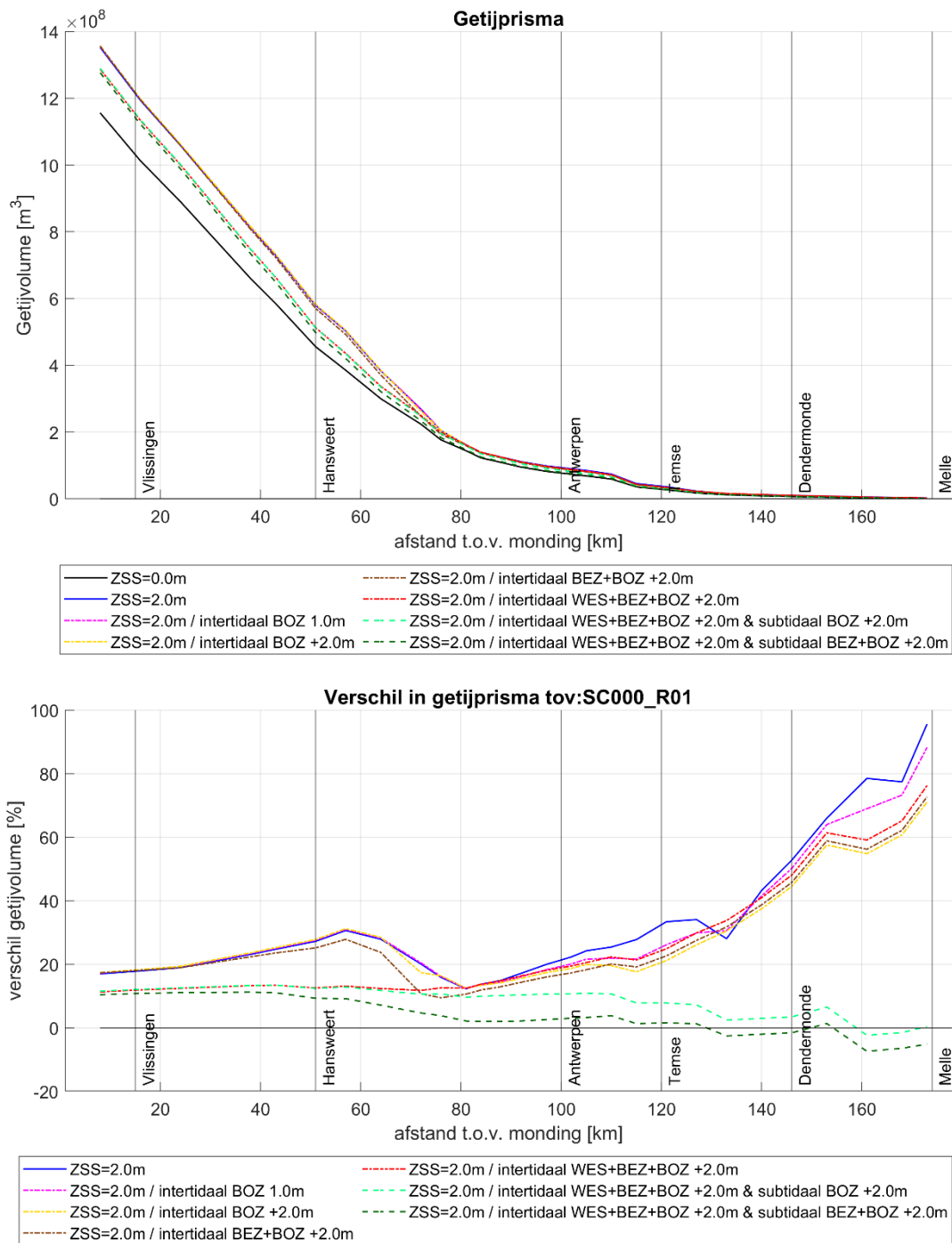
Tabel 17 - Getijvertraging LW t.o.v. monding voor scenario's met 200cm zeespiegelstijging.

Simulatie	Antwerpen	Temse	Dendermonde	Melle
SC000_R01	+01:56	+02:55	+04:21	+06:12
SC200_R01	+01:46	+02:42	+03:57	+05:28
SC200_R02	+01:46	+02:39	+03:54	+05:22
SC200_R03	+01:45	+02:38	+04:01	+05:40
SC200_R04	+01:45	+02:38	+03:52	+05:18
SC200_R05	+01:42	+02:35	+03:47	+05:15
SC200_R06	+01:35	+02:27	+03:41	+05:08
SC200_R07	+01:33	+02:25	+03:54	+05:45
SC200_R08	+01:38	+02:38	+04:05	+05:55

Tabel 18 – Verschil in getijvertraging LW in minuten t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01 voor scenario's met 200cm zeespiegelstijging.

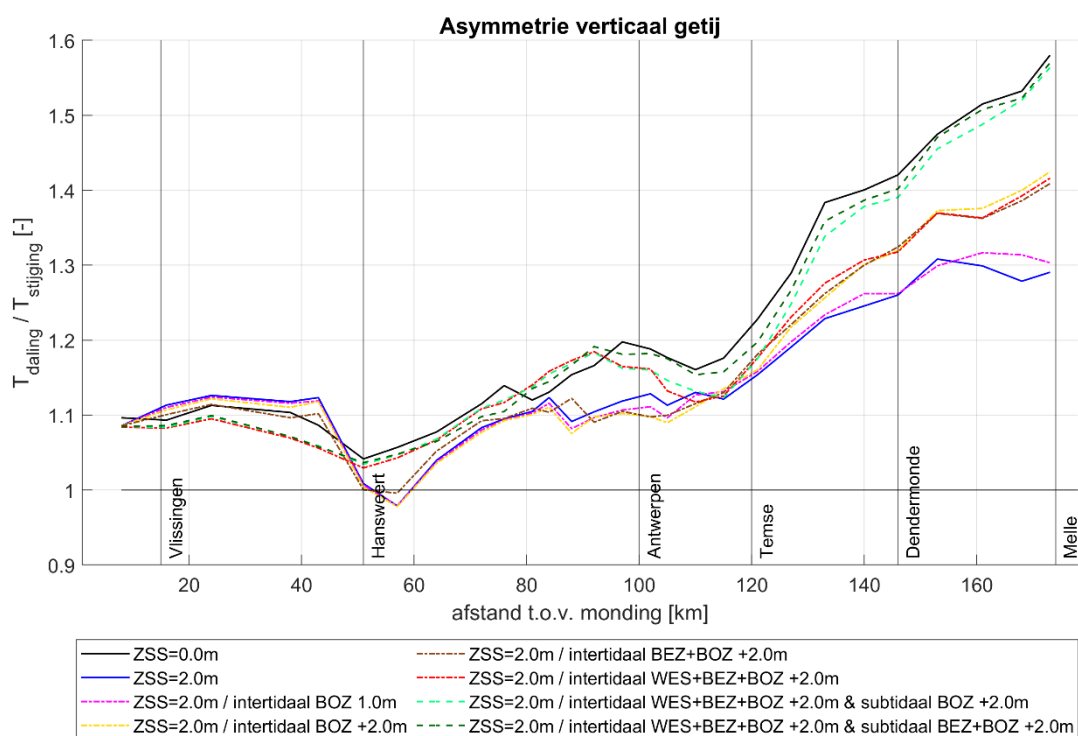
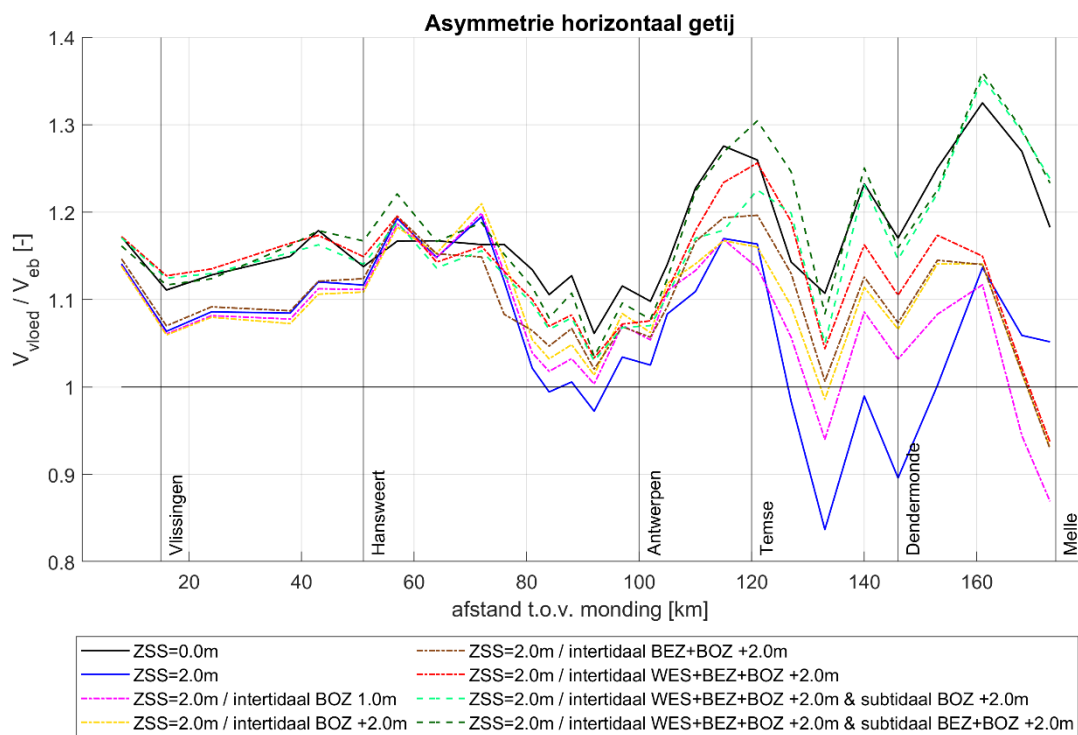
Simulatie	Antwerpen	Temse	Dendermonde	Melle
SC000_R01	-	-	-	-
SC200_R01	-10	-14	-24	-43
SC200_R02	-10	-16	-27	-49
SC200_R03	-11	-17	-20	-32
SC200_R04	-11	-18	-29	-53
SC200_R05	-14	-20	-34	-57
SC200_R06	-21	-28	-40	-64
SC200_R07	-22	-30	-26	-26
SC200_R08	-18	-17	-16	-16

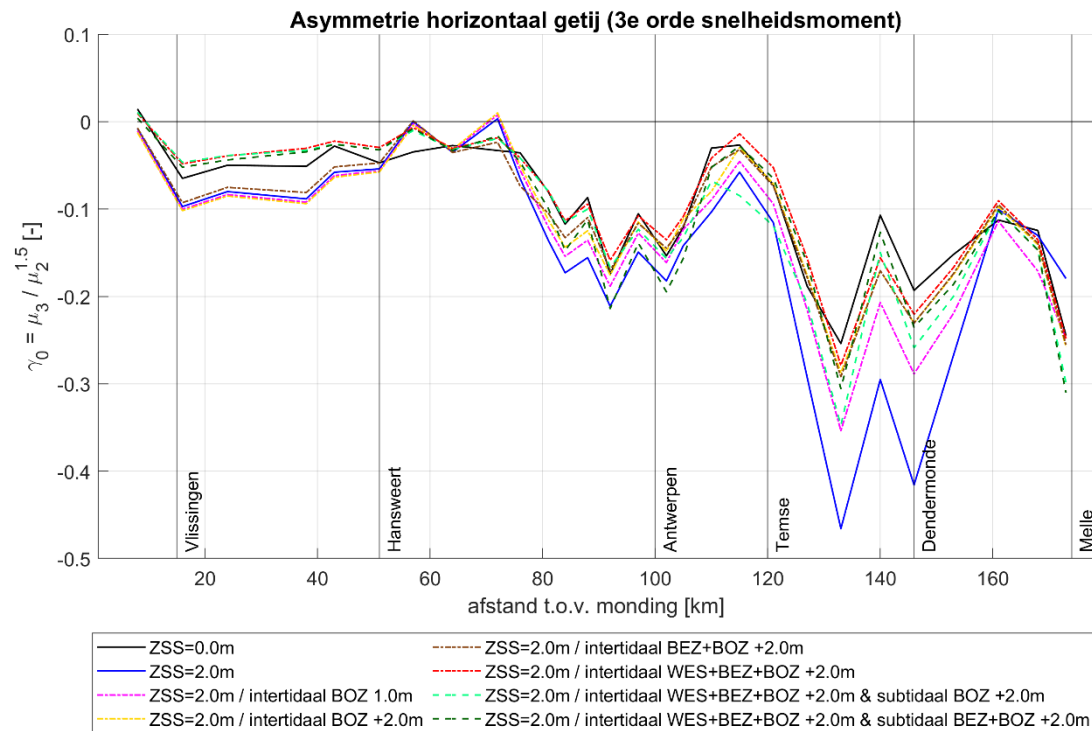
Getijprisma



Figuur 54 – Gemiddeld getijprisma in morfologische meegroeiscenario's met 200cm zeespiegelstijging (boven) en verschil t.o.v. referentiesimulatie SC000_R01.

Getij-asymmetrie

Figuur 55 – Asymmetrie op basis van ratio $T_{daling} / T_{stijging}$ in meegroeiscenario's met 200cm zeespiegelstijging.Figuur 56 – Asymmetrie op basis van ratio V_{vloed} / V_{eb} in meegroeiscenario's met 200cm zeespiegelstijging.



Figuur 57 – Asymmetrie op basis van derde-orde snelheidsmoment (γ_0) in meegroeiscenario's met 200cm zeespiegelstijging.

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

www.waterbouwkundiglaboratorium.be