



Vlaanderen
is wetenschap



14_025_5
WL rapporten

Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde

Deelrapport 5 – Wijziging sedimentatie ter hoogte van
baggerlocaties en slikken en schorren

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be



Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde

Deelrapport 5 – Wijziging sedimentatie ter hoogte van
baggerlocaties en slikken en schorren

Coen, L.; Meire, D.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F.

Maart 2016

WL2016R14_025_5

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Coen, L.; Meire, D.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016). Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde: Deelrapport 5 – Wijziging sedimentatie ter hoogte van baggerlocaties en slikken en schorren. Versie 4.0. WL Rapporten, 14_025. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.



DEPARTEMENT **MOBILITEIT EN 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

mow.vlaanderen.be



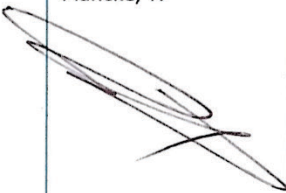


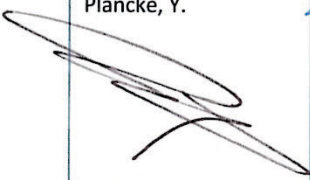
waterbouwkundiglaboratorium.be

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welk andere wijze ook zonder voorafgaande toestemming van de uitgever.

Documentidentificatie

Titel:	Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde: Deelrapport 5 – Wijziging sedimentatie ter hoogte van baggerlocaties en slikken en schorren		
Opdrachtgever:	VNSC	Ref.:	WL2016R14_025_5
Keywords (3-5):	Sediment, stortstrategie, Beneden-Zeeschelde		
Tekst (p.):	21	Bijlagen (p.):	/
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	Uitzondering:	<input checked="" type="checkbox"/> Opdrachtgever
			<input type="checkbox"/> Intern
			<input type="checkbox"/> Vlaamse overheid
	<input type="checkbox"/> Nee	<input type="checkbox"/> Online beschikbaar	

Goedkeuring

Auteur	Revisor	Projectleider	Coördinator Studie & Advies	Afdelingshoofd
Coen, L.	Meire, D.	Plancke, Y.	Verwaest, T.	Mostaert, F.
				
Plancke, Y.				
				

Revisies

Nr.	Datum	Omschrijving	Auteur(s)
1.0	28/09/2015	Conceptversie	Coen, L.; Plancke, Y.
2.0	23/10/2015	Inhoudelijke revisie	Meire, D.
3.0	30/11/2015	Revisie opdrachtgever	Beirinckx, K.; Ides, S.
4.0	09/03/2016	Definitieve versie	Plancke, Y.

Abstract

Om de toegankelijkheid naar de Scheldehavens te kunnen garanderen dienen quasi continu onderhoudsbaggerwerken uitgevoerd te worden. Om deze werken uit te voeren zijn vergunningen nodig. Voor de Beneden-Zeeschelde lopen de huidige onderhoudsvergunningen nog tot december 2017. Ten behoeve van een nieuwe vergunning wordt voorbereidend onderzoek uitgevoerd om de stortstrategie zo optimaal mogelijk in te vullen, rekening houdend met toekomstige ontwikkelingen.

Met behulp van het 2D numeriek model (Delft3D) werden scenarioberekeningen uitgevoerd voor verschillende stortstrategieën voor slib en zand. De wijziging van stortlocaties in de verschillende stortscenario's leidt tot een wijziging in de sedimentatie op de huidige baggerlocaties, zowel drempels (ondiepten in de vaargeul), de sluisoegangen als het Deurganckdok. Daarnaast zullen ook wijzigingen kunnen optreden in de ophogingssnelheid van intergetijdengebieden, de slikken en schorren. De huidige modellen zijn beperkt in het voorspellen van de sedimentatie ter hoogte van drempels en intergetijdengebieden. In voorliggend rapport wordt op basis van een aantal empirische modellen een inschatting gemaakt van de sedimentatie ter hoogte van baggerlocaties en intergetijdengebieden in de Beneden-Zeeschelde.

INHOUDSTAFEL

Inhoudstafel.....	I
Lijst van de tabellen.....	II
lijst van de figuren	III
1 Inleiding	4
1.1 Situering.....	4
1.2 Overige rapporten	5
2 De onderzochte stortscenario's	6
3 Sedimentatie ter hoogte van baggerlocaties	8
3.1 Sedimentatie op drempels en toegangsgeulen tot sluisen	8
3.1.1 Methodologie	8
3.1.2 Resultaten	10
3.2 Sedimentatie in Deurganckdok.....	11
3.2.1 Methodologie	11
3.2.2 Resultaten	12
3.3 Sedimentatie ter hoogte van alle baggerlocaties.....	13
4 Sedimentatie op slikken en schorren	14
4.1 Empirisch ophogingsmodel.....	14
4.2 Kalibratie van het empirisch ophogingsmodel voor Hedwige- en Prosperpolder.....	15
4.3 Toepassing van het model voor verschillende stortscenario's.....	16
4.3.1 CASE 1 – middelhoog slik.....	16
4.3.2 CASE 2 – hoog slik	17
4.3.3 Conclusies	18
5 Conclusies	19
6 Referenties	20

LIJST VAN DE TABELLEN

Tabel 1 – Overzicht stortscenario's	6
Tabel 2 – Wijziging in sedimentatiehoeveelheid (in %) ter hoogte van baggerlocaties voor de verschillende scenario's ten opzichte van het huidige stortscenario.....	10
Tabel 3 – Wijziging in sedimentatiehoeveelheid (in %) in Deurganckdok voor de verschillende scenario's ten opzichte van het huidige stortscenario	12
Tabel 4 – Wijziging in totale baggerhoeveelheid (in %) voor de verschillende baggerlocaties ten opzichte van het huidige stortscenario voor de periode 2012-2013	13
Tabel 5 - Parameterwaardes voor het ophogingsmodel	16

LIJST VAN DE FIGUREN

Figuur 1 – Overzicht huidige bagger- (groen) en stortzones (oranje) in de Beneden-Zeeschelde.....	9
Figuur 2 – Empirische relatie tussen de ophogingssnelheid (ΔE) en de gemiddelde waterdiepte gebruikt in het ophogingsmodel van Vandenbruwaene et al. (2011)	14
Figuur 3 – Asymptotisch verloop van de platformophoging in een natuurlijk schor (grijze lijnen) en een GGG Lippenbroek (zwarte lijnen) (Vandenbruwaene et al., 2011)	15
Figuur 4 – Verloop van de bodemligging voor verschillende stortscenario's bij SPM_ref = 100 mg/l (links) en SPM_ref = 200 mg/l (rechts)	17
Figuur 5 – Verloop van de ophogingssnelheid voor verschillende stortscenario's bij SPM_ref = 100 mg/l (links) en SPM_ref = 200 mg/l (rechts).....	17
Figuur 6 – Verloop van de bodemligging voor verschillende stortscenario's bij SPM_ref = 100 mg/l (links) en SPM_ref = 200 mg/l (rechts)	18
Figuur 7 – Verloop van de ophogingssnelheid voor verschillende stortscenario's bij SPM_ref = 100 mg/l (links) en SPM_ref = 200 mg/l (rechts).....	18

1 INLEIDING

1.1 Situering

Om de toegankelijkheid naar de Scheldehavens te kunnen garanderen dienen quasi continu onderhoudsbaggerwerken uitgevoerd te worden. Om deze werken uit te voeren zijn vergunningen nodig. Voor de Westerschelde werd in 2013 een verlenging aangevraagd, dewelke in 2014 werd toegekend. Hierdoor zijn de bagger- en stortactiviteiten in het Nederlandse deel van het Schelde-estuarium vergund tot februari 2022.

Voor het Vlaamse deel van het estuarium, de Beneden-Zeeschelde, lopen de huidige onderhoudsvergunningen nog tot december 2017. Momenteel wordt zandige specie teruggestort in de Schaar van Ouden Doel (waar ook zandwinning plaatsvindt) en slibrijke specie ter hoogte van de Punt van Melsele (linkeroever) en Plaat van Boomke, Oosterweel en Vlake van Hoboken (rechteroever). Ten behoeve van een nieuwe vergunning (mogelijks een zogeheten omgevingsvergunning) dient er onderzoek te gebeuren om de stortstrategie zo optimaal mogelijk in te vullen, rekening houdend met toekomstige ontwikkelingen (o.a. zandwinstrategie, aanleg Oosterweeltunnel, risico regime shift).

Met behulp van het 2D-model in Delft3D werden scenarioberekeningen uitgevoerd voor verschillende stortstrategieën voor slib. De opbouw van het model, evenals de gevoeligheidsanalyse, validatie en scenarioberekeningen worden beschreven in [Coen *et al.*, 2016]. De strategie voor het terugstorten van zandige specie wordt in een ander rapport beschreven [Vos *et al.*, 2016].

De wijziging van stortlocaties in de verschillende stortscenario's leidt tot een wijziging in de sedimentatie op de huidige baggerlocaties, zowel drempels (ondiepten in de vaargeul), de sluisoegangen als het Deurganckdok. Daarnaast zullen ook wijzigingen kunnen optreden in de ophogingssnelheid van intergetijdengebieden, de slikken en schorren. Uit vroegere studies [o.a. IMDC, 2011] is gebleken dat de huidige modellen niet in staat zijn om de sedimentatie ter hoogte van drempels en intergetijdengebieden met een grote nauwkeurigheid te voorspellen. Ook het binnen voorliggende studie gebruikte model bleek niet in staat deze morfologische veranderingen op de mesoschaal goed te reproduceren. Daartoe is ervoor geopteerd om op basis van een aantal empirische modellen een inschatting te maken van de sedimentatie ter hoogte van baggerlocaties en intergetijdengebieden in het studiegebied.

1.2 Overige rapporten

De studie “Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde” werd in het kader van de Agenda voor de Toekomst¹ uitgevoerd door het Waterbouwkundig laboratorium in samenwerking met Antea Group, Instituut voor Natuur en Bosonderzoek en de Universiteit Antwerpen. De resultaten van de studie worden beschreven in 8 deelrapporten:

- DR 1. Opzet en validatie slibmodel
- DR 2. Opzet en validatie zandmodel
- DR 3. Slibscenario's.
- DR 4. Zandscenario's
- DR 5. Wijziging sedimentatie ter hoogte van baggerlocaties en slikken en schorren
- DR 6. Effecten op primaire productie van verschillende scenario's voor het terugstorten van slib
- DR 7. Ecologische effect inschatting van de verschillende zandstortscenario's
- DR 8. Samenvatting

¹ De Agenda voor de Toekomst is een Vlaams-Nederlands onderzoeksprogramma binnen de Werkgroep Onderzoek en Monitoring van de VNSC waarbinnen de prioritaire onderzoeksthema's onderzocht worden, volgend uit de evaluatie van het verdrag Beleid & Beheer (<http://www.vnsc.eu/agenda-voor-de-toekomst/>).

2 DE ONDERZOCHE STORTSCENARIO'S

In [Coen *et al.*, 2015] worden een aantal nieuwe stortscenario's onderzocht die moeten leiden tot een geoptimaliseerde stortstrategie voor slib in de Beneden-Zeeschelde. De invulling van de nieuwe stortstrategie dient rekening te houden met een aantal uitgangspunten, waaronder (1) geen extra toename in getijverschil, (2) beperken van de effecten op de ecologie, (3) reduceren van het risico op een eventuele regime shift en (4) rekening houden met de financiële aspecten (BATNEEC-principe = **B**est **A**vailable **T**echnique, **N**ot entailing **E**xcessive **E**conomical **C**osts).

Voor een uitgebreide beschrijving van de scenario's alsook bijbehorende effecten op abiotisch vlak, wordt verwezen naar bovenvermeld rapport. Tabel 1 geeft een overzicht van de belangrijkste scenario's die onderzocht werden.

Tabel 1 – Overzicht stortscenario's

SCENARIO	EB		VLOED		Stortperiode
	HW – HW+3u	HW+3u – LW	LW – LW+3u	LW+3u - HW	
S421: Huidig	Oosterweel		Punt van Melsele		25/09 – 23/10
S422: Dichtbij	Schaar van Ouden Doel		Ketelputten		25/09 – 14/10
S423: Afwaarts I	Schaar van Ouden Doel		Schaar van Ouden Doel		25/09 – 15/10
S424: Afwaarts II	Appelzak		Appelzak		25/09 – 24/10
S428: Huidig+dichtbij opwaarts	Oosterweel		Ketelputten	Punt van Melsele	25/09 – 23/10
S429: Huidig+dichtbij afwaarts	Schaar van Ouden Doel	Oosterweel	Punt van Melsele		25/09 – 18/10
S434: Huidig+dichtbij opwaarts+afwaarts	Schaar van Ouden Doel	Oosterweel	Ketelputten	Punt van Melsele	25/09 – 18/10

Bij de onderzochte scenario's kan een onderscheid gemaakt worden in twee fasen: in een eerste fase werden een aantal extreme scenario's onderzocht, waarbij het sediment teruggestort werd op telkens 1 of 2 locaties in het estuarium. Deze nieuw voorgesteld stortlocaties liggen dichterbij de huidige baggerlocaties, en liggen tevens meer afwaarts van de huidige stortlocaties (met het oog op een reductie van het risico op een eventuele regime shift). Doordat een aantal van de stortlocaties aanzienlijk dichterbij de baggerlocaties liggen, is de verwachting dat het sediment sneller terug op de baggerlocaties zal komen (snellere retourstroming). In de 2^{de} fase werden scenario's gedefinieerd waarbij de stortingen gespreid werden over meerdere locaties, en waarbij een deel (> 50%) van de specie op de huidige stortlocaties werd teruggestort.

Binnen voorliggend rapport zal nagegaan worden in welke mate de verschillende scenario's een effect hebben op enerzijds de sedimentatie ter hoogte van de baggerlocaties en anderzijds de ophogingssnelheid van de intergetijdengebieden in het studiegebied.

3 SEDIMENTATIE TER HOOGTE VAN BAGGERLOCATIES

In dit hoofdstuk wordt op basis van de wijziging in sedimentconcentratie ter hoogte van de belangrijkste baggerlocaties een inschatting gemaakt van de te verwachten wijzigingen in onderhoudsbaggervolumes. Er dient opgemerkt te worden dat deze methodiek slechts een **eerste inschatting** zal geven, en dat in de realiteit verschillende factoren een invloed zullen hebben op de daadwerkelijke wijzigingen.

3.1 Sedimentatie op drempels en toegangseulen tot sluizen

3.1.1 Methodologie

Op basis van de wijziging in sedimentconcentratie ter hoogte van de baggerlocaties wordt per stortscenario een inschatting gemaakt van de wijziging in sedimentatie ten opzichte van het huidige stortscenario. Deze aanname is gebaseerd op de (ook in numerieke modellen) gebruikte formule voor afzetting van cohesief sediment (Krone, 1962):

$$D = w_s \cdot c_b \cdot \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cb}}\right)$$

Met D : afzettingssnelheid [kg/m²/s]

w_s : valsnelheid [m/s]

c_b : sediment concentratie nabij bodem [kg/m³]

τ_b : bodem schuifspanning [Pa]

τ_{cb} : kritische bodemschuifspanning voor afzetting [Pa]

Uit deze formule blijkt dat de afzettingssnelheid evenredig is met de sedimentconcentratie (nabij de bodem). Bij hogere sedimentconcentratie, zal er dus meer sediment kunnen afzetten. Aangezien de erosiesnelheid evenredig is met de bodemschuifspanning (die op zijn beurt gerelateerd is aan het profiel van de stroomsnelheid), die niet significant zal wijzigen, zal de erosiesnelheid niet significant wijzigen.

Hiertoe wordt de verhouding berekend tussen de gemiddelde sedimentconcentratie over de volledige simulatieperiode, ter hoogte van een baggerlocatie voor een bepaald scenario en deze voor het huidige stortscenario. Deze verhouding wordt procentueel uitgedrukt per baggerlocatie en per scenario. Hiermee wordt aangegeven of een bepaald scenario leidt tot een verhoging of verlaging van de baggerhoeveelheden op een bepaalde baggerlocatie.

Per scenario wordt eveneens gekeken naar de wijziging van de totale baggerhoeveelheid over de verschillende baggerlocaties. Hiertoe wordt de relatieve wijziging van de sedimentconcentratie voor een locatie vermenigvuldigd met de totale baggerhoeveelheid over de periode 2012-2013² voor die locatie. Hiermee wordt een "gewicht" toegekend per baggerlocatie. Deze totalen worden opgeteld en procentueel uitgedrukt ten opzichte van de totale baggerhoeveelheid over de verschillende baggerlocaties over de periode 2012-2013.

² De periode 2012-2013 wordt binnen deze studie beschouwd als representatief voor de nabije toekomst. Uit de recente gegevens voor het jaar 2014, blijkt deze aanname geldig te zijn voor 2014.

De beschouwde baggerlocaties zijn (Figuur 1):

- Drempel van Zandvliet
- Toegangsgeul Zandvliet/Berendrechtsluis (ZBS)
- Drempel van Frederik
- Drempel van Lillo
- Toegangsgeul Boudewijn/Van Cauwelaertsluis (BVC)
- Toegangsgeul Kallosluis

Het Deurganckdok wordt in een aparte paragraaf (§ 0) behandeld, aangezien hiervoor een empirisch model werd opgesteld om de sedimentatie in het dok te kunnen inschatten.

Er dient opgemerkt te worden dat een verhoging in onderhoudsbaggervolumes automatisch aanleiding geeft tot grotere stortvolumes. In de scenario berekeningen werd echter steeds uitgegaan van eenzelfde totale onderhoudshoeveelheid. Wanneer een bepaald scenario aanleiding geeft tot een verhoging in onderhoudsvolume, zal de terugstorthoeveelheid eveneens toenemen, waardoor het onderhoudsvolume nog verder zal toenemen. Uit verkennende berekeningen is gebleken dat een grotere onderhoudshoeveelheid een relatief beperkt effect heeft op de extra toename in sedimentconcentratie en alsook verdere toename van onderhoudsvolumes (enkele %). De gepresenteerde verschillen in onderhoudsbaggervolumes dienen dan ook als een eerste indicatie beschouwd te worden.



Figuur 1 – Overzicht huidige bagger- (groen) en stortzones (oranje) in de Beneden-Zeeschelde

3.1.2 Resultaten

Tabel 2 geeft de procentuele wijziging in sedimentatiehoeveelheid ter hoogte van de verschillende baggerlocaties voor de verschillende stortscenario's ten opzichte van het huidige stortscenario. Hieruit blijkt dat, zoals te verwachten, een verplaatsing van de stortlocaties naar afwaarts, zoals in scenario's afwaarts I (S423) en afwaarts II (S424) leidt tot een verhoging van de sedimentatie in de meest afwaartse baggerlocaties. De stortlocaties zijn echter vlakbij deze baggerlocaties gelegen waardoor de vaartijd sterk beperkt wordt. In de meest opwaartse baggerlocaties daalt de sedimentatie ten opzichte van het huidige stortscenario. Op deze locaties zal dus minder moeten gebaggerd worden, doch is de vaartijd langer dan in het huidige scenario.

De scenario's met meerdere stortlocaties en bijgevolg een grotere spreiding van de stortlocaties lijken een kleiner en meer gespreid effect te hebben op de sedimentatie ter hoogte van de baggerlocaties. In scenario huidig+dichtbij opwaarts (S428) is het effect ter hoogte van alle baggerlocaties zeer beperkt. Omwille van de opwaartse ligging van de stortlocaties is de vermindering in vaartijd beperkt ten opzichte het huidige scenario. In scenario huidig+dichtbij afwaarts (S429) wordt aan het huidige scenario één stortlocatie toegevoegd die meer naar afwaarts gelegen is (Schaar van Ouden Doel), hierdoor wordt de vaartijd tijdens de eerste 3 uur van eb sterk beperkt. Deze stortlocatie is echter vlakbij de drempel van Zandvliet gelegen en de toegangsgeul van de Zandvliet/Berendrechtsluis. Dit leidt tot een hogere sedimentatie op deze afwaartse baggerlocaties. Op de andere baggerlocaties is echter een beperkte daling van de sedimentatiehoeveelheid te zien, ten opzichte van het huidige stortscenario. In het scenario huidig+dichtbij opwaarts+afwaarts (S434) worden vorige scenario's gecombineerd en wordt zowel opwaarts (bij vloed) als afwaarts (bij eb) een baggerlocatie toegevoegd. Hierdoor is de wijziging van de sedimentatie ter hoogte van afwaartse baggerlocaties kleiner. De vermindering van sedimentatie ter hoogte van de opwaartse baggerscenario's is kleiner dan in het scenario huidig+dichtbij afwaarts (S429). Anderzijds is de vaartijd van Ketelputten naar de opwaartse baggerlocaties kleiner, dan van Punt van Melsele, waardoor de bagger- en stortperiode korter wordt.

Vergeleken met de baggerhoeveelheden per drempel voor de periode 2012-2013 voor het huidige stortscenario, zou er in scenario 'huidig+dichtbij afwaarts' (S429) en 'huidig+dichtbij opwaarts+afwaarts' (S434) in totaal, gesommeerd over de verschillende baggerlocaties, quasi geen extra baggerwerk zijn.

Tabel 2 – Wijziging in sedimentatiehoeveelheid (in %) ter hoogte van baggerlocaties voor de verschillende scenario's ten opzichte van het huidige stortscenario

Wijziging sedimentatie in % t.o.v. S421	S422	S423	S424	S428	S429	S434
Zandvliet	+17	+29	+29	+1	+10	+6
Toegang ZBS	+11	+23	+9	+1	+4	+3
Frederik	+8	+14	+4	+1	0	0
Lillo	+5	+6	-2	+1	-3	-1
Toegang BVC	-2	-6	-11	+3	-6	-2
Toegang Kallo	-4	-13	-15	+4	-6	0

3.2 Sedimentatie in Deurganckdok

3.2.1 Methodologie

In 2014 werd door IMDC in samenwerking met Deltares een studie uitgevoerd naar de externe effecten op sedimentatie in het Deurganckdok (IMDC, 2014). Hiertoe werd een sedimentatiemodel toegepast voor de periode 2006 – 2012. Het doel was zoveel mogelijk inzicht te krijgen van het effect van de nieuwgebouwde 'Current Deflecting Wall' (CDW) op de stromingspatronen en op de sedimentatie op lange termijn.

Het conceptueel sedimentatiemodel, gebaseerd op data-assimilatie, werd toegepast om de sedimentinstroom en –afzetting in het dok te begroten, ten gevolge van de drie voornaamste wateruitwisselingsmechanismen aan de ingang van het dok: getijdenvulling, dichtheitsstromen en eddiestromen. De sedimentatie in het dok wordt berekend als de som van de netto sedimentfluxen voor elk uitwisselingsmechanisme.

$$F_{\text{totaal}} = F_{\text{getij}} + F_{\text{dichtheid}} + F_{\text{eddie}}$$

De nettoflux ten gevolge van *getijdenvulling* wordt gedefinieerd als:

$$F_{\text{getij}} = \alpha_{\text{sed,getij}} \cdot (h(t) \cdot A_h) \cdot c(t)$$

Met $\alpha_{\text{sed,getij}}$ = fractie van de instroom die sedimenteert in het dok
 $h(t)$ = getijamplitude
 A_h = horizontale oppervlakte dok
 $c(t)$ = getijdegemiddelde sedimentconcentratie

Dichtheitsstromen ontstaan ten gevolge van een initieel horizontaal verschil in dichtheid, ten gevolge van een verschil in saliniteit. De nettoflux ten gevolge van dichtheitsstroming in het dok wordt gedefinieerd als:

$$F_{\text{dens}} = \alpha_{\text{sed,dens}} \cdot \left(\frac{A_{cs}}{2} \cdot (0,5 \sqrt{\varepsilon(t) g H_{\text{dok}}}) \cdot T_{\text{dens}} \right) \cdot c(t)$$

Met $\alpha_{\text{sed,dens}}$ = fractie van instroom die sedimenteert in het dok
 A_{cs} = oppervlakte dwarsdoorsnede dok
 $\varepsilon(t) = \frac{\Delta\rho}{\rho} =$ relatief dichtheitsverschil (berekend als saliniteitsverschil)
 $= \frac{\text{sal}_{\text{dok}} - \text{sal}_{\text{Schelde}}}{\text{sal}_{\text{Schelde}}}$
 g = graviteitsconstante
 H_{dok} = diepte dok
 T_{dens} = gemeten duur van de dichtheitsstromen

De *eddiestromen* resulteren in instromend water in het dok via de zuidelijke helft van de ingang en uitstromend water via de noordelijke helft. Dit proces verloopt omgekeerd tijdens de eb.

De nettoflux ten gevolge van de eddiestromen in het dok wordt gedefinieerd als:

$$F_{\text{eddie}} = \alpha_{\text{sed,eddie}} \cdot \left(\frac{A_{cs}}{2} \bar{v}_{\text{eddie}} \frac{h(t)}{h} T_{\text{eddie}} \right) \cdot c(t)$$

Met	$\alpha_{sed,eddie}$	= fractie van instroom die sedimenteert in het dok
	\bar{v}_{eddie}	= gemeten gemiddelde eddiesnelheid
	\bar{h} en $h(t)$	= resp. gemiddelde en dagelijkse getijamplitude
	T_{eddie}	= gemeten duur van de eddiestromen

Uit bovenstaande vergelijkingen blijkt dat de instroom van sediment in het dok lineair evenredig is met de concentratie van het sediment in het instromend water $c(t)$. Hierdoor kan de wijziging van de sedimentconcentratie ter hoogte van het Deurganckdok beschouwd worden als indicator voor het effect van de gewijzigde stortscenario's op de sedimentatie in het dok.

3.2.2 Resultaten

Analoog aan de resultaten in §3.1.2, wordt in Tabel 3 wordt de procentuele verhouding van de sedimentconcentratie ter hoogte van Deurganckdok, voor de verschillende scenario's ten opzichte van het huidige scenario gegeven.

Tabel 3 – Wijziging in sedimentatiehoeveelheid (in %) in Deurganckdok voor de verschillende scenario's ten opzichte van het huidige stortscenario

Wijziging sedimentatie in %	S422	S423	S424	S428	S429	S434
Deurganckdok	+5	+6	-2	+1	-3	-1

In scenario's 'dichtbij' (S422) en 'afwaarts I' (S423) wordt gestort ter hoogte van Ketelputten en Schaar van Ouden Doel. Deze stortlocaties zijn dichterbij Deurganckdok gelegen ten opzichte van de huidige stortlocaties. Hierdoor is de sedimentconcentratie ter hoogte van het dok hoger ten opzichte van het huidige scenario en is bijgevolg de te verwachten sedimentatie in het dok hoger.

Wanneer gestort wordt ter hoogte van Appelzak, in scenario 'afwaarts II' (S424) daalt de sedimentatiehoeveelheid in het Deurganckdok met circa 2%. In het kader van het onderzoek van V&T [IMDC *et al.*, 2013] werd een hogere afname (-15%) van de sedimentatie in het Deurganckdok berekend. Dit verschil is te wijten aan een andere modelaanpak: op de korte tijdschaal is afwaarts storten minder gunstig in het in de huidige studie gebruikte model (2D, erosie-gelimiteerd), terwijl op de lange tijdschaal (3D, aanbod-gelimiteerde model binnen V&T studie) het effect van de stortpluim uitgewerkt is en de retourstroom kleiner is.

In het scenario 'huidig+dichtbij opwaarts' (S428) wordt bijkomend gestort ter hoogte van Ketelputten. Het effect op de sedimentatiehoeveelheid in het dok is echter beperkt.

In het scenario 'huidig+dichtbij afwaarts' (S429) wordt bijkomend gestort ter hoogte van Schaar van Ouden Doel. Deze storting vindt echter plaats tijdens de eerste 3 uren van de eb fase. Hierdoor wordt het sediment afwaarts verplaatst. Door de stortingen ter hoogte van Schaar van Ouden Doel wordt minder gestort opwaarts van het dok. Dit leidt tot een afname in sedimentatiehoeveelheid ten opzichte van het huidige scenario.

In het scenario 'huidig+dichtbij opwaarts+afwaarts' (S434) wordt de daling tengevolge van de stortingen ter hoogte van Schaar van Ouden Doel deels teniet gedaan door de stijging tengevolge van stortingen ter hoogte van Ketelputten. Er blijft echter een beperkte afname van de sedimentatiehoeveelheid ten opzichte van het huidige scenario.

3.3 Sedimentatie ter hoogte van alle baggerlocaties

Met behulp van de relatieve wijzigingen per baggerlocatie en het relatieve belang (i.e. relatieve aandeel van één baggerlocatie in de totale baggerhoeveelheid wordt gebruikt als gewichtsfactor) van deze baggerlocatie in het totale onderhoudsvolume (periode 2012-2013), wordt in Tabel 4 een indicatie gegeven van de te verwachten verandering in totale onderhoudsvolumes voor de verschillende scenario's. Voor de (extreme) scenario's (S422-S423-S424), waarbij de totale hoeveelheid op (een) andere locatie(s) dan de huidige locaties wordt gestort, wordt er een toename (5-10%) verwacht van de onderhoudsbaggerwerken wanneer in de nabijheid van de baggerlocaties wordt gestort. Bij het meer afwaarts storten in de Appelzak (S424), blijft het effect zeer beperkt.

Wanneer de huidige stortlocaties in combinatie met nieuwe locaties worden gebruikt - scenario 'huidig + dichtbij opwaarts' (S428), 'huidig + dichtbij afwaarts' (S429) en 'huidig + dichtbij opwaarts + dichtbij afwaarts' (S434) – zal er gemiddeld over de verschillende baggerlocaties quasi geen extra onderhoud zijn (verschil kleiner dan 1%). Deze variatie is kleiner dan de natuurlijke (cfr. rol bovenafvoer op sedimentconcentratie) variatie die teruggevonden wordt in de jaarlijks baggerhoeveelheden.

Tabel 4 – Wijziging in totale baggerhoeveelheid (in %) voor de verschillende baggerlocaties ten opzichte van het huidige stortscenario voor de periode 2012-2013

Wijziging totale baggerhoeveelheid in %	S422	S423	S424	S428	S429	S434
	6	10	1	1	-1	0

4 SEDIMENTATIE OP SLIKKEN EN SCHORREN

4.1 Empirisch ophogingsmodel

Het empirisch ophogingsmodel door Vandenbruwaene et al. (2011) is gebaseerd op een empirische relatie tussen de ophogingssnelheid en de gemiddelde waterdiepte (Figuur 2). Deze empirische relatie kan omschreven worden als:

$$\Delta E = ah^b \quad (1)$$

Met: ΔE = de ophogingssnelheid [m/jaar]

h = de gemiddelde waterdiepte [m]

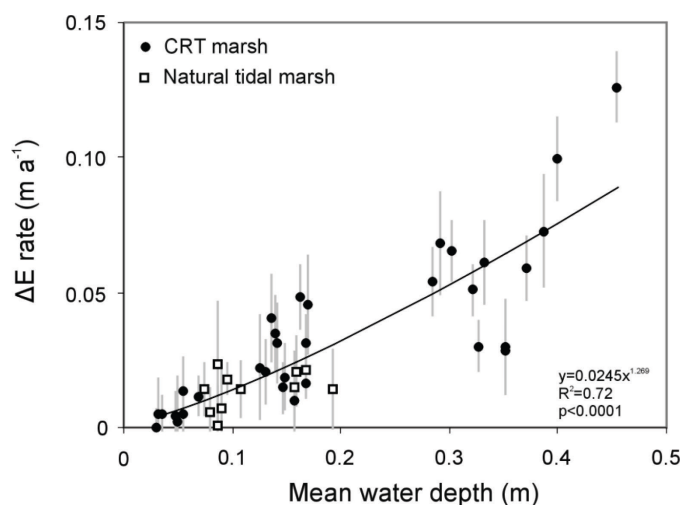
De gemiddelde waterdiepte wordt hierbij gedefinieerd als:

$$h = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \max((H_j - z_j), 0) \quad (2)$$

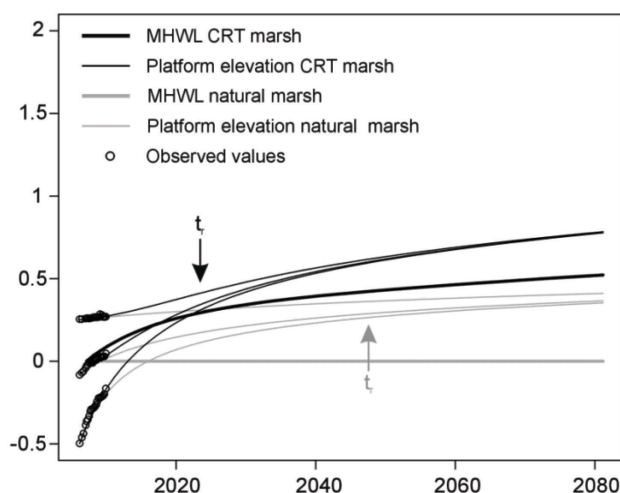
Met: k = het aantal getijcycli gedurende de beschouwde tijdsperiode

H_j = het hoogwaterpeil voor getij j

z_j = de platformhoogteligging voor getij j (als $H_j < z_j$ dan is er geen overspoeling van het platform)



Figuur 2 – Empirische relatie tussen de ophogingssnelheid (ΔE) en de gemiddelde waterdiepte gebruikt in het ophogingsmodel van Vandenbruwaene et al. (2011)



Figuur 3 – Asymptotisch verloop van de platformophoging in een natuurlijk schor (grijze lijnen) en een GGG Lippenbroek (zwarte lijnen) (Vandenbruwaene et al., 2011)

De relatie in Figuur 2 impliceert dat een stijging in platformhoogte ten opzichte van hoogwater zal leiden tot een afname van de gemiddelde waterdiepte in de tijd, wat op zijn beurt resulteert in een afname van de ophogingssnelheden. Bijgevolg zal de platformophoging zich in de tijd asymptotisch gedragen (Figuur 3) waarbij een evenwichtssituatie wordt bereikt indien de platformophoging min of meer gelijk is aan de stijging in gemiddeld hoogwater (GHW).

4.2 Kalibratie van het empirisch ophogingsmodel voor Hedwige- en Prosperpolder

Het oorspronkelijke ophogingsmodel werd in [Vandenbruwaene *et al.*, 2015] verder geoptimaliseerd om de ophoging in intergetijdengebieden te kunnen voorspellen. Deze optimalisatie was noodzakelijk omdat (1) de SPM concentratie ter hoogte van andere intergetijdengebieden verschillend is van de SPM concentratie ter hoogte van Lippenbroek en (2) andere intergetijdengebieden gekarakteriseerd worden door andere gemiddelde waterdieptes in vergelijking met een gereduceerd getijgebied zoals het Lippenbroek. Daarnaast dient het ophogingsmodel rekening te kunnen houden met een verschil in platformophoging bij een begroeid versus een niet-begroeid platform.

De optimalisatie van het ophogingsmodel werd uitgevoerd op basis van een beschikbare dataset van het Verdrongen Land van Saeftinghe. Hierbij werd de periode 1931-1963 geselecteerd omdat (1) er in die tijdsperiode nog voldoende slik aanwezig was om de platformophoging van een slik te evalueren en (2) de beschouwde tijdsperiode voldoende lang is (~30 jaar) om te kalibreren op een gemeten platformophoging op lange termijn. Voor een uitgebreide beschrijving van deze optimalisatie wordt verwezen naar [Vandenbruwaene *et al.*, 2015].

Het finale ophogingsmodel is van de vorm $\Delta E = C_{SPM} \cdot C_j \cdot a \cdot h$

Met:

ΔE = de ophogingssnelheid [m/jaar]

h = de gemiddelde waterdiepte [m]

a = de lineaire empirische relatie voor de ophoging van Saeftinghe over 32 jaar [1/jaar]

C_j = de kalibratiefactor om a in een ophogingsmodel met tijdstap 1 jaar te gebruiken [-]

C_{SPM} = correctie voor het verschil in SPM tussen Saeftinghe en locatie X [-]

De finale waarden resulterend uit de kalibratie worden weergegeven in onderstaande tabel:

Tabel 5 - Parameterwaarden voor het ophogingsmodel

Parameter [eenheid]	Waarde
a [1/jaar]	1,13 (begroeid)
	0,42 (niet begroeid)
C _j [-]	1,36 (begroeid)
	0,94 (niet begroeid)

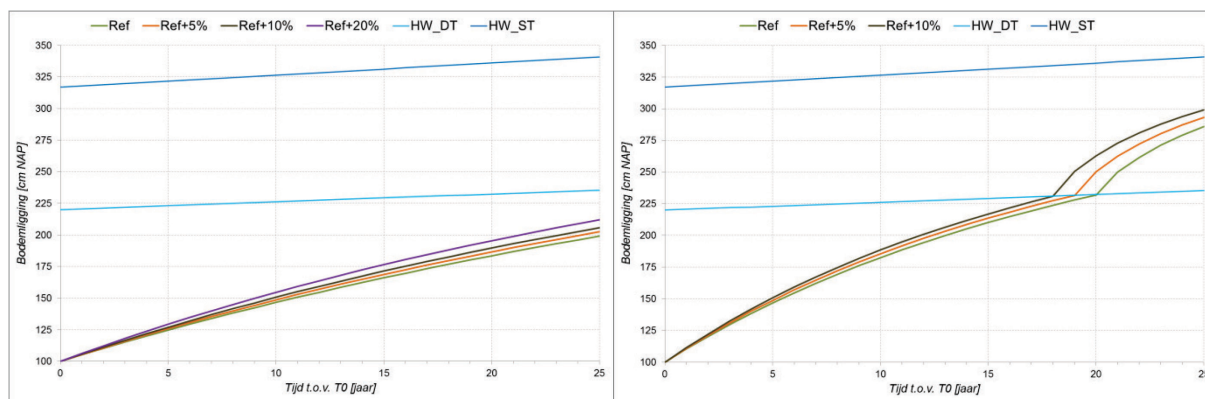
4.3 Toepassing van het model voor verschillende stortscenario's

Het geoptimaliseerde ophogingsmodel uit [Vandenbruwaene *et al.*, 2015] wordt binnen voorliggende studie toegepast om een indicatie te geven van de mogelijke verschillende in de ophogingssnelheid van intergetijdgebieden ("gevoeligheidsanalyse"). Aangezien het model tot op heden niet gevalideerd werd voor enerzijds korte tijdschalen (< 20 jaar) en anderzijds voor klassieke slikken en schorren langs het estuarium, dienen deze resultaten met de nodige omzichtigheid te worden gebruikt. Binnen deze studie is ervoor geopteerd om de gevoeligheidsanalyse uit te voeren voor een aantal hypothetische situaties, zonder expliciete link naar reële slikken en schorren langs de Zeeschelde, en dit omwille van de beperkingen van het model, alsook de grote natuurlijke variatie in bepalende parameters (met name hoogteligging en SPM) van het model.

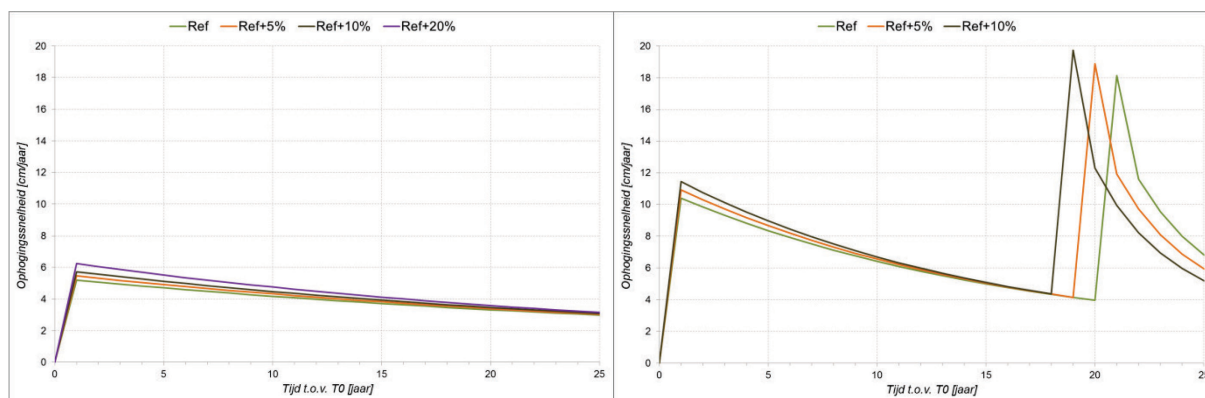
4.3.1 CASE 1 – middelhoog slik

Een eerste case gaat uit van een initiële hoogteligging van +100 cm NAP (dit stemt overeen met +335 cm TAW) en een SPM concentratie van resp. 100 mg/l ($C_{SPM} = 2,38$) en 200 mg/l ($C_{SPM} = 4,76$). Deze waarden zijn representatief voor de sedimentconcentratie nabij het wateroppervlak in de Beneden-Zeeschelde, waarbij de waarde van 100 mg/l voorkomt in het afwaartse deel en 200 mg/l voorkomt in het opwaartse deel van de Beneden-Zeeschelde (afgeleid uit OMES-data).

Uit de scenarioberekeningen [Coen *et al.*, 2015] is gebleken dat een verandering in stortstrategie, gebaseerd op de huidige stortstrategie, aanleiding geeft tot relatieve verandering in SPM concentratie tussen +5% en +10%, met lokaal uitschieters tot +20%. Deze veranderingen werden in het ophogingsmodel aangebracht en de resultaten worden getoond in Figuur 4 en Figuur 5.



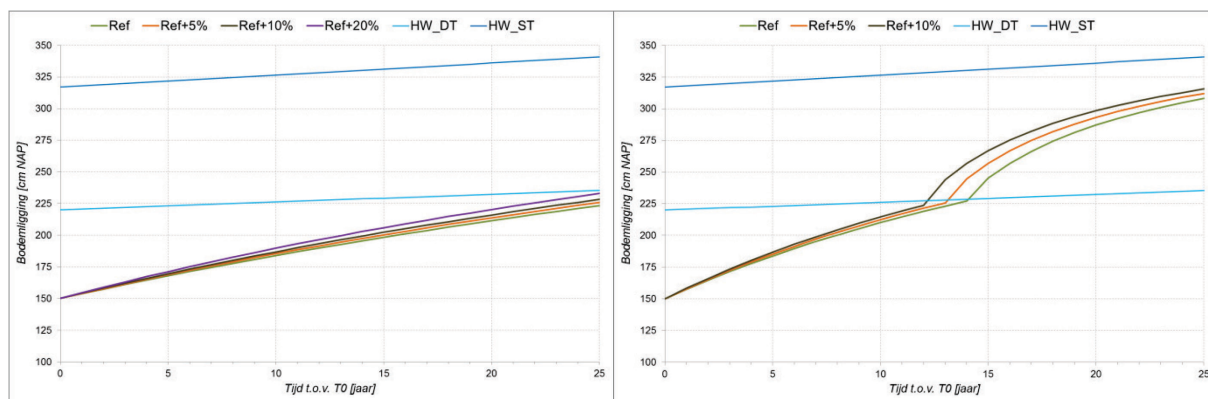
Figuur 4 – Verloop van de bodemligging voor verschillende stortscenario's bij $SPM_{ref} = 100 \text{ mg/l}$ (links) en $SPM_{ref} = 200 \text{ mg/l}$ (rechts)



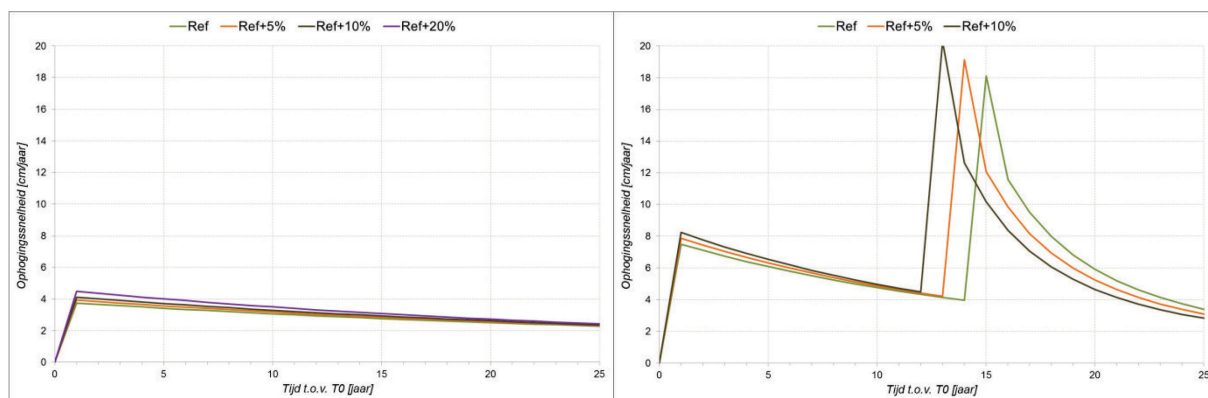
Figuur 5 – Verloop van de ophogingssnelheid voor verschillende stortscenario's bij $SPM_{ref} = 100 \text{ mg/l}$ (links) en $SPM_{ref} = 200 \text{ mg/l}$ (rechts)

4.3.2 CASE 2 – hoog slik

Een tweede case gaat uit van een initiële hoogteligging van +150 cm NAP (dit stemt overeen met +385 cm TAW) en een SPM concentratie van resp. 100 mg/l en 200 mg/l. Uit de scenarioberekeningen [Coen et al., 2015] is gebleken dat een verandering in stortstrategie, gebaseerd op de huidige stortstrategie, aanleiding geeft tot relatieve verandering in SPM concentratie tussen +5% en +10%, met lokaal uitschieters tot +20%. Deze veranderingen werden in het ophogingsmodel aangebracht en de resultaten worden getoond in Figuur 6 en Figuur 7.



Figuur 6 – Verloop van de bodemligging voor verschillende stortscenario's bij SPM_ref = 100 mg/l (links) en SPM_ref = 200 mg/l (rechts)



Figuur 7 – Verloop van de ophogingssnelheid voor verschillende stortscenario's bij SPM_ref = 100 mg/l (links) en SPM_ref = 200 mg/l (rechts)

4.3.3 Conclusies

Een verhoging in SPM-concentratie zal leiden tot een verschil in ophogingssnelheid ter hoogte van de intergetijdengebieden. Bij een referentie SPM-concentratie van 100 mg/l zal een toename in SPM concentratie van 10% resulteren in toename in ophogingssnelheid van 0,3 à 0,4 cm/jaar (gemiddeld over periode van 10 jaar) en 0,2 à 0,3 cm/jaar (gemiddeld over periode van 20 jaar). Bij een referentie SPM-concentratie van 200 mg/l zal een toename in SPM concentratie van 10% resulteren in toename in ophogingssnelheid van 0,5 à 0,6 cm/jaar (gemiddeld over periode van 10 jaar) en 0,6 à 1,5 cm/jaar (gemiddeld over periode van 20 jaar). Deze laatste toename is sterker omwille van het feit van het slik 1 à 2 jaar sneller begroeid zou kunnen worden, waardoor de ophogingssnelheid opnieuw groter wordt. Voor niet-begroeide intergetijdengebieden blijkt de relatieve toename in ophogingssnelheid (5-10%) in dezelfde grootte-orde van de relatieve toename in SPM concentratie (10%).

5 CONCLUSIES

Wijziging van de stortstrategie zorgt voor een wijziging van de sedimentconcentratie in de waterkolom ter hoogte van de baggerlocaties, de drempels, de toegangsheuvelen tot de sluizen en het Deurganckdok, evenals ter hoogte van slikken en schorren.

Aangezien de gebruikte numerieke modellen minder geschikt zijn om een inschatting te maken van de te verwachten wijzigingen, is ervoor geopteerd gebruik te maken van een aantal empirische modellen om dit effect in te schatten.

Het effect op de sedimentatie ter hoogte van de drempels en toegangsheuvelen wordt berekend op basis van de procentuele wijziging van de sedimentconcentratie in de waterkolom ten opzichte van het huidige stortscenario. Deze aanname is gebaseerd op de klassieke formulering voor afzettingssnelheid van cohesief sediment. Ook voor Deurganckdok kan een vergelijkbare berekeningswijze toegepast worden, gebaseerd op een conceptueel ophogingsmodel van IMDC, aangezien de instroom van sediment in het dok lineair evenredig is met de concentratie van het sediment in het instromend water. Hieruit blijkt dat het verplaatsen van de stortscenario's naar locaties dichterbij de beschouwde baggerlocaties leidt tot een verhoging van de sedimentatie ter hoogte van deze locaties, en alzo een verhoogde baggerinspanning. Een spreiding van de stortlocaties, waarbij een belangrijk deel ter hoogte van de huidige stortlocaties wordt gestort, zorgt voor aanzienlijk kleinere relatieve wijzigingen.

Het wijzigen van de stortstrategie zal leiden tot een wijziging in sedimentconcentratie in het studiegebied. Afhankelijk van de stortstrategie, zal er in bepaalde zones een afname in sedimentconcentratie optreden, terwijl in andere zones een toename zal plaatsvinden. Voor de scenario's gebaseerd op de huidige stortstrategie, blijkt dat relatieve wijzigingen in sedimentconcentratie kunnen optreden tot 10 à 20%. Deze grootte is afhankelijk van het percentage sediment dat op een andere stortzone wordt teruggestort in vergelijking met het referentiescenario. Op basis van het gebruikte empirische ophogingsmodel, zal bij een relatieve verhoging van de sedimentconcentratie, er een toename in ophogingssnelheid kunnen optreden van ca. 0,2 à 0,6 cm/jaar, afhankelijk van de hoogteligging en de referentieconcentratie.

6 REFERENTIES

Coen, L.; De Maerschallck, B.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016). Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde: Deelrapport 3 – Slibscenario's. Versie 4.0. WL Rapporten, 14_025. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België

IMDC (2011) Ontwikkelingszone Saefthinge – Hydraulisch, sedimentologisch en morfologisch onderzoek. Deelrapport 6: Calibratie Sediment Saefthingedokmodel. International Marine & Dredging Consultants ism. Deltares, iov. Gemeentelijk Havenbedrijf Antwerpen.

IMDC (2013). LTV-Veiligheid en Toegankelijkheid. Instandhouding vaarpassen Schelde Milieuvergunningen terugstorten baggerspecie. Basisrapport specifieke beheersvragen B23: Analyse stortvakken Beneden-Zeeschelde. International Marine & Dredging Consultants ism. Deltares, Svašek Hydraulics en ARCADIS Nederland iov. Afdeling Maritieme Toegang: Antwerpen

IMDC (2014). Evaluation of the external effect on the siltation in Deurganckdok. Report 1.8: Analysis of external effects on siltation processes and factors. 16 January 2014 – version 3.0. International Marine & Dredging Consultants ism. Deltares iov. Vlaamse Overheid – Departement Mobiliteit en Openbare Werken – Afdeling Maritieme Toegang. Antwerpen; België.

Krone, R. B., "Flume Studies of the Transport of Sediment in Estuarine Shoaling Processes. Final Report to San Francisco District U. S. Army Corps of Engineers, Washington D.C." (1962).

Vandenbruwaene, W.; Maris, T.; Cox, T.J.S.; Cahoon, D.R.; Meire, P.; Temmerman, S. (2011). Sedimentation and response to sea-level rise of a restored marsh with reduced tidal exchange: Comparison with a natural tidal marsh. *Geomorphology* 130(3-4): 115-126

Vandenbruwaene, W.; Vanlede, J.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2015). Inrichtingsplan Hedwige-Prosperpolder: Deelrapport 3 – Empirisch ophogingsmodel. Versie 6.0. WL Rapporten, 13_166. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.

Vos, G.; Bastiaensen, E.; De Bruyn, L.; De Schutter, J.; Plancke, Y.; Mostaert, F. (2011). Lithologische kaart Beneden-Zeeschelde: Resultaten korrelanalyse sedimentstalen. Versie 2_0. WL Rapporten, 736_56. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België

Vos, G. ; Meire, D.; Plancke Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016). Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde: Deelrapport 4 – Zandsenario's. Versie 4.0. WL Rapporten, 14_025. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.

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