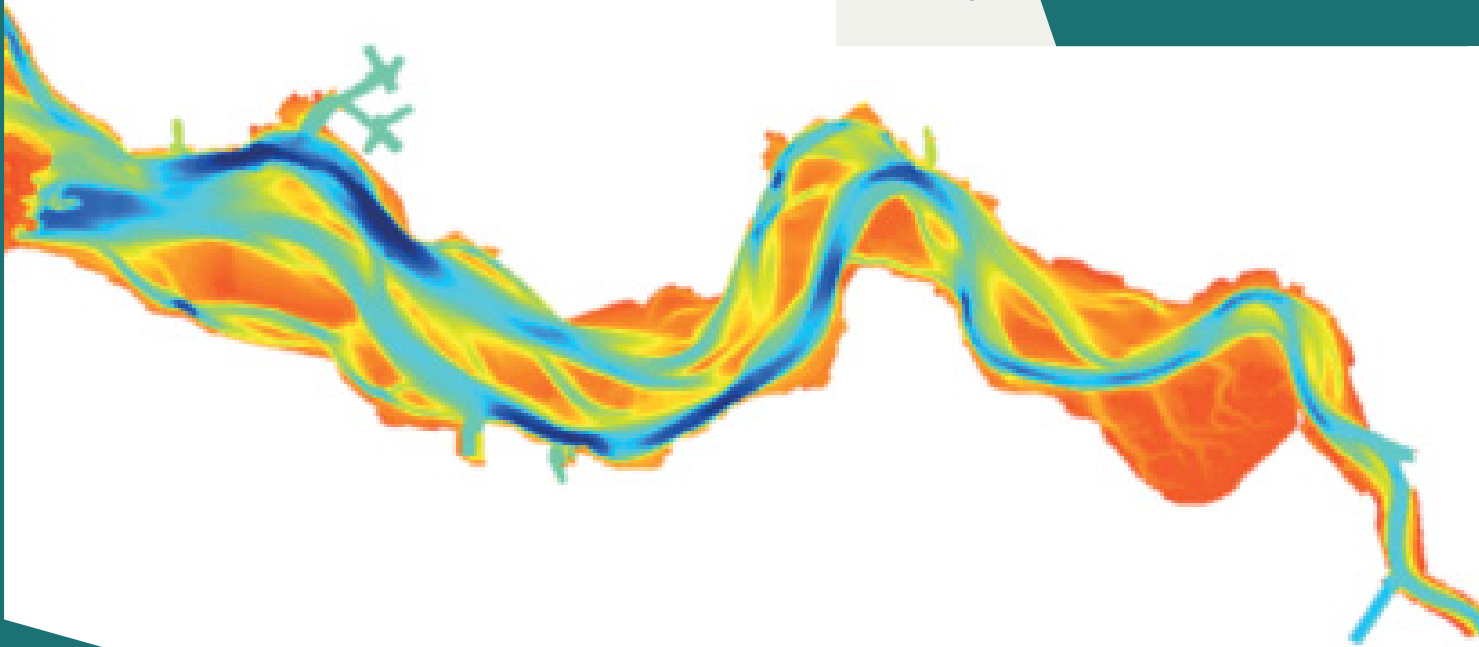




Vlaanderen
is wetenschap



14_024_3
WL rapporten

Agenda voor de Toekomst Morfologie Mesoschaal

Deelrapport 3
Gevoeligheidsanalyse voor morfologische simulaties
in de Westerschelde

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Agenda voor de Toekomst: Morfologie Mesoschaal

Deelrapport 3 – Gevoeligheidsanalyse voor morfologische simulaties in de Westerschelde

Meire, D.; Plancke, Y.; De Maerschallck, B.; Mostaert, F.

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 2019
D/2019/3241/041

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Meire, D.; Plancke, Y.; De Maerschalc, B.; Mostaert, F. (2019). Agenda voor de Toekomst: Morfologie Mesoschaal: Deelrapport 3 – Gevoeligheidsanalyse voor morfologische simulaties in de Westerschelde. Versie 4.0. WL Rapporten, 14_024_3. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

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

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	Vlaams-Nederlandse Schelde-Commissie (VNSC)	Ref.:	WL2019R14_024_3
Keywords (3-5):	Westerschelde, morfologie, morfologische simulaties, gevoeligheid, Delft3D		
Tekst (p.):	47	Bijlagen (p.):	40
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

Auteur(s):	Meire, D.; Plancke, Y.
------------	------------------------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	De Maerschalc, B.	<small>Getekend door: Bart De Maerschalc (Signa) Getekend op: 2019-11-29 13:34:36 +01:00 Reden: ik keur dit document goed</small> <i>Bart De Maerschalc</i>
Projectleider:	Plancke, Y.	<small>Getekend door: Yves Plancke (Signature) Getekend op: 2019-11-29 13:17:14 +01:00 Reden: ik keur dit document goed</small> <i>Yves Plancke</i>

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	<small>Getekend door: Frank Mostaert (Signature) Getekend op: 2019-11-29 13:09:42 +01:00 Reden: ik keur dit document goed</small> <i>Frank Mostaert</i>
-----------------	--------------	--



Abstract

Het project 'Hydro- en sedimentdynamische en morfologische processen op meso-schaal', dat onderdeel is van thema 7 uit de Agenda "Morfologische en ecologische effecten sedimentstrategie", tracht de inzichten in de hydro- en sedimentdynamische en morfologische processen op meso-schaal te verbeteren. In dit rapport wordt de gevoeligheid van verschillende parameters op het morfologische resultaat nagegaan, voornamelijk gefocust op de drempelgebieden (drempel van Hansweert en drempel van Frederik). De parameters die worden onderzocht zijn de type sedimenttransport formulering, de morfologische factor (MF), de correcties voor de bodemhelling (α_{bn} en α_{bs}). Qua hydrodynamische parameters werd gevarieerd met de ruwheid, 3D effecten (ofwel 3D-model met 2 lagen ofwel gebruik makend van secundaire stroming optie). Tot slot werd een gridverfijning geprobeerd en werden ook de eigenschappen van het sediment zelf (D_{50} en sedimentfracties) aangepast.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VII
Lijst van de figuren	VIII
Voorwoord.....	1
1 Inleiding	2
2 Morfologisch modelleren	4
2.1 Inleiding	4
2.2 Sediment transport.....	4
2.2.1 Engelund en Hansen (1967).....	5
2.2.2 Van Rijn (1993)	5
2.2.3 Wijzigingen aan het bodemtransport.....	7
2.3 Morfologie	7
2.4 Literatuurstudie morfologisch modelleren	8
2.4.1 Delft3D.....	8
2.4.2 Finel2D	10
2.4.3 Geïdealiseerde modellen.....	11
3 Opbouw van het model	14
3.1 Grid	14
3.2 Bathymetrie	14
3.3 Randvoorwaarden	15
3.3.1 Opwaartse randvoorwaarden	15
3.3.2 Afwaartse randvoorwaarden.....	15
3.3.3 Sediment randvoorwaarden.....	15
3.4 Ruwheid.....	16
3.5 Tijdsstap.....	16
3.6 Uitvoerpunten	17
4 Eerste verkennende resultaten	18
4.1 Randvoorwaarden afwaarts	18
4.2 Ruwheidsveld	19

5	Gevoeligheidsanalyse	20
5.1	Referentiesimulatie	22
5.1.1	Algemene beschrijving.....	22
5.1.2	Aanvullingen bij referentiesituatie	25
5.2	Morfologische versnellingsfactor	26
5.3	Transportformulering	29
5.4	Gridresolutie	31
5.5	Stromingspatronen.....	31
5.6	Saliniteit.....	34
5.7	Ruwheid.....	36
5.8	Bodemhelling.....	37
5.9	Sedimentkarakteristieken	41
5.10	Geen morfologische versnelling (MF = 1).....	43
6	Conclusie en aanbevelingen	44
7	Referenties	46
	Bijlagen	B1
	Referentiesimulatie (Sim 00).....	B1
	Morfologische versnellingsfactor (MF)	B5
	Transportformulering	B11
	Gridresolutie.....	B13
	3D stromingspatronen.....	B13
	Saliniteit.....	B17
	Ruwheid.....	B21
	Bodemhelling α_{bn}	B23
	Sedimentkarakteristieken: D50	B31
	Geen morfologische versnelling	B37

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Overzicht inzetbaarheid ZEEKENNIS-model.....	9
Tabel 2 – Overzicht van gehanteerde parameters in eerdere studies	12
Tabel 3 – Overzicht van de parameterinstellingen van de verschillende gevoeligheidsruns.	21
Tabel 4 – Gebruikte Delft 3D versie.....	25

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Ligging van de drempel van Hansweert en drempel van Frederik binnen het Schelde-estuarium .	2
Figuur 2 – Vergelijking sedimenttransport: meting en numeriek model met formule van Van Rijn en Engelund-Hansen	5
Figuur 3 – Illustratie van het NEVLA rooster.	14
Figuur 4 – Opgelegde waterstandsrand ter hoogte van de lijn Westkapelle – Cadzand	15
Figuur 5 – Origineel ruwheidsveld in het NEVLA model, uitgedrukt als Manning coëfficiënt.	16
Figuur 6 – Situering van het focus gebied in deze modelstudie.....	17
Figuur 7 – Voorbeeld van run met instabiliteiten aan de afwaartse rand.	18
Figuur 8 – Zoom op de ruwheidsvelden (links), uitgedrukt in Manning coëfficiënt en sedimentatie en erosieplot (rechts), uitgedrukt in meter	19
Figuur 9 – Simulatieresultaten (Sim 00) van de diepteligging van na respectievelijk 392, 1078 en 2058 dagen in de regio Vlissingen – Terneuzen	23
Figuur 10 – Simulatieresultaten (Sim 00) van de verandering van de diepteligging na respectievelijk 392, 1078 en 2058 dagen t.o.v. de vorige outputstap (respectievelijk 0, 392, 1078) in de regio Vlissingen - Terneuzen	23
Figuur 11 – Simulatieresultaten (Sim 00) van de diepteligging van na respectievelijk 392, 1078 en 2058 dagen in de regio Terneuzen – Hansweert.	24
Figuur 12 – Simulatieresultaten (Sim 00) van de verandering van de diepteligging na respectievelijk 392, 1078 en 2058 dagen t.o.v. de vorige outputstap (respectievelijk 0, 392, 1078) in de regio Terneuzen - Hansweert	24
Figuur 13 – Verloop van een getijkromme (tijd in minuten t.o.v. HW en waterstanden in mTAW) te Vlissingen (links) en Oosterweel (rechts) aan het begin van de simulatie (rood) en na 50 dagen simulatie (blauw)	25
Figuur 14 – Vergelijking van de resultaten bij het gebruik van Delft3D versie FLOW2D3D Version 6.02.01.5527 versus versie FLOW2D3D Version 5.00.00.1287 voor de regio tussen Terneuzen en Hansweert.....	26
Figuur 15 – Vergelijking van de resultaten bij het gebruik van Delft3D versie FLOW2D3D Version 6.02.01.5527 berekend op het cluster te WL vs. Universiteit Leuven voor de regio tussen Terneuzen en Hansweert.	26
Figuur 16 – Verloop van een getijkromme (tijd in minuten t.o.v. HW en waterstanden in m TAW) te Vlissingen (boven) en Oosterweel (onder) aan het begin van de simulatie (links) en na 50 dagen simulatie (rechts) ...	27
Figuur 17 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 01 (MF = 12,25) t.o.v. Sim 00 (MF = 24,5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078) in de regio Terneuzen - Hansweert.....	28
Figuur 18 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 03 (MF = 49) t.o.v. Sim 00 (MF = 24,5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078) in de regio Terneuzen - Hansweert.....	28
Figuur 19 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 04 (MF = 98) t.o.v. Sim 00 (MF = 24.5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert..	29
Figuur 20 – Verloop van een getijkromme (tijd in minuten t.o.v. HW en waterstanden in mTAW) te Vlissingen (boven) en Oosterweel (onder) aan het begin van de simulatie (links) en na 50 dagen simulatie (rechts) ...	30

Figuur 21 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 04 (Van Rijn) t.o.v. Sim 00 (Engelund-Hansen) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert	31
Figuur 22 – Verloop van een getijkromme (tijd in minuten t.o.v. HW en waterstanden in mTAW) te Vlissingen (boven) en Oosterweel (onder) aan het begin van de simulatie (links) en na 50 dagen simulatie (rechts) ...	32
Figuur 23 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 06 (secondary flow) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen – Hansweert.	33
Figuur 24 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 10 (3D) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078) in de regio Terneuzen - Hansweert	33
Figuur 25 – Verloop van een getijkromme (tijd in minuten t.o.v. HW en waterstanden in mTAW) te Vlissingen (links) en Oosterweel (rechts) aan het begin van de simulatie	34
Figuur 26 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 07 (saliniteit) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 344, 1078, 2058) in de regio Vlissingen - Terneuzen.....	35
Figuur 27 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 08 (sec. flow & saliniteit) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert	35
Figuur 28 – Verloop van een getijkromme (tijd in minuten t.o.v. HW en waterstanden in mTAW) te Vlissingen (boven) en Oosterweel (onder) aan het begin van de simulatie (links) en na 50 dagen simulatie (rechts) ...	36
Figuur 29 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 14 ($n = 0.026$) t.o.v. Sim 00 ($n = 0.023$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078) in de regio Terneuzen - Hansweert.....	37
Figuur 30 – Verloop van een getijkromme (tijd in minuten t.o.v. HW en waterstanden in mTAW) te Vlissingen (boven) en Oosterweel (onder) aan het begin van de simulatie (links) en na 50 dagen simulatie (rechts) ...	38
Figuur 31 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 19 ($\alpha_{bn} = 0.15$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bn} = 1.5$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert	39
Figuur 32 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 16 ($\alpha_{bn} = 15$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bn} = 1.5$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert	39
Figuur 33 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 24 ($\alpha_{bs} = 0.1$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bs} = 1$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert	40
Figuur 34 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 23 ($\alpha_{bs} = 10$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bs} = 1$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert	40
Figuur 35 – Verloop van een getijkromme (tijd in minuten t.o.v. HW en waterstanden in mTAW) te Vlissingen (boven) en Oosterweel (onder) aan het begin van de simulatie (links) en na 50 dagen simulatie (rechts) ...	41
Figuur 36 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 04 (MF = 98) t.o.v. Sim 00 (MF = 24.5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert..	42
Figuur 37 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim LT30 (3 fracties) t.o.v. Sim 00 ($D_{50} = 200 \mu\text{m}$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert	42
Figuur 38 – Simulatieresultaten (Sim 00) van de diepteligging na respectievelijk 392, 1078 en 2058 dagen in de regio Vlissingen - Terneuzen.....	B1
Figuur 39 – Simulatieresultaten (Sim 00) van de diepteligging na respectievelijk 392, 1078 en 2058 dagen in de regio Terneuzen - Hansweert	B1
Figuur 40 – Simulatieresultaten (Sim 00) van de diepteligging na respectievelijk 392, 1078 en 2058 dagen in de regio Hansweert - Bath.....	B2

Figuur 41 – Simulatieresultaten (Sim 00) van de diepteligging na respectievelijk 392, 1078 en 2058 dagen in de regio Bath - Antwerpen	B2
Figuur 42 – Simulatieresultaten (Sim 00) van de verandering van de diepteligging na respectievelijk 392, 1078 en 2058 dagen t.o.v. de vorige outputstap (respectievelijk 0, 392, 1078) in de regio Vlissingen - Terneuzen	B3
Figuur 43 – Simulatieresultaten (Sim 00) van de verandering van de diepteligging na respectievelijk 392, 1078 en 2058 dagen t.o.v. de vorige outputstap (respectievelijk 0, 392, 1078) in de regio Terneuzen - Hansweert	B3
Figuur 44 – Simulatieresultaten (Sim 00) van de verandering van de diepteligging na respectievelijk 392, 1078 en 2058 dagen t.o.v. de vorige outputstap (respectievelijk 0, 392, 1078) in de regio Hansweert - Bath.....	B4
Figuur 45 – Simulatieresultaten (Sim 00) van de verandering van de diepteligging na respectievelijk 392, 1078 en 2058 dagen t.o.v. de vorige outputstap (respectievelijk 0, 392, 1078) in de regio Bath - Antwerpen	B4
Figuur 46 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 02 (MF = 12.25) t.o.v. Sim 00 (MF = 24.5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078) in de regio Vlissingen - Terneuzen	B5
Figuur 47 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 02 (MF = 12.25) t.o.v. Sim 00 (MF = 24.5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078) in de regio Terneuzen – Hansweert.....	B5
Figuur 48 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 02 (MF = 12.25) t.o.v. Sim 00 (MF = 24.5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078) in de regio Hansweert – Bath	B6
Figuur 49 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 02 (MF = 12.25) t.o.v. Sim 00 (MF = 24.5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078) in de regio Bath - Antwerpen.....	B6
Figuur 50 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 03 (MF = 49) t.o.v. Sim 00 (MF = 24.5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Vlissingen - Terneuzen ...	B7
Figuur 51 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 03 (MF = 49) t.o.v. Sim 00 (MF = 24.5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen – Hansweert.	B7
Figuur 52 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 03 (MF = 49) t.o.v. Sim 00 (MF = 24.5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Hansweert - Bath	B8
Figuur 53 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 03 (MF = 49) t.o.v. Sim 00 (MF = 24.5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Bath - Antwerpen.....	B8
Figuur 54 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 04 (MF = 98) t.o.v. Sim 00 (MF = 24.5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Vlissingen - Terneuzen ...	B9
Figuur 55 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 04 (MF = 98) t.o.v. Sim 00 (MF = 24.5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert..	B9
Figuur 56 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 04 (MF = 98) t.o.v. Sim 00 (MF = 24.5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Hansweert - Bath	B10
Figuur 57 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 04 (MF = 98) t.o.v. Sim 00 (MF = 24.5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Bath - Antwerpen.....	B10
Figuur 58 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 11 (Van Rijn) t.o.v. Sim 00 (Engelund-Hansen) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Vlissingen - Terneuzen.....	B11
Figuur 59 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 11 (Van Rijn) t.o.v. Sim 00 (Engelund-Hansen) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert	B11

Figuur 60 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 11 (Van Rijn) t.o.v. Sim 00 (Engelund-Hansen) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Hansweert - Bath	B12
Figuur 61 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 11 (Van Rijn) t.o.v. Sim 00 (Engelund-Hansen) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Bath - Antwerpen	B12
Figuur 62 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 06 (secondary flow) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Vlissingen – Terneuzen	B13
Figuur 63 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 06 (secondary flow) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen – Hansweert.	B13
Figuur 64 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 06 (secondary flow) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Bath	B14
Figuur 65 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 06 (secondary flow) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Bath - Antwerpen	B14
Figuur 66 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 10 (3D) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Vlissingen - Terneuzen	B15
Figuur 67 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 10 (3D) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert	B15
Figuur 68 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 10 (3D) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Hansweert -Bath.....	B16
Figuur 69 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 10 (3D) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Bath - Antwerpen	B16
Figuur 70 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 07 (saliniteit) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 344, 1078, 2058) in de regio Vlissingen - Terneuzen.....	B17
Figuur 71 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 07 (saliniteit) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 344, 1078, 2058) in de regio Vlissingen - Terneuzen.....	B17
Figuur 72 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 07 (saliniteit) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 344, 1078, 2058) in de regio Hansweert - Bath	B18
Figuur 73 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 07 (saliniteit) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 344, 1078, 2058) in de regio Bath - Antwerpen	B18
Figuur 74 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 08 (sec. flow & saliniteit) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Vlissingen - Terneuzen	B19
Figuur 75 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 08 (sec. flow & saliniteit) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert	B19
Figuur 76 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 08 (sec. flow & saliniteit) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Hansweert – Bath	B20
Figuur 77 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 08 (sec. flow & saliniteit) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Bath – Antwerpen	B20
Figuur 78 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 14 (n = 0.026) t.o.v. Sim 00 (n = 0.023) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078) in de regio Vlissingen - Terneuzen	B21

Figuur 79 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 14 ($n = 0.026$) t.o.v. Sim 00 ($n = 0.023$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078) in de regio Terneuzen - Hansweert.....	B21
Figuur 80 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 14 ($n = 0.026$) t.o.v. Sim 00 ($n = 0.023$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078) in de regio Hansweert - Bath	22
Figuur 81 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 14 ($n = 0.026$) t.o.v. Sim 00 ($n = 0.023$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078) in de regio Bath - Antwerpen.....	B22
Figuur 82 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 19 ($\alpha_{bn} = 0.15$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bn} = 1.5$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Vlissingen - Terneuzen ...	B23
Figuur 83 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 19 ($\alpha_{bn} = 0.15$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bn} = 1.5$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert..	B23
Figuur 84 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 19 ($\alpha_{bn} = 0.15$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bn} = 1.5$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Hansweert - Bath.....	B24
Figuur 85 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 19 ($\alpha_{bn} = 0.15$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bn} = 1.5$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Bath - Antwerpen.....	B24
Figuur 86 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 16 ($\alpha_{bn} = 15$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bn} = 1.5$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Vlissingen - Terneuzen ...	B25
Figuur 87 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 16 ($\alpha_{bn} = 15$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bn} = 1.5$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert..	B25
Figuur 88 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 16 ($\alpha_{bn} = 15$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bn} = 1.5$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Hansweert - Bath.....	B26
Figuur 89 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 16 ($\alpha_{bn} = 15$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bn} = 1.5$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Bath - Antwerpen.....	B26
Figuur 90 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 24 ($\alpha_{bs} = 0.1$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bs} = 1$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Vlissingen - Terneuzen.....	B27
Figuur 91 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 24 ($\alpha_{bs} = 0.1$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bs} = 1$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert	B27
Figuur 92 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 24 ($\alpha_{bs} = 0.1$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bs} = 1$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Hansweert - Bath.....	B28
Figuur 93 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 24 ($\alpha_{bs} = 0.1$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bs} = 1$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Bath - Antwerpen	B28
Figuur 94 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 16 ($\alpha_{bs} = 10$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bs} = 1$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Vlissingen - Terneuzen.....	B29
Figuur 95 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 16 ($\alpha_{bs} = 10$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bs} = 1$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert	B29
Figuur 96 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 16 ($\alpha_{bs} = 10$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bs} = 1$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Hansweert - Bath.....	B30
Figuur 97 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 16 ($\alpha_{bs} = 10$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bs} = 1$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Bath - Antwerpen	B30
Figuur 98 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 02 ($D_{50} = 100 \mu\text{m}$) t.o.v. Sim 00 ($D_{50} = 200 \mu\text{m}$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078) in de regio Vlissingen - Terneuzen .	B31
Figuur 99 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 02 ($D_{50} = 100 \mu\text{m}$) t.o.v. Sim 00 ($D_{50} = 200 \mu\text{m}$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078) in de regio Terneuzen - Hansweert	B31

Figuur 100 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 02 ($D_{50} = 100 \mu\text{m}$) t.o.v. Sim 00 ($D_{50} = 200 \mu\text{m}$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078) in de regio Hansweert - Bath ..	B32
Figuur 101 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 02 ($D_{50} = 100 \mu\text{m}$) t.o.v. Sim 00 ($D_{50} = 200 \mu\text{m}$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078) in de regio Bath - Antwerpen..	B32
Figuur 102 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 13 ($D_{50} = 300 \mu\text{m}$) t.o.v. Sim 00 ($D_{50} = 200 \mu\text{m}$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Hansweert - Bath	B33
Figuur 103 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 13 ($D_{50} = 300 \mu\text{m}$) t.o.v. Sim 00 ($D_{50} = 200 \mu\text{m}$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert	B33
Figuur 104 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 13 ($D_{50} = 300 \mu\text{m}$) t.o.v. Sim 00 ($D_{50} = 200 \mu\text{m}$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Hansweert - Bath	B34
Figuur 105 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 13 ($D_{50} = 300 \mu\text{m}$) t.o.v. Sim 00 ($D_{50} = 200 \mu\text{m}$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Bath - Antwerpen	B34
Figuur 106 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim LT30 (3 fracties) t.o.v. Sim 00 ($D_{50} = 200 \mu\text{m}$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Vlissingen - Terneuzen	B35
Figuur 107 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim LT30 (3 fracties) t.o.v. Sim 00 ($D_{50} = 200 \mu\text{m}$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert	B35
Figuur 108 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim LT30 (3 fracties) t.o.v. Sim 00 ($D_{50} = 200 \mu\text{m}$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Hansweert – Bath	B36
Figuur 109 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim LT30 (3 fracties) t.o.v. Sim 00 ($D_{50} = 200 \mu\text{m}$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Bath – Antwerpen	B36
Figuur 110 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 20 (MF = 1) t.o.v. Sim 00 (MF = 24.5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 24, 49, 73) in de regio Vlissingen - Terneuzen	B37
Figuur 111 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 20 (MF = 1) t.o.v. Sim 00 (MF = 24.5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 24, 49, 73) in de regio Terneuzen - Hansweert.....	B37
Figuur 112 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 20 (MF = 1) t.o.v. Sim 00 (MF = 24.5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 24, 49, 73) in de regio Hansweert - Bath	B38
Figuur 113 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 20 (MF = 1) t.o.v. Sim 00 (MF = 24.5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 24, 49, 73) in de regio Bath – Antwerpen	B38
Figuur 114 – Diepteligging aan het begin van de simulatie ($t = 1\text{d}$, links), op het einde van de simulatie ($t = 92\text{d}$, midden) en het verschil tussen beiden ($t = 92\text{d} - 1\text{d}$, rechts) voor de regio Vlissingen - Terneuzen	B39
Figuur 115 – Diepteligging aan het begin van de simulatie ($t = 1\text{d}$, links), op het einde van de simulatie ($t = 92\text{d}$, midden) en het verschil tussen beiden ($t = 92\text{d} - 1\text{d}$, rechts) voor de regio Terneuzen - Hansweert.....	B39
Figuur 116 – Diepteligging aan het begin van de simulatie ($t = 1\text{d}$, links), op het einde van de simulatie ($t = 92\text{d}$, midden) en het verschil tussen beiden ($t = 92\text{d} - 1\text{d}$, rechts) voor de regio Hansweert - Bath	B40
Figuur 117 – Diepteligging aan het begin van de simulatie ($t = 1\text{d}$, links), op het einde van de simulatie ($t = 92\text{d}$, midden) en het verschil tussen beiden ($t = 92\text{d} - 1\text{d}$, rechts) voor de regio Bath - Antwerpen.....	B40

Voorwoord

Dit rapport is onderdeel van de studie “Hydro- en sedimentdynamische en morfologische processen op meso-schaal” in het kader van de Agenda voor de Toekomst. Dit Vlaams-Nederlandse onderzoeksprogramma tracht het inzicht te vergroten in een aantal processen die als prioritair geïdentificeerd werden binnen de Evaluatie van het Verdrag Beleid en Beheer van de VNSC.

Dit rapport kwam tot stand dankzij de inbreng van een aantal personen. Bij aanvang van de studie werden een groot aantal verkennende simulaties uitgevoerd door Gensheng Zhao. In deze verkenning kwamen een aantal problemen aan het licht waarvoor Gensheng mogelijke oplossingen heeft aangereikt. Deze resultaten hebben de basis gevormd voor de simulaties die in voorliggend rapport beschreven worden.

De resultaten van de verschillende simulaties binnen het gevoeligheidsonderzoek werden omgezet naar verschilplots in een GIS-omgeving. Deze actie werd uitgevoerd door de GIS-medewerkers Katrien Wouters, Julie Delue en Raf Hertoghs (Antea Group).

De tussentijdse resultaten in het onderzoek werden op regelmatige tijdstippen intern en extern gepresenteerd. De projectgroep “Storten en Meergeulen” binnen de werkgroep O&M zorgde voor de externe opvolging en leverde inspirerende suggesties en commentaren om de resultaten te verbeteren. Daarnaast vond op regelmatige tijdstippen overleg plaats met de collega’s van Deltares (o.l.v. Jebbe van der Werf), die eveneens een gelijkaardig opdracht uitvoerden binnen het kader van de Agenda voor de Toekomst.

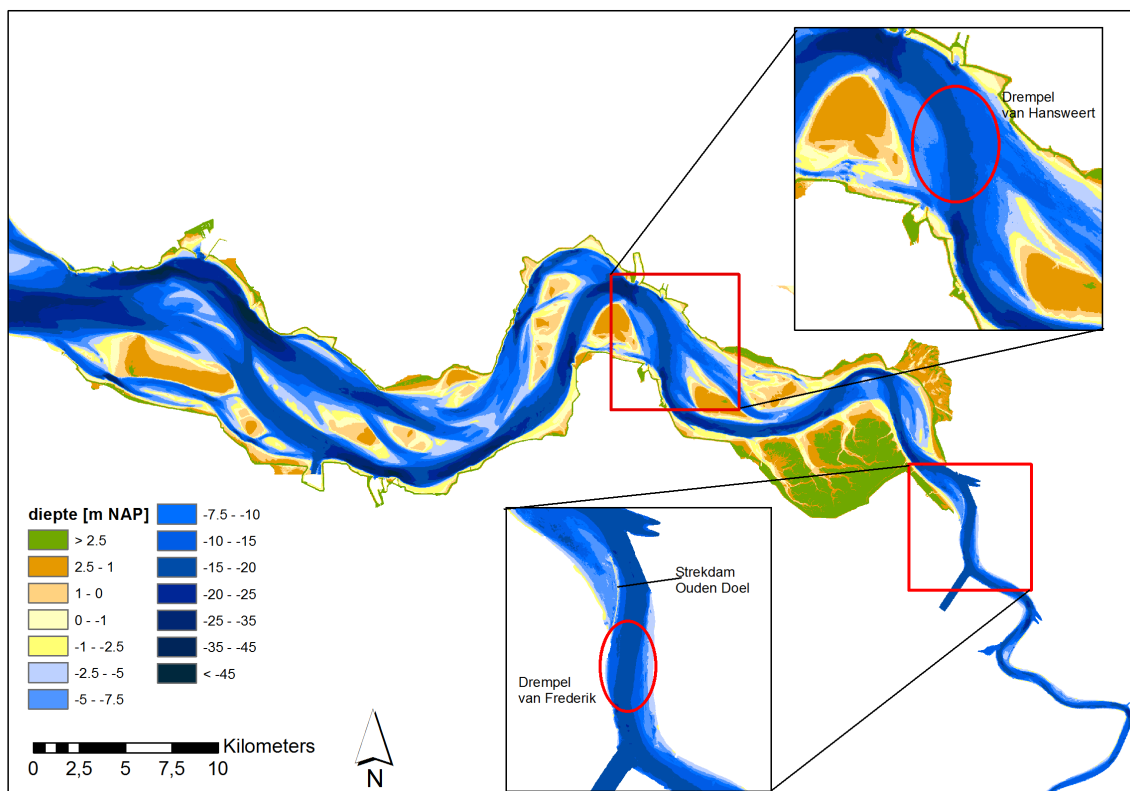
1 Inleiding

Dit rapport is een onderdeel van het project 'Hydro- en sedimentdynamische en morfologische processen op meso-schaal', dat kadert binnen Agenda voor de Toekomst. Deze Agenda voor de Toekomst kwam tot stand in het kader van de eerste evaluatie van het Verdrag gemeenschappelijk Beleid en Beheer. De Vlaams-Nederlandse Schelde-Commissie heeft met deze Agenda ingestemd op de najaarsvergadering van 2013. Hierop volgend werd een Plan van Aanpak (Beirinckx *et al.*, 2013) opgemaakt, dat de leidraad vormt voor het onderzoek 2014-2017.

Het project 'Hydro- en sedimentdynamische en morfologische processen op meso-schaal', dat onderdeel is van thema 7 uit de Agenda "Morfologische en ecologische effecten sedimentstrategie", tracht de inzichten in de hydro- en sedimentdynamische en morfologische processen op meso-schaal te verbeteren.

Binnen dit project zal gebruik gemaakt worden van numerieke modellen. Deze modellen zullen worden ingezet om de morfologische ontwikkelingen op de meso-schaal, gericht op specifieke plaat- of geulsystemen, te reproduceren. De aandacht zal uitgaan naar zowel de sedimentatie ter hoogte van drempels als de sedimentdynamica van gestorte specie in diepe delen (van de hoofdgeul). Binnen het project worden hiervoor data-analyses uitgevoerd om de werkelijk opgetreden patronen in beeld te brengen. In Vos *et al.* (2016) werd een analyse uitgevoerd van de sedimentatie ter hoogte van de drempel van Hansweert (Westerschelde) en de drempel van Frederik (Beneden-Zeeschelde). Deze locaties zijn aangeduid in Figuur 1.

Figuur 1 – Ligging van de drempel van Hansweert en drempel van Frederik binnen het Schelde-estuarium (uit Vos *et al.* (2016))



Vooraleer deze reële cases te bestuderen met het numerieke model, werd een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd, waarbij het belang van diverse parameters onderzocht werd. Hierbij wordt voornamelijk het gedrag rond de drempels besproken. De resultaten van dit gevoeligheidsonderzoek worden in dit rapport gepresenteerd. In een volgende fase volgt een validatie van het model op basis van gemeten stroomsnelheden en sedimenttransport ter hoogte van de drempel van Frederik en Hansweert, zoals beschreven in Vandebroek *et al.* (2017 a,b), alsook de morfologische veranderingen ter hoogte van de drempels, zoals bepaald in Vos *et al.* (2017).

Het volledige project 'Hydro- en sedimentdynamische en morfologische processen op meso-schaal' bestaat dus uit een reeks van rapporten. Hierbij wordt gefocust op de drempelgebieden (drempel van Hansweert en drempel van Frederik) en diepe delen (SH41). De rapporten m.b.t. drempels binnen bovengenoemd project zijn:

1. Data-analyse: Vos *et al.* (2017)
2. Analyse metingen: Vandebroek *et al.* (2017a, b)
3. Gevoeligheidsanalyse numeriek model: dit rapport
4. Validatie numeriek model: Stark *et al.* (in voorbereiding)

De rapporten m.b.t. (storten in) diepe delen zijn hieronder opgelijst:

1. Data-analyse: Plancke *et al.* (in voorbereiding)
2. Gevoeligheidsanalyse numeriek model: Vos *et al.* (in voorbereiding)

2 Morfologisch modelleren

2.1 Inleiding

In een morfologisch model wordt de waterbeweging (hydrodynamische berekening) gekoppeld aan een sedimentbeweging. Voor de sedimentbeweging zijn verschillende sedimenttransport formuleringen beschikbaar, die allen een empirische oorsprong hebben. Een overzicht van de formuleringen die hier gebruikt kunnen worden, wordt gegeven in sectie 2.2. Divergentie in sedimenttransport veroorzaakt lokaal erosie en sedimentatie. In een morfologische berekening, zoals in dit rapport worden beschouwd, wordt de bathymetrie bijgevolg in elke tijdsstap aangepast. Voor deze morfologische update kunnen eveneens een aantal parameters gekozen worden, zoals beschreven in sectie 2.3.

2.2 Sediment transport

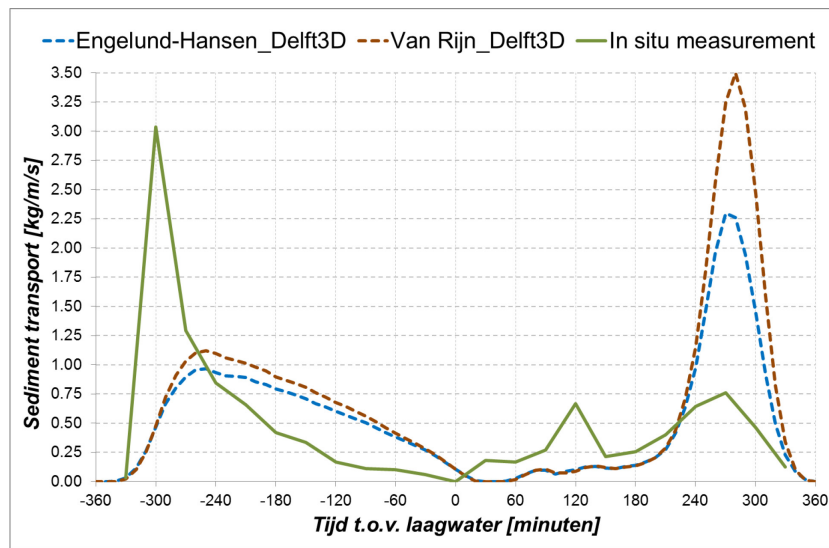
In een numeriek model worden de berekende snelheden, bekomen door het oplossen van de continuïteits- en bewegingsvergelijkingen, gebruikt in de sedimenttransport berekeningen. In de literatuur zijn verschillende sedimenttransport formuleringen beschikbaar.

Binnen Delft3D kan gebruikt gemaakt worden van verschillende sedimenttransport formuleringen. Volgende formules zijn standaard beschikbaar (Deltares, 2011):

- Van Rijn (1993)
- Engelund-Hansen (1967)
- Meyer-Peter-Muller (1948)
- Bijker (1971)
- Van Rijn (1984)
- Soulsby/Van Rijn
- Soulsby
- Ashida–Michiue (1974)
- Van Rijn (2007)

In Ceuppens & Darcis (2015) werd een vergelijking gemaakt tussen o.a. een aantal beschikbare sedimenttransport metingen in het Schelde-estuarium en een numeriek model in Delft3D waarbij het sedimenttransport gesimuleerd werd met verschillende formules (Figuur 2). Aangezien de verschillende formules empirisch van aard zijn en een specifiek toepassingsgebied hebben (bv. bepaald type van sediment), wordt, gebaseerd op eerdere ervaringen, binnen deze studie gefocust op de formule van Engelund-Hansen (1967) en de formule van Van Rijn (1993).

Figuur 2 – Vergelijking sedimenttransport: meting en numeriek model met formule van Van Rijn en Engelund-Hansen (gebaseerd op Ceuppens en Darcis (2015))



2.2.1 Engelund en Hansen (1967)

De transportformule van Engelund-Hansen (1967) is gebaseerd op het energiebalans concept en berekent direct het totale sedimenttransport. De formule wordt uitgedrukt in volgende vergelijking:

$$\vec{q} = \frac{0,05 |u^4| \cdot \vec{x}}{\sqrt{g} \cdot C^3 \cdot \Delta^2 \cdot D_{50}} \quad (2.1)$$

De grootte van het sediment transport q ($m^3/m/s$) wordt gerelateerd aan:

U	[m/s]	Diepte-gemiddelde snelheid
$\Delta = (\rho_s - \rho_w) / \rho_w$	[-]	Relatieve dichtheid sedimentdeeltjes
g	[m/s ²]	Valversnelling
C	[m ^{1/2} /s]	Chézy coëfficiënt
D_{50}	[m]	Mediane korrelgrootte

2.2.2 Van Rijn (1993)

De sedimenttransportformule van Van Rijn (1993) maakt een onderscheid tussen sedimenttransport over de bodem (q_b [kg/m/s]) en in suspensie (q_s [kg/m/s]) (zie o.a. Deltares (2011)). De hoogte waarop dit onderscheid wordt gemaakt, wordt aangeduid met de referentiehoogte. Deze referentiehoogte is afhankelijk van de bodemruwheid (Lesser, 2009).

Voor het bodemtransport wordt een benaderende methode (vergelijking 2.2) gebruikt, voor de berekening van het periode gemiddelde (in het geval van golven) bodemtransport, zoals besproken in Deltares (2011). Deze benadering wordt berekend als:

$$|q_b| = 0,006 \rho_s \cdot w_s \cdot D_{50} \cdot M^{0.5} \cdot M_e^{0.7} \quad (2.2)$$

met:

ρ_s	[kg/m ³]	dichtheid van het sediment
w_s	[m/s]	valsnelheid van de D_{50} van het bodemmateriaal
$M = \frac{U^2}{\Delta \cdot g \cdot D_{50}}$	[-]	het sediment mobiliteitsgetal
$M_e = \frac{(U - U_{kr})^2}{\Delta \cdot g \cdot D_{50}}$	[-]	het 'overmatig' mobiliteitsgetal

Het onderscheid tussen M en M_e is dus het in rekening brengen van de kritische dieptegemiddelde snelheid voor begin van sedimentbeweging (U_{kr}), in het geval van M_e . U is de equivalente dieptegemiddelde snelheid, berekend op basis van de snelheid in de onderste rekencel en gebruik makende van een veronderstelling van het logaritisch snelheidsprofiel.

Voor het suspensietransport wordt gebruik gemaakt van uitdrukking 2.3, in het geval van een tweedimensionale (diepte gemiddelde) berekening:

$$\frac{\delta[h c]}{\delta t} + \frac{\delta[h U c]}{\delta x} + \frac{\delta[h V c]}{\delta y} = h \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_H \frac{\delta c}{\delta x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_H \frac{\delta c}{\delta y} \right) \right] + h S \quad (2.3)$$

Hierbij is c de diepte gemiddelde sediment concentratie, h de waterdiepte, D_H is de horizontale diffusiviteit en S een sediment bronterm. Deze term kan geschreven worden als:

$$S = \frac{c_{eq} - c}{T_s} = \frac{S_{sus,eq}}{|U|h} \quad (2.4)$$

Met c_{eq} de diepte gemiddelde equilibrium concentratie en $S_{sus,eq}$ de diepte gemiddelde suspensie sediment transport vector. De equilibrium sediment concentratie wordt berekend door een numerieke integratie van de stationaire één-dimensionale advection-diffusie vergelijking (Lesser, 2009):

$$c_{eq} w_s + D_v \frac{dc_{eq}}{dz} = 0 \quad (2.5)$$

Hier is D_v de verticale sediment diffusie coefficient, zoals voorgesteld in Van Rijn (1993). Voor een 3D simulatie wordt vergelijking 2.3 uitgebreid in 3 dimensies. Er wordt een onderscheid gemaakt in bodemtransport en suspensietransport, gebruik makende van de referentiehoogte a . Op deze hoogte wordt een referentieconcentratie C_a [kg/m³] bepaald, als volgt:

$$C_a = 0.015 \rho_s \frac{D_{50} \cdot T_a^{1.5}}{a \cdot D_*^{0.3}} \quad (2.6)$$

Hierbij zijn D_* en T_a respectievelijk een dimensieloze sedimentdiameter en een dimensieloze bodem schuifspanning. Sedimenttransport boven referentiehoogte a wordt beschouwd als suspensietransport, onder referentiehoogte a als bodemtransport. Gebaseerd op de berekende concentraties, wordt de volgende sedimenttransport berekend (Van Rijn, 2003):

$$q_{s,x} = \int_a^h \left(u c - \varepsilon_s \frac{\partial c}{\partial x} \right) dz \quad (2.7)$$

Waarbij ε_s de eddy – diffusiviteit van de sedimentfractie [m²/s] is. Deze advection-diffusievergelijking wordt berekend tussen de referentiehoogte a en het wateroppervlak.

Door de oplossing van de advection-diffusie vergelijking is het suspensietransport niet volledig bepaald door de lokale condities in het rekenpunt, in tegenstelling tot de berekening m.b.v. de formule van Engelund-Hansen.

2.2.3 Wijzigingen aan het bodemtransport

Naast het effect van stroming en sedimentkarakteristieken, wordt het bodemtransport ook beïnvloed door gradiënten in de bathymetrie. Aangezien de formule van Engelund – Hansen, die een totaal transport berekend, in Delft3D wordt afgehandeld als bodemtransport, worden ook deze sedimentfluxen aangepast afhankelijk van de bodemgradiënt. De grootte van het bodemtransport wordt aangepast in twee stappen. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen de helling in de richting van het transport (longitudinale bodemhelling) en een helling loodrecht hierop (de transverse helling). Eerst wordt de grootte aangepast ten gevolge van de longitudinale bodemhelling:

$$\vec{q}'_b = \alpha_s \vec{q}_b^n \quad (2.8)$$

Met

$$\alpha_s = 1 + \alpha_{bs} \left[\frac{\tan(\varphi)}{\cos(\tan^{-1}(\frac{\delta z_b}{\delta s})) \cdot (\tan(\varphi) - \frac{\delta z_b}{\delta s})} - 1 \right] \quad (2.9)$$

hierbij is α_{bs} een coëfficiënt met default waarde 1 en φ de interne wrijvingshoek van het bodemmateriaal. In een tweede stap wordt de richting van het bodemtransport aangepast voor een bodemhelling loodrecht op het initiële sedimenttransport. De grootte wordt berekend als volgt:

$$q_n = |q'_b| \cdot \alpha_{bn} \cdot \frac{u_{cr}}{|U|} \cdot \frac{\partial z_n}{\partial n} \quad (2.10)$$

met α_{bn} een coëfficiënt met default waarde 1.5. Voor de Van Rijn formulering zal enkel het bodemtransport q_b worden aangepast, voor Engelund-Hansen is dit het volledig transport (aangezien q_{tot} wordt afgehandeld als q_b in Delft3D). De kalibratie van deze parameters blijkt gevoelig te zijn voor gridresolutie.

2.3 Morfologie

In een morfologisch model wordt de bathymetrie aangepast op basis van het lokale sedimenttransport. Dit kan worden uitgedrukt met volgende vergelijking, die het behoud van sediment beschrijft:

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{1}{1-\varepsilon} \nabla \cdot \vec{q} \quad (2.11)$$

waarbij ε de bodem porositeit (default = 0.4), z_b de bodemligging (m), \vec{q} het sediment transport in respectievelijk de x- en y-richting ($m^3/m/s$). Er is dus enkel een verandering van de bodem in deze rekencellen die niet droog zijn. Indien echter bv. veel erosie plaatsvindt nabij een oever, kan deze droge oever ook worden betrokken in de berekening.

Aangezien de morfologische veranderingen gebeuren op een tijdschaal die 1 à 2 ordes groter is dan de hydrodynamische tijdschalen (Stive et al., 1990; Latteux, 1995), kan de morfologische respons worden versneld met behulp van een morfologische versnellingsfactor (MF) zoals aangegeven in vergelijking 2.12.

$$\Delta t_{morfologie} = MF * \Delta t_{hydrodynamisch} \quad (2.12)$$

Zo leidt, met een morfologische versnellingsfactor MF van 24.5, een simulatie van één volledige springtij-doodtij-cyclus (ca. 14,5 dagen) tot een morfologische ontwikkeling van ongeveer 1 jaar.

2.4 Literatuurstudie morfologisch modelleren

Morfologische modellen kunnen worden ingezet met verschillende doelstellingen. Zo kunnen ze gebruikt worden om inzicht te krijgen in de morfologische evoluties in relatie tot menselijke ingrepen (in- of ontpolderingen, variatie in bovenafvoer, sedimentonttrekkingen, vaargeul-verruiming, onderhoudsbaggerwerken,...) op verschillende tijdschalen, gaande van zeer korte tijdschalen (een enkele stormevent) tot zeer langlopende ontwikkelingen (decennia). De focus kan hierbij o.a. liggen op de inschatting van volumeveranderingen van geulen en platen, het inschatten van lokale sedimentatie – en erosiefenomenen of bagger- en storthoeveelheden.

Een hele reeks modellen kan worden gebruikt voor het uitvoeren van morfologische modellering. In de afgelopen jaren werden voor het Schelde-estuarium verschillende studies uitgevoerd waarbij morfologische modellen werden ingezet. Hierbij werd gebruik gemaakt van verschillende software-pakketten zoals Delft3D (ZEEKENNIS (WL Delft Hydraulics & Alkyon (2004)); LTV O&M (WL Delft Hydraulics, 2006); IMDC et al., 2013; ...) en FINEL2d (Svasek, 2006; Dam et al., 2015). Aangezien de morfologie van het Schelde-estuarium gekarakteriseerd wordt door variaties in de diepte maar ook in de planvorm (ligging van platen en geulen), is het noodzakelijk gebruik te maken van (minimaal) 2-dimensionale modellen om de morfologische ontwikkelingen voldoende trachten te reproduceren. Aangezien ook bochtstromingen etc. belangrijk zijn zou een 3D model beter geschikt moeten zijn, maar gezien de rekentijden is dit veelal niet mogelijk. Deze bochtstromen kunnen ook geparametriseerd worden m.b.v. een secundaire stroming implementatie. In volgende paragrafen wordt dan ook ingegaan op voorgaande studies uitgevoerd met meerdimensionale numerieke modellen in het Schelde-estuarium. Een overzicht van stromingsmodellen in de Westerschelde en het mondingsgebied is ook te vinden in van der Werf (2016).

Naast de complexe morfologische modellen, waarbij uitgegaan wordt van een werkelijke topo-bathymetrie, zijn er een aantal geïdealiseerde modelstudies (vertrekkende van bv. vlakke bodem, of geschematiseerde geometrie) die uitgevoerd werden om meer inzicht te krijgen in de onderliggende hydro- en morfodynamische processen. Deze worden eveneens kort toegelicht. In Tabel 1 wordt een overzicht gegeven van de verschillende parameterinstellingen die binnen de verschillende studies gehanteerd werden.

2.4.1 Delft3D

In het kader LTV- O&M werd één van de eerste complexe morfologisch modellen opgebouwd in Delft3D. Binnen de ZEEKENNIS-studie (WL Delft Hydraulics & Alkyon (2004) in opdracht van RIKZ), werd het bestaande hydrodynamische model “KUSTZUID” uitgebreid met sedimenttransport en morfologie. Na een gevoeligheidsanalyse (gericht op het jaar 2001) werden simulaties uitgevoerd voor 2 kalibratie-periodes: enerzijds 1998-2002 (na de tweede verruiming) en anderzijds 1960-1966 (voor de eerste verruiming). Na een optimalisatie van de parameter-instellingen werd een validatie uitgevoerd voor de periode 1970-1985. Er werd toegespitst op volgende resultaten:

- Volumeveranderingen per macrocel
- Totale jaarlijkse volumes van de onderhoudsbaggerwerken
- Residuele sedimenttransporten, in analogie met zandbalansberekeningen
- Sedimentatie-erosiepatronen

Het rapport geeft voor verschillende toepassingen de inzetbaarheid van het model. Hierbij wordt een score tussen 1 en 5 toegekend, waarbij een score van 1 overeenkomt met een zeer lage inzetbaarheid en een score 5 met een zeer goede inzetbaarheid. In Tabel 1 wordt dit overzicht overgenomen. Deze score is eerder subjectief en weerspiegelt de ervaring van de gebruikers en de status van de modellen.

Binnen deze studie worden een aantal aanbevelingen gedaan:

- invloed van een ruimtelijke variatie van de korreldiameter
- invloed van de bodemruwheid

- invloed van het dwarshellingseffect
- invloed van de sedimenttransportgrootte

Deze aanbevelingen werden opgenomen binnen de vervolgstudie “LTV O&M actieplan voor morfologisch onderzoek modelinstrumentarium - Delft3D” (WL Delft Hydraulics, 2006), als voorbereiding op het onderzoek in het kader van het MER verruiming vaargeul. Naast de bovenstaande aanbevelingen werd binnen deze studie ingegaan op

- 1) een bijkomende validatie van de waterbeweging op basis van de vlottermetingen nabij de Plaat van Walsoorden,
- 2) de voorspelhorizon van het morfologisch model,
- 3) een morfologische simulatie van de proefstortingen bij Walsoorden en
- 4) het opzetten van een fijn morfologisch model

Tabel 1 – Overzicht inzetbaarheid ZEEKENNIS-model (uit WL Delft Hydraulics & Alkyon, 2004)

Toepassing	Score
Waterbeweging (getijvoortplanting, -asymmetrie, ...)	5
Volumes onderhoudsbaggerwerk, effecten van ingrepen, ondersteuning conceptuele modellen	4
Effecten van ingrepen op macro-schaal Gedrag van drempels Ruimtelijke en temporele variatie in sedimenttransport patronen	3
Effect van ingrepen op residuele transport en sedimentbalansen	2-3
Effect van ingrepen op intergetijdengebieden	2
Ontwikkelingen van schorren	1-2

De studie concludeerde m.b.t. morfologie dat de resultaten een verbetering laten zien ten opzichte van de eerder behaalde resultaten binnen de ZEEKENNIS-studie. De berekende jaargemiddelde erosie en sedimentatie voor een periode van vier jaar wordt minder overschat en is meer in overeenstemming met de observaties. De netto zandvolumeveranderingen van de eb- en vloedgeulen van de macrocellen worden beter gereproduceerd. Totale jaarlijkse baggerhoeveelheden voor de Westerschelde worden door het model met een nauwkeurigheid van enkele procenten weergegeven; voor de Beneden-Zeeschelde wordt het totale baggervolume (alleen zand) 20% overschat. In de monding is sprake van een overschatting met een factor twee. Veranderingen van arealen worden nu beter gereproduceerd, vooral wanneer ook de jaarlijkse (natuurlijke) variaties worden beschouwd, welke resulteren in onzekerheidsbanden rondom de metingen. Het model berekent een geringe netto export van sediment ter plaatse van de zeewaartse rand van de Westerschelde, dit in tegenstelling tot een netto import tijdens ZEEKENNIS.

Met betrekking tot de inzetbaarheid in het kader van het MER voor de verruiming van de vaargeul, dat op een tijdschaal van vijf jaren het model redelijk het gedrag op kleinere ruimteschalen beschrijft: het erosiesedimentatiepatroon, de netto zandvolumeveranderingen van de afzonderlijke eb- en vloedgeulen, de arealen van de macrocellen, de totale en lokale baggerhoeveelheden en de netto sedimenttransporten.

Voor tijdschalen van tien jaren kan in redelijke mate het gedrag van de netto zandvolumeveranderingen en de arealen op het aggregatieniveau van de gehele Westerschelde worden beschreven. Op deze langere tijdschalen kan niet van alle macrocellen de kanteling van de eb- en vloedgeulen worden aangegeven. Ook kunnen stortvakken in het model vol lopen, wat leidt tot de oneigenlijke vorming van “eilanden” in het gebied.

Het zijdelings migreren van platen naar de vaargeul, wat aanleiding geeft tot een toename van het baggerwerk, wordt niet door het model weergegeven. Indien gebruik wordt gemaakt van door het model berekende sedimenttransporten dient te worden gerealiseerd, dat het model niet is gekalibreerd of geverifieerd aan de hand van transportmetingen. Het model is slechts in beperkte mate gevalideerd voor de monding.

In de vervolgstudie in het kader van LTV O&M – Veiligheid & Toegankelijkheid (V&T), wordt het model geactualiseerd. De resultaten hiervan worden beschreven in IMDC et al. (2013a). De NEVLA-schematisatie wordt eveneens gebruikt, waarvoor de waterbeweging uitvoerig gekalibreerd werd [Maximova et al. (2009)]. Het model wordt getoetst op een periode van 4 jaar, op basis van sedimentatiehoeveelheden (volumeverandering, totale sedimentatie en erosie) en ook sedimentatie – erosiepatronen. Daar waar in de eerste studie binnen ZEEKENNIS de formulering van Van Rijn (versie 1993) gebruikt werd, werd dit in LTV O&M [WL Delft Hydraulics & Alkyon, 2006] gewijzigd naar de formule van Engelund-Hansen (1967). Binnen de laatste actualisatie van het Delft3D-model werd opnieuw de formulering van Van Rijn (versie 2007) gekozen.

2.4.2 Finel2D

In het kader “LTV O&M actieplan voor morfologisch onderzoek modelinstrumentarium” werd tevens een morfologisch modelinstrumentarium opgemaakt met behulp van de FINEL2D software [Svasek, 2006]. In tegenstelling tot Delft3D, maakt FINEL2D gebruik van een ongestructureerde schematisatie (eindige elementen methode). Hierdoor kunnen complexe vormen makkelijker meegenomen worden in de model schematisatie. In een eerste stap werd een hydrodynamisch model opgemaakt voor het Schelde-estuarium, waarna de morfologische module werd toegevoegd. De studie concludeert inzake inzetbaarheid dat omwille van het krappe tijdschema niet alle relevante onderzoeksvragen uitputtend zijn behandeld, en dat tot op het laatste moment een wisselwerking heeft plaatsgevonden tussen modelconcept en modelresultaat. De wijze waarop spiraalstroming is behandeld is een voorbeeld van deze wisselwerking. Op een groot aantal locaties worden door het model bodemveranderingen berekend die gelijkenis vertonen met de werkelijkheid. In de huidige staat is het model daarom vooral geschikt als ondersteunend instrument van de morfoloog bij zijn analyses van het gedrag van het estuarium en de effecten van ingrepen. Vooral nog moeten de modelresultaten kwalitatief worden geïnterpreteerd. Absolute uitspraken (bijvoorbeeld over meer/minder aantal hectares ondiep water) mogen nog niet aan het model worden ontleend. Als aanbeveling voor vervolgonderzoek worden 3D effecten, verdere aandacht aan ruwheidseffecten, spiraalstroming en verbetering van de bagger- en stortinvoer gesuggereerd.

In de vervolgstudie in het kader van LTV O&M – Veiligheid & Toegankelijkheid (V&T), wordt het model geactualiseerd. De resultaten hiervan worden beschreven in IMDC et al. (2013b). Het FINEL model is geactualiseerd door middel van optimalisaties van het rooster, de waterbeweging en de morfologie en het uitvoeren van validaties. Geconcludeerd kan worden dat het FINEL2d model de waterbeweging goed kan reproduceren. Het model is voldoende betrouwbaar voor de waterstanden in de monding, de Westerschelde en de Zeeschelde. Een controle op diverse gemeten stroomsnelheden laat een goede reproductie zien. De modelresultaten van de morfologie voor de periode 1998-2002 komen in een groot deel van de Westerschelde overeen met de gemeten ontwikkelingen. Op een aantal locaties zoals diepe putten en in de monding zijn afwijkingen te zien. De berekende baggerlocaties en volumes van het FINEL model komen goed overeen met de werkelijkheid. Het model is op vier punten verbeterd ten opzichte van de standaardrun:

- een aangepaste hydraulische ruwheid van het intergetijdengebied.
- een ruimtelijk variërende d_{50} , waarbij $300\ \mu\text{m}$ in de monding gehanteerd is, geleidelijk afnemend tot $150\ \mu\text{m}$ in het oosten.
- een ruimtelijk variërende valsnelheid van het sediment, gebaseerd op de ruimtelijke d_{50} van punt 2.
- de niet-erodeerbare laag is aangepast (Dam, 2012).

Al deze 4 punten geven een verbetering van de resultaten. Geconcludeerd wordt dat het model opgetreden morfologische ontwikkelingen grotendeels kan reproduceren voor grootschalige fenomenen op lange tijdschalen (110 jaar hindcast) en kleinschalige fenomenen op korte tijdschalen (plaatrandstorting).

2.4.3 Geïdealiseerde modellen

In geïdealiseerde modellen worden de belangrijkste processen meegenomen in het model, maar worden ook een aantal sterke vereenvoudigingen gemaakt. Zo kan bv. de vorm van het estuarium worden geïdealiseerd (exponentieel verloop van estuarium) of wordt vertrokken van een eenvoudige vlakke bodem (Nnafie et al. (2016) en van der Wegen (2010)).

In van der Wegen (2010) wordt zowel een 2D als 3D model, bestaande uit 10 sigma lagen, gebruikt. De grid extensie is gelijkaardig als het NeVLa grid, maar de resolutie groffer. Als morfac parameter wordt een waarde van 50 tot 400 gebruikt. Zones worden aangeduid waarin baggerwerken worden gesimuleerd. In het algemeen, op basis van visuele vergelijkingen, wordt gesteld dat de 2D simulaties rechtere kanalen worden voorspeld vergeleken met 3D simulaties. Lage waarden van de 'bed slope factor' α_{bn} leiden tot meerdere kanalen in laterale richting, welke onrealistisch lijken.

In Nnafie et al. (2016) wordt een 2D Delft3D run vergeleken met Telemac2D voor een geïdealiseerd basin met een connectie naar zee. In het Telemac model worden meer diffuse patronen waargenomen vergeleken met Delft3D, waardoor deze eerste niet geschikt wordt bevonden voor morfologische simulaties. Vervolgens wordt een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd voor verschillende (geïdealiseerde) grids, verschillende initiële bathymetriën en dikte van de erodeerbare laag. Eén van de hypothesen voor de geobserveerde verschillen tussen de huidige bathymetrie en de simulaties is het niet in rekening brengen van golfwerking.

Tabel 2 – Overzicht van gehanteerde parameters in eerdere studies

Referentie	Model	Termijn	Transport formule	MF	Ruwheid	Zout	D50	α_{bs}	α_{bn}	Opmerking
ZEEKENNIS WL Delft & Alkyon (2004)	Delft3D Kustzuid Run042	5-15 jr	Van Rijn (1993)	120	Ruimtelijk Manning	Neen ?	200 μm	1	100	Morfologisch getij (25u) 1 jaar inspeel morfologie Ruimtelijke variatie erodeerbare lagen Geen golven
LTV O&M WL Delft Hydraulics (2006)	Delft3D NEVLA Run119h	5-15 jr	E-H (1967)	120	Ruimtelijk Manning	Neen ?	200 μm	1	10	ZEEKENNIS-opmerkingen geldig Sedimenttransport x 0,5 (Molinas & Wu, 2001) Interventiediepte baggeren = diepte + 0,7m
LTV O&M Svasek (2006)	FINEL	5-15 jr	E-H (1967)	24,75	Ruimtelijk Nikuradse	Neen	150 μm $w_s =$ 1,5cm/s			Ongestructureerd rooster 1 jaar inspeel morfologie Morfologische ruwheid = 0,02 m
V&T-onderzoek IMDC et al. (2013a)	Delft3D NEVLA	5 jr	Van Rijn (2007)	26	Ruimtelijk Manning	Neen	200 μm	1	100	1 jaar inspeel morfologie Morfac = 104 voor validatie
V&T-onderzoek IMDC et al. (2013b)	FINEL	5 jr 100 jr	E-H (1967)	24,75	Ruimtelijk Nikuradse	Neen	150 μm			Ongestructureerd rooster 1 jaar inspeel morfologie Parametrisatie spiraalstroming aan Morfologische ruwheid = 0,05 m
Van Der Wegen	Delft3D	200 jr	Van Rijn E-H							
AvdT Nnafie et al. (2016)	Delft3D	200 j	EH	100	constant	Neen	200 μm	1	20	Model werd recentelijk ingezet voor een verkennde studie naar de impact van de aanleg van een nieuwe geul in het mondingsgebied

Referentie	Model	Termijn	Transport formule	MF	Ruwheid	Zout	D50	α_{bs}	α_{bn}	Opmerking
ZEEKENNIS WL Delft & Alkyon (2004)	Delft3D Kustzuid Run042	5-15 jr	Van Rijn (1993)	120	Ruimtelijk Manning	Neen ?	200 μm	1	100	Morfologisch getij (25u) 1 jaar inspeel morfologie Ruimtelijke variatie erodeerbare lagen Geen golven
LTV O&M WL Delft Hydraulics (2006)	Delft3D NEVLA Run119h	5-15 jr	E-H (1967)	120	Ruimtelijk Manning	Neen ?	200 μm	1	10	ZEEKENNIS-opmerkingen geldig Sedimenttransport x 0,5 (Molinas & Wu, 2001) Interventiediepte baggeren = diepte + 0,7m
LTV O&M Svasek (2006)	FINEL	5-15 jr	E-H (1967)	24,75	Ruimtelijk Nikuradse	Neen	150 μm $w_s =$ 1,5cm/s			Ongestructureerd rooster 1 jaar inspeel morfologie Morfologische ruwheid = 0,02 m
V&T-onderzoek IMDC et al. (2013a)	Delft3D NEVLA	5 jr	Van Rijn (2007)	26	Ruimtelijk Manning	Neen	200 μm	1	100	1 jaar inspeel morfologie Morfac = 104 voor validatie
V&T-onderzoek IMDC et al. (2013b)	FINEL	5 jr 100 jr	E-H (1967)	24,75	Ruimtelijk Nikuradse	Neen	150 μm			Ongestructureerd rooster 1 jaar inspeel morfologie Parametrisatie spiraalstroming aan Morfologische ruwheid = 0,05 m
Van Der Wegen	Delft3D	200 jr	Van Rijn E-H							
AvdT Nnafie et al. (2016)	Delft3D	200 j	EH	100	constant	Neen	200 μm	1	20	Model werd recentelijk ingezet voor een verkennde studie naar de impact van de aanleg van een nieuwe geul in het mondingsgebied

3 Opbouw van het model

3.1 Grid

Het numeriek 2D-model gebruikt in deze studie is het zogenaamde NEVLA-model. Het NEVLA-model is een hydrodynamisch model ontwikkeld met SIMONA (Verheyen *et al.*, 2012 en Maximova *et al.*, 2013). Dit model omvat het volledige Schelde-estuarium: een deel van de Noordzee, de Vlakte van de Raan, de Westerschelde, Zeeschelde en de getijgebonden zijrivieren in Vlaanderen. De afwaartse rand van het NEVLA-model is gelegen in de Noordzee. De opwaartse randen zijn gelegen aan de grenzen van het tijgebied. De resolutie van de rekenrooster varieert van ongeveer 400 m op de Noordzee en neemt geleidelijk af tot ongeveer 30 meter in de buurt van Schelle. Aan de drempel van Hansweert, varieert de resolutie tussen 30 – 40 m (plaat van Ossensisse) in de binnenbocht tot 60 – 90 meter in de buitenbocht (en vaargeul). Bij de drempel van Frederik ligt de ruimtelijke resolutie tussen 65 en 85 meter.

Figuur 3 – Illustratie van het NEVLA rooster.
De witte lijn illustreert de lijn Westkappelle-Cadzand, waar het model wordt afgesneden.



In deze studie wordt de afwaartse rand van het model afgesneden ter hoogte van de lijn Westkappelle - Cadzand, zoals aangeduid in Figuur 3. Het gedeelte van het grid in de Noordzee wordt dus buiten beschouwing gelaten.

3.2 Bathymetrie

De topo-bathymetrie van de Westerschelde en de Beneden-Zeeschelde zijn gebaseerd op metingen van 2011 aangeleverd door respectievelijk Rijkswaterstaat en Vlaamse Hydrografie. De bathymetrie van de intertidale

gebieden is gebaseerd op LIDAR-metingen van 2011. Bij overlap tussen LIDAR en bathymetrische gegevens, is voorkeur gegeven aan bathymetrie. TAW wordt gebruikt als verticaal referentievlak.

De bathymetrische data van de Westerschelde zijn beschikbaar met een resolutie van 20x20m (interpolatie van singlebeam echosounding raaien). De bathymetrische data van de Zeeschelde zijn beschikbaar met een resolutie van 1x1m (gebiedsdekkende multibeam peilingen). Deze werden ten behoeve van deze studie omgezet naar een 5x5m grid om de totale bestandsgrootte van het samengestelde bathymetrische grid werkbaar te houden. Aangezien de gridcellen van het model groter zijn dan 5x5 m vormt dit geen probleem voor het aanmaken van de modelbathymetrie.

3.3 Randvoorwaarden

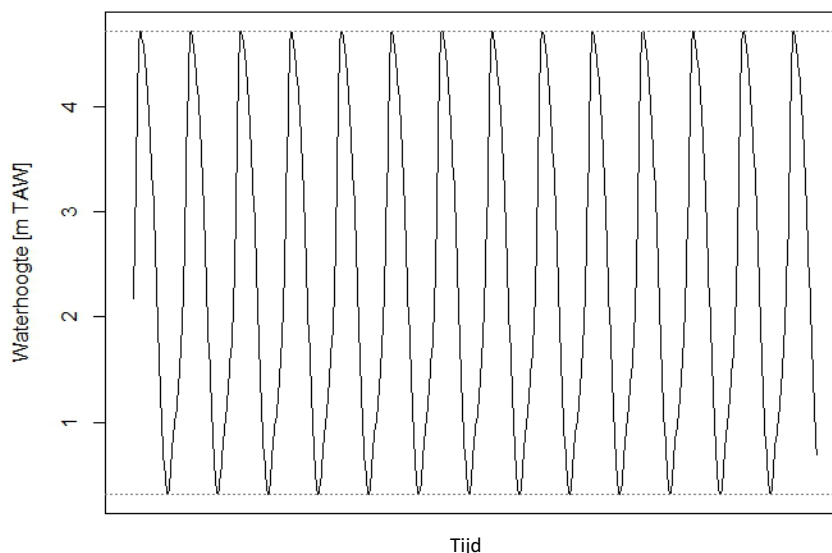
3.3.1 Opwaartse randvoorwaarden

Aan de opwaartse rand worden debieten opgelegd, meer bepaald dagelijkse meetwaarden van het jaar 2009. In het interessegebied, hier voornamelijk Westerschelde (en het meest afwaartse deel van de Beneden-Zeeschelde) zullen deze randvoorwaarden de resultaten nauwelijks beïnvloeden.

3.3.2 Afwaartse randvoorwaarden

De afwaartse rand wordt opgelegd tussen Westkapelle en Cadzand. Als randvoorwaarde wordt een waterhoogte opgelegd, zoals weergegeven in Figuur 4. De waterhoogte varieert tussen 0.131 m en 4.41 m TAW. De amplitude van de opgelegde getijgolf bedraagt dus 2.1 m, dit komt ongeveer overeen met een getijfactor van 1.13. Dit cyclisch getij dat wordt opgelegd komt overeen met een gemiddeld springtij.

Figuur 4 – Opgelegde waterstandsrand ter hoogte van de lijn Westkapelle – Cadzand



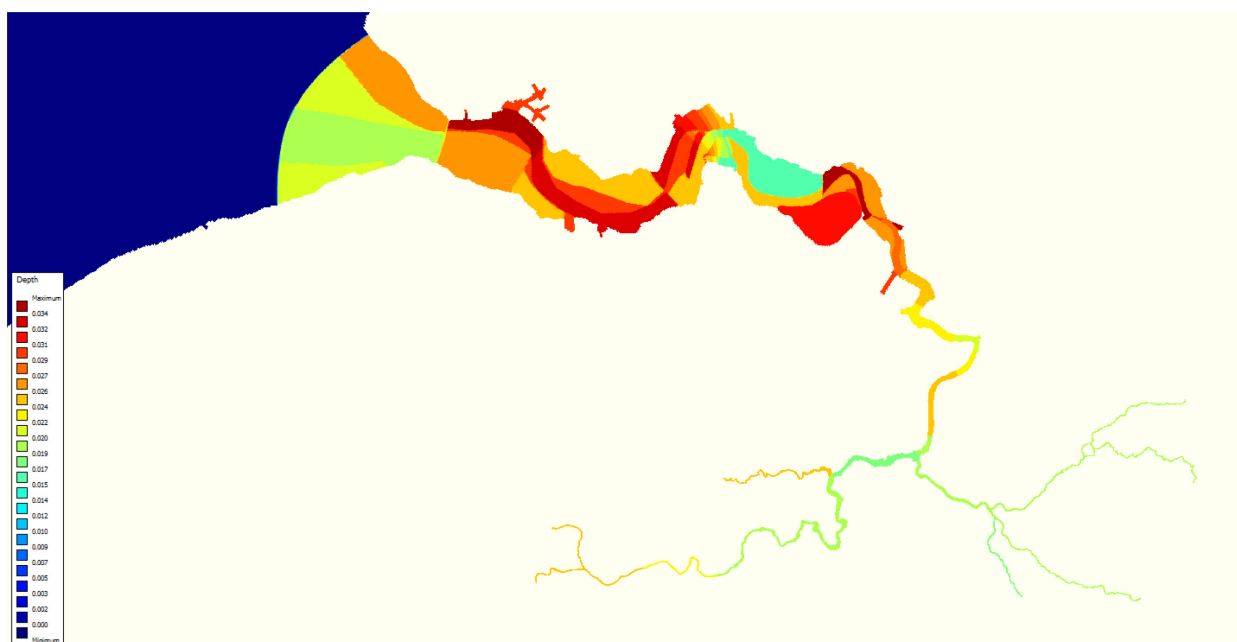
3.3.3 Sediment randvoorwaarden

Als instroom van sediment (zand) aan de opwaartse rand wordt een constante waarde van 0 kg/m^3 opgelegd. Aangezien ter hoogte van de opwaartse randen de sedimentaanvoer voornamelijk bestaat uit slib, wat deze aanname verantwoord. Aan de afwaartse rand wordt een evenwichtsconcentratie opgelegd.

3.4 Ruwheid

In Figuur 5 is het originele ruwheidsveld weergegeven [Maximova *et al.*, 2009], welke ruimtelijk variërend is, zowel in longitudinale en laterale richting.

Figuur 5 – Origineel ruwheidsveld in het NEVLA model, uitgedrukt als Manning coëfficiënt.

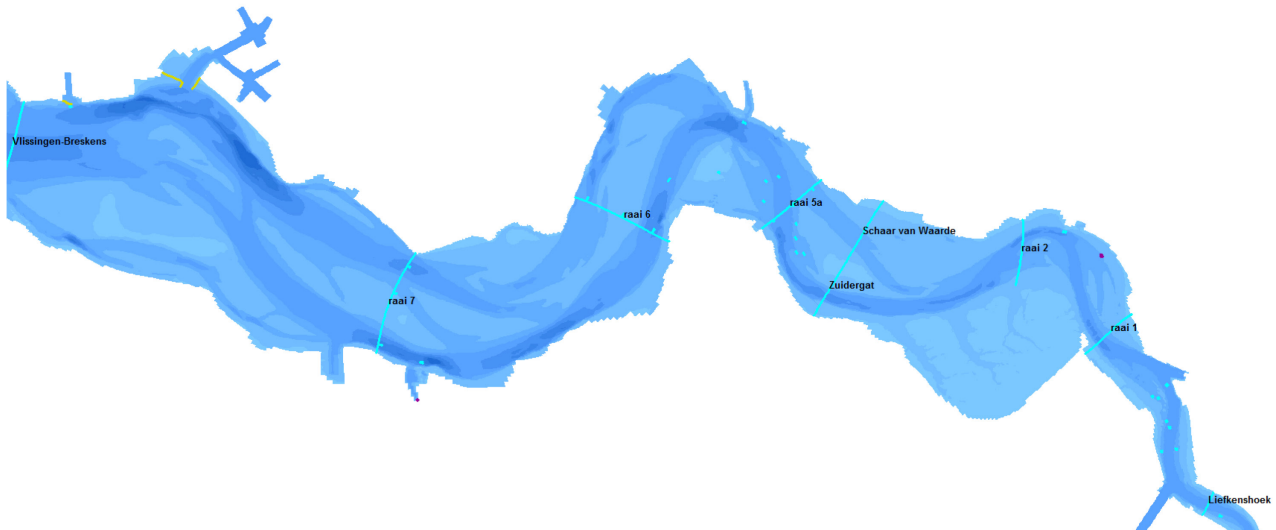


3.5 Tijdsstap

Voor de basisberekening werd gebruik gemaakt van een tijdstap van 0,05 min (gelijk aan 3 s). Het model wordt gerund voor een periode van 3 maanden, van 1 januari t.e.m. 31 maart. De morfologische versnellingsfactor wordt gevarieerd tussen 1 (waarbij drie morfologische maanden worden doorgerekend) tot 98 (waarbij dan een morfologieverandering over ca. 24 jaar wordt gemodelleerd). De rekentijden voor het uitvoeren van een morfologische run variëren tussen ca. 10 dagen voor de basisruns, tot meer dan 3 weken voor simulatie waarin extra processen worden opgenomen (secundaire stroming, saliniteit,...)

3.6 Uitvoerpunten

Figuur 6 – Situering van het focus gebied in deze modelstudie.
De output raaien zijn aangeduid met witte lijnen. De outputpunten zijn aangeduid met witte punten.



Figuur 6 geeft de gebruikte uitvoerpunten en raaien weer die in het model gedefinieerd werden. Hierbij werd enerzijds gebruik gemaakt van meetstations/debietraaien waar metingen beschikbaar zijn en zullen gebruikt worden in de modelvalidatie. Op elke raai werden 3 uitvoerpunten gedefinieerd, 1 op de thalweg en 2 aan weerszijden, in het ondiepere deel van de geul. Anderzijds werden ook extra uitvoerpunten toegevoegd in de zones waarin in deze en volgende studies wordt gefocust, meer bepaald rond de drempel van Hansweert en rond de drempel van Frederik.

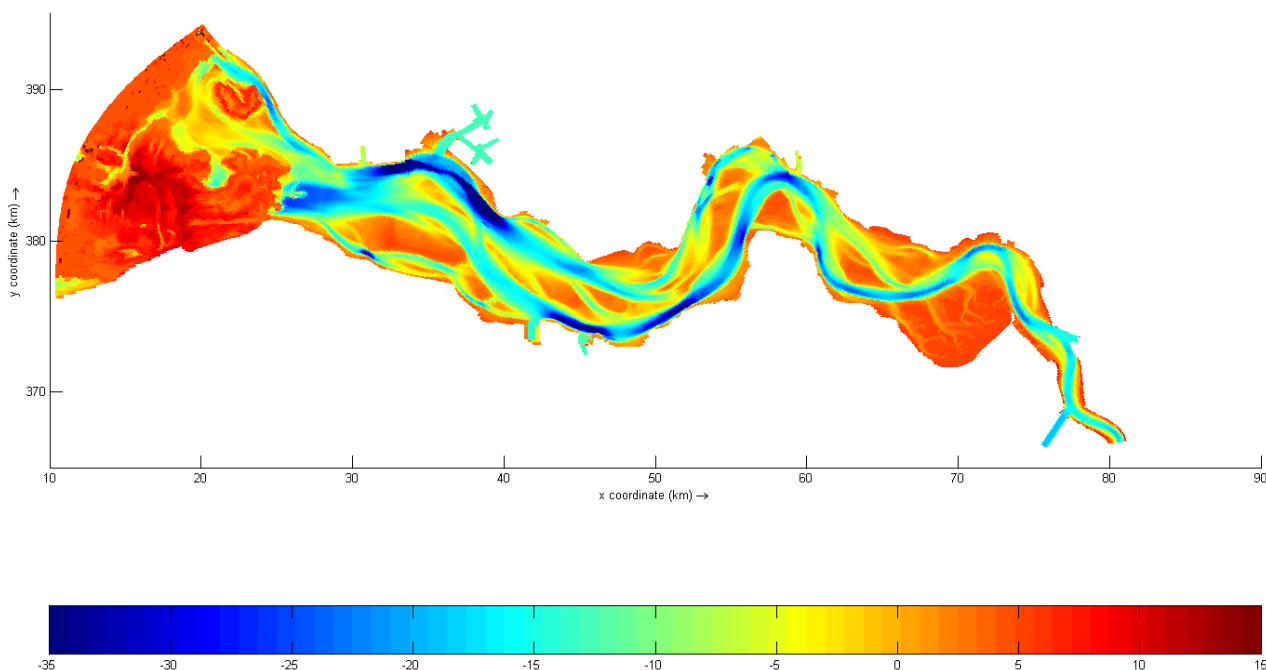
Naast deze hoogfrequente output, de simulatieresultaten in de uitvoerpunten en raaien worden elke 10 minuten uitgevoerd, worden ook per simulatiedag (de overeenkomende morfologische periode is afhankelijk van de morfac keuze) een map van de snelheden en de geüpdatete topo-bathymetrie weggeschreven.

4 Eerste verkennende resultaten

4.1 Randvoorwaarden afwaarts

Op basis van de verkennende simulaties bleken er in de loop van sommige morfologische simulaties instabiliteiten op te treden aan de afwaartse rand (zie bijvoorbeeld Figuur 7). De tangentiële componenten van advectietermen aan de zeewaartse rand (parallel met de rand) kunnen een artificiële "grenslaag" opbouwen langs deze rand. Door de keuze van "Cstbnd =#YES#" worden de tangentiële componenten van advectietermen op nul gezet. Ook na deze aanpassing, vertonen sommige resultaten nog steeds instabiliteiten na verloop van tijd. Dit ligt waarschijnlijk aan de positie van de randvoorwaarde in het mondingsgebied zelf. Een mogelijke oplossing is het gebruik van de reflectiecoëfficiënt alfa, die in deze simulaties gelijk aan nul werd ingesteld. Voor berekening met getijden wordt een waarde van 50 – 100 s² geadviseerd (Deltares, 2011).

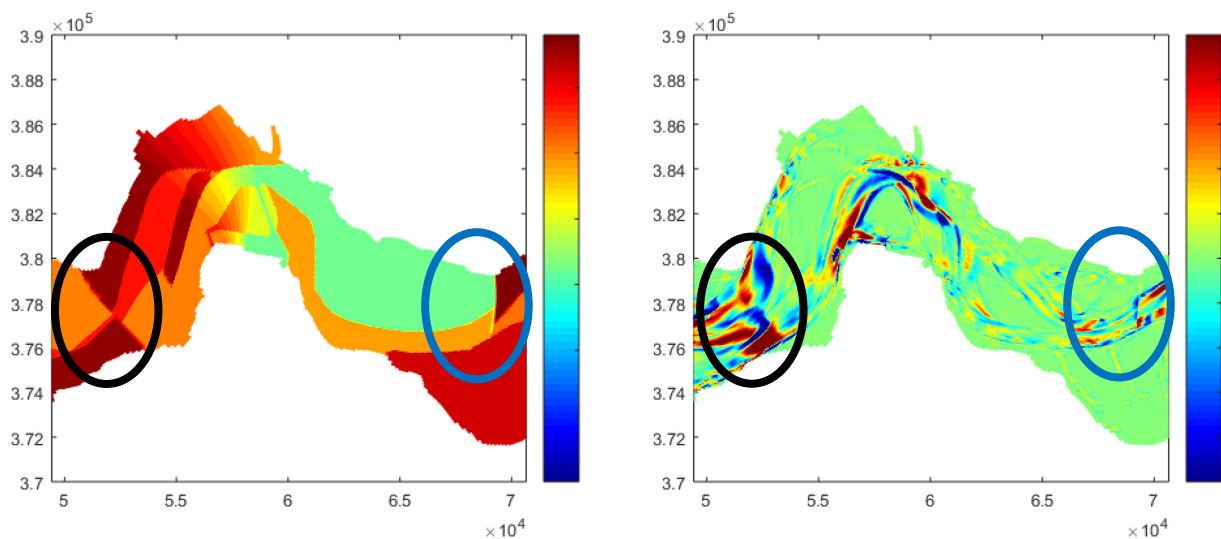
Figuur 7 – Voorbeeld van run met instabiliteiten aan de afwaartse rand.
Resultaten na 1 jaar met Engelund-Hansen transportformule en $d_{50} = 150 \mu\text{m}$



4.2 Ruwheidsveld

In Figuur 8 is een zoom weergegeven van het ruwheidsveld enerzijds en anderzijds de sedimentatie en erosiepatronen. Aan het Gat van Ossensisse (zwarte cirkel) zien we een duidelijke grens van de sedimentatie en erosievelden, welke overeenkomt met de grens tussen verschillende ruwheidsvelden. Ter hoogte van het Nauw van Bath (blauwe cirkel) kan eveneens een abrupte overgang worden waargenomen, overeenkomende met een variatie van Manning coëfficiënt in deze zone.

Figuur 8 – Zoom op de ruwheidsvelden (links), uitgedrukt in Manning coëfficiënt en sedimentatie en erosieplot (rechts), uitgedrukt in meter



Aangezien een ruimtelijk variërend ruwheidsveld, en meer bepaald de scherpe grenzen tussen verschillende blokken, een duidelijk en onrealistisch effect hebben op de resultaten van de morfologische berekeningen wordt ervoor geopteerd om in de simulaties te werken met een uniform ruwheidsveld ($n = 0,023 \text{ s.m}^{-1/3}$).

5 Gevoeligheidsanalyse

In voorliggende gevoeligheidsanalyse worden de parameters van het basismodel één voor één aangepast zodat het geïsoleerde effect van deze parameter kan worden bestudeerd. Zoals eerder aangehaald wordt in deze gevoeligheidsanalyse gefocust op de sedimentatie en erosiepatronen in de Westerschelde (kwalitatief), eerder dan te kijken naar bv. bagger- en stortvolumes. De bagger en stort module wordt hier ook niet gebruikt, aangezien gekeken wordt naar de met het model voorspelde, natuurlijke morfologische evoluties.

In het model, zoals besproken in hoofdstuk 3, wordt enerzijds de morfologische factor MF aangepast, variërende tussen 12,25 en 98. Eveneens werd de transportformulering gevarieerd, alsook de correctie voor de bodemhelling (sectie 5.3 en 5.8). Qua hydrodynamische parameters werd gevarieerd met de ruwheid, 3D effecten (ofwel 3D-model met 2 lagen ofwel gebruik makend van secundaire stroming optie). Ook werd een gridverfijning geprobeerd en sediment eigenschappen (D_{50}) aangepast. Een overzicht van de verschillende simulaties, met de gebruikte parameters, wordt gegeven in Tabel 3. Hierbij is simulatie 00 de referentiesimulatie.

In secties 5.2 tot 5.9 worden de resultaten van de gevoeligheidsanalyse, per onderwerp, besproken. Simulaties worden steeds vergeleken met de referentiesimulatie op hetzelfde (morfologische) ogenblik. De simulatieresultaten, met name de door morfologische wijzigingen geüpdatete bathymetrieën, worden getoond op drie tijdstippen, met name 392, 1078 en 2058 dagen. Dit komt, door de morfologische factor, overeen met ca. 1.07, 3 en 5.6 jaar morfologische evolutie. In sommige gevallen zijn niet alle simulaties beschikbaar, wegens een crash van de simulaties of een crash van de server (elektriciteitspanne). Dit is aangegeven in Tabel 3.

Tabel 3 – Overzicht van de parameterinstellingen van de verschillende gevoeligheidsruns.
Versie geeft aan met welke versie van Delft3D de simulatie is uitgevoerd (V1 = FLOW2D3D Version 5.00.00.1287; V2 = FLOW2D3D Version 6.02.01.5527)

Naam	Grid	Tijdstap [min]	Morfologie			Processen			Sediment		Versie	Opmerkingen
			MF	α_{Bn}	α_{Bs}	Wind	Saliniteit	Secondary flow	Transport-formule	D50 [μm]		
Sim 00	1*1	0,05	24,5	1,5	1,0	Yes	No	No	EH	200	V1 & V2	
Sim 01	1*1	0,05	<u>12,5</u>	1,5	1,0	Yes	No	No	EH	200	V1	
Sim 02	1*1	0,05	24,5	1,5	1,0	Yes	No	No	EH	<u>100</u>	V1	
Sim 03	1*1	0,05	<u>49</u>	1,5	1,0	Yes	No	No	EH	200	V1	Cluster KUL
Sim 04	1*1	0,05	<u>98</u>	1,5	1,0	Yes	No	No	EH	200	V2	
Sim 05	1*1	0,05	24,5	1,5	1,0	<u>No</u>	No	No	EH	200	V1	
Sim 06	1*1	0,05	24,5	1,5	1,0	Yes	No	<u>Yes</u>	EH	200	V1	
Sim 07	1*1	0,05	24,5	1,5	1,0	Yes	<u>Yes</u>	No	EH	200	V2	
Sim 08	1*1	0,05	24,5	1,5	1,0	Yes	<u>Yes</u>	<u>Yes</u>	EH	200	V2	
Sim 09	1*1	<u>0,025</u>	24,5	1,5	1,0	Yes	No	No	EH	200	V1	
Sim 10	1*1	0,05	24,5	1,5	1,0	Yes	No	No	EH	200	V1	<u>3D (50/50%)</u>
Sim 11	1*1	0,05	24,5	1,5	1,0	Yes	No	No	<u>Van Rijn (93)</u>	200	V1 & V2	
Sim 12	1*1	0,05	24,5	1,5	1,0	Yes	No	No	<u>Bijker</u>	200	V1	
Sim 13	1*1	0,05	24,5	1,5	1,0	Yes	No	No	EH	<u>300</u>	V2	
Sim 14	1*1	0,05	24,5	1,5	1,0	Yes	No	No	EH	200	V2	<u>n = 0,026</u>
Sim 16	1*1	0,05	24,5	<u>0,15</u>	1,0	Yes	No	No	EH	200	V1	
Sim 19	1*1	0,05	24,5	<u>15</u>	1,0	Yes	No	No	EH	200	V1	
Sim 23	1*1	0,05	24,5	1,5	10	Yes	No	No	EH	200	V2	
Sim 24	1*1	0,05	24,5	1,5	0,1	Yes	No	No	EH	200	V2	
Sim LT_18	<u>2*2</u>	0,05	<u>98</u>	1,5	1,0	Yes	No	No	EH	200	V1	
Sim LT_30	1*1	0,05	<u>98</u>	1,5	1,0	Yes	No	No	EH	3 fracties	V1	

5.1 Referentiesimulatie

5.1.1 Algemene beschrijving

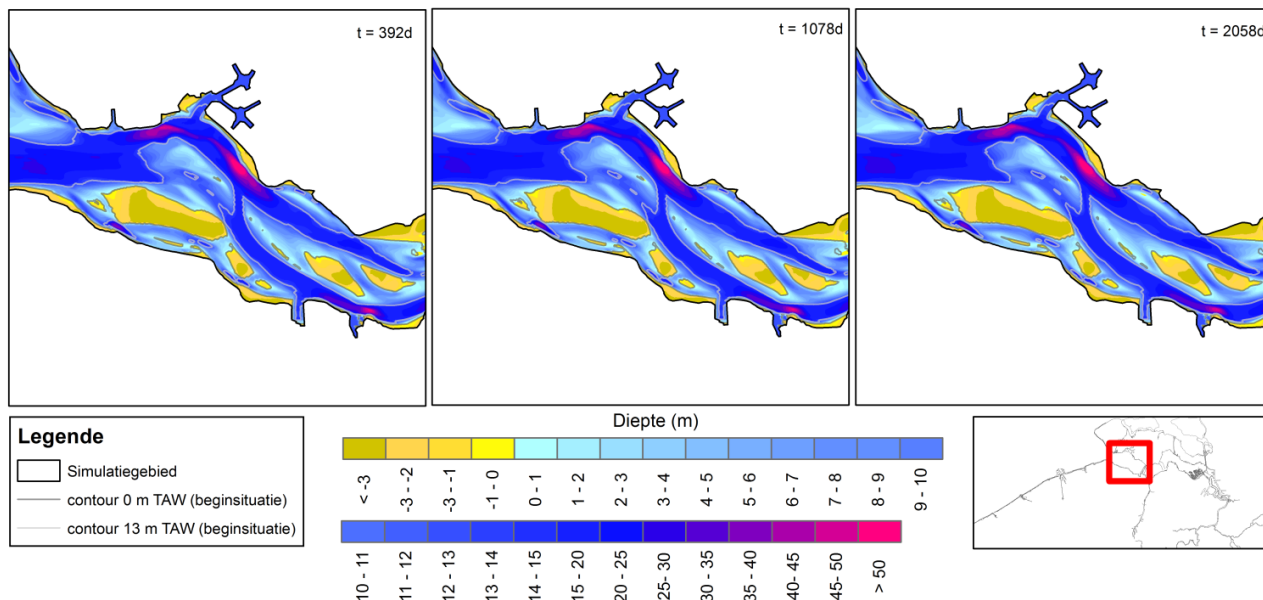
Als referentiesimulatie, Sim 00, wordt een 2D morfologische run met MF 24,5 gebruikt. Als sediment-transportformule wordt Engelund-Hansen gebruikt, met een D_{50} van 200 μm . De simulatieresultaten worden steeds getoond in 4 gebieden, “Vlissingen – Terneuzen”, “Terneuzen – Hansweert”, “Hansweert - Bath”, “Bath – Antwerpen” en zijn weergegeven in Appendix (Figuur 38 t.e.m. Figuur 45). In Figuur 9 en Figuur 11 zijn de diepteliggingen weergegeven voor respectievelijk “Vlissingen – Terneuzen” en “Terneuzen – Hansweert”. In deze figuren met bathymetrieën zijn de verschillen tussen opeenvolgende tijdstappen dikwijls moeilijk zichtbaar (bv. Figuur 9 op $t = 392$ dagen of $t = 2058$ dagen). Evenwel, aan of rond de bochten zijn de verschillen na ca. 1 en 5 jaar soms wel al zichtbaar, zoals bv. aan het drempelgebied van de Everingen of de drempel van Hansweert (aangegeven in Figuur 11, in respectievelijk vierkant en cirkel). In Figuur 10 en Figuur 12 zijn, voor dezelfde gebieden, de verschillen weergegeven tussen de bathymetrieën op 2 opeenvolgende weerhouden tijdstappen, respectievelijk 392 t.o.v. 0 dagen, 1078 t.o.v. 392 dagen en 2058 t.o.v. 1078 dagen. In de verschilplots zijn de verschillen teruggerekend naar een bodemverandering per jaar (uitgedrukt in cm/jaar).

In de eerste output (392 dagen) kan een mozaïek patroon van (kleine) zones met sedimentatie en erosie worden vastgesteld. Het model werkt in deze initiële fase de sterkere gradiënten in de diepteligging weg. In de daaropvolgende fases zijn de veranderingen geleidelijker en treden patronen op in grotere (en langgerekte) zones van verdieping of verondieping t.o.v. de vorige tijdsstap. Deze zijn voornamelijk gesitueerd ter hoogte van de belangrijkste bochten of drempelgebieden (bv. bocht van Hansweert, drempelgebied van de Everingen). De gemiddelde snelheid van verandering na 3 of 6 jaar lijkt van dezelfde grootte orde, evenals de globale zones van ver(on)dieping.

Naast de morfologische verschillen zijn in Figuur 13 ook, voor Vlissingen en Oosterweel, de getijkrommes in het begin van de simulatie en na ca. 50 dagen in de simulatie weergegeven. Deze periode van 50 dagen werd geselecteerd, omdat alle modelruns zo lang hebben gerekend, en dit een voldoende simulatieduur is om instabiliteiten en grote veranderingen op te merken. De getijkrommes te Vlissingen dienen als een toets voor de opgelegde randvoorwaarde, de getijkromme te Oosterweel is geselecteerd om het effect van morfologische veranderingen in de Westerschelde te kunnen inschatten. Er kan worden opgemerkt dat de getijcurves niet echt veranderen doorheen de morfologische situatie. Gelijkaardige getijkrommes aan het begin en einde van de simulatie duiden erop dat de globale voortplanting van de getijgolf niet sterk verschillend is door de gesimuleerde morfologische veranderingen binnen het systeem.

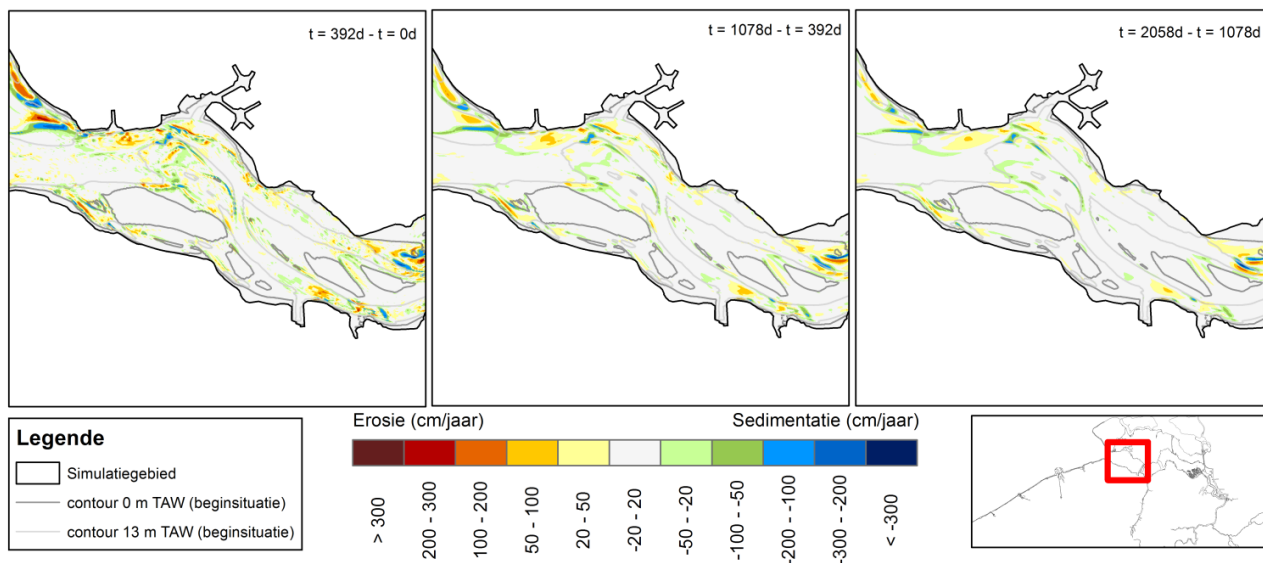
Figuur 9 – Simulatieresultaten (Sim 00) van de diepteligging van na respectievelijk 392, 1078 en 2058 dagen in de regio Vlissingen – Terneuzen

Sim 00: Vlissingen-Terneuzen



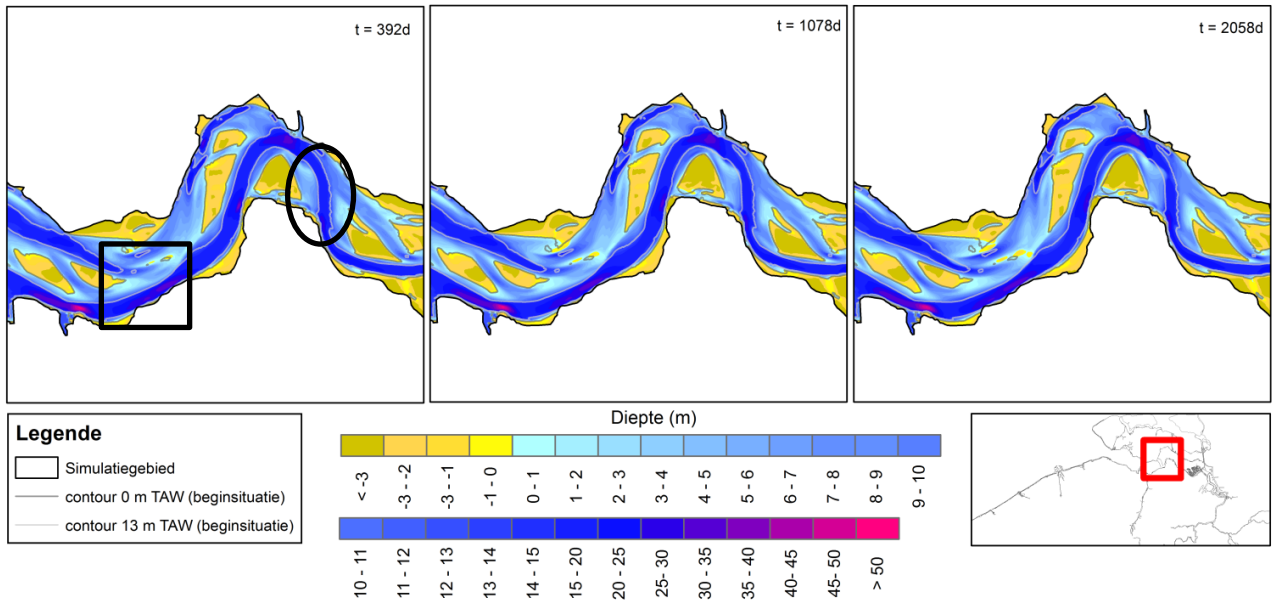
Figuur 10 – Simulatieresultaten (Sim 00) van de verandering van de diepteligging na respectievelijk 392, 1078 en 2058 dagen t.o.v. de vorige outputstap (respectievelijk 0, 392, 1078) in de regio Vlissingen - Terneuzen

Sim 00: Vlissingen-Terneuzen



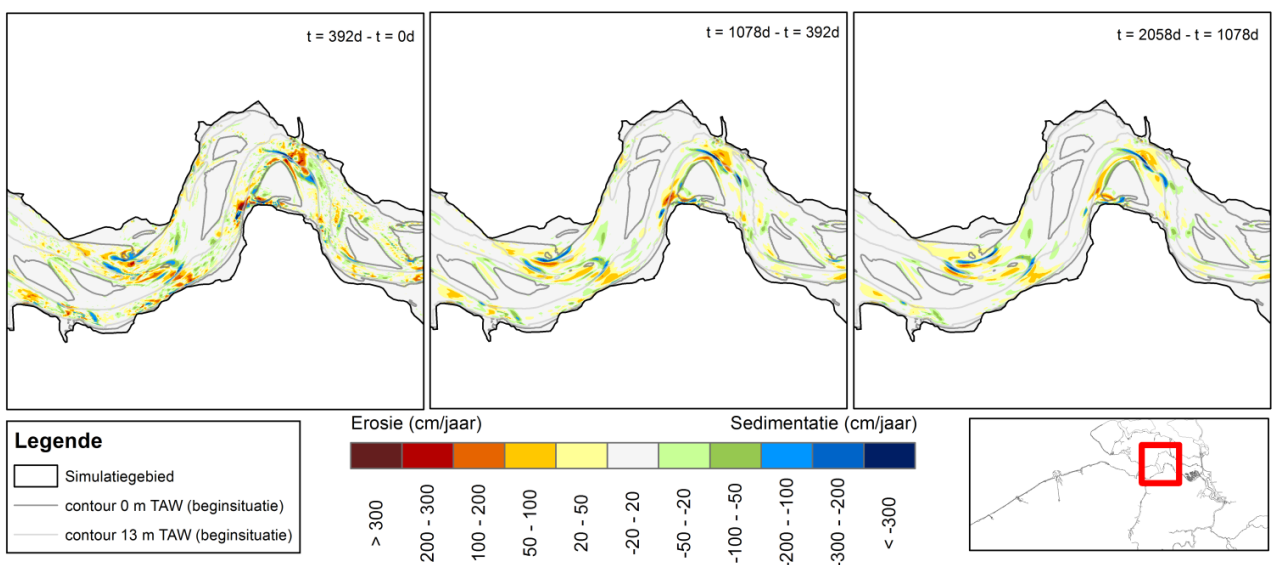
Figuur 11 – Simulatiere resultaten (Sim 00) van de diepteligging van na respectievelijk 392, 1078 en 2058 dagen in de regio Terneuzen – Hansweert. De zones waar duidelijker verschillen kunnen worden waargenomen, drempelgebied Everingen en drempel van Hansweert, zijn aangeduid met zwart vierkant en ovaal.

Sim 00: Terneuzen-Hansweert

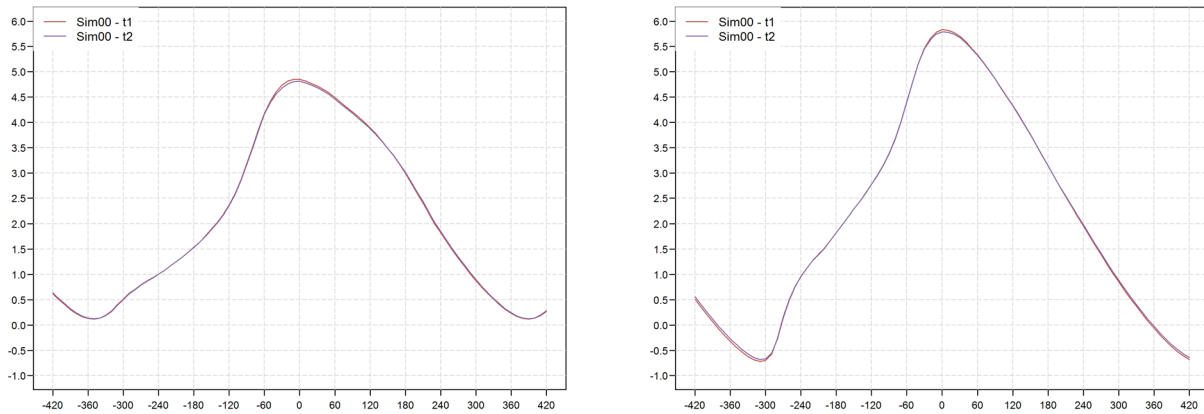


Figuur 12 – Simulatiere resultaten (Sim 00) van de verandering van de diepteligging na respectievelijk 392, 1078 en 2058 dagen t.o.v. de vorige outputstap (respectievelijk 0, 392, 1078) in de regio Terneuzen - Hansweert

Sim 00: Terneuzen-Hansweert



Figuur 13 – Verloop van een getijkromme (tijd in minuten t.o.v. HW en waterstanden in mTAW) te Vlissingen (links) en Oosterweel (rechts) aan het begin van de simulatie (rood) en na 50 dagen simulatie (blauw)



5.1.2 Aanvullingen bij referentiesituatie

Doorheen het uitvoeren van de gevoeligheidsanalyse werden zowel berekening uitgevoerd op het rekencluster van het Waterbouwkundig Laboratorium en op de infrastructuur van het Vlaamse Supercomputer Centrum, KU Leuven, wegens de lange simulatietijden en overbezetting van het eigen cluster. Bij het vergelijken van de resultaten werden verschillen opgemerkt, die niet te wijten kunnen zijn aan de modelinstellingen. Uiteindelijk bleken twee verschillende versie van Delft3D geïnstalleerd te zijn (zie Tabel 4), met ongeveer 3,5 jaar tussen beiden. Enkele aanvullende tests voor het effect van deze versie en de reproduceerbaarheid van de resultaten werden uitgevoerd.

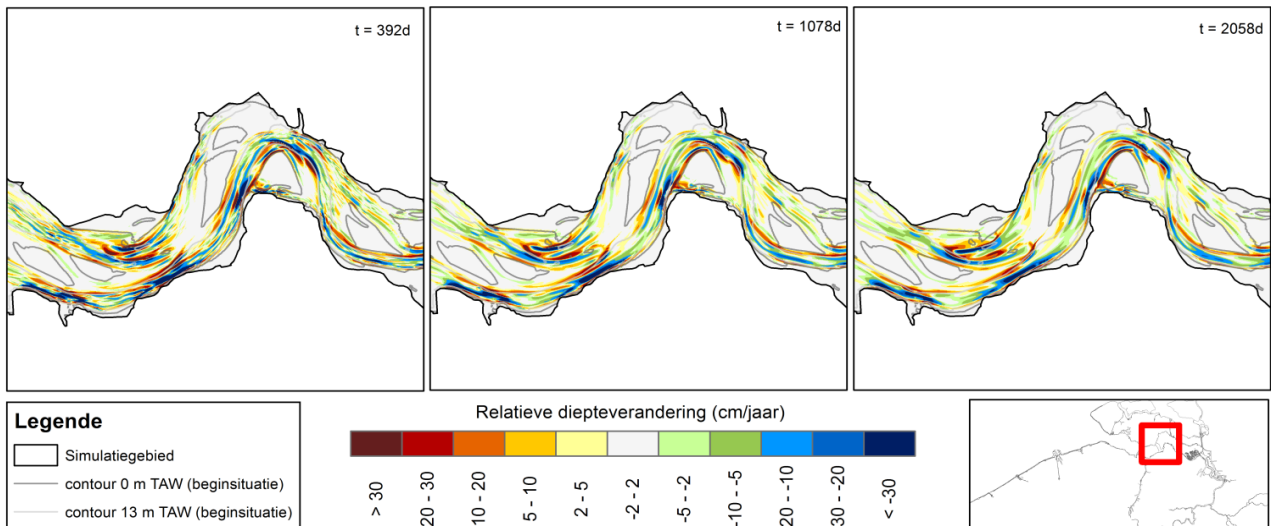
Tabel 4 – Gebruikte Delft 3D versie

Cluster	Delft versie	
Leuven	FLOW2D3D Version 6.02.01.5527	(~oktober 2015)
WL	FLOW2D3D Version 5.00.00.1287	(~maart 2012)

In Figuur 14 is het verschil weergegeven voor een modelsimulaties (met identieke parameters) berekend met versie FLOW2D3D Version 6.02.01.5527 versus FLOW2D3D Version 5.00.00.1287. De verschillen tussen beide versies zijn zeer opvallend. De verschillen zijn voornamelijk georiënteerd in een richting parallel met de geulen, vergelijkbaar met het effect van de keuze van α_{bn} (zie sectie 5.8). In Figuur 15 is het verschil weergegeven voor een berekening met versie FLOW2D3D Version 6.02.01.5527 berekend op het cluster op het Waterbouwkundig Laboratorium en de Universiteit Leuven. Hier worden geen verschillen waargenomen, wat wil zeggen dat de resultaten onafhankelijk zijn van de gebruikte rekenprocessoren. Doordat in deze gevoeligheidsanalyse de resultaten relatief worden bekeken, heeft dit geen invloed op de conclusies. Wel dient het aanbeveling steeds de modelversie te vermelden bij de resultaten en kunnen herhalingen van simulaties uit oude rapporten dus andere resultaten opleveren door gebruik van verschillende versies.

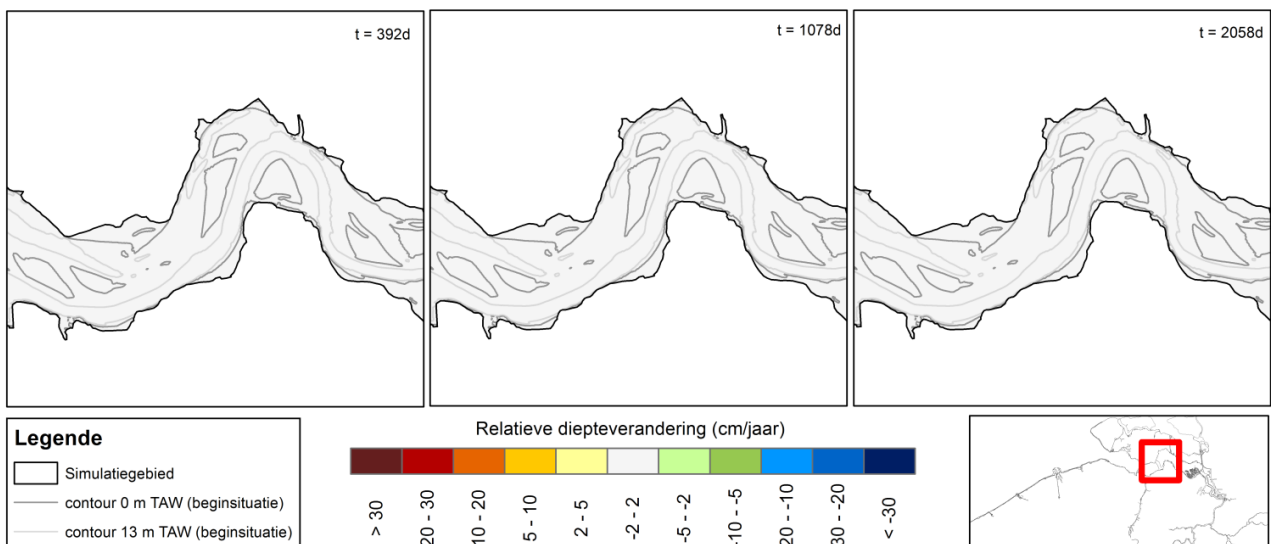
Figuur 14 – Vergelijking van de resultaten bij het gebruik van Delft3D versie FLOW2D3D Version 6.02.01.5527 versus versie FLOW2D3D Version 5.00.00.1287 voor de regio tussen Terneuzen en Hansweert.

Sim00_repreyrec - Sim 00: Terneuzen-Hansweert



Figuur 15 – Vergelijking van de resultaten bij het gebruik van Delft3D versie FLOW2D3D Version 6.02.01.5527 berekend op het cluster te WL vs. Universiteit Leuven voor de regio tussen Terneuzen en Hansweert.

Sim00_repleuven - Sim 00_repreyrec: Terneuzen-Hansweert



5.2 Morfologische versnellingsfactor

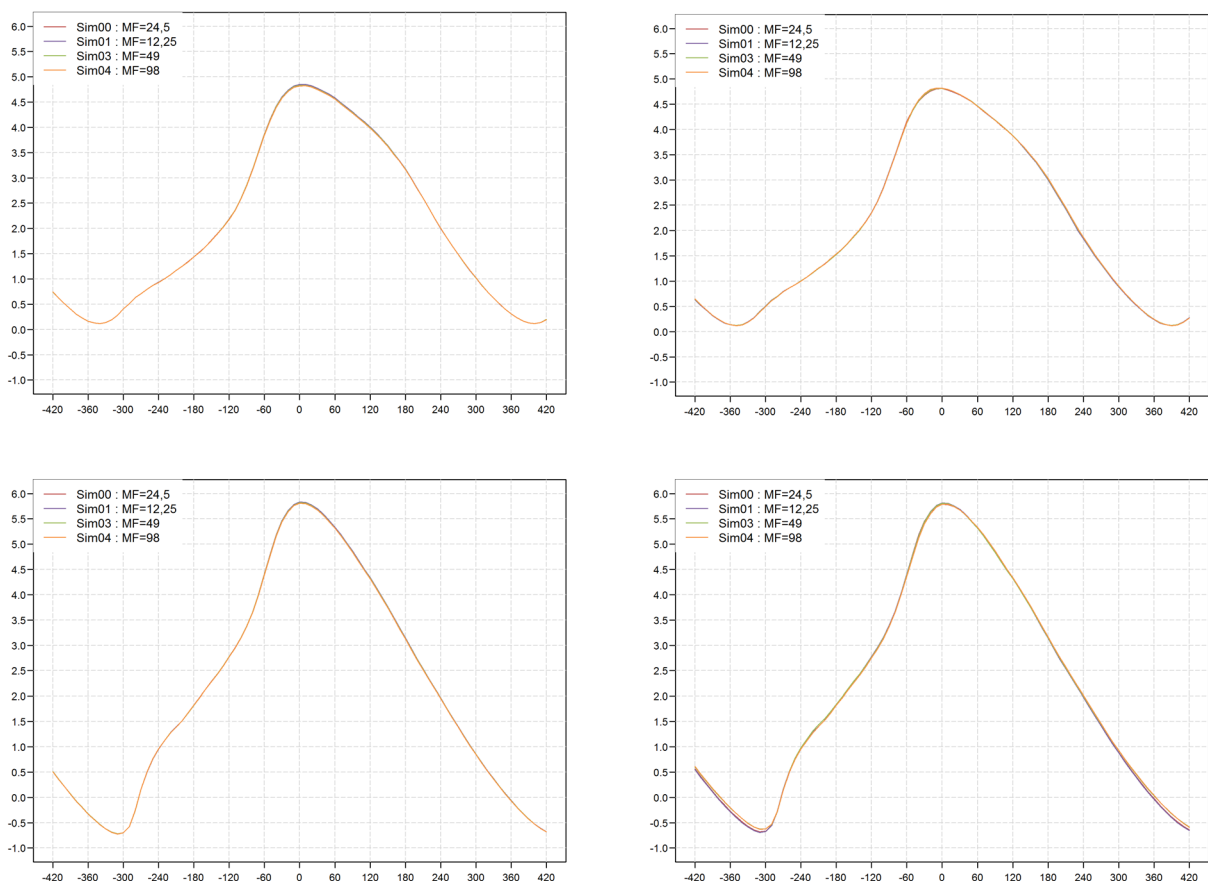
In simulaties 00, 01, 03, 04 werd de morfologische versnellingsfactor gevarieerd, respectievelijk tussen 24,5; 12,25 (Figuur 46 t.e.m. Figuur 49), 49 (Figuur 50 t.e.m. Figuur 53) en 98 (Figuur 54 t.e.m. Figuur 57). Voor de morfologische versnellingsfactor van 12,25 is de maximale, gesimuleerde morfologische tijd slechts 1078 dagen of 3 jaar, hier worden dus slechts 2 simulatieresultaten besproken. Voor de zone Terneuzen –

Hansweert zijn voor Simulatie 1 en Simulatie 04 de verschillen weergegeven in respectievelijk Figuur 17 en Figuur 19.

In Figuur 16 (links) zijn voor de verschillende simulaties de getijkrommes aan het begin van de simulatie te Vlissingen en Oosterweel weergegeven. Na 50 dagen simulatie is de getijkromme te Vlissingen en Oosterweel weergegeven (Figuur 16, rechts). Dit is hier, voor de verschillende runs op een verschillende morfologische tijd, wegens de verschillende morfac instelling van de simulaties. Voor de verschillende simulaties zien we dat op beide locaties de getijkrommes zeer goed overeenkomen. De globale voortplanting van de getijgolf blijkt niet te verschillen door de verschillende morfologische instellingen.

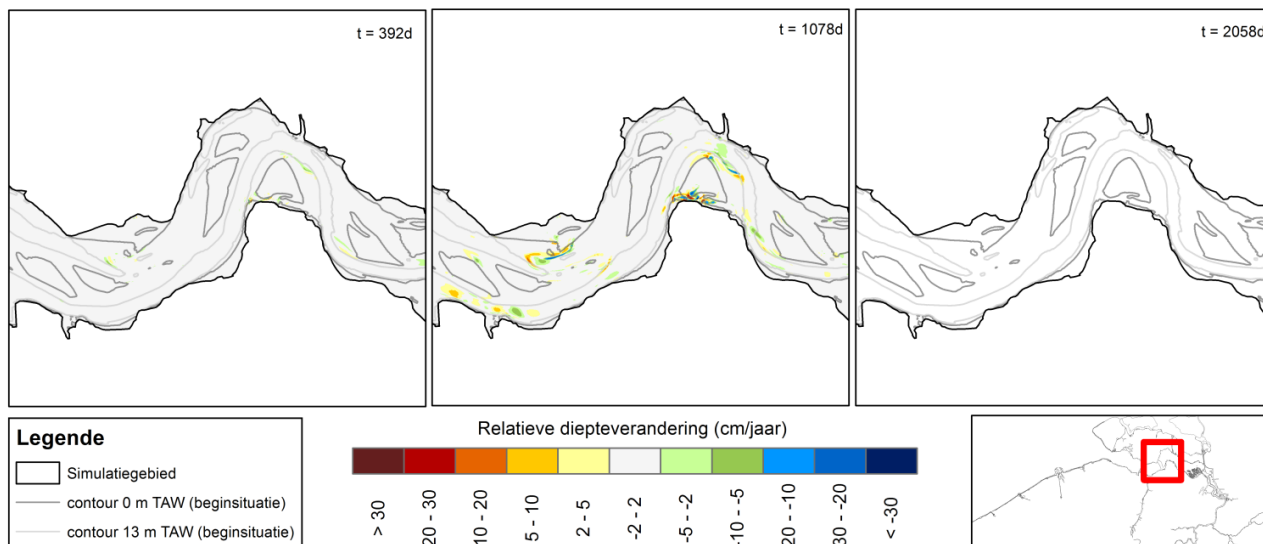
Wanneer Sim 00 (MF = 24,5) en Sim 01 (MF = 12,25) vergeleken worden (Figuur 46 t.e.m. Figuur 49) , kan een goede overeenkomst worden waargenomen tussen beide simulaties. Toch kan in de bochten en langs de platen zones worden onderscheiden, waar de verandering iets sneller of trager verloopt. De meest uitgesproken zone hieromtrent is de Schaar van Ossensisse (zie Figuur 17). Het globale beeld van morfologische verandering in de Westerschelde zal gelijkaardig zijn voor beide morfologische versnellingsfactoren. Wanneer men concentreert op morfologische veranderingen in bepaalde zones, bv. drempel van Hansweert, kan er dus wel een effect zijn t.g.v. de keuze van de morfologische versnellingsfactor (over de beschouwde tijdschaal). Sim 03 (MF = 49), gelopen op het cluster te Leuven, vertoont gelijkaardige resultaten dan deze die bekomen worden met een MF = 24.5 (Figuur 18). Voor Sim 04 (MF = 98) zijn de verschillen duidelijk groter (zie bv. Figuur 19). Op tijdstap 2 (1078 dagen) lijken de zones waarin de simulaties onderling verschillen het grootst. Zeker wanneer men naar meer lokale fenomenen kijkt, lijkt het niet aangewezen om een morfologische run uit te voeren met een morfologische versnellingsfactor groter dan 49. De verschillen zijn groter op korte termijn en vlakken uit naarmate langer gesimuleerd wordt.

Figuur 16 – Verloop van een getijkromme (tijd in minuten t.o.v. HW en waterstanden in m TAW) te Vlissingen (boven) en Oosterweel (onder) aan het begin van de simulatie (links) en na 50 dagen simulatie (rechts)



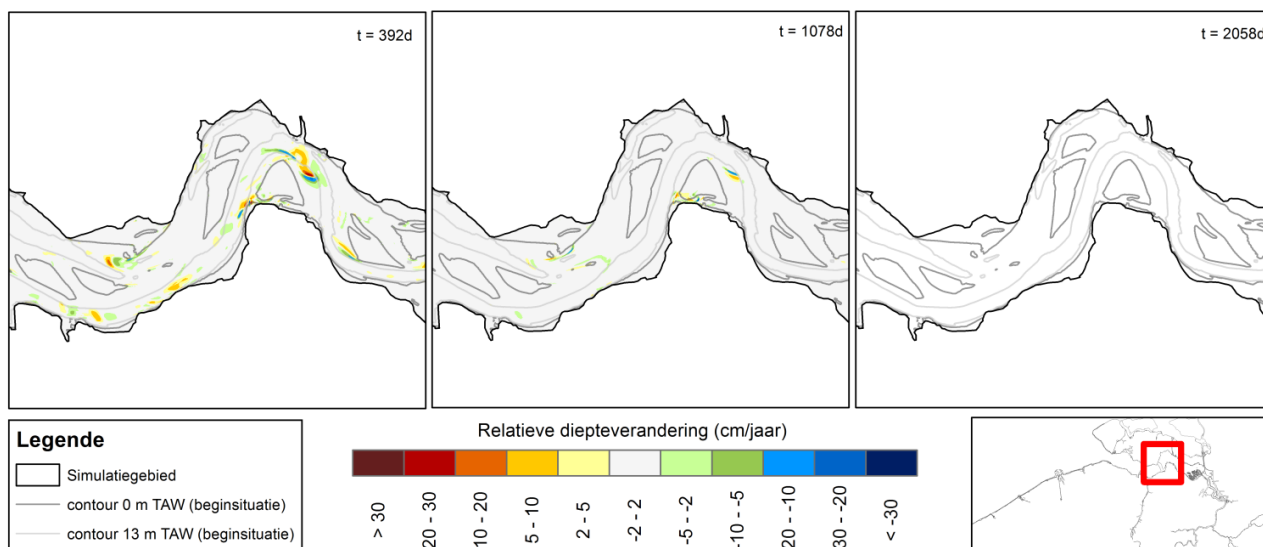
Figuur 17 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 01 (MF = 12,25) t.o.v. Sim 00 (MF = 24,5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078) in de regio Terneuzen - Hansweert

Sim 01 – Sim 00: Terneuzen-Hansweert

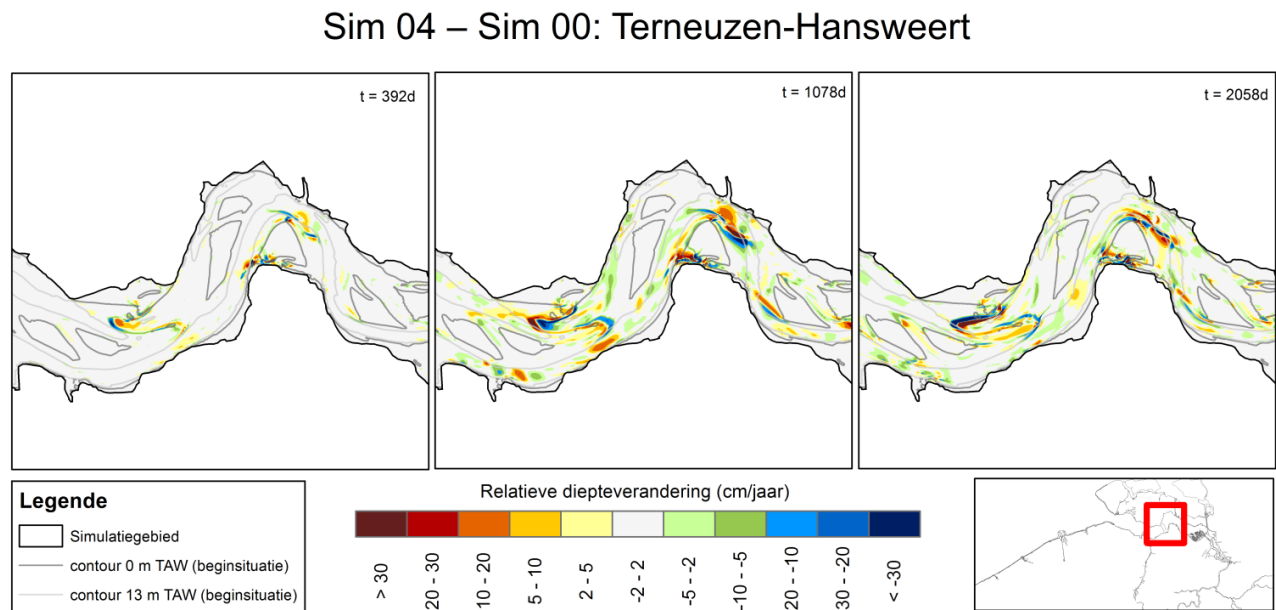


Figuur 18 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 03 (MF = 49) t.o.v. Sim 00 (MF = 24,5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078) in de regio Terneuzen - Hansweert

Sim 03_L - Sim 00_repleuven: Terneuzen-Hansweert



Figuur 19 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 04 (MF = 98) t.o.v. Sim 00 (MF = 24.5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert

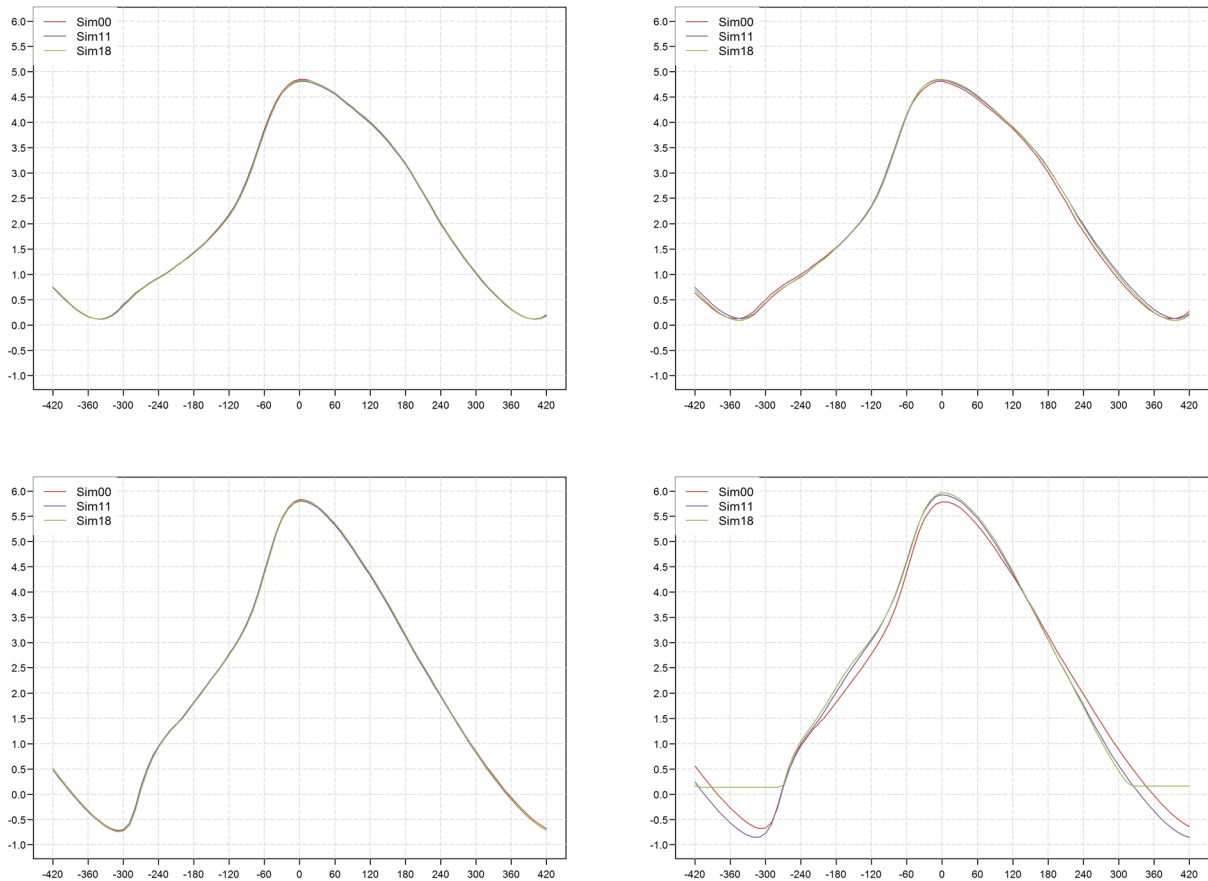


5.3 Transportformulering

In simulaties 00, 11 en 18 worden respectievelijk de transportformulering van Engelund-Hansen (1967), Van Rijn (1993) en Van Rijn (2007) vergeleken. De simulaties van Van Rijn (1993) zijn weergegeven in Figuur 58 t.e.m. Figuur 61.

In Figuur 20 zijn voor de verschillende simulaties de getijkrommes aan het begin van de simulatie en na 50 dagen simulatie (morfologische tijd = ± 3.5 jaar) te Vlissingen en Oosterweel weergegeven. Aan het begin van de simulatie (Figuur 20, links) kan opgemerkt worden dat alle krommes gelijk lopen. Na ca. 50 dagen simulatie kan worden opgemerkt te Oosterweel dat de simulaties met Van Rijn (2007) geen realistisch getijverloop kennen. Deze simulatie is dus onstabiel en zal verder niet meer besproken worden. Te Vlissingen zijn de getijcurves voor zowel simulatie 00 en simulatie 11 gelijkaardig op tijdstip 2, te Oosterweel kan echter een groter verschil worden opgemerkt. In simulatie 11 zijn de laagwaters lager, de hoogwaters hoger, m.a.w. de amplitude van de getijkromme is groter dan in de referentiesituatie. Dit kan verklaard worden door een sterk morfologisch verschil tussen de simulaties in het afwaartse deel van het estuarium, bij de monding en de Westerschelde (zie verder).

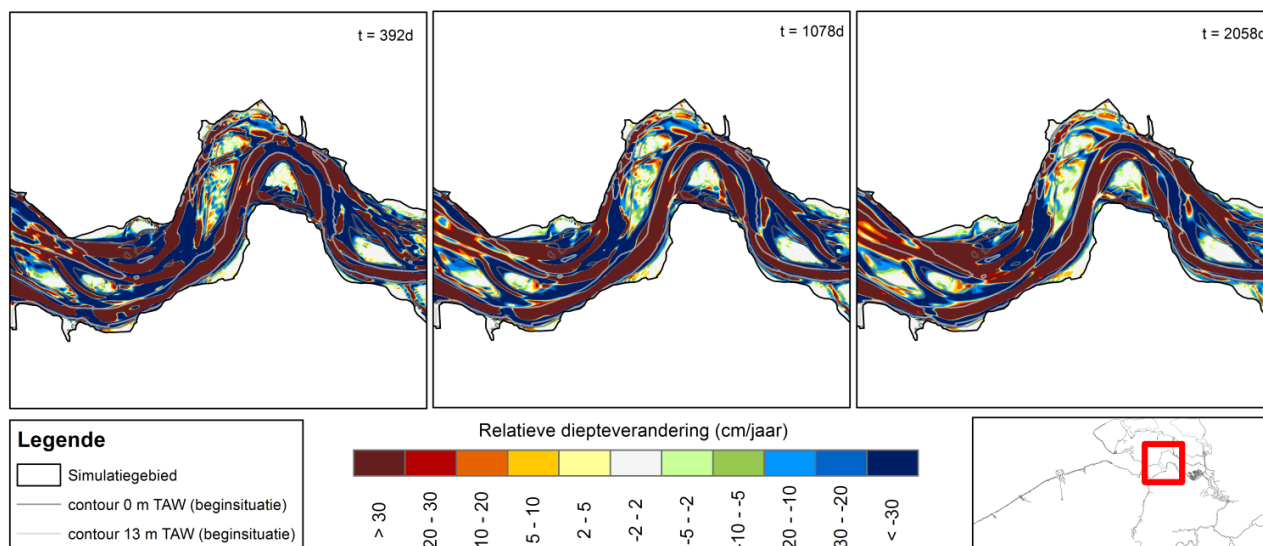
Figuur 20 – Verloop van een getijkromme (tijd in minuten t.o.v. HW en waterstanden in mTAW) te Vlissingen (boven) en Oosterweel (onder) aan het begin van de simulatie (links) en na 50 dagen simulatie (rechts)



In Figuur 58 t.e.m. Figuur 61 zijn de verschillen tussen de simulaties met Engelund-Hansen (referentie) en Van Rijn (1993) weergegeven. In Figuur 21 wordt gefocust op het gebied tussen Terneuzen en Hansweert. Er is een duidelijke verdieping van de diepere delen in Sim 11 (Van Rijn formulering) t.o.v. de referentiesimulatie waarneembaar. Over bijna de volledige lengte van de Westerschelde lijkt de vaargeul te verdiepen. Waar dit niet zo is, is er een verdieping van de vloedcharen, bv. ter hoogte van Hansweert lijkt de Schaar van Waarde te verdiepen (zie Figuur 21). In de ondiepere delen naast de vaargeul lijkt overwegend een verondieping op te treden t.o.v. de referentiesimulatie. De verschillen tussen beide simulaties zijn zeer uitgesproken, en gesitueerd over het volledig oppervlak van het beschouwde gebied. Het patroon van de verschillen tussen de simulaties blijven op de verschillende output tijdstappen wel gelijkaardig. Wel worden de patronen opnieuw iets uitgesmeerd in de loop van de tijd.

Figuur 21 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 04 (Van Rijn) t.o.v. Sim 00 (Engelund-Hansen) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert

Sim11_L - Sim00_repleuven: Terneuzen-Hansweert



5.4 Gridresolutie

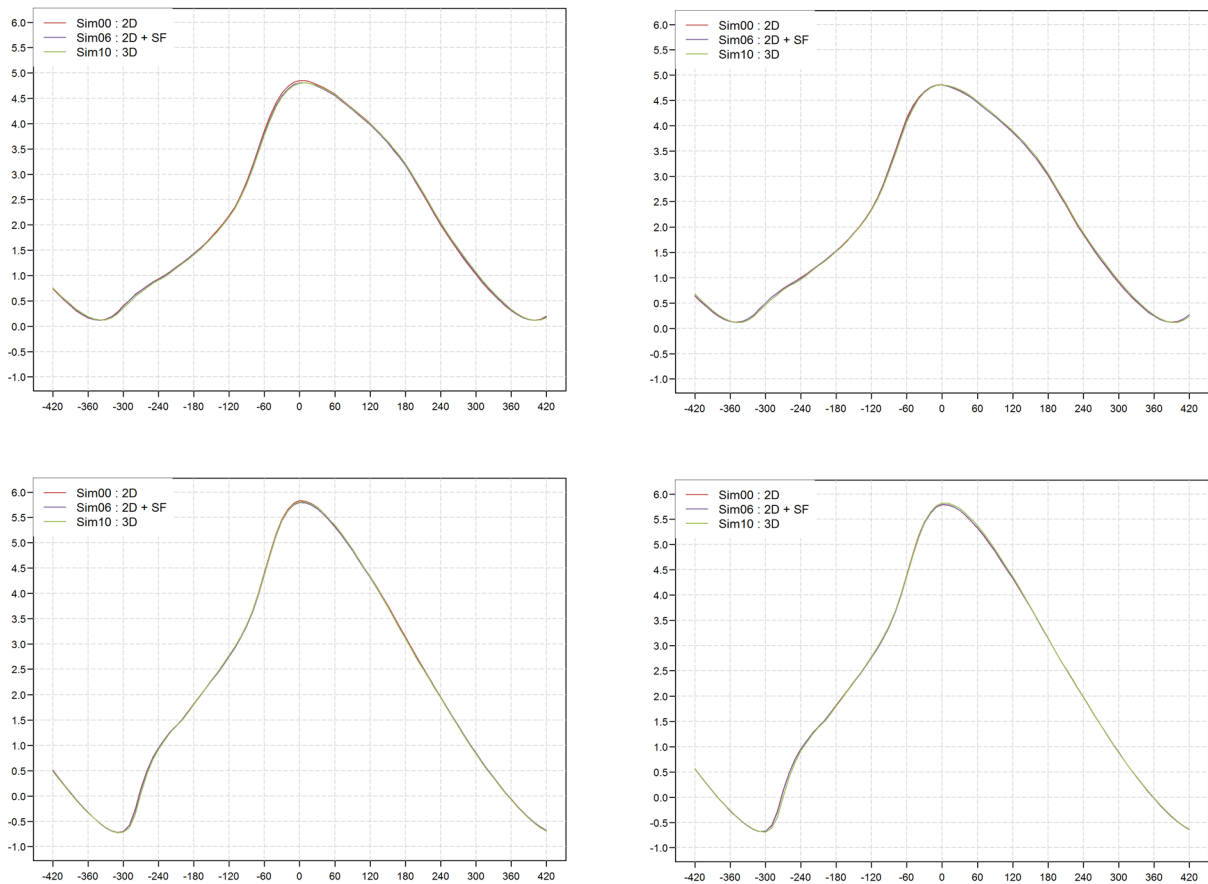
Naast het gewone NeVLa grid in simulatie 00, wordt ook een 2*2 verfijning geprobeerd (simulatie 22). Hierbij wordt het grid aangepast (en bijgevolg ook de bathymetrie). De overige settings (viscositeit, diffusie) werden constant gehouden. Onder deze voorwaarden bleek het onmogelijk om een stabiele simulatierun te bekomen. Vermoedelijk heeft dit te maken met (te) sterke aanpassingen aan de afwaartse randvoorwaarden of verminderde numerieke diffusie (waardoor sommige instabiliteiten kunnen ontwikkelen) t.g.v. het grovere grid. Bijgevolg kunnen geen resultaten i.v.m. het effect van de gridresolutie besproken worden. Een mogelijkheid is om de randvoorwaarde verder zeewaarts op te leggen, wat de rekentijden sterk kan verhogen, of eventueel een nog kleinere tijdstap te hanteren.

5.5 Stromingspatronen

In simulatie 10 worden 3D stromingspatronen in rekening gebracht door te werken met een 3D model, met 2 lagen die elk 50 % van de waterdiepte vertegenwoordigen (Figuur 66 t.e.m. Figuur 69). In simulaties 6 (Figuur 62 t.e.m. Figuur 65) en 8 (Figuur 74 t.e.m. Figuur 77) worden deze 3D stromingen gesimuleerd, gebruik makende van de “secondary flow” optie in Delft3D, respectievelijk zonder en met saliniteit. Simulatie 8 wordt besproken in sectie 5.6. In Maximova et al. (2011) werd aangetoond dat in de Kramp (bocht in de Boven-Zeeschelde) een 3D model met 2 lagen of 10 lagen weinig verschil gaf, maar een 3D model met 2 lagen wel duidelijk verbetering toonde ten opzichte van een diepte-gemiddeld 2D model.

In Figuur 22 zijn voor de verschillende simulaties de getijkrommes aan het begin van de simulatie te Vlissingen en Oosterweel weergegeven (Figuur 22, links). Na 50 dagen simulatie is de getijkromme te Vlissingen en Oosterweel weergegeven (Figuur 22, rechts). Voor de verschillende simulaties zien we dat op beide locaties de getijkrommes zeer goed overeenkomen, zowel aan het begin als gedurende de simulatie. De globale voortplanting van de getijgolf blijkt niet te verschillen door de verschillende morfologische instellingen.

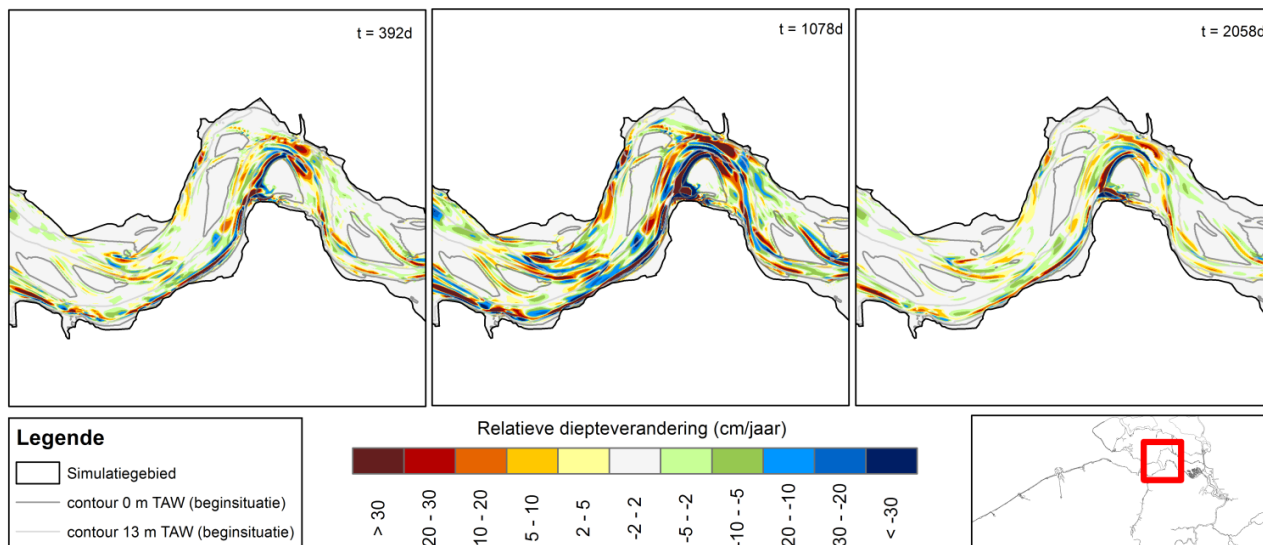
Figuur 22 – Verloop van een getijkromme (tijd in minuten t.o.v. HW en waterstanden in mTAW) te Vlissingen (boven) en Oosterweel (onder) aan het begin van de simulatie (links) en na 50 dagen simulatie (rechts)



Wanneer de simulatieresultaten van de secondary flow en 3D simulatie worden vergeleken, kan worden opgemerkt dat het verschil met de referentiesimulatie groter is voor de 3D simulatie. Bij het gebruik van secondary flow focussen de verschillen (zeker na langere simulatieduur) voornamelijk op de randen van de geulen. In Figuur 23 kan duidelijk een verandering van de patronen worden opgemerkt tussen $t = 1078$, waar verschillen over de volledige geul worden waargenomen en $t=2058$, waarin de verschillen vooral in de buitenbocht zijn geconcentreerd. De buitenbocht lijkt te verdiepen t.o.v. van de referentiesimulatie. In Figuur 24, zijn zoals vermeld de verschillen meer uitgespreid over de volledige geul met meer uitgesproken sedimentatie t.o.v. de referentiesimulatie. Wanneer we focussen op de drempelgebieden van Hansweert en Frederik, blijkt het effect van secondary flow voornamelijk voor deze eerste belangrijk. Voor de 3D simulaties, waarvoor slechts 2 uitvoersteps zijn, zijn de verschillen duidelijker en ook meer verdeeld over de volledige oppervlakte van de geulen.

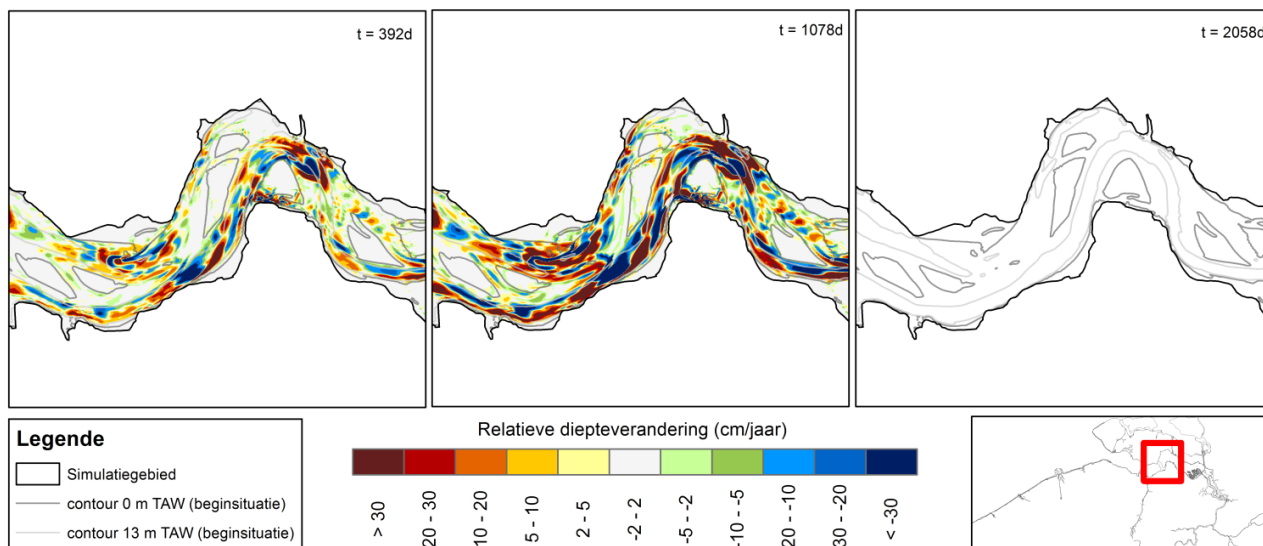
Figuur 23 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 06 (secondary flow) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen – Hansweert.

Sim 06 – Sim 00: Terneuzen-Hansweert



Figuur 24 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 10 (3D) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078) in de regio Terneuzen - Hansweert

Sim 10 – Sim 00: Terneuzen-Hansweert

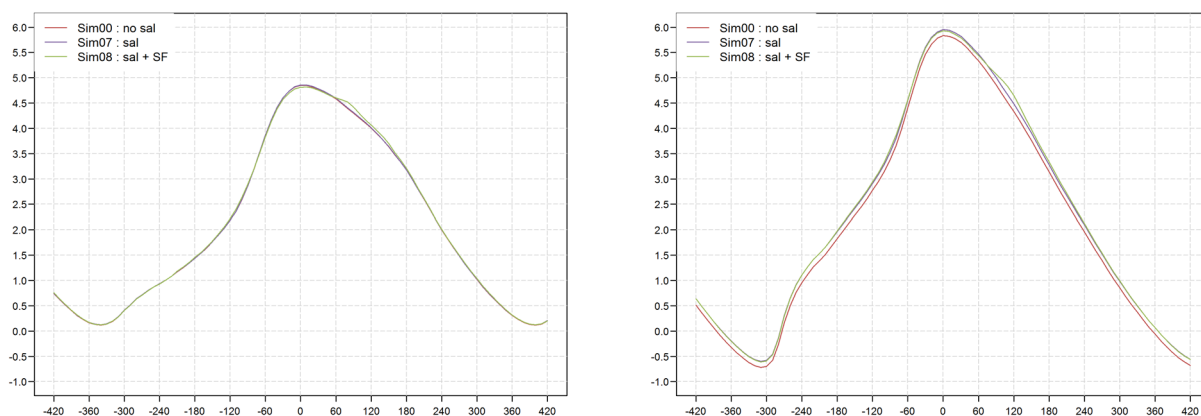


5.6 Saliniteit

In simulatie 7 (Figuur 70 t.e.m. Figuur 73) en 8 (Figuur 74 t.e.m. Figuur 77) wordt eveneens gebruik gemaakt van de saliniteitsberekening. Een constante waarde (31 psu) wordt aan de afwaartse rand vastgehouden. Een initieel zoutveld werd berekend voor deze simulaties, zodat geen (lange) inspeelperiode voor zout noodzakelijk is. Het verschil tussen simulatie 7 en 8 is het gebruik van de “secondary flow” optie, welke in simulatie 8 is aangezet.

In Figuur 25 zijn voor de verschillende simulaties de getijkrommes aan het begin van de simulatie te Vlissingen (links) en Oosterweel (rechts) weergegeven. Vanwege de lange duur van de simulaties en beperkte clustertijd is voor simulatie 8 slechts 1 tijdstap beschikbaar (na 344 dagen) en voor simulatie 7 twee, met name na 344 en 1054 dagen. De curves te Vlissingen voor de simulaties vallen ongeveer samen (behalve de knik in de curve voor Sim 08 ongeveer 1 uur na hoogwater). Te Oosterweel (Figuur 25, rechts) is er een duidelijk verschil tussen de getijkrommes. De simulaties met saliniteit vertonen een getijverloop dat ongeveer 10 cm verschoven is naar boven toe. Dit fenomeen, veroorzaakt door hogere densiteit en bijgevolg druk van zout water, wordt meer uitvoerig besproken in van der Kaaij (2015).

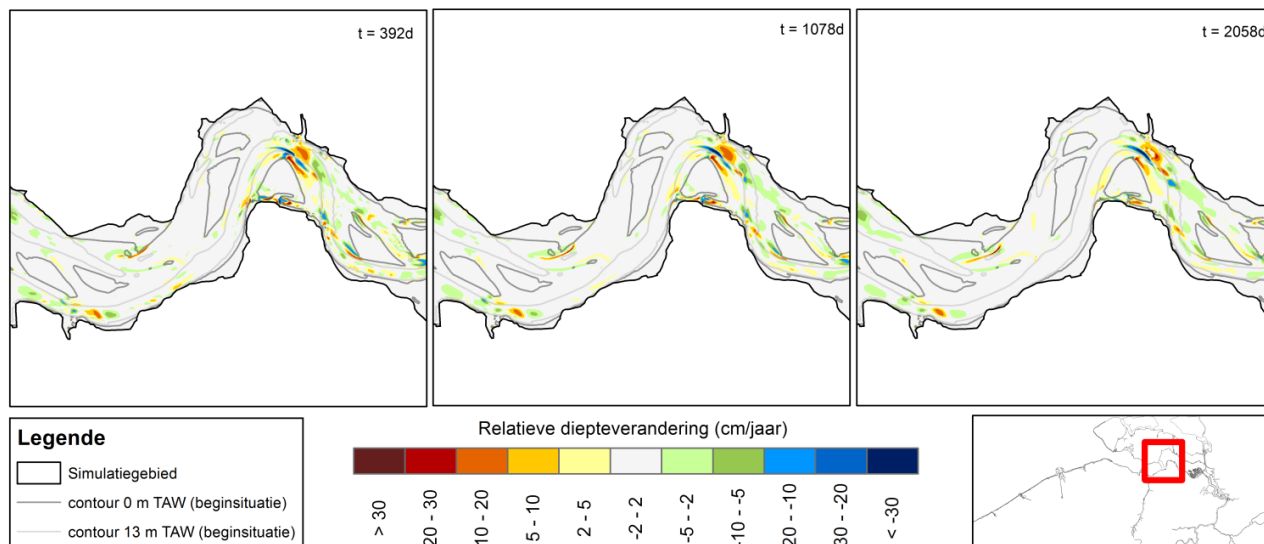
Figuur 25 – Verloop van een getijkromme (tijd in minuten t.o.v. HW en waterstanden in mTAW) te Vlissingen (links) en Oosterweel (rechts) aan het begin van de simulatie



Voor simulatie 7 valt op dat de verschillen vooral gesitueerd zijn aan de bochten en plaatsen waar vloedscharen samenkomen met de vaargeul. Al bij al lijken de verschillen zeer beperkt, zeker rekening houdende met de lange toename in simulatietijden. Ter hoogte van de bocht van Hansweert lijkt er iets meer sedimentatie t.o.v. de referentie in de binnenbocht, iets meer erosie in de buitenbocht. In simulatie 8 zijn de verschillen veel groter. Dit is voornamelijk ten gevolge van de implementatie van de secundaire stroming, aangezien de patronen zeer sterk gelijkaardig zijn als deze in simulatie 6 (Figuur 23). Deze verschillen zijn hier ook voornamelijk gesitueerd aan de rand van de vaargeul.

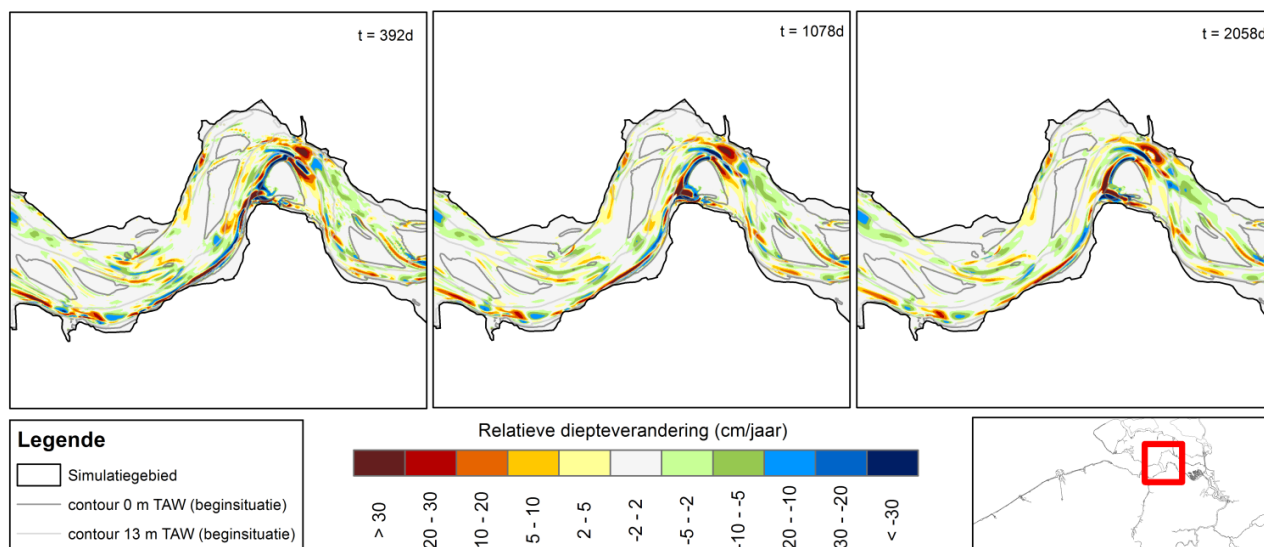
Figuur 26 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 07 (saliniteit) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 344, 1078, 2058) in de regio Vlissingen - Terneuzen

Sim07 – Sim00_repleuven: Terneuzen-Hansweert



Figuur 27 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 08 (sec. flow & saliniteit) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert

Sim08 – Sim00_repleuven: Terneuzen-Hansweert

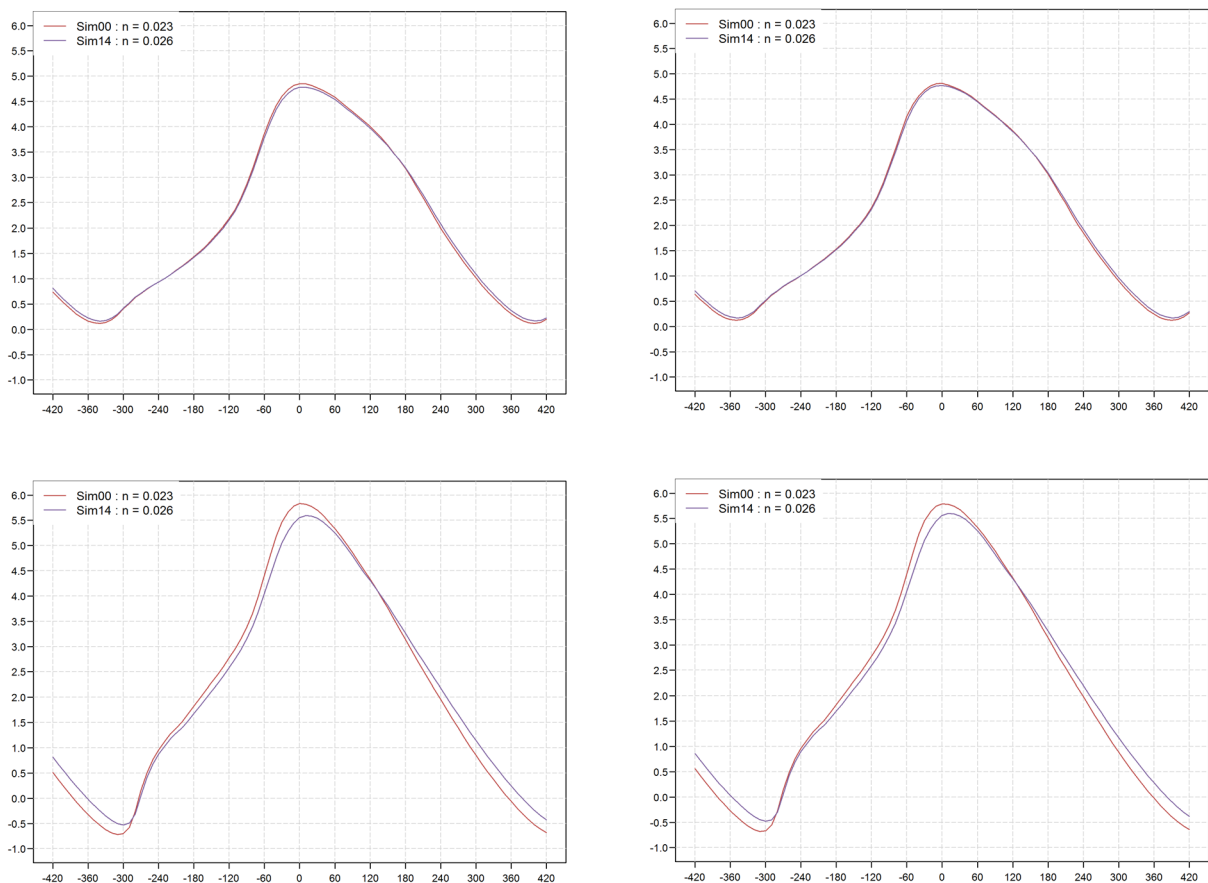


5.7 Ruwheid

In deze gevoeligheidsstudie wordt steeds gewerkt met een uniform ruwheidsveld, wegens het grote effect van ruwheidsblokken op de resultaten, zoals aangetoond in sectie 4.2. Simulatie 00 wordt vergeleken met simulatie 14 (Figuur 78 t.e.m. Figuur 81), respectievelijk met een Manning coëfficiënt van $0,023 \text{ s.m}^{-1/3}$ en $0,026 \text{ s.m}^{-1/3}$.

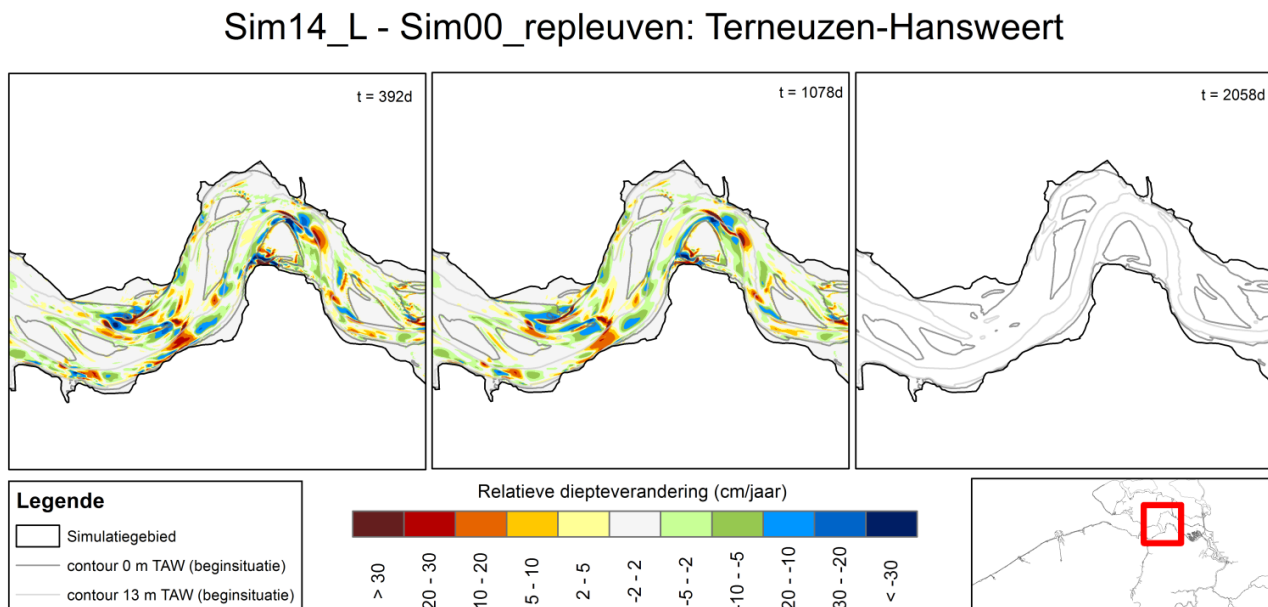
In Figuur 28 zijn voor de verschillende simulaties de getijkrommes aan het begin van de simulatie en na 50 dagen simulatie (morfologische tijd = ± 3.5 jaar) te Vlissingen en Oosterweel weergegeven. Aan het begin van de simulatie (Figuur 28, links) kan opgemerkt worden dat te Vlissingen de amplitude iets kleiner is voor de simulatie met hogere Manning wrijvingscoëfficiënt. Na ca. 50 dagen simulatie verloopt de getijkromme te Vlissingen voor de simulaties gelijkaardig. Te Oosterweel, is aan het begin van de simulatie het getijverschil tussen de verschillende scenario's sterk verschillend. Na 50 dagen simulatie (Figuur 28, rechts) is het getijverschil gelijkaardig. Het verschil in hoogwater lijkt iets kleiner geworden. Deze verlaagde amplitude bij hogere Manning coëfficiënt is logisch, aangezien een grotere remming wordt gezet op de stroming bij een hogere ruwheidswaarde.

Figuur 28 – Verloop van een getijkromme (tijd in minuten t.o.v. HW en waterstanden in mTAW) te Vlissingen (boven) en Oosterweel (onder) aan het begin van de simulatie (links) en na 50 dagen simulatie (rechts)



In de figuren, Figuur 78 t.e.m. Figuur 81, zijn de verschillen tussen beide simulaties weergegeven. In de belangrijkste bochten of drempelgebieden (bv. bocht van Bath, bocht van Hansweert en drempelgebied Everingen – Middelgat) wordt eerder een relatieve verondieping geobserveerd (Figuur 29). Dit kan te wijten zijn aan het feit dat de ruwheid een groter effect heeft op de ondiepere drempelgebieden, waardoor bij hogere waarden, een sterkere verlaagde stroming in deze gebieden optreedt vergeleken met de diepere gebieden. In de rechte delen van de vaarweg eerder een verdieping. Er is weinig verschil in de relatieve verandering voor de verschillende tijdstappen.

Figuur 29 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 14 (n = 0.026) t.o.v. Sim 00 (n = 0.023) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078) in de regio Terneuzen - Hansweert

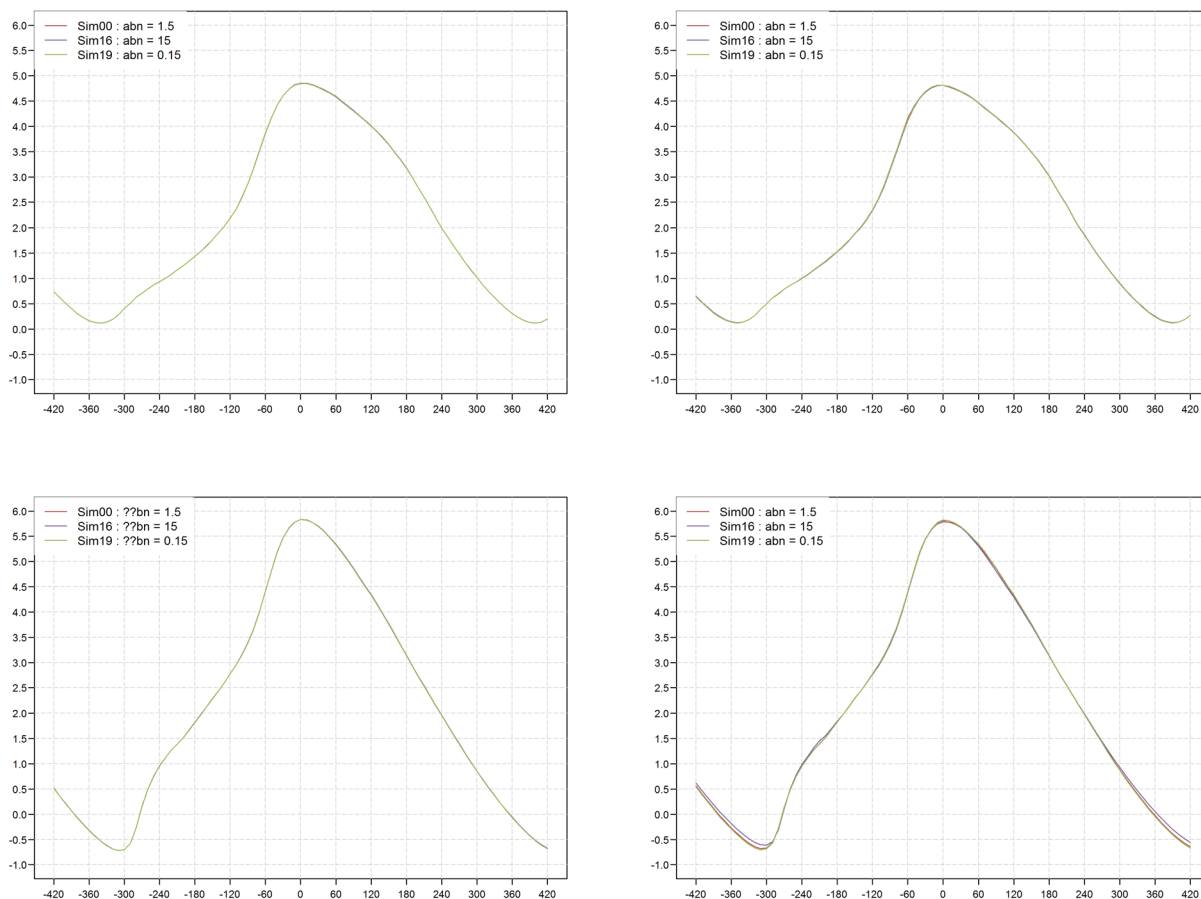


5.8 Bodemhelling

In simulaties 00, 16 en 19 wordt het effect van de bodemhelling α_{bn} nagegaan, met respectievelijke waarden 1.5 (een default waarde), 15 en 0.15. Eveneens werden simulaties uitgevoerd waarbij α_{bs} werd gevarieerd, met name tussen respectievelijke waarden 10, 1 (default) en 0.1. De simulaties met α_{bn} zijn weergegeven in Figuur 82 t.e.m. Figuur 89, simulaties met α_{bs} zijn weergegeven in Figuur 90 t.e.m. Figuur 97.

In Figuur 30 zijn voor de verschillende simulaties de getijkrommes aan het begin van de simulatie te Vlissingen en Oosterweel weergegeven (Figuur 30, links). Na 50 dagen simulatie is de getijkromme te Vlissingen en Oosterweel weergegeven (Figuur 30, rechts). Voor de verschillende simulaties zien we dat te Vlissingen de getijkrommes zeer goed overeenkomen, zowel aan het begin als gedurende de meting. Te Oosterweel lijkt voor simulatie 16, met verhoogde α_{bn} waarde, de laagwaters iets hoger te worden.

Figuur 30 – Verloop van een getijkromme (tijd in minuten t.o.v. HW en waterstanden in mTAW) te Vlissingen (boven) en Oosterweel (onder) aan het begin van de simulatie (links) en na 50 dagen simulatie (rechts)



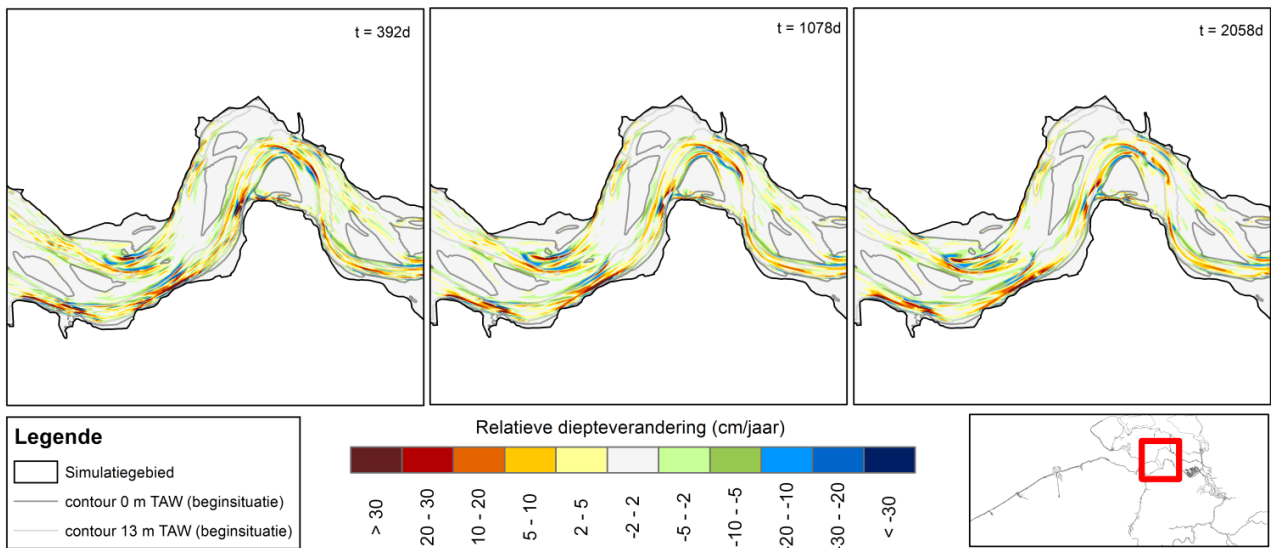
De resultaten van Sim 19 ($\alpha_{bn} = 0.15$) t.o.v. de referentiesimulatie zijn weergegeven van Figuur 82 t.e.m. Figuur 85, de resultaten van Sim 16 ($\alpha_{bn} = 15$) t.o.v. Sim 00 zijn weergegeven van Figuur 86 t.e.m. Figuur 89. De verschillen met de referentiesimulaties ($\alpha_{bn} = 1.5$) lijken kleiner voor een lagere α_{bn} (0.15) t.o.v. een hogere α_{bn} (15) (zie Figuur 31 en Figuur 32). In beide gevallen zijn de patronen van de verschillen georiënteerd volgens de lengterichting van de (Wester)Schelde. α_{bn} is een diffusieparameter voor bodemtransport, een grotere waarde leidt tot een grotere spreiding in laterale richting. Voor simulatie 19 blijven de verschillen, zowel qua patroon en grootte, gelijkaardig voor de verschillende tijdstappen. De verschillen tussen de simulaties lijken af te nemen naar het grensgebied toe (zone Bath – Liefkenshoek), op en afwaarts van deze zone zijn de verschillen meer uitgesproken (zeker in de Zeeschelde). De verschillen tussen simulatie 16 ($\alpha_{bn} = 15$) en de referentiesimulatie zijn meer uitgesproken en ook duidelijk over een groter oppervlak van het estuarium. In de hoofdgeul lijkt eerder een verondieping t.o.v. de referentie plaats te vinden, in de nevengeulen eerder een verdieping. Voor simulatie 16 blijven de verschillen, qua grootte, gelijkaardig voor de verschillende tijdstappen. De initiële verschilpatronen tussen de verschillende simulaties zijn gelijkaardig, maar de patronen worden duidelijker in de loop van de simulatie. De zones met relatieve ver(on)dieping zijn meer aaneengesloten en de kleinere variaties lijken te verdwijnen na 6 jaar morfologische simulatie.

De resultaten van Sim 24 ($\alpha_{bs} = 0.1$) t.o.v. de referentiesimulatie zijn weergegeven van Figuur 90 t.e.m. Figuur 93, de resultaten van Sim 16 ($\alpha_{bs} = 10$) t.o.v. Sim 00 zijn weergegeven van Figuur 94 t.e.m. Figuur 97. Ook hier kan gesteld worden dat een verlaging van de waarde t.o.v. de default waarde leidt tot een quasi identieke morfologische evolutie. Vermoedelijk zorgt een verlaging van de waarde voor de

bodemhellingseffecten (zowel α_{bs} als α_{bn}) ervoor dat deze diffusie termen klein blijven t.o.v. de numerieke diffuse. Voor een verhoging van α_{bs} t.o.v. de default waarde zijn de verschillen groter (zie Figuur 86). In tegenstelling tot de factor α_{bn} zijn de patronen hier niet parallel met de geul, maar eerder loodrecht hierop, alhoewel geen duidelijk patroon kan worden onderscheiden voor locaties met ver(on)dieping ten opzichte van de referentiesimulatie. Het effect van α_{bn} lijkt over het algemeen groter te zijn en over een groter gedeelte van de stroomgeulen te spelen.

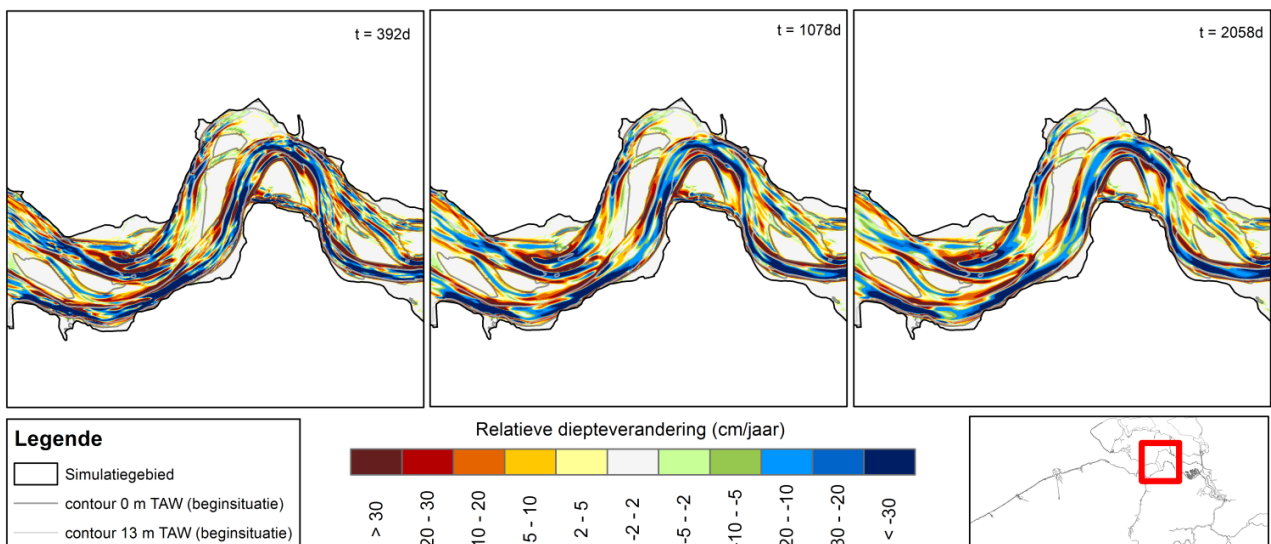
Figuur 31 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 19 ($\alpha_{bn} = 0.15$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bn} = 1.5$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert

Sim 19 - Sim 00: Terneuzen-Hansweert



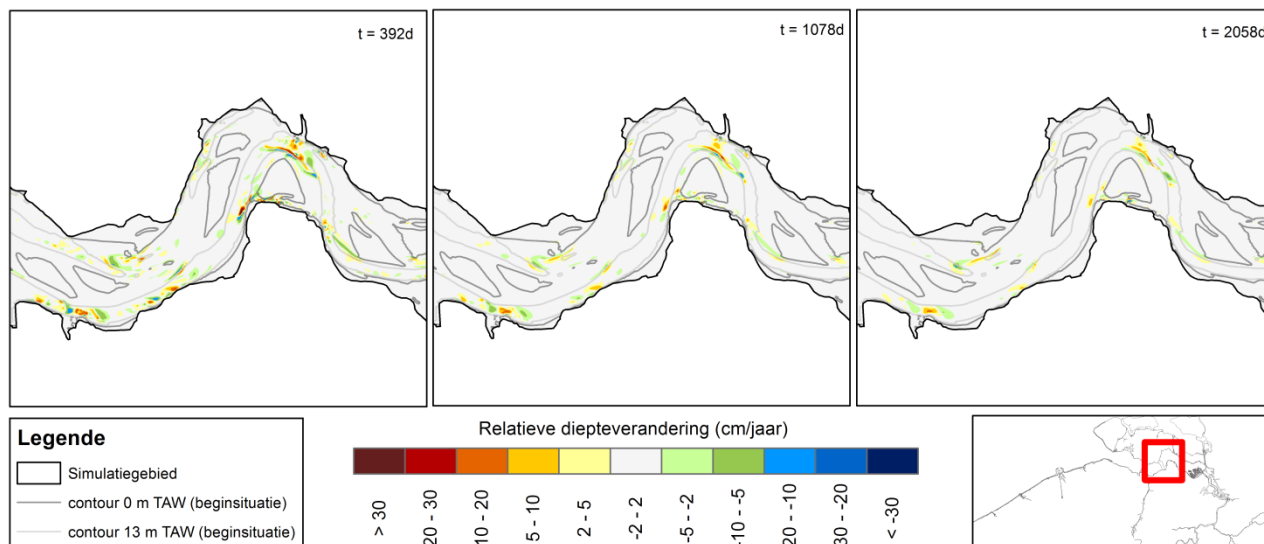
Figuur 32 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 16 ($\alpha_{bn} = 15$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bn} = 1.5$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert

Sim 16 - Sim 00: Terneuzen-Hansweert



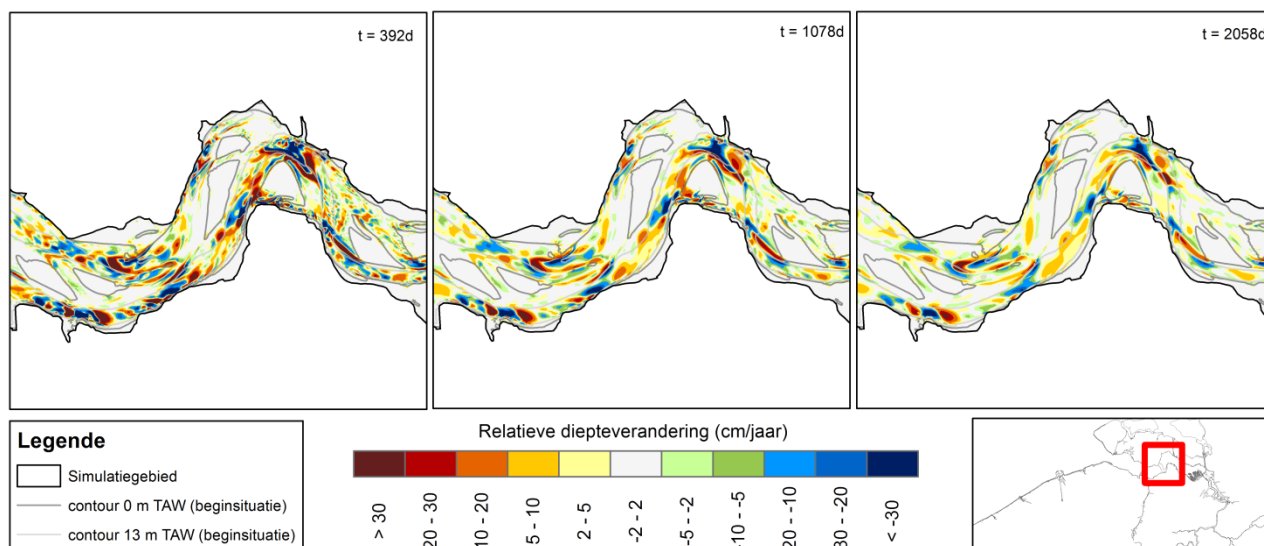
Figuur 33 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 24 ($\alpha_{bs} = 0.1$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bs} = 1$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert

Sim 24: Terneuzen-Hansweert



Figuur 34 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 23 ($\alpha_{bs} = 10$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bs} = 1$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert

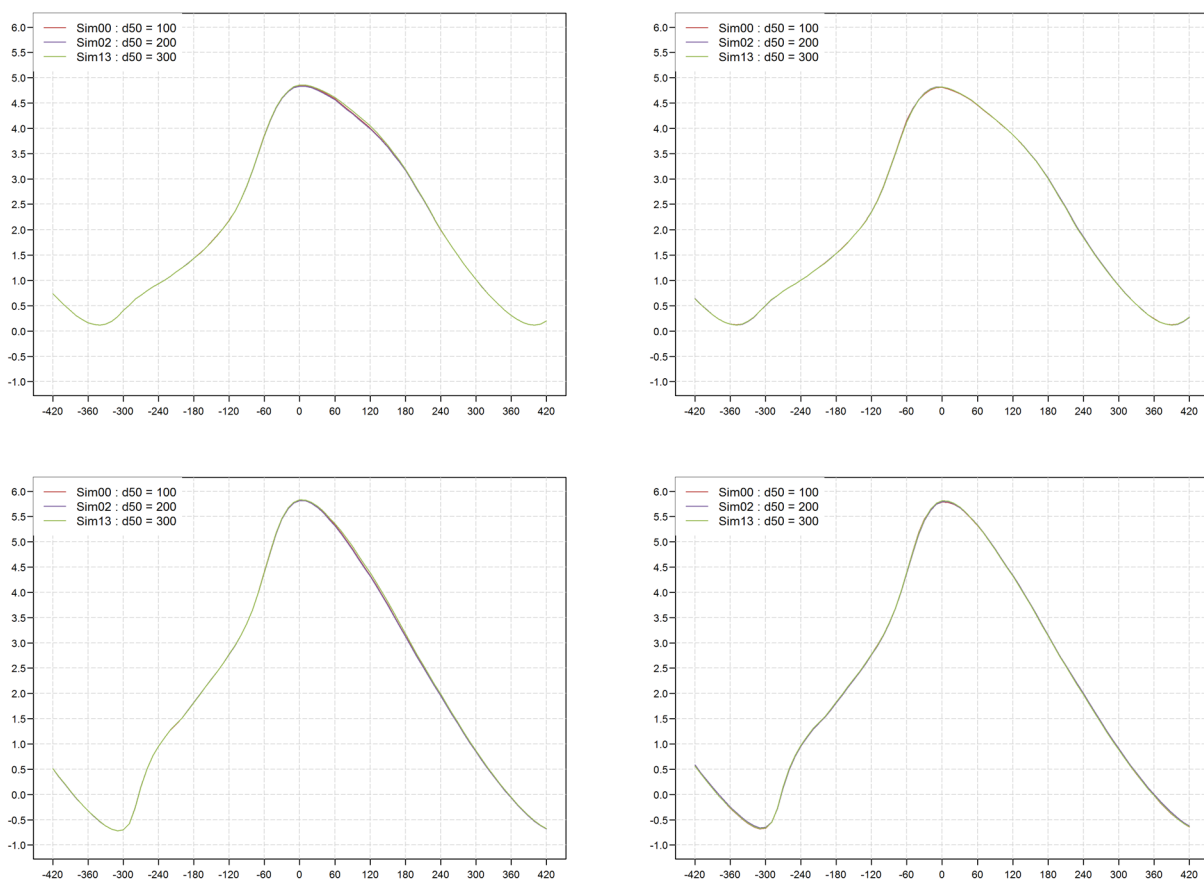
Sim 23: Terneuzen-Hansweert



5.9 Sedimentkarakteristieken

Naast morfologische parameters kan ook gevarieerd worden met de eigenschappen van het sediment. In simulaties 00, 02 (Figuur 98 t.e.m. Figuur 101) en 13 wordt de D50 parameter respectievelijk gevarieerd tussen 100 en 300 μm . Deze sedimentkarakteristieken werden steeds constant verondersteld over de hele Westerschelde, alsook in de tijd. Hiernaast werd ook een simulatie gerund met 3 sedimentklassen, nl. 100 μm , 250 μm en 400 μm . Deze resultaten van simulatie LT_30, zijn weergegeven in Figuur 106 t.e.m. Figuur 109.

Figuur 35 – Verloop van een getijkromme (tijd in minuten t.o.v. HW en waterstanden in mTAW) te Vlissingen (boven) en Oosterweel (onder) aan het begin van de simulatie (links) en na 50 dagen simulatie (rechts)



In Figuur 35 zijn voor de verschillende simulaties de getijkrommes aan het begin van de simulatie en na 50 dagen simulatie (morfologische tijd = ± 3.5 jaar) te Vlissingen en Oosterweel weergegeven. Voor Vlissingen vallen de gesimuleerde getijkrommes voor alle verschillende scenario's samen, zowel aan het begin als na 50 dagen simulatietijd. Voor Oosterweel vallen de gesimuleerde getijkrommes voor alle verschillende scenario's samen aan het begin van de simulatie (Figuur 35, links).

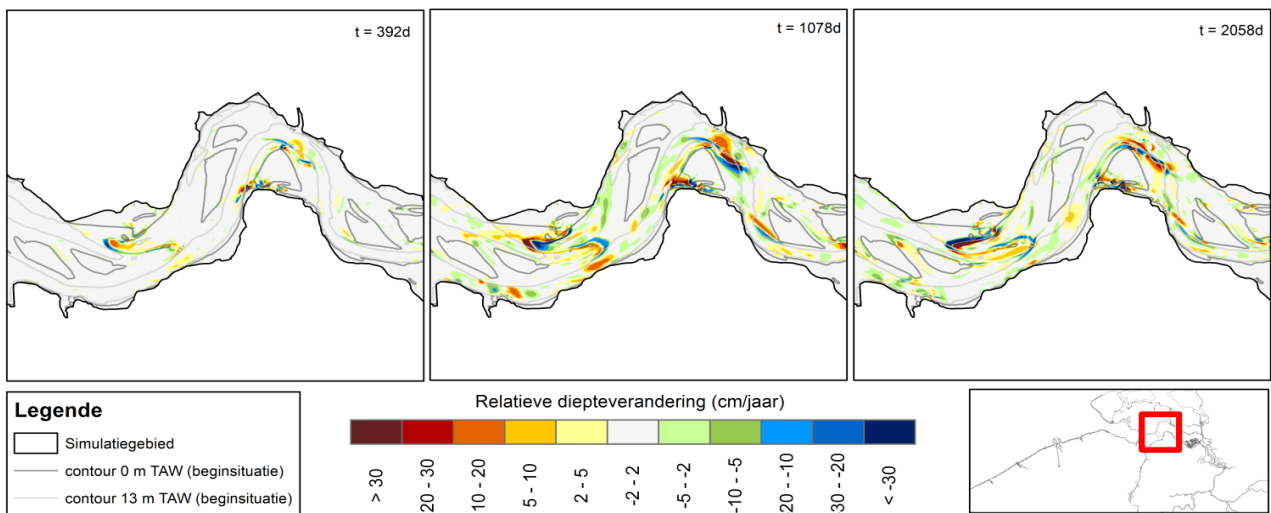
De resultaten van Sim 02 (D50 = 100 μm) zijn weergegeven van Figuur 98 t.e.m. Figuur 101. In het algemeen kunnen sterke verschillen worden waargenomen tussen Sim 02 en de referentie. Een sterke verdieping t.o.v. de referentiesimulatie valt op in het drempelgebied van de Everingen en de drempel van Hansweert, na ca. 3 jaar. Over het algemeen lijkt in het centrum van de vaargeul ook een verondieping t.o.v. de referentiesimulatie te worden waargenomen. De resultaten van Sim 13 (D50 = 300 μm) zijn weergegeven in Figuur 102 t.e.m. Figuur 105. De veranderingen lijken kleiner te zijn t.o.v. van Sim 02, wat ook verwacht kan

worden vanwege het grotere, en bijgevolg minder mobiele sediment. De sterke uitvlakking van het mozaïekpatroon tussen de simulaties na 3 en 6 jaar is opvallend.

Voor de simulatie met 3 fracties (Sim LT30), weergegeven in Figuur 106 t.e.m. Figuur 109, valt op dat de verschillen met de referentiesimulatie beperkt is. Bij deze simulatie dient eveneens opgemerkt te worden dat de Morfac op 98 ingesteld stond. Wanneer men de simulatieresultaten van Sim 04 met morfac 98 (Figuur 36) vergelijkt met de simulaties van Sim LT 30 (Figuur 37), waarbij zowel de morfologische versnellingsfactor gelijk is aan 98 maar ook 3 fracties worden gebruikt i.p.v. een D50 van 200 µm, kan opgemerkt worden dat de zones waarin verschillen zijn t.o.v. de referentiesimulatie, sterk gelijkend zijn. Eveneens lijken de verschillen iets kleiner te zijn voor Sim LT 30 vergeleken met Sim 04.

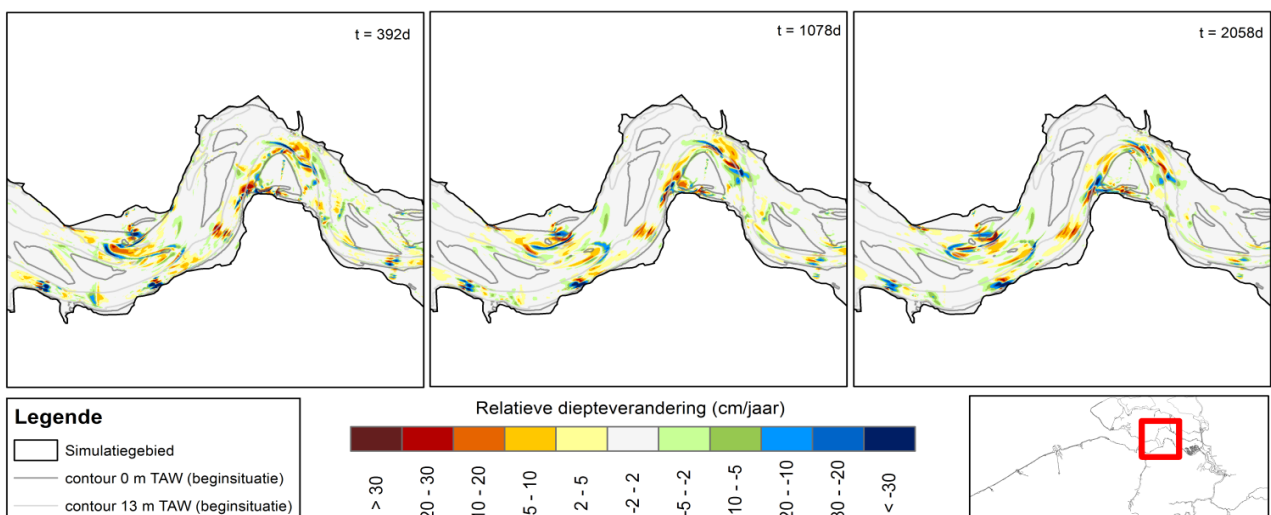
Figuur 36 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 04 (MF = 98) t.o.v. Sim 00 (MF = 24.5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert

Sim 04 – Sim 00: Terneuzen-Hansweert



Figuur 37 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim LT30 (3 fracties) t.o.v. Sim 00 (D₅₀ = 200 µm) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert

Sim LT30 – Sim 00: Terneuzen-Hansweert



5.10 Geen morfologische versnelling (MF = 1)

Er werd ook één simulatie uitgevoerd waarbij geen morfologische versnellingsfactor werd toegepast. De snelheid van morfologische verandering is dus 1 op 1 gekoppeld met de hydrodynamische berekening en niet versneld. Hierdoor is het onmogelijk om dezelfde morfologische tijdstippen te bespreken, zoals beschreven in sectie 5.1.1, vanwege de lange simulatietijden. Wegens deze kortere morfologische simulatietijd worden de simulaties hier vergeleken, en niet opgenomen in sectie 5.2, waar het effect van de morfac wordt besproken. Op het cluster te Leuven (Ivy node, 20 processoren) zijn voor 90 dagen simulatie (ca. 3 maanden) 20 rekendagen nodig. De resultaten van deze simulatie worden vergeleken op 3 tijdstappen, met name na 24, 49 en 72 dagen.

De resultaten, met name de verschillen tussen MF = 1 (Sim 20) en MF = 24.5 (Sim 00), zijn weergegeven van Figuur 110 t.e.m. Figuur 113. De veranderingen tussen de beginsituatie en na de laatste berekende tijdstap (dag 92) zijn weergegeven van Figuur 114 t.e.m. Figuur 117. Vanwege de veel kortere (morfologische) tijdsduren van deze simulaties zijn de veranderingen hier weergegeven in cm/week in plaats van cm/jaar.

In het algemeen zijn de verschillen tussen Sim 20 en de referentie beperkt. De voornaamste gebieden waarin een onderling verschil optreedt zijn in het drempelgebied van de Everingen, aan de bocht van Hansweert, ten zuiden van de plaat van Walsoorden en aan de Bocht van Bath. Er wordt hoofdzakelijk een lokale verdieping gesimuleerd, gebruik makende van MF = 1. Duidelijke patronen in de verschillen kunnen niet worden waargenomen.

Wanneer we kijken naar de morfologische evolutie (Figuur 114 t.e.m. Figuur 117) zijn dezelfde regio's morfologisch het meest actief. Opvallend is dat zowel voor de Everingen, de bocht van Hansweert & de bocht van Bath voor/in de bocht een verondieping optreedt. Na de bocht, in de vaargeul, treedt een lokale verdieping op van de geul. Ter hoogte van de drempel van Frederik kan nauwelijks verschil worden waargenomen, vermoedelijk te wijten door het feit dat sedimentatie hier voornamelijk slib gebonden is.

6 Conclusie en aanbevelingen

In dit rapport werd een gevoeligheidsstudie uitgevoerd van Delft3D morfologische simulaties gefocust op de Westerschelde. In de eerste plaats bleek er een duidelijk effect te zijn van het gebruik van verschillende versies van Delft3D op de resultaten. Dit zorgt ervoor dat gebruikte instellingen van het model in vorige studies, en zijn berekende resultaten, niet zomaar gelijkaardige resultaten zal opleveren. In deze studie werd het effect van een bepaald scenario steeds vergeleken met een referentiesimulatie uitgevoerd met dezelfde versie van het model. Eveneens werd nagegaan of er een effect is van het gebruik van een verschillend rekencluster op de resultaten. Dit bleek, zoals is weergegeven in Figuur 15, niet het geval.

Algemeen kan gesteld worden dat voor een aantal parameterinstellingen (2D, Van Rijn & Soulsby transportformulering) geen stabiele modelresultaten werden verkregen voor de huidige modelinstellingen. Eveneens werd vastgesteld dat aan de afwaartse rand in de loop van de morfologische simulatie soms kleine instabiliteiten ontstonden, voornamelijk aan het Oostgat. Het dient dan ook tot aanbeveling voor vervolgstudies om de afwaartse rand van het model te definiëren aan de rand van het Nevla model, met name verder buiten het mondingsgebied. Anderzijds leidt dit natuurlijk tot langere rekentijden en kan dit ook conflicteren met de wens naar meer detail in de interesse gebieden.

De grootste effecten op de morfologische resultaten worden bekomen door de keuze van de transportformulering. De verschillen voor een gebruik van de Engelund-Hansen formulering en de Van Rijn formulering zijn groot, en over het volledige rekendomein. In deze studie werden de verschillende parameters van de transportformulering niet gevarieerd, wat eveneens kan leiden tot sterke verschillen in de resultaten.

Wanneer gekeken wordt naar de morfologische parameters (morfologische versnellingsfactor en bodemhelling) blijkt voornamelijk de keuze van de waarde (enkel een verhoging t.o.v. de default waarde) van de bodemhelling een sterke en globale invloed te hebben op de resultaten. De effecten van α_{bs} zijn eveneens nagegaan in dit rapport, maar lijken iets kleiner te zijn vergeleken met α_{bn} . De invloed van de morfologische versnellingsfactor is beperkter in oppervlak en grootte. De keuze van een grotere morfologische versnellingsfactor ($MF > 49$) lijkt wel een sterkere invloed te geven op de resultaten.

Wanneer gekeken wordt naar de processen die de (berekening van de) stroming beïnvloeden, zoals 3D effecten, secondary flow, saliniteit en ruwheid, lijkt in de eerste plaats 3D en secondary flow effecten een belangrijke invloed te hebben op de resultaten. De berekening van de morfologische evolutie lijkt voornamelijk beïnvloed door de incorporatie van 3D effecten en in tweede plaats secondary flow effecten, welke in een 3D berekening zowieso worden opgenomen. In dit rapport wordt, verkennend, enkel gekeken naar een relatieve verdeling van de rekenlagen van 50 – 50%, het kan eveneens interessant zijn om de invloed van de relatieve verdeling van de lagen op de resultaten na te gaan, naast het effect van het aantal lagen. Eveneens kan het interessant zijn om het effect van meerdere verticale lagen te bestuderen, alhoewel men hier op een praktische belemmering wegens de langere rekentijden kan botsen. In gevallen waarin saliniteit wordt opgenomen, zijn de verschillen tussen de referentiesimulatie en de beschouwde simulaties beperkter en meer gefocust op de morfologisch actievere bochten en drempels. De getijcurve voor deze simulatie met saliniteit is verschoven, zoals bv. ook wordt aangehaald in van der Kaaij (2016).

Het effect van sedimentkarakteristieken (d_{50}) op de resultaten is eveneens groot en uitgesproken over de volledige oppervlak van het studiegebied.

Samengevat zou volgende volgorde van effect kunnen worden afgeleid, in volgorde van sterkte van de impact, voor het NEVLA model zoals het hier gebruikt is:

- 1) transportformulering
- 2) sedimentkarakteristieken / bodemhelling (met name α_{bn})
- 3) 3D en secondary flow
- 4) ruwheid en saliniteit
- 5) morfologische versnellingsfactor

Uiteraard is hierbij het doel van de studie steeds in het oog te houden. Immers, wanneer gekeken wordt naar de kortere termijn en de focus op specifieke gebieden gericht is, lijkt het effect van saliniteit en morfologische versnellingsfactor eveneens belangrijk.

7 Referenties

Beirinckx, K.; Taal, M.; Plancke, Y.; Van den Bergh, E. (2013). Plan van Aanpak Onderzoek Agenda voor de Toekomst

Ceuppens, S., Darcis, M. (2015). Studie naar het sedimenttransport in het Schelde-estuarium: de theorie, de metingen en de reproduceerbaarheid met numerieke modellen. Masterproef voorgedragen tot het bekomen van de graad van: Master of Science in de industriële wetenschappen Bouwkunde. Universiteit Antwerpen.

Dam, G., 2012, Update niet-erodeerbare lagen kartering Westerschelde, U12072/1630/GD; Svašek Hydraulics

Dam, G., van der Wegen, M., Labeur, R. J., Roelvink, D. (2015) Modeling centuries of estuarine morphodynamics in the Western Scheldt estuary. *Geophys. Res. Lett.*, 43, doi:10.1002/2015GL066725

Deltares (2011). Delft3D-FLOW - Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments - User Manual.

Dissanayake, P.K. (2011) Modelling morphological response of large tidal inlet systems to sea level rise. PhD thesis, Delft University of Technology.

IMDC, Deltares, Svasek, Arcadis (2013a) Instandhouding Vaarpassen Schelde Milieuvergunningen terugstorten baggerspecie Actualisatierapport Finel 2D Schelde-estuarium Achtergrondrapport A-26.

IMDC, Deltares, Svasek, Arcadis (2013b) Instandhouding Vaarpassen Schelde Milieuvergunningen terugstorten baggerspecie Actualisatierapport Delft3D Schelde-estuarium. Achtergrondrapport A-27.

Kuijper, K., Van der Kaaij, T, De Goede, E., 2006. LTV-O&M actieplan voor morfologisch onderzoek modelinstrumentarium. Rapport Z3950. WL|Delft Hydraulics.

Latteux, B., 1995. Techniques for long-term morphological simulations under tidal action. *Marine Geology* 126, pp 129-141.

Lesser, G.J., 2009. An approach to medium-term coastal morphological modelling. PhD thesis, Delft University of Technology, Delft.

Maximova, T.; Ides, S.; De Mulder, T.; Mostaert, F. (2009). LTV O&M thema Veiligheid - Deelproject 1: Verbetering hydrodynamisch NeVla model ten behoeve van scenario-analyse. WL Rapporten, 756_05. Flanders Hydraulics Research & Deltares: Antwerp, Belgium

Maximova, T.; Vanlede, J.; Mostaert, F. (2011). Flow in river bends: A numerical model investigation. Version 2_0. WL Rapporten, 753_15. Flanders Hydraulics Research: Antwerp, Belgium

Nnafie, A.; Van Oyen, T.; De Maerschalck, B. ; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016) Modeling effects of geometry, initial bathymetry and sediment availability on the morphodynamic evolution of the Scheldt mouth area. Version 3.0. WL Rapporten, 14_094. Flanders Hydraulics Research: Antwerp, Belgium.

Plancke, Y.; Wouters, K.; Meire, D.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016). Agenda voor de toekomst - Morfologie Mesoschaal: Deelrapport 5 – Data-analyse sedimentdynamica ter hoogte van stortingen. Versie 4.0. WL Rapporten, 14_024_5. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Svasek (2006) Morfodynamische berekeningen van de Westerschelde met behulp van "FINEL2d"

Stark, J.; Meire, D.; De Maerschalck, B.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2017). Morfologie mesoschaal: Deelrapport 7 – Sedimentatie ter hoogte van drempels: validatie numeriek model. Versie 4.0. WL Rapporten, 14_024. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Stive, M.J.F., Roelvink, J.A., De Vriend, H.J., (1990) Large-scale coastal evolution concept, Proc. 22nd Int. Conf. on Coastal Engineering, ASCE, 1962-1967.

Teske, R. (2013) Tidal inlet channel stability in long term process based modelling. Msc. Traineeship report.

Vandebroek, E.; Claeys, S.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2017a). Agenda for the future – Mesoscale hydro- and sediment dynamics in the Schelde estuary: Sub report 10. Factual data report for measurements at Drempel van Hansweert in April/May 2016. Version 3.0. *FHR reports*, 14_024_10. Flanders Hydraulics Research/Antea Group: Antwerp.

Vandebroek, E.; Claeys, S.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2017b). Agenda for the future - Hydrodynamics and sediment dynamics in the Schelde Estuary: sub report 11. Factual data report for frame-measurements at Drempel van Frederik in December 2015 and January 2016. Version 3.0. *FHR reports*, 14_024_11. Flanders Hydraulics Research/Antea Group: Antwerp.

van Der Wegen, M. (2010) Modeling morfodynamic evolution in alluvial estuaries. PhD thesis, Delft University of Technology.

Van der Werf, J. (2016) Modelinstrumentaria ten behoeve van verkenningen morfologische ingrepen Schelde-monding. 1210301-000-ZKS-0020

van der Kaaij (2015) Schelde Estuarium. WAQUA model 5^e generatie. Modelopzet, Kalibratie en validatie. Deltares.

Van Rijn, L. C.; J. A. Roelvink; W. T. Horst (2000) Approximation formulae for sand transport by currents and waves and implementation in DELFT-MOR. Tech. Rep. Z3054.40, WL Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands.

Van Rijn, L. C.; Walstra, D.J.R. (2003) Modelling of sand transport in DELFT3D. Z3624, WL Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands.

Verheyen, B.; Vanlede, J.; Decrop, B.; Mostaert, F. (2012). NEVLA3D randvoorwaardenmodel: deelrapport 6. Scenarioberekeningen LTV zandhuishouding. versie 2.0. *WL Rapporten*, 00_018. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Vos, G.; Meire, D.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016) Agenda voor de toekomst – DT5 Morfologie Mesoschaal: Deelrapport 1 – Data-analyse sedimentdynamica ter hoogte van drempels. Versie 3.0. WL Rapporten, 14_024. Waterbouwkundig Laboratorium & Antea Group Belgium: Antwerpen, België.

Vos, G.; De Maerschalck, B.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2017). Agenda voor de toekomst - Morfologie Mesoschaal: Deelrapport 8 – Sedimentatie ter hoogte van drempels: gevoeligheidsanalyse stortingen. Versie 1.0. WL Rapporten, 14_024_8. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

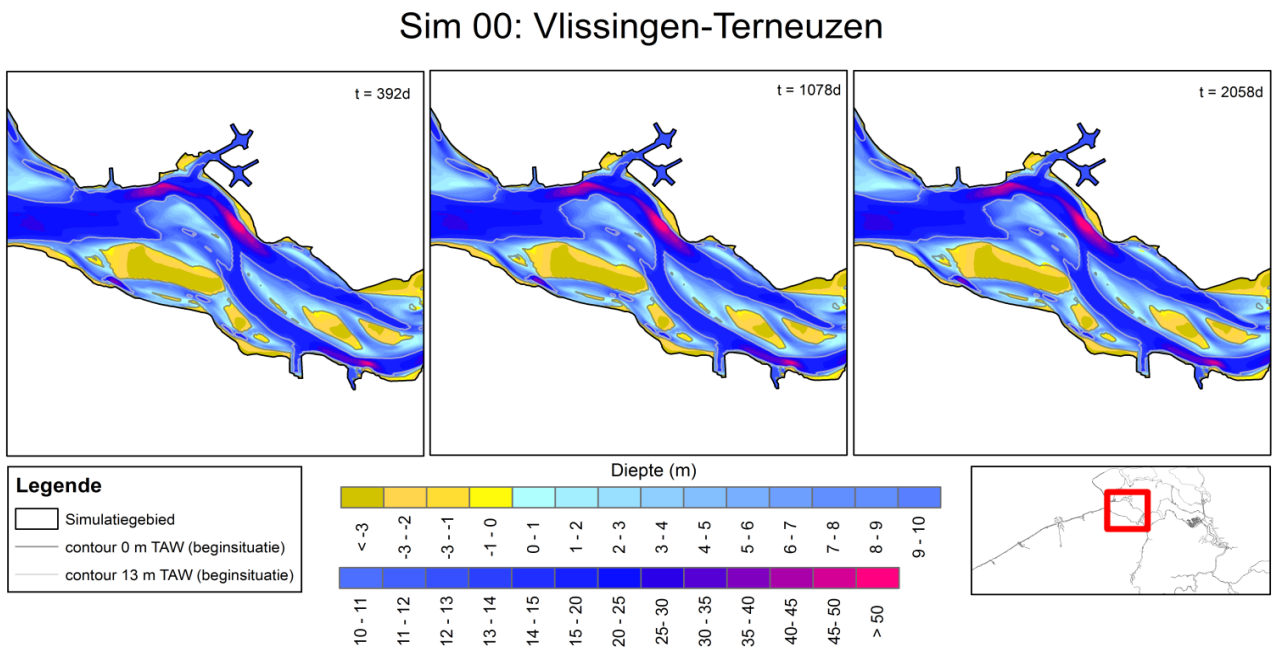
WL Delft Hydraulics & Alkyon (2004) Morphological modelling of the Western Scheldt. Validation of Delft3D.

WL Delft Hydraulics (2006) LTV O&M actieplan voor morfologisch onderzoek modelinstrumentarium. Z3950

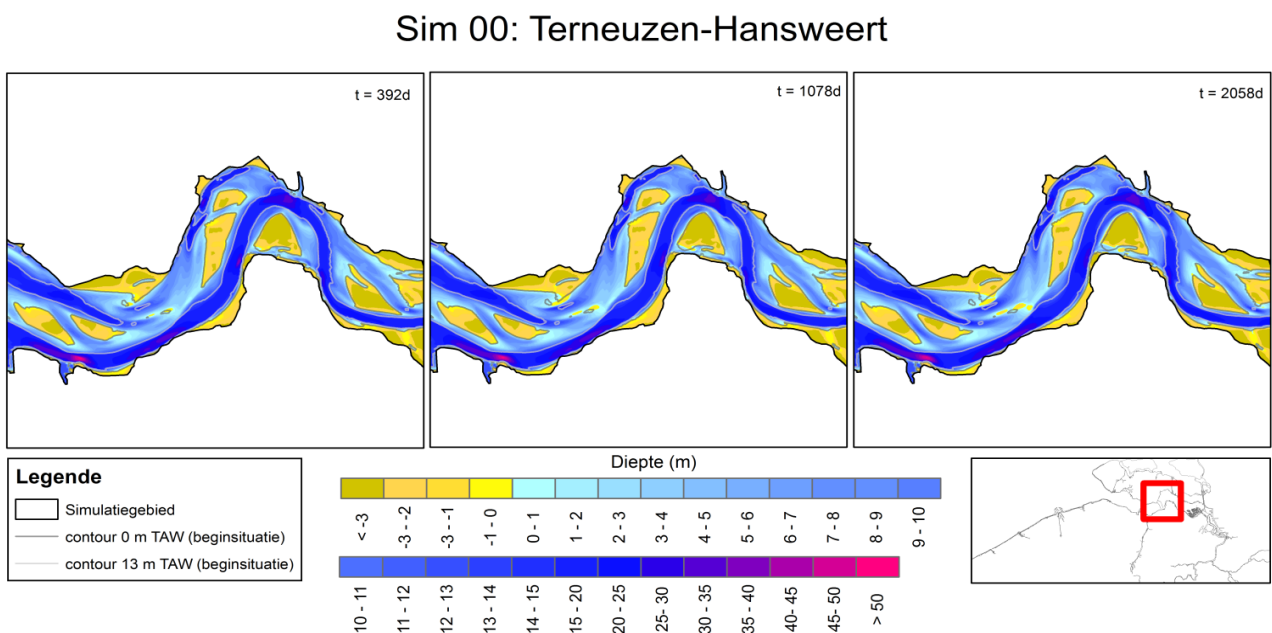
Bijlagen

Referentiesimulatie (Sim 00)

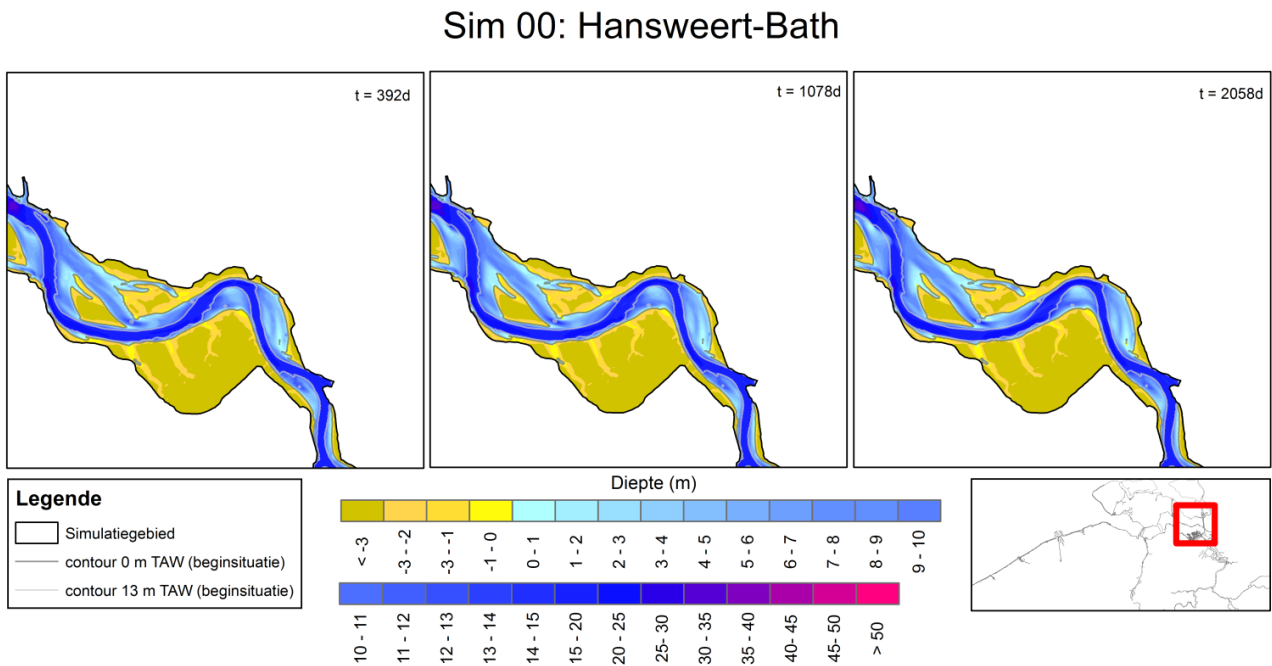
Figuur 38 – Simulatieresultaten (Sim 00) van de diepteligging na respectievelijk 392, 1078 en 2058 dagen in de regio Vlissingen - Terneuzen



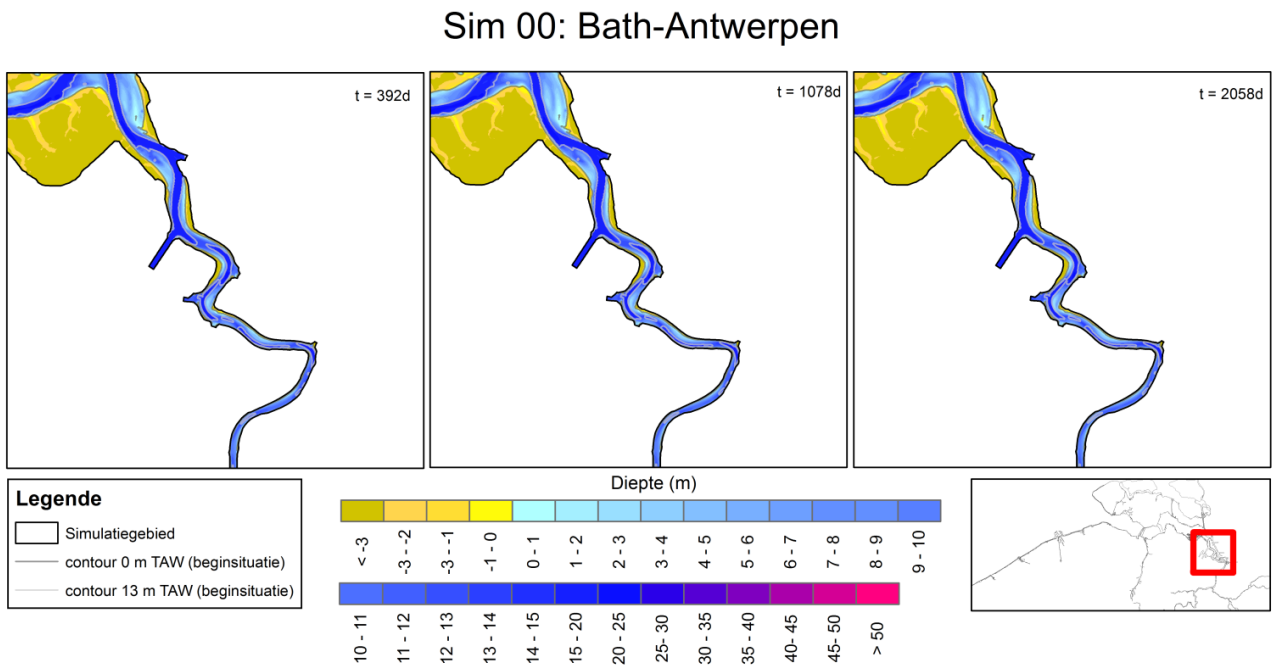
Figuur 39 – Simulatieresultaten (Sim 00) van de diepteligging na respectievelijk 392, 1078 en 2058 dagen in de regio Terneuzen - Hansweert



Figuur 40 – Simulatieresultaten (Sim 00) van de diepteligging na respectievelijk 392, 1078 en 2058 dagen in de regio Hansweert - Bath

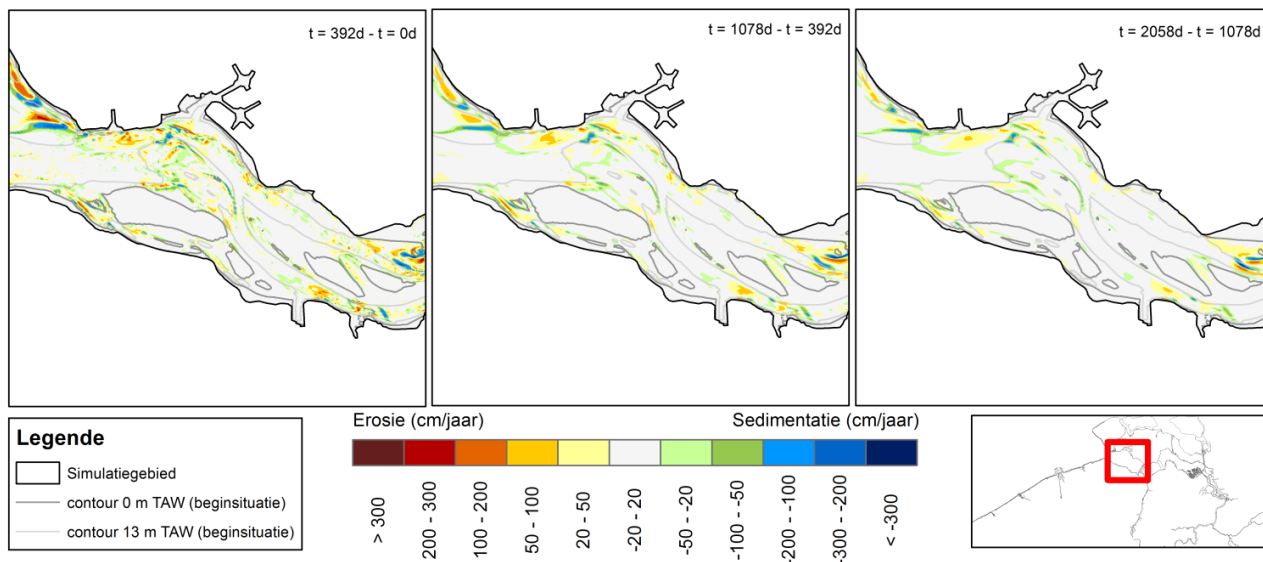


Figuur 41 – Simulatieresultaten (Sim 00) van de diepteligging na respectievelijk 392, 1078 en 2058 dagen in de regio Bath - Antwerpen



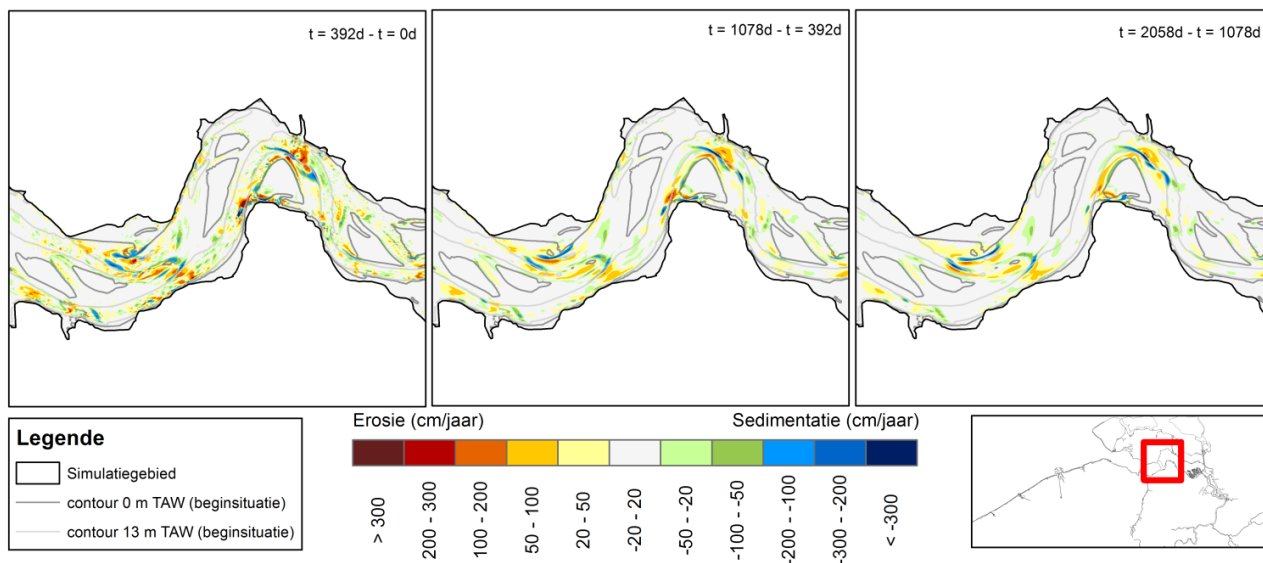
Figuur 42 – Simulatieresultaten (Sim 00) van de verandering van de diepteligging na respectievelijk 392, 1078 en 2058 dagen t.o.v. de vorige outputstap (respectievelijk 0, 392, 1078) in de regio Vlissingen - Terneuzen

Sim 00: Vlissingen-Terneuzen

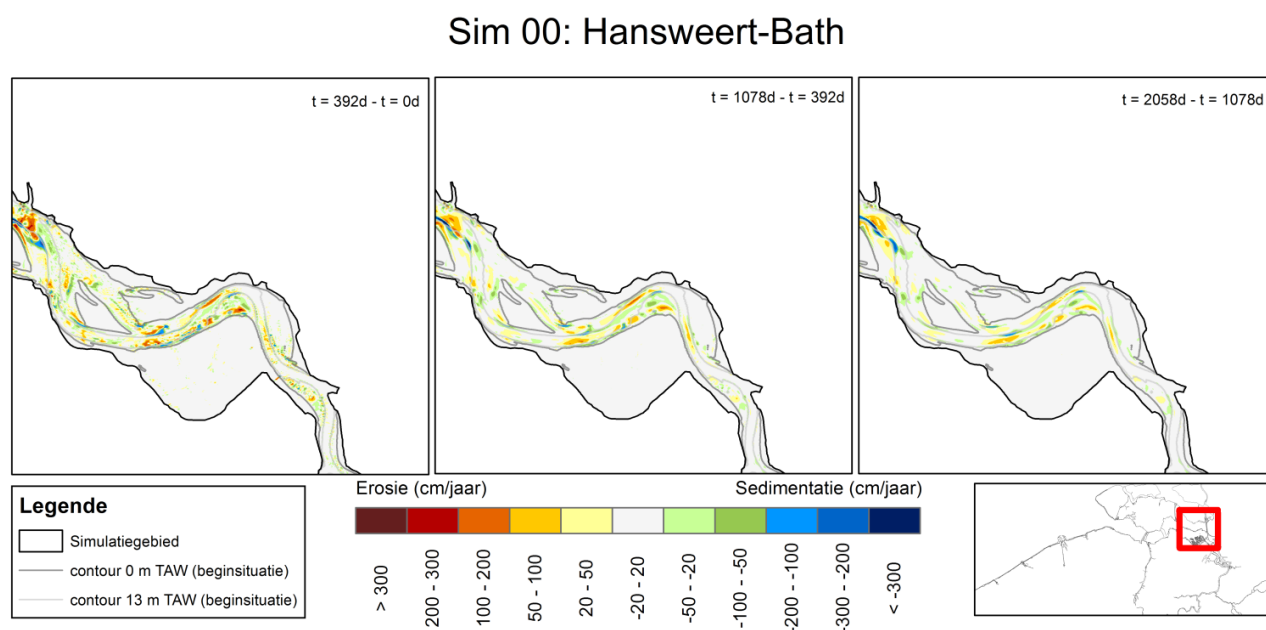


Figuur 43 – Simulatieresultaten (Sim 00) van de verandering van de diepteligging na respectievelijk 392, 1078 en 2058 dagen t.o.v. de vorige outputstap (respectievelijk 0, 392, 1078) in de regio Terneuzen - Hansweert

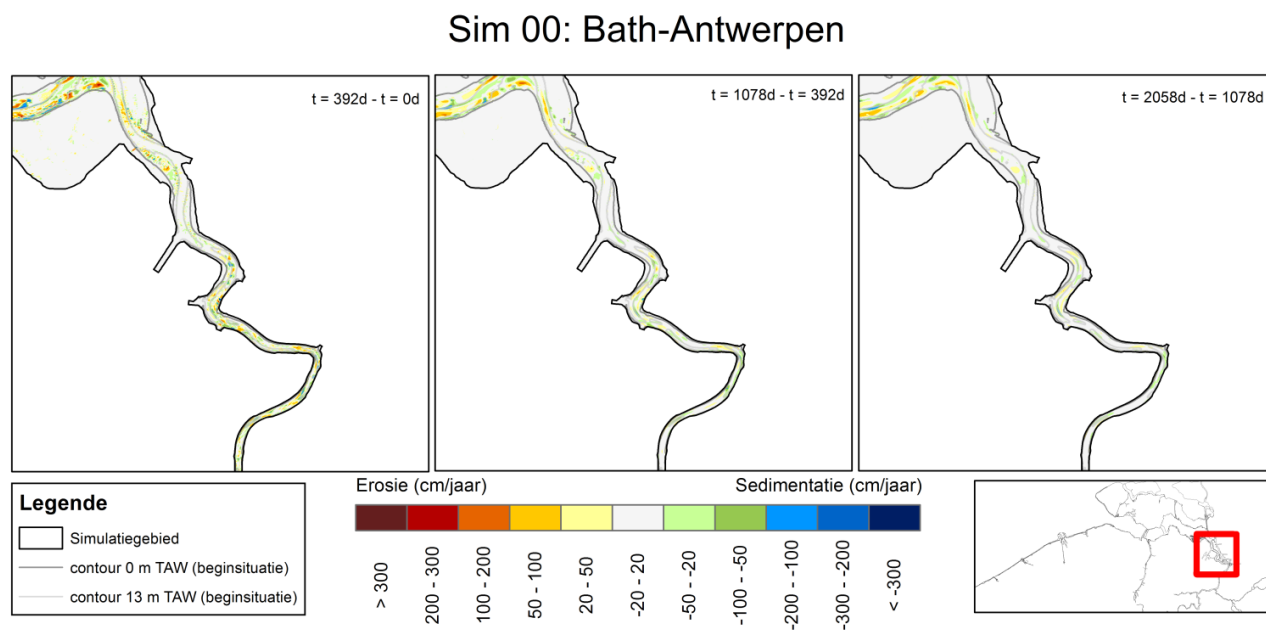
Sim 00: Terneuzen-Hansweert



Figuur 44 – Simulatiesresultaten (Sim 00) van de verandering van de diepteligging na respectievelijk 392, 1078 en 2058 dagen t.o.v. de vorige outputstap (respectievelijk 0, 392, 1078) in de regio Hansweert - Bath

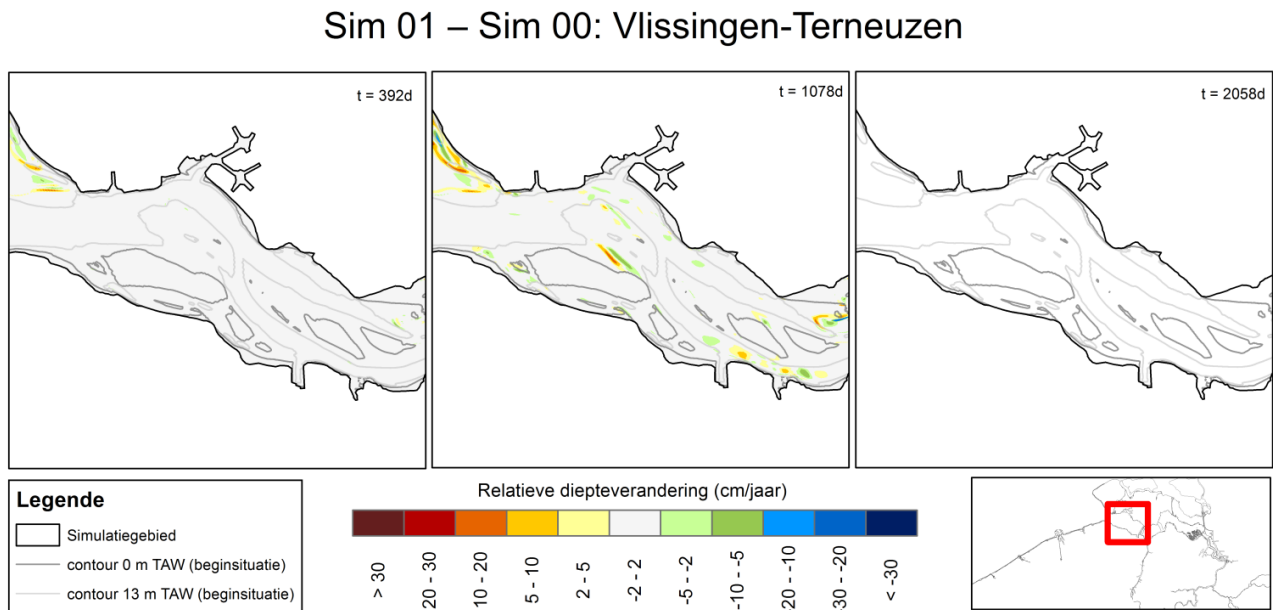


Figuur 45 – Simulatiesresultaten (Sim 00) van de verandering van de diepteligging na respectievelijk 392, 1078 en 2058 dagen t.o.v. de vorige outputstap (respectievelijk 0, 392, 1078) in de regio Bath - Antwerpen

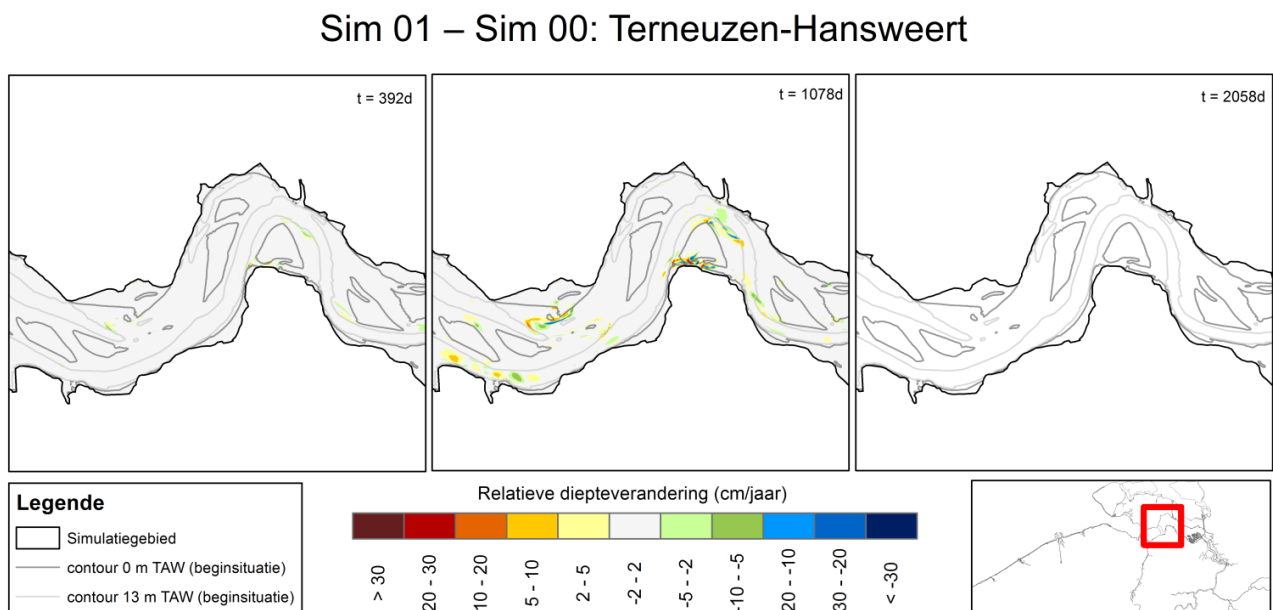


Morfologische versnellingsfactor (MF)

Figuur 46 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 02 (MF = 12.25) t.o.v. Sim 00 (MF = 24.5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078) in de regio Vlissingen - Terneuzen

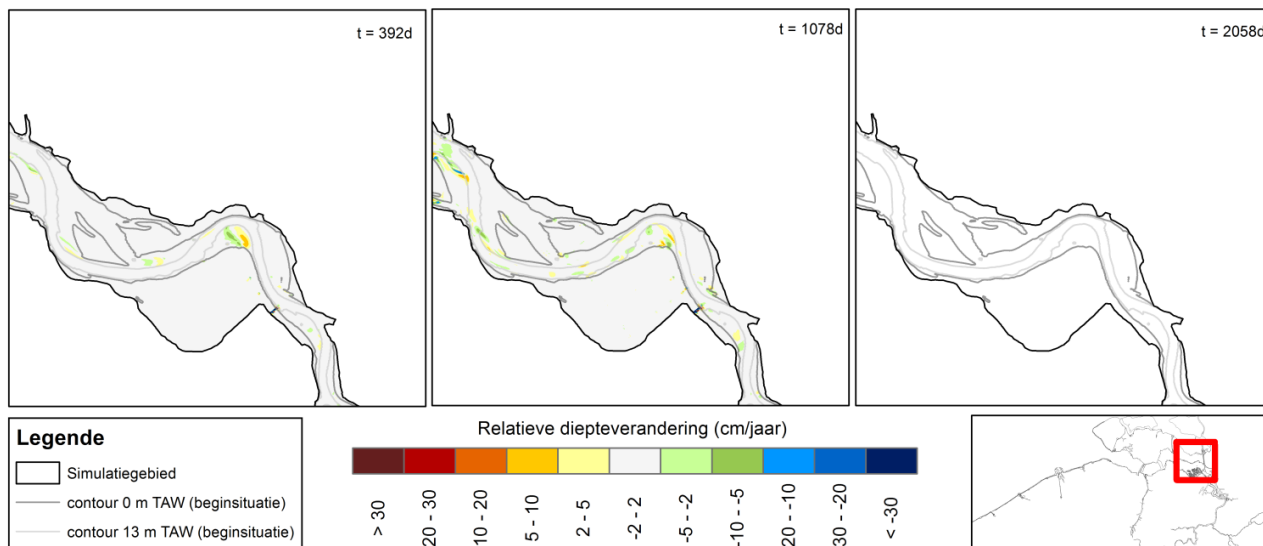


Figuur 47 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 02 (MF = 12.25) t.o.v. Sim 00 (MF = 24.5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078) in de regio Terneuzen – Hansweert



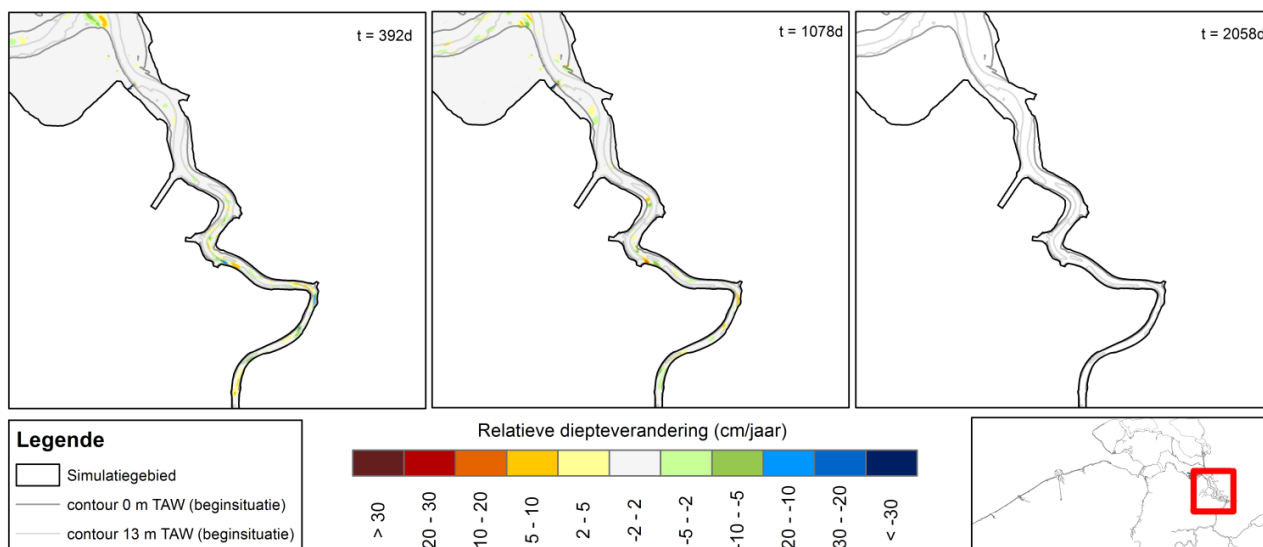
Figuur 48 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 02 (MF = 12.25) t.o.v. Sim 00 (MF = 24.5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078) in de regio Hansweert – Bath

Sim 01 – Sim 00: Hansweert-Bath



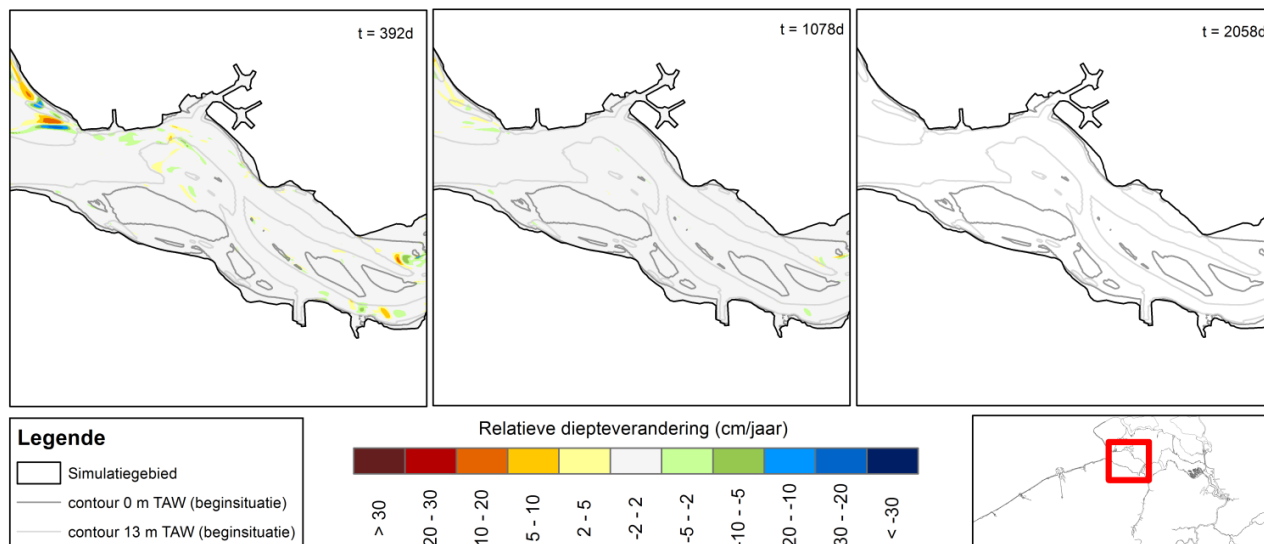
Figuur 49 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 02 (MF = 12.25) t.o.v. Sim 00 (MF = 24.5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078) in de regio Bath - Antwerpen

Sim 01 – Sim 00: Bath-Antwerpen



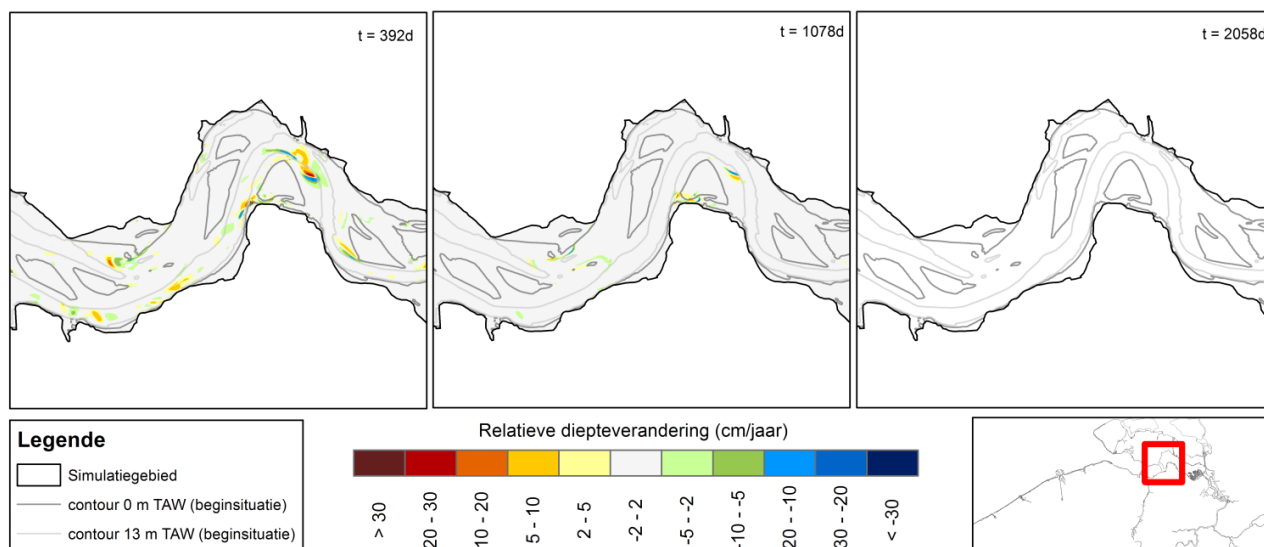
Figuur 50 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 03 (MF = 49) t.o.v. Sim 00 (MF = 24.5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Vlissingen - Terneuzen

Sim 03_L - Sim 00_repleuven: Vlissingen-Terneuzen



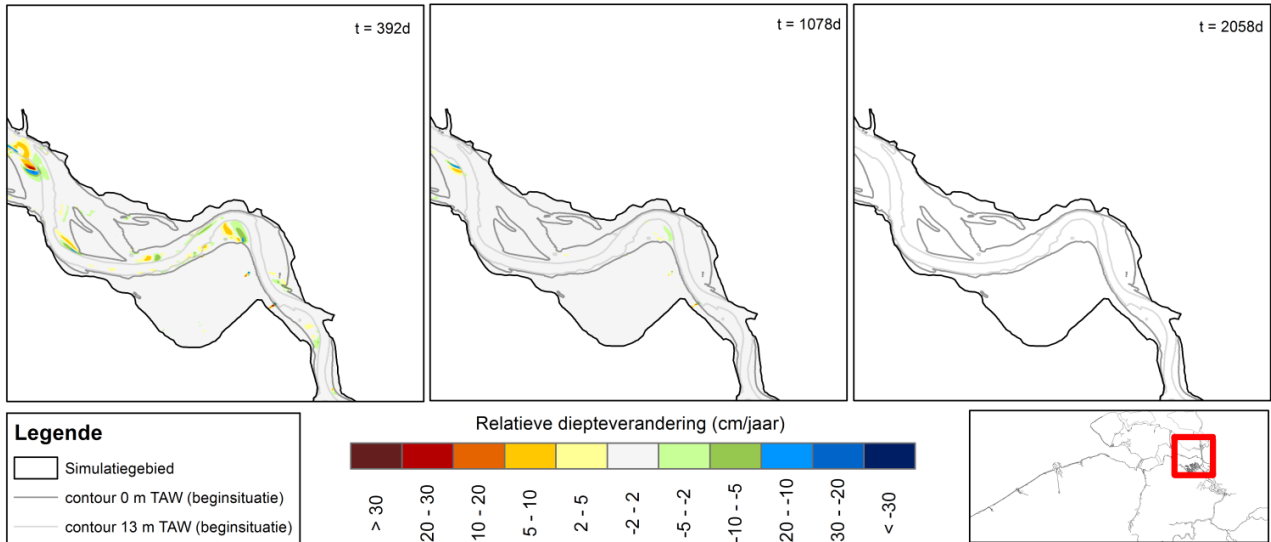
Figuur 51 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 03 (MF = 49) t.o.v. Sim 00 (MF = 24.5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen – Hansweert

Sim 03_L - Sim 00_repleuven: Terneuzen-Hansweert



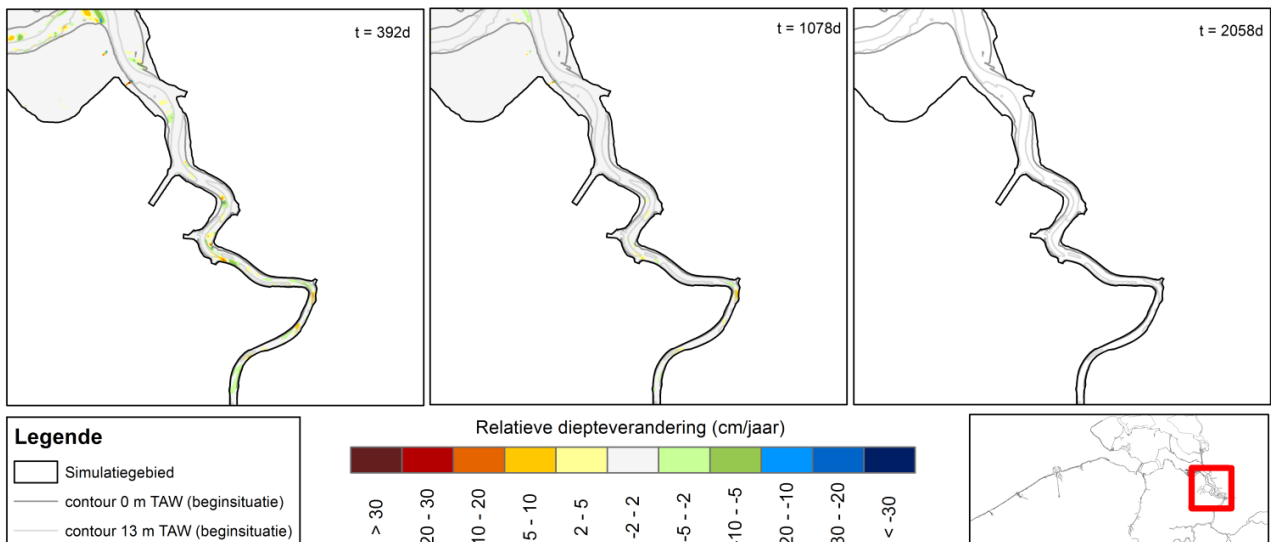
Figuur 52 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 03 (MF = 49) t.o.v. Sim 00 (MF = 24.5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Hansweert - Bath

Sim 03_L - Sim 00_repleuven: Hansweert-Bath



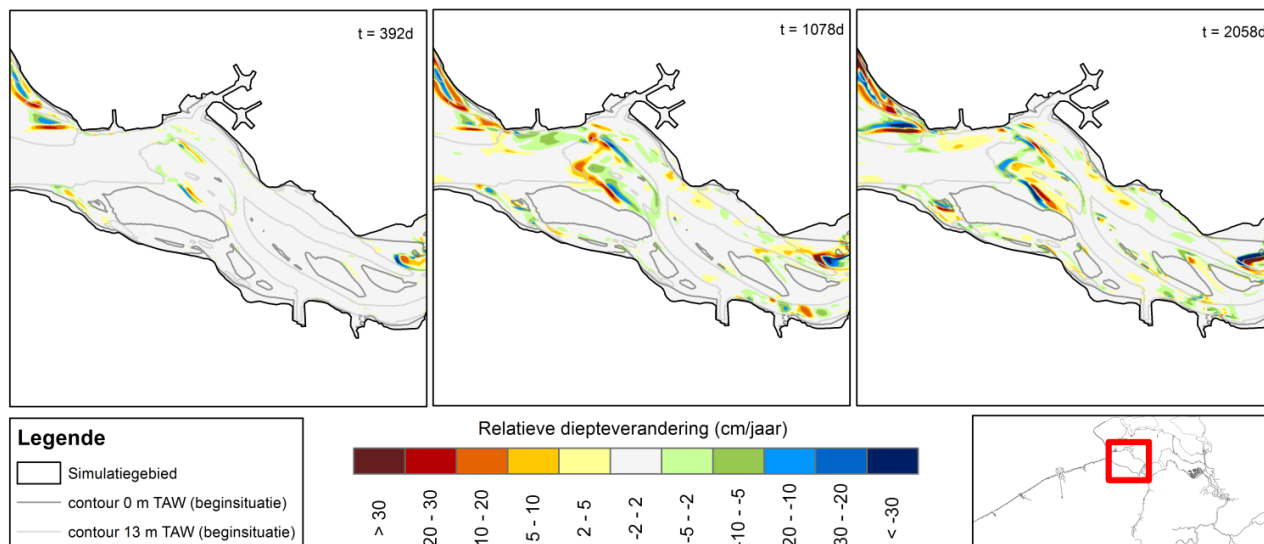
Figuur 53 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 03 (MF = 49) t.o.v. Sim 00 (MF = 24.5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Bath - Antwerpen

Sim 03_L - Sim 00_repleuven: Bath-Antwerpen



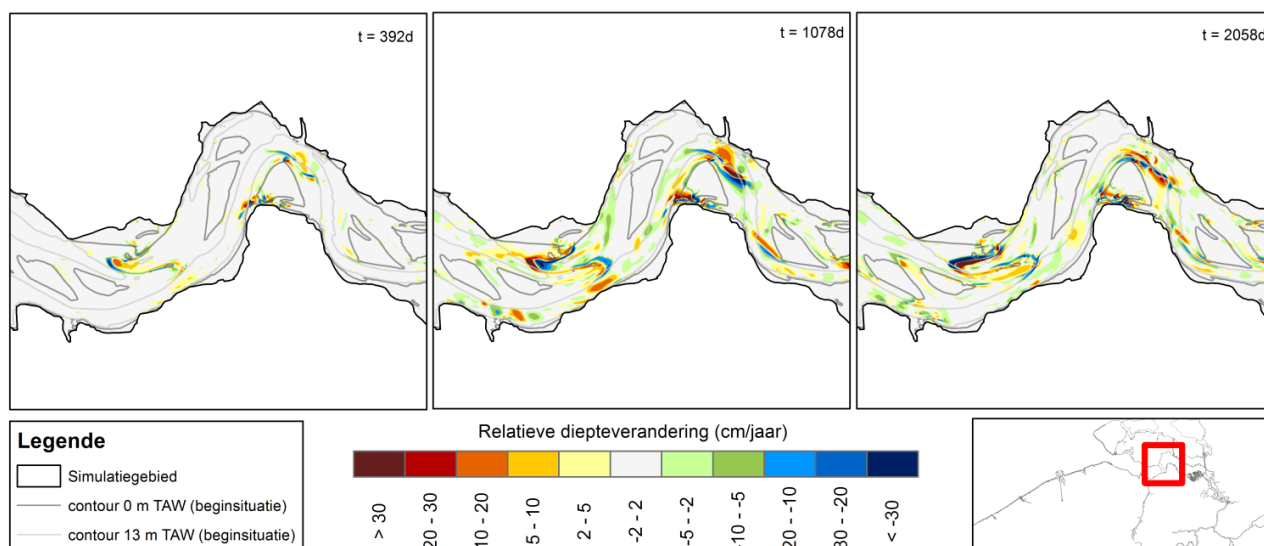
Figuur 54 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 04 (MF = 98) t.o.v. Sim 00 (MF = 24.5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Vlissingen - Terneuzen

Sim 04 – Sim 00: Vlissingen-Terneuzen

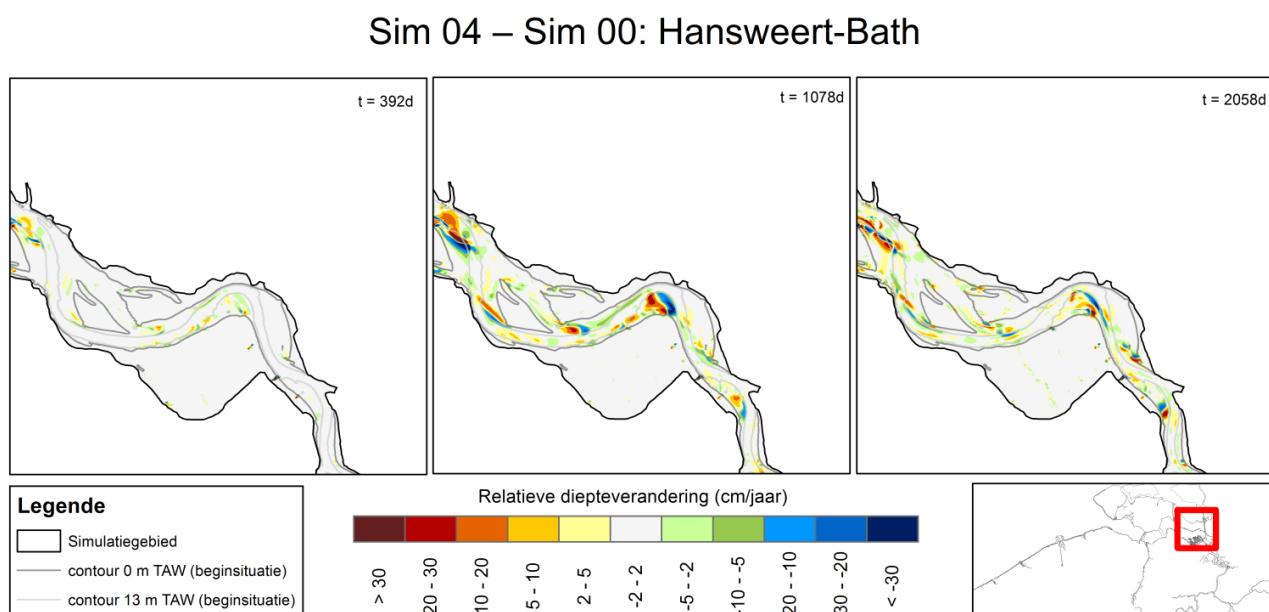


Figuur 55 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 04 (MF = 98) t.o.v. Sim 00 (MF = 24.5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert

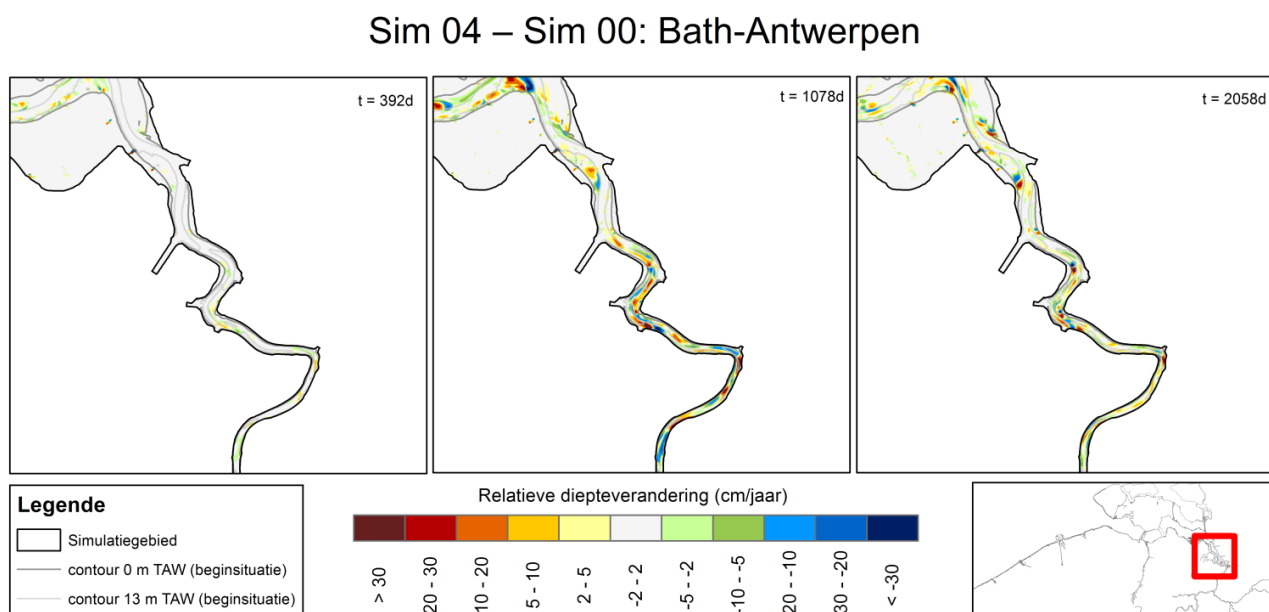
Sim 04 – Sim 00: Terneuzen-Hansweert



Figuur 56 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 04 (MF = 98) t.o.v. Sim 00 (MF = 24.5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Hansweert - Bath

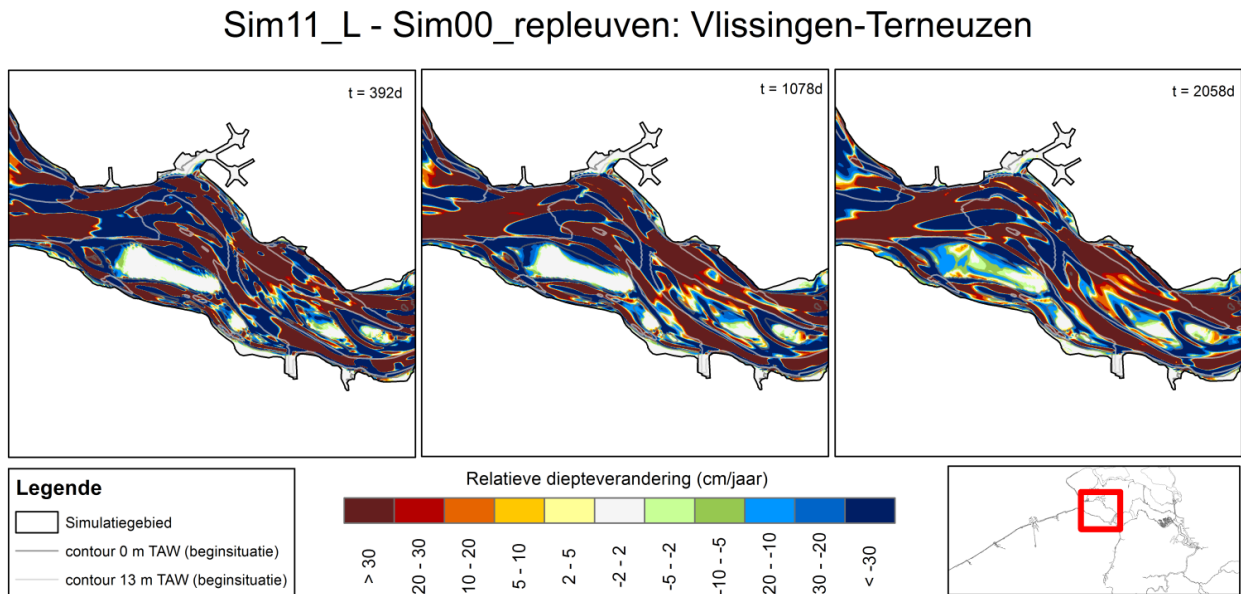


Figuur 57 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 04 (MF = 98) t.o.v. Sim 00 (MF = 24.5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Bath - Antwerpen

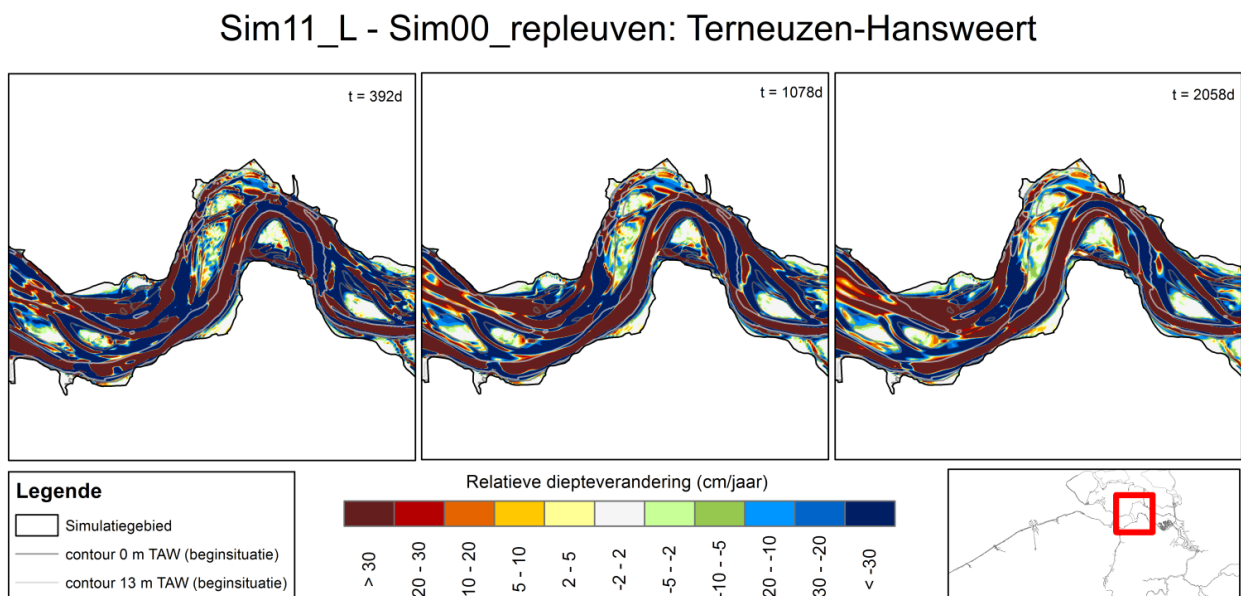


Transportformulering

Figuur 58 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 11 (Van Rijn) t.o.v. Sim 00 (Engelund-Hansen) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Vlissingen - Terneuzen

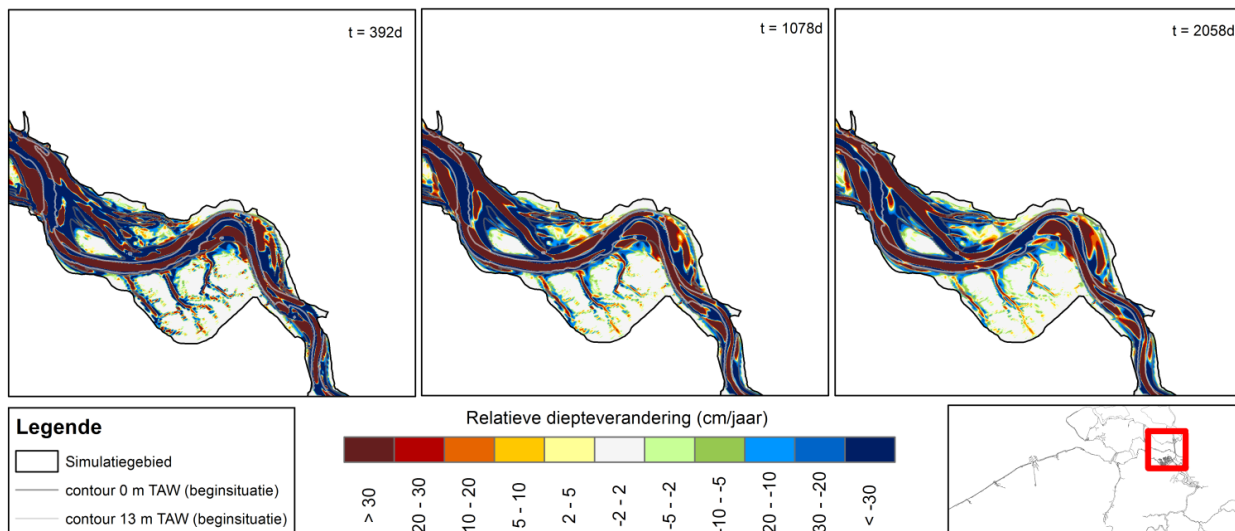


Figuur 59 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 11 (Van Rijn) t.o.v. Sim 00 (Engelund-Hansen) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert



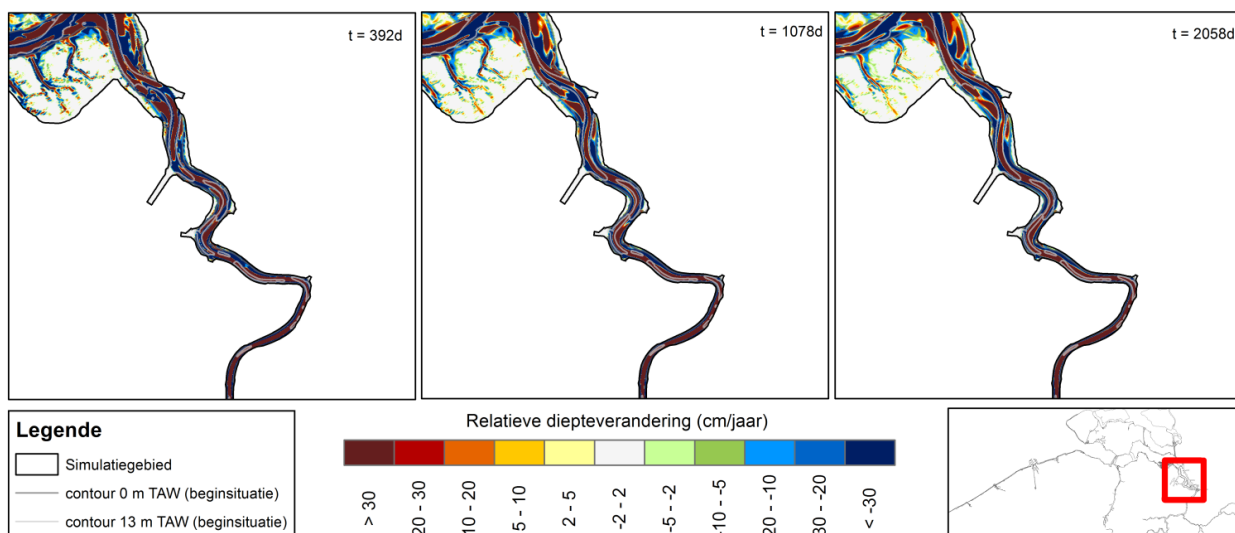
Figuur 60 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 11 (Van Rijn) t.o.v. Sim 00 (Engelund-Hansen) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Hansweert - Bath

Sim11_L - Sim00_repleuven: Hansweert-Bath



Figuur 61 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 11 (Van Rijn) t.o.v. Sim 00 (Engelund-Hansen) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Bath - Antwerpen

Sim11_L - Sim00_repleuven: Bath-Antwerpen

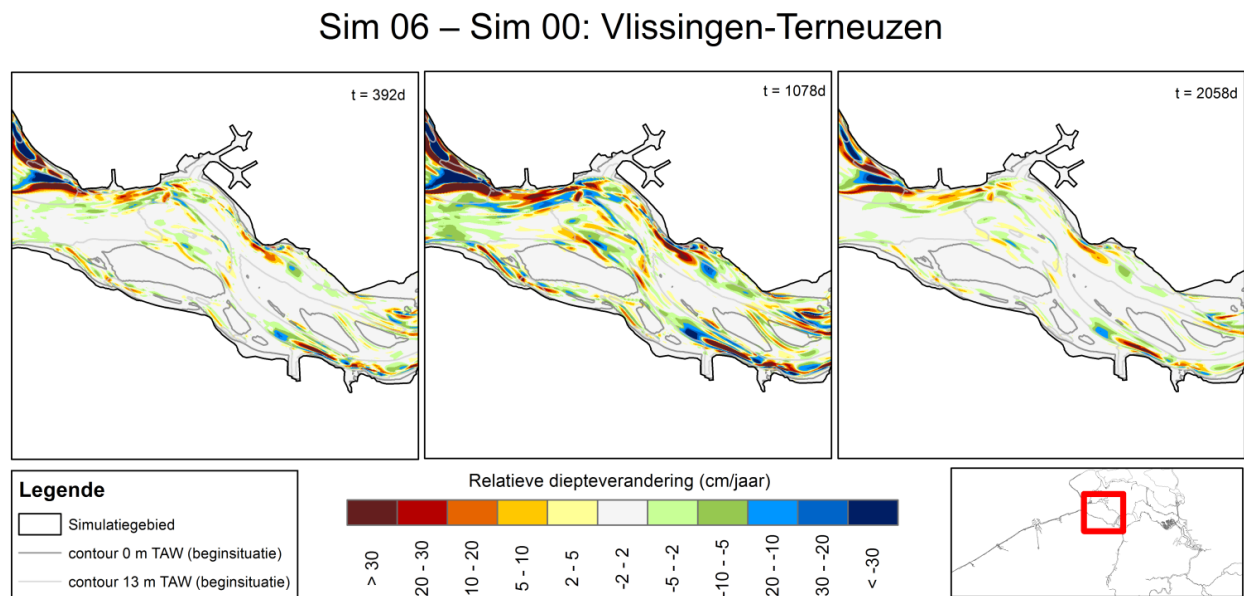


Gridresolutie

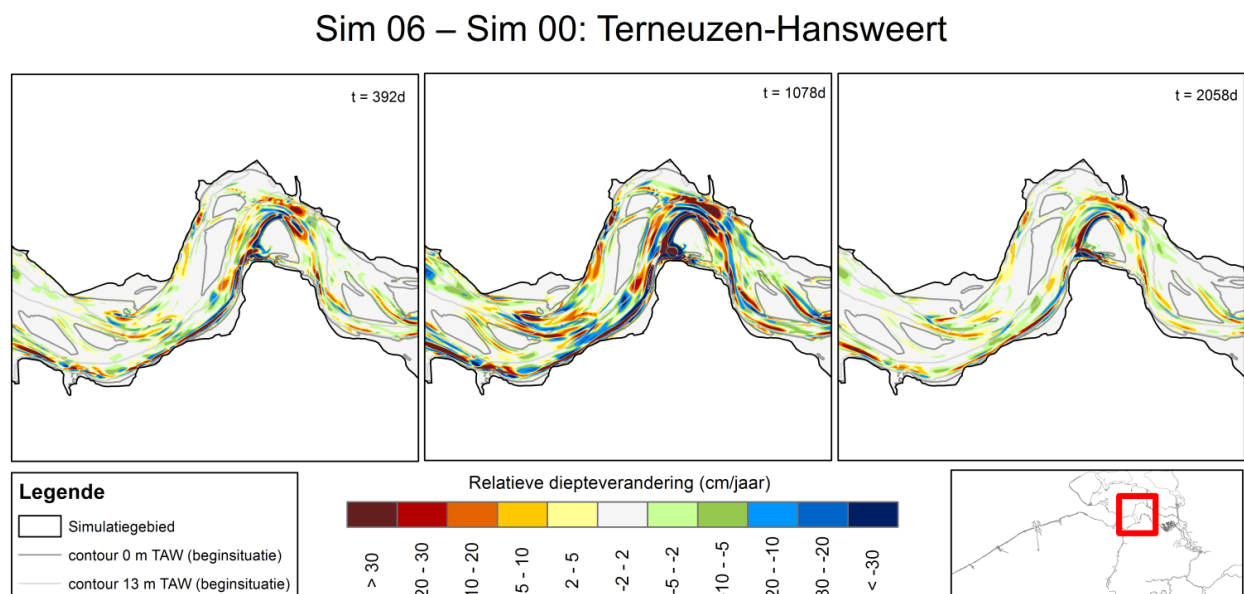
Er werden geen stabiele simulaties bekomen met een grotere simulatie.

3D stromingspatronen

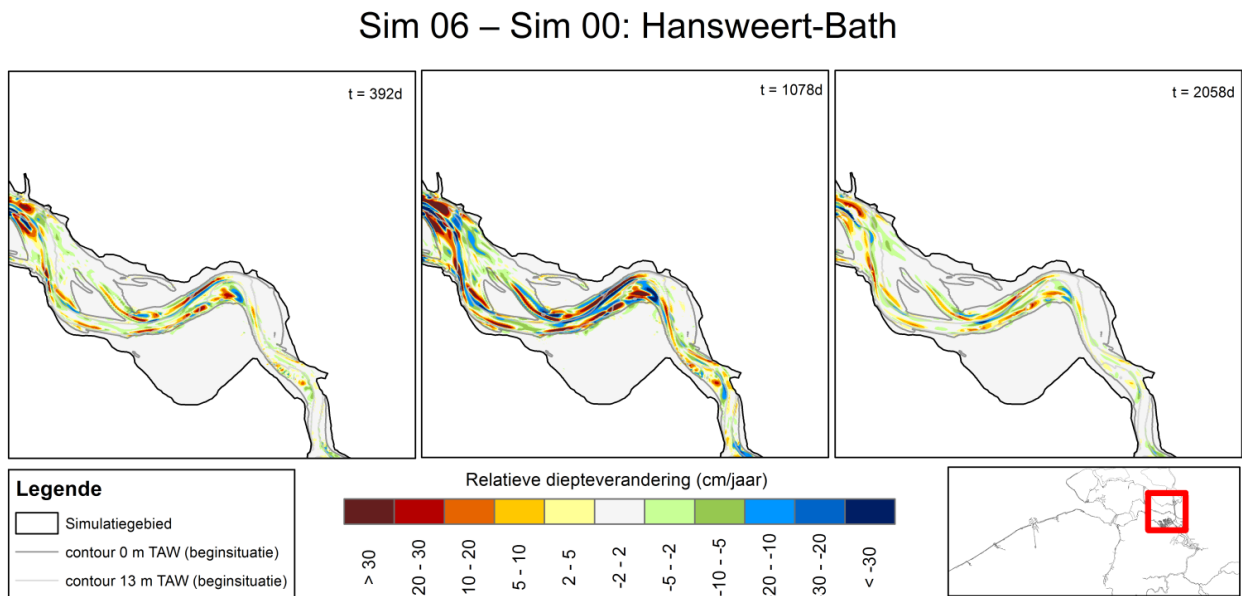
Figuur 62 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 06 (secondary flow) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Vlissingen – Terneuzen



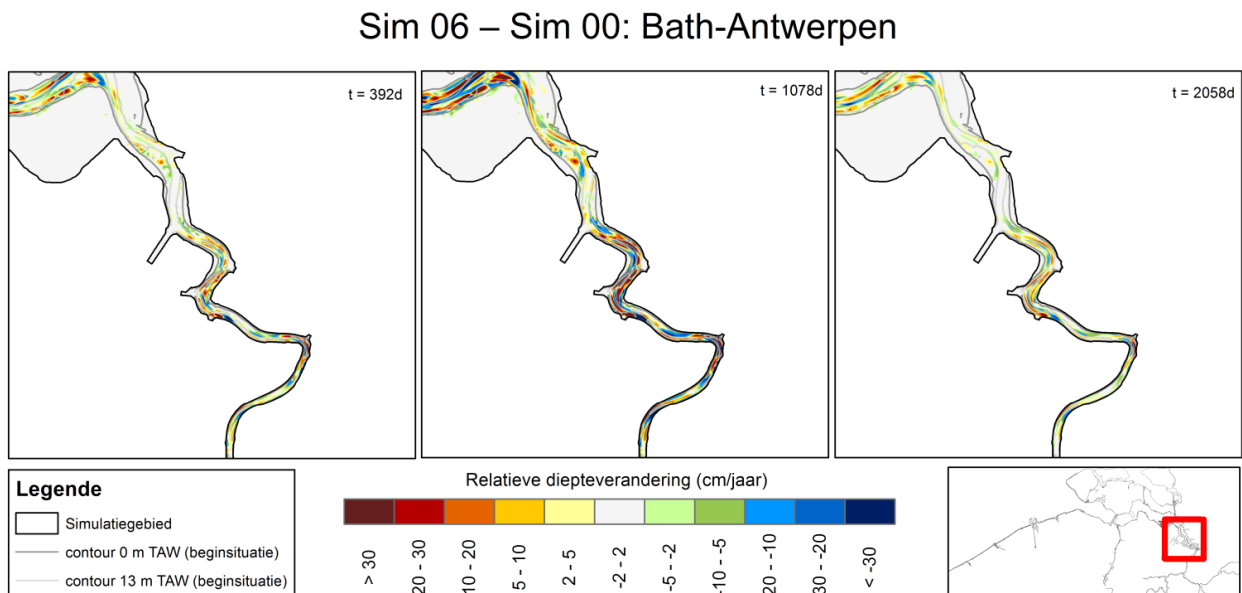
Figuur 63 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 06 (secondary flow) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen – Hansweert.



Figuur 64 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 06 (secondary flow) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Bath

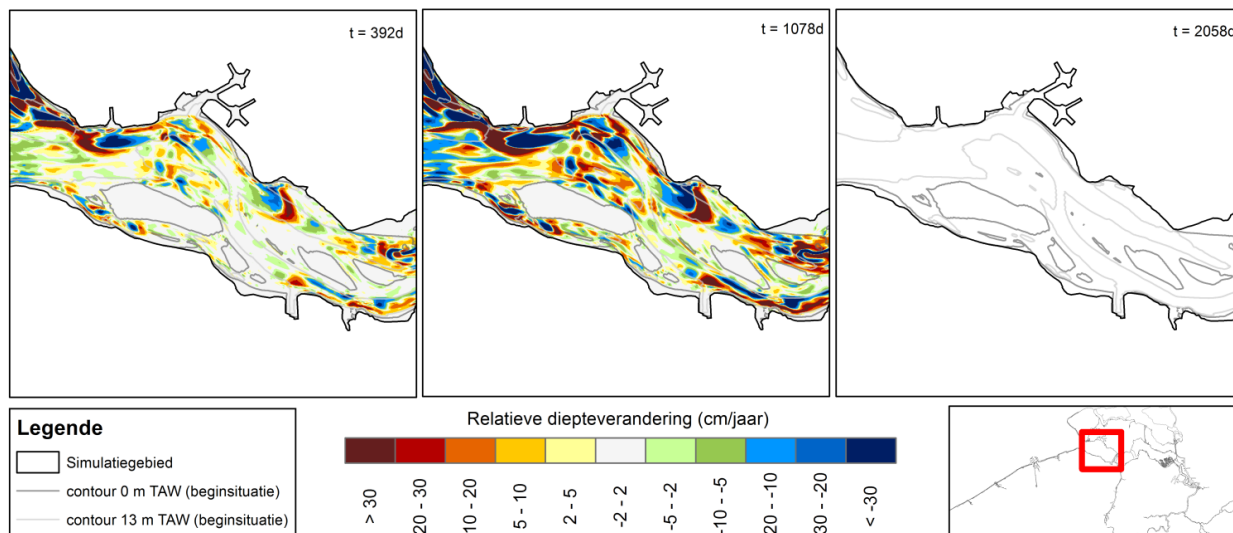


Figuur 65 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 06 (secondary flow) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Bath - Antwerpen



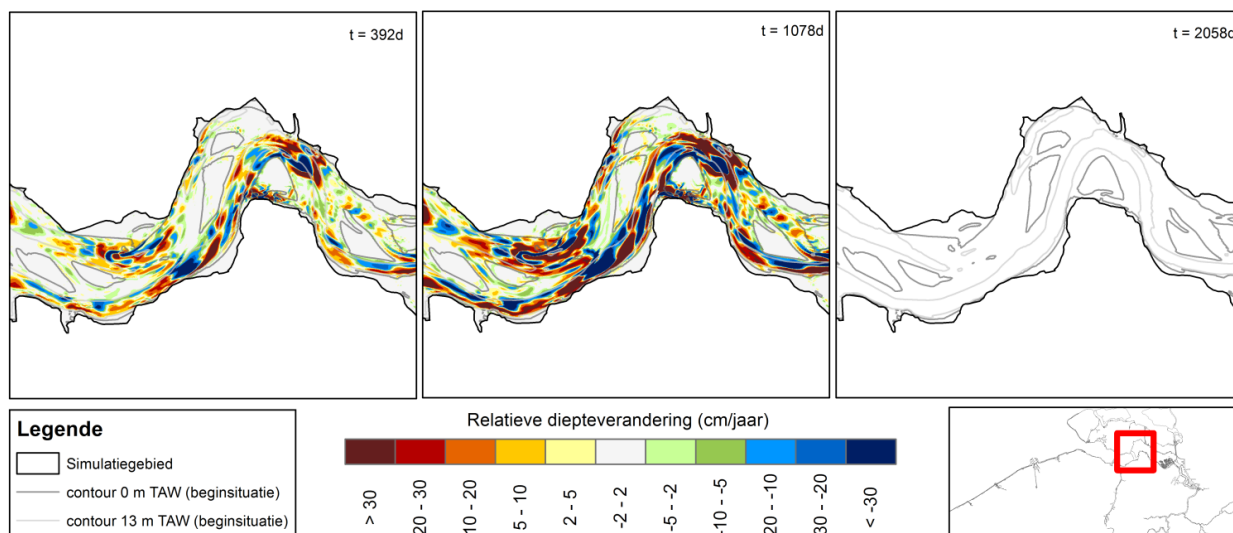
Figuur 66 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 10 (3D) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Vlissingen - Terneuzen

Sim 10 – Sim 00: Vlissingen-Terneuzen



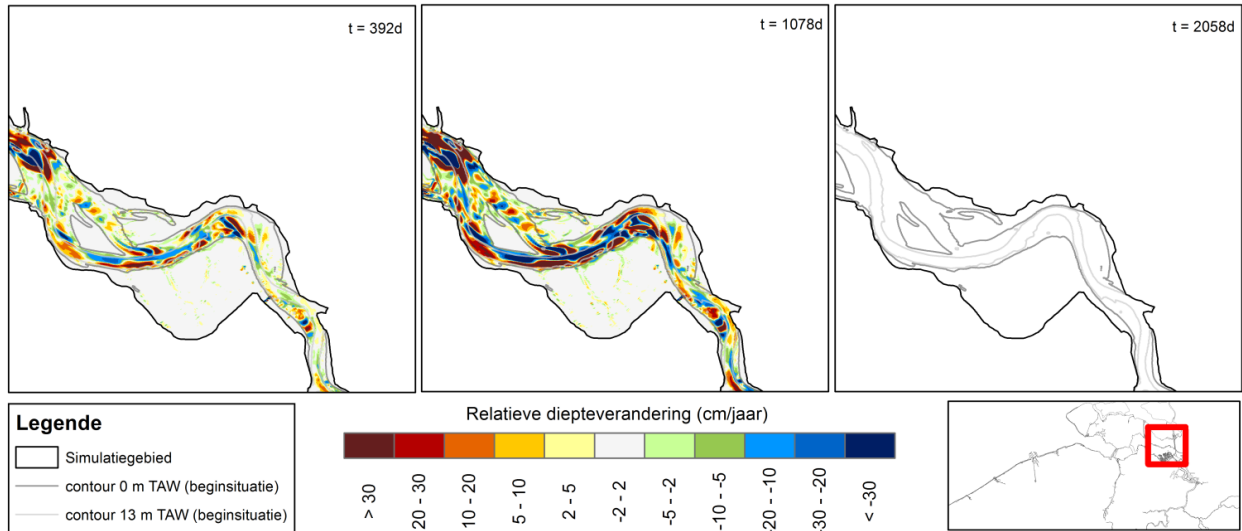
Figuur 67 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 10 (3D) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert

Sim 10 – Sim 00: Terneuzen-Hansweert



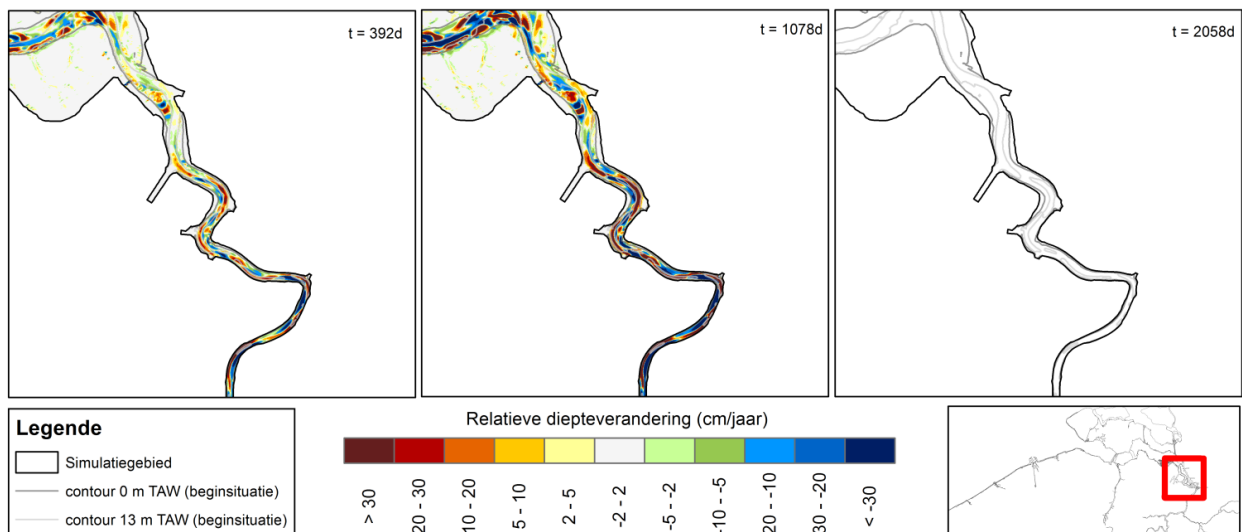
Figuur 68 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 10 (3D) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Hansweert -Bath

Sim 10 – Sim 00: Hansweert-Bath



Figuur 69 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 10 (3D) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Bath - Antwerpen

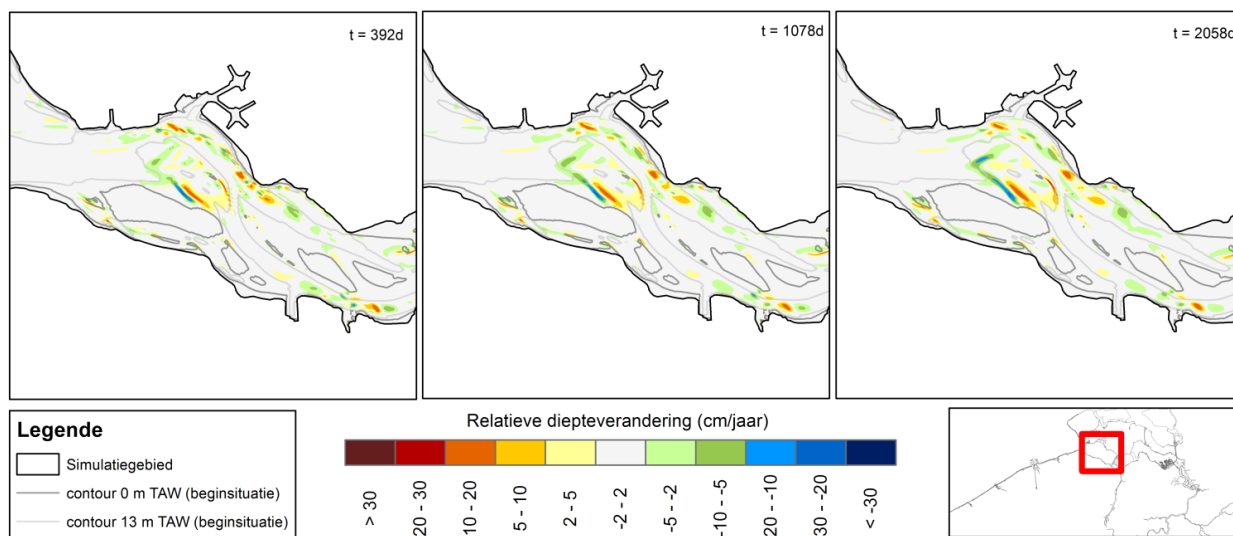
Sim 10 – Sim 00: Bath-Antwerpen



Saliniteit

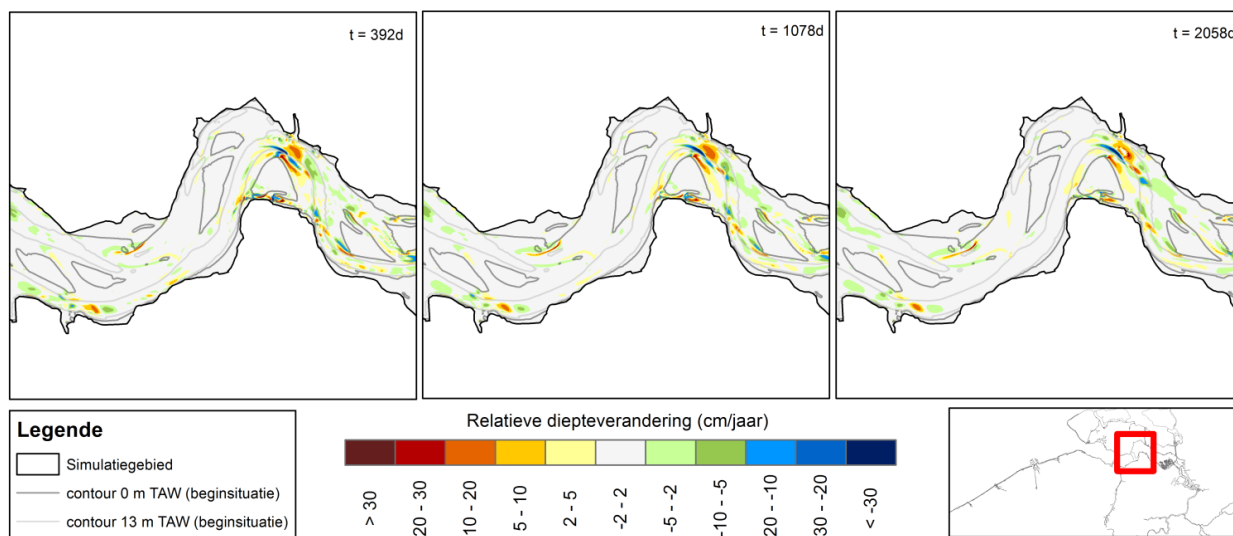
Figuur 70 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 07 (saliniteit) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 344, 1078, 2058) in de regio Vlissingen - Terneuzen

Sim07 – Sim00_repleuven: Vlissingen-Terneuzen



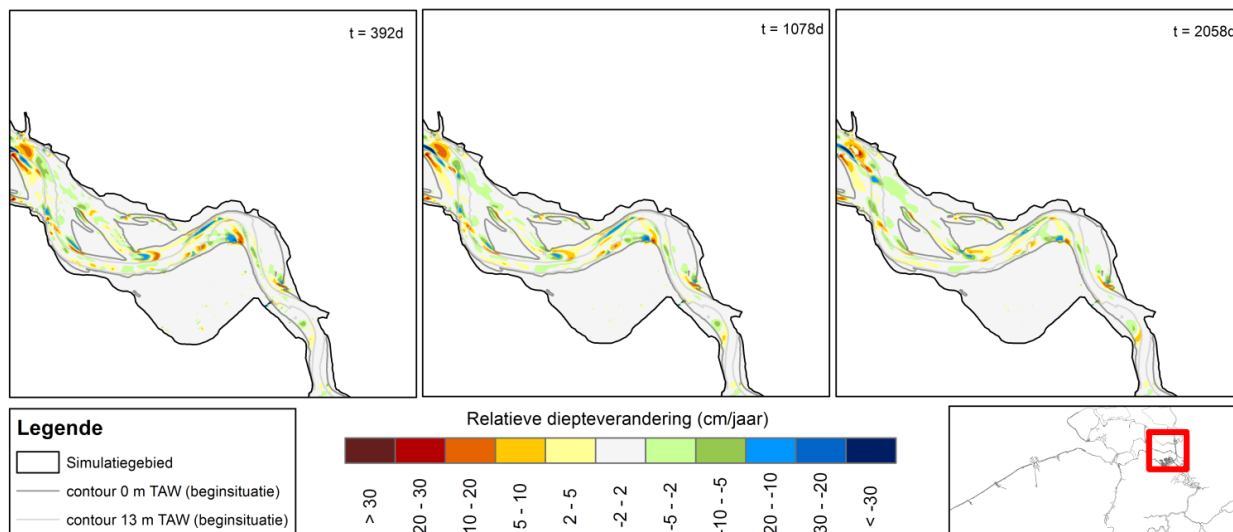
Figuur 71 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 07 (saliniteit) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 344, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert

Sim07 – Sim00_repleuven: Terneuzen-Hansweert



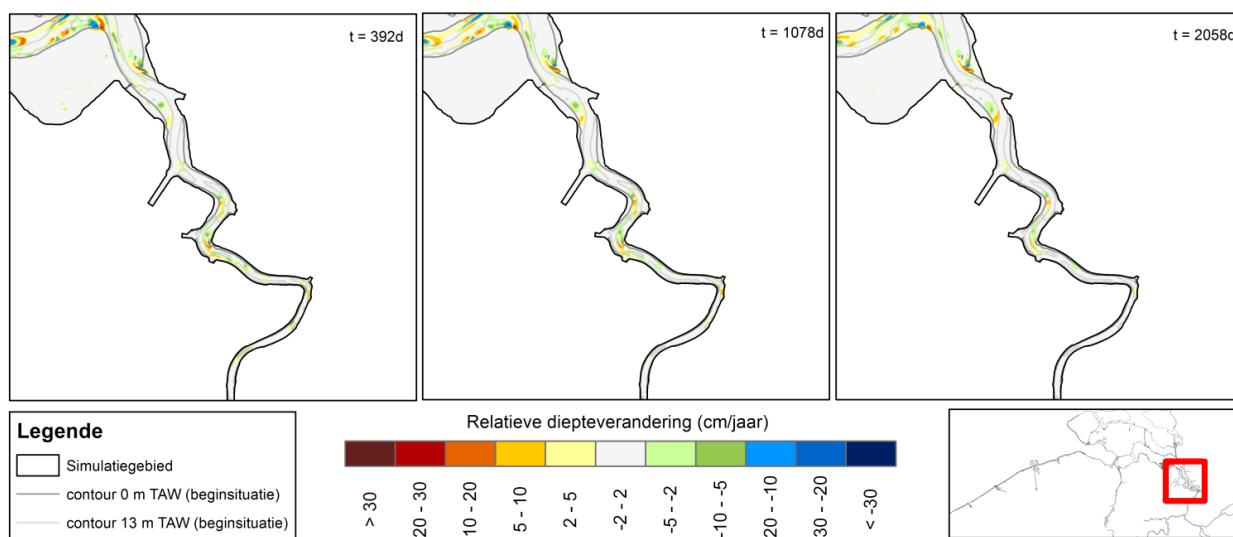
Figuur 72 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 07 (saliniteit) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 344, 1078, 2058) in de regio Hansweert - Bath

Sim07 – Sim00_repleuven: Hansweert-Bath



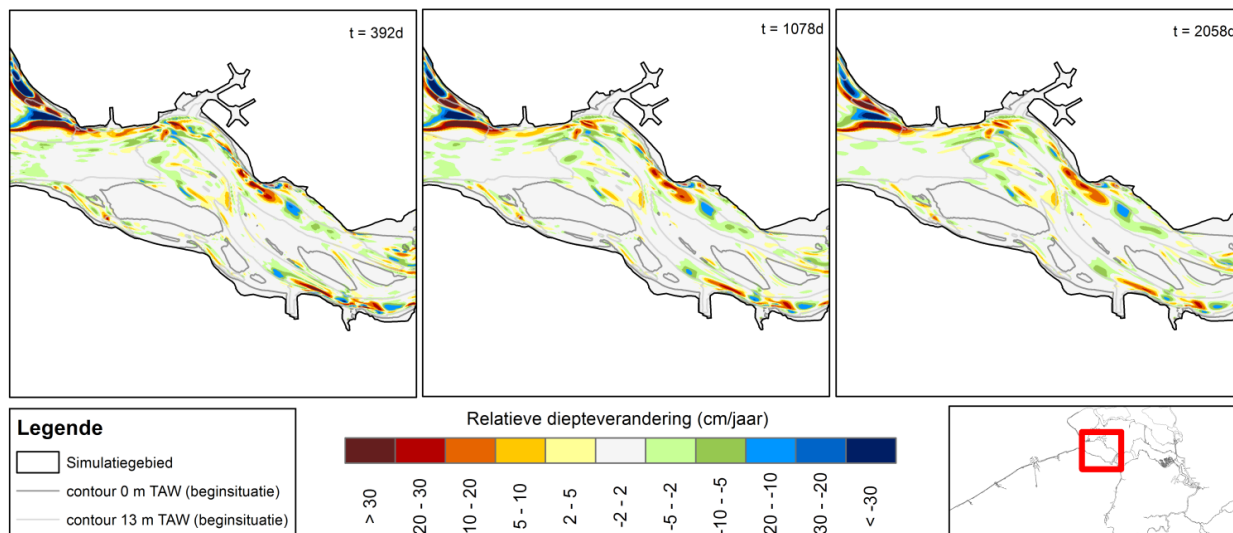
Figuur 73 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 07 (saliniteit) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 344, 1078, 2058) in de regio Bath - Antwerpen

Sim07 – Sim00_repleuven: Bath-Antwerpen



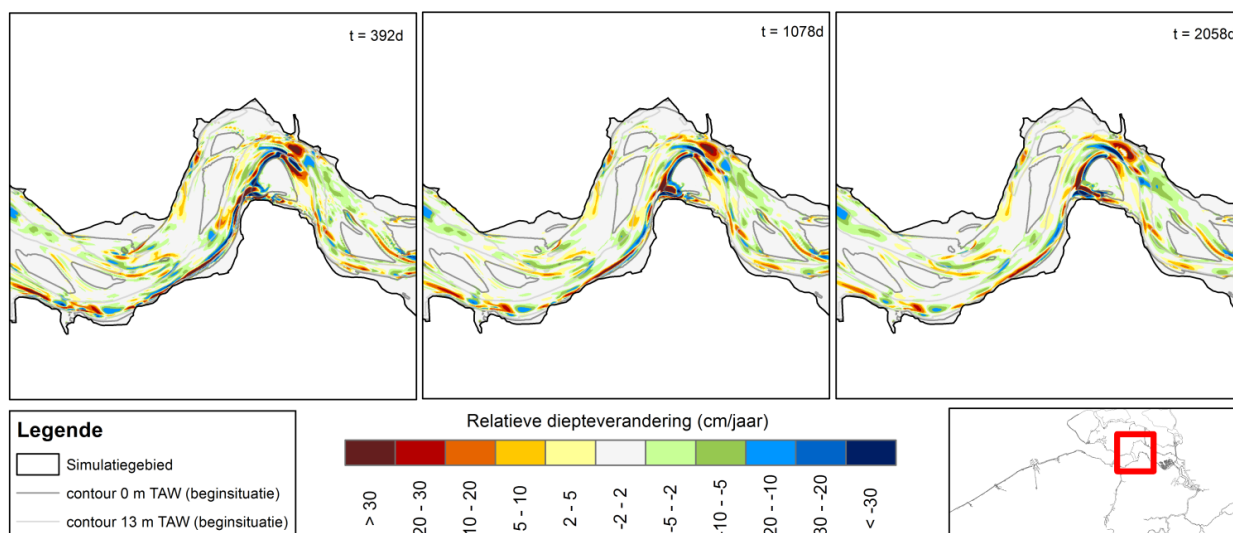
Figuur 74 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 08 (sec. flow & saliniteit) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Vlissingen - Terneuzen

Sim08 – Sim00_repleuven: Vlissingen-Terneuzen



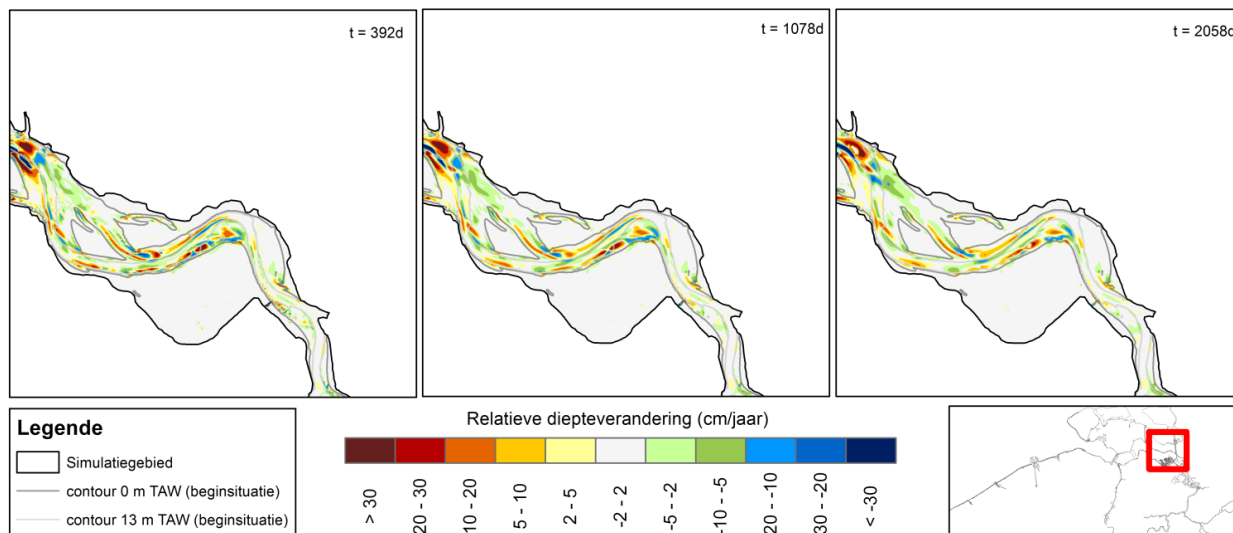
Figuur 75 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 08 (sec. flow & saliniteit) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert

Sim08 – Sim00_repleuven: Terneuzen-Hansweert



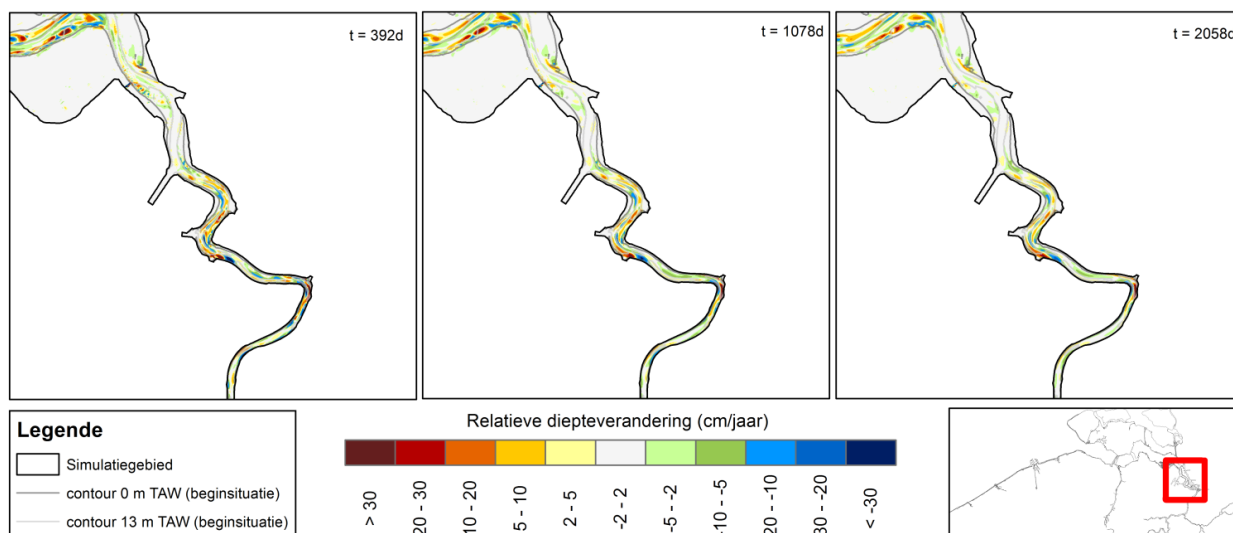
Figuur 76 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 08 (sec. flow & saliniteit) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Hansweert - Bath

Sim08 – Sim00_repleuven: Hansweert-Bath



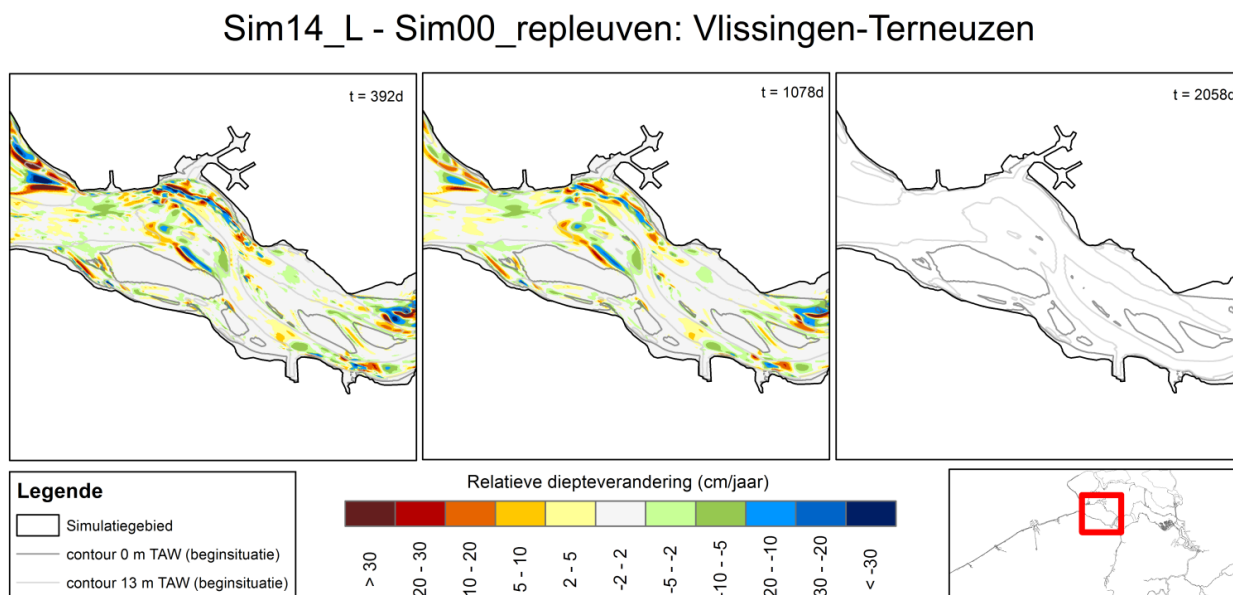
Figuur 77 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 08 (sec. flow & saliniteit) t.o.v. Sim 00 (2D) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Bath – Antwerpen

Sim08 – Sim00_repleuven: Bath-Antwerpen

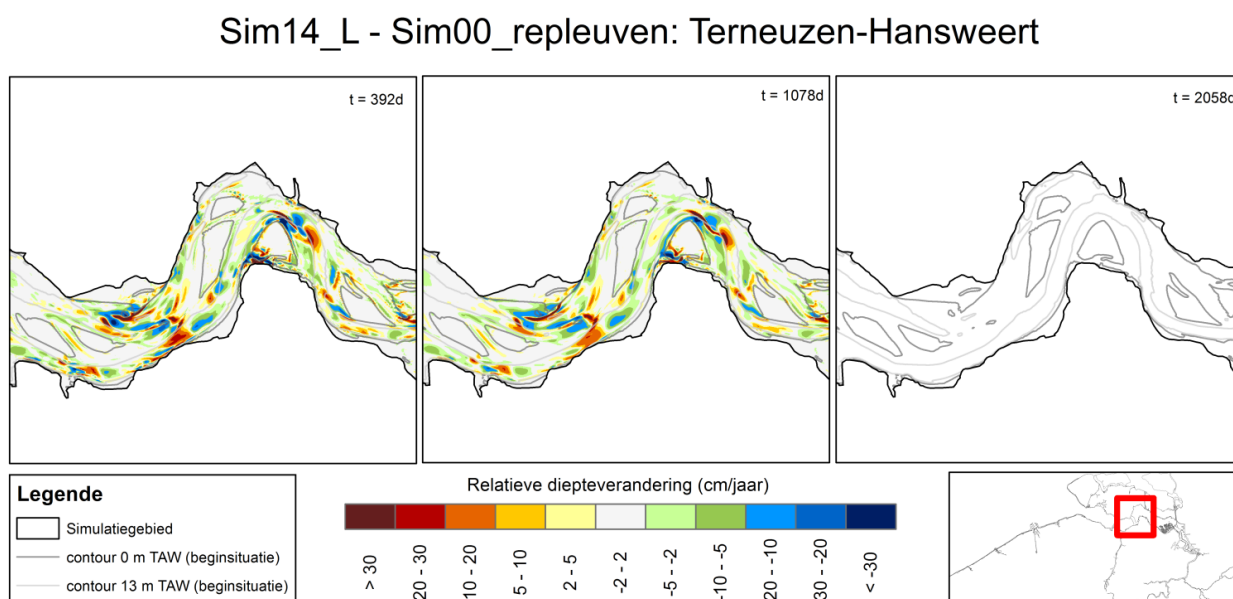


Ruwheid

Figuur 78 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 14 ($n = 0.026$) t.o.v. Sim 00 ($n = 0.023$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078) in de regio Vlissingen - Terneuzen

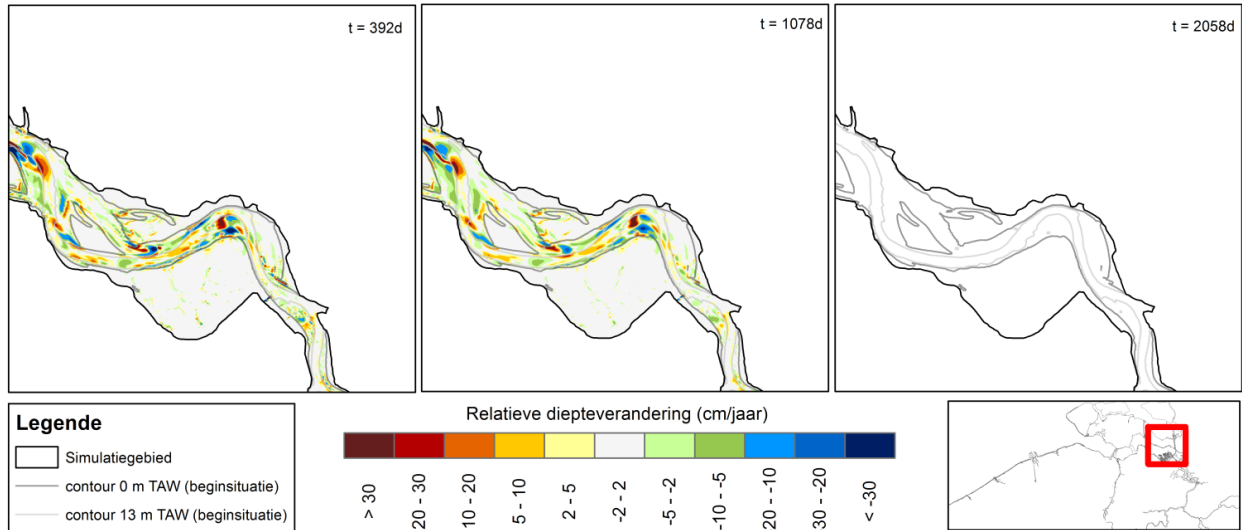


Figuur 79 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 14 ($n = 0.026$) t.o.v. Sim 00 ($n = 0.023$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078) in de regio Terneuzen - Hansweert



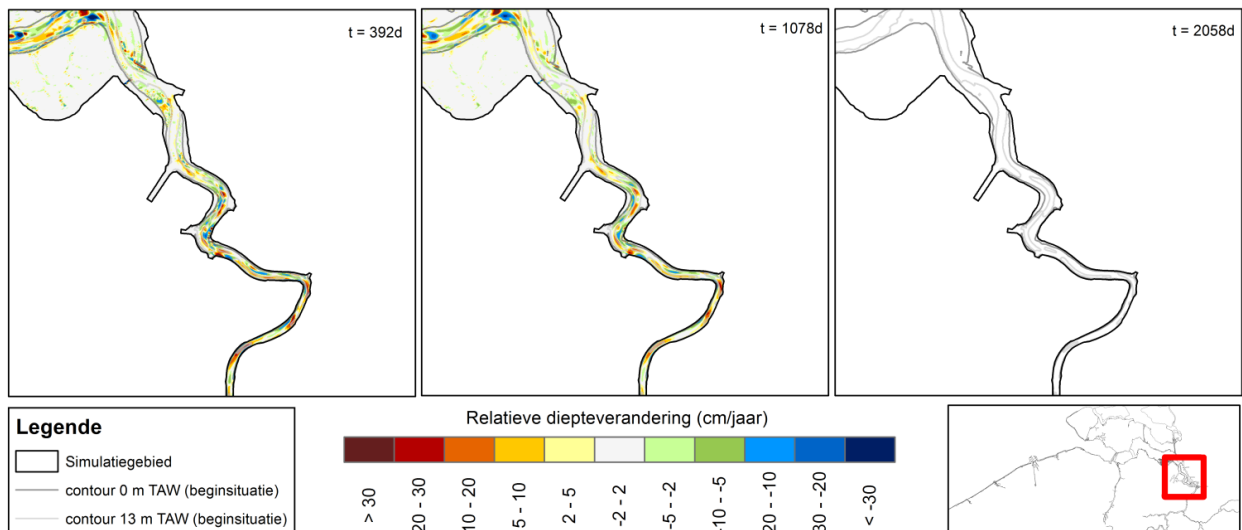
Figuur 80 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 14 (n = 0.026) t.o.v. Sim 00 (n = 0.023) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078) in de regio Hansweert - Bath

Sim14_L - Sim00_repleuven: Hansweert-Bath



Figuur 81 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 14 (n = 0.026) t.o.v. Sim 00 (n = 0.023) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078) in de regio Bath - Antwerpen

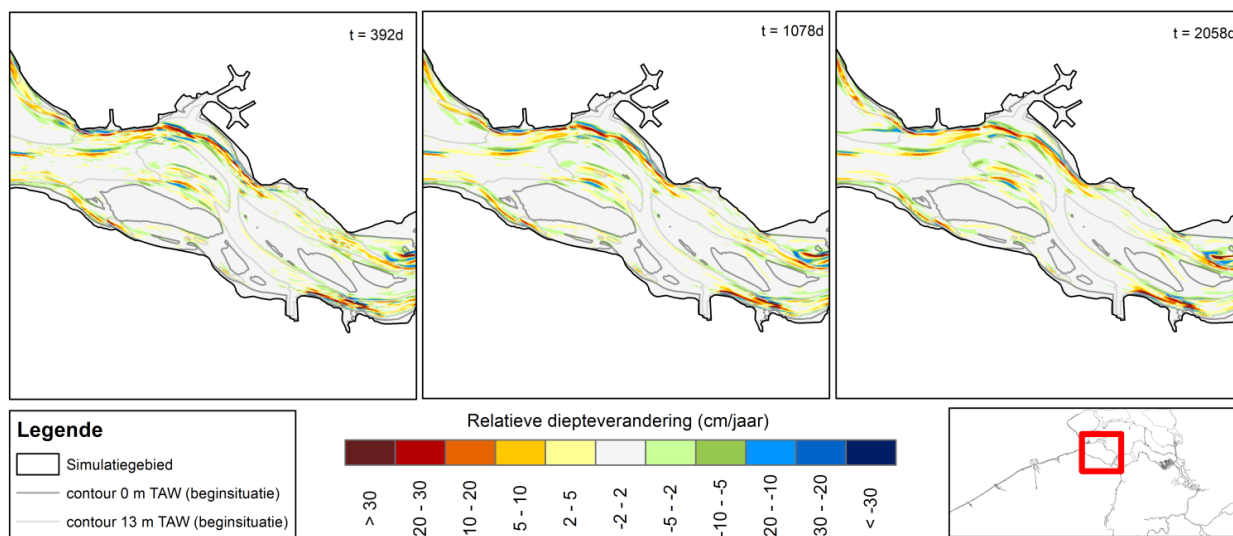
Sim14_L - Sim00_repleuven: Bath-Antwerpen



Bodemhelling α_{bn}

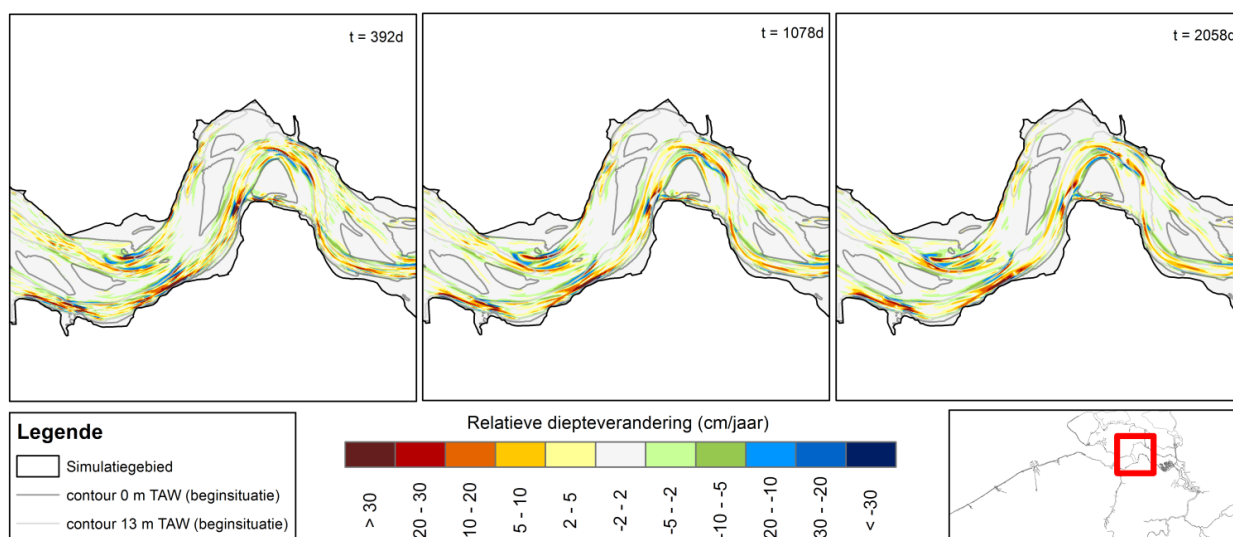
Figuur 82 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 19 ($\alpha_{bn} = 0.15$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bn} = 1.5$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Vlissingen - Terneuzen

Sim 19 - Sim 00: Vlissingen-Terneuzen

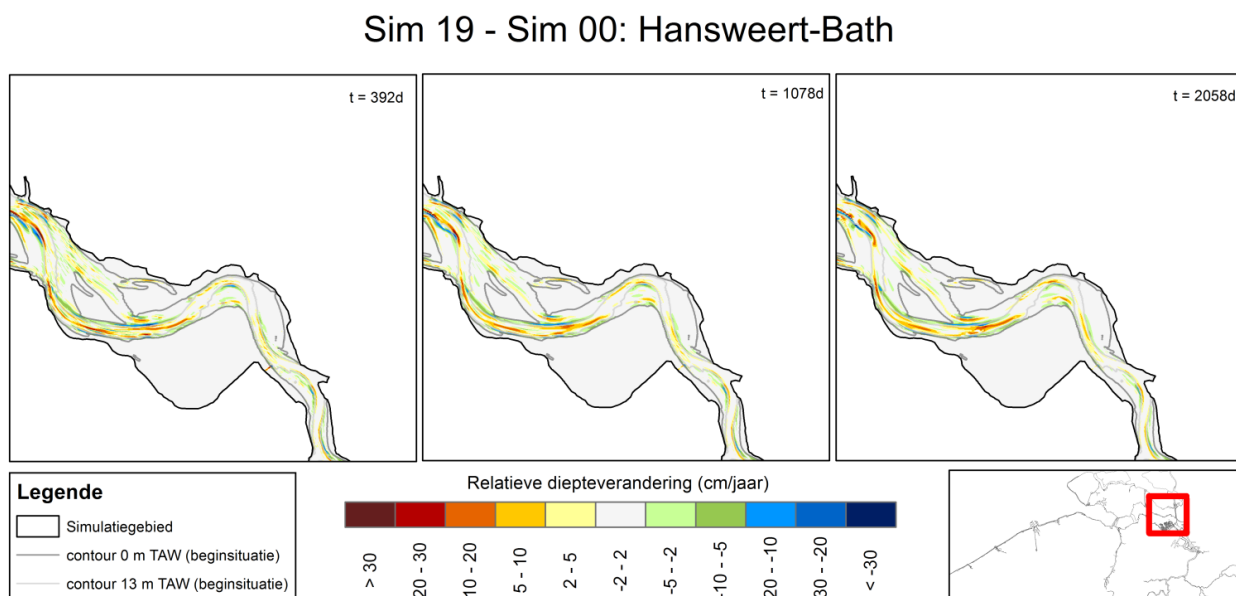


Figuur 83 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 19 ($\alpha_{bn} = 0.15$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bn} = 1.5$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert

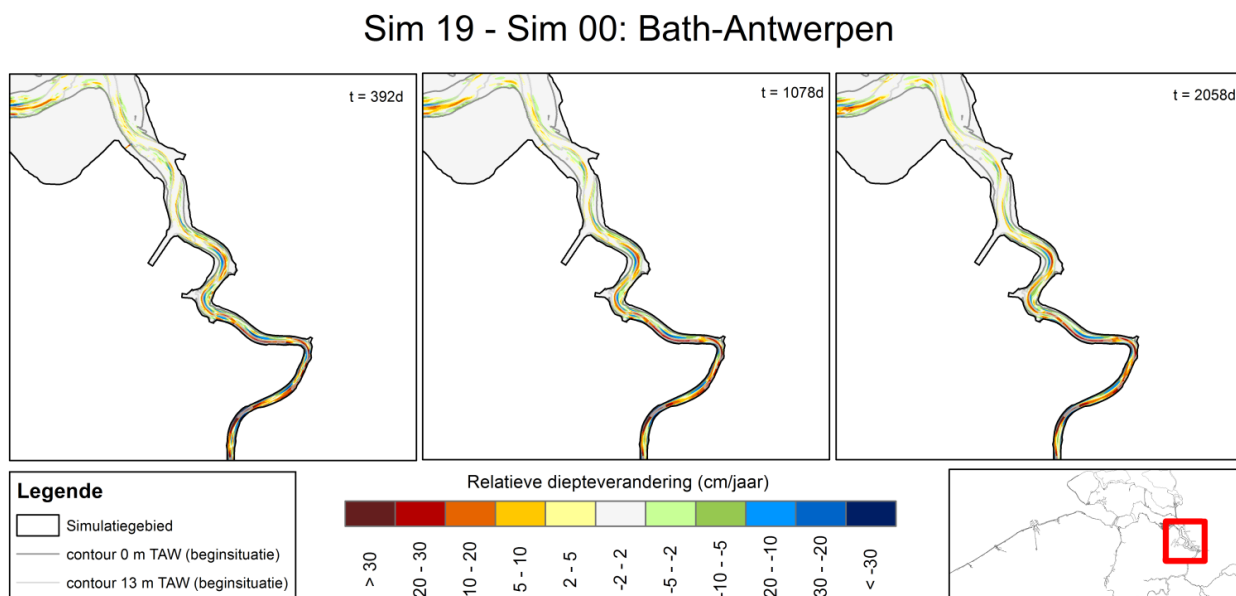
Sim 19 - Sim 00: Terneuzen-Hansweert



Figuur 84 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 19 ($\alpha_{bn} = 0.15$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bn} = 1.5$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Hansweert - Bath

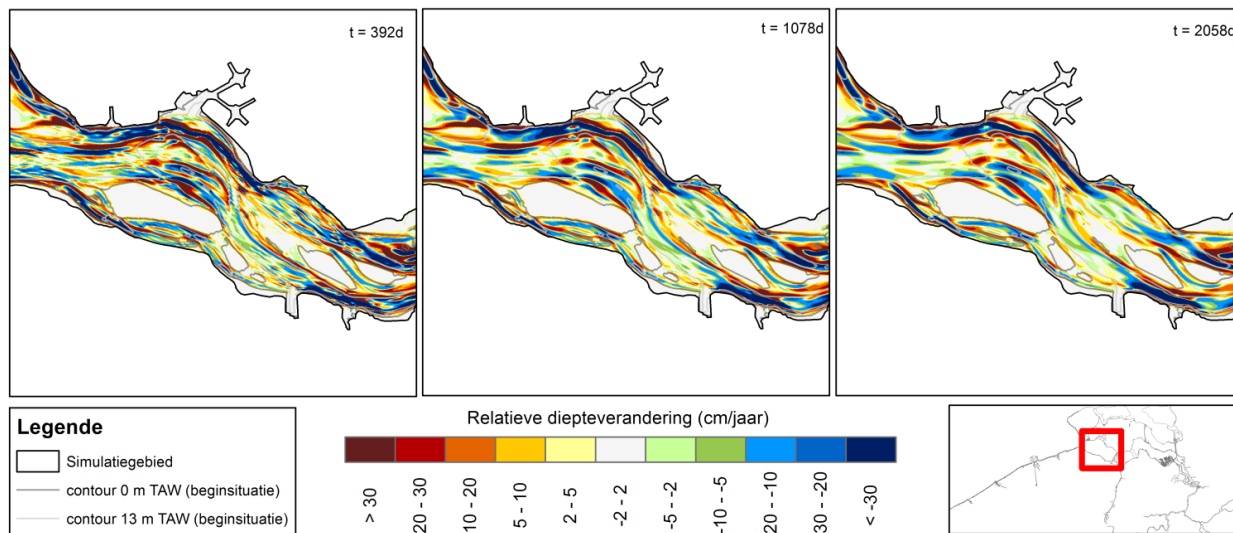


Figuur 85 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 19 ($\alpha_{bn} = 0.15$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bn} = 1.5$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Bath - Antwerpen



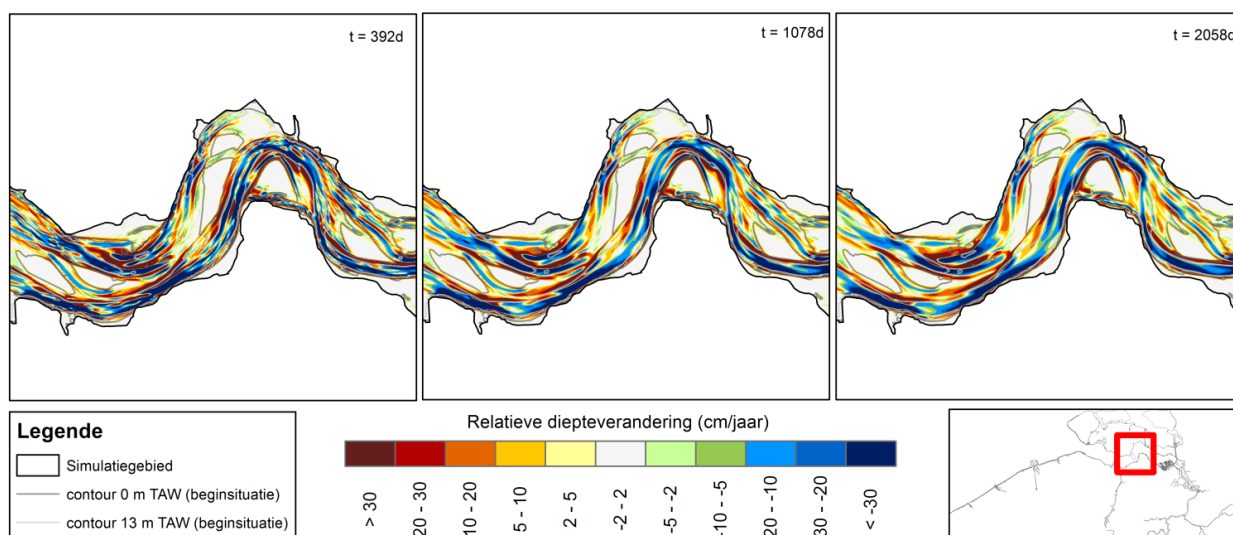
Figuur 86 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 16 ($\alpha_{bn} = 15$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bn} = 1.5$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Vlissingen - Terneuzen

Sim 16 - Sim 00: Vlissingen-Terneuzen

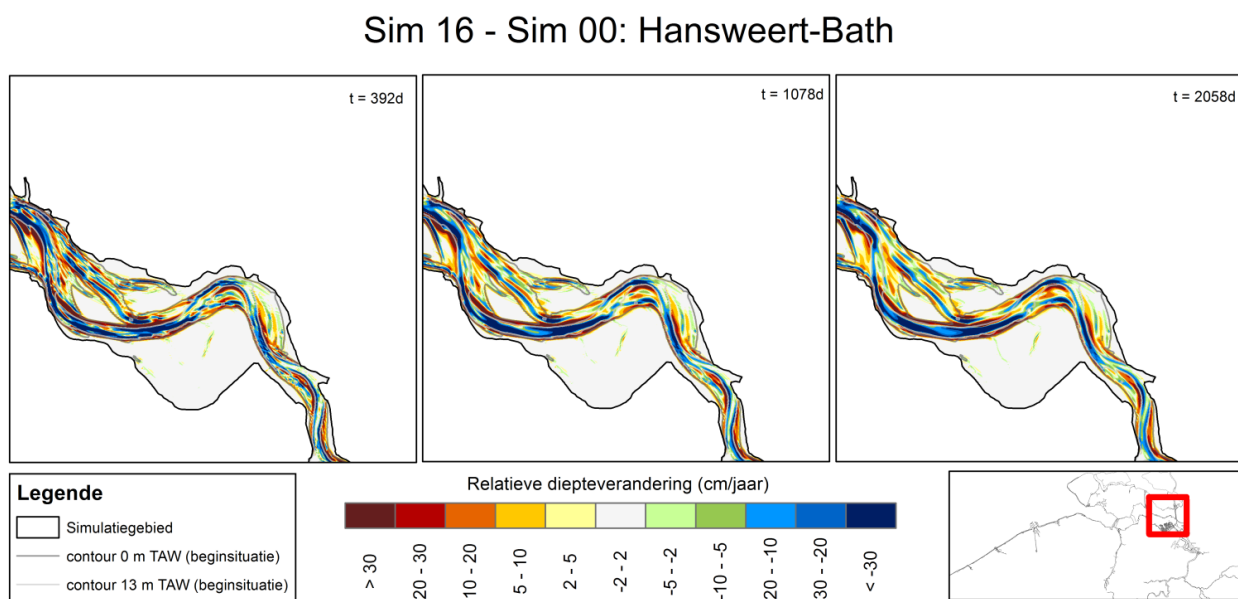


Figuur 87 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 16 ($\alpha_{bn} = 15$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bn} = 1.5$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert

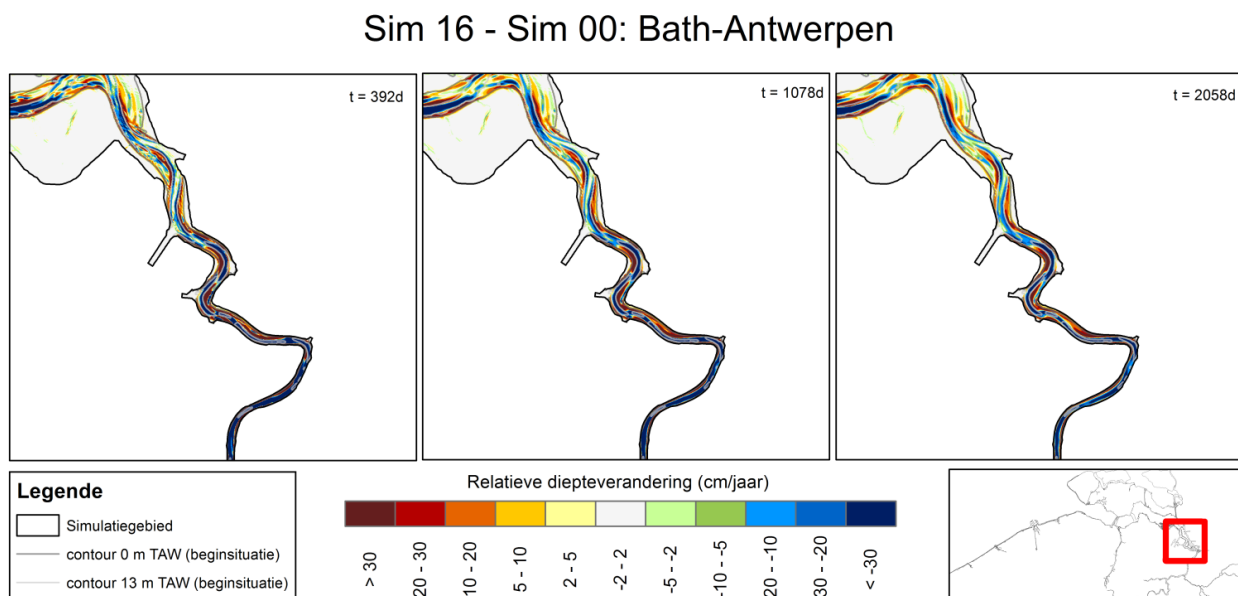
Sim 16 - Sim 00: Terneuzen-Hansweert



Figuur 88 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 16 ($\alpha_{bn} = 15$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bn} = 1.5$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Hansweert - Bath

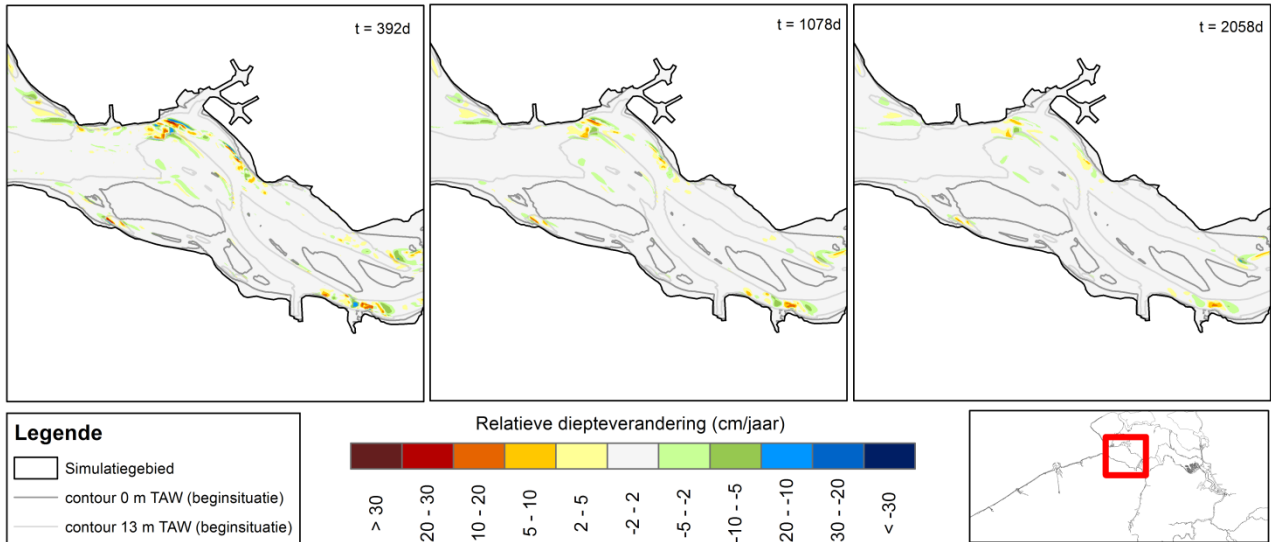


Figuur 89 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 16 ($\alpha_{bn} = 15$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bn} = 1.5$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Bath - Antwerpen



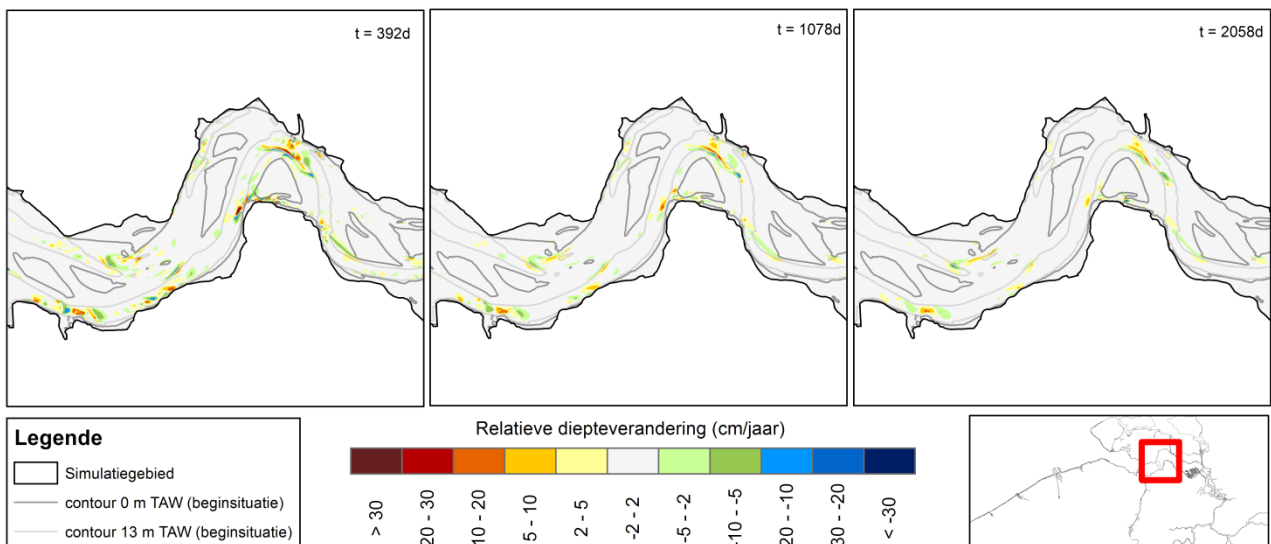
Figuur 90 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 24 ($\alpha_{bs} = 0.1$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bs} = 1$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Vlissingen - Terneuzen

Sim 24: Vlissingen-Terneuzen

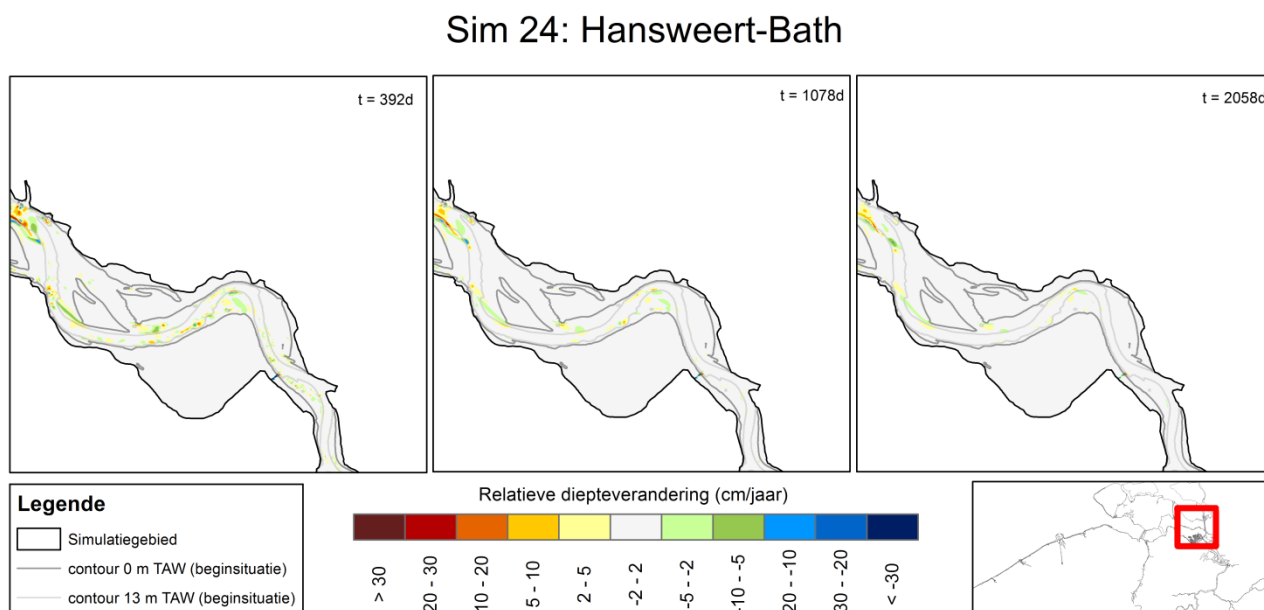


Figuur 91 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 24 ($\alpha_{bs} = 0.1$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bs} = 1$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert

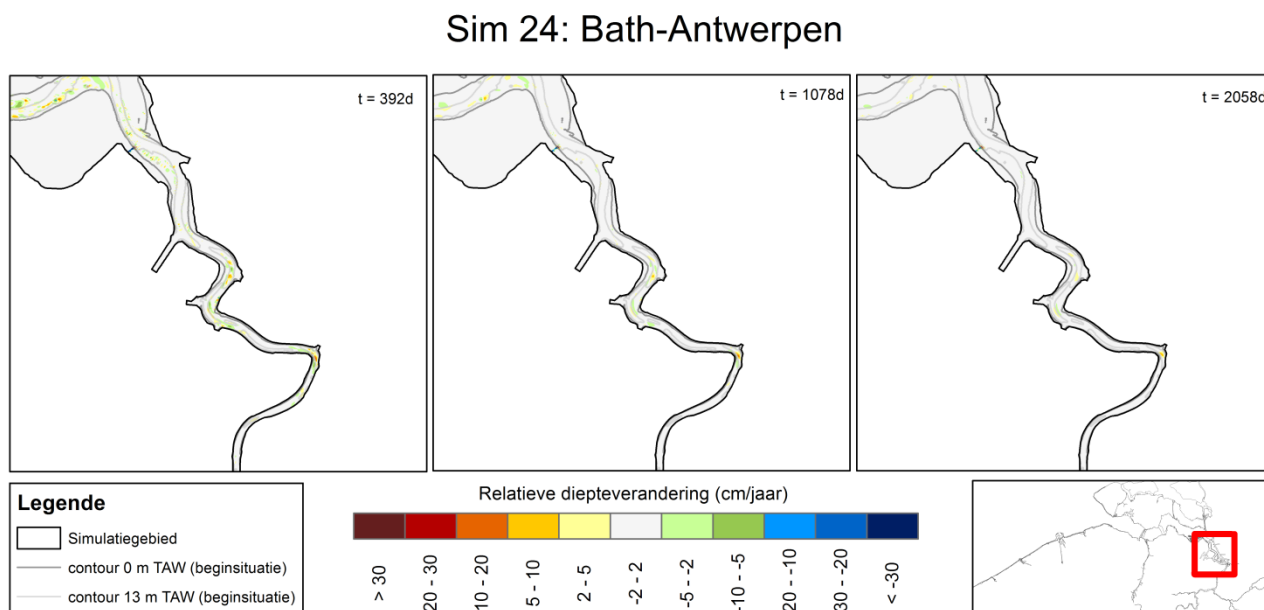
Sim 24: Terneuzen-Hansweert



Figuur 92 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 24 ($\alpha_{bs} = 0.1$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bs} = 1$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Hansweert - Bath

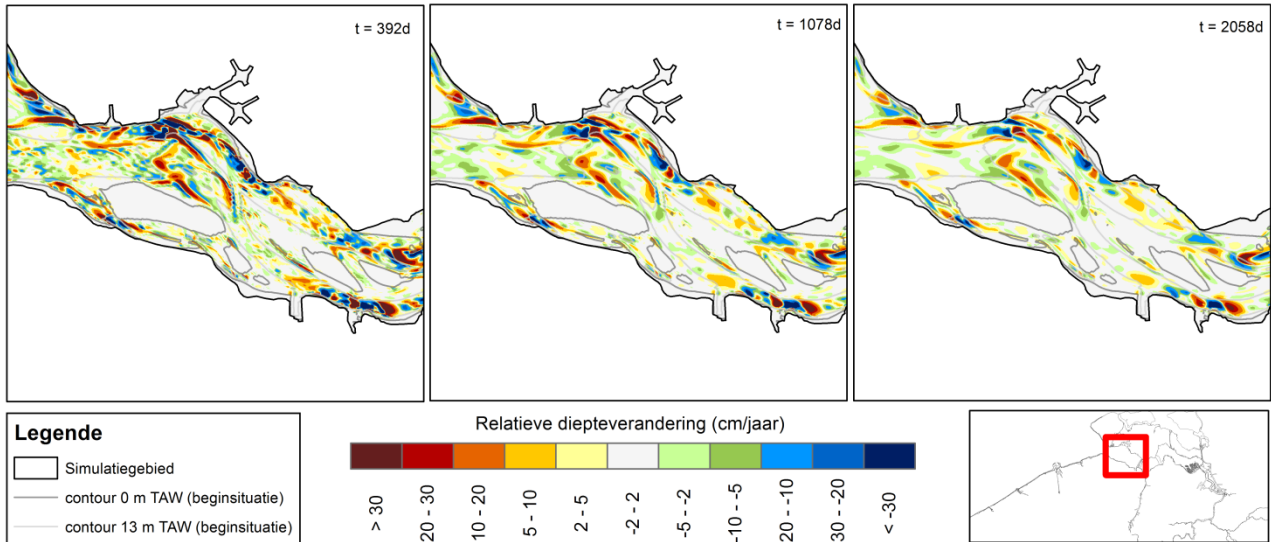


Figuur 93 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 24 ($\alpha_{bs} = 0.1$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bs} = 1$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Bath - Antwerpen



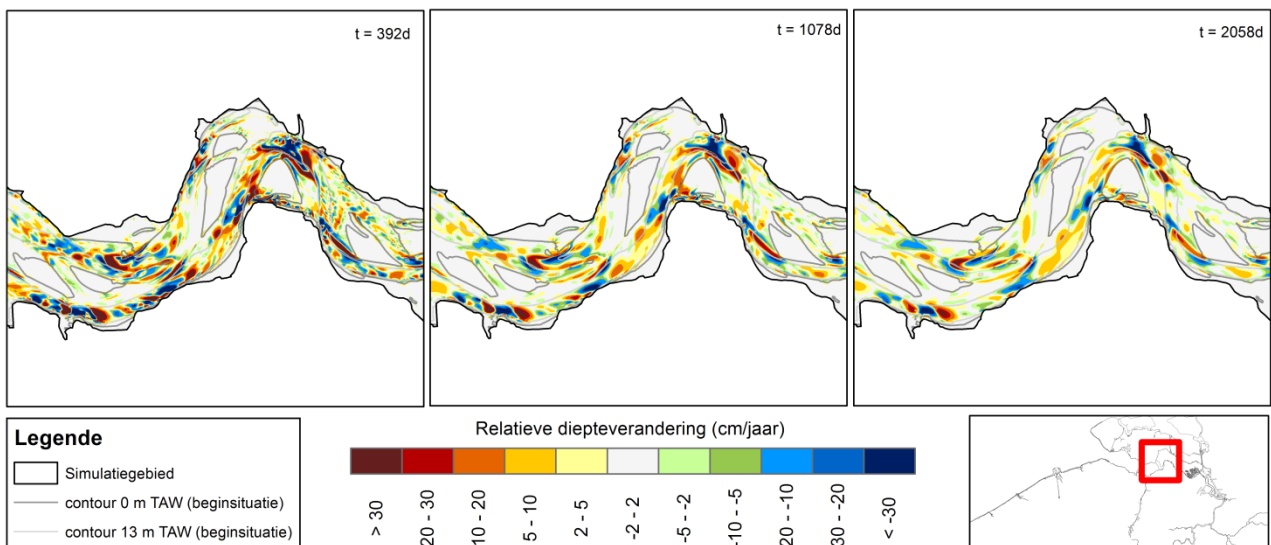
Figuur 94 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 16 ($\alpha_{bs} = 10$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bs} = 1$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Vlissingen - Terneuzen

Sim 23: Vlissingen-Terneuzen

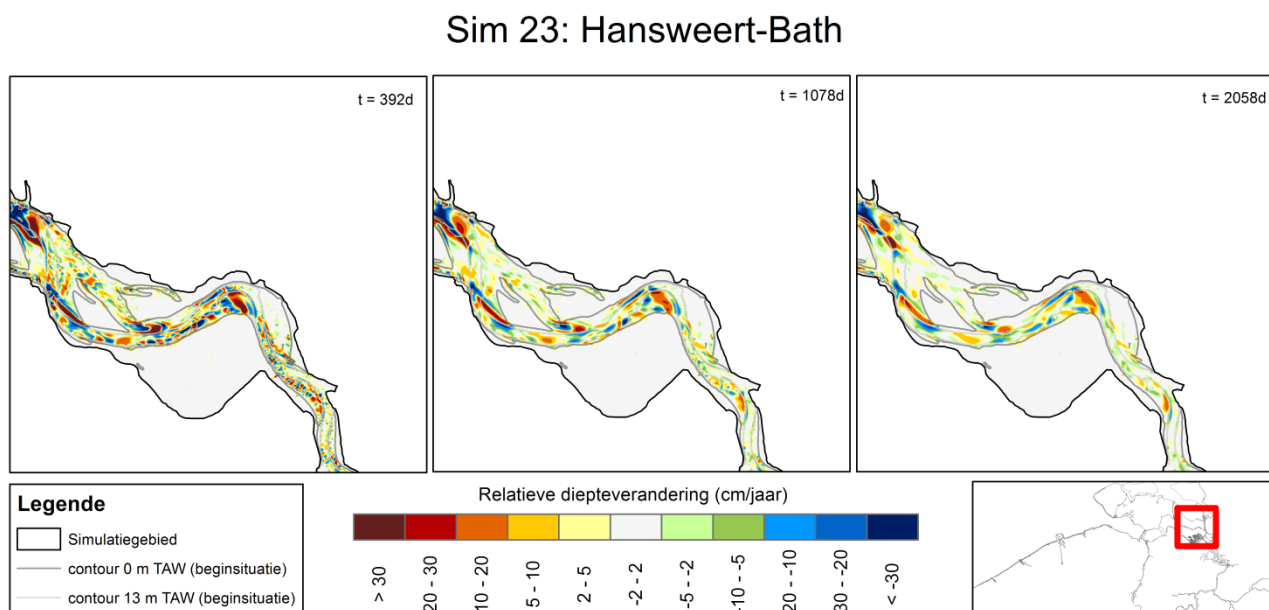


Figuur 95 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 16 ($\alpha_{bs} = 10$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bs} = 1$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert

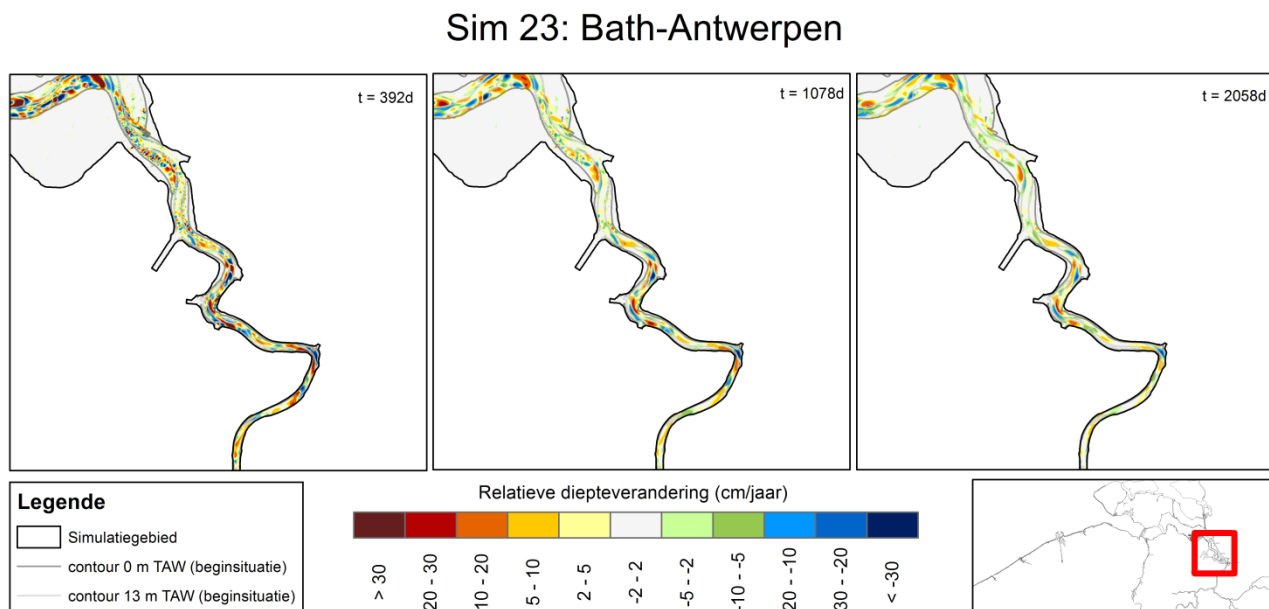
Sim 23: Terneuzen-Hansweert



Figuur 96 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 16 ($\alpha_{bs} = 10$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bs} = 1$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Hansweert - Bath



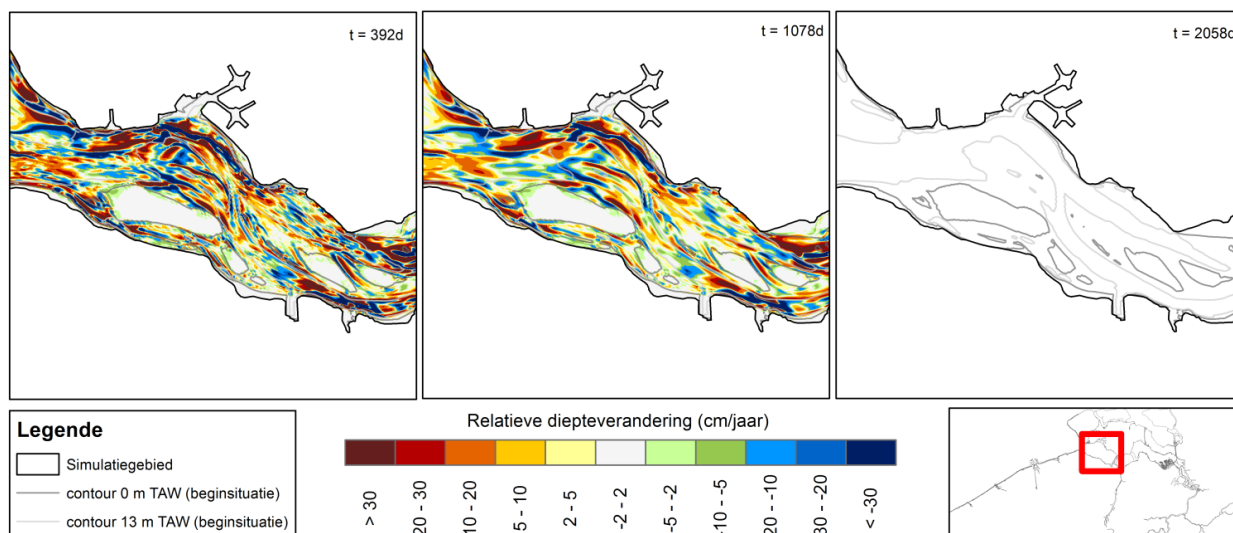
Figuur 97 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 16 ($\alpha_{bs} = 10$) t.o.v. Sim 00 ($\alpha_{bs} = 1$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Bath - Antwerpen



Sedimentkarakteristieken: D50

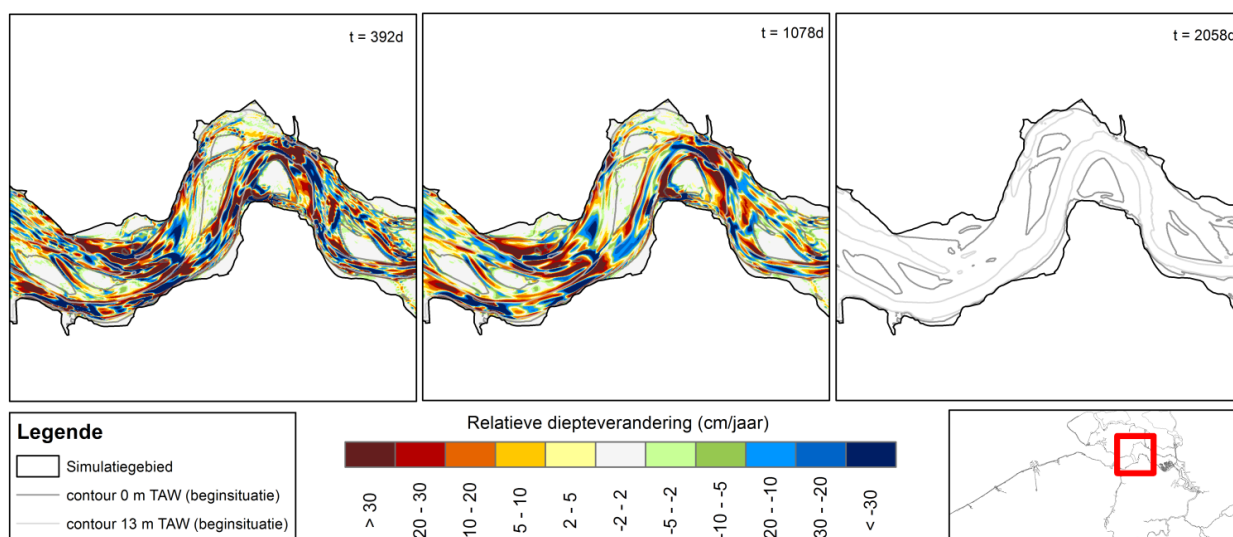
Figuur 98 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 02 ($D_{50} = 100 \mu\text{m}$) t.o.v. Sim 00 ($D_{50} = 200 \mu\text{m}$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078) in de regio Vlissingen - Terneuzen

Sim 02 – Sim 00: Vlissingen-Terneuzen

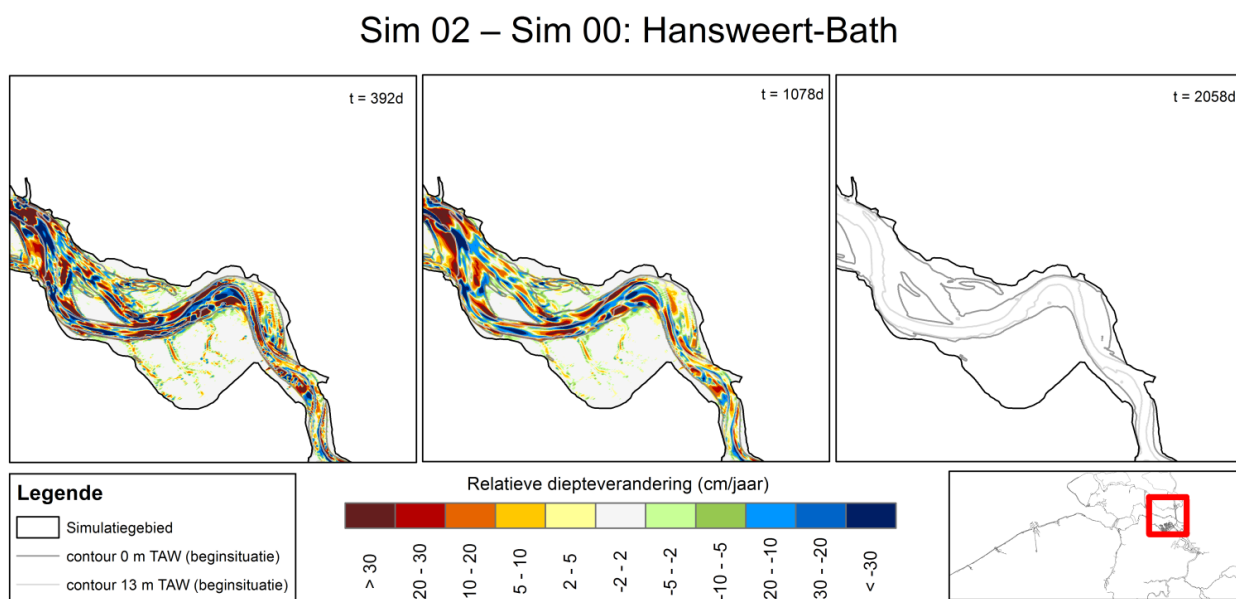


Figuur 99 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 02 ($D_{50} = 100 \mu\text{m}$) t.o.v. Sim 00 ($D_{50} = 200 \mu\text{m}$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078) in de regio Terneuzen - Hansweert

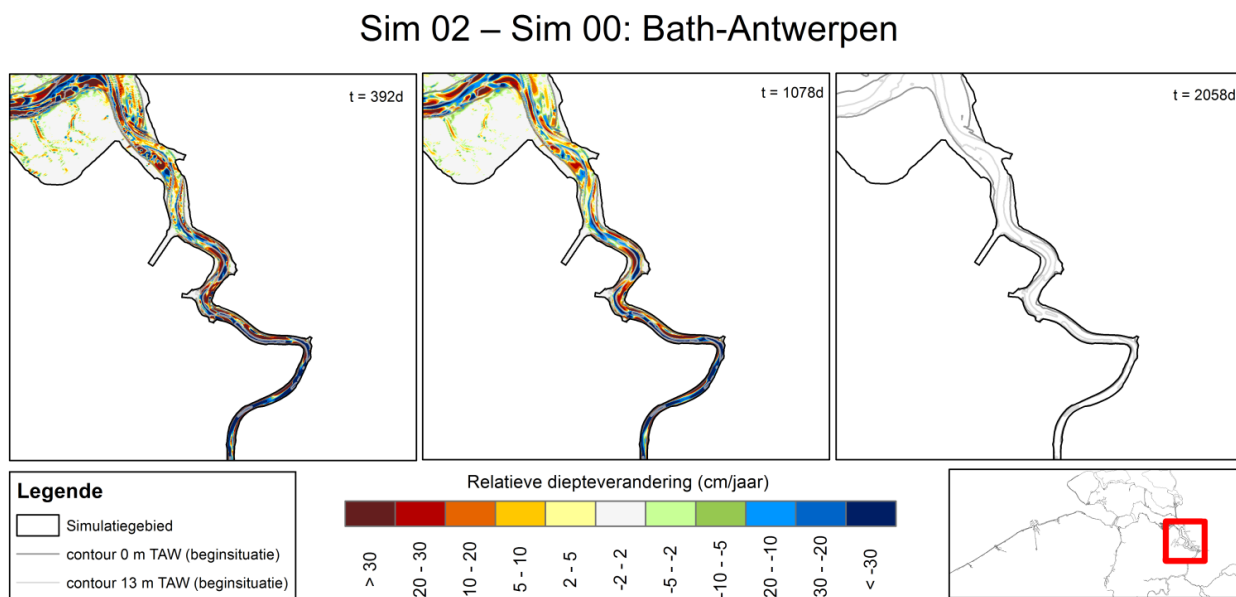
Sim 02 – Sim 00: Terneuzen-Hansweert



Figuur 100 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 02 ($D_{50} = 100 \mu\text{m}$) t.o.v. Sim 00 ($D_{50} = 200 \mu\text{m}$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078) in de regio Hansweert - Bath

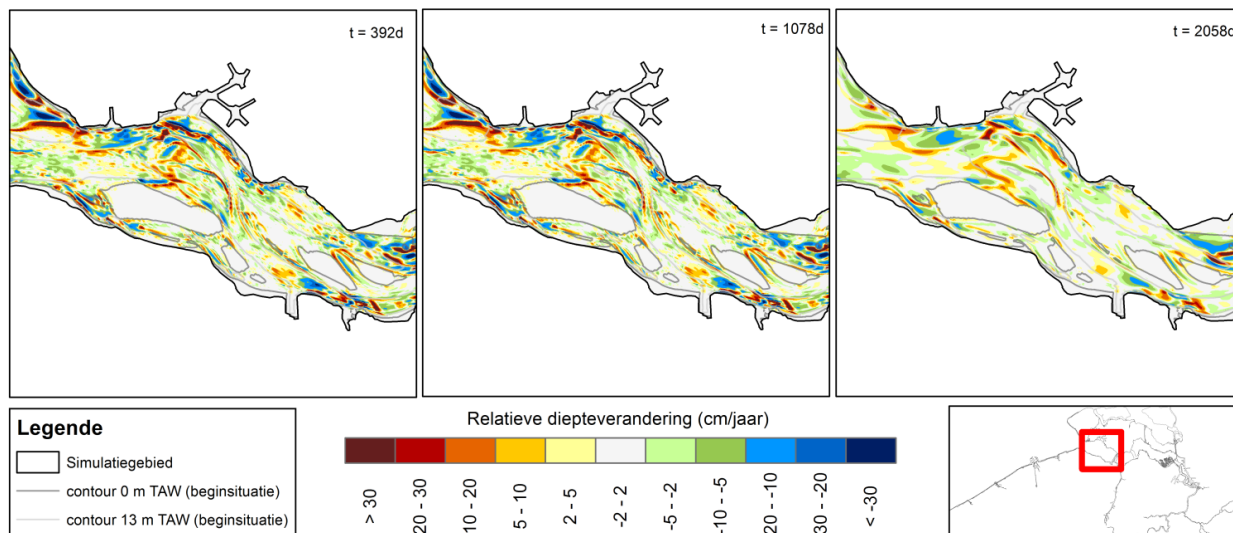


Figuur 101 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 02 ($D_{50} = 100 \mu\text{m}$) t.o.v. Sim 00 ($D_{50} = 200 \mu\text{m}$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078) in de regio Bath - Antwerpen



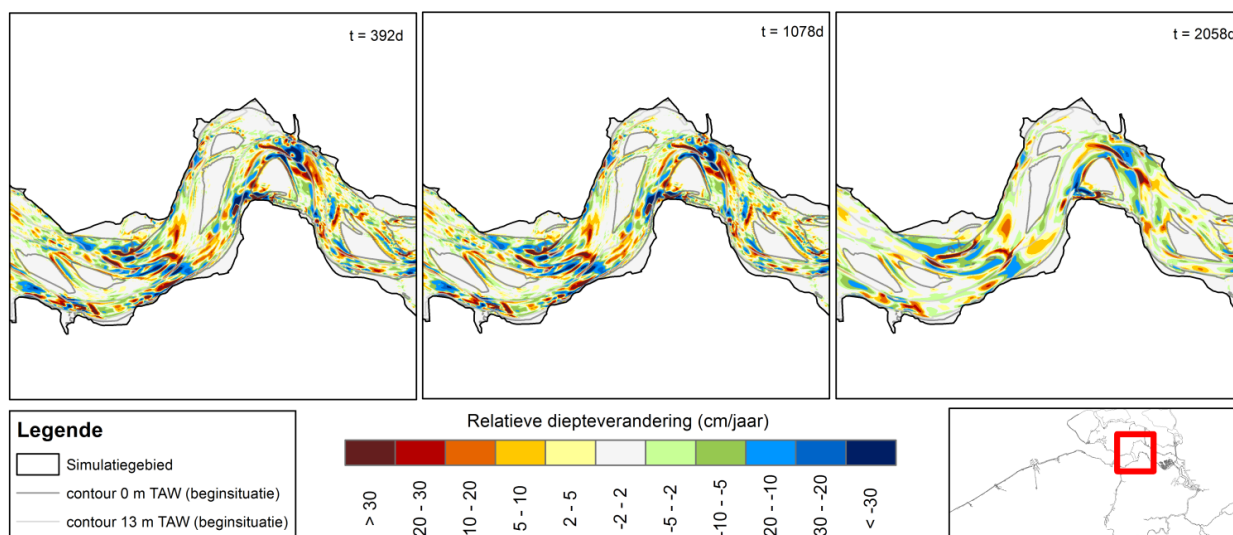
Figuur 102 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 13 ($D_{50} = 300 \mu\text{m}$) t.o.v. Sim 00 ($D_{50} = 200 \mu\text{m}$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Hansweert - Bath

Sim13_L - Sim00_repleuven: Vlissingen-Terneuzen



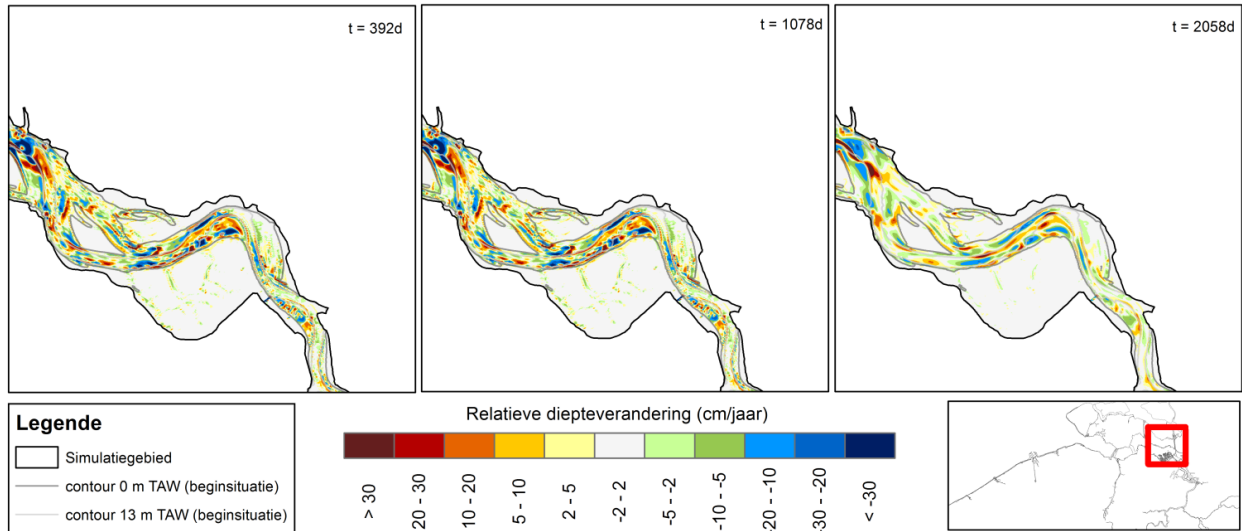
Figuur 103 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 13 ($D_{50} = 300 \mu\text{m}$) t.o.v. Sim 00 ($D_{50} = 200 \mu\text{m}$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert

Sim13_L - Sim00_repleuven: Terneuzen-Hansweert



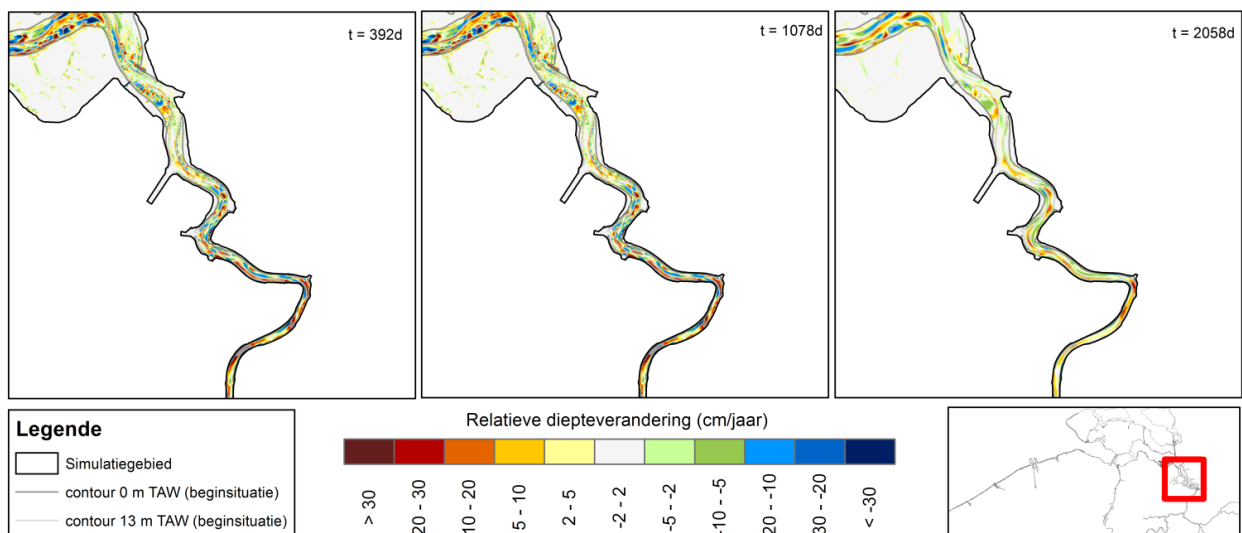
Figuur 104 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 13 ($D_{50} = 300 \mu\text{m}$) t.o.v. Sim 00 ($D_{50} = 200 \mu\text{m}$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Hansweert - Bath

Sim13_L - Sim00_repleuven: Hansweert-Bath



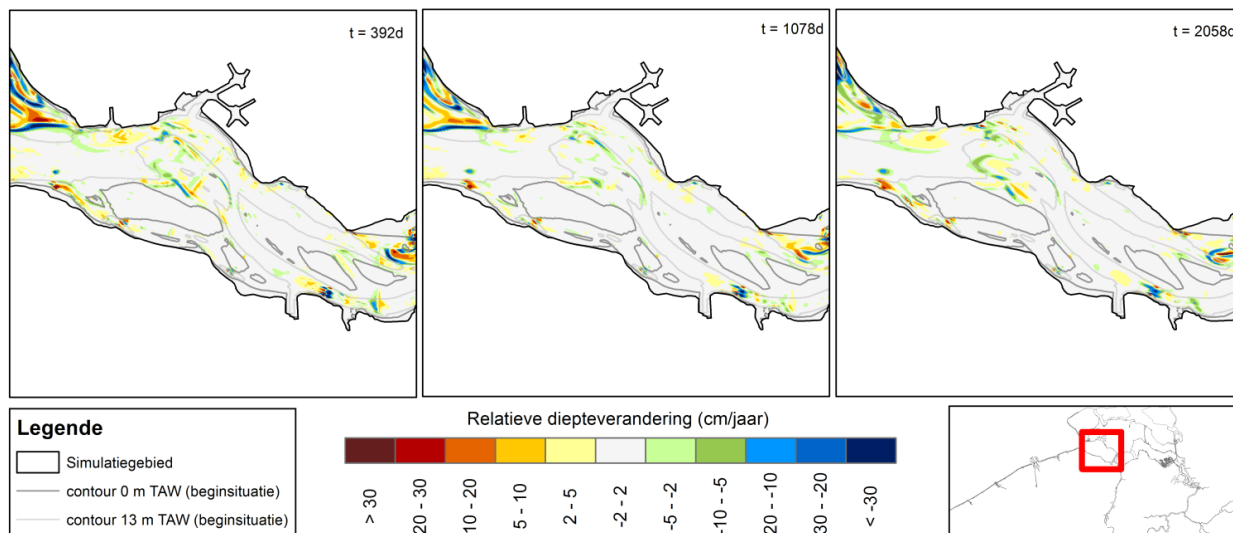
Figuur 105 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 13 ($D_{50} = 300 \mu\text{m}$) t.o.v. Sim 00 ($D_{50} = 200 \mu\text{m}$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Bath - Antwerpen

Sim13_L - Sim00_repleuven: Bath-Antwerpen



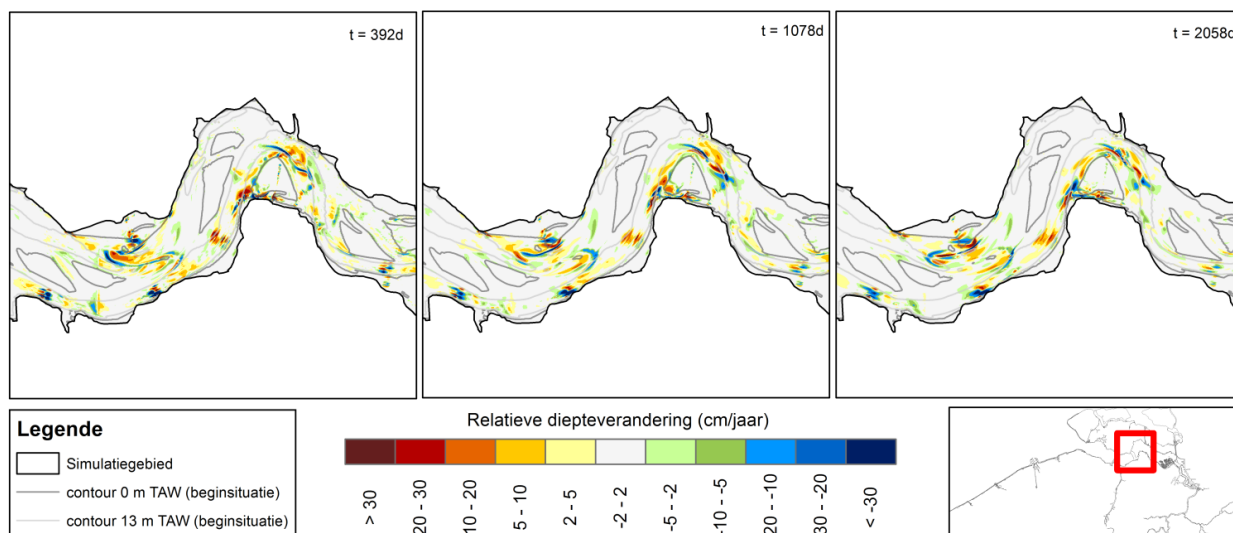
Figuur 106 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim LT30 (3 fracties) t.o.v. Sim 00 ($D_{50} = 200 \mu\text{m}$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Vlissingen - Terneuzen

Sim LT30 – Sim 00: Vlissingen-Terneuzen

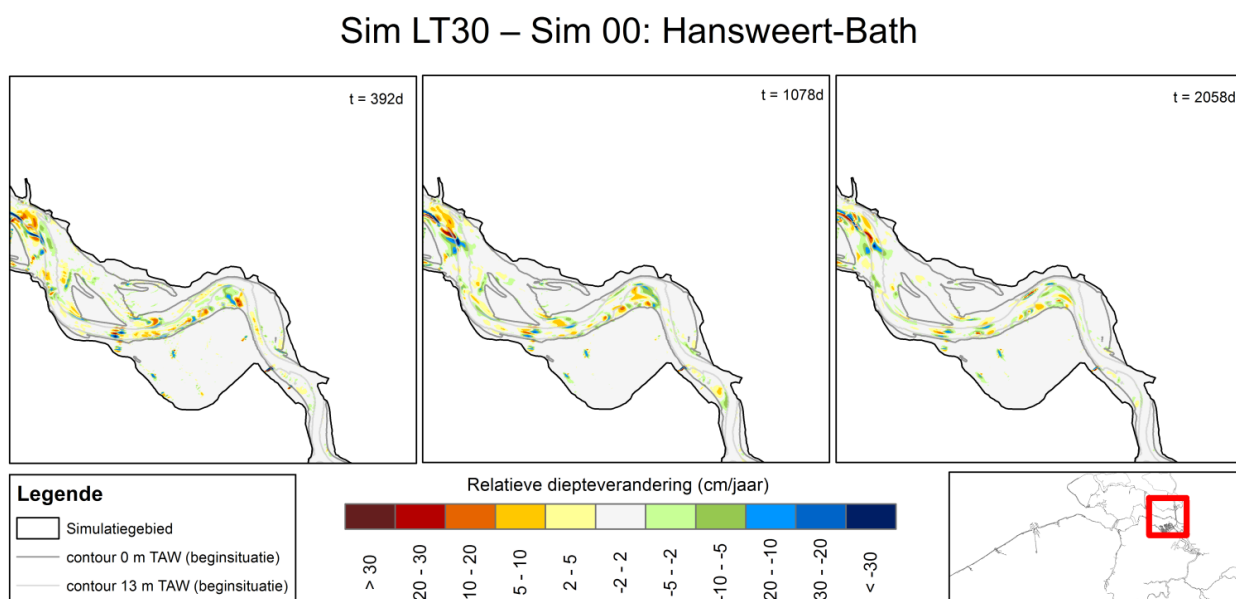


Figuur 107 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim LT30 (3 fracties) t.o.v. Sim 00 ($D_{50} = 200 \mu\text{m}$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Terneuzen - Hansweert

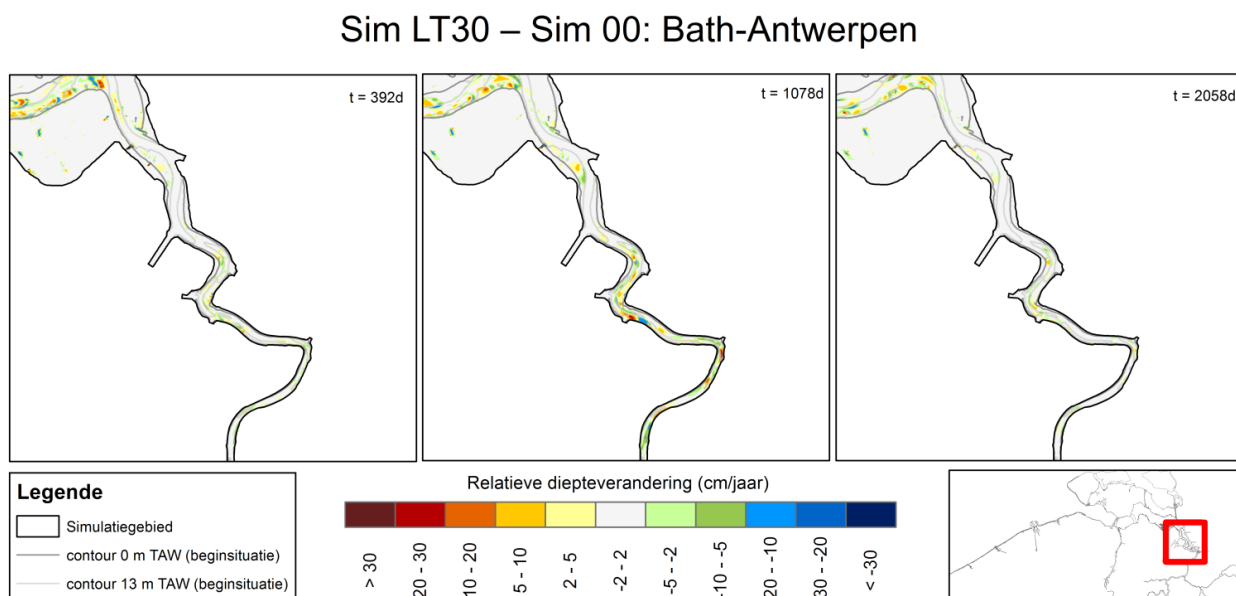
Sim LT30 – Sim 00: Terneuzen-Hansweert



Figuur 108 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim LT30 (3 fracties) t.o.v. Sim 00 ($D_{50} = 200 \mu\text{m}$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Hansweert - Bath



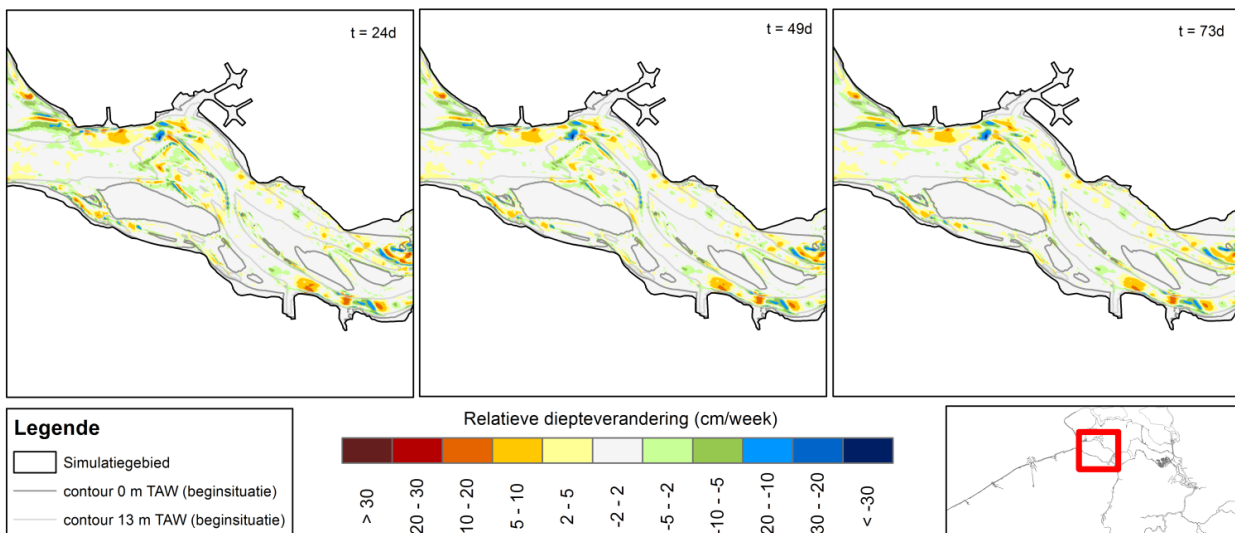
Figuur 109 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim LT30 (3 fracties) t.o.v. Sim 00 ($D_{50} = 200 \mu\text{m}$) op dezelfde outputstap (respectievelijk 392, 1078, 2058) in de regio Bath – Antwerpen



Geen morfologische versnelling

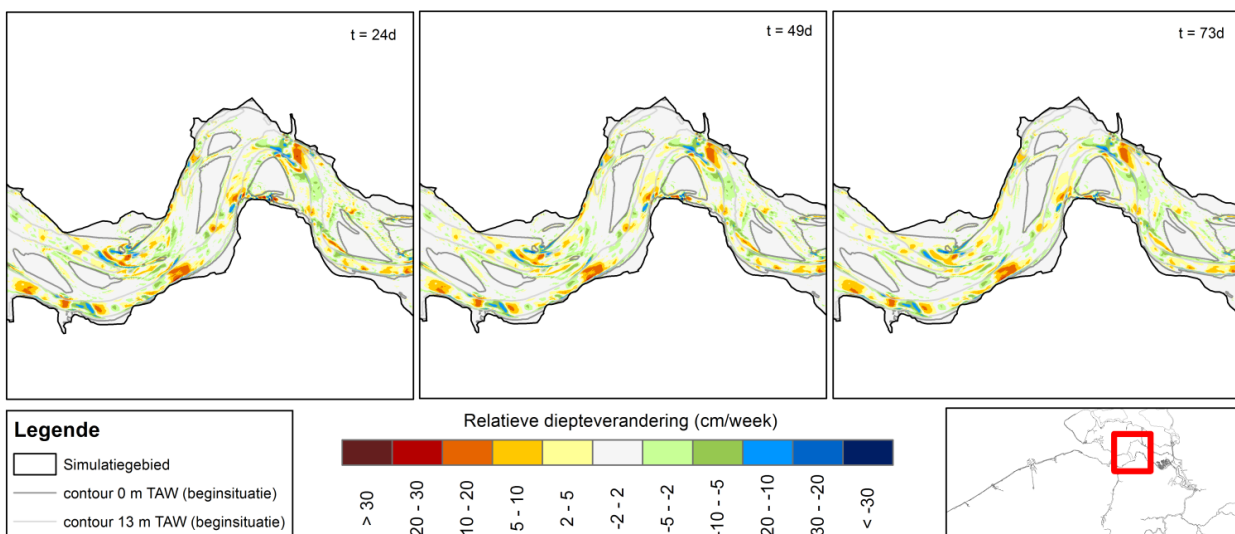
Figuur 110 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 20 (MF = 1) t.o.v. Sim 00 (MF = 24.5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 24, 49, 73) in de regio Vlissingen - Terneuzen

Sim 20_L - Sim 00_repleuven: Vlissingen-Terneuzen



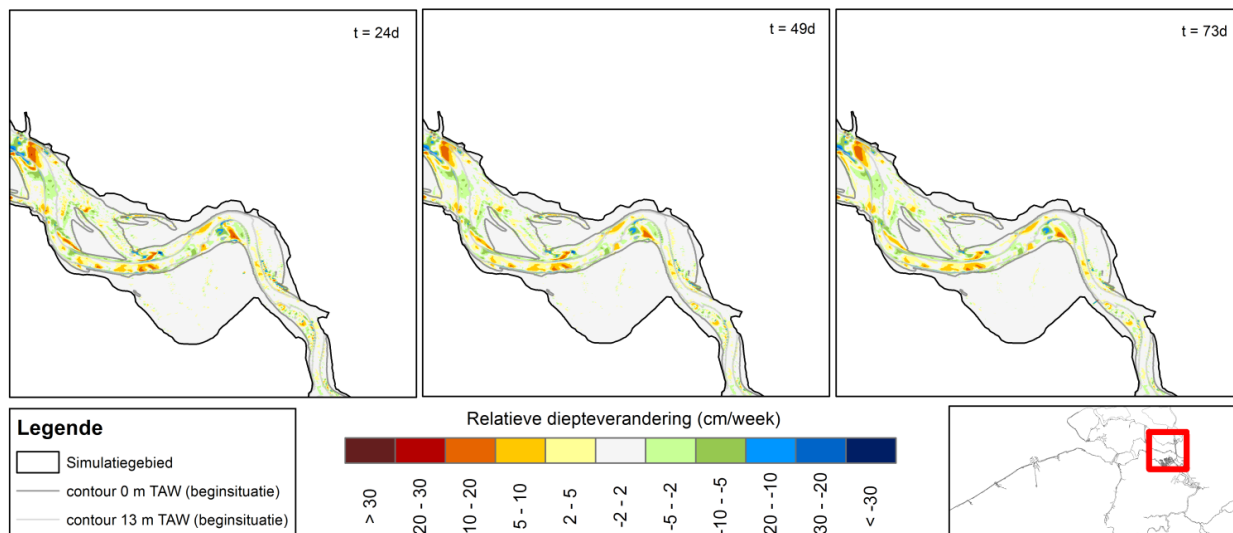
Figuur 111 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 20 (MF = 1) t.o.v. Sim 00 (MF = 24.5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 24, 49, 73) in de regio Terneuzen - Hansweert

Sim 20_L - Sim 00_repleuven: Terneuzen-Hansweert



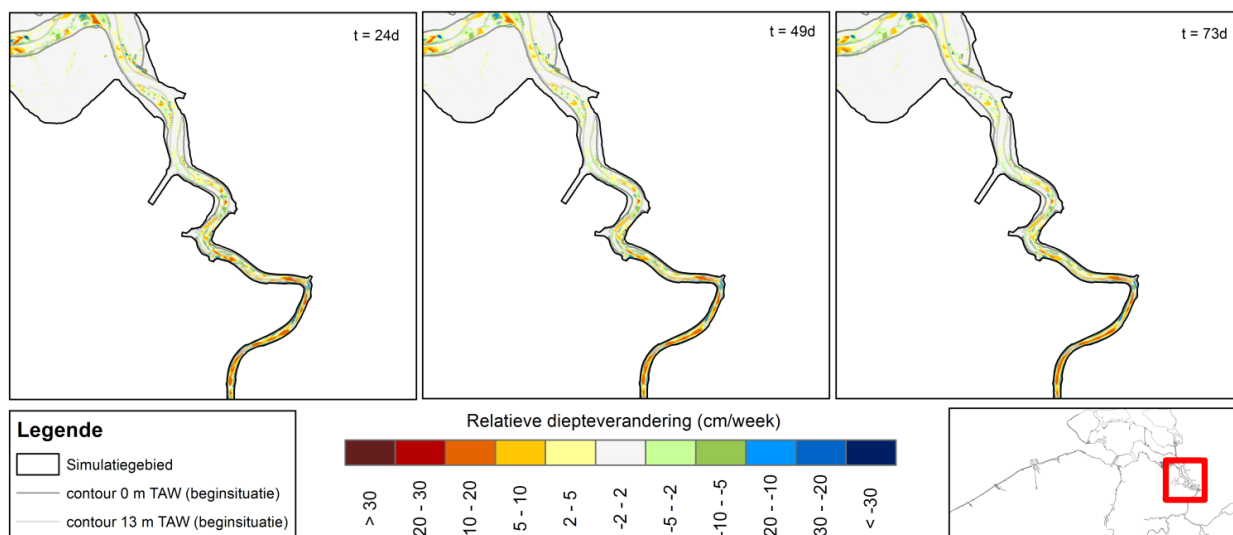
Figuur 112 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 20 (MF = 1) t.o.v. Sim 00 (MF = 24.5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 24, 49, 73) in de regio Hansweert - Bath

Sim 20_L - Sim 00_repleuven: Hansweert-Bath

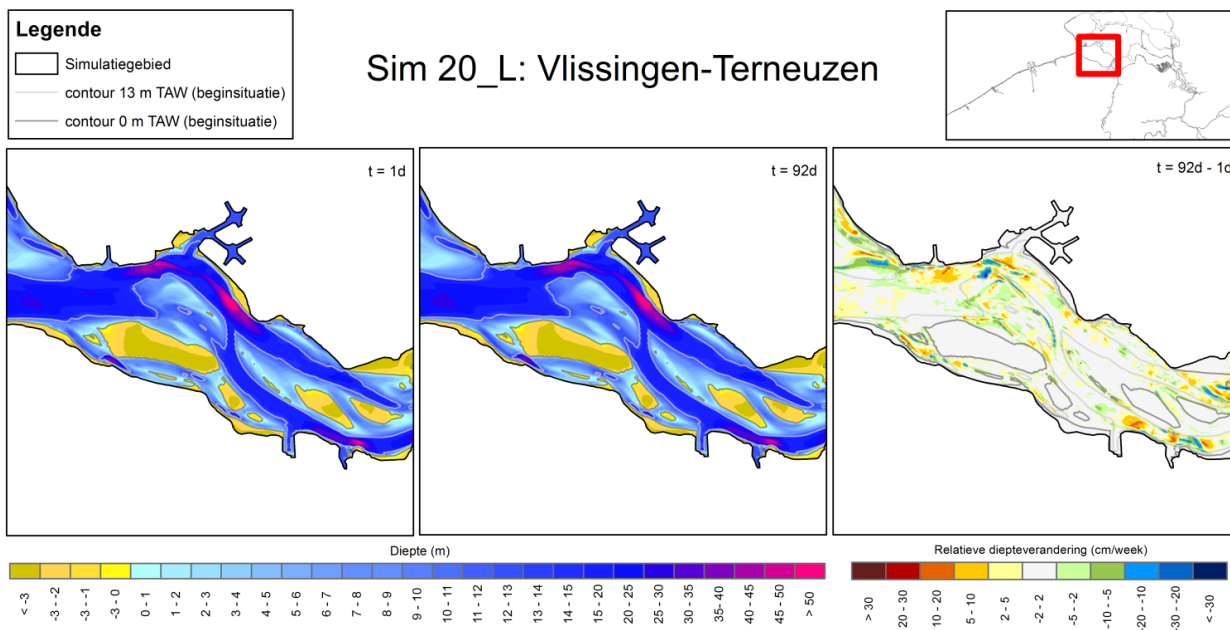


Figuur 113 – Simulatieresultaten van de verandering van de diepteligging van Sim 20 (MF = 1) t.o.v. Sim 00 (MF = 24.5) op dezelfde outputstap (respectievelijk 24, 49, 73) in de regio Bath – Antwerpen

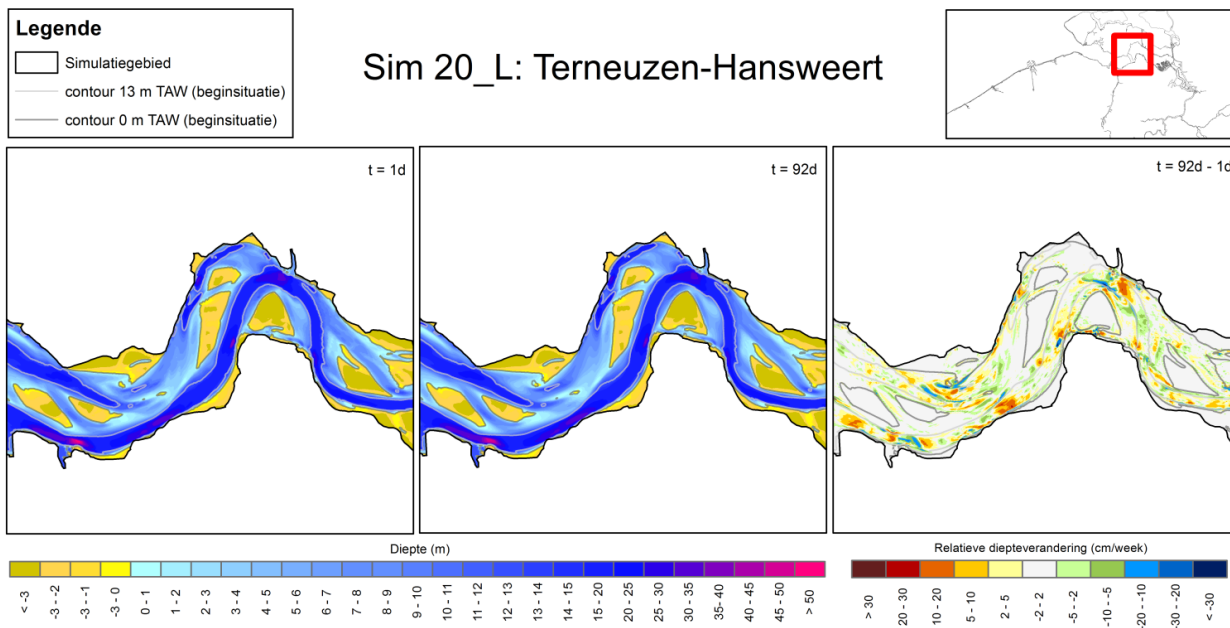
Sim 20_L - Sim 00_repleuven: Bath-Antwerpen



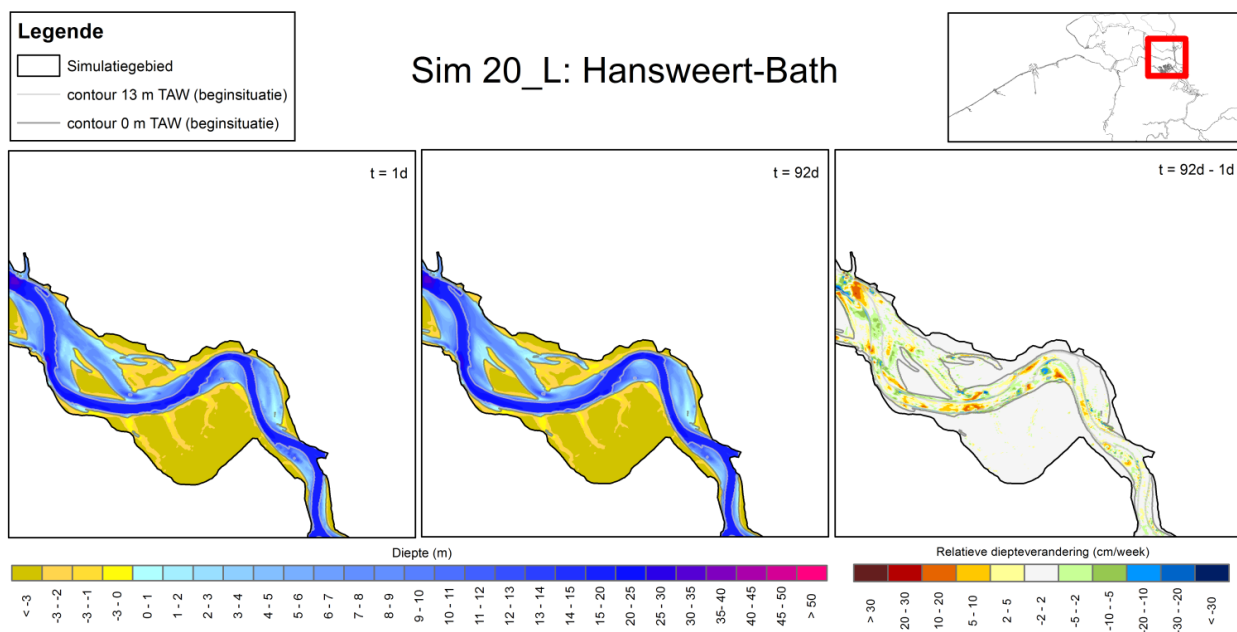
Figuur 114 – Diepteligging aan het begin van de simulatie (t = 1d, links), op het einde van de simulatie (t = 92 d, midden) en het verschil tussen beiden (t = 92d – 1d, rechts) voor de regio Vlissingen - Terneuzen



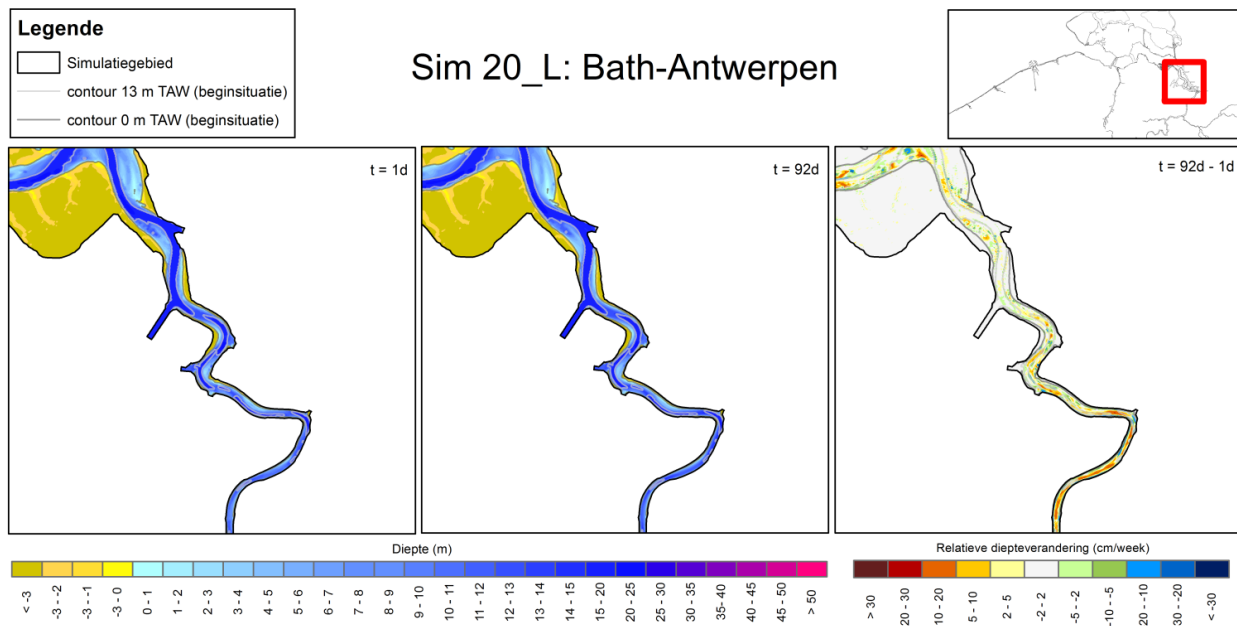
Figuur 115 – Diepteligging aan het begin van de simulatie (t = 1d, links), op het einde van de simulatie (t = 92 d, midden) en het verschil tussen beiden (t = 92d – 1d, rechts) voor de regio Terneuzen - Hansweert



Figuur 116 – Diepteligging aan het begin van de simulatie (t = 1d, links), op het einde van de simulatie (t = 92 d, midden) en het verschil tussen beiden (t = 92d – 1d, rechts) voor de regio Hansweert - Bath



Figuur 117 – Diepteligging aan het begin van de simulatie (t = 1d, links), op het einde van de simulatie (t = 92 d, midden) en het verschil tussen beiden (t = 92d – 1d, rechts) voor de regio Bath - Antwerpen



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