




Vlaanderen
is wetenschap

Empirisch ophogingsmodel voor ontpolderingen langsheen de Zeeschelde

Nicolas Vanermen, Alexander Van Braeckel, Joost Vanoverbeke & Gunther Van Ryckegem

**INSTITUUT
NATUUR- EN BOSONDERZOEK**

Auteurs:

Nicolas Vanermen , Alexander Van Braeckel, Joost Vanoverbeke & Gunther Van Ryckegem

Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek

Reviewers:

Anne-Lie Van Praet

Het INBO is het onafhankelijk onderzoeksinstituut van de Vlaamse overheid dat via toegepast wetenschappelijk onderzoek, data- en kennisontsluiting het biodiversiteitsbeleid en -beheer onderbouwt en evalueert.

Vestiging:

Herman Teirlinckgebouw
INBO Brussel
Havenlaan 88, 1000 Brussel
vlaanderen.be/inbo

e-mail:

nicolas.vanermen@inbo.be

Wijze van citeren:

Vanermen N., Van Braeckel A., Vanoverbeke J. & Van Ryckegem G. (2025). Empirisch ophogingsmodel voor ontpolleringen langsheen de Zeeschelde. Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2025 (69). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel.

DOI: doi.org/10.21436/inbor.134360519

D/2025/3241/457

Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2025 (69)

ISSN: 1782-9054

Verantwoordelijke uitgever:

Hilde Eggermont

Foto cover:

Yves Adams / Vilda

Dit onderzoek werd uitgevoerd in opdracht van:

De Vlaamse Waterweg nv



Dit werk valt onder een [Creative Commons Naamsvermelding-GelijkDelen 4.0 Internationaal-licentie](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

**EMPIRISCH OPHOGINGSMODEL VOOR
ONTPOLDERINGEN LANGSHEEN DE ZEESCHELDE**

**Nicolas Vanermen, Alexander Van Braeckel, Joost Vanoverbeke &
Gunther Van Ryckegem**

doi.org/10.21436/inbor.134360519

Dankwoord/Voorwoord

We bedanken De Vlaamse Waterweg nv van harte voor het financieren van dit onderzoek, en in het bijzonder Liesbet Poppe voor de coördinatie van het *Sigma*³ project. We zijn ook het Agentschap Digitaal Vlaanderen en het Waterbouwkundig Laboratorium zeer erkentelijk voor de grote hoeveelheid data die aan de basis liggen van deze studie (respectievelijk de LiDAR data en getijgegevens). Tot slot bedanken we ex-collega Amber Mertens voor het bewerken en intern beschikbaar stellen van de aangeleverde DTM's, en collega Anne-Lie Van Praet voor haar interne review.



Samenvatting

Deze studie kadert in de uitbreiding en optimalisatie van de zogenaamde modeltrein, die initieel ontwikkeld werd binnen het project *Integraal Plan* (IMDC, 2023). De modeltrein werd destijds ingezet om de effecten van verschillende morfologische toestanden van de Zeeschelde onder verschillende scenario's (wat betreft zeespiegelstijging en getijslag) te kunnen evalueren. De modeltrein zal in de nabije toekomst ook gebruikt worden binnen het *Sigma³* project, dat wil bestuderen hoe het Schelde-estuarium na implementatie van het huidige Sigmaplan en met het oog op de verdere toekomst duurzaam ingericht kan worden. De klimaatveranderingen gaan namelijk sneller dan verwacht ten tijde van de uitwerking van het Geactualiseerd Sigmaplan in 2005, met belangrijke implicaties voor overstromingsveiligheid en biodiversiteit.

De concrete aanleiding voor dit rapport was de vaststelling dat ontpolderingen doorgaans heel snel ophogen door aanslibbing. De snelheid van ophoging bleek bovendien een pak hoger te liggen dan ingeschat en doorgerekend tijdens het *Integraal Plan*. Binnen dit rapport stellen we daarom een nieuw ééndimensionaal ophogingsmodel voor. Dat model werd gekalibreerd op basis van de waargenomen sedimentatie in zes ontpolderingen en aantakkingen over tijdspannes van 3 tot 12 jaar. We kwamen uit op een lineair *mixed model* met gemiddelde hoogwaterdiepte als enige (significante) verklarende variabele in het *fixed* gedeelte, en een *random slope* voor hoogwaterdiepte per studiegebied. De geschatte coëfficiënt van het *fixed* modelgedeelte bedraagt 0,1357. Concreet betekent dit dat er voor een toename in gemiddelde hoogwaterdiepte van 1 m een bijkomende sedimentatie van bijna 14 cm per jaar wordt verwacht.

Binnen het Schelde-ecosysteem spelen estuariene ecotopen en de bijhorende vegetaties een cruciale rol. Tegelijk worden het voorkomen, de verspreiding en de ontwikkeling van deze ecotopen in de allereerste plaats bepaald door de hoogteligging, en de hieruit voortvloeiende overstromingsfrequentie en droogvalduur. Met het oog op ecotopenkartering werd in dit rapport daarom ook een methode voorgesteld om het ééndimensionaal ophogingsmodel toe te passen op een (tweedimensionaal) *Digital Terrain Model* (DTM). Deze methode werd al toegepast voor acht *LIFE Sparc*-gebieden, waarbij we nieuwe DTM's genereerden door 25 jaar sedimentatie te simuleren. Op basis daarvan karteerden we voor elk gebied een toekomstige ecotopen-verspreiding (Vanermen *et al.*, in voorbereiding). De resultaten van deze oefening bleken zeer bruikbaar te zijn, vooral wanneer al één of meerdere kreken in het gebied (en het DTM) aanwezig zijn. Toch zou het zeer nuttig zijn om te proberen evolueren naar een tweedimensionaal model en bijkomende parameters in te sluiten, zoals de mate van begroeiing en afstand tot de kreek of de kreekmonding.

De evolutie in hoogteligging is bepalend voor de ontwikkeling van estuariene ecotopen binnen ontpolderingen. Om ecologische voorspellingen en scenario-analyses in het kader van *Sigma³* verder te optimaliseren is het daarom belangrijk om te blijven bouwen aan een zo betrouwbaar mogelijk en breed inzetbaar sedimentatiemodel.



English abstract

This study fits within the extension and optimization of the so-called model train, which was initially developed during the project *Integraal Plan* (IMDC, 2023). Within this project, the model train was used to evaluate the effects of different morphological states of the Sea Scheldt under various scenarios (with regard to sea level rise and tidal range). In the near future, the model train will also be used within the *Sigma³* project, which aims to study how the Sea Scheldt can be managed sustainably in the future, after the full implementation of the Sigmaplan of 2005, which is still a work in progress. This is crucial since climate changes are taking place way faster than expected, with important implications for flood safety and biodiversity.

Depoldered areas tend to silt up very quickly due to sedimentation. Moreover, the sedimentation rate turned out to be much higher than estimated and calculated during the project *Integraal Plan*. As such, in this report we propose a new (one-dimensional) sedimentation model, calibrated upon the observed sedimentation in six depoldered areas across time spans of 3 to 12 years. This led to a linear mixed model with mean high-water depth as the only (significant) explanatory variable in the fixed part, and a random slope for high-water depth per study area. The estimated coefficient of the fixed model part is 0.1357. This implies that for an increase in mean high-water depth of 1 m, an additional sedimentation of almost 14 cm per year is expected.

Within the Scheldt ecosystem, estuarine ecotopes and their associated vegetation play a crucial role. At the same time, the occurrence, distribution, and development of these ecotopes are primarily determined by elevation. With regard to ecotope mapping, this report therefore also proposes a method to apply the one-dimensional sedimentation model to a (two-dimensional) DTM. This method has already been applied to eight *LIFE Sparc* areas, for which we produced new DTMs simulating 25 years of sedimentation, based on which we mapped future ecotope distribution (*Vanermen et al.*, in preparation). The results of this exercise proved to be very useful, especially when creeks are already present in the area (and the DTM). Nevertheless, it would be very useful to try to evolve toward a two-dimensional model and to include additional parameters, such as vegetation cover and distance to the creek or creek mouth. Given the importance of elevation for the development of estuarine ecotopes, it is important to continue working towards a sedimentation model that is as reliable and broadly applicable as possible, as such optimizing the intended predictions and scenario analyses within the *Sigma³* project.

Inhoudstafel

Dankwoord/Voorwoord	2
Samenvatting	3
English abstract	4
1 Inleiding.....	6
2 Methodiek	7
2.1 LiDAR metingen	7
2.2 Studiegebieden	7
2.2.1 Paardenschor.....	8
2.2.2 Lillo Potpolder	8
2.2.3 Burchtse Weel	9
2.2.4 Fasseit.....	10
2.2.5 Groot Schoor (Hamme)	11
2.3 Studieperiode	12
2.4 Waterstanden en SPM gegevens.....	12
2.5 Sedimentatie.....	14
2.6 Ophogingsmodel.....	14
2.7 R-scripts	15
3 Resultaten	16
3.1 Evolutie in gemiddelde hoogteligging	16
3.2 Evolutie in het aandeel supralittoraal en schor.....	17
3.3 Ophogingsmodel.....	19
3.4 Simulatie	20
4 Discussie.....	23
Referenties	26
Lijst van figuren	28
Lijst van tabellen	29



1 INLEIDING

Binnen het Geactualiseerd Sigmaphan van 2005 werd aan heel wat gebieden langsheen de Zeeschelde en haar zijrivieren een overstromingsregime toebedeeld. Gecontroleerde overstromingsgebieden (GOG's) overstromen enkel bij extreem hoge waterpeilen, via een overlooptdijk. Gecontroleerde overstromingsgebieden met gereduceerd getij (GOG-GGG's) werken ook met een overlooptdijk, maar aan de hand van een hoge inlaat en lage uitlaat stroomt dagelijks een deel van de getijgolf in en uit het gebied. Hierdoor kunnen ook laaggelegen overstromingsgebieden met een hoge bergingscapaciteit zich ontwikkelen tot estuariene natuur met slikken en schorren. Daarnaast wordt ook 'ontpolderd', een maatregel waarbij een gebied geheel wordt teruggegeven aan de rivier en haar getijdenwerking door het (gedeeltelijk) weghalen van de dijk. Door de Zeeschelde en haar zijrivieren meer ruimte te geven, wordt Vlaanderen beter beschermd tegen overstromingen en wordt in één en dezelfde beweging ook het riviergebonden ecosysteem sterk opgewaardeerd. Het Sigmaphan wil zo bijdragen aan het behalen van Europese natuur- en milieudoelstellingen (geformuleerd binnen Natura 2000, de Kaderrichtlijn Water en de Langetermijnvisie Schelde-estuarium).

Deze studie kadert in de uitbreiding en optimalisatie van de zogenaamde modeltrein, die ontwikkeld werd binnen het *Integraal Plan* (IMDC, 2023). De focus binnen dit project lag op het toetsen van allerhande toekomstscenario's met het oog op ecosysteem-functioneren, veiligheid en toekomstgerichte scheepvaart. De modeltrein werd hierbij ingezet om de effecten van verschillende morfologische toestanden van de Zeeschelde (de zogenaamde B- en C-alternatieven) onder verschillende scenario's (specifieke randvoorwaarden met betrekking tot zeespiegelstijging en getijslag) te kunnen evalueren. De modeltrein zal ook gebruikt worden binnen het *Sigma*³ project, dat tot doel heeft om te bestuderen hoe het Schelde-estuarium na implementatie van het huidige Sigmaphan en met het oog op de verdere toekomst duurzaam ingericht kan worden. De klimaatveranderingen gaan namelijk sneller dan verwacht ten tijde van de uitwerking van het Geactualiseerd Sigmaphan in 2005, met belangrijke implicaties voor overstromingsveiligheid en biodiversiteit.

De concrete aanleiding voor dit rapport was de vaststelling dat ontpolderingen doorgaans heel snel ophogen door aanslibbing. De snelheid van ophoging bleek bovendien een pak hoger te liggen dan ingeschat (en doorgerekend) tijdens het *Integraal Plan*, op basis van het ophogingsmodel uitgewerkt door Vandenbruwaene *et al.* (2015). Sedimentatie binnen ontpolderingen heeft belangrijke implicaties, zowel naar de ontwikkeling van estuariene ecotopen als naar buffercapaciteit en veiligheid toe. Het doel van deze studie was daarom om een ophogingsmodel te bouwen dat gebaseerd is op empirisch vastgestelde sedimentatie binnen reeds gerealiseerde ontpolderingen, met name Paardenschor, Lillo Potpolder (West), Lillo Potpolder (Oost), Burchtse Weel, Fasseit en Groot Schoor (Hamme). Dit ophogingsmodel zal uiteindelijk als een bijkomende module ingebouwd worden in de modeltrein voor *Sigma*³.



2 METHODIEK

2.1 LIDAR METINGEN

Voor de Beneden-Zeeschelde (stroomafwaarts van de Rupelmonding) wordt jaarlijks een DTM (of: Digital Terrain Model) aangemaakt op basis van LiDAR-data. Voor de Boven-Zeeschelde gebeurt dit maar eens om de 3 jaar. Deze taak wordt uitgevoerd door het Agentschap Digitaal Vlaanderen in opdracht van De Vlaamse Waterweg nv. De LiDAR-metingen gebeuren telkens in het voorjaar tussen maart en mei. LiDAR (of: light detection and ranging) is een technologie die gebruikt wordt om de hoogteligging van het landschap in hoge resolutie op te meten. Aan de hand van de reflecties van laserpulsen, uitgezonden vanaf een luchtvaartuig, wordt een driedimensionaal beeld van het onderliggende landschap verkregen. Op basis hiervan wordt, na correctie voor de eventuele aanwezigheid van vegetatie, een raster met een resolutie van 1x1 m gegenereerd.

Onze berekeningen van de ophoging in ontpolderde gebieden zijn volledig gebaseerd op deze DTM-rasters. De ophogingswaarden werden namelijk bepaald aan de hand van het verschil in gemiddelde DTM-hoogteligging tussen studie jaren.

2.2 STUDIEGEBIEDEN

We bekeken DTM's in 5 studiegebieden langs de Beneden-Zeeschelde, met name Paardenschor, Lillo Potpolder (West), Lillo Potpolder (Oost), Burchtse Weel en Fasseit. Eén studiegebied, het Groot Schoor in Hamme, bevindt zich langs de Boven-Zeeschelde. Een overzicht van enkele gebiedskenmerken wordt gegeven in Tabel 1. Er wordt hierbij een onderscheid gemaakt tussen een 'echte' ontpoldering en een aantakking. In beide gevallen staat het gebied in rechtstreeks contact met de rivier, maar bij een ontpoldering wordt de volledige dijk weggehaald terwijl het water bij een aantakking enkel via één of meerdere bressen binnen- en buitenstroomt.

Tabel 1. Overzicht van de studiegebieden.

Studiegebied	Type inrichting	Afwerking	Oppervlakte	Studieperiode
Paardenschor	Ontpoldering	April 2004	12 ha	2007-2022
Lillo West	Ontpoldering	September 2012	5 ha	2013-2022
Lillo Oost	Aantakking	September 2012	3 ha	2013-2022
Burchtse Weel	Aantakking	Januari 2011	15 ha	2014-2018
Fasseit	Aantakking	Juni 2016	6 ha	2019-2023
Groot Schoor (Hamme)	Ontpoldering	Juli 2021	25 ha	2022-2025

De exacte afbakening van de studiegebieden verliep volgens een vaste 'workflow' in ArcGIS en R. In een eerste stap werden de studiegebieden manueel gedigitaliseerd aan de hand van de DTM's en op basis van de ligging van de dijken. Meer specifiek werd hiervoor gebruik gemaakt van de DTM's van 2010 (Paardenschor), 2013 (Lillo, Burchtse Weel & Fasseit – oude dijk) en 2019 (Fasseit – nieuwe dijk). Voor het Groot Schoor te Hamme baseerden we ons op een bestaande shapefile van de zogenaamde natuurdoelenkaart. Vervolgens werd een 'clip' uitgevoerd van de



gebiedspolygonen met de eerst beschikbare ecotopenkaart na ontpoldering, teneinde niet-estuariene zones uit de analyse te weren. In een volgende stap werd verder geselecteerd op natuurlijke ecotopen door het uitsluiten van breuksteenzones en dijken. Als laatste bewerking werd een inwaartse buffer van 15 m toegepast om randeffecten te minimaliseren.

2.2.1 Paardenschor

Het Paardenschor is gelegen langs de linkeroever van de Schelde, net stroomopwaarts van het schor van Ouden Doel. In de jaren '60 werd het oorspronkelijke Paardenschor opgehoogd voor de bouw van de kerncentrale van Doel (Van den Neucker *et al.*, 2007). Het noordelijk deel van die ophoging bleef echter onbebouwd en werd in de jaren '80 ingedijkt met een Sigmadijk op 11 m TAW. Ter compensatie voor een brak schor dat bij de aanleg van het Deurganckdok verloren ging, werd dit onbebouwde deel van het voormalige Paardenschor in de loop van 2003 en 2004 hersteld. Het gebied werd afgegraven met een flauwe helling tussen 5 m TAW en de hoogte van het voorliggende slik (ongeveer 4 m TAW), om zo een goede uitgangssituatie te creëren voor schorontwikkeling. Aansluitend op de dijk langs het schor van Ouden Doel werd een nieuwe dijk op Sigmahoogte (11 m TAW) aangelegd, en de oude Sigmadijk werd afgegraven.



Figuur 1. Studiegebied Paardenschor vier jaar na inrichting (orthofoto 31/01/2009).

2.2.2 Lillo Potpolder

De Potpolder, net stroomopwaarts van het Fort van Lillo, ontstond ooit door een dijkdoorbraak (Mertens *et al.*, 2024). Het gebied werd in het begin van de jaren '60 met een verhoogde zomerdijk van de Schelde afgesloten en opgespoten met zand, en fungeerde nadien meermaals als gronddepot tijdens grote infrastructuurwerken. De ontpoldering van het gebied werd in 2005 opgenomen in het Meest Wenselijke Alternatief van het Geactualiseerde Sigmaplan.

Midden augustus 2010 werd er gestart met de werken. Het gebied werd afgegraven tot een niveau tussen 4,0 en 4,5 m TAW (ofwel: 0,5–1 m onder het gemiddeld hoogwater) en omgeven door een volwaardige Sigmadijk op 11 m TAW. Een deel van de oude Scheldedijk bleef behouden als schiereiland, en is toegankelijk via een landbrug op 8 m TAW. Deze landbrug splitst het getijdengebied dus in twee delen. De twee compartimenten werden op een andere manier ingericht met als bedoeling om eventuele verschillen in estuariene ontwikkeling op te volgen en te evalueren.



Het westelijke compartiment werd volledig ontpolderd door de voorliggende dijk af te graven tot het niveau van het voorliggend slik. Het water kan bij vloed over de gehele breedte instromen. Het oostelijke compartiment werd aangetakt via een bres, en de bestaande dijk werd afgegraven tot 5,5–5,6 m TAW. De in- en uitstroom van het water verloopt bijgevolg (meestal) via de bres en daarom beschouwen we dit gebied eerder als een aantakking. Enkel bij hoog springtij stroomt het water gedurende een korte periode ook over het dijkrelict in en uit het gebied. In beide compartimenten werd een kreekaanzet van 1 à 1,5 m diep gegraven ('overdiepte') om de ontwikkeling van een dendritisch krekensysteem te bevorderen. De werken waren voltooid midden september 2012.



Figuur 2. Studiegebied Lillo Potpolder kort na de inrichting (orthofoto 10/03/2014).

2.2.3 Burchtse Weel

Naar aanleiding van het verlies van 6 à 7 ha slik en schor door de aanleg van de Oosterweeltunnel werd de Burchtse Weel heringericht (Van den Bergh *et al.*, 2020). Deze voormalige weel, in de 19e eeuw ontstaan door een dijkdoorbraak, fungeerde voor de inrichtingswerkzaamheden als recreatiegebied (Maris *et al.*, 2021). Het primaire doel van deze inrichting was de ontwikkeling van estuariene natuur met een gradiënt van 100 tot 0% overspoeling. Het gebied werd daartoe aangetakt via 4 kokers van elk 1,5 m breed en 3,3 m hoog, met de vloerhoogte op -0,3 m TAW en het plafond op 3,0 m TAW.

Om permanente waterafvoer voor de gemeente Zwijndrecht via de Laarbeek te verzekeren, werd in het noorden van het plangebied een bufferbekken aangelegd, in combinatie met een pompstation en gravitaire afwatering (afvoerduiker met terugslagklep) tussen het bufferbekken en de Burchtse Weel.

Het gebied trad in werking op 11 januari 2011, maar deze datum werd gevolgd door een aantal onvoorziene omstandigheden en maatregelen:

- Van 15 juli 2011 tot 22 maart 2013 bleef de nieuwe sluisconstructie gesloten, wegens technische problemen en noodzakelijke herstelwerken aan de oude uitwateringsluis.
- Ook van augustus tot november 2017 bleef de sluisconstructie gesloten omwille van schade aan een terugslagklep van het bufferbekken.

- Tijdens lange perioden van droogte bleek de afwateringsgeul dicht te slibben, waardoor de gravitaire afvoer van de Laarbeek via de Burchtse Weel in het gedrang kwam (Maris *et al.*, 2021). In het najaar van 2018 en 2019, telkens na een droge zomer, werden daarom baggerwerken uitgevoerd om de afwateringsgeul doorheen de slikken in Burchtse Weel open te houden. De in- en uitwateringsconstructie bleef in die periode open en het gebied bleef onder getij-invloed.
- Om herhaalde dure baggerwerken in de toekomst te vermijden, werden in december 2019 terugslagkleppen geïnstalleerd onderaan de in- en uitlaatkokers. Het water stroomt sindsdien pas binnen vanaf 2,1 m TAW in plaats van bij het keren van het tij. Op die manier wordt vermeden dat de onderste waterlagen, die de hoogste sedimentconcentratie meedragen, het gebied binnenstromen. Sindsdien is de Burchtse Weel onderhevig aan een GGG regime en niet langer als een aantakking te beschouwen.



Figuur 3. Studiegebied Burchtse Weel, met het bufferbekken in de noordwesthoek (orthofoto 24/05/2015).

Om bovenstaande redenen beschouwen we het gebied enkel in de periode 2014-2018 als representatief voor een aantakking. Het laatst beschouwde DTM is gebaseerd op LiDAR-metingen in het voorjaar van 2018, vóór de eerste baggerwerken in het najaar van 2018 en de inwerkingtreding van het GGG regime eind 2019. Al dient ook binnen het tijdvak 2014-2018 rekening gehouden te worden met de periode van 4 maand in 2017 toen het gebied niet onder invloed van het getij stond.

2.2.4 Fasseit

Als één van de laatste stappen in de inrichting van het gecontroleerd overstromingsgebied 'Polders van Kruikeke' werd in 2017 het studiegebied Fasseit ontpolderd. Dit gebied werd tijdens de inrichting van de Kruikeekse polder gebruikt als zandstock. De zuidhoek van Fasseit wordt overigens nog steeds voor dit doeleinde gebruikt.

De voorliggende dijk werd over een lengte van ruim 200 m afgegraven tot op ongeveer 5,5 m TAW (grofweg de hoogte van het voorliggende schor), en er werd een afwateringsgeul gegraven van 10 meter breed, met een overdiepte aan landzijde. Hierdoor is ook Fasseit te beschouwen als een aantakking, eerder dan een volledige ontpoldering. Het gebied zelf werd

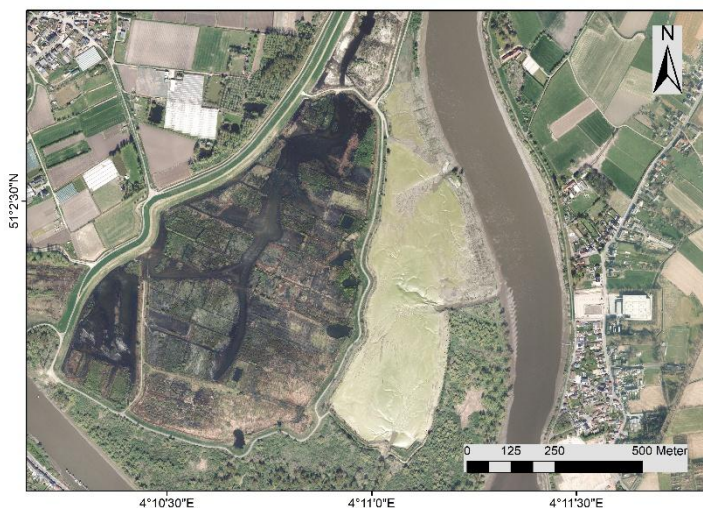
afgegraven en genivelleerd op een hoogte van 4,8–5,0 m TAW, met behoud van de zandstock in de zuidhoek, en een depressiezone langs de noordrand van het gebied (zie Figuur 4).



Figuur 4. Studiegebied Fasseit kort na ontpoldering (orthofoto 19/04/2018).

2.2.5 Groot Schoor (Hamme)

Dit gebied, een voormalige akker die als gecontroleerd overstromingsgebied fungeerde, werd ontpolderd in juli 2021 door de bestaande dijk over een afstand van 1,5 km te verlagen van 7 m TAW tot 4,5 m TAW (grofweg het niveau van de polder). Voor een goede getjuitwisseling en drainage werden 3 kreekaanzetten gegraven, één in de noordelijke helft van het gebied en twee ter hoogte van bestaande kreek in het voorliggende schor in de zuidelijke helft.



Figuur 5. Studiegebied Groot Schoor (Hamme) kort na ontpoldering, in de orthofoto te herkennen als de kale slikvlakte, met in het westen het aanliggende GOG-GGG Wal-Zwijn (orthofoto 17/04/2022).

Tussen het Groot Schoor en het aanliggende Sigmagebied Wal-Zwijn werd een overlooppdijk aangelegd op 6,7–6,9 m TAW. Wal-Zwijn werd ingericht als een GOG-GGG, en is pas sinds oktober 2025 operationeel. De werken in Groot Schoor en Wal-Zwijn werden mede gefinancierd door het Europese project *LIFE Sparc*.

2.3 STUDIEPERIODE

Op basis van verkennende analyses bleek er wat ruis te zitten op de DTM's, zowel qua hoogteligging (het DTM van 2020 te Lillo bijvoorbeeld; zie Mertens *et al.*, 2024), maar evengoed zijn er van jaar tot jaar lichte verschuivingen merkbaar in het XY-vlak. Om de ruis inherent aan de DTM's enigszins te onderdrukken werd ervoor gekozen om met een interval van meerdere jaren te werken en de waarden voor tussenliggende jaren te interpoleren, dit zowel voor de gemiddelde ophoging als voor de hoogteligging. Voor het Paardenschor, Lillo en het Groot Schoor (Hamme) werd geopteerd voor een interval van 3 jaar in de periode 2007-2022, 2013-2022 en 2022-2025 respectievelijk. Voor de Burchtse Weel kon enkel de periode 2014-2018 als representatief worden beschouwd (zie §2.2.3) en gebruikten we een interval van 2 jaar. Tot slot vertoonde het DTM van 2018 in Fasseit heel wat ontbrekende waarden. Voor dit specifieke gebied werd daarom de periode 2019-2023 beschouwd, ook hier met een interval van 2 jaar.

2.4 WATERSTANDEN EN SPM GEGEVENS

De belangrijkste sturende variabelen voor sedimentatie op gebiedsniveau zijn de gemiddelde hoogwaterdiepte en het gehalte aan zwevende stof (SPM) van de instromende getijgolf (Vandenbruwaene *et al.*, 2011 & 2015).

De gemiddelde hoogwaterdiepte wordt afgeleid uit het verschil tussen de hoogteligging en de hoogwaterstanden. De benodigde getijddata werden verkregen via de HIC databank (Waterbouwkundig Laboratorium, 2025), die geraadpleegd werd via het R package *HICwebservices* (Brackx, 2020). De studiegebieden werden elk gekoppeld aan het dichtstbijzijnde meetstation (of tijpost):

- Paardenschor ~ Prosperpolder
- Lillo West & Oost ~ Liefkenshoek
- Burchtse Weel ~ Antwerpen
- Fasseit ~ Hemiksem
- Groot Schoor (Hamme) ~ Sint-Amands

Uit Figuur 6 blijken de laagwaterstanden ter hoogte van de tijposten langsheen de Beneden-Zeeschelde heel dicht bij elkaar te liggen (met een 50-percentielwaarde rond 0 m TAW). De laagwaterstanden in Sint-Amands vallen een stuk hoger uit (0,33 m TAW). De hoogwaterstanden nemen toe in stroomopwaartse richting, als gevolg van de opstuwung van de vloedgolf. Zo bedraagt de 50-percentielwaarde van de hoogwaters in de periode 2007-2025 ter hoogte van Prosperpolder 5,18 m TAW, en neemt deze toe tot 5,62 m TAW in Sint-Amands.

Per studiegebied werd de gemiddelde hoogwaterdiepte h berekend aan de hand van de volgende formule (Vandenbruwaene *et al.*, 2015):

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

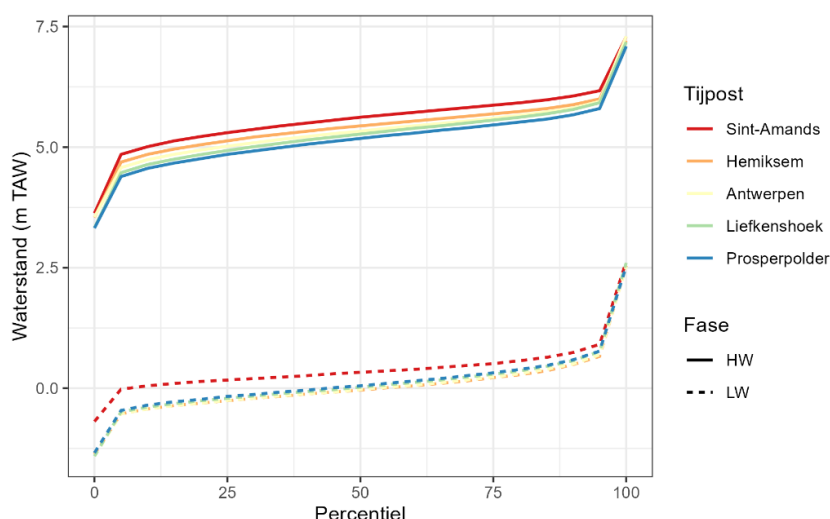
Hierin is:

- h : de gemiddelde hoogwaterdiepte (m)

////////////////////////////////////

- k : het aantal getijcycli gedurende de beschouwde tijdsperiode
- H_j : het hoogwaterpeil (m TAW) voor getij j
- z_j : de platformhoogteligging (m TAW) voor getij j

De gemiddelde hoogwaterdiepte werd berekend per gebied en per jaar. De platformhoogteligging staat gelijk aan de gemiddelde DTM-hoogteligging van het studiegebied tijdens de beschouwde periode (zie §3.1 en Figuur 7). Aangezien er niet voor elk jaar een platformhoogteligging beschikbaar was, werd voor deze parameter gebruik gemaakt van geïnterpoleerde waarden (zie ook §2.3).



Figuur 6. Percentiel-verdeling van de hoog- en laagwaterstanden op de 5 beschouwde tijposten in de periode 2007-2025.

Data voor SPM (*suspended particulate matter*, ofwel het gehalte aan zwevende stof in het oppervlaktewater) werden verkregen via ScheldeMonitor (www.scheldemonitor.be). We maakten enkel gebruik van de datasets *Monitoring physical-chemical water quality in the Zeeschelde* (OMES) en *Surface water monitoring network of the Flemish Environment Agency* (VMM). Voor de geselecteerde data werd vervolgens de mediaan bepaald, zowel (a) per gebied voor de volledige studieperiode (zie Tabel 2) als (b) per gebied en per jaar binnen de studieperiode.

Tabel 2. Berekende mediane SPM waarden per studiegebied op basis van de ScheldeMonitor data.

Studiegebied	Meetstations	Periode	Mediane SPM (mg/l)
Paardenschor	Grens / 154100	2007 - 2022	41,1
Lillo West & Oost	Liefkenshoek /157000	2013 - 2022	62,8
Burchtse Weel	Antwerpen / 160200 Kruikebeke / 160800	2014 - 2018	84,0
Fasseit	Bazel / 162000	2019 - 2023	97,6
Groot Schoor (Hamme)	Baasrode / 163500	2022 - 2025	69,9

2.5 SEDIMENTATIE

Door de gerichte afbakening van de studieperiodes per gebied werden al te grote oppervlaktes aan ontbrekende DTM-waarden binnen onze studiegebieden vermeden, bijvoorbeeld voor Fasseit. Ter invulling van de nog resterende ontbrekende waarden werd elk DTM stapsgewijs geïnterpoleerd, en meer specifiek op basis van de waarden van alle rastercellen binnen een straal van 5 meter. Dit gebeurde aan de hand van een ArcGIS tool ontwikkeld door Oberon Geunens en Amber Mertens. Per gebied en per jaar werd vervolgens een gemiddelde hoogteligging geëxtraheerd. Het verschil in gemiddelde hoogteligging tussen 2 opeenvolgende DTM's is vervolgens onze maat voor sedimentatiesnelheid.

2.6 OPHOGINGSMODEL

De responsvariabele van ons empirisch ophogingsmodel is sedimentatiesnelheid, uitgedrukt in meter per jaar (m/jaar). De belangrijkste sturende variabelen voor sedimentatie zijn de gemiddelde hoogwaterdiepte en de SPM van het instromende water (zie §2.4). Daarnaast kan ook de inrichtingsvorm een bepalende rol spelen (Mertens *et al.*, 2024). Gezien het gebrek aan voldoende replica's per inrichtingsvorm namen we deze parameter echter niet mee als factor. Anderzijds werd studiegebied a priori opgenomen als *random effect*.

We gingen dus uit van een *mixed model* met een *random slope* voor hoogwaterdiepte per studiegebied. Er werd gekozen voor een *random slope* omdat men ervan uit kan gaan dat het sedimentatieproces in elk gebied anders zal zijn, en dus sneller of trager zal verlopen als gevolg van vooralsnog onbekende of moeilijk te karakteriseren processen. De regressie werd bovendien door het nulpunt geforceerd, zowel voor het *fixed* als het *random* modelgedeelte, hierbij aannemend dat geen sedimentatie noch erosie plaatsvindt wanneer een gebied niet langer overstroomt.

In een verkennende fase testten we meerdere varianten op het 'full model', waaronder een lineair versus een exponentieel verband tussen hoogwaterdiepte en ophogingsnelheid (Temmerman *et al.*, 2003a; Vandenbruwaene *et al.*, 2011). Uit deze verkennende fase bleek ook dat de mediane SPM waarde per gebied een betere fit gaf vergeleken met de mediane SPM per jaar en per gebied. Als 'full model' kwamen we uiteindelijk uit op het volgende lineaire *mixed model*:

$$\Delta S \sim 0 + D_HW + SPM + (0 + D_HW | Gebied)$$

Hierin duidt het deel tussen haakjes het *random* modelgedeelte aan, en geven de nultermen aan dat de regressies door het nulpunt geforceerd worden (overeenkomstig de syntax van het R package *lme4*). Verder is:

- ΔS : Sedimentatiesnelheid (m/jaar)
- D_HW : Gemiddelde hoogwaterdiepte (m)
- SPM : Mediaan gehalte aan zwevende stof (mg/l) in het oppervlaktewater
- $Gebied$: Studiegebied

De achterwaartse modelselectie gebeurde aan de hand van het *Akaike Information Criterion* (AIC). Dit criterium geeft een schatting van de (relatieve) kwaliteit van een model, en kan dus worden gebruikt om verschillende modellen met elkaar te vergelijken. Voor de iteraties en coëfficiënt-schattingen maakten we gebruik van het R package *lme4* (Douglas *et al.*, 2015).

2.7 R-SCRIPTS

Alle R-scripts gebruikt voor deze studie zijn beschikbaar op https://github.com/nicolasvanermen/GitScripts_Sedimentation

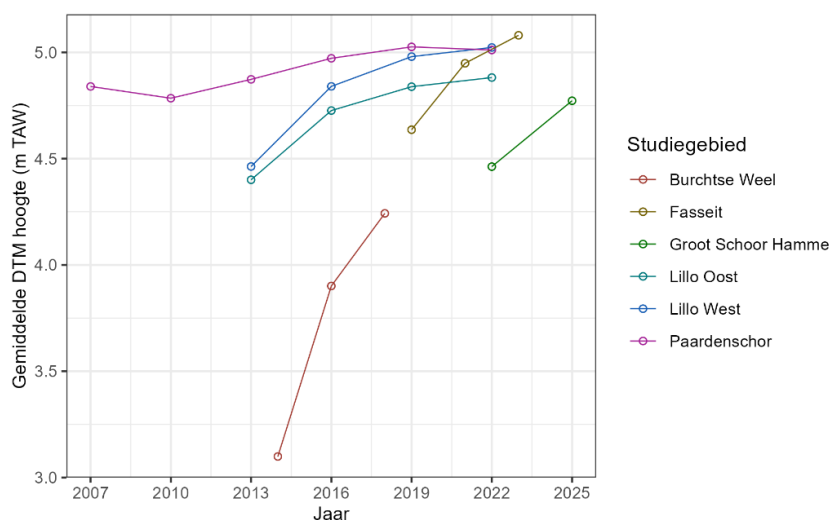


3 RESULTATEN

3.1 EVOLUTIE IN GEMIDDELDE HOOGTELIKKING

Een gebied dat ophoogt door sedimentatie overspoelt almaar minder vaak, waardoor ook de sedimentatiesnelheid zelf gaandeweg vertraagt. Deze feedback-loop zorgt voor een asymptotisch verloop van de hoogteligging doorheen de tijd, wat mooi wordt geïllustreerd door de evolutie in beide deelgebieden te Lillo (Figuur 7). Voor de Burchtse Weel, Fasseit en Groot Schoor lijkt het asymptotisch plafond binnen de beschouwde periodes nog niet bereikt. Opvallend is de sterk vergelijkbare ophoging die werd geobserveerd in Lillo West en Lillo Oost in de periode 2013-2016 en in het Groot Schoor (Hamme) in de periode 2022-2025. Met een gemiddelde initiële hoogteligging van om en bij de 4,5 m TAW werd in deze drie gebieden op drie jaar tijd een gemiddelde ophoging van 31 tot 38 cm vastgesteld.

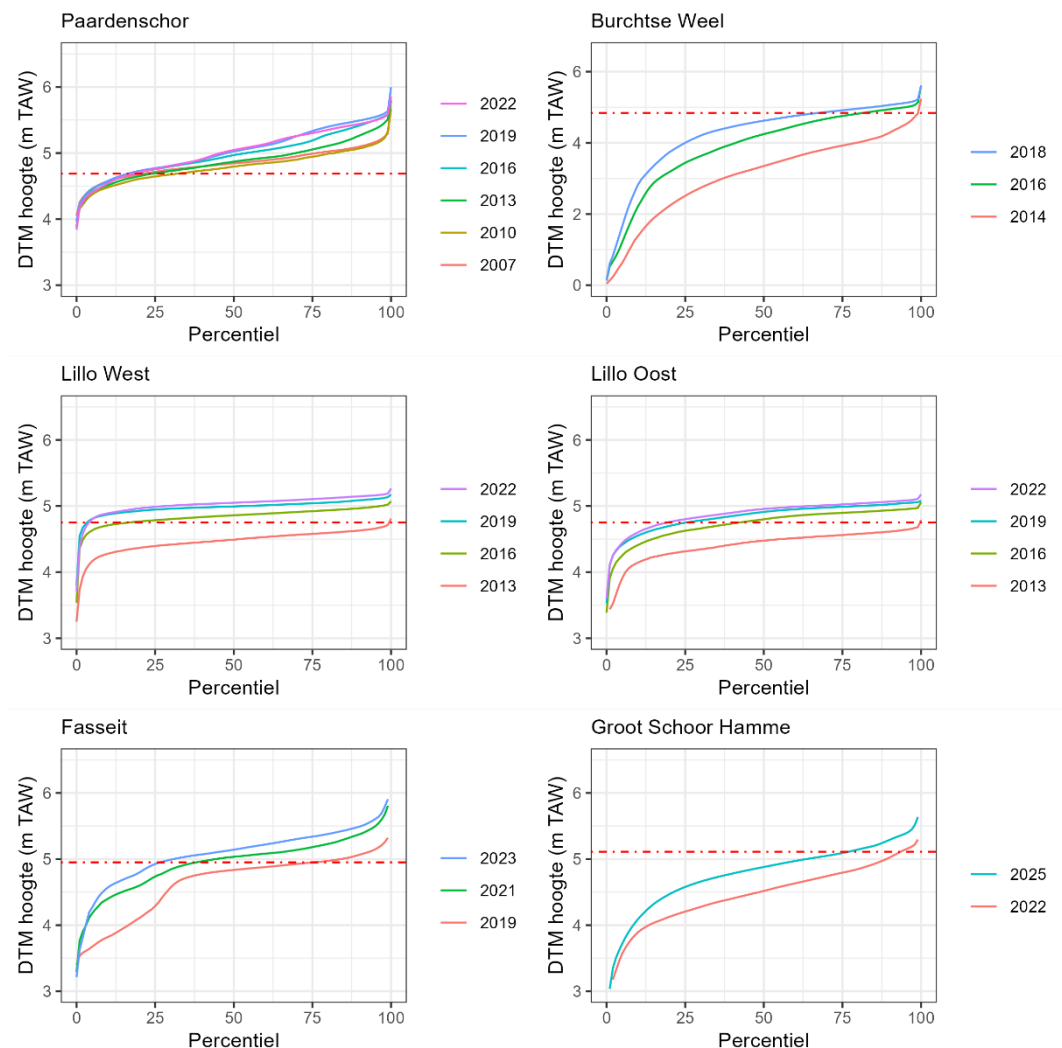
Het Paardenschor toonde een lichte afname in DTM-hoogte gedurende twee tijdsintervallen (2007-2010 & 2019-2022). Het is echter de vraag of daadwerkelijk erosie heeft plaatsgevonden of dat de gedaalde hoogteligging eerder gelegen is aan ruis in de DTM's. Zo berekenden Spanoghe *et al.* (2010) voor het Paardenschor een gemiddelde sedimentatie van 3,4 cm per jaar in de periode 2006-2009. Deze berekening gebeurde aan de hand van op het INBO ontwikkelde DTM's, die gebaseerd waren op een groot aantal theodoliet-metingen doorheen het gebied. Tegelijk werd in diezelfde periode sedimentatie vastgesteld in 5 van de 6 sedimentatie-erosieplots. Het zesde proefvlak met (lichte) erosie was echter in een kreek gelegen en toonde daarom een atypisch en vrij erratisch verloop in hoogteligging (Speybroeck *et al.*, 2011). Tot slot werd op basis van de DTM's van 2007 en 2010 een afname van 20 cm vastgesteld in de hoogte van de sigmadijk langsheen het Paardenschor. Hiervoor corrigeren zou de negatieve sedimentatiewaarden kunnen opheffen. Anderzijds bieden dijkhoogtes geen absolute houvast aangezien deze nog gedurende lange tijd na aanleg kunnen 'inklinken'. Hoe dan ook zijn er meerdere redenen om aan te nemen dat het DTM van 2007 voor het Paardenschor onbetrouwbaar is en dit data-punt werd daarom uit de analyse geweerd.



Figuur 7. Evolutie in gemiddelde hoogteligging (m TAW) per gebied op basis van DTM's.

3.2 EVOLUTIE IN HET AANDEEL SUPRALITTORAAL EN SCHOR

Wanneer we per DTM-raster de evolutie in de verdeling van percentielwaarden doorheen de tijd nagaan, springen een aantal zaken in het oog (Figuur 8). Beide deelgebieden in Lillo hogen bijvoorbeeld opvallend uniform op. Los daarvan verloopt de ophoging in Lillo Oost duidelijk minder snel. In de Burchtse Weel en Fasseit verloopt de ophoging minder gelijkmatig, en door de snellere ophoging in de laagst gelegen delen (vooral opvallend in Fasseit) vindt in beide gebieden een algemene uitvlakking plaats. Het meest afwijkende patroon zien we in Paardenschor, waar de sedimentatie het snelst verloopt ter hoogte van de hoger gelegen delen. Dit is allicht en op zijn minst deels het gevolg van een sterkere sedimentatie ter hoogte van reeds begroeide zones, zoals ook opgenomen in het sedimentatiemodel van Vandenbruwaene *et al.* (2015). Tegelijkertijd verloopt de sedimentatie in de laagste gelegen delen (percentielwaarden 0 tot 25) relatief traag in vergelijking met andere gebieden.



Figuur 8. Percentiel-verdeling van de DTM-waarden per gebied en per jaar, met de grens van het supralittoraal (hoogteligging met een overstroomingsfrequentie van 85%) gemarkeerd als een rode stippellijn.

Bovenstaande Figuur 8 toont ook de grens van het supralittoraal, meer bepaald de hoogte met een overspoelingsfrequentie van 85%. Deze grenshoogte werd bepaald aan de hand van de

peilgevens opgemeten gedurende de laatste 10 jaar (2015-2025) in het dichtstbijzijnde meetstation (zie §2.4). Uitgaande van deze grenswaarde schommelt het aandeel supralittoraal in het Paardenschor sinds 2013 rond de 80%, terwijl dit percentage in 2010 nog 68% bedroeg (Tabel 3). In Lillo is het aandeel supralittoraal in 10 jaar tijd gestegen van minder dan 1% tot respectievelijk 96% en 81% in het westelijke en oostelijke deel. Ook in de Burchtse Weel en Fasseit groeide het aandeel supralittoraal snel aan tot 33% en 73% respectievelijk (Tabel 4).

Tabel 3 & Tabel 4 tonen ook de schorbedekkingsgraad, en dit op basis van de ecotopenkaarten van 2019 en 2022. Deze werden aangemaakt in het kader van [MONEOS](#) (zie bijvoorbeeld Van Braeckel & Mertens, 2021). Er blijkt een sterke discrepantie te zijn tussen het aandeel supralittoraal op basis van de 85% overspoelingsfrequentie en de percentages schor op de ecotopenkaarten. Zones die reeds de theoretische schorhoogte hebben bereikt maar nog niet begroeid zijn met vegetatie worden bij de ecotopenkartering namelijk ingekleurd als potentiële pionierszone.

Tabel 3. Evolutie in het percentage supralittoraal binnen de studiegebieden Paardenschor, Lillo Potpolder en Groot Schoor (Hamme) op basis van de 85% overspoelingsfrequentie, met in het rood het aandeel schor (= begroeid intertidaal) op basis van de ecotopenkaart van 2022.

	2010	2013	2016	2019	2022	2022	2025
Paardenschor	68%	76%	82%	84%	82%	53%	
Lillo West		0,2%	84%	97%	96%	34%	
Lillo Oost		0,1%	58%	75%	81%	23%	
Groot Schoor (Hamme)					7%	1%	23%

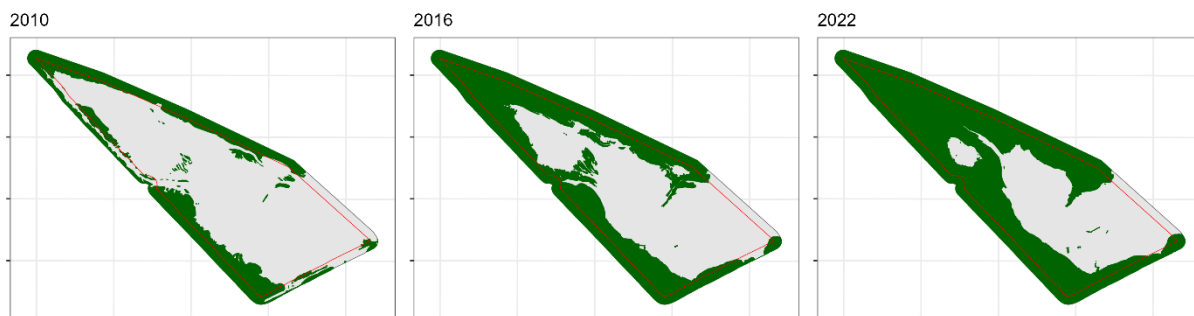
Tabel 4. Evolutie in het percentage supralittoraal binnen de studiegebieden Burchtse Weel & Fasseit op basis van de 85% overspoelingsfrequentie, met in het rood het aandeel schor (= begroeid intertidaal) op basis van de ecotopenkaarten van 2019 & 2022.

	2014	2016	2018	2019	2019	2021	2022	2023
Burchtse Weel	1%	19%	33%	5%				
Fasseit					24%	62%	65%	73%

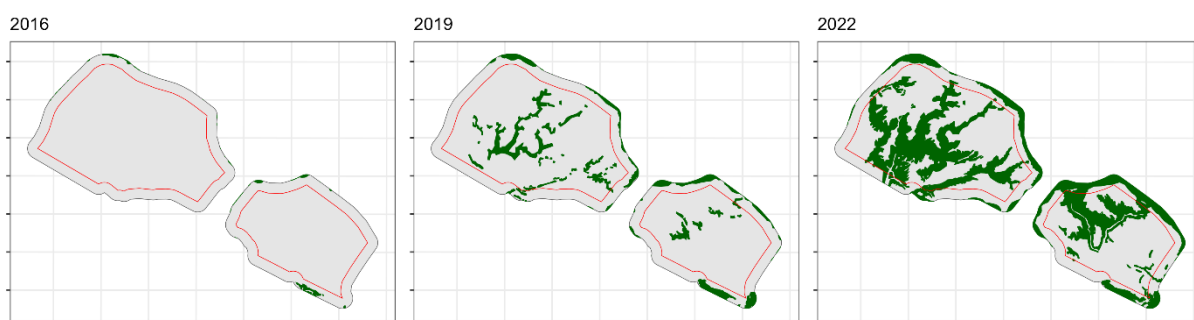
Behalve in Fasseit loopt de oppervlakte schor in elk gebied duidelijk achter op de theoretisch geschikte oppervlakte. Gezien de relatief recente inrichting van onze studiegebieden ligt dit echter in lijn van de verwachting. De kolonisatie van potentiële pionierszones hangt namelijk deels af van zogenaamde 'windows of opportunity'. Pas wanneer de periode tussen opeenvolgende overstromingen voldoende lang aanhoudt, biedt dit kansen voor pioniersoorten, niet enkel om te kiemen maar ook om stand te houden en zich blijvend te vestigen. Typische pioniersoorten zijn zeeaster (*Aster tripolium*), zeekraal (*Salicornia spec.*) en spiesmelde (*Atriplex prostrata*). Daarnaast kan schor ook aangroeien via vegetatieve uitbreiding, waarbij planten zoals riet (*Phragmites australis*) met behulp van wortelstokken vanuit de rand van het schor het slik koloniseren (Van Ryckegem *et al.*, 2021). Beide processen, vegetatieve uitbreiding en kolonisatie door pioniersoorten, worden mooi geïllustreerd door de uitbreiding van de schorvegetatie in respectievelijk het Paardenschor en de Potpolder te Lillo. De evolutie van het Paardenschor wordt gekenmerkt door een inwaartse uitbreiding van het schor, met een inkrimping van de centrale slibvlakte tot gevolg (Figuur 9). In Lillo daarentegen verloopt de



uitbreiding van het schor duidelijk vanaf de kreekranden, en dus van binnen naar buiten (Figuur 10).



Figuur 9. Uitbreiding van de schorvegetatie in het Paardenschor op basis van de ecotopenkaarten (eigen gegevens INBO); de percentages in Tabel 3 & Tabel 4 zijn gebaseerd op de oppervlaktes binnen de rode perimeter (inwaartse buffer van 15m, zie §2.2).



Figuur 10. Uitbreiding van de schorvegetatie in Lillo op basis van de ecotopenkaarten (eigen gegevens INBO); de percentages in Tabel 3 & Tabel 4 zijn gebaseerd op de oppervlaktes binnen de rode perimeter (inwaartse buffer van 15m, zie §2.2).

3.3 OPHOGINGSMODEL

In onze zoektocht naar een geschikt ééndimensionaal ophogingsmodel kwamen we uit op een lineair *mixed model* met gemiddelde hoogwaterdiepte en mediane SPM als (potentiële) verklarende variabelen in het *fixed* gedeelte, en een *random slope* voor hoogwaterdiepte per studiegebied. Op basis van achterwaartse selectie met AIC als criterium bleek SPM echter geen significante bijdrage te leveren aan het model, en deze parameter werd niet behouden. Ondanks het beperkte aantal parameters geeft het resulterende model een goede fit, met een R^2 van 89%.

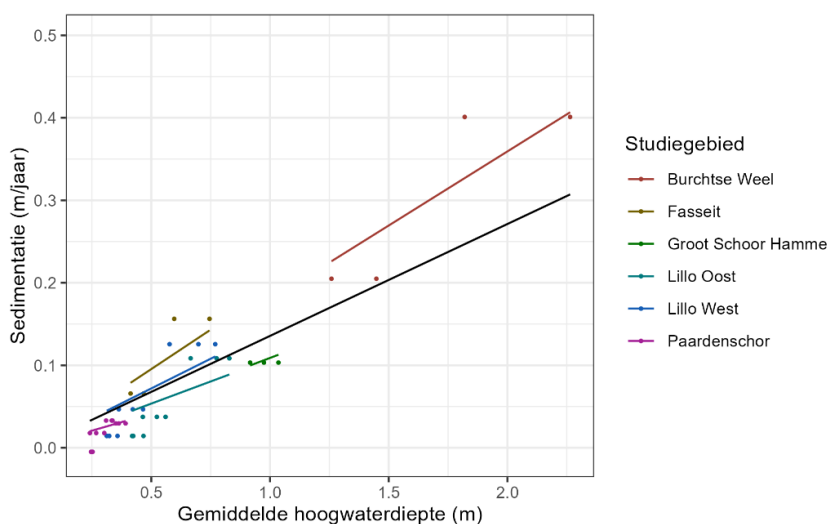
Tabel 5. Modelsamenvatting van het ééndimensionaal ophogingsmodel, met de gemiddelde hoogwaterdiepte uitgedrukt als D_HW.

Fixed effecten	Coëfficiënt-schatting	Standaard-fout	t-waarde
D_HW	0,1357	0,0205	6,628
Random effecten	Variantie	Standaard-deviatie	
D_HW Gebied	0,0022	0,0466	
Residual	0,0008	0,0276	

Aantal observaties: 41, groepen (Gebied): 6

Uit de modelsamenvatting (Tabel 5) blijkt de geschatte coëfficiënt van het *fixed* modelgedeelte 0,1357 te bedragen, wat betekent dat er voor een toename in gemiddelde hoogwaterdiepte van 1 m een bijkomende sedimentatie van 13,57 cm per jaar wordt verwacht. Omdat we het lineair model door het nulpunt 'forceerden' is er geen intercept¹.

Aangezien elk gebied zijn specifieke karakteristieken heeft (en daarom mogelijk sneller of trager ophooft), namen we ook een *random slope* mee voor hoogwaterdiepte per studiegebied. Figuur 11 toont zowel de algemene modelvoorspelling, als de voorspelling op basis van de geschatte *random slopes*. Zoals verwacht op basis van Figuur 7 wordt voor Lillo West een sterkere sedimentatie voorspeld vergeleken met Lillo Oost. Verder blijkt dat de sedimentatie in de Burchtse Weel en Fasseit sneller verloopt vergeleken met het algemeen modelgedeelte. Allicht niet toevallig zijn dit de 2 gebieden waar de SPM van het instromende water het hoogst is (zie Tabel 2).



Figuur 11. Voorspelde sedimentatiesnelheid (m/jaar) in functie van de gemiddelde hoogwaterdiepte (*fixed* model gedeelte - zwarte lijn) en de voorspellingen per gebied (inclusief de *random slopes* - gekleurde lijnen).

3.4 SIMULATIE

Teneinde het ontwikkelde model toe te kunnen passen op een tweedimensionaal DTM werden meerdere pistes onderzocht. Figuur 12 illustreert enkele stappen binnen deze zoektocht, met Burchtse Weel als voorbeeldgebied. Het DTM van 2014 fungeert hierin als de referentiesituatie, en dat van 2018 als validatie. Gezien de aard van de modellering was de eerste logische stap om het volledige DTM op te hogen met de voorspelde sedimentatie (strategie **a** in Figuur 12). Op die manier hogen de hoogst gelegen delen echter op een onrealistische manier op, zelfs indien deze niet of nauwelijks overstromen. Een andere optie was om de sedimentatie te voorspellen en door te rekenen per percentiel-interval, om zo tot een nieuwe percentiel-verdeling te komen (strategie **b** in Figuur 12). Maar hoewel er tijdens het sedimentatieproces altijd een zekere

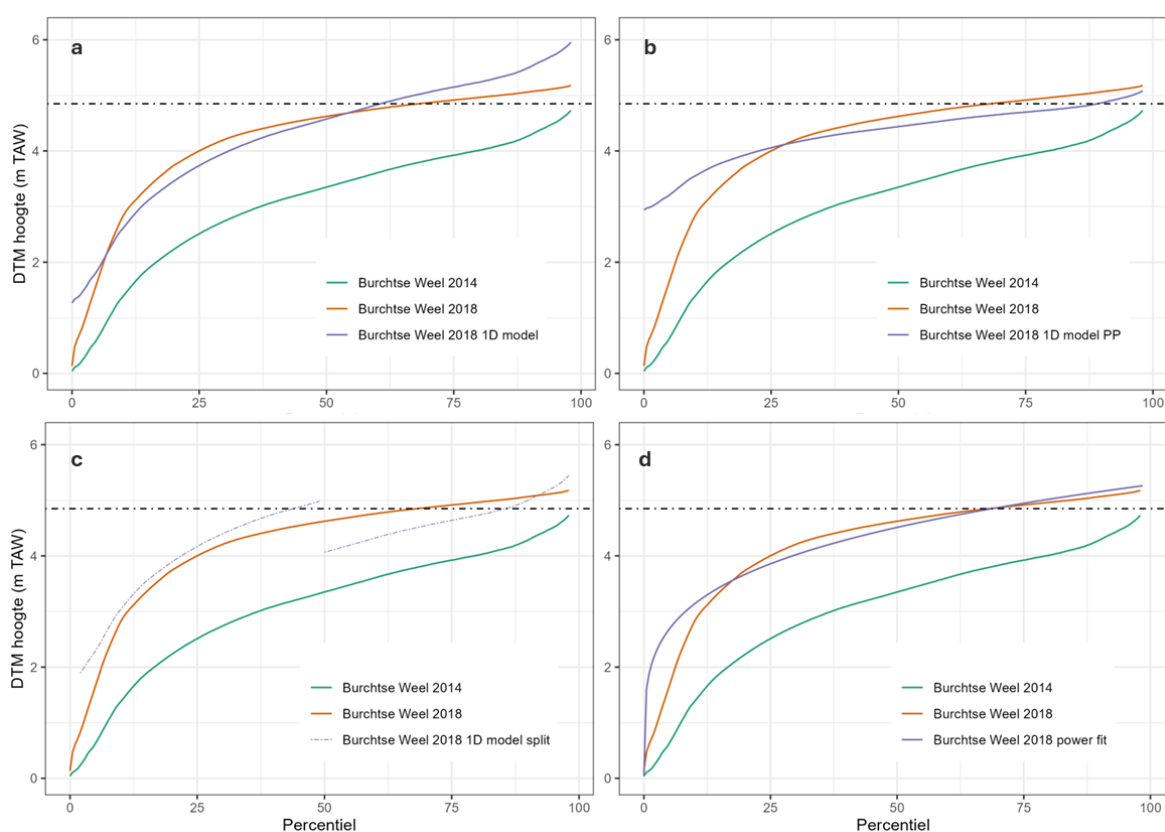
¹ In een eerdere versie van deze nota werd een *random intercept* model uitgewerkt, nog zonder Groot Schoor (Hamme) als studiegebied. De intercept- en coëfficiëntschatting stonden gelijk aan -0,0565 en 0,2306 respectievelijk. Dit voorlopige model werd toegepast in Vanermen *et al.* (in voorbereiding) & Vrebos *et al.* (2025).

afvlakking plaatsvindt, is de afvlakking na toepassing van deze strategie veel te uitgesproken, zeker ter hoogte van de lagere regionen van het DTM. Beide strategieën hebben overigens te leiden onder een overschatting van de sedimentatie ter hoogte van het allerlaagste punt. Merk op dat dit punt naar alle waarschijnlijkheid samenvalt met een afvoerkreek, alwaar de verwachte sedimentatie door de hoge dynamiek eerder beperkt zal zijn.

Om aan bovenstaande bezorgdheden tegemoet te komen, kwamen we uit bij de volgende methodiek:

- het DTM wordt opgedeeld in een lagere en hogere helft op basis van de mediaan, en de sedimentatie wordt geschat en uniform doorgevoerd voor elk van deze helften (zie tussenstap **c** in Figuur 12)
- we fitten een machtsfunctie doorheen het resultaat van de bovenstaande tussenstap, en forceren de fit bovendien doorheen het laagste punt van de DTM van het referentiejaar (uitkomst **d** in Figuur 12).

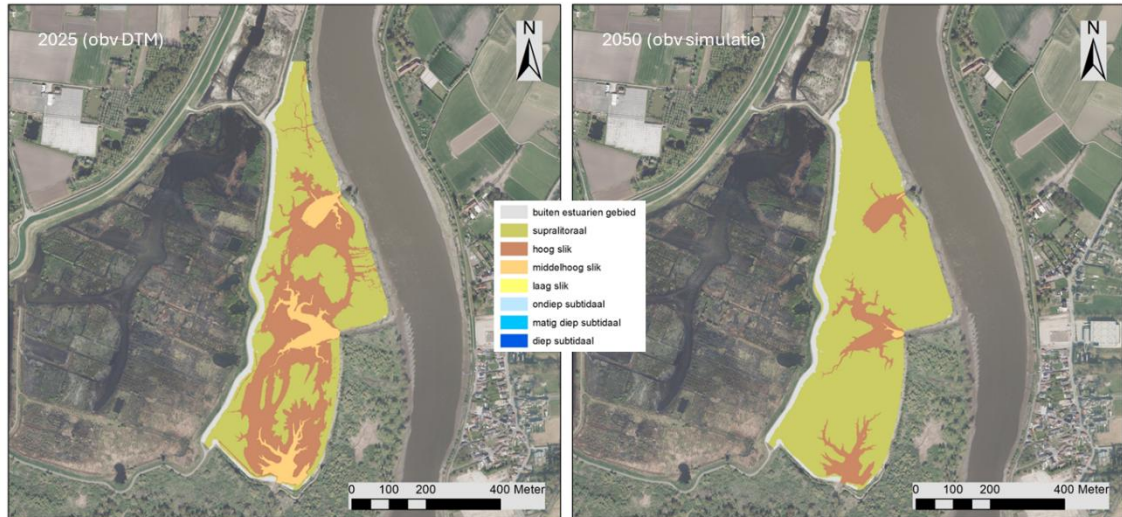
De eerste stap vermijdt onrealistisch hoge sedimentatie in de hogere regionen, terwijl de tweede stap een al te uitgesproken afvlakking uit de weg gaat en sedimentatie ter hoogte van het drainagepunt vermijdt. Voor de meeste gebieden resulteerde deze methode in de beste benadering van de percentielverdeling van het DTM in het validatiejaar.



Figuur 12. Percentiel-verdelingen van geobserveerde en gesimuleerde DTM's ter illustratie van enkele mogelijke strategieën (**a**, **b** & **d**) om het 1D sedimentatiemodel toe te passen op een bestaand DTM; merk op dat **c** een tussenstap vormt richting uitkomst **d**; de donkere puntstreeplijn wijst de theoretische grens tussen slijk en schor aan (hoogteligging met een overstromingsfrequentie van 85%).



Deze methode werd ook reeds toegepast in het kader van *LIFE Sparc*. Binnen dit project werden fysiotoopenkaarten geproduceerd voor acht Sigmagebieden, enerzijds voor de (huidige) referentiesituatie en anderzijds voor de (verwachte) situatie in 2050, rekening houdend met ophoging door sedimentatie. Figuur 13 toont het resultaat voor het Groot Schoor in Hamme. Hieruit blijkt dat het gebied in het voorjaar van 2025 voor ongeveer de helft op schorhoogte lag. Door ophoging als gevolg van sedimentatie zou het grootste deel van het gebied op 25 jaar tijd naar schor moeten evolueren, en resteert enkel ter hoogte van de kreken nog slikhabitat (Vanermen *et al.*, in voorbereiding).



Figuur 13. Fysiotoopkaarten voor het Groot Schoor te Hamme, links op basis van het DTM van 2025 en rechts na toepassing van het sedimentatiemodel over een tijdspanne van 25 jaar.

4 DISCUSSIE

Dit rapport stelt de resultaten voor van een ééndimensionaal ophogingsmodel, dat werd gekalibreerd op basis van de waargenomen sedimentatie in zes ontpolderingen en aantakkingen over tijdspannes van 3 tot 12 jaar. Uit deze studie blijkt dat de gemiddelde hoogwaterdiepte de enige (significant) verklarende variabele is voor sedimentatiesnelheid, weliswaar in een model met een *random slope* voor hoogwaterdiepte per studiegebied. Het verband is bovendien lineair. Een exponentieel verband zoals eerder aangenomen bij gerichte sedimentatiestudies in de Notelaar en het Lippenbroek (Temmerman *et al.*, 2003a; Vandenbruwaene *et al.*, 2011) bood geen extra verklarende kracht. De verwachting was dat ook SPM bepalend zou zijn voor het voorspellen van sedimentatie. Zo veronderstelden Vandenbruwaene *et al.* (2015) een lineair verband tussen de ophogingsnelheid van een gebied en de omgevingsconcentraties van SPM. Dat we de invloed van SPM in deze studie niet statistisch hard konden maken, is mogelijk te wijten aan de variatie in type inrichting. Terwijl Paardenschor, Lillo West en Groot Schoor (Hamme) echte ontpolderingen zijn, stroomt het water in Lillo Oost en Fasseit meestal enkel via de dijkbes het gebied in en gebeurt de getij-uitwisseling in Burchtse Weel uitsluitend via vier kokers. Ook de gebieden zelf verschillen qua inrichting. Paardenschor, Lillo West en Lillo Oost werden afgewerkt met een flauwe helling, terwijl Fasseit eerder genivelleerd werd met behoud van enkele depressies langs de noordrand. De inrichtingshoogte lag in vijf van de zes gebieden tussen de 4 en 5 m TAW, terwijl Burchtse Weel vlak na inrichting heel wat lager gelegen was, met een gemiddelde hoogteligging van 2,6 m TAW in het voorjaar van 2012. Het is onze hypothese dat de geschatte *random slopes* het resultaat zijn van een samenspel tussen SPM, het type inrichting en (onbekende) gebiedskarakteristieken. Tot op zekere hoogte zijn de waargenomen onderlinge verschillen in *random slope* logisch. Zo hogen Burchtse Weel en Fasseit het snelst op van alle gebieden, en zijn dit net de gebieden met de hoogste SPM waarden in het langsstromende Scheldewater. De SPM waarden zijn er zelfs meer dan dubbel zo hoog vergeleken met die ter hoogte van het Paardenschor (Tabel 2). Daarnaast voorspelt het model voor Lillo West een snellere sedimentatie dan voor Lillo Oost, overeenkomstig de observaties. In het kader van een monitoringstudie rond de inrichting van de Potpolder te Lillo concludeerden Mertens *et al.* (2024) al dat een maximalisatie van getijuitwisseling leidt tot versnelde sedimentatie, als verklaring voor de snellere ophoging in Lillo West (ontpoldering) vergeleken met Lillo Oost (aantakking). Merk tot slot op dat het algemene effect van waterdiepte sterk overheerst op de verschillen tussen gebieden, en dat het model daarom ook toepasbaar is in andere gebieden.

Gezien de waargenomen snelle ophoging van onze studiegebieden kan gesteld worden dat de slikfase in ontpolderingen onvermijdelijk van relatief korte duur is, ongeacht de initiële hoogteligging. Dit heeft duidelijke implicaties met betrekking tot de bergingscapaciteit, de potentiële overlast door knijten en de ecologische waarde van ontpolderingen. Zo zijn er concrete oppervlakte doelstellingen voor slik als foerageergebied voor vogels en vissen, meer bepaald 500 ha bovenop het in 2005 reeds aanwezige areaal (Van den Bergh & Van Ryckegem, 2024). Maar ontpolderingen zullen op langere termijn dus voornamelijk het schorareaal ten goede komen.

Deze studie kadert in de uitbreiding en optimalisatie van de modeltrein, die werd ontwikkeld binnen het project *Integraal Plan* (IMDC, 2023). Deze modeltrein werd toentertijd gebruikt om de effecten van verschillende ingreeps scenario's onder wisselende randvoorwaarden met betrekking tot zeespiegelstijging en getijslag door te rekenen. Een aangepaste versie van deze modeltrein zal ook binnen het *Sigma*³ project gebruikt worden. Dit project heeft als doel om te



bestuderen hoe het Schelde-estuarium in de verdere toekomst en na implementatie van het Geactualiseerd Sigmplan duurzaam ingericht kan worden. De klimaatveranderingen gaan namelijk sneller dan verwacht ten tijde van de uitwerking van het Geactualiseerd Sigmplan in 2005, met belangrijke implicaties voor de veiligheid tegen overstromingen en de realisatie van de natuur- en milieudoelstellingen.

Wat betreft het veiligheidsaspect is sedimentatie bepalend voor de bergingscapaciteit van ontpolderingen en GOG-GGG's. De bathymetrie van het Schelde-estuarium vormt het startpunt voor de modeltrein en de hydrodynamische modellen. Het hier voorgestelde ophogingsmodel kan makkelijk ingebouwd worden in de modeltrein door de bathymetrie aan te passen op basis van gesimuleerde ophogingen, om zo meer betrouwbare voorspellingen te kunnen doen rond overstromingsrisico's.

Het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek (INBO) is binnen *Sigma*³ echter in de eerste plaats verantwoordelijk voor de doorrekening van ecologische effecten. Hiertoe ontwikkelde INBO het ECOTIDE modelpakket (Vanermen *et al.*, 2025), dat aan de hand van meerdere modules een brede evaluatie van de impact van inrichting-scenario's op het ecosysteem-functioneren van het Schelde-estuarium beoogt. Binnen het Schelde-ecosysteem spelen estuariene ecotopen en de bijhorende vegetaties een cruciale rol. Tegelijk worden het voorkomen, de verspreiding en de ontwikkeling van deze ecotopen in de allereerste plaats bepaald door de hoogteligging, en de hieruit voortvloeiende overstromingsfrequentie en droogvalduur. Met het oog op ecotopenkartering werd in dit rapport daarom ook een methode voorgesteld om het empirisch en ééndimensionaal ophogingsmodel toe te passen op een (tweedimensionaal) DTM. Deze methode werd reeds toegepast voor acht *LIFE Sparc* gebieden, waarbij we nieuwe DTM's genereerden door 25 jaar sedimentatie te simuleren. Op basis daarvan karteerden we voor elk gebied een toekomstige ecotopen-verspreiding (Vanermen *et al.*, in voorbereiding). De bruikbaarheid van de resultaten hangt in grote mate af van de aanwezigheid van krekens of kreekaanzetten in de gebruikte DTM's. De voorspellingen zijn het minst betrouwbaar wanneer deze nog niet aanwezig zijn, om de eenvoudige reden dat de sedimentatiemodule niet kan voorspellen hoe het krekensstelsel zich zal ontwikkelen. Anderzijds, indien wel reeds een krekensstelsel of kreekaanzet aanwezig is in het gebruikte DTM, blijken de resultaten zeer bruikbaar voor een inschatting van de veranderingen in hoogteligging en de verschuivingen in ecotoop-oppervlaktes. Bovendien hebben de inzichten uit het *LIFE Sparc* project ook tot een verfijning van het ophogingsmodel zelf geleid. Om de resultaten verder te verfijnen en een betere inschatting te maken van de tweedimensionale variatie in sedimentatie binnen een gebied, wordt in een vervolgfase idealiter toegewerkt naar een expliciet tweedimensionaal model dat extra parameters in rekening neemt. Het is bijvoorbeeld gekend dat begroeiing de sedimentatiesnelheid zal bevorderen (Vandenbruwaene *et al.*, 2015). Dit kwam ook in deze studie naar voor, gezien de specifieke evolutie van het DTM-profiel van het Paardenschor (Figuur 8), maar de factor begroeiing werd vooralsnog niet meegenomen omdat de meeste gebieden zich gedurende de studieperiode nog grotendeels in de slikfase bevonden. Uit een studie van Temmerman *et al.* (2003b) bleek voorts dat de sedimentatiesnelheid in twee studiegebieden (de Notelaar en het Paulinaschor) volgens dezelfde wetmatigheid correleerde met de afstand tot de kreek en met de afstand tot de kreekmonding. Zulke correlaties incorporeren in een sedimentatiemodel houdt tegelijk in dat we vat moeten krijgen op de (complexe) variatie in de ontwikkeling van krekensstelsels in pas aangelegde overstromingsgebieden.

Tot slot is het belangrijk om aan te stippen dat ons ophogingsmodel gekalibreerd werd op basis van de waargenomen sedimentatie in eerder laag-dynamische en jonge ontpolderingen. Een sterk geëxposeerde ontpoldering zoals Ketenisse werd daarom bij voorbaat uit de analyse gelaten. Ook dient nog onderzocht te worden in hoeverre het model toepasbaar is voor GOG-



GGG's of bestaande schorplateau's. Om ecologische voorspellingen en scenario-analyses in het kader van *Sigma*³ verder te optimaliseren is het, gezien het belang van de hoogteligging voor de ontwikkeling van estuariene ecotopen, hoe dan ook belangrijk om te blijven sleutelen aan een zo breed mogelijk inzetbaar sedimentatiemodel.



Referenties

- Bi Q., Vanlede J. & Smolders S. (2021). Estimation of siltation on the intertidal and flood control areas. Versie 4.0. WL Memo's, 13_131_61. Waterbouwkundig Laboratorium, Antwerpen.
- Brackx M. (2020). `_HICwebservices: HIC Webservices for R_`. R package version 1.0.
- Douglas B., Maechler, M., Bolker, B. & Walker S. (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software* 67(1): 1–48.
- IMDC (2023). Integrale rapportage C alternatieven. I/RA/11448/23110/JVS. International Marine & Dredging Consultants, Antwerpen.
- Maris T., Baeten S., Van den Neucker T., van den Broeck T. & Meire P. (2021). Onderzoek naar de gevolgen van het Sigmaplan, baggeractiviteiten en havenuitbreiding in de Zeeschelde op het milieu. Geïntegreerd eindverslag van het onderzoek verricht in 2020, deelrapport Intergetijdengebieden, ECOBE 021-R276. Universiteit Antwerpen, Antwerpen.
- Mertens W., Geunens O., Van Beek H., Van Braeckel A., Van Ryckegem G., Vandevoorde B., Van Lierop F., Terrie T., Spanoghe G. & Van den Bergh E. (2024). Ontpoldering van Lillo's Polpolder. Monitoring van twee inrichtingsvarianten. Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2024 (69). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel.
- Spanoghe G., Gyselings R., Vandevoorde B., Van den Bergh E., Mertens W. & Hessel K. (2010). Monitoring van het Linkerscheldeoevergebied in uitvoering van de resolutie van het Vlaams Parlement van 20 februari 2002: resultaten van het zevende jaar. INBO.R.2010.8. Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel.
- Speybroeck, J., Van Ryckegem, G., Vandevoorde, B. & Van de Bergh, E. (2011). Evaluatie van natuurontwikkelingsprojecten in het Schelde-estuarium. 2de rapportage van de projectmonitoring periode 2006-2009. INBO.R.2011.21. Instituut voor Natuur-en Bosonderzoek, Brussel.
- Temmerman S., Govers G., Meire P. & Wartel S. (2003a). Modelling long-term tidal marsh growth under changing tidal conditions and suspended sediment concentrations, Scheldt estuary, Belgium. *Marine Geology* 193: 151–169.
- Temmerman S., Govers G. Wartel S. & Meire P. (2003b). Spatial and temporal factors controlling short-term sedimentation in a salt and freshwater tidal marsh, Scheldt estuary, Belgium, SW Netherlands. *Earth Surface Processes and Landforms* 28: 739–755.
- Van Braeckel A. & Mertens A. (2021). Ecotopen *in* Van Ryckegem, G., Vanoverbeke, J., Van Braeckel, A., Van de Meutter, F., Mertens, W., Mertens, A., & Breine, J. (2021). MONEOS-Datarapport INBO: toestand Zeeschelde 2020. Monitoringsoverzicht en 1ste lijnsrapportage Geomorfologie, diversiteit Habitats en diversiteit Soorten. Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2021 (47). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel.
- Van den Bergh E., Van Ryckegem G., Vandevoorde B., Mertens W. & Maris T. (2020). Advies over het functioneren van Burchtse Weel (Antwerpen). INBO.A.4046. Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel.

Van den Bergh E. & Van Ryckegem G. (2024). Advies over oppervlaktedoelen voor ecotopen in de Zeeschelde en haar getijgebonden zijrivieren. Adviezen van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, INBO.A.4815. Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel.

Van den Neucker T., Verbessem I., Vandevoorde B., Van Braeckel A., Stevens M., Spanoghe G., Gyselings R., Soors J., De Regge N., De Belder W. & Van den Bergh E. (2007). Evaluatie van natuurontwikkelingsprojecten in het Schelde-estuarium. INBO.R.2007.57. Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel.

Van Ryckegem G., Van de Meutter F., Vandevoorde B., Vanoverbeke J., Jocqué M., Mertens W., & Van den Bergh E. (2021). Knijtenoverlast in Gentbrugge: ecologische kennisopbouw en doeltreffendheid van maatregelen. Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2021 (25). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel.

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: 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.

Vanermen N., Van Braeckel A., Van de Meutter, F., Vanoverbeke J. & Van Ryckegem G. (2025). Ecological modelling of the tidal Scheldt, also known as ECOTIDE. Poster presented at the ECSA Conference on 2025-05-14. Research Institute for Nature and Forest, Brussels.

Vanermen N., Mertens A., Van Ryckegem G., Vanoverbeke J. & Mertens W. (in voorbereiding). Estuarine habitat mapping of the LIFE-SPARC areas. Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel.

Vrebos D., Maris T., Vanermen N. & Staes J. (2025). Ecosysteemdienstenmodellen voor de evaluatie van SIGMA Gebieden, Studienota opgemaakt in opdracht van de Vlaamse Waterweg, Universiteit Antwerpen, onderzoeksgroep ECOSPHERE, ECOSPHERE 025-RES038.

Waterbouwkundig Laboratorium (2025). Metingen en voorspellingen afkomstig uit de databank van het Hydrologisch InformatieCentrum. Data: Waterstand hoog-en laagwaters tijgebied Schelde. Datum: 14/10/2025.



Lijst van figuren

Figuur 1. Studiegebied Paardenschor vier jaar na inrichting (orthofoto 31/01/2009).	8
Figuur 2. Studiegebied Lillo Potpolder kort na de inrichting (orthofoto 10/03/2014).	9
Figuur 3. Studiegebied Burchtse Weel, met het bufferbekken in de noordwesthoek (orthofoto 24/05/2015).	10
Figuur 4. Studiegebied Fasseit kort na ontpoldering (orthofoto 19/04/2018).	11
Figuur 5. Studiegebied Groot Schoor (Hamme) kort na ontpoldering, in de orthofoto te herkennen als de kale slikvlakte, met in het westen het aanliggende GOG-GGG Wal-Zwijn (orthofoto 17/04/2022).	11
Figuur 6. Percentiel-verdeling van de hoog- en laagwaterstanden op de 5 beschouwde tijposten in de periode 2007-2025.	13
Figuur 7. Evolutie in gemiddelde hoogteligging (m TAW) per gebied op basis van DTM's.	16
Figuur 8. Percentiel-verdeling van de DTM waarden per gebied en per jaar, met de grens van het supralittoraal (hoogteligging met een overstromingsfrequentie van 85%) gemarkeerd als een rode stippellijn.	17
Figuur 9. Uitbreiding van de schorvegetatie in het Paardenschor op basis van de ecotopenkaarten (eigen gegevens INBO); de percentages in Tabel 3 & Tabel 4 zijn gebaseerd op de oppervlaktes binnen de rode perimeter (inwaartse buffer van 15m, zie §2.2).	19
Figuur 10. Uitbreiding van de schorvegetatie in Lillo op basis van de ecotopenkaarten (eigen gegevens INBO); de percentages in Tabel 3 & Tabel 4 zijn gebaseerd op de oppervlaktes binnen de rode perimeter (inwaartse buffer van 15m, zie §2.2).	19
Figuur 11. Voorspelde sedimentatiesnelheid (m/jaar) in functie van de gemiddelde hoogwaterdiepte (<i>fixed</i> model gedeelte - zwarte lijn) en de voorspellingen per gebied (inclusief de <i>random slopes</i> - gekleurde lijnen).	20
Figuur 12. Percentiel-verdelingen van geobserveerde en gesimuleerde DTM's ter illustratie van enkele mogelijke strategieën (a , b & d) om het 1D sedimentatiemodel toe te passen op een bestaand DTM; merk op dat c een tussenstap vormt richting uitkomst d ; de donkere punt-streep lijn wijst de theoretische grens tussen slik en schor aan (hoogteligging met een overstromingsfrequentie van 85%).	21
Figuur 13. Fysiotoopkaarten voor het Groot Schoor te Hamme, links op basis van het DTM van 2025 en rechts na toepassing van het sedimentatiemodel over een tijdsperiode van 25 jaar.	22

Lijst van tabellen

Tabel 1. Overzicht van de studiegebieden.	7
Tabel 2. Berekende mediane SPM waarden per studiegebied op basis van de ScheldeMonitor data.	13
Tabel 3. Evolutie in het percentage supralittoraal binnen de studiegebieden Paardenschor, Lillo Potpolder en Groot Schoor (Hamme) op basis van de 85% overspoelingsfrequentie, met in het rood het aandeel schor (= begroeid intertidaal) op basis van de ecotopenkaart van 2022.	18
Tabel 4. Evolutie in het percentage supralittoraal binnen de studiegebieden Burchtse Weel & Fasseit op basis van de 85% overspoelingsfrequentie, met in het rood het aandeel schor (= begroeid intertidaal) op basis van de ecotopenkaarten van 2019 & 2022.	18
Tabel 5. Modelsamenvatting van het ééndimensionaal ophogingsmodel, met de gemiddelde hoogwaterdiepte uitgedrukt als D_HW.	19

