

21\_106\_1 WL rapporten

## Evaluatiemethodiek Sedimenttransportcapaciteit

Deelrapport 1 – Methodiek

DEPARTEMENT MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

# Evaluatiemethodiek Sedimenttransportcapaciteit

Deelrapport 1 – Methodiek

Stark, J.; De Maerschalck, B.; Plancke, Y.; Meire, D.



Cover figuur © Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium

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 2022 D/2022/3241/136

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

**Stark, J.; De Maerschalck, B.; Plancke, Y.; Meire, D.** (2022). Evaluatiemethodiek Sedimenttransportcapaciteit: Deelrapport 1 – Methodiek. Versie 3.0. WL Rapporten, 21\_106\_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

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

#### Documentidentificatie

Opdrachtgever:	VNSC – PG Evaluatie & Rappor	tage	Ref.:	WL2022R21_106_1	
Trefwoorden (3-5):	Schelde, Sedimenttransport, Numerieke modellering				
Kennisdomeinen:	Hydraulica en sediment > Sediment > Sedimenttransport > Numerieke modellering				
Tekst (p.):	28 Bijlagen (p.): 15				
Vertrouwelijk:	⊠ Nee ⊠ Online beschikbaar				

Auteur(s): Stark, J.	Auteur(s):	Stark, J.

Controle

	Naam	Handtekening	
Revisor(en):	Meire, D.; Plancke, Y.	Getekend door:Dieter Meire (Signature) Getekend op:2022-09-19 14:54:05 +02:0 Reden:lk keur dit document goed Dierex Heise	Getekend op:2022.09-14 07:4652 +02:0 Reden:Ik keur dit document goed
Projectleider:	De Maerschalck, B.	Getekend door:Bart De Mærschalck (Sig Getekend op:2022-09-05 11:28:20 +02:0 Reden:Ik keur dit document goed Bart De Haensclauce	

Goedkeuring

Afdelingshoofd: Bellafkih, K.	Getekend door:Abdelkarim Bellafkih (Sign Getekend op:2022-09-05 12:14:46 +02:0 Reden:Ik keur dit document goed Abreennin Bernafrik
-------------------------------	---



## Abstract

In het kader van de *Evaluatiemethodiek Schelde-estuarium* is een methodiek voor het bepalen van de sedimenttransportcapaciteit in het Schelde-estuarium op basis van modelberekeningen voorgesteld. Er is aandacht besteed aan de modelkeuze en de methodiek voor het genereren van relevante modeluitvoer. Een vergelijking tussen het NeVla model in Delft3D en het Scaldis model in Telemac-3D toont aan dat het Scaldis model het meest geschikt is voor het berekenen van de sedimenttransportcapaciteit in het gehele estuarium: in de Westerschelde zijn de resultaten vergelijkbaar. In de Zeeschelde kent Scaldis een hogere resolutie en representatie van de Boven-Zeeschelde en haar zijrivieren. De modeluitvoer die kan worden opgeleverd bestaat uit gebiedsdekkende kaarten van de bruto- en netto transportcapaciteit, berekend op basis van één getij. Ook worden de bruto- en netto transportcapaciteit, alsmede de getijdebieten, berekend door raaien langs het estuarium, nu over een volledige springtij-doodtij cyclus.

Vervolgens is de voorgestelde methodiek toegepast voor modelsimulaties voor de jaren 2011, 2013, 2016 en 2019. De modelresultaten geven o.a. een indicatie van de zones in het estuarium waar de transportcapaciteit het hoogst of het laagst is. Daarnaast kan op basis van de modelresultaten aangeduid worden in welke zones het netto transport opwaarts of juist afwaarts is gericht. Vergelijkingen tussen de modelsimulaties van verschillende jaren kunnen worden gebruikt om de vaak subtiele veranderingen of trends te analyseren.

# Inhoudstafel

Abst	ract			. 111
Inho	udst	afel		IV
Lijst	van o	de ta	bellen	VI
Lijst	van o	de fig	guren	VII
1	Inlei	ding		. 1
1.	1	Situ	ering	. 1
1.	2	Doe	lstelling	. 2
1.	3	Lees	swijzer	. 2
2	Вера	aling	methodiek	. 3
2.	1	Sedi	imenttransportcapaciteit	. 3
2.	2	Para	ametrisatie sedimenttransportcapaciteit	. 3
2.	3	Mod	delkeuze	. 9
	2.3.2	1	Vergelijking modellen	10
3	Mod	lelbe	schrijving	12
3.	1	Mod	deldomein en rekenrooster	12
3.	2	Mod	delinstellingen	14
3.	3	Bath	nymetrie	15
3.	4	Ran	dvoorwaarden	16
	3.4.2	1	Simulatieperiode	16
	3.4.2	2	Afwaartse randvoorwaarden	16
	3.4.3	3	Opwaartse randvoorwaarden	17
3.	5	Sedi	imenttransport	18
	3.5.2	1	Transportformulering Engelund-Hansen	18
	3.5.2	2	Dikte sedimentlaag	18
	3.5.3	3	Sedimenteigenschappen en parametrisatie sedimenttransport	19
4	Mod	lelres	sultaten	20
4.	1	Sedi	imenttransportcapaciteit: ruimtelijk beeld	20
4.	2	Sedi	imenttransportcapaciteit: raaien	21
4.	3	Deb	ieten door raaien	24
5	Con	clusie	es	26
Refe	renti	es		27

Bijlage 1	Gebiedsdekkende kaarten van de gemodelleerde bruto transportcapaciteit	B1
Bijlage 2	Gebiedsdekkende kaarten van de gemodelleerde netto transportcapaciteit	B6
Bijlage 3	Sedimenttransportcapaciteit door transecten Westerschelde	B11
Bijlage 4	Bron bathymetrie in detail	B15

# Lijst van de tabellen

Tabel 1 - Overzicht modelprestatie NeVla en Scaldis in Beneden-Zeeschelde en Boven-Zeesche	elde op basis
van gebiedsgemiddelde RMSE voor het waterstandsverloop	9
Tabel 2 – Instellingen Telemac-3D	14
Tabel 3 – Overzicht gebiedsdekkende opnames voor Westerschelde, Beneden-Zeeschelde, Bover Durme	n-Zeeschelde 15
Tabel 4 – Bovenafvoer [m <sup>3</sup> /s]	17
Tabel 5 – Instellingen Sisyphe	19

# Lijst van de figuren

Figuur 1 – Visualisatie zandloperbenadering met piramides uit de evaluatiemethodiek 1
Figuur 2 – Indeling Macrocellen Westerschelde met in grijs de ebgeulen en in blauw de vloedgeulen (bron: Barneveld <i>et al.</i> , 2018)
Figuur 3 – Dwarsraaien voor sedimenttransport Westerschelde in MC1 en MC2 5
Figuur 4 – Dwarsraaien voor sedimenttransport Westerschelde in MC3 5
Figuur 5 – Dwarsraaien voor sedimenttransport Westerschelde in MC4 6
Figuur 6 – Dwarsraaien voor sedimenttransport Westerschelde in MC56
Figuur 7 – Dwarsraaien voor sedimenttransport Westerschelde in MC6 en MC7
Figuur 8 – Dwarsraaien voor sedimenttransport Beneden Zeeschelde7
Figuur 9 – Dwarsraaien voor sedimenttransport Boven-Zeeschelde Temse tot Driegoten
Figuur 10 – Dwarsraaien voor sedimenttransport Boven-Zeeschelde Driegoten tot Melle
Figuur 11 – Vergelijking bruto (boven) en netto (onder) sedimenttransportcapaciteit door raaien in de Westerschelde op basis van modelberekeningen in NeVla en Scaldis voor het jaar 2011
Figuur 12 – Illustratie van het Scaldis modeldomein en bathymetrie (m TAW)
Figuur 13 – Detail van het rekenrooster nabij de monding van de Rupel en sluis Wintham 13
Figuur 14 – Detail van het rekenrooster in de Beneden-Zeeschelde 13
Figuur 15 – Manning's ruwheidscoefficienten in het Scaldis2013 model
Figuur 16 – Omvang van de modelroosters DCSM, Zuno en NeVla17
Figuur 17 – Bruto (boven) en netto (onder) sedimenttransportcapaciteit, gemiddeld per macrocel, voor raaien in de Westerschelde op basis van modelberekeningen in Scaldis voor de jaren 2011, 2013, 2016 en 2019
Figuur 18 – Bruto (boven) en netto (onder) sedimenttransportcapaciteit door OMES-raaien in de Zeeschelde op basis van modelberekeningen in Scaldis voor de jaren 2011, 2013, 2016 en 2019
Figuur 19 – Vloed- en ebvolumes, gemiddeld per macrocel, voor raaien in de Westerschelde voor de jaren 2011, 2013, 2016 en 2019
Figuur 20 – Vloed- en ebvolumes door OMES-raaien in de Zeeschelde voor de jaren 2011, 2013, 2016 en 2019
Figuur 21 – Overzichtskaarten bruto sedimenttransportcapaciteit WesterscheldeB1
Figuur 22 – Verschilkaarten bruto sedimenttransportcapaciteit WesterscheldeB2
Figuur 23 – Overzichtskaarten bruto sedimenttransportcapaciteit Beneden-Zeeschelde: 2011 (linksboven), 2013 (rechtsboven), 2016 (linksonder) en 2019 (rechtsonder)
Figuur 24 – Verschilkaarten bruto sedimenttransportcapaciteit Beneden-Zeeschelde
Figuur 25 – Overzichtskaarten bruto sedimenttransportcapaciteit Boven-Zeeschelde Temse-Dendermonde: 2011 (linksboven), 2013 (rechtsboven), 2016 (linksonder) en 2019 (rechtsonder)
Figuur 26 – Verschilkaarten bruto sedimenttransportcapaciteit Boven-Zeeschelde Temse-Dendermonde. B5

Figuur 27 – Overzichtskaarten netto sedimenttransportcapaciteit Westerschelde					
Figuur 28 – Verschilkaarten netto sedimenttransportcapaciteit WesterscheldeB7					
Figuur 29 – Overzichtskaarten netto sedimenttransportcapaciteit Beneden-Zeeschelde B8					
Figuur 30 – Verschilkaarten netto sedimenttransportcapaciteit Beneden-Zeeschelde B9					
Figuur 31 – Overzichtskaarten netto sedimenttransportcapaciteit Boven-Zeeschelde Temse-Dendermonde					
Figuur 32 – Verschilkaarten netto sedimenttransportcapaciteit Boven-Zeeschelde Temse-Dendermonde B10					
Figuur 33: Gemodelleerde bruto sedimenttransportcapaciteit door raaien Westerschelde voor Scaldis 2011 simulatie					
Figuur 34 – Gemodelleerde bruto sedimenttransportcapaciteit door raaien Westerschelde voor Scaldis 2013 simulatie					
Figuur 35 – Gemodelleerde bruto sedimenttransportcapaciteit door raaien Westerschelde voor Scaldis 2016 simulatie					
Figuur 36 – Gemodelleerde bruto sedimenttransportcapaciteit door raaien Westerschelde voor Scaldis 2019 simulatie					
Figuur 37 – Gemodelleerde netto sedimenttransportcapaciteit door raaien Westerschelde voor Scaldis 2011 simulatie					
Figuur 38 – Gemodelleerde netto sedimenttransportcapaciteit door raaien Westerschelde voor Scaldis 2013 simulatie					
Figuur 39 – Gemodelleerde netto sedimenttransportcapaciteit door raaien Westerschelde voor Scaldis 2016 simulatie					
Figuur 40 – Gemodelleerde netto sedimenttransportcapaciteit door raaien Westerschelde voor Scaldis 2019 simulatie					
Figuur 41 – Datasets topo-bathymetrie Scaldis 2013 model B15					
Figuur 42 – Details bron bathymetrie bodem "2013" in Scaldis2013 model					

# 1 Inleiding

## 1.1 Situering

Naar aanleiding van de uitvoering van de T2015 rapportage, die werd door het uitvoerend consortium *Schelde in Beeld* (HKV – Antea – Bureau Waardenburg – Ugent) een evaluatie van de evaluatiemethodiek opgesteld. Dit document (VNSC, 2021), een overzichtslijst met potentiële aanpassingen of verbetervoorstellen voor de Evaluatiemethodiek Schelde-estuarium, werd besproken binnen de projectgroep Evaluatie en Rapportage van de VNSC, en een prioritering werd opgesteld. Naar aanleiding van het rapport worden door het Waterbouwkundig Laboratorium de volgende topics geëvalueerd en verder uitgewerkt: "stormvloeden", waarbij meer specifiek wordt gekeken naar de opzet doorheen het estuarium (horende bij de piramide "Veiligheid"), het topic "sedimentbalans" (horende bij de piramide "Plaat- en geulsysteem" en "Leefomgeving") en het topic "stremmingen" (horende bij de piramide "Bevaarbaarheid"). Recent werd hier nog een topic aan toegevoegd: "Sedimenttransportcapaciteit". Deze wordt als parameter weerhouden in de nieuwe piramide "Morfologie" (Figuur 1). Voor deze parameter is de methodiek echter nog niet bepaald. Binnen deze studie zal de methodiek voor het bepalen van de sedimenttransportcapaciteit worden uitgewerkt. De sedimenttransportcapaciteit kan worden berekend met numerieke modellen die de hydrodynamica en eventueel het sedimenttransport zelf in het estuarium kunnen simuleren.



Figuur 1 – Visualisatie zandloperbenadering met piramides uit de evaluatiemethodiek.

## 1.2 Doelstelling

De doelstelling van dit rapport is tweeledig:

Ten eerste zal de methodiek voor het bepalen van de sedimenttransportcapaciteit in het kader van de Evaluatiemethodiek uiteengezet worden. Dit omvat de keuze voor een specifiek modelinstrumentarium en de bepaling van geschikte modeluitvoer voor de evaluatie.

Ten tweede zal de sedimenttransportcapaciteit berekend worden voor de jaren 2011, 2013, 2016 en 2019 en zullen de afgeleide parameters ten behoeve van de systeemevaluatie geproduceerd worden.

### 1.3 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 wordt eerst aandacht besteed aan de modelkeuze en de methodiek voor het genereren van relevante modeluitvoer om de sedimenttransportcapaciteit te analyseren. Vervolgens geeft Hoofdstuk 3 een beschrijving van het numeriek model waarmee de sedimenttransportcapaciteit wordt berekend. Hoofdstuk 4 bevat de modelresultaten en een beknopte analyse van de sedimenttransportcapaciteit in het estuarium. Tot slot worden in Hoofdstuk 5 de belangrijkste conclusies van dit rapport samengevat.

# 2 Bepaling methodiek

## 2.1 Sedimenttransportcapaciteit

Met behulp van een numeriek model zal de sedimenttransportcapaciteit voor het volledige estuarium geschat worden. Het werkelijke sedimenttransport is niet enkel afhankelijk van de lokale stroming, typisch schaalt het sedimenttransport met de dieptegemiddelde snelheid tot de vijfde macht (formule Engelund Hansen, zie verder in het rapport), maar het lokale transport is ook afhankelijk van de beschikbaarheid van sediment, de granulaire samenstelling van sediment en de aanwezigheid van moeilijk erodeerbare of harde lagen.

In het model wordt een uniforme korreldiameter en een onbeperkte sedimentbeschikbaarheid voor het volledige estuarium aangenomen. Het gemodelleerde transport moet daarom geïnterpreteerd worden als de capaciteit van de getijstroming in het estuarium om sediment, indien beschikbaar, te mobiliseren. Dit kan lokaal beschikbaar sediment zijn, of lokaal toegevoegd sediment door sedimentstortingen. Het gemodelleerde sedimenttransport schaalt omgekeerd evenredig met de korrelgrootte. Indien het lokale beschikbare sediment of gestorte sediment grover of fijner is dan het sediment in het model kan het sedimenttransport in postprocessing eenvoudig herschaald worden naar de lokale condities.

## 2.2 Parametrisatie sedimenttransportcapaciteit

De sedimenttransportcapaciteit zal geanalyseerd worden op verschillende tijd- en ruimteschalen. Er worden op basis van de output van de numerieke modellering (1) gebiedsdekkende kaarten geproduceerd van de gemodelleerde transportcapaciteit over één getij. Daarnaast worden (2) de sedimenttransportcapaciteit en het debiet over een volledige springtij-doodtij cyclus bepaald voor verschillende dwarsraaien langsheen het estuarium.

De sedimenttransportcapaciteit kan worden voorgesteld als een bruto transportcapaciteit en een netto transportcapaciteit. De bruto transportcapaciteit representeert het totale transport over de gehele getijcyclus en is de som van het bij vloed opwaarts gerichte en bij eb afwaarts gerichte transport. De netto transportcapaciteit geeft het verschil tussen het sedimenttransport tijdens de vloedfase en tijdens de ebfase. Hiermee wordt dus een richting van het residuele sedimenttransport voorgesteld. Doordat de beschikbaarheid van het sediment in de modelsimulaties ongelimiteerd is (i.e., er zijn geen harde lagen) komt het berekende sedimenttransport overeen met de sedimenttransportcapaciteit.

#### Gebiedsdekkende kaarten

De bruto en netto transportcapaciteit worden voor elk roosterpunt berekend. Eerst worden de momenten van kentering hoogwater en kentering laagwater bepaald, binnen een vooraf vastgestelde tijdsperiode (zie: Modelbeschrijving). Roosterpunten waarvoor de kenteringsmomenten niet konden worden bepaald zijn buiten beschouwing gelaten. Dit is bijvoorbeeld van toepassing op intertidale gebieden en zones waar de stroomrichting over de getijcyclus niet (quasi-)bi-directioneel is. De gebiedsdekkende kaarten bevatten bijgevolg enkel modeluitvoer voor de subtidale delen van het estuarium. Door het gemodelleerde sedimenttransport te integreren tussen beide kenteringsfases kan het sedimenttransport tijdens de vloedfase en het sedimenttransport tijdens de ebfase worden bepaald. Het verschil tussen beide absolute waarden wordt als netto sedimenttransport beschouwd. De som van beide absolute waarden geeft het bruto sedimenttransport weer.

#### Raaien

De dwarsraaien waardoor de sedimenttransportcapaciteit en het debiet worden berekend zijn weergegeven in onderstaande figuren (Figuur 3 tot en met Figuur 10).

De raaien in de Westerschelde zijn omwille van het meergeulensysteem opgedeeld tussen hoofdgeul en nevengeul. De overgang tussen beide geulen vindt plaats ter hoogte van ongeveer<sup>1</sup> het hoogste punt op de tussenliggende plaat. Daar waar geen uitgesproken intergetijdengebied aanwezig is, wordt de grens tussen beide geulen gemaakt op basis van de geulmorfologie. De raaien bevinden zich in de macrocellen MC1 tot MC7, ten oosten van de lijn Vlissingen – Breskens en ten noorden van de Belgisch-Nederlandse grens, zie Figuur 2 voor de indeling van de macrocellen. De berekende transportcapaciteit door de dwarsraaien in de Westerschelde wordt per macrocel nog eens gemiddeld over de hoofdgeul en de nevengeul zodat voor elke geul één waarde kan worden gepresenteerd.



Figuur 2 – Indeling Macrocellen Westerschelde met in grijs de ebgeulen en in blauw de vloedgeulen (bron: Barneveld et al., 2018)

Kleine nevengeulen zoals de Zimmermangeul (MC5) en de Schaar van Ossenisse (MC4) worden niet meegenomen in de analyse omdat de resolutie van het model in deze geulen te beperkt is. Hierdoor zal de geïmplementeerde bodemligging in het model weinig representatief zijn. Bijgevolg zijn de gemodelleerde debieten en sedimenttransporten slechts beperkt nauwkeurig.

In de Zeeschelde wordt de sedimenttransportcapaciteit berekend door raaien tussen de verschillende OMES-vakken, die tevens werden gebruikt bij de ruimtelijke indeling voor de systeemevaluatie en de opmaak

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Aangezien de intergetijdengebieden niet beschouwd worden in de berekening, is de exacte ligging van de overgang minder belangrijk.

van de sedimentbalans (Vandenbruwaene *et al.*, 2017; Vos *et al.*, in voorbereiding). De naamgeving van de OMES-raaien komt overeen met het afwaartse OMES-vak (i.e., raai OMES\_09 ligt tussen vakken 9 en 10, raai OMES\_10 ligt tussen vakken 10 en 11, etc..). Tot slot worden twee raaien geanalyseerd aan de mondingen van de Rupel en Durme.



Figuur 3 – Dwarsraaien voor sedimenttransport Westerschelde in MC1 en MC2.



Figuur 4 – Dwarsraaien voor sedimenttransport Westerschelde in MC3.



Figuur 5 – Dwarsraaien voor sedimenttransport Westerschelde in MC4.



Figuur 6 – Dwarsraaien voor sedimenttransport Westerschelde in MC5.



Figuur 7 – Dwarsraaien voor sedimenttransport Westerschelde in MC6 en MC7.



Figuur 8 – Dwarsraaien voor sedimenttransport Beneden Zeeschelde.







Figuur 10 – Dwarsraaien voor sedimenttransport Boven-Zeeschelde Driegoten tot Melle.

## 2.3 Modelkeuze

De sedimenttransportcapaciteit kan worden berekend met numerieke modellen die de hydrodynamica en het sedimenttransport kunnen simuleren. Op het Waterbouwkundig Laboratorium zijn twee modellen voor het Schelde estuarium beschikbaar:

- NeVla (Delft3D), gekalibreerd voor het jaar 2009 (Vanlede et al., 2015)
- Scaldis (Telemac), gekalibreerd voor het jaar 2013 (Smolders et al., 2016)

Beide modellen werden door het WL ontwikkeld. Het NeVla model is vooral afgestemd op de Westerschelde, daar waar het Scaldis model een hogere resolutie heeft in de Zeeschelde, maar minder uitgebreid gevalideerd is voor de Westerschelde.

In de eerste fase van dit onderzoek zal nagegaan worden of de modelresultaten voor de verschillende delen van het estuarium in lijn liggen. Deze fase heeft als doel één model te kiezen voor het hele estuarium. Indien de modellen sterk afwijken, zal er in overweging genomen worden om verschillende modellen te gebruiken voor Wester- en Zeeschelde.

Daarom wordt in eerste instantie een vergelijking gemaakt tussen de modelresultaten van de verschillende modellen. Deze vergelijking concentreert zich op de Westerschelde omdat beide modellen daar een gelijkaardige resolutie en hydrodynamische modelprestatie hebben. In de (Boven-)Zeeschelde heeft het Scaldis model een hogere resolutie en een betere representatie van het verticaal getij (zie: Tabel 1).

Op vlak van waterbeweging is een validatie van de modellen mogelijk. Voor het sedimenttransport is, door de beperkte beschikbaarheid van meetdata, de modelvalidatie een stuk moeilijker. Gelet op de beperkte beschikbare tijdsperiode voor dit onderzoek, behoort een kalibratie/validatie van de modellen op vlak van sedimenttransport niet tot de scope van dit project. De modelresultaten moeten dan ook beschouwd worden als een indicatieve trend van de veranderingen van de sedimenttransportcapaciteit in het estuarium, eerder dan absolute sediment transporten.

	Beneden-Zeeschelde			Boven-Zeeschelde		
Model	RMSE TOT	RMSE HW	RMSE LW	RMSE TOT	RMSE HW	RMSE LW
(vanaatierapport)	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
<b>NeVla</b> (Vanlede et al., 2015)	0,18	0,19	0,14	0,24	0,20	0,18
<b>Scaldis</b> (Smolders et al., 2016)	0,14	0,12	0,09	0,14	0,12	0,12

Tabel 1 – Overzicht modelprestatie NeVla en Scaldis in Beneden-Zeeschelde en Boven-Zeeschelde op basis van gebiedsgemiddelde RMSE voor het waterstandsverloop.

#### NeVla

Door het Waterbouwkundig Laboratorium werd in 2004 een hydrodynamisch model – NeVla– gebouwd van het Schelde-estuarium en alle, via de Zeeschelde, aangesloten getij-afhankelijke zijrivieren. Het oorspronkelijke NeVla model is afgeleid van een toenmalige versie van het Kustzuid model en werd verbeterd voor de Zeeschelde (Hartsuiker & van Banning, 2004). Er vond een laatste actualisatie van NeVla3D plaats door Vanlede *et al.* (2015). Naast de operationele toepassing van het model voor waterstandsvoorspellingen, wordt het NeVla model ook gebruikt voor studies en advies met betrekking tot de getijhydrodynamica, stromingspatronen en sedimenthuishouding in het estuarium (e.g. Coen *et al.*, 2019; Stark *et al.*, 2019; Vos *et al.*, 2016).

Binnen het Delft3D model-software pakket kan gebruik gemaakt worden van de sedimenttransportmodule voor de online berekening van sedimenttransport (niet-cohesief en/of cohesief). De voorliggende studie beperkt zich tot het niet-cohesief sediment.

#### Scaldis

Het Scaldis model is opgezet in Telemac-3D en werd door het Waterbouwkundig Laboratorium ontwikkeld in het kader van het project "Integraal Plan Boven-Zeeschelde" (Smolders et al., 2016). Na de initiële oplevering van het Scaldis2013 model werd het model recent nog geüpdatet naar Scaldis2019 (Vanlede et al., 2020). In de huidige studie wordt echter gebruik gemaakt van het originele Scaldis2013 model omdat deze versie van het model binnen het project Integraal plan Boven-Zeeschelde reeds gekoppeld is met de sedimenttransportmodule Sisyphe binnen de Telemac-Mascaret model software. Gedetailleerde informatie over de kalibratie, validatie en de instellingen van dit model wordt gegeven in (Smolders et al., 2016).

Binnen het Telemac model-software pakket kan gebruik gemaakt worden van de sedimenttransportmodule *Sisyphe* voor de online berekening van (niet-cohesief) sedimenttransport. Sisyphe maakt gebruik van de 2D-resultaten van Telemac berekeningen, ook als er hydrodynamisch met Telemac-3D wordt gerekend. Het Scaldis model werd al eerder ingezet voor het modelleren van zandtransport in het estuarium. In Smolders *et al.* (2019) wordt het Scaldis-Sand model gepresenteerd en gevalideerd voor enkele punten in de Zeeschelde. In (Stark *et al.*, 2022) werd het model toegepast in een historische context om lange termijn variaties in sedimenttransport te identificeren.

#### 2.3.1 Vergelijking modellen

De vergelijking van beide modellen en de modelkeuze worden beschreven in onderstaande nota:

Stark (2022) - Evaluatiemethodiek sedimenttransportcapaciteit. Vergelijking Sedimenttransportcapaciteit Scaldis en NeVIa. WL2022R21\_106\_1. 25/03/2022.

De belangrijkste resultaten worden hierna samengevat:

De gemodelleerde bruto en netto transportcapaciteit zijn kwalitatief zeer gelijkend voor beide modellen (Figuur 11). Er zijn lokaal wel kwantitatieve verschillen waarbij het Scaldis model een hogere transportcapaciteit voorspelt in MC5 en het NeVla model in MC6 en MC7. In het algemeen kan geconcludeerd worden dat het Scaldis model en het NeVla model geen significant afwijkende resultaten of trends vertonen in de Westerschelde en dat verwacht mag worden dat beide modellen op basis van de hier gepresenteerde modelresultaten even geschikt zijn voor het evalueren van de evolutie van de sedimenttransportcapaciteit in het estuarium.

Lettend op een aantal voordelen die het Scaldis model in TELEMAC biedt ten opzichte van het NeVla model in Delft3D, wordt voorgesteld om het Scaldis model toe te passen voor de evaluatie van de sedimenttransportcapaciteit in het Schelde estuarium. Enkele voordelen van het Scaldis model ten opzichte van het NeVla model zijn:

- Hogere resolutie en betere (hydrodynamische) modelprestatie in de Zeeschelde;
- Toepassing van een constante bodemruwheid in de sedimenttransportmodule waardoor ruimtelijke variaties en scherpe overgangen in het gekalibreerde bodemruwheidsveld van de hydrodynamische module niet leiden tot scherpe overgangen in het transportpatroon;
- In Telemac/Sisyphe wordt het sedimenttransport door de raaien na afloop van de simulatie in postprocessing berekend. Dit heeft als voordeel dat er bijkomende raaien kunnen worden toegevoegd aan de analyse zonder dat er een extra simulatie hoeft te worden opgestart.



Figuur 11 – Vergelijking bruto (boven) en netto (onder) sedimenttransportcapaciteit door raaien in de Westerschelde op basis van modelberekeningen in NeVIa en Scaldis voor het jaar 2011.

# 3 Modelbeschrijving

### 3.1 Modeldomein en rekenrooster

Het Scaldis2013 modelrooster omvat het volledige Schelde-estuarium, inclusief getijgeboden zijrivieren en het mondingsgebied (Figuur 12). Ook bevat het modeldomein de Belgische kustzone en de Oosterschelde. De resolutie van het mode varieert van enkele honderden meters buiten de kust over 100 à 150 meter in de Westerschelde tot 20 à 10 meters in de Boven-Zeeschelde. Speciale aandacht is bij de ontwikkeling van het model besteed aan de implementatie van de gereduceerde getijgebieden (GGG's) en gecontroleerde overstromingsgebieden (GOG's). Zie onderstaande figuren voor een aantal voorbeelden van het modelrooster in de Beneden- en Boven-Zeeschelde.



Figuur 12 – Illustratie van het Scaldis modeldomein en bathymetrie (m TAW).



Figuur 13 – Detail van het rekenrooster nabij de monding van de Rupel en sluis Wintham.



Figuur 14 – Detail van het rekenrooster in de Beneden-Zeeschelde

## 3.2 Modelinstellingen

De overige generieke modelinstellingen voor het hydrodynamisch model in Telemac-3D zijn overgenomen van het gevalideerde Scaldis 3D model (Smolders *et al.*, 2016).

#### Bodemruwheid

Figuur 15 toont het bodemruwheidsveld van het gevalideerde Scaldis2013 model.

In de sedimenttransportmodule *"Sisyphe"* wordt een ruimtelijk uniforme bodemruwheid van  $n = 0,02 \text{ s} \cdot m^{-1/3}$  toegepast door middel van een aanpassing in de broncode van Sisyphe (i.e., in subroutine *coefro\_sisyphe.f*). Op die manier zijn de berekende sedimenttransporten niet afhankelijk van variaties in het (gekalibreerde) ruwheidsveld. De bodemruwheid voor de sedimenttransportmodule is daarmee wel verschillend van de bodemruwheid voor de hydrodynamische module.

Tabel 2 – Instellingen Telemac-3D					
Parameter	Waarde				
Time step	4 s				
Initial condition	Constante waterhoogte en start met inspeeltijd				
Number of layers in the vertical	5 (3D model)				
Salt transport	On				
Wind	Off				
Bottom friction formula	Manning				
Bed roughness value	Ruimtelijk variërend				
Friction formula for lateral boundaries	Nikuradse Law				
Friction coefficient for lateral boundaries	0.054848				
Option for the treatment of tidal flats	1: equations solved everywhere with correction on tidal flats				
Treatment of negative depths	2: flux control				
Free surface gradient compatibility	0.9				
Vertical turbulence model	2: mixing length				
Mixing length model	3: Nezu and Nakagawa				
Horizontal turbulence model	4: Smagorinsky				
Coefficient for vertical diffusion of velocities	0.01				
Coefficient for horizontal diffusion of velocities	0.01				
Scheme for advection of velocities	1: characteristics				
Scheme for advection of depth	5: conservative scheme				
Scheme for advection of tracers	13: Leo Postma for tidal flats				
Scheme for diffusion of velocities	1: implicit (1 is default; 0 cancels the diffusion)				
Scheme for diffusion of tracers	1: implicit				
Solver	7: GMRES				



#### 3.3 Bathymetrie

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de gebruikte bathymetrische data in verschillende delen van het estuarium voor de verschillende Scaldis modelruns (i.e., 2011, 2013, 2016 en 2019). De gebruikte datasets voor 2011, 2016 en 2019 werden samengesteld uit gebiedsdekkende bathymetrische opnames en LIDAR datasets in het kader van de opmaak van de Sedimentbalansen 2011-2016 en 2016-2019 (Vos et al., in voorbereiding). Voor Scaldis2013 werd een gebiedsdekkende bathymetrie samengesteld binnen het project Integraal Plan Boven-Zeeschelde (Smolders et al., 2016).

De bathymetrische data wordt op het Scaldis modelrooster geïmplementeerd met behulp van de BlueKenue software. Het Scaldis2013 model wordt steeds als basis gebruikt bij de implementatie van een nieuwe bathymetrie. De bathymetrische updates tussen de verschillende runs worden enkel toegepast binnen de reguliere grenzen van het estuarium (i.e., exclusief GOG's en GGG's). Afhankelijk van de beschikbaarheid van de data wordt de bathymetrie steeds geüpdatet van de lijn Westkapelle – Cadzand (afwaarts) tot en met Boom (opwaarts Rupel), Hamme (opwaarts Durme) en Merelbeke (opwaarts Schelde). De bathymetrische data in de overige delen van het modeldomein, inclusief de getij-arm Gentbrugge-melle, blijft identiek aan het originele Scaldis-2013 model. Voor de getijgebonden zijrivieren zoals Beneden-Nete, Zenne en Dijle is in het Scaldis model data uit de periode 2006-2009 geïmplementeerd. Een gedetailleerd overzicht van de geïmplementeerde bathymetrische data in het originele Scaldis model wordt gegeven in het validatierapport (Smolders et al., 2016), zie ook Bijlage 4 voor meer details. Dit rapport beschrijft ook de geïmplementeerde datasets voor de kustzone en de getijgebonden zijrivieren die in deze modeloefening niet worden geüpdatet.

Tabel 3 – Overzicht gebiedsdekkende opnames voor Westerschelde, Beneden-Zeeschelde, Boven-Zeeschelde Durme					
Referentiejaar	Westerschelde	Beneden-Zeeschelde	Boven-Zeeschelde	Durme	
"2011"	2011	2011	2011-2012	2011	
"2013"	2013	2011	2013-2014 <sup>2</sup>	2011-2013 <sup>3</sup>	
"2016"	2016	2016	2016	2013-2016 <sup>4</sup>	
"2019"	2019	2019	2019	2018-2019 <sup>5</sup>	

<sup>2</sup> Zie ook Figuur 41 in Bijlage 4 voor meer details over de "2013" bathymetrie in Scaldis2013.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Idem

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Multibeam peilingen: 2013-2014, Lidar: 2016 (Vos et al., 2022)

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Multibeam peilingen: 2018, Lidar: 2019 (Vos et al., 2022)

## 3.4 Randvoorwaarden

#### 3.4.1 Simulatieperiode

De modelsimulaties worden uitgevoerd over één volledige doodtij – springtij cyclus (+ inspeelperiode). De sedimenttransportcapaciteit wordt geanalyseerd op verschillende temporele en spatiale schalen: gebiedsdekkend over 1 getij vs. verschillende dwarsraaien langsheen het estuarium over een volledige ST-DT-cyclus. De sedimenttransporten worden herrekend naar het jaargemiddelde sedimenttransport, debieten naar een getijgemiddeld debiet. De volgende simulatieperiode wordt gebruikt voor alle Scaldis modelruns: 20/3/2019 3h30 - 20/4/2019 3h30.

- De springtij-doodtij cyclus die wordt gebruikt: 30/3/2019 12h30 14/4/2019 6h30.
- Het enkele getij wordt vergeleken voor het tij van: 6/4/2019.

Dit laatste getij heeft een getijverschil van 4,50 m te Vlissingen (i.e., LW = 0,24 m TAW en HW = 4,74 m TAW) en is daarmee representatief voor een gemiddeld springtij (Dillingh, 2013).

Over de geanalyseerde periode van enkele jaren mag worden aangenomen dat de effecten van langdurige processen zoals zeespiegelstijging verwaarloosbaar zijn. De randvoorwaarden en simulatieperiode blijven daarom gelijk voor de simulaties van verschillende jaren. Op die manier is er geen mogelijke invloed van de geïmplementeerde getijcondities aan de afwaartse rand op de verschillen tussen de modelresultaten en wordt enkel het effect van wijzigingen in bathymetrie en morfologie beschouwd. Dit betekent ook dat de mogelijke invloed van de 18,6-jarige nodale getijcyclus met een amplitude van ±1,2 cm (Baart *et al.*, 2012) niet in beschouwing wordt genomen.

#### 3.4.2 Afwaartse randvoorwaarden

#### DCSM-ZuNo modeltrein

De afwaartse rand van het Scaldis model is genest in de DCSM-ZUNO modeltrein (Figuur 16). De modellen die worden gedraaid voor de generatie van randvoorwaarden van het Scaldis-model zijn (van grof naar fijner) het Dutch Continental Shelf model (DCSM) en het Zuidelijke Noordzee model (Zuno). Deze modellen zijn door Deltares ontwikkeld. Voor meer informatie over het DCSM-model en het Zuno model wordt verwezen naar: Leyssen *et al.* (2011) en Chu *et al.* (2020).

Het grootschalige DCSM model wordt aangestuurd door een harmonische getijrand. Het is een rechtlijnig model op de bol (in bolcoördinaten). Hirlam windvelden (bron: KNMI) worden gebruikt als bron voor het genereren van opzet bovenop het astronomisch getij.

Zuno is genest in het DCSM model met gebruik van twee waterstandsranden bij (1) de lijn Cherbourg (F) – Bournemouth (UK) en (2) de lijn Aberdeen (UK) – Løkken (DK). Het Zuno model is een kromlijnig model dat de zuidelijke Noordzee en het Kanaal bevat, met inbegrip van onder meer de Westerschelde. De resolutie bedraagt ongeveer een tweetal kilometer voor de Belgische kust. De Hirlam windvelden worden ook in het Zuno model gebruikt voor het aandrijven van de opzet.

Voor het Scaldis model worden waterstanden en stroomsnelheden vanuit de modeltrein geïmplementeerd op de afwaartse rand.

#### Randvoorwaarden voor saliniteit en sediment

Er wordt een constante saliniteit van 32 ppt opgelegd aan de afwaartse rand.



Figuur 16 – Omvang van de modelroosters DCSM, Zuno en NeVla.

#### 3.4.3 Opwaartse randvoorwaarden

Er wordt een constante bovenafvoer opgelegd (Tabel 4), overeenkomstig met de P50-waarden zoals toegepast in modelonderzoek naar de invloed van bovenafvoer op slibhuishouding in het estuarium door Plancke *et al.* (2021).

Tabel 4 – Bovenafvoer [m <sup>3</sup> /s]					
Meetstation	Ziirivier	P50-waarde			
Grobbendonk	Kleine Nete	4,80			
Itegem	Grote Nete	3,82			
Haacht	Dijle	11,2			
Appels	Dender	3,20			
Merelbeke	Bovenschelde	22,5			
Eppegem	Zenne	7,26			

## 3.5 Sedimenttransport

#### 3.5.1 Transportformulering Engelund-Hansen

In het kader van het onderzoek binnen de Agenda voor de Toekomst, werd in het project "sedimenttransport op verschillende tijd- en ruimteschalen" reeds onderzoek uitgevoerd naar de best bruikbare sedimenttransportformule (Meire *et al.*, 2019). Voor het Schelde-estuarium worden de transportformule van Engelund-Hansen of de transportformule van Van Rijn in de meeste gevallen gebruikt. Binnen voorliggende studie is ervoor gekozen het sedimenttransport te berekenen op basis van de transportformule van Engelund-Hansen (1967), zoals voorgesteld in *Evaluatiemethodiek Schelde-estuarium update 2021* (VNSC, 2021). Deze is gebaseerd op het energiebalans concept en berekent direct het totale sedimenttransport. Er wordt dus geen onderscheid gemaakt tussen bodemtransport en suspensietransport.

De formule wordt uitgedrukt in volgende vergelijking:

$$\vec{q}_{s} = \frac{0.05 \, |u^{4}|.\vec{u}}{\sqrt{g} \, .C^{3} \, .\Delta^{2} \, .D_{50}}$$
(2.1)

• U	[m/s]	Diepte-gemiddelde stroomsnelheid
• $\Delta = (\rho_s - \rho_w)/\rho_w$	[-]	Relatieve dichtheid sedimentdeeltjes
• g	[m/s²]	Valversnelling
• D <sub>50</sub>	[m]	Mediane korrelgrootte
• C	[m <sup>1/2</sup> /s]	Chézy coëfficiënt (i.e., met $C = 1/n \cdot R_h^{1/6}$ )
o <b>n</b>	[s/m <sup>1/3</sup> ]	Manning coëfficiënt
0 <b>R</b> <sub>h</sub>	[m]	Hydraulische straal (~waterdiepte)

De grootte van het sedimenttransport  $q_s$  [m<sup>3</sup>/m/s] wordt gerelateerd aan:

Merk op dat in deze formulering het transport omgekeerd evenredig is met de mediane korrelgrootte. Indien gewenst kan men voorliggende resultaten makkelijk herschalen naar de werkelijke korrelgrootte wanneer deze gekend is voor een specifiek gebied of geul, of bijvoorbeeld in geval van sediment lozingen met een bepaalde korrel. Men dient hiervoor het model niet opnieuw te runnen.

In Sisyphe wordt het sedimenttransport  $q_s$  eveneens uitgedrukt in m<sup>3</sup>/s/m. Echter betreft het hier het volume van de sedimentkorrels, exclusief poriën. De porositeit wordt als volgt in rekening gebracht:

$$q_s = \frac{\overline{q_s}}{(1-n)} \tag{2.2}$$

waarin n [-] de porositeit voorstelt. Een porositeit van 0,4 wordt hier aangenomen. Deze correctie gebeurt in post-processing.

#### 3.5.2 Dikte sedimentlaag

Door een uniforme sedimentlaagdikte van 10 m te implementeren blijft gedurende de gehele simulatieperiode overal sediment beschikbaar. Er wordt voor de berekening van de sedimenttransportcapaciteit dus geen rekening gehouden met de eventuele aanwezigheid van harde (klei)lagen die de beschikbaarheid van erodeerbaar sediment op de bodem kunnen beperken. Er worden enkel sedimenttransporten berekend. De bodemupdate is in het model uitgezet.

#### 3.5.3 Sedimenteigenschappen en parametrisatie sedimenttransport

In onderstaande tabel worden de sedimentkarakteristieken opgesomd zoals ze in Sisyphe zijn geïmplementeerd.

Tabel 5 – Instellingen Sisyphe			
Parameter	Waarde		
Sediment diameter	200 μm		
Morphological Factor	1		
Option for the treatment of tidal flats	1: equations solved everywhere with correction on tidal flats		
Option for the treatment of non-erodible beds	3: minimization of the solid discharge		
Bed roughness value	<ul> <li>n = 0.02 s·m<sup>-1/3</sup> (i.e., ruimtelijk constant door aanpassing in Sisyphe subroutine coefro_sisyphe.f)</li> </ul>		
Bed load	Yes		
Bed load transport formula	3: (Engelund & Hansen, 1967)		
Minimum value for bed load	0.01 m		
Slope effect	Yes		
Skin friction correction	1: (yes)		
Ratio between skin friction and mean diameter	$\alpha_{ks} = 3$ (i.e., $k_s' = \alpha_{ks} \cdot d_{50}$ )		
Formula for slope effect	1: (Koch & Flokstra, 1981)		
Beta	1.3		
Friction angle of the sediment	n/a (i.e., only for Soulsby, 1997)		
Formula for deviation	1: (Koch & Flokstra, 1981)		
Parameter for deviation	n/a (only for Talmon et al., 1995)		
Secondary currents	No		
Secondary currents alpha coefficient	n/a		
Suspension	No (Engelund & Hansen, 1967)		
Type of advection	1: (method of characteristics)		
Non cohesive bed porosity	0.4		

# 4 Modelresultaten

De modelresultaten omvatten volgende onderdelen:

- Kaarten bruto en netto transportcapaciteit
- Kaarten maximale dieptegemiddelde stroomsnelheid bij eb en vloed
- Sedimenttransportcapaciteit hoofd en nevengeulen: raaien
- Debieten geulen: raaien

### 4.1 Sedimenttransportcapaciteit: ruimtelijk beeld

De overzichtskaarten met de gemodelleerde bruto sedimenttransportcapaciteit voor de verschillende simulaties zijn opgenomen in Bijlage 1. De overzichtskaarten met de gemodelleerde netto sedimenttransportcapaciteit zijn opgenomen in Bijlage 2. Voor zowel de bruto als de netto transportcapaciteit zijn ook verschilkaarten geproduceerd voor de periodes 2011-2013, 2013-2016 en 2016-2019.

#### Bruto transportcapaciteit

De gebiedsdekkende kaarten van de bruto transportcapaciteit laten verschillende zones zien waar de sedimenttransportcapaciteit het hoogst is. In de Westerschelde is de transportcapaciteit het hoogst in de Schaar van de Spijkerplaat, het drempelgebied tussen de Everingen en de Geul van Baarland, de Inloop van Ossenisse, het Gat van Ossenisse en tussen de Put van Hansweert en de Drempel van Hansweert (Figuur 21). In de Beneden-Zeeschelde is de sedimenttransportcapaciteit het hoogst tussen Antwerpen en Rupelmonde, en met name ter hoogte van Burcht en Hemiksem (Figuur 23). Langs de Boven-Zeeschelde is de bruto sedimenttransportcapaciteit in algemene zin lager dan verder afwaarts (Figuur 25).

In de verschilkaarten van de transportcapaciteit voor verschillende simulaties kunnen de temporele ontwikkelingen worden waargenomen. In de Westerschelde (Figuur 22) is vooral de sterke dynamiek (i.e., afwisselend sterke toename en sterke afname in één gebied) opvallend in macrocel 1 rond de Spijkerplaat en in het overgangsgebied tussen macrocel 3 en macrocel 4. De Spijkerplaat is van nature een zeer dynamisch gebied in de Westerschelde. Verder valt in de Everingen een afname van de transportcapaciteit waar te nemen tussen 2011 en 2016, gevolgd door een toename tussen 2016 en 2019. De Overloop van Hansweert en het Zuidergat worden vooral tussen 2011 en 2013 gekenmerkt door een consistente toename in transportcapaciteit over een langgerekt gebied. Na 2013 is de verandering in transportcapaciteit in de hoofdgeul van macrocellen 4 en 5 meer ruimtelijk variërend. In de Beneden-Zeeschelde (Figuur 24) nam de sedimenttransportcapaciteit eerst toe tussen Antwerpen en Burcht (2011-2013, vervolgens tussen Burcht en Kruibeke (2013-2016) en meer recent tussen Kruibeke en Schelle (2016-2019). In die laatste periode nam de bruto transportcapaciteit tussen Antwerpen en Burcht juist weer af. In de Boven-Zeeschelde (Figuur 26) is de gemodelleerde verandering in sedimenttransportcapaciteit beperkter. Tussen 2011 en 2013 nam de bruto transportcapaciteit af over een relatief langgerekte zone tussen Temse en Hamme en tussen 2016 en 2019 was sprake van een duidelijke lokale afname in transportcapaciteit rond Driegoten. Verder zijn geen grootschalige of sterke ontwikkelingen waar te nemen.

#### Netto transportcapaciteit

De gebiedsdekkende kaarten van de netto sedimenttransportcapaciteit duiden aan welke geulen of geulsecties gekenmerkt worden door een opwaarts vloed-gedomineerd residueel transport (rood) en welke geulen worden gekenmerkt door een afwaarts of eb-gedomineerd residueel transport (blauw). De

belangrijkste vloedgeulen (i.e., hoogste netto vloedtransporten) in de Westerschelde (Figuur 27) zijn het afwaartse deel van de Schaar van de Spijkerplaat in het mondingsgebied, de Everingen, de Overloop van Hansweert, Schaar van Waarde en Schaar van de Noord. De Honte, het opwaartse deel van de Schaar van de Spijkerplaat, Pas van Terneuzen en de Overloop van Valkenisse/Zuidergat zijn juist sterk eb-gedomineerd (i.e., hoogste transportcapaciteit in ebrichting). Zowel in de Beneden-Zeeschelde (Figuur 29) als Boven-Zeeschelde (Figuur 31) zijn de gemodelleerde netto transporten kleiner dan in sommige delen van de Westerschelde. Langs de Beneden-Zeeschelde is het berekende netto sedimenttransport in de geul voornamelijk afwaarts gericht. In de binnenbochten is er lokaal wel sprake van opwaarts gericht netto transport (e.g. Schaar van Ouden Doel, Groot Buitenschor, Ketenisse, Fort Filips, Sint-Anna). Tussen Kruibeke en Rupelmonde wordt ook in de geul een opwaarts gericht netto transport berekend. In de Boven-Zeeschelde, van de Rupelmonding tot Tielrode, is de berekende netto transportcapaciteit in de geul voornamelijk eb-gedomineerd. Langs de banken is het netto transport juist opwaarts gericht. Opwaarts van Tielrode is de netto transportcapaciteit eb-gedomineerd tot aan Sint-Amands. Nog verder opwaarts is het netto sedimenttransport gering.

De verschilkaarten (Figuur 28, Figuur 30 en Figuur 32) geven de ontwikkeling over tijd weer van de netto sedimenttransportcapaciteit. In de Westerschelde valt wederom het dynamische karakter op van de zone rond de Spijkerplaat (macrocel 1) en van het overgangsgebied tussen macrocel 3 en macrocel 4. Tussen 2011 en 2016 nam het netto vloedtransport toe in een groot gebied rond de Drempel van Hansweert. Verder is in de Westerschelde vooral sprake van kleinschalige of variabele ontwikkelingen in de netto sedimenttransportcapaciteit. De ontwikkeling van de netto transportcapaciteit in de Beneden-Zeeschelde varieert over de tijd. Tussen 2011 en 2013 wordt met name tussen Burcht en Schelle een ontwikkeling ten faveure van het vloedtransport gemodelleerd. Later, tussen 2016 en 2019, is de ontwikkeling omgekeerd met een relatieve toename van de afwaarts gerichte transporten. De gemodelleerde ontwikkeling van de netto transportcapaciteit in de Boven-Zeeschelde tussen Temse en Dendermonde is zowel ruimtelijk als temporeel zeer variabel.

## 4.2 Sedimenttransportcapaciteit: raaien

Figuur 17 toont de gemodelleerde bruto en netto sedimenttransportcapaciteit voor verschillende geulen in de Westerschelde. De gepresenteerde waarden zijn voor elke macrocel het gemiddelde van de raaien in de hoofdgeul of de raaien in de nevengeul. De sedimenttransportcapaciteit voor de individuele raaien in de Westerschelde is per simulatie opgenomen in Bijlage 3.

Figuur 18 toont de gemodelleerde bruto en netto sedimenttransportcapaciteit voor de OMES-raaien in de Beneden-Zeeschelde en Boven-Zeeschelde. Let op het verschil in schaal van de verticale as tussen de figuren met bruto en netto transportcapaciteit. De netto transportcapaciteit is steeds ongeveer een ordegrootte lager dan de bruto transportcapaciteit.

#### Bruto transportcapaciteit

De berekening van de bruto transportcapaciteit door de raaien bevestigt dat de Schaar van de Spijkerplaat, de Everingen en de Overloop van Hansweert in de Westerschelde de hoogste transportcapaciteit hebben. In de Zeeschelde wordt de hoogste bruto transportcapaciteit gemodelleerd door OMES-raai 12, ter hoogte van Burcht. Uiteraard neemt de transportcapaciteit door de raaien stroomopwaarts geleidelijk af door de kleinere dwarssecties en lagere getijvolumes.

De ontwikkeling van de bruto transportcapaciteit in de verschillende geulen en macrocellen in de Westerschelde tussen 2011 en 2019 toont kleine variaties en ook enkele geleidelijke veranderingen. Zo nam de transportcapaciteit in macrocel 1 in beide geulen toe tussen 2011 en 2013 en af tussen 2013 en 2019. Hetzelfde geldt voor de Overloop van Hansweert in macrocel 4. In het Middelgat (macrocel 4) en de Schaar van de Noord (macrocel 6) is sprake van een continue afname van de sedimenttransportcapaciteit tussen

2011 en 2019. In macrocel 5 is de sedimenttransportcapaciteit juist toegenomen over de geanalyseerde periode.

In de Zeeschelde nam de bruto sedimenttransportcapaciteit geleidelijk af voor OMES-raai 8 (ter hoogte van Prosperpolder), raai 9 (Doel), raai 11 (Oosterweel), raai 14 (Tielrode). Voor OMES-raai 10 (net opwaarts van Liefkenshoek), raai 12 (Burcht) en raai 16 (Dendermonde) is juist sprake van een geleidelijke toename, hoewel de bruto transportcapaciteit tussen 2016 en 019 weer afnam door OMES-raai 12.

#### Netto transportcapaciteit

Op basis van de berekende netto transportcapaciteit door de raaien in de Westerschelde zijn de Everingen, de Overloop van Hansweert en de Schaar van Waarde de belangrijkste vloedgeulen, terwijl de Pas van Terneuzen de hoogste netto sedimenttransporten in afwaartse richting heeft. Ook in de gemodelleerde netto transportcapaciteit zijn enkele veranderingen over tijd te zien. In macrocel 1 in de Westerschelde wordt de Honte iets minder eb-gedomineerd en de Schaar van de Spijkerplaat iets meer eb-gedomineerd tussen 2011 en 2019. In de Everingen, Overloop van Hansweert, het Zuidergat en de Schaar van Waarde nam de vloed-gedomineerde netto transportcapaciteit toe tussen 2011 en 2016, waarna deze in laatstgenoemde geulen weer afnam tussen 2016 en 2019.

Er wordt opgemerkt dat de individuele raaien zich in een overgangsgebied tussen een ebgeul en vloedgeul kunnen bevinden, waardoor het gemiddelde transport van een hoofdgeul of nevengeul niet altijd representatief is voor de gehele geulsectie. Dit is bijvoorbeeld het geval voor het Middelgat, waar voor de meest afwaartse raai in de 2011 en 2013 simulaties een zeer sterk netto opwaarts transport wordt berekend en het gemiddelde netto transport daardoor wordt beïnvloed. Omwille van de onderlinge vergelijkbaarheid van de modelresultaten voor de verschillende jaren worden de meest afwaartse raaien toch meegenomen in de berekening van het gemiddelde netto transport voor het Middelgat. Een ander voorbeeld van tegengestelde transportrichtingen binnen één geul is de Schaar van de Spijkerplaat. Hier is er een duidelijk onderscheid tussen de afwaartse raaien met een sterk vloed-gedomineerd transport en de opwaartse raaien met een sterk eb-gedomineerd transport. In beide gevallen is de grootte en richting van de netto transportcapaciteit die in Figuur 17 wordt gepresenteerd dus niet representatief voor de gehele geulsectie.

In de Zeeschelde wordt voor OMES-raai 10 en raai 15 een duidelijk vloed-gedomineerd netto transport gesimuleerd. Raaien 8 (Prosperpolder) en raaien 11-14 (Oosterweel tot Tielrode) geven juist relatief sterke netto transportcapaciteit in afwaartse richting. Hierbij moet worden opgemerkt dat de afstand tussen de verschillende raaien steeds groot is en dat in tussenliggende gebieden ook sprake kan zijn van omgekeerde transportrichtingen, zoals ook uit de gebiedsdekkende kaarten blijkt. Voor de OMES-raaien in de Zeeschelde zijn de relatieve temporele veranderingen tussen 2011 en 2019 groter dan voor de gemiddelde netto transportcapaciteit door de raaien in de Westerschelde. Voor OMES-raai 9 (ter hoogte van Doel) is zelfs sprake van een verandering van netto afwaarts transport in de periode 2011-2016 naar netto opwaarts transport in 2019, al is de netto transportcapaciteit hier zeer gering. Verder valt in de Zeeschelde de afname van het afwaarts gericht netto transport door raai 8 (Prosperpolder) op, evenals de sterke toename in het afwaartse transport door raai 12 (Burcht) tussen 2011 en 2013. De temporele verandering in netto transportcapaciteit is sowieso zeer variabel voor raaien 12, 13 en de raai in de Rupelmonding.



Figuur 17 – Bruto (boven) en netto (onder) sedimenttransportcapaciteit, gemiddeld per macrocel, voor raaien in de Westerschelde op basis van modelberekeningen in Scaldis voor de jaren 2011, 2013, 2016 en 2019.





## 4.3 Debieten door raaien

Naast de berekende sedimenttransportcapaciteit, werden ook de gemodelleerde debieten door de raaien bepaald en opgeleverd. Ter illustratie toont Figuur 19 de berekende vloed- en ebvolumes voor de raaien in de Westerschelde (i.e., gemiddeldes per macrocel). Figuur 20 geeft de getijvolumes voor vloed en eb weer voor de OMES-raaien in de Zeeschelde.



Figuur 19 – Vloed- en ebvolumes, gemiddeld per macrocel, voor raaien in de Westerschelde voor de jaren 2011, 2013, 2016 en 2019.



# 5 Conclusies

In dit rapport is in het kader van de *Evaluatiemethodiek Schelde-estuarium* een methodiek voor het bepalen van de sedimenttransportcapaciteit in het Schelde-estuarium op basis van modelberekeningen voorgesteld en toegepast voor de jaren 2011, 2013, 2016 en 2019. Er is aandacht besteed aan de modelkeuze en de methodiek voor het genereren van relevante modeluitvoer.

De sedimenttransportcapaciteit kan worden berekend met het Scaldis model in Telemac-3D. Uit een vergelijking tussen dit model en het NeVla model in Delft3D, blijkt dat beide modellen gelijkaardige resultaten geven met betrekking tot het ruimtelijk beeld én de grootte van het sedimenttransport in de Westerschelde. Het Scaldis model verdient bij gelijke modelresultaten in de Westerschelde de voorkeur vanwege (1) een hogere resolutie en nauwkeurigheid in de Zeeschelde, (2) de toepassing van een ruimtelijk constante ruwheidscoëfficiënt in de sedimenttransportmodule en (3) de mogelijkheid om extra raaien in post-processing te analyseren zonder dat daar nieuwe modelsimulaties voor uitgevoerd hoeven worden. Bij de interpretatie van de resultaten dient men er rekening mee te houden dat in het model het beschikbaar sediment ongelimiteerd is, i.e. er zijn geen harde bodems of moeilijk erodeerbare lagen. Ook rekent het model met een uniforme korreldiameter en niet-cohesief sediment. De berekende transporten dienen geïnterpreteerd te worden als de lokale capaciteit van de getijstroming in de geulen om sediment in beweging te zetten.

De modeluitvoer die kan worden opgeleverd in het kader van de Evaluatiemethodiek bestaat uit gebiedsdekkende kaarten van de bruto sedimenttransportcapaciteit en van de netto transportcapaciteit. Deze kaarten worden bepaald op basis van één getij en bevatten verwerkte modelresultaten in het subtidale deel van het estuarium. Daarnaast worden de bruto- en netto transportcapaciteit ook berekend door raaien langs het estuarium. Hierbij wordt de transportcapaciteit berekend over een volledige springtij-doodtij cyclus. In de Westerschelde bestrijken de raaien de hoofd- en nevengeulen van de verschillende macrocellen. Per macrocel worden de transporten in de hoofd- en nevengeul nog gemiddeld zodat binnen elke macrocel voor elke geul één waarde kan worden gepresenteerd. In de Zeeschelde wordt de transportcapaciteit berekend voor de OMES-raaien. Naast het sedimenttransport wordt ook het debiet door de raaien opgeleverd. Uit deze debieten worden de getijvolumes bij vloed en bij eb afgeleid.

De modelresultaten die in dit rapport zijn gepresenteerd geven een indicatie van zones in het estuarium waar de sedimenttransportcapaciteit het hoogst is en hoe deze varieert doorheen de tijd. De hoogste sedimenttransportcapaciteit wordt in alle simulaties gevonden in de Schaar van de Spijkerplaat, het drempelgebied tussen de Everingen en de Geul van Baarland en de Overloop van Ossenisse (met name Gat van Ossenisse en Put van Hansweert) in de Westerschelde en ter hoogte van Burcht en Hemiksem in de Beneden-Zeeschelde. Ook kan op basis van de modelresultaten aangeduid worden in welke zones het netto transport opwaarts of juist afwaarts is gericht. De modelresultaten tonen een duidelijk beeld van ebgeulen en vloedgeulen in de Westerschelde. In de Beneden-Zeeschelde kan een onderscheid worden gemaakt tussen de geul waar het netto transport veelal afwaarts is gericht en enkele vloedscharen of platen langs de oevers waar het netto transport juist opwaarts is gericht. Ook tussen Burcht en Schelle is de netto transportrichting opwaarts. Een vergelijking tussen de modelsimulaties van verschillende jaren kan worden gebruikt om de - vaak subtiele - veranderingen of trends te analyseren.

## Referenties

Baart, F.; Van Gelder, P.H.A.J.M.; De Ronde, J.; Van Koningsveld, M.; Wouters, B. (2012). The effect of the 18.6-year lunar nodal cycle on regional sea-level rise estimates. *J. Coast. Res.* 28(2): 511–516. doi:10.2112/JCOASTRES-D-11-00169.1

**Barneveld, H.J.; Nicolai, R.P.; Boudewijn, T.J.; de Jong, J.W.; Didderen, K.; van de Haterd, R.J.W.; Van de Moortel, I.; Velez, C.** (2018). Evaluatierapport T2015-rapportage Schelde-estuarium, VNSC rapport PR3152.10, Bergen-op-Zoom.

**Chu, K.; Vanlede, J.; Decrop, B.; Mostaert, F.** (2020). Validation of North Sea models: sub report 1. Validation and sensitivity analysis. Version 3.0. *FHR reports*, 19\_058\_1. Flanders Hydraulics Research: Antwerp. Available at: http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=325253

**Coen, L.; Plancke, Y.; De Maerschalck, B.; Mostaert, F.** (2019). Morfologie Mesoschaal - FSK: deelrapport 2. Fysieke systeemkenmerken Schelde-estuarium. Versie 5.0. *WL Rapporten,* 14\_024\_2. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at:

http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=314384

**Dillingh, D.** (2013). Kenmerkende waarden kustwateren en grote rivieren, 1207509-000-IKS-0010. Deltares: Delft. ISBN 1207509000. 87 pp.

Hartsuiker, G.; van Banning, G.K.F.M. (2004). 2Dh Nevla-Scheldemodel (SCALWEST 2000 met verbeterde Belgische roosterschematisatie): bouw en afregeling stromingsmodel. Waterbouwkundig Laboratorium/Alkyon: Borgerhout

**Leyssen, G.; Vanlede, J.; Mostaert, F.** (2011). Modellentrein CSM-ZUNO: deelrapport 1: opzet en gevoeligheidsanalyse. *WL Rapporten*, 753\_12. Waterbouwkundig Laboratorium/IMDC: Antwerpen

**Meire, D.; Plancke, Y.; De Maerschalck, B.; Mostaert, F.** (2019). Agenda voor de toekomst - Morfologie Mesoschaal: deelrapport 3. Gevoeligheidsanalyse voor morfologische simulaties in de Westerschelde. *WL rapporten*, 14\_024\_3. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

**Plancke, Y.; Dupont, H.; Stark, J.; Kaptein, S.** (2021). Sediment dynamics in the Schelde-estuary: Report 1 – Influence of fresh water discharge and tide on the ETM-dynamics in the Schelde-estuary using Delft3D. Version 3.0. FHR Reports, 19\_060\_1.: Antwerp. 24 pp.

**Smolders, S.; De Maerschalck, B.; Plancke, Y.; Vanlede, J.; Mostaert, F.** (2019). Integraal Plan Boven-Zeeschelde: sub report 10. Scaldis Sand: a sand transport model for the Scheldt estuary. Version 2.. *FHR reports,* 13\_131\_10. Flanders Hydraulics Research: Antwerp. Available at: http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=317512

**Smolders, S.; Maximova, T.; Vanlede, J.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2016). Integraal plan Bovenzeeschelde: Subreport 1. SCALDIS: a 3D Hydrodynamic model for the Scheldt Estuary. *WL Rapporten,* 13\_131. Flanders Hydraulics Research: Antwerp

**Stark, J.** (2022). Evaluatiemethodiek sedimenttransportcapaciteit. Vergelijking Sedimenttransportcapaciteit Scaldis en NeVla. WL Memo's. WL2022M21\_106\_1. 25/03/2022. pp.28

**Stark, J.; De Maerschalk, B.; Plancke, Y.; Mostaert, F.** (2022). AvdT – Sedimenttransport op verschillende tijdschalen: Deelrapport 16 – Complexe modellering van historisch sedimenttransport in het Scheldeestuarium: zandtransport. WL Rapporten 17\_088\_16. Versie 1.0. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. 26 pp.

**Stark, J.; Vandenbruwaene, W.; De Maerschalck, B.; Plancke, Y.; Mostaert, F.** (2019). Morfologie mesoschaal – numerieke modellering drempels: deelrapport 7. Sedimentatie ter hoogte van drempels: validatie numeriek model. Versie 3.0. *WL Rapporten,* 14\_024\_7. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=318280

Vandenbruwaene, W.; Levy, Y.; Plancke, Y.; Vanlede, J.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2017). Integraal plan Boven-Zeeschelde: deelrapport 8. Sedimentbalans Zeeschelde, Rupel en Durme. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 13\_131\_8. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=286358

Vanlede, J.; Chu, K.; Smolders, S.; Decrop, B.; Mostaert, F. (2020). Update SCALDIS 2019: a 3D hydrodynamic model of the Scheldt Estuary: calibration report. Version 3.. *FHR reports*, PA016\_1. Flanders Hydraulics Research: Antwerp. Available at:

http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=334271

Vanlede, J.; Delecluyse, K.; Primo, B.; Verheyen, B.; Leyssen, G.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2015). Verbetering randvoorwaardenmodel: subreport 7. Calibration of NEVLA 3D. *WL Rapporten*, 00\_018. Flanders Hydraulics Research: Antwerpen

Vlaamse Nederlands Schelde Comissie (2021). Evaluatiemethodiek Schelde-estuarium Update 2021. Bergenop-Zoom

**Vos, G.; De Maerschalck, B.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2016). Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde: deelrapport 2. Opzet en validatie zandmodel. *WL Rapporten,* 14\_025. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

**Vos, G.; Meire, D.; Plancke, Y.; Bellafki, K.** (2022). Sedimentstrategie Schelde-estuarium: Deelrapport 6 – Sedimentbalans Zeeschelde, Rupel en Durme voor de periode 2016-2019: Antwerpen

# Bijlage 1 Gebiedsdekkende kaarten van de gemodelleerde bruto transportcapaciteit



Figuur 21 – Overzichtskaarten bruto sedimenttransportcapaciteit Westerschelde.



Figuur 22 – Verschilkaarten bruto sedimenttransportcapaciteit Westerschelde.



Figuur 23 – Overzichtskaarten bruto sedimenttransportcapaciteit Beneden-Zeeschelde: 2011 (linksboven), 2013 (rechtsboven), 2016 (linksonder) en 2019 (rechtsonder).



Figuur 24 – Verschilkaarten bruto sedimenttransportcapaciteit Beneden-Zeeschelde.



Figuur 25 – Overzichtskaarten bruto sedimenttransportcapaciteit Boven-Zeeschelde Temse-Dendermonde: 2011 (linksboven), 2013 (rechtsboven), 2016 (linksonder) en 2019 (rechtsonder).



Figuur 26 – Verschilkaarten bruto sedimenttransportcapaciteit Boven-Zeeschelde Temse-Dendermonde.

# Bijlage 2 Gebiedsdekkende kaarten van de gemodelleerde netto transportcapaciteit







Figuur 28 – Verschilkaarten netto sedimenttransportcapaciteit Westerschelde (rood = toename vloedtransport of afname ebtransport, blauw = toename ebtransport of afname vloedtransport).



Figuur 29 – Overzichtskaarten netto sedimenttransportcapaciteit Beneden-Zeeschelde (rood = vloeddominant, blauw = ebdominant): 2011 (linksboven), 2013 (rechtsboven), 2016 (linksonder) en 2019 (rechtsonder).



Figuur 30 – Verschilkaarten netto sedimenttransportcapaciteit Beneden-Zeeschelde (rood = toename vloedtransport of afname ebtransport, blauw = toename ebtransport of afname vloedtransport).



Figuur 31 – Overzichtskaarten netto sedimenttransportcapaciteit Boven-Zeeschelde Temse-Dendermonde (rood = vloeddominant, blauw = ebdominant): 2011 (linksboven), 2013 (rechtsboven), 2016 (linksonder) en 2019 (rechtsonder).



Figuur 32 – Verschilkaarten netto sedimenttransportcapaciteit Boven-Zeeschelde Temse-Dendermonde (rood = toename vloedtransport / afname ebtransport, blauw = toename ebtransport / afname vloedtransport).

# Bijlage 3 Sedimenttransportcapaciteit door transecten Westerschelde

#### Bruto sedimenttransportcapaciteit







Figuur 34 – Gemodelleerde bruto sedimenttransportcapaciteit door raaien Westerschelde voor Scaldis 2013 simulatie.









#### Netto sedimenttransportcapaciteit



Figuur 38 – Gemodelleerde netto sedimenttransportcapaciteit door raaien Westerschelde voor Scaldis 2013 simulatie.





Figuur 40 – Gemodelleerde netto sedimenttransportcapaciteit door raaien Westerschelde voor Scaldis 2019 simulatie.

# Bijlage 4 Bron bathymetrie in detail



Figuur 41 – Datasets topo-bathymetrie Scaldis 2013 model: Blauw = 2011. Oranje = 2014. Rood = Durme 2012. Groen = Durme 2013. Geel = gereduceerde getijdgebieden (GGG) en gecontroleerde overstromingsgebieden 2013 (Smolders *et al.*, 2016).



Figuur 42 – Details bron bathymetrie bodem "2013" in Scaldis2013 model (Smolders *et al.*, 2016). Blauw=2014, oranje = topografie 2007, rood = bathymetrie Zenne van 2001, zwart = bathymetrie from 2010-2013, grijs = 2001 , geel = 2010-2013; groen = 2001

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