

**Mesoschaal Westerschelde,
Integratierapport 2014-2018**



Mesoschaal Westerschelde, Integratierapport 2014-2018

Marcel Taal
Dick Mastbergen
Jelmer Cleveringa
Reinier Schrijvershof
Yves Plancke
Zheng Wang
Jebbe van der Werf
Ad van der Spek

Titel

Mesoschaal Westerschelde, Integratierapport 2014-2018

Pagina's

133



Trefwoorden

Westerschelde, morfologie, ecologie, mesoschaal, vaargeulonderhoud

Samenvatting

Het Schelde-estuarium ligt zowel in Nederland (Westerschelde) als Vlaanderen (Zeeschelde). Vanaf 2005 is in verdragen vastgelegd dat de landen gemeenschappelijk beleid en beheer voeren. De basis hiervoor is de Lange Termijn Visie, die drie gebruiksfuncties als pijlers benoemt: veiligheid, toegankelijkheid en natuurlijkheid.

Dit rapport beschrijft de ontwikkelingen van de Westerschelde op het schaalniveau van individuele morfologische elementen, de zogenaamde mesoschaal. Het uitvoeren van het (gemeenschappelijk) beheer op die schaal is van grote invloed op de drie pijlers van de Lange Termijn Visie.

| Versie | Datum | Auteur | Paraaf Review | Paraaf Goedkeuring | Paraaf |
|--------|-----------|---|--|--------------------|---|
| 0.2 | mrt. 2019 | Marcel Taal Dick Mastbergen Jelmer Cleveringa Reinier Schrijvershof Yves Plancke Zheng Wang Jebbe van der Werf Ad van der Spek |  Thijs Lanckriet | Dirk-Jan Walstra |  |
| <hr/> | | | | | |
| <hr/> | | | | | |
| <hr/> | | | | | |

Status

definitief

Inhoud

| | |
|---|-----------|
| 1 Context: morfologische kennis voor beleid en beheer | 1 |
| 1.1 Het Schelde-estuarium: gemeenschappelijk beheer en beleid | 1 |
| 1.2 Morfologie van de Westerschelde: macrocellen en mesoschaalelementen | 1 |
| 1.3 Morfologische elementen op mesoschaal | 2 |
| 1.4 Doelstelling van dit rapport | 5 |
| 1.5 Algemene aspecten gebruiksfuncties | 5 |
| 1.5.1 Natuurlijkheid: het gebruik van ecotopenkaarten | 6 |
| 1.5.2 Toegankelijkheid: bagger- en verspreidingslocaties | 7 |
| 1.5.3 Veiligheid: invloed op belastingen en sterkte van keringen | 9 |
| 1.6 Opbouw van het rapport | 10 |
| 2 Morfologie op de mesoschaal, algemeen | 11 |
| 2.1 Morfologische ontwikkelingen op verschillende schalen | 11 |
| 2.2 Invloed van de geologie op mesoschaal | 11 |
| 2.3 Menselijke invloeden op de morfologische ontwikkeling | 13 |
| 2.3.1 Menselijke invloeden op de megaschaal | 13 |
| 2.3.2 Menselijke invloeden op lagere schaalniveaus | 18 |
| 2.4 Mesoschaal veranderingen en denkmodellen | 19 |
| 2.4.1 Afname van de omvang van nevengeulen. | 19 |
| 2.4.2 Stortcapaciteit in de nevengeulen | 20 |
| 2.4.3 Ophoging van de platen en slikken | 21 |
| 2.4.4 Afname kortsluitgeulen | 23 |
| 2.4.5 Afname areaal ondiep water | 24 |
| 2.5 Modelonderzoek op mesoschaal | 24 |
| 2.5.1 Doel en gevraagde functionaliteit | 24 |
| 2.5.2 Beschikbare numerieke modellen van de Westerschelde | 27 |
| 2.5.3 Wat is nodig voor modellering mesoschaal morfologie? | 30 |
| 3 Macrocel 1, de Honte en de Spijkerplaat | 32 |
| 3.1 Beschrijving morfologisch systeem Macrocel 1 | 32 |
| 3.2 Gebruiksfuncties Macrocel 1 | 34 |
| 3.2.1 Veiligheid | 34 |
| 3.2.2 Toegankelijkheid, baggeren en storten | 34 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.2.3 | Natuurlijkheid | 36 |
| 3.3 | Morfologische ontwikkelingen geulen en platen Macrocel 1 | 36 |
| 3.3.1 | Lange-termijn ontwikkelingen | 36 |
| 3.3.2 | Rond de Schaar van de Spijkerplaat | 39 |
| 3.3.3 | Baggeren op de Pas van Borssele | 42 |
| 3.3.4 | Plaatrandstortingen en ontwikkelingen Hooge Platen Noord | 43 |
| 4 | Mesocel 2, Vaarwater langs Hoofdplaat en Hooge Platen | 46 |
| 4.1 | Beschrijving morfologisch systeem Mesocel 2 | 46 |
| 4.2 | Gebruiksfuncties Mesocel 2 | 47 |
| 4.2.1 | Veiligheid | 47 |
| 4.2.2 | Toegankelijkheid | 47 |
| 4.2.3 | Natuurlijkheid | 48 |
| 4.3 | Morfologische ontwikkelingen geulen en platen Mesocel 2 | 48 |
| 4.3.1 | Vaarwater langs Hoofdplaat | 48 |
| 4.3.2 | Plaatrandstortingen en ontwikkelingen Hooge Platen West | 49 |
| 4.3.3 | Ontwikkelingen Hooge Springer | 52 |
| 5 | Macrocel 3, rond Middelplaat, drempelgebied met Macrocel 4 | 54 |
| 5.1 | Begrenzing en beschrijving studiegebied | 54 |
| 5.1.1 | Grenzen en overgangen | 54 |
| 5.2 | Gebruiksfuncties | 55 |
| 5.2.1 | Veiligheid en Toegankelijkheid | 55 |
| 5.2.2 | Natuurlijkheid | 55 |
| 5.3 | Morfologie op de schaal van de hele macrocel: sedimentvoorraden | 56 |
| 5.4 | Evolutie oostelijk deel nevengeul Everingen | 57 |
| 5.4.1 | Waarnemingen oostelijk deel Everingen | 57 |
| 5.4.2 | Waarnemingen kortsluitgeul Zuid-Everingen | 58 |
| 5.5 | Drempelgebied Everingen tussen Macrocel 3 en Macrocel 4 | 61 |
| 5.5.1 | Patroonwisseling eb- en vloedgeulen | 61 |
| 5.5.2 | Ontwikkeling Straatje van Willem | 63 |
| 5.6 | Oostelijke Middelplaat en de Plaat van Baarland | 65 |
| 5.6.1 | Waarnemingen | 65 |
| 5.7 | Bagger- en verspreidingslocaties in Macrocel 3 | 67 |
| 5.7.1 | Overzicht stortlocaties | 67 |
| 5.7.2 | Modeluitkomsten extreem stortscenario in oostelijk deel Everingen | 68 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5.7.3 | Geulwandstorting Gat van Ossenisse | 69 |
| 6 | Macrocel 4 en drempel Hansweert, rond Plaat van Ossenisse | 71 |
| 6.1 | Begrenzing en beschrijving studiegebied | 71 |
| 6.2 | Gebruiksfuncties | 71 |
| 6.3 | Op schaal van de Macrocel: verondiepen Middelgat en uitruimen hoofdgeul | 72 |
| 6.3.1 | Waarnemingen | 72 |
| 6.3.2 | Gevolgen voor gebruiksfuncties | 76 |
| 6.3.3 | Modeluitkomsten extreem stortscenario in SN41 Middelgat | 78 |
| 6.4 | Kortsluitgeul door de Molenplaat | 78 |
| 6.5 | De Platen van Ossenisse | 80 |
| 6.6 | De Schaar van Ossenisse | 83 |
| 6.7 | Baggeren op de drempel van Hansweert | 85 |
| 6.8 | Verspreiden in de diepe delen van / bij Macrocel 4 | 86 |
| 6.8.1 | Verspreiden op SH41 en transporten naar aangrenzende macrocellen | 86 |
| 6.8.2 | Proefstortingen in Put van Hansweert, metingen | 87 |
| 6.8.3 | Proefstortingen in Put van Hansweert, berekeningen | 90 |
| 6.9 | Giertyj ten oosten van Platen van Ossenisse | 91 |
| 7 | Macrocel 5, rond de Platen van Valkenisse | 93 |
| 7.1 | Begrenzing en beschrijving studiegebied | 93 |
| 7.1.1 | Grenzen en overgangen | 93 |
| 7.1.2 | Gebruiksfuncties | 94 |
| 7.2 | Morfologische ontwikkeling Macrocel 5 op de schaal van macrocel en geulen | 95 |
| 7.3 | Morfologische ontwikkeling rondom de Plaat van Walsoorden | 99 |
| 7.4 | Rondom de Plaat van Valkenisse | 102 |
| 7.5 | Plaatrandstortingen in Macrocel 5: Plaat van Walsoorden | 103 |
| 7.5.1 | Waarnemingen | 103 |
| 7.5.2 | Modellering Plaatrandstortingen Walsoorden | 107 |
| 7.6 | Verspreiden in Macrocel 5 | 108 |
| 7.6.1 | Storten in de hoofdgeul SH51 | 108 |
| 7.6.2 | Voormalige stortingen in nabijheid Konijnenschor | 109 |
| 7.6.3 | Verspreiden op SN51 in Schaar van Waarde | 109 |
| 7.6.4 | Modelsimulatie extreem storten in Schaar van Waarde | 109 |
| 7.7 | Slikken en schorren langs de oevers | 110 |

| | |
|--|------------|
| 8 Macrocel 6, rond het nauw van Bath | 111 |
| 8.1 Beschrijving morfologisch systeem Macrocel 6 | 111 |
| 8.2 Toegankelijkheid | 113 |
| 8.3 Morfologische ontwikkelingen | 114 |
| 8.3.1 Ontwikkelingen geulen en slikken | 114 |
| 8.3.2 Verspreiden in de nevengeul SN61 | 117 |
| 8.3.3 Ontwikkelingen in het Land van Saefthinghe | 118 |
| 9 Macrocel 7, rond Pas van Rilland | 120 |
| 9.1 Beschrijving | 120 |
| 9.2 Morfologische ontwikkelingen | 122 |
| 10 Referenties | 123 |
| | |
| Bijlage(n) | |
| A Stortcapaciteit Westerschelde | 130 |
| B Geologische dwarsprofielen per macrocel | 137 |

1 Context: morfologische kennis voor beleid en beheer

1.1 Het Schelde-estuarium: gemeenschappelijk beheer en beleid

Het Schelde-estuarium ligt in Nederland (Westerschelde) en Vlaanderen (Zeeschelde). In 2005 is via verdragen vastgelegd dat de landen gemeenschappelijk beleid en beheer voeren. De basis hiervoor is de Lange Termijn Visie (Technische Schelde Commissie, 2001), die drie gebruiksfuncties als pijlers benoemt: veiligheid, toegankelijkheid en natuurlijkheid. Het platform voor het gemeenschappelijk beleid en beheer is de Vlaams-Nederlandse Schelde Commissie (VNSC).

Dit rapport beschrijft de ontwikkelingen van de Westerschelde op het schaalniveau van individuele morfologische elementen, de zogenaamde mesoschaal. Het uitvoeren van het (gemeenschappelijk) beheer op die schaal is van grote invloed op de drie pijlers van de Lange Termijn Visie.

Veiligheid.

Het estuarium wordt beschermd door dijken. Deze vallen niet onder het verdrag van gemeenschappelijk beleid en beheer. De belastingen op de dijken en de ontwikkeling van de vooroevers worden wel beïnvloed door het gemeenschappelijk beheer. Het kan de voortplanting van het getij veranderen, evenals de golfbelasting en de ontwikkeling van de geulen. De voortplanting van het getij is een estuarium-breed verschijnsel en wordt niet in dit rapport behandeld. De invloed van de bodemligging op de (demping van de) golfaanval en de ontwikkeling van de oevers spelen wel op mesoschaal en worden daarom wel behandeld.

Toegankelijkheid.

In de vaargeul, in het bijzonder de drempels, is sedimentbeheer van groot belang voor de toegankelijkheid. Het gebaggerde sediment wordt teruggestort in het estuarium en de wijze waarop dit gebeurt kan het tempo van opnieuw aanzanden van de gebaggerde locatie beïnvloeden. De invloed van beheer op de grootschalige aspecten van het getij die voor de scheepvaart van belang zijn (b.v. getijdensters) wordt niet in dit rapport behandeld.

Natuurlijkheid.

Het estuarium ontleent zijn ecologische waarden onder meer aan de grote diversiteit in habitats c.q. ecotopen. Deze manifesteren zich op de mesoschaal (platen, slikken, schorren en ondiep water). Hierbij spelen begrippen als 'mozaïek' (variatie / patronen op kleine schaal) en de 'aanwezigheid van gradiënten' een grote rol. In de Westerschelde wordt getracht via een uitgebalanceerde stortstrategie de ecologische waarden te verhogen.

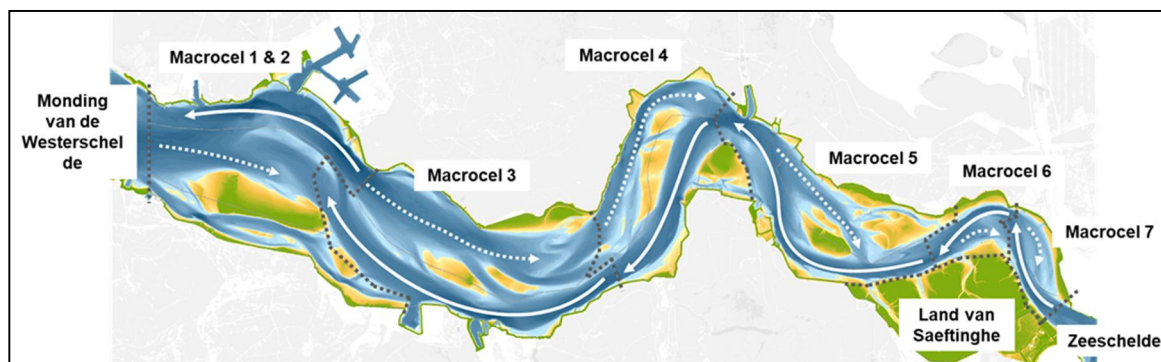
In sectie 1.5 en in de hoofdstukken per macrocel (hoofdstukken 3 tot en met 0) wordt de samenhang van de gebruiksfuncties met de morfologie op mesoschaal verder besproken.

1.2 Morfologie van de Westerschelde: macrocellen en mesoschaalelementen

De Westerschelde wordt gekenmerkt door een regelmatig patroon van geulen en platen. De grote geulen worden onderverdeeld in eb- en vloedgeulen. Tussen de eb- en vloedgeul ligt een platencomplex of ondiepte. Door het platencomplex kunnen kortsluitgeulen lopen die de eb- en vloedgeul verbinden.

Bij het beschrijven van de morfologie van de Westerschelde wordt sinds het begin van de 21^{ste} eeuw het concept van de macrocellen gebruikt (Figuur 1-1). De indeling in macrocellen en het

cellenconcept borduurt voort op het concept van de sedimentcirculatiecellen, dat in de jaren '40 van de 20^{ste} eeuw door Van Veen (1944, 1950) is geïntroduceerd. De beschrijving van de macrocellen is ontleend aan Jeuken et al. (2002).



Figuur 1-1 De macrocellen in de Westerschelde, met de belangrijkste geulen (doorgaande pijlen: vaargeul, gestippelde pijlen zijn nevengeulen).

Een macrocel (of estuariene sectie, bochtgroep of sedimentcirculatiecel) bestaat uit een, veelal wat grotere, ebgeul met daarnaast een vloedgeul. Daar waar de eb- en vloedgeulen elkaar ontmoeten liggen de grenzen tussen de macrocellen. Iedere macrocel kent een eigen morfologische ontwikkeling. Ze kan worden beschouwd als een morfologische eenheid op tijdschalen tot tientallen jaren (Jeuken, 2000; Winterwerp et al., 2000).

Het begrip 'mesoschaal' wordt gebruikt voor de morfologische onderdelen binnen een macrocel, overeenkomstig het begrip 'mesoscale features', zoals gehanteerd door Hibma (2004). De mesoschaal is een ordeniveau kleiner dan de macrocellen. De macrocellen vormen de elementen op macroschaal die de verschillende morfologische elementen op mesoschaal omvatten. De karakteristieke morfologische elementen worden besproken in paragraaf 1.3 en zijn aangeduid in Figuur 1-2. Op de mesoschaal vinden menselijke ingrepen plaats, in het bijzonder de uitvoering van de sedimentstrategie, voor zowel zand als slib. Ook komen op deze schaal veel gebruiksfuncties tot uitdrukking.

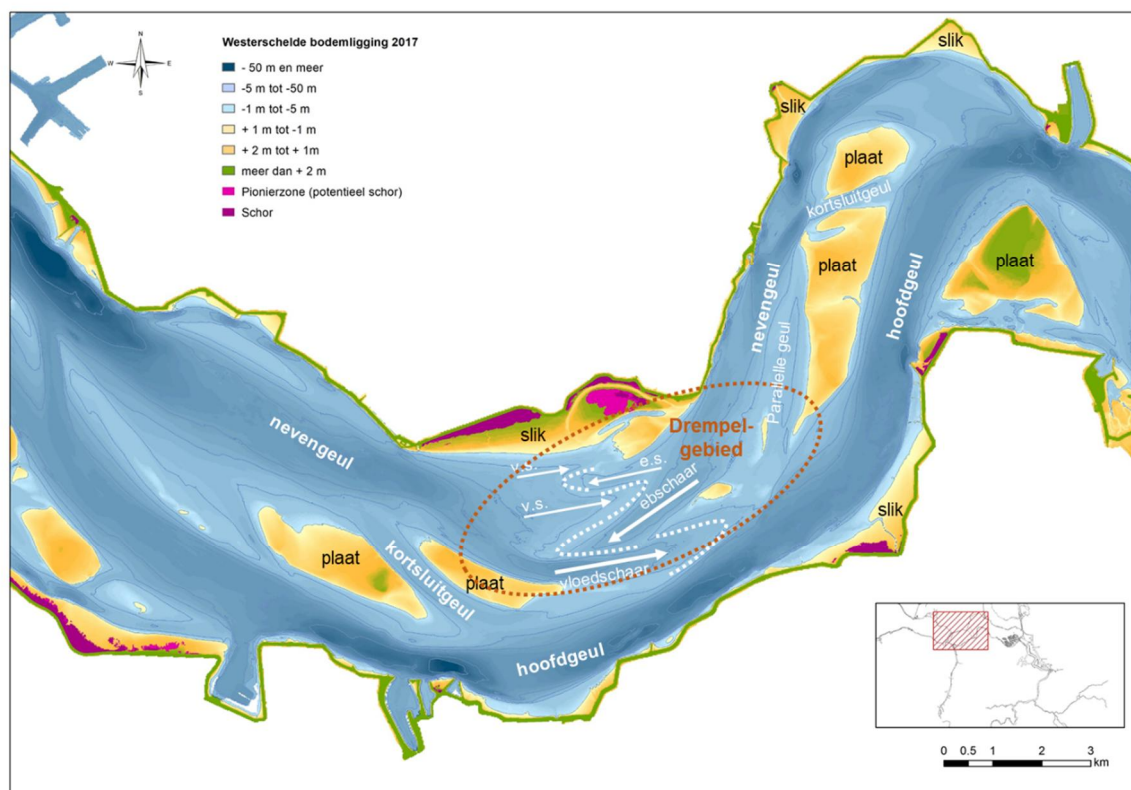
1.3 Morfologische elementen op mesoschaal

Getijdengeul (eb- en vloedgeul, hoofd- en nevengeul)

Getijdengeulen zijn de diep ingesneden delen van het Westerschelde estuarium die in stand worden gehouden door de getijdenstroming. De getijdengeulen worden in de buitenbochten veelal begrensd door een relatief steile geuldwaarsdoorsnede, bestaande uit een vooroeververdediging of natuurlijke harde lagen met op de vooroever slikken. In de binnenbochten liggen meestal vrije, veelal zandige en flauw hellende platen en banken.

In de Westerschelde wordt de geul meestal gedomineerd door één overheersende stroomrichting (met de hoogste stroomsnelheden), eb of vloed. Dit bepaalt daarmee meestal ook de richting van het getijgemiddelde sedimenttransport. Er wordt dan gesproken van een eb- of een vloedgeul. Door de getijdenstroming is op de geulbodem voortdurend zand in beweging. De geulen worden daarom beschouwd als hoogdynamisch.

Naast de aanduiding eb- en vloedgeul, is er ook het nautische onderscheid in hoofd- en nevengeul. Vaak is dit hetzelfde, omdat de ebgeul meestal ook met betoning als de hoofdvaargeul wordt gemarkeerd. De vloedgeul fungeert dan als nevengeul. Alleen in Macrocel 4 is de vloedgeul (Overloop van Hansweert) tegenwoordig de hoofdvaargeul.



Figuur 1-2 Schets van verschillende elementen op de mesoschaal aan de hand van de Macrocellen 3 en 4.

Platen

De platen zijn de intergetijdengebieden die worden omgeven door water en alleen bij vloed geheel of grotendeels overstroomd. Ze liggen hoger dan gemiddeld laagwater bij springtij. Aan- of afwezigheid van bodemvormen en sedimentsamenstelling bepalen of een deel van de plaat als hoog- of laagdynamisch wordt gekarakteriseerd. Laagdynamisch betekent dat het water open afstroomt zonder grote stroomsnelheden te bereiken. De lage stroomsnelheden bieden de mogelijkheid voor het afzetten van fijn sediment, inclusief slib. De omwerking van de bodem door fysische processen is beperkt.

Delen van platen zijn 'hoogdynamisch' indien tijdens hoogwater hoge stroomsnelheden worden bereikt. Dit kan leiden tot de vorming van grote ribbels (megaribbels), maar de bodem kan ook vlak blijven. Op deze delen kan bijna geen fijn materiaal worden afgezet, zodat de bodem voornamelijk uit zand bestaat. De hoogdynamische delen van de platen liggen vrijwel altijd naast of in het verlengde van de getijdengeulen.

Laagdynamische delen van platen bieden betere leefomstandigheden voor bodemdieren dan hoogdynamische. Ze vormen de belangrijkste foerageergebieden voor steltlopers.

In de Macrocellen 1 tot en met 5 liggen tussen de hoofd- en de nevengeul één of meerdere droogvallende platen. In Macrocel 6 en 7 liggen tussen de hoofd- en de nevengeul nog wel ondieptes, maar geen droogvallende platen.

Slikken

Langs de oevers van de Westerschelde liggen op veel plekken droogvallende onbegroeide intergetijdengebieden, die 'slikken' worden genoemd. Op de meeste slikken stroomt het water

op en af zonder hoge stroomsnelheden te bereiken, hoewel op sommige slikken direct naast de geul hoogdynamische delen worden aangetroffen. Daar waar lage stroomsnelheden optreden kan fijn sediment worden afgezet.

Veel slikken zijn gevormd op de vooroevers van dijken en worden beschermd door nog aanwezige, soms rudimentaire, vooroeververdediging of natuurlijke harde lagen, zoals bij de voormalige polders van Borssele, Ellewoutsdijk, Baarland en Saeftinghe. Op sommige slikken is het ooit aanwezige zand en slib weggespoeld en liggen onderliggende pakketten veen en klei bloot. De laagdynamische delen met zacht substraat (zand en slib) bieden de beste leefomstandigheden voor bodemdieren.

Schorren

Schorren zijn de permanent begroeiide, hogere delen van de slikken en platen. Ze liggen in de hoogste zones van het intergetijden- en in het supragetijdengebied (boven gemiddeld hoogwater) zoals in het Land van Saeftinghe. De meeste schorren liggen tegen de dijken en hebben een voorland van slikken. Ook op de hogere delen van de Hooge Platen en de Plaat van Walsoorden worden sinds ongeveer 2004 schorren aangetroffen.

De samenstelling van de vegetatie volgt de hoogte in het gebied, met Zeekraal (*Salicornia*) en Slijkgras (*Spartina*) in het intergetijdengebied, Zeeaster (*Asteretea tripolii*) en Kweldergras (*Puccinellietum maritimae*) op de hogere delen en Zeekweek (*Elytrigia atherica*) op de hoogste delen.

Drempels met eb- en vloedscharen of drempelgeulen

De drempels in de Westerschelde zijn de gebieden waarin de nevengeulen uitlopen. Ze vormen de overgang van nevengeul naar hoofdgeul en zijn van nature minder diep dan de hoofdgeul.

Eb- en vloedscharen zijn kenmerkende morfologische elementen in alle getijdengebieden met geulen en platen (Van Veen, 1950). Een schaar bestaat uit een geul die steeds smaller en ondieper wordt, meestal omgeven door een schildvormige ondiepte (zie voor een voorbeeld de vloedscharen in Figuur 1-1). Scharen eindigen in een drempel wanneer eb- en vloedscharen elkaar ontmoeten (de vloedscharen en ebscharen in Figuur 1-2 vormen hiervan een voorbeeld).

De richting waarin de schaar ondieper wordt, geeft de hoofdrichting van de stroming en de sedimenttransporten aan. Deze duidelijke koppeling tussen morfologie en sedimenttransport maakt het mogelijk ebscharen van vloedscharen te onderscheiden. In de Westerschelde komen eb- en vloedscharen vaak gekoppeld voor. Eb- en vloedscharen zijn de meest dynamische onderdelen van de Westerschelde, ze ontstaan en verdwijnen snel en hebben meestal hoge laterale verplaatsingssnelheden (in de richting dwars op de geulas). De stroomsnelheden zijn hoog en er is veel sediment in beweging.

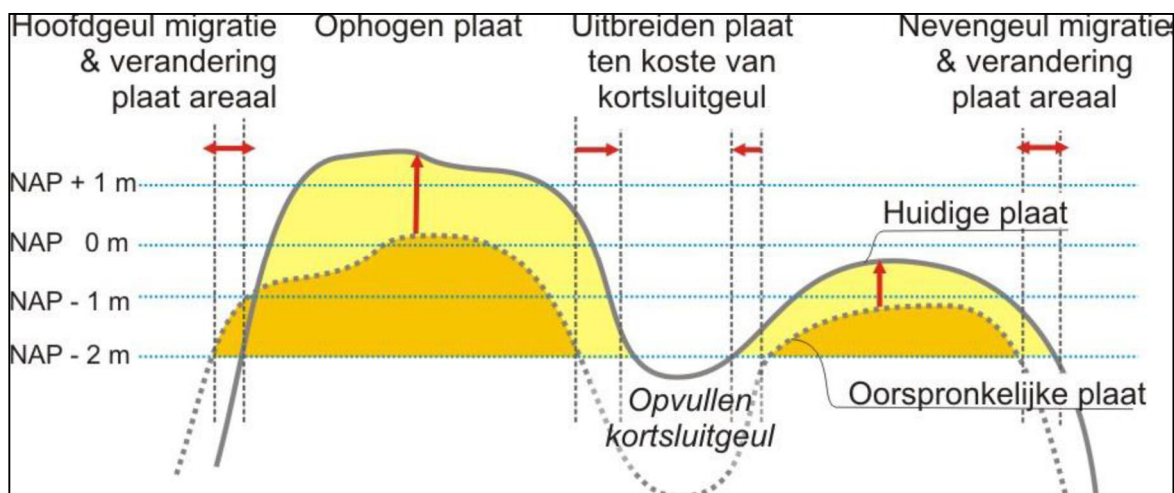
Kortsluitgeulen

Dit zijn de kleinere geulen die de eb- en vloedgeul in een macrocel verbinden. Dit kan zijn dwars over het drempelgebied, door verbinding van een eb- en een vloedschaar (*bar connecting channels*) of door/over de plaat tussen twee grote geulen (*shoal connecting channels*), zie ook Jeuken (2000). Kortsluitgeulen zijn kleiner dan de hoofd- en nevengeulen en kenden, vooral in het verleden, hoge verplaatsingssnelheden (in de richting dwars op de geul).

Samenhang

Mesoschaalelementen zijn in hun ontwikkeling sterk verbonden, zoals wordt geïllustreerd in Figuur 1-3. Een verandering tussen geul en plaat kan veel verschillende vormen en oorzaken

hebben. De figuur bevat niet alle mogelijke veranderingen op de mesoschaal. Het lokaal ver(on)diepen van geulen behoort er bijvoorbeeld ook toe.



Figuur 1-3 Schematische dwarsdoorsnede van de verschillende ontwikkelingen die plaats kunnen vinden bij het toenemen van het plaatvolume (uit Cleveringa, 2013b).

1.4 Doelstelling van dit rapport

In het onderzoeksprogramma Agenda voor de Toekomst (Beirinckx et al, 2014) zijn onderzoeken gestart om kennisleemten die van belang zijn voor beleid en beheer in te vullen.

Voor de mesoschaal morfologie werden de volgende prioriteiten vastgesteld:

- Een sluitend denkmodel en voorspellend instrumentarium op mesoschaal,
- Beter begrip van de evolutie op mesoschaal via de vele metingen die gedaan zijn in kader van 'Flexibel Storten'. Een numeriek model dat op de mesoschaal in staat is deze data te reproduceren is hierin zeer functioneel.

De beheerders hebben gevraagd de resultaten van onderzoeken van de Agenda voor de Toekomst en van andere projecten en programma's op de mesoschaal samen te vatten. Ook is verzocht in dezelfde rapportage voor alle macrocellen een systeembeschrijving te maken van de morfologie en morfologische processen op de mesoschaal. Dit heeft geresulteerd in een update van / aanvulling op het mesoschaalrapport uit 2013 (Cleveringa, 2013a).

Merk op dat binnen de Agenda voor de Toekomst relatief veel aandacht is besteed aan Macrocel 5 (zie hoofdstuk 0). Dit is het gebied waar de ingrepen via baggeren en storten (relatief en absoluut) het grootst zijn. Hierin ligt de drempel die het meeste onderhoud vraagt (Drempel van Hansweert) en de locatie voor plaatrandstortingen die het langst in gebruik is (Plaat van Walsoorden).

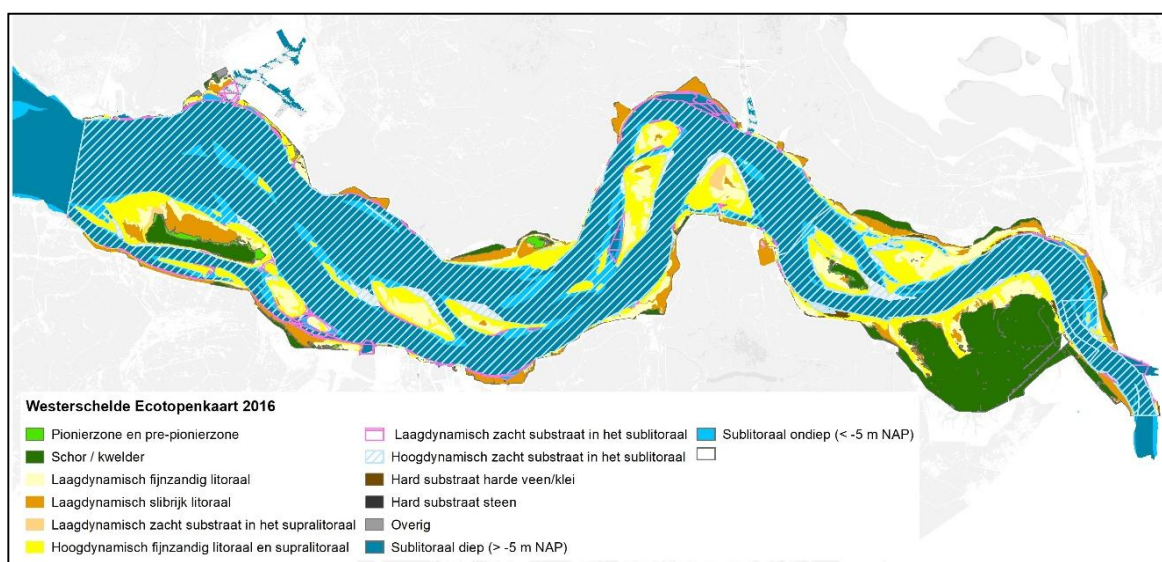
1.5 Algemene aspecten gebruiksfuncties

In de hoofdstukken per macrocel (3 tot en met 0) staat steeds informatie over de belangrijkste lokale gebruiksfuncties. De meer algemene aspecten over gebruiksfuncties, die de hele Westerschelde betreffen, staan hieronder.

1.5.1 Natuurlijkheid: het gebruik van ecotopenkaarten

De ecotopenkaarten van de Westerschelde geven inzicht in de ecologische waarden. “Ecotopen zijn ruimtelijk te begrenzen ecologische eenheden, waarvan de samenstelling en ontwikkeling worden bepaald door abiotische, biotische en antropogene condities ter plaatse. Een ecotoop is een herkenbare, min of meer homogene landschappelijke eenheid”. De basis voor de indeling in ecotopen ligt in het Zoutwater Ecotopen Stelsel (ZES), volgens Bouma e.a. (2005). Dit stelsel is een hiërarchisch opgebouwde indeling (classificatiesysteem), waarin de meest belangrijke abiotische omgevingsfactoren (mate van droogvallen, type substraat, saliniteit) en biotische aspecten (aanwezigheid begroeiing) van de leefmilieus van de zoute kustwateren worden weergegeven. De ecotopenkaarten geven inzicht in het *potentiële* voorkomen van levensgemeenschappen in en vlak boven de bodem. Het is dus niet zo dat de aanwezigheid van een ecotoop een garantie biedt op de aanwezigheid van bepaalde dieren of planten. De daadwerkelijke ecologische kwaliteit van een gebied kan door factoren worden bepaald die geen onderdeel zijn van het ecotopenstelsel, zoals de hoeveelheid zwevend stof in het water en het broedsucces van trekvogels die in het gebied overwinteren.

De meest recente ecotopenkaart is die van 2016, deze is weergegeven in Figuur 1-4.



Figuur 1-4 Ecotopen in de Westerschelde, situatie 2016 (gegevens: Rijkswaterstaat).

Ecotopen zijn niet hetzelfde als ‘habitats’. “Een habitat is de leefomgeving waarin een bepaalde soort leeft. Een soort kan verschillende habitats nodig hebben in de loop van een jaar of zijn levenscyclus. Deze habitats kunnen bij elkaar liggen (bijvoorbeeld lage zandplaat – hoge zandplaat; lage zandplaat – sublitoraal) of in verschillende gebieden liggen (bijvoorbeeld toendra Siberië – Waddenzee).” (Uit Bouma e.a., 2005).

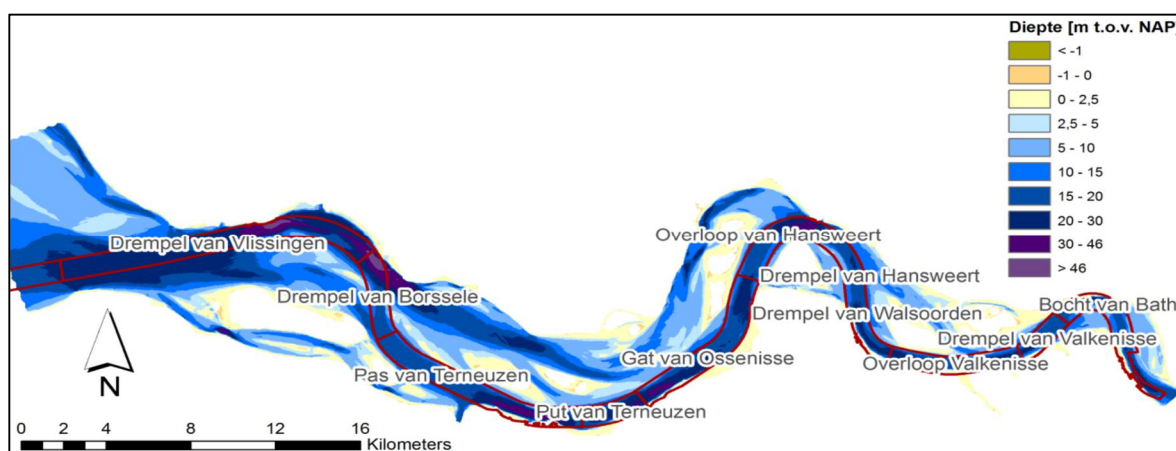
Habitats zijn ook een wezenlijk onderdeel van de gebiedsbescherming onder de Wet Natuurbescherming die van toepassing is op de Natura-2000 gebieden Westerschelde en Saeftinghe. De belangrijkste habitattypes (met hun Natura-2000 code) in de Westerschelde in relatie tot de morfologie zijn:

- H1130 Estuarium, dat alle geulen, slikken en platen omvat en de verschillende schorhabitattypen:
- H1310A Pioniervegetaties Zeekraal,
- H1310B Pioniervegetaties Zeevetmuur,

- H1320 Schorren met slijkgras en
- H1330A Atlantische schorren, buitendijks.

1.5.2 Toegankelijkheid: bagger- en verspreidingslocaties

Toegankelijkheid is belangrijk voor de scheepvaartverbindingen van de Noordzee naar de grote havens in de Westerschelde, zoals Vlissingen, Terneuzen / Gent en vooral Antwerpen. Daarvoor worden de ondiepten in de vaargeul, de drempels of vaarpassen, op een minimaal vereiste diepte gehouden door onderhoudsbaggeren. Momenteel is deze diepte voor de hoofdvaargeul LAT -14,5 m. Figuur 1-5 en Tabel 1.1 geven de belangrijkste baggerlocaties.

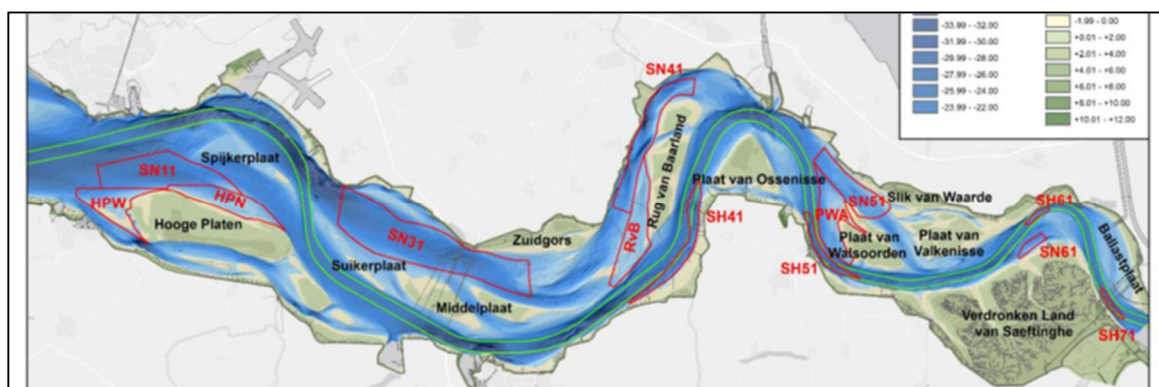


Figuur 1-5 Vaarweg tracé Westerschelde en belangrijkste baggerlocaties (Plancke et al, 2016), zie ook Tabel 1.1.

| Macrocel | Afkorting | Baggerlocatie |
|----------|-----------|-------------------------|
| MC1 | DVL | Drempel van Vlissingen |
| MC1 | DBO | Drempel van Borssele |
| MC3 | PAS | Pas van Terneuzen |
| MC3 | PUT | Put van Terneuzen |
| MC4 | GVO | Gat van Ossenisse |
| MC4 | OHW | Overloop van Hansweert |
| MC4 | DHW | Drempel van Hansweert |
| MC5 | DWA | Drempel van Walsoorden |
| MC5 | OVA | Overloop van Valkenisse |
| MC5 | DVA | Drempel van Valkenisse |
| MC6 | BBA | Bocht van Bath |

Tabel 1.1 Baggerlocaties in de Westerschelde (Barneveld et al, 2015)

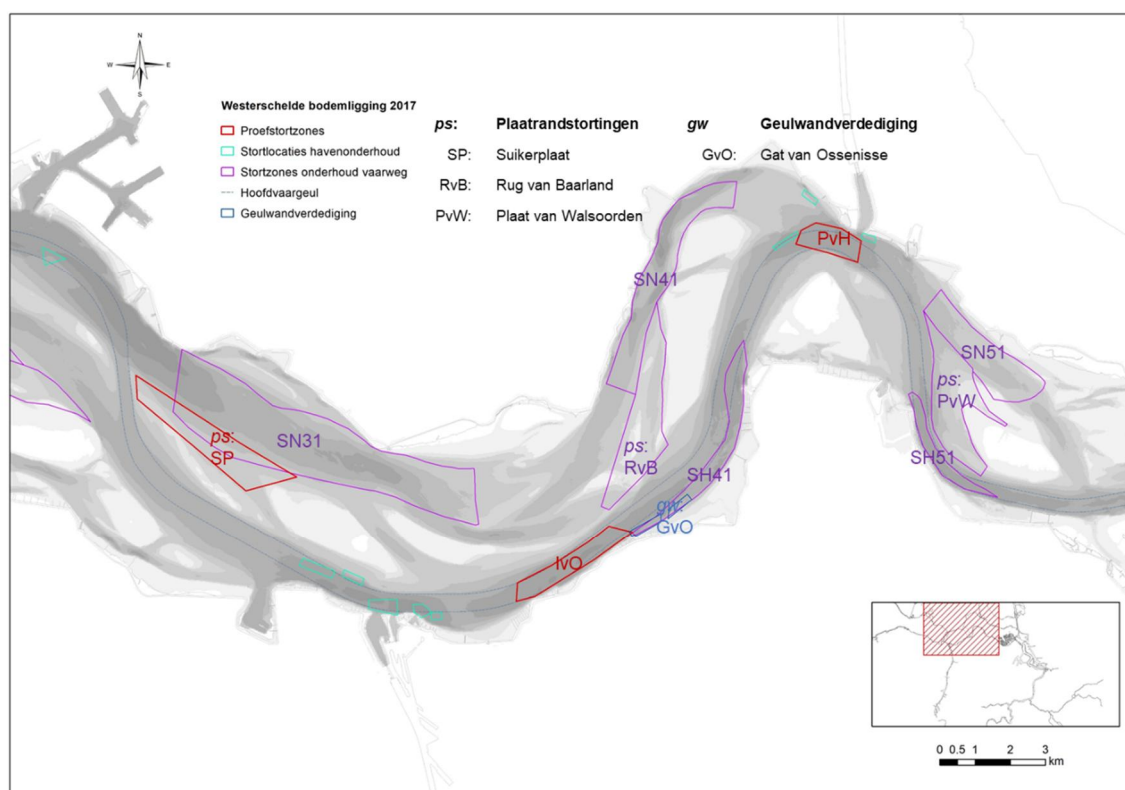
Figuur 1-6, Figuur 1-7 en Tabel 1.2 geven alle verspreidingslocaties in de Westerschelde.



Figuur 1-6 · Westerschelde met in groen de ligging van de hoofdvaarweg. Daar mag worden gebaggerd. De voor het vaarwegbeheer vergunde reguliere verspreidingslocaties zijn met rood aangegeven.

| Macrocel | Afkorting | Verspreidingslocatie |
|----------|-----------|---|
| MC1 | SN11 | Stort nevengeul 11 Schaar van de Spijkerplaat |
| MC1 | HP1 | Plaatrandstorting Hooge Platen Noord |
| MC1 | HP3 | Plaatrandstorting Hooge Platen West |
| MC3 | SN31 | Stort nevengeul 31 Everingen |
| MC3 | SUPL | Plaatrandstorting Suikerplaat |
| MC4 | SH41 | Stort hoofdgeul 41 Overloop van Hansweert |
| MC4 | SN41 | Stort nevengeul 41 Middelgat |
| MC4 | RvB | Plaatrandstorting Rug van Baarland |
| MC4 | GWOS | Geulwandverdediging Ossenisse |
| MC5 | INOS | Proefstorting Inloop van Ossenisse |
| MC5 | SH51 | Stort hoofdgeul 51 Zuidergat / Bocht van Walsoorden |
| MC5 | SN51 | Stort nevengeul 51 Schaar van Waarde |
| MC5 | PWA | Plaatrandstorting Plaat van Walsoorden |
| MC5 | DPHW | Proefstorting Diepe delen Put van Hansweert |
| MC6 | SH61 | Stort hoofdgeul 61 Nauw van Bath |
| MC6 | SN61 | Stort nevengeul 61 Schaar van de Noord |
| MC7 | SH71 | Stort hoofdgeul 71 Pas van Rilland |

Tabel 1.2 Verspreidingslocaties in de Westerschelde per macrocel (uit Barneveld et al, 2017, Schrijvers, 2018)



Figuur 1-7 · Overzicht stortzones, met naast de reguliere zones (in paars) ook de proefstortzones (in rood) en de geulwandstoringen Gat van Ossensisse (donkerblauw). De groen aangegeven stortlocaties zijn beschikbaar voor specie uit de havens.

1.5.3 Veiligheid: invloed op belastingen en sterkte van keringen

Voor de veiligheid tegen overstromingen zijn de vooroevers van de dijken, vaak bestaande uit schorren en slikken, van belang. Zij verminderen de hydraulische belasting van de dijk en vormen een veiligheidsbuffer voor oever- en dijkvallen.

De vooroevers of voorlanden kunnen alleen bestaan zolang de standzekerheid, dus de stabiliteit van de aanliggende geulwand, is gewaarborgd (sterkte). Bij doorgaande erosie en oeverversteiling kan deze in gevaar komen. Daarom zijn de mesoschaal ontwikkelingen en het beheer mede van invloed op de veiligheid. Van nature hebben de hoofdgeulen de neiging uit te bochten, zoals bij een meanderende rivier. Daar worden vanouds de oevers het meest bedreigd door verdergaande erosie. Sinds de voltooiing van de Deltawerken en de versterkingen bij de eerste verdieping (rond 2000) zijn de meeste buitenbochten geheel bekleed of zijn reeds van nature voldoende erosiebestendig (door klei- en schelpenlagen). De bodemontwikkeling van de vooroevers van de dijken wordt jaarlijks gemonitord door het Waterschap Scheldestromen en waar nodig worden beheermaatregelen genomen in de vorm van (herstel van) oeverbescherming en bestorting.

De veiligheid wordt behalve door de standzekerheid van (de vooroevers van) de dijken ook bepaald door golfslag en de hoogte van de waterstanden bij stormvloed (hydraulische belastingen). De mesoschaal ontwikkelingen hebben invloed op de getijslag. Golfopzet wordt medebepaald door de demping door eventuele schorvegetatie op de vooroevers. De maatgevende waterstanden door getij, windopzet en golven bij stormvloed worden dus ook bepaald door de mesoschaal ontwikkelingen.

1.6 Opbouw van het rapport

Na een inleiding in de mesoschaal morfologie in Hoofdstuk 2 worden de ontwikkelingen in de Macrocellen 1 t/m 7 van de Westerschelde beschreven in de Hoofdstukken 3 t/m 9.

Een blik naar grotere tijd- en ruimteschaal wordt gemaakt waar dit nodig is om het functioneren binnen de macrocel te duiden, dan wel de grootschalige implicaties te bespreken van de ontwikkelingen in de macrocel.

De volgorde waarin mesoschaalelementen worden behandeld is gebaseerd op de samenhang in een macrocel. Dat gebeurt aan de hand van de specifieke vraagstukken en de morfologische elementen in de macrocel en kan daarom per hoofdstuk een iets andere opbouw geven.

Elk hoofdstuk start met een korte beschouwing over de morfologische en historische achtergronden en de daardoor gestuurde ontwikkelingen van de hoofd- en nevengeul in de macrocel. Ook worden de gebruiksfuncties (veiligheid, toegankelijkheid en natuurlijkheid), toegespitst op de schaal van de macrocel aangeduid.

2 Morfologie op de mesoschaal, algemeen

2.1 Morfologische ontwikkelingen op verschillende schalen

Morfologische veranderingen in een estuarium treden op verschillende tijd- en ruimteschalen op. Veranderingen van beddingvormen, zoals ribbels en duinen op de bodem, kunnen als ontwikkelingen op de kleinste schaal, de microschaal, worden beschouwd. De veranderingen op de schaal van het gehele estuarium worden beschouwd op de 'mega-schaal'. Daartussenin staan de macro- en mesoschaalontwikkelingen. De macro- en mesoschaal zijn al ingeleid in paragrafen 1.2 en 1.3 en Figuur 1-1.

De verdeling in verschillende schalen is een schematisatie van het systeem. De grenzen tussen de verschillende schalen zijn niet altijd even scherp te trekken. In de literatuur vindt men verschillende verdelingen van de schalen. Zo worden ook de veranderingen van verschillende grote delen van de Westerschelde (oostelijk, midden en westelijk deel) tot mega-schaal ontwikkelingen gerekend. De veranderingen van de eb- en vloedgeulen en vooral de verandering in hun onderlinge verhouding (ook wel kanteling genoemd), wordt vaak als een ontwikkeling op de macroschaal (en niet de mesoschaal) beschouwd.

Morfologische ontwikkelingen op de verschillende schalen gebeuren niet geïsoleerd van elkaar. Veranderingen op kleinere schalen vormen onderdelen van de veranderingen op grotere schalen en die veranderingen zijn weer een belangrijke aandrijvende kracht voor veranderingen op de schalen daaronder. Omgekeerd beïnvloeden veranderingen op de kleinere schaal weer de evolutie op een grotere schaal via een veranderende waterbeweging. Bijvoorbeeld: verlaging of verhoging van een plaat binnen een estuarium (een mesoschaalontwikkeling) beïnvloedt het getijprisma en kan ook de getijsymmetrie beïnvloeden. Zo heeft dit weer invloed op de sedimentimport en -export bij de monding van het estuarium en dus op de megaschaal ontwikkeling.

Dit rapport legt de nadruk op de mesoschaal en tracht waargenomen veranderingen te begrijpen door de veranderingen op de verschillende schalen aan elkaar te relateren, te modelleren en te begrijpen. Hierin is de invloed van menselijke ingrepen een belangrijk vraagstuk.

2.2 Invloed van de geologie op mesoschaal

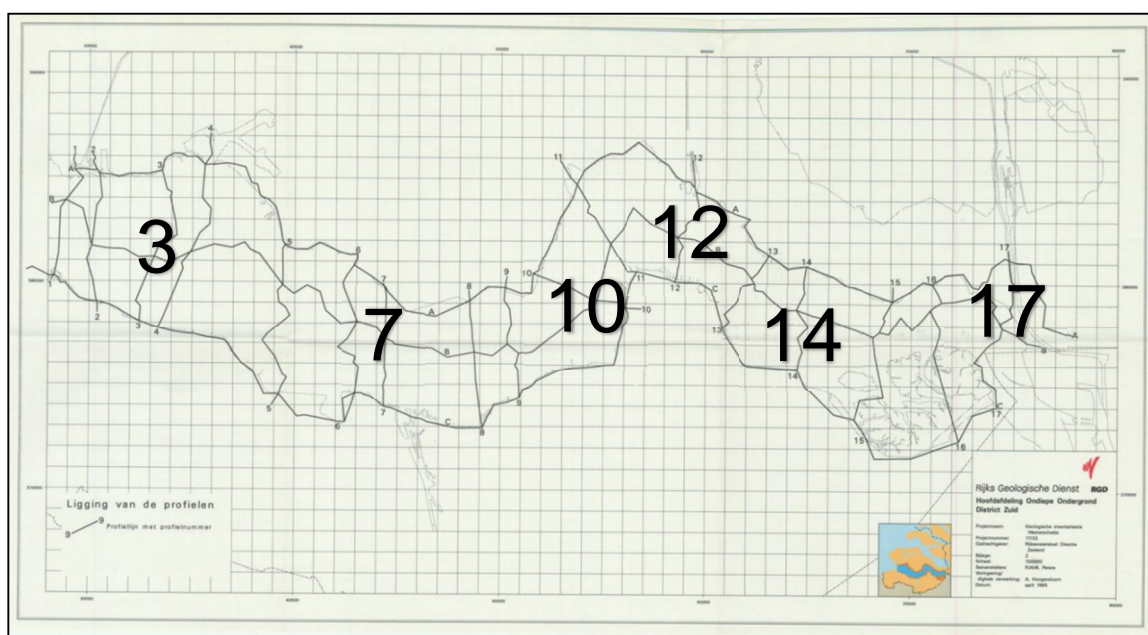
De veranderingen in de bodemligging worden, ook op de mesoschaal, gestuurd door de hydrodynamica en de lokale bodemsamenstelling, die wordt bepaald door zowel de geologie als door menselijke ingrepen als bedijkingen, dammen en geulwandverdediging. Om de ontwikkelingen te begrijpen is dan ook informatie nodig hiervan op mesoschaalniveau.

Deze paragraaf licht de beschikbare geologische informatie van de Westerschelde toe op basis van de beschikbare literatuur (RGD, 1995, Gruijters et al, 2004 en Cleveringa, 2007). Daartoe is per macrocel een representatieve dwarsdoorsnede opgenomen in Bijlage B. Een overzicht van de dwarsprofielen in de bijlage met de belangrijkste mesoschaalelementen die hierin te zien zijn, staat in Tabel 2.1 (tevens in Tabel B.1 in Bijlage B). In Bijlage B is ter aanvulling een dwarsprofiel toegevoegd dat loopt door de Put van Hansweert (op de grens van de Macrocellen 4 en 5). Figuur 2-1 geeft de locatie van de verschillende profielen weer.

Hieronder wordt een geologische beschrijving gegeven van de verschillende formaties die in de ondergrond van de Westerschelde zijn te vinden. In Tabel B.2 in Bijlage B is de naamgeving opgenomen van de formaties die in de dwarsprofielen zijn te zien.

Tabel 2.1 Geselecteerde geologische dwarsprofielen Westerschelde (RGD, 1995) per macrocel

| Macro cel | Geologische dwarsprofiel | Belangrijkste mesoschaal elementen |
|-----------|---|--|
| 1/2 | Profiel 3 Zuidwatering – Hoogeweg | Honte – Spijkerplaat – Hooge Platen – Vaarwater |
| 3 | Profiel 7 Ellewoutsdijk – Terneuzen | Everingen – Middelpaalt – Pas van Terneuzen |
| 4 | Profiel 10 Baarland – Zeedorp | Middelgat – Rug van Baarland – Gat van Ossensisse |
| 4 / 5 | Nieuw profiel tussen 11 en 12 gelegen Hansweert – Kreverhille | Put van Hansweert – Platen van Ossensisse – Schaar van Ossensisse |
| 5 | Profiel 14 Oud Valkenisse – Baalhoek | Schaar van Valkenisse – Plaat van Walsoorden – Overloop van Valkenisse |
| 6 / 7 | Profiel 17 Bathpolder – Saeftinghe | Appelzak – Pas van Rilland – Land van Saeftinghe |



Figuur 2-1 Geologische dwarsprofielen per macrocel (RGD, 1995), zie Tabel 2.1 en Bijlage B.

In de ondergrond van de Westerschelde worden lagen van Tertiaire en Pleistocene ouderdom aangetroffen. De grootschalige geologische trend in het gebied van de Westerschelde wordt bepaald door de aanwezigheid van het Massief van Brabant in het zuiden. Dit massief ligt ongeveer op de lijn Brussel-Londen en komt langzaam omhoog. Ten gevolge hiervan zijn alle Tertiaire en Vroeg-Pleistocene lagen scheef gesteld, waarbij de lagen in noordelijke tot noordoostelijke richting hellen. De oudste lagen komen in Vlaanderen aan of nabij het oppervlak voor. Ter hoogte van de Westerschelde bevinden de lagen zich op diepten van tientallen tot enkele honderden meters. Als gevolg hiervan verschilt de geologische opbouw van de zuidoever van de Westerschelde van die van de noordoever: aan de zuidoever worden oudere lagen dicht bij het maaiveld aangetroffen.

De oudste Tertiaire afzettingen bestaan uit kleiige en fijnzandige (ondiepe) mariene afzettingen, welke zijn gevormd vanaf het Eoceen tot en met het Midden-Oligoceen (ca. 50 tot 30 miljoen

jaar geleden). Van onder naar boven gaat het om de Klei van Asse (Dongen Formatie), Zand van Bassevelde, Klei van Watervliet, Zand van Ruisbroek (allen Tongeren Formatie) en de Klei van Boom¹ (Rupel Formatie). De zanden zijn over het algemeen glauconiethoudend en in de zanden van de Tongeren Formatie komt ook mica voor. Door zetting en verkitting van het zand zijn deze afzettingen moeilijker erodeerbaar dan jongere zandpakketten. De kleilagen zijn onder het gewicht van de bovenliggende lagen gecompacteerd en zijn relatief hard. De hardste klei is de Klei van Boom. Vooral de kleilagen zijn in hoge mate erosiebestendig.

Op het bovenbeschreven pakket afzettingen ligt een tweede serie overwegend mariene afzettingen met een ouderdom van het Midden-Mioceen (ca. 15 miljoen jaar geleden) tot het Vroeg-Pleistoceen (ca. 1 miljoen jaar terug). Aan de basis liggen de glauconiethoudende mariene zanden van de Formatie van Breda, waarop de Pliocene Formatie van Oosterhout ligt. Deze laatste bestaat uit schelprijke mariene zanden, waarin tot enkele meters dikke, verkitte schelpenbanken ('craigs') voorkomen. Aan de top van "de Oosterhout" komt een ca. 3 m dikke kalkhoudende kleilaag voor, waarin een zandsteenlaag is ingeschakeld. Deze formatie wordt langs de noordoever van de Westerschelde aangesneden in diepe geulen, met name ten noorden van Saefthinghe, en kan door zijn erosiebestendigheid het morfodynamisch gedrag van de geulen aanzienlijk beïnvloeden. De Vroeg-Pleistocene afwisseling van ondiepe mariene en estuariene zanden en kleien, ontstaan als gevolg van het verschuiven van de toenmalige kustlijn, respectievelijk de Formaties van Maassluis en Waalre, sluit dit pakket afzettingen af. In de Formatie van Waalre worden vooral in de buurt van Hansweert stevige kleilagen aangetroffen.

Op deze Vroeg-Pleistocene afzettingen liggen Laat-Pleistocene, kustnabije mariene zanden en kleien van de Eem Formatie, lokale riviersedimenten en eolische afzettingen (Boxtel Formatie) en door de Schelde aangevoerde zanden (Koewacht Formatie) uit de laatste ijstijd en ten slotte zand- en veenpakketten en kleilagen gevormd als gevolg van de Holocene transgressie (Naaldwijk en Nieuwkoop Formaties).

2.3 Menselijke invloeden op de morfologische ontwikkeling

2.3.1 Menselijke invloeden op de megaschaal

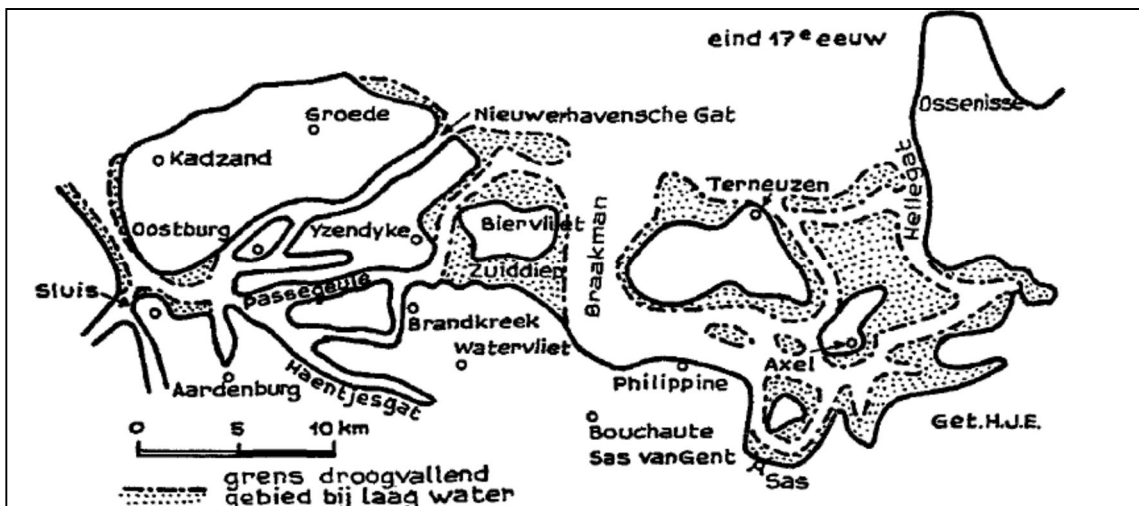
De menselijke invloeden op de megaschaal zijn onder te verdelen in vastleggingen (ingreep op de begrenzingen) en ingrepen in de sedimentvoorraden. Het laatste kan onderverdeeld worden in onttrekkingen en (grootschalige) verplaatsingen.

Ingrepen op de begrenzingen

De Scheldedelta heeft zijn huidige vorm gekregen door het geleidelijk steeds meer indringen van de getijdegeulen in het landschap door de zeespiegelstijging (de Holocene transgressie) en in de laatste eeuwen mede door het door de mens indijken van natuurlijk opgehoogde schorgebieden ('aanwas') die vaak ook vaak weer verloren gingen door stormvloed, dijkvallen of militaire inundaties. Zo is Zeeuws-Vlaanderen, dat voor de 17^e eeuw nog een

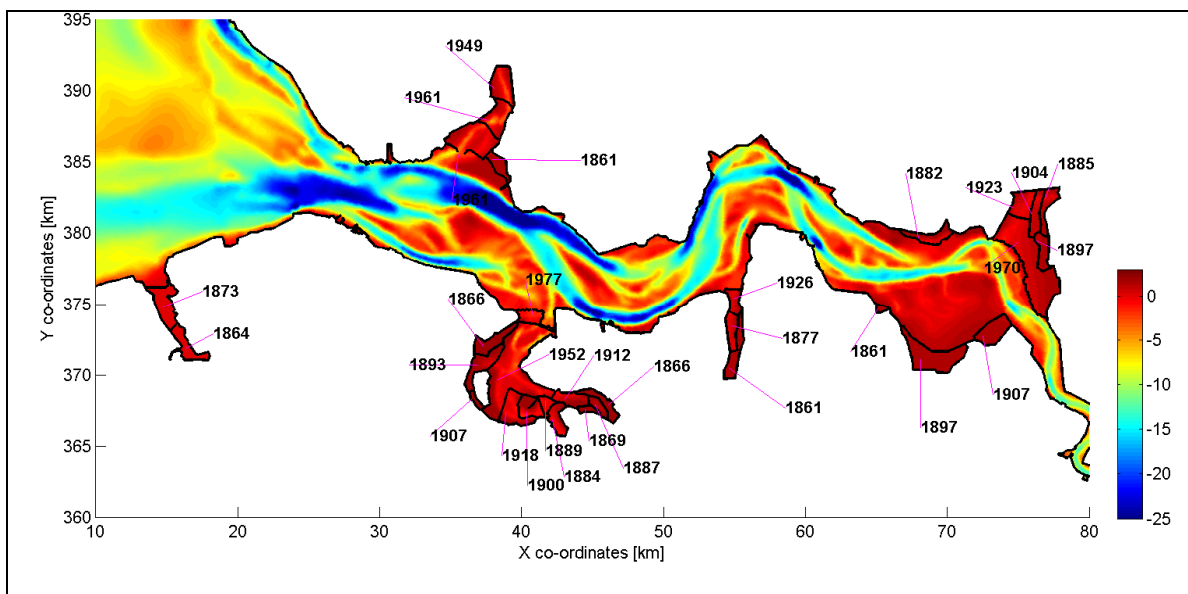
¹ Afzettingen krijgen de naam van de locatie waar zij het eerst beschreven zijn. Het kan voorkomen dat een afzetting of formatie later tijdens een revisie een nieuwe naam krijgt, de naam van de locatie waar de afzetting beter en completer beschreven kan worden. Ook kan de indeling in formaties veranderen als gevolg van nieuwe inzichten in de ouderdom en onderlinge relatie van afzettingen. In Tabel B.2 in Bijlage B worden zowel de verouderde als de nieuwste formatie indeling weergegeven, zodat ook oudere publicaties met recente vergeleken kunnen worden.

eilandenrijk was bestaande uit platen en slikken en geheel omspoeld werd door de zee, geleidelijk geheel ingepolderd (Figuur 2-2).



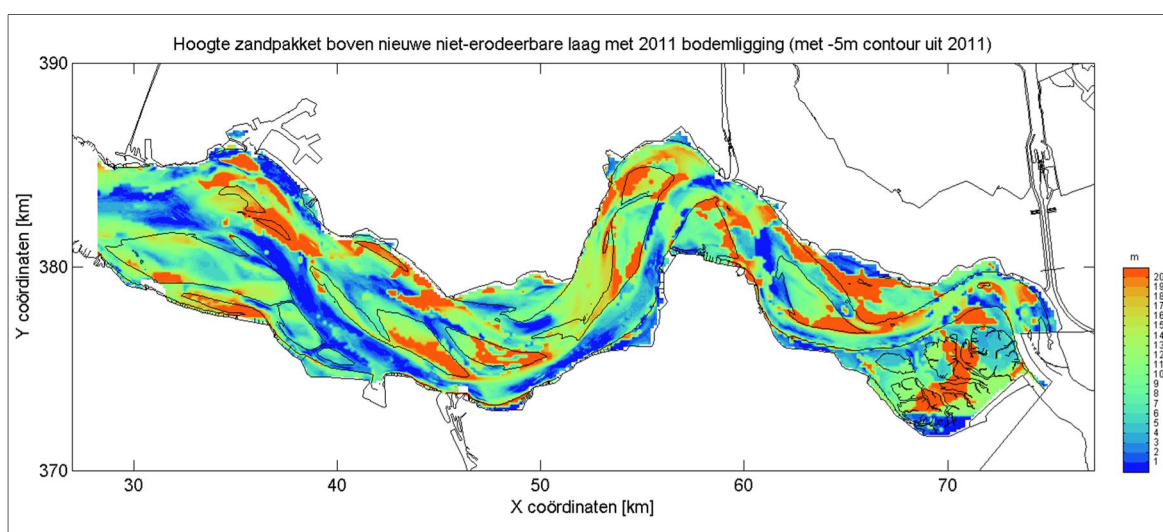
Figuur 2-2 Polders westelijk Zeeuws-Vlaanderen in de 17^e eeuw (Wilderom, 1973)

De grenzen van het estuarium zijn vooral sinds de 19^e eeuw door de mens steeds meer vastgelegd door inpoldering met dijken, afsluitdammen en bestortingen, zie Figuur 2-3. Dat heeft (direct) lokale effecten gehad, maar bracht ook veranderingen op grotere tijd- en ruimteschaal teweeg. De morfologische reactie op deze ingrepen kan zeer lang doorlopen. Op kleinere schaal vinden tegenwoordig ook weer ontpolderingen plaats (zoals Perkpolder en de Hedwigepolder, zie paragraaf 9.1). De grenzen van de Westerschelde zijn tegenwoordig grotendeels vastgelegd.



Figuur 2-3 Hoogtekaart Westerschelde met inpolderingen vanaf 1860 (Dam, 2017)

Steeds meer sediment is het estuarium uit getransporteerd. In Figuur 2-4 is te zien is dat op veel locaties, vooral in de hoofdgeul de maximale diepte (de donkerblauwe gebieden met een zandlaagdikte van '0') is bereikt. Hier liggen de oudere geologische formaties, veelal slecht erodeerbare kleilagen, aan de oppervlakte.



Figuur 2-4 'Harde lagen' en dikte zandpakket in de Westerschelde (Dam, 2013)

Sedimentbeheer

Op het niveau van het hele estuarium wordt de ontwikkeling van het sedimentvolume bepaald door zowel de actieve sedimentonttrekking (zandwinning) als de import-export naar aangrenzende, sediment-delende systemen (de monding en de Zeeschelde). Tot en met 2012 was de zandwinning groot t.o.v. de netto sedimenttransporten. Vanaf 2015 is de zandwinning in de Westerschelde beëindigd. Alleen in de Zeeschelde (Schaar van Ouden Doel) wordt nog wel jaarlijks 1 miljoen m³ zand gewonnen.

Omdat met vaargeulonderhoud ordegrrootte 10 miljoen m³ sediment per jaar moet worden verspreid kan dit ook leiden tot grootschalige verplaatsingen. Uit Figuur 2-8 in de volgende paragraaf kan worden afgeleid dat er sprake is van antropogeen gedreven westwaarts transport. Deze lijkt groter dan de netto transporten die door de waterbeweging worden gestuurd (zie o.m. Cleveringa & Dam, 2013, Dam, 2017). Op de megaschaal verandert de sedimentinhoud van het estuarium niet door het vaargeulonderhoud, tenzij de stortingen invloed hebben op de uitwisseling met de monding en de Zeeschelde.

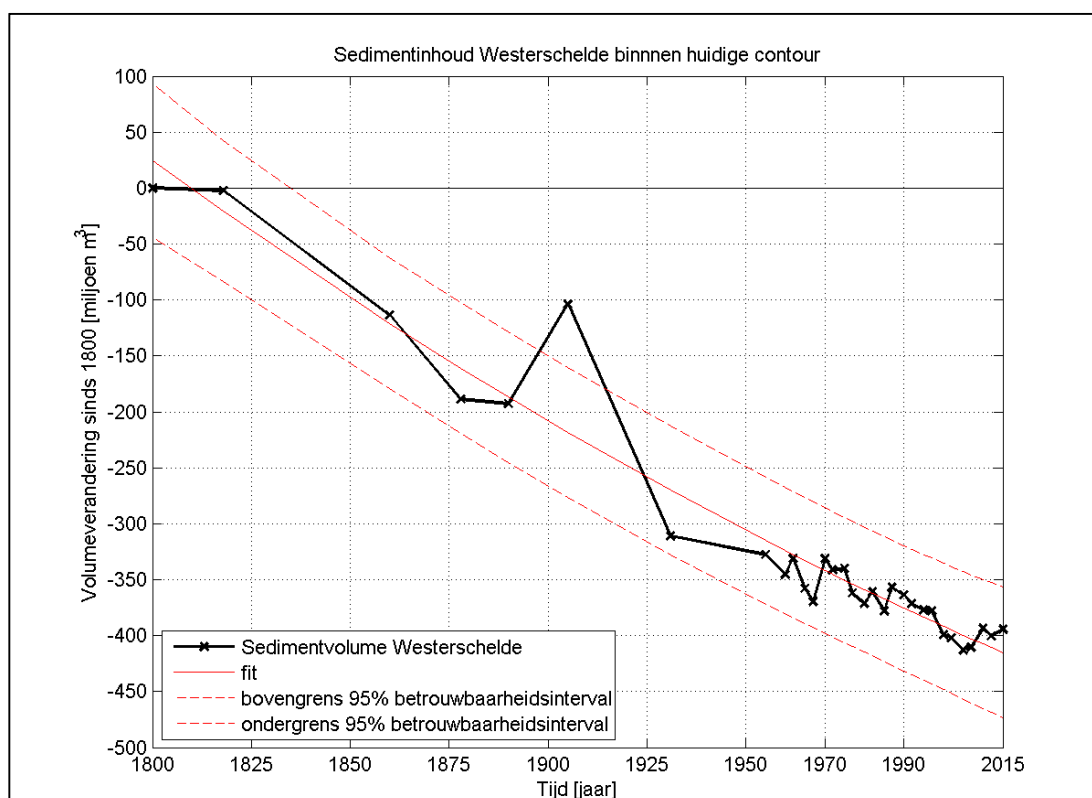
Het onderhoud van de vaargeul is ook een proces van vastlegging, zij het van een beter omkeerbaar karakter dan door de 'harde' begrenzingsen. De laatste eeuw is de vaargeul langzamerhand gekomen op de huidige plaats en wordt er feitelijk geen grootschalige migratie van geulen meer toegestaan.

Afname sedimentvoorraden

Als onderdeel van de Agenda voor de Toekomst is een Lange Termijn Sedimentbalans van de Westerschelde opgesteld (Dam, 2017). De focus van dat rapport ligt op de periode 1860-1955, vóór de grootschalige vaargeulverruiming. Figuur 2-5 laat zien, dat de Westerschelde binnen de huidige grenzen (dus zonder de zijtakken die de afgelopen 200 jaar zijn ingepolderd, Figuur 2-3), een duidelijke trend van uitruimen van de geulen heeft. In het bijzonder het westelijk deel van de Westerschelde ruimde sterk uit, zo blijkt uit Figuur 2-6 (bovenste figuur).

Het 'autonoom' exporteren van zand vanuit het westelijk deel van de Westerschelde is mede aannemelijk op basis van de resultaten van morfologische modelleeroefeningen, zie Van der Werf & Brière (2013), Cleveringa & Dam (2013) en Dam (2017). Hoewel het estuarium vloed-asymmetrisch is (kent een kortere duur van vloed dan eb, met gemiddeld hogere snelheden tijdens vloed) is er toch netto export van zand richting de monding.

De oorzaak is het ontbreken van een dynamisch evenwicht, omdat de geulen zich nog steeds moeten aanpassen aan morfologische veranderingen die zijn opgetreden in een verder verleden. Hierbij is de doorbraak van de Honte naar de Schelde rond de 13/14^e eeuw de meest ingrijpende geweest. Van een relatief kort getijbekken veranderde het systeem toen snel in een estuarium met een getijderivier. Dit lijkt een lange periode, maar dit past in onze kennis van volledig alluviale estuaria. We weten dat een dergelijke aanpassing millennia duurt. Voor de Westerschelde, met gedeeltelijk moeilijk erodeerbare lagen, is het dan ook aannemelijk dat het estuarium zich nog steeds aanpast aan de plotselinge verlenging van ca. 8 eeuwen geleden. De combinatie van morfologische veranderingen, inclusief inpolderingen, afsluitingen en inundaties, zoals tijdens de 80-jarige oorlog toen de grenzen van het huidige Zeeuws-Vlaanderen werden vastgesteld met vele vestingwerken, leidden tot sedimentverlies en een toename van de getijslag. Omdat hierdoor het getijprisma weer toeneemt is ook de getijslag een aandrijvende kracht voor verder uitruimen van de geulen.

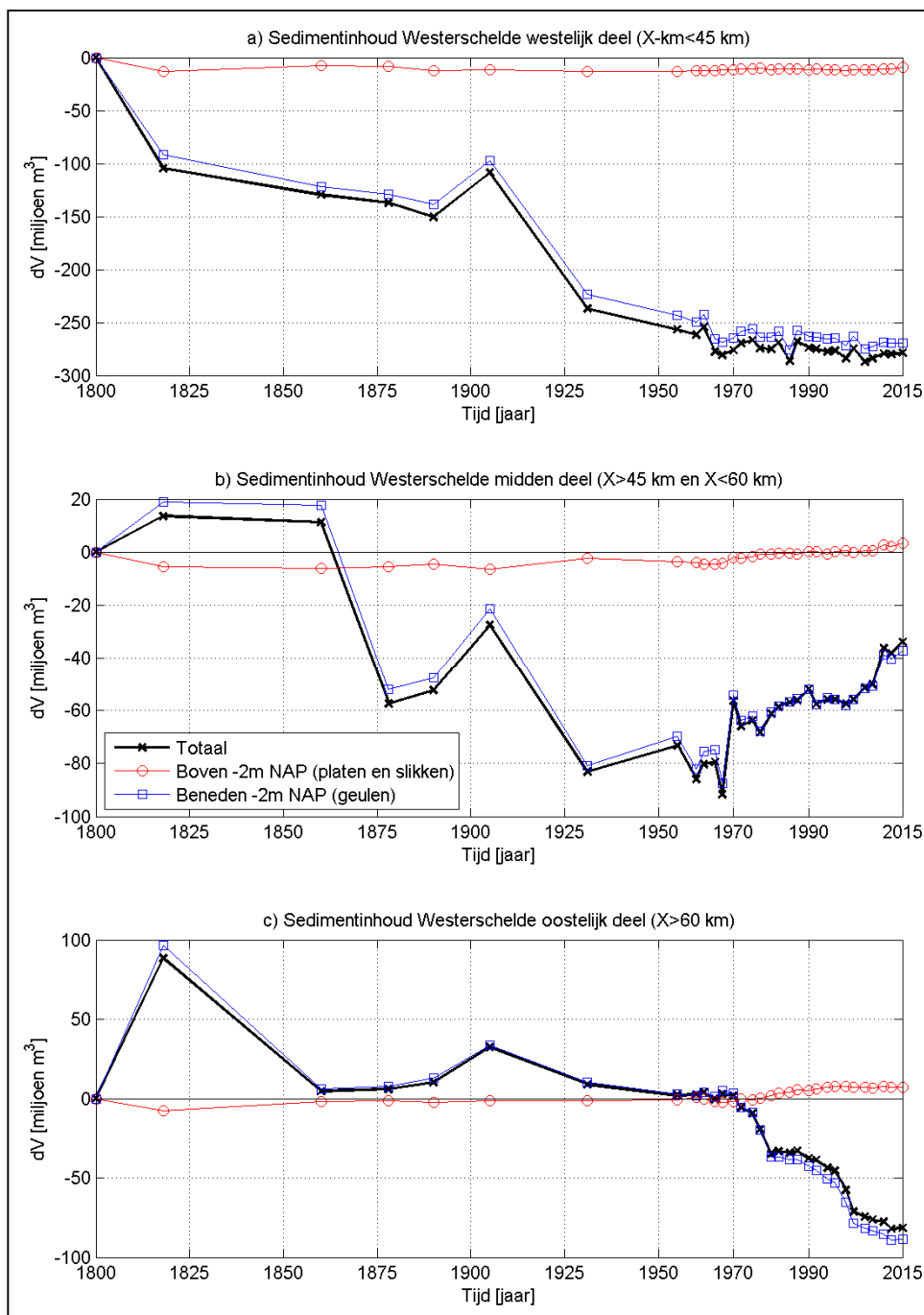


Figuur 2-5: Evolutie sedimentinhoud Westerschelde over laatste twee eeuwen (Dam, 2017)

De meest plausibele verklaring voor de afname in de periode 1860-1955 is dat de Westerschelde zelf de geulen uitruimde. De westelijke geulen zijn waarschijnlijk nog altijd te 'krap' voor het water dat er doorheen gaat. De laatste halve eeuw bleef er sprake van toenemende getijslag, in die periode vooral veroorzaakt door zandwinning, verdieping en onderhoudsbaggerwerk, vooral stroomopwaarts in het estuarium, zie o.m. Taal (2013). Hierdoor moet er nog meer water door de geulen, wat tot verder uitruimen leidt.

Een reconstructie van de sedimentbalans in Dam (2017) geeft aan dat het vrijgekomen zand van de westelijke geulen zich verspreidt in alle richtingen: naar het oosten, naar de (later) ingepolderde gebieden (Figuur 2-3) en ook richting de zee. De schatting is dat er tussen de 1,4 tot 2,4 Mm³ zand/jaar geëxporteerd is in de periode 1860-1955.

Het is aannemelijk dat de hierboven beschreven morfologische aanpassingen nog steeds actief zijn en een aandrijvende kracht zijn voor de export van zand uit (in het bijzonder de westelijke) geulen van de Westerschelde.



Figuur 2-6 Evolutie sedimentinhoud Westerschelde: uitgesplitst naar westelijk, midden en oostelijk deel. Tevens uitsplitsing naar geulen en intergetijdengebieden

2.3.2 Menselijke invloeden op lagere schaalniveaus

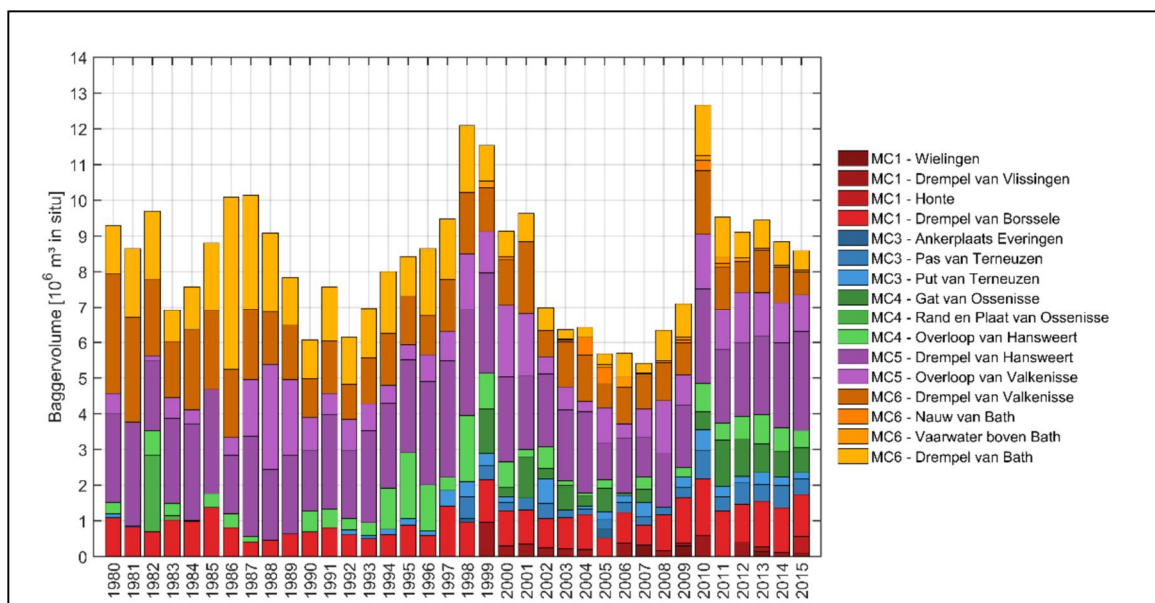
Ook op lagere schaalniveaus kan een onderverdeling gemaakt worden in vastleggingen en sedimentbeheer.

Op macro- en mesoschaal zijn er *vastleggingen* door bijv. het aanbrengen van oeververdediging of de aanleg van strekdammen (Stroomleidam), leidingkruisingen (Gasdam) of het aanleggen of afsluiten van kleine havens of spuisluizen. Genoemd kunnen worden de recente ontwikkelingen bij Terneuzen (Braakmanhaven, aanleg Nieuwe Sluis), de uitbreiding van havens (Vlissingen Sloehaven, Hansweert) of het verdwijnen door inpoldering (zoals in het verleden Sluis, Aardenburg en Axel, zie Figuur 2-2), indijking (Hoofdplaat) of ontpoldering (veerhaven Perkpolder). Nieuwe spuisluizen zijn aangelegd bij o.m. De Paal en Bath.

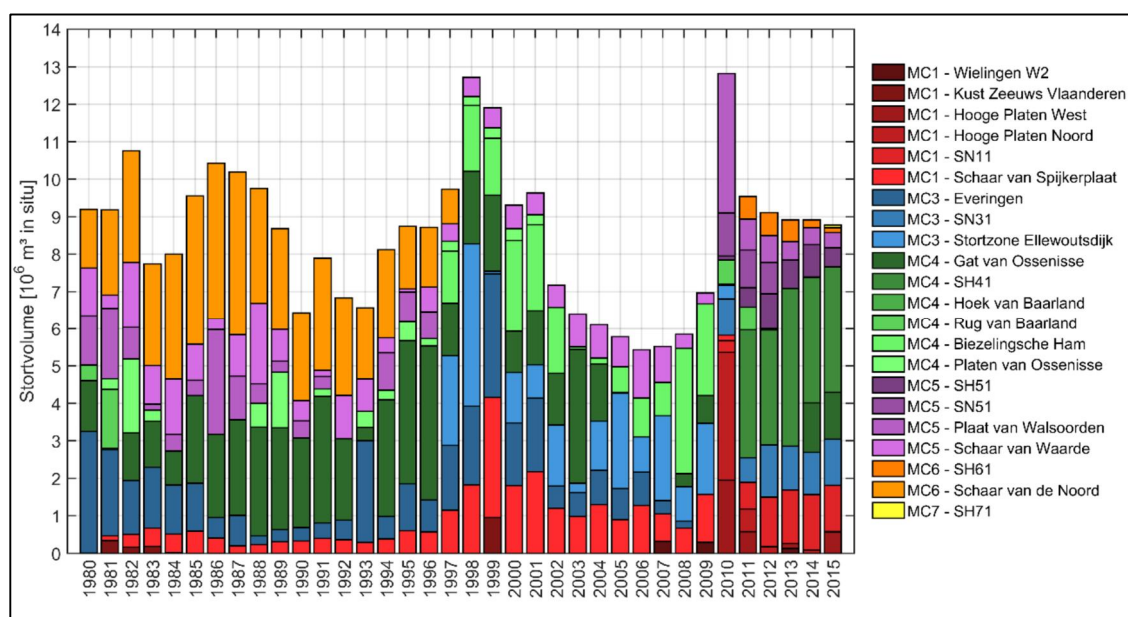
Binnen het *sedimentbeheer* is de zandwinning van belang geweest voor de macro- en mesoschaal ontwikkelingen vanwege de invloed op de zandvoorraden. Voor het beheer en beleid van groot belang is de *bagger- en verspreidingsstrategie*, zie ook paragraaf 1.5.2. Deze heeft op de mesoschaal een grote invloed op de sedimentinhoud van de morfologische elementen.

Baggeren gebeurt op de drempels en andere ondiepe en/of nauwe delen langs de vaargeul. Figuur 2-7 geeft de gebaggerde volumes op de verschillende locaties. Dit heeft direct invloed op de morfologische ontwikkeling op mesoschaalniveau. Door het storten van gebaggerd materiaal wordt de morfologische ontwikkeling op macroschaal (veranderingen in verhouding hoofd- en nevengeul of veranderingen in sedimentinhoud van een macrocel) beïnvloed. Figuur 2-8 geeft de gestorte volumes op de verschillende locaties. Stortingen langs een plaatrand zijn juist gericht op het sturen van ontwikkelingen op mesoschaalniveau.

Een goede bagger- en stortstrategie is gezien het voorafgaande erg belangrijk. Met gebaggerd sediment bepaalde ecotypen creëren is een al genoemd voorbeeld. Een vraagstuk is of met slimmer storten van het gebaggerd sediment de (grootschalige) getijvoortplanting kan worden beïnvloed (Huisman et al, 2018).



Figuur 2-7 Baggervolumes op verschillende locaties in de Westerschelde tussen 1980 en 2015. Elke locatie wordt weergegeven in een verschillende kleur (uit: Goossens et al, 2016)



Figuur 2-8 Stortvolumes op verschillende locaties in de Westerschelde tussen 1980 en 2015 (Goossens et al, 2016)

2.4 Mesoschaal veranderingen en denkmodellen

Deze paragraaf besteedt aandacht aan veranderingen op mesoschaal die (a) als negatief worden aangemerkt, (b) spelen in meerdere macrocellen en (c) waarvoor de aanname is dat ze (deels) gestuurd worden door menselijke ingrepen. Dit zijn achtereenvolgens (i) de afname van de omvang van nevengeulen en de gevolgen daarvan voor de stortcapaciteit in die geulen; (ii) de ophoging van de platen, (iii) de afname van de kortsluitgeulen en (iv) de afname van het areaal ondiep water.

2.4.1 Afname van de omvang van nevengeulen.

De verruiming en het onderhoud van de vaargeul hebben tot gevolg gehad dat de hoofdgeulen groter zijn geworden. Ook zijn een aantal nevengeulen afgenomen in omvang. Voor die afname is, vanaf het opstellen van de Lange Termijn Visie, veel aandacht geweest. De vrees is dat een dergelijke ontwikkeling op lange termijn resulteert in het volledig verdwijnen van de nevengeul en (in die macrocel) een verandering naar een ééngeulstelsel plaatsvindt. De overheersende mening is dat een verandering naar een ééngeulstelsel voor de scheepvaart negatief is (scheiding verkeersstromen niet goed meer mogelijk) en waarschijnlijk ook voor natuurlijkheid (huidig aanwijzingsbesluit spreekt van opgave tot 'instandhouding van het meergeulensysteem'). Ook vanuit veiligheidsoogpunt is de beoordeling negatief, omdat het kan leiden tot hogere waterstanden en meer golfaanval op de dijken.

Momenteel vindt in twee macrocellen een structurele afname van de omvang van de nevengeul plaats: Macrocel 4 (Middelgat, zie paragraaf 6.3) en Mesocel 2 (Vaarwater langs Hoofdplaat, zie paragraaf 4.3.1). De snelheid van sedimentatie in deze nevengeulen is dusdanig dat het zeker honderd jaar zal duren voordat ze volledig zijn opgevuld. Vanuit dat gegeven is een eventuele overgang naar een ééngeulstelsel zowel een lokaal als een geleidelijk verschijnsel. Dit kan niet gekarakteriseerd worden als een (onomkeerbare) 'systeemomslag'. Macrocel 5 kent een andere opvallende ontwikkeling. Hier waren lange tijd twee samenhangende nevengeulen, maar de omvang van één ervan (Zimmermangeul, zie paragraaf 7.4) is nu zodanig klein dat er delen droogvallen bij laag water.

De hypothese dat een verandering naar een ééngeulstelsel mogelijk is, is gebaseerd op hydrodynamische en morfodynamische analyses. Door (al dan niet door mensen veroorzaakte) verruiming van de vaargeul en verlagen van de drempels gaat er meer stroming door de hoofdgeul, zodat ook elders in hoofdgeul een verdieping plaatsvindt. Vervolgens gaat er nog meer stroming door de hoofdgeul. Hierdoor wordt de nevengeul ernaast minder belangrijk. Het effect versterkt zichzelf. Het storten van baggerspecie in de nevengeul kan daarbovenop een directe verkleining van de nevengeul teweegbrengen.

Meerdere publicaties (o.a. Jeuken en Wang, 2010) en rapporten (o.a. Jeuken, 2014) hebben gewerkt aan richtlijnen voor de stortcapaciteit om de mogelijkheid van verandering naar een ééngeulstelsel beter te begrijpen en te voorkomen. De maximale stortintensiteit is daarbij gerelateerd aan enerzijds de bruto sediment transportcapaciteit van de nevengeul en anderzijds de autonome ontwikkeling (die bijvoorbeeld heel belangrijk is voor de stortcapaciteit van het Middelgat). Van de drie genoemde in omvang afnemende nevengeulen bevat alleen het Middelgat vergunde stortlocaties, maar deze worden in de praktijk niet meer benut.

2.4.2 Stortcapaciteit in de nevengeulen

In 2017 is een kennisoverzicht opgeleverd (presentatie in powerpoint) m.b.t. de stortcapaciteit in nevengeulen en de stabiliteit van het meergeulenstelsel. Deze presentatie is opgenomen in Bijlage A en hieronder staat de hoofdlijn.

De *veilige ondergrens* voor de stortcapaciteit in de nevengeulen (volgens Jeuken & Wang 2010) is gebaseerd op de berekende sedimenttransportcapaciteit en een factor α , die een waarde heeft van 0,05 (als de nevengeul een sedimenterende trend heeft) of 0,1 (bij een eroderende trend). De sedimenttransportcapaciteit wordt bepaald met een numeriek model. Als er netto onttrekkingen in de nevengeul optreden vergroten deze (met dezelfde omvang) het maximum stortvolume in de nevengeul. Een qua effecten optimaler maximum stortvolume kan via een numeriek model onderzocht worden. Bij de MER voor de 3^e verruiming is dit gedaan via simulaties van stortscenario's. Hierdoor kon de stortcapaciteit met 1/3 worden vergroot, maar niet alleen in de nevengeulen. Ook leerde de praktijk dat herstel van de omvang van de nevengeul kan optreden. Hiervoor is uiteraard wel een bijstelling / verandering van de stortstrategie nodig.

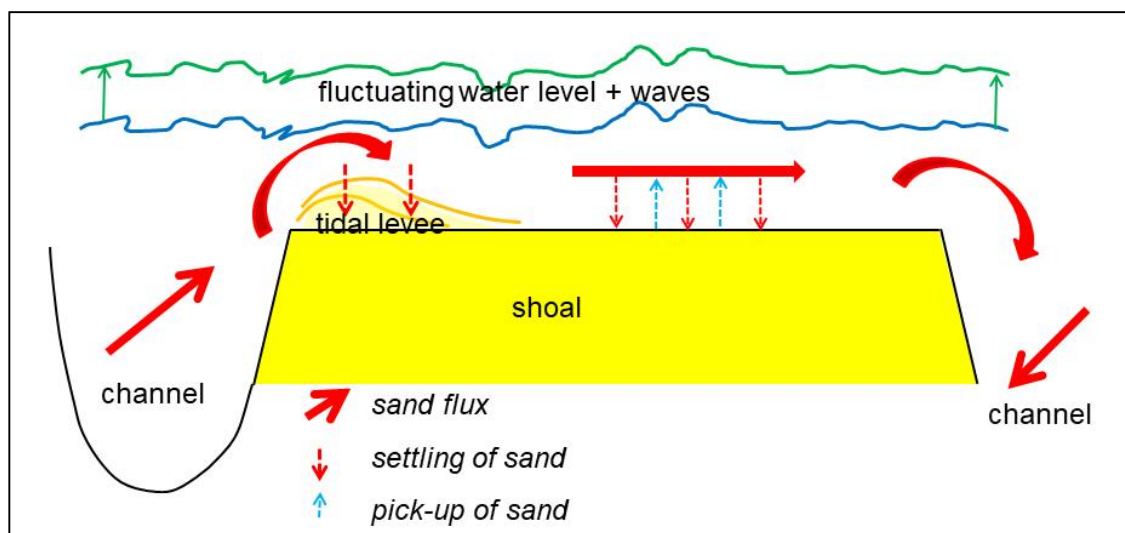
In opdracht van het overleg Flexibel Storten is in 2014 een advies opgeleverd voor het 'verbeteren van het Criterium Nevengeulen' (Jeuken et al, 2014). Hierin is een alternatief gepresenteerd voor de bestaande toetsing die geen rekening houdt met ontwikkelingstrends, zoals (autonome) verondieping. Het alternatief neemt de trends én beleidskeuzes aangaande de ontwikkelingen van de geulen mee. Met beleidskeuzes wordt bedoeld op macrocelniveau kijken naar de gewenste situatie, in acht nemend de evolutie en de gebruiksfuncties. Dit leidt dan tot keuzes voor ontwikkeling van nevengeulen en/of kortsluitgeulen.

De overzichtspresentatie in Bijlage A heeft als conclusie dat stortruimte maken door sleutelen aan α is af te raden. Ook wordt opgemerkt dat eerdere literatuur weinig ingaat op 'bijzondere' stortlocaties. Diepe putten en stortingen op plaatranden die niet in nevengeulen plaatsvinden, vergroten de totale stortcapaciteit.

Om de effecten van het gebruik van deze 'bijzondere' stortlocaties te begrijpen is een investering in modelinstrumentarium nodig. Behalve onderzoek en monitoring van de plaatrandstortingen op de plaatranden zijn ook een aantal proefstortlocaties in de diepe delen aangewezen voor onderzoek en monitoring, zie paragraaf 1.5.2.

2.4.3 Ophoging van de platen en slikken

Sedimentatie en erosie op de platen (shoals) wordt gestuurd door de interactie tussen plaat en geul. Het algemene inzicht hierover is dat getijstroming sediment van de geul naar de plaat brengt en voor de opbouw van de plaat zorgt, terwijl golven erosie op de plaatrand veroorzaken en zo voor afbraak van de plaat zorgen (Cleveringa, 2007, 2013b). Ook plaatvallen zorgen voor sedimentverlies van een plaat evenals insnijding van krekken die vloed- en regenwater afvoeren. De balans tussen de opbouw en afbraak bepaalt de hoogte van de plaat en heeft invloed op de samenstelling van de bodem. Andere (aansluitende en aanvullende) conceptuele modellen zijn beschreven door De Vet et al. (2017) en Wang et al (2018). De Vet et al (2017) vergeleek de ontwikkeling van de platen in de Westerschelde en de Oosterschelde. De meeste platen in de Westerschelde zijn meer in hoogte toegenomen dan de lokale verhoging van het hoogwater. Wang et al (2018) presenteerden in hun studie van de Waddenzee een conceptueel model voor plaat-geul interactie voor zandige en slibrijke getijdegebieden met intergetijdenplaten en -slikken. Elementen daarvan lijken toepasbaar op (delen van sommige) platen van de Westerschelde². Belangrijk verschil tussen de droogvallende platen in de Waddenzee en in de Westerschelde is, dat de stroming in de Westerschelde ook tijdens een deel van de eb fase opwaarts de plaat gericht kan zijn. Omdat dit denkmodel nog niet eerder tegenover de waarnemingen in de Westerschelde werd gezet wordt het hieronder uiteen gezet en is het schematisch weergegeven in Figuur 2-9.



Figuur 2-9 Conceptueel model plaat-geul interactie: opbouw platen door de vloedstroming (pres. Van der Spek, *Sedimentbalans Waddenzee*, 2017)

Conceptueel model geul-plaat-interactie op basis van waarnemingen

In dit conceptuele model kan het getij als een soort pomp beschouwd worden, die steeds een verse hoeveelheid water met zand en slib aanvoert, en de plaat als een bezinkbak. De belangrijkste factoren zijn dan getijslag en sedimentconcentratie. De getijslag en de sedimentgradatie en -concentratie bepalen de snelheid waarmee de ophoging plaatsvindt. Omdat de platen alleen bij vloed overstroomd worden en vooral rond de kentering de stroomsnelheden gering zijn (laagdynamisch areaal), kan juist hier gesuspenderd fijn zand en

² B.v. de waarnemingen aan de sedimentatie van de Plaat van Walsoorden, waar boringen zijn uitgevoerd die afwisselend zand- en sliblaagjes laten zien, zie Mastbergen en Schrijvershof (2016).

slib zich afzetten. Wanneer de plaat een hoogte bereikt waarbij deze gedurende langere tijd (meerdere getijdeperiodes achter elkaar) droogvalt, kan zich daar vegetatie ontwikkelen (schorvorming). Door golven in combinatie met hoogwater kan het sediment op de plaat weer in suspensie gaan en afgevoerd worden. Golven kunnen ook zorgen voor het ophogen van de plaat, door golfoverslag. De hiervoor benodigde golfenergie wordt alleen aangetroffen bij de monding en heeft geresulteerd in het hoge gebied aan de westzijde van de Hooge Platen (de Bol). De meeste platen in de Westerschelde liggen echter in de luwte, zodat erosie door golven alleen optreedt bij meer stormachtige condities. Door de voortdurende ophoging en versteiling van de plaatranden zal met een zekere regelmaat ook plaatval optreden.

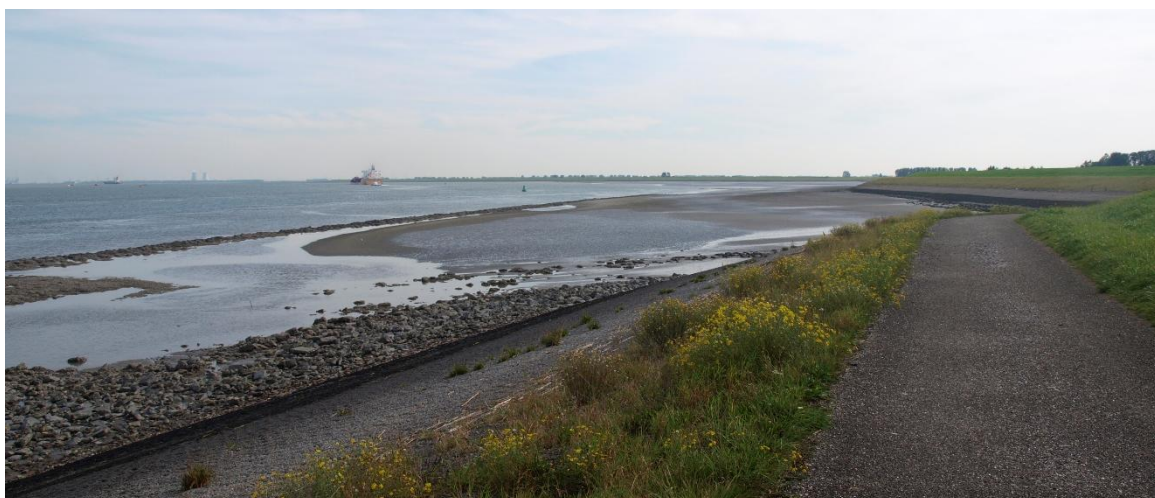
In de dieper gelegen randen van de platen is de stroming tijdens bepaalde fasen van het getij (vooral de vloed) echter dusdanig sterk, dat er geen fijn sediment afgezet kan worden (hoogdynamisch areaal). Het zandtransport (veelal grover zand) vindt hier plaats in de vorm van 'bed load'. De bodemvormen bestaan uit megaribbels of ze ontbreken ('upper stage plane bed') en er kunnen grootschaliger vormen ontstaan (spits).

De sedimentaanvoer verder op de platen, op de laagdynamische delen, vindt hoofdzakelijk plaats als suspensietransport en bestaat diensgevolge vooral uit fijn zand en slib. Bij aflopend water bij het inzetten van de eb, zal de terugtrekkende stroming zich meer concentreren en insnijden in geulen en deels insijgen in het droogvallende zand. Daardoor wordt het op de plaat afgezette sediment niet weer geheel teruggevoerd. Op sommige plaatsen langs kleinere geulen (niet de hoofd- en nevengeul) kunnen langs de plaatranden grovere sedimentafzettingen optreden die een soort drempel (tidal levee) vormen waarachter een depressie ontstaat en waarin fijner sediment achterblijft, zoals geschetst in Figuur 2-9. Figuur 2-10 geeft een voorbeeld daarvan op de Plaat van Walsoorden.



Figuur 2-10 Geul op de Plaat van Walsoorden bij laag water (2014). Het witte (drogere) zand vormt een soort tidal levee langs de geul (Figuur 2-9). De donkere lagen zijn kleilagen ontstaan uit eerder ingevangen sliblaagjes. (Mastbergen en Schrijvershof, 2016).

Het conceptuele model is ook toepasbaar op de intergetijdengebieden langs de oevers, de slikken (intertidal mud flats). Ook daar kunnen luwe plaatsen ontstaan waar sedimentatie van slib plaatsvindt. In de Westerschelde zijn deze te vinden (i) op plaatsen achter de vooroververdediging langs de buitenbochten, zie Figuur 2-11, (ii) in doodlopende vloedscharen en (iii) tijdens overstromen van begroeide delen zoals de schorren.



Figuur 2-11 Slikken ten zuiden van Walsoorden (2014). Hier kan slib bezinken in de luwte van de geulwand-verdediging die hier langs het Zuidergat doorloopt tot Baalhoek.

In de vigerende denkmodellen voor de opbouw van intergetijdenplaten wordt verondersteld dat deze blijven ophogen, maar dat de sedimentaanvoer gaandeweg afneemt bij geringere overstromingsdiepte boven de plaat bij vloed, totdat deze uiteindelijk geheel droogvalt of juist door stormcondities weer wordt afgebroken. Het denkmodel veronderstelt een dynamisch evenwicht tussen aanvoer en afbraak, waardoor zich over langere tijd gemiddeld een evenwichtshoogte instelt, die is gerelateerd aan het lokale niveau van hoogwater. Deze denkmodellen zijn niet meer toepasbaar als de platen of slikken dermate hoog worden dat schorvegetatie tot ontwikkeling kan komen.

Verschillende factoren kunnen verantwoordelijk zijn voor de verschillen in hoogteontwikkeling van de plaatcomplexen in de Westerschelde (Cleveringa, 2013b). Daarbij spelen onder meer de locatie en omvang van het verspreiden van de baggerspecie nabij de platen een rol en de ontwikkeling van de aanpalende neven- en hoofdgeul en mogelijk ook de kortsluitgeulen.

Het verschil tussen de ontwikkeling van de platen en de langs de oevers gelegen slikken in de Westerschelde wordt onder andere verklaard doordat de randen van de slikken worden beschermd door een harde vooroever, waardoor de getijdegeulen geen vat op deze gebieden hebben (zoals bijvoorbeeld Zuidgors, Slikken van Baalhoek, Bath en Borssele, zie ook Figuur 2-11).

2.4.4 Afname kortsluitgeulen

Het aantal, de grootte en de dynamiek van de kortsluitgeulen in de Westerschelde zijn afgenomen in de afgelopen decennia (Swinkels et al., 2009). De aanwezigheid en de omvang van de kortsluitgeulen wordt gerelateerd aan het momentane verschil in waterstand tussen de twee grote geulen. Dit waterstandverschil wordt beschouwd als de drijvende kracht voor het behouden en de activiteit van de kortsluitgeulen. De ontwikkeling van de kortsluitgeulen wordt dus bepaald door de getijvoortplanting door de twee grote geulen in een macrocel en is gerelateerd aan de morfologische ontwikkeling op een groter schaalniveau.

De inkrimping van de kortsluitgeulen is gelijktijdig opgetreden met de ophoging van de platen. Voor de kortsluitgeulen over de platen (shoal connecting channels) is er een verband gelegd tussen deze twee ontwikkelingen, omdat ze elkaar kunnen versterken. De gedachte is dat verhoging van de plaat ook tot opvulling van de kortsluitgeulen daardoorheen leidt en dat een hogere plaat het migreren van de kortsluitgeulen moeilijker maakt (dus afname dynamiek). Aan

de andere kant bevordert de afname van de dynamiek van de kortsluitgeulen weer de verhoging van de plaat, omdat geulmigratie plaatverlagend werkt (geregenereerde plaat achter de migrerende geul is lager dan de oude plaat die door de migrerende geul wordt geërodeerd). Hoewel dit verband tussen de twee ontwikkelingen plausibel lijkt, moet het als een hypothese worden beschouwd. De alternatieve verklaring is dat de twee ontwikkelingen door hetzelfde proces worden aangedreven.

2.4.5 Afname areaal ondiep water

Het areaal ondiep water is het gebied onder de laagwaterlijn waarvan de bodem hoger dan NAP-5 m ligt. Dit is het gebied tussen het intergetijdengebied en de diepe delen van de geulen (dieper dan NAP-5 m). Ondiep water heeft een belangrijke functie in het ecologische systeem als kraamkamer voor vissen en habitat voor bodem- en schelpdieren. Afname van het areaal ondiep water ten gunste van intergetijdengebied en vooral diep water, wordt daarom als negatief beschouwd. De afname van ondiep water in de Westerschelde heeft verschillende oorzaken, waaronder de afname van kortsluitgeulen (die vaak tot ondiep water behoren) en de verruiming van de hoofdgeulen (zie Figuur 1-3). De combinatie van afname van het areaal ondiep water, ophoging van platen en verruiming van geulen wordt ook wel verstelling genoemd.

2.5 Modelonderzoek op mesoschaal

2.5.1 Doel en gevraagde functionaliteit

De beheervraagstukken in de Westerschelde liggen meestal op mesoschaal niveau (zie o.m. 1.1) en leiden tot kennisvragen als 'wat is het effect van baggeren op de drempels', 'hoe verspreidt het teruggestorte sediment zich', 'hoe verloopt de vorming, migratie en erosie van banken en geulen', 'wat zijn hoogte en lengte van duinen in de vaargeul en langs de plaatranden', 'vindt er aangroei of erosie plaats van slikken' en 'wat is de ontwikkeling van vegetatie en schorren en het effect op ecotopen / vogels'?

Binnen de VNSC wordt hiervoor een grote hoeveelheid gegevens verzameld, zowel over de morfologische als de ecologische ontwikkelingen. De frequentie van meten is soms relatief hoog, zie bijv. Maandrapportage Flexibel Storten, Goossens & Depreiter (2017a, b, 2018) en Schrijver, (2018). Deze metingen worden direct gebruikt voor de beoordeling van de ontwikkelingen en de effecten van de beheersmaatregelen.

Met een model kunnen de metingen beter begrepen worden. We kennen fysische en numerieke modellen. Een fysisch model kan een schaalmodel zijn of een model dat de fysische processen op megaschaal versneld reproduceert en daarmee inzicht geeft in de lange-termijnontwikkelingen (zoals de Metronoom in Utrecht, Kleinhans et al, 2014). Op macroniveau wordt de hydrodynamica in de Westerschelde al goed beschreven met numerieke modellen, zie paragraaf 2.5.2. Met een numeriek 'process-based' model dat is gevalideerd met de beschikbare metingen is het mogelijk om gericht bepaalde effecten kwantitatief te onderzoeken en de gevolgen te voorspellen op de kortere termijn en a.h.w. experimenten uit te voeren die in de praktijk niet mogelijk zijn, bijv. scenario's in de stortstrategie, zie paragraaf 5.7.2.

Om met een numeriek model de morfologische en ecologische ontwikkelingen ook op mesoschaal realistisch te kunnen simuleren, zie bijv. paragraaf 6.8.2 en 7.5.2, zijn verschillende in complexiteit opeenvolgende beschrijvingen nodig voor:

- 1) Hydrodynamisch gedrag (waterstanden en stroomsnelheden op niveau dagelijks getij, maandelijks cyclus of jaarlijks met seizoenseffecten en golven bij gegeven

- bodemligging, rivier- en zee randvoorwaarden en randvoorwaarden tussen de macrocellen),
- 2) Sedimenttransport (met zand en slib, invoer op basis van bronnen/putten door baggeren en storten en rivier- en zee randvoorwaarden of randvoorwaarden tussen de macrocellen en de sedimentverdeling op de bodem en langs de oevers),
 - 3) Morfologische ontwikkelingen (bodemveranderingen, ligging en samenstelling),
 - 4) Ecologische effecten (wordt voldaan aan criteria voor ontwikkeling vegetatie en gevolgen voor voedsel en broedgelegenheid voor vogels).

Stroming en sedimenttransport

Transport van zand en slib wordt in hoge mate bepaald door de stroomsnelheid en varieert dus sterk en niet-lineair gedurende een enkele getijperiode of een etmaal. Suspensietransport volgt de stroming zolang de snelheden hoog genoeg zijn ten opzichte van de valsnelheid van de deeltjes. Slib gedraagt zich min of meer als washload, het wordt door de getijstroming heen en weer meegevoerd en bezinkt alleen op locaties met zeer geringe snelheden. Door sedimentatie en resuspensie kan er voor de minder fijne fracties een naijlingseffect optreden gedurende de kentering of andere snelheidsveranderingen zoals in bochten.

De sedimenttransportcapaciteit volgt met behulp van sedimenttransportmodellen of formules (bijv. Engelund-Hansen of Van Rijn), toegepast voor één of meerdere verschillende fracties direct uit het snelheidsveld en tezamen met de beschikbaarheid (bodem) en aanbod (randvoorwaarden) volgen hieruit de sedimentatie en erosie.

Het bodemtransport van de grovere zandfracties manifesteert zich in de vorm van duinmigratie die zich veel langzamer voltrekt dan de getijstroming, maar de opgelegde schuifspanning bij de bodem van de eb- en vloedstroming wel vrijwel instantaan volgt. Het omkeren van de duinmigratiesnelheid en daarbij ook van de duinvorm tijdens de kentering is bijv. waargenomen bij gedetailleerde bodemmetingen bij de Plaat van Walsoorden (elke 20 minuten over een gebied van enkele honderden meters tijdens de IJkdijkproef in 2014).

Rond de kentering kan een verschil in stroomrichting ontstaan tussen het water bij de bodem en bij het oppervlak en daardoor zal de verticale snelheidsverdeling veranderen. Dit betekent dat de verhouding tussen bodem- en suspensietransport en zelfs de richting kan veranderen. Om dit effect goed te kunnen reproduceren is voor een nauwkeurige lokale modellering een diepteafhankelijke (3D) stromingsmodellering nodig. Daarnaast spelen 3D-effecten een belangrijke rol in de bochten en in de diepe delen.

De huidige generatie hydrodynamische modellen zijn in staat om de getijstroming (waterstanden en stroomsnelheden) in de Westerschelde en in de macrocellen afzonderlijk nauwkeurig te reproduceren met voldoende hoge resolutie (10x10 m), al vergt dat een behoorlijk inspanning op het gebied van randvoorwaarden op de macrocelgrenzen (als per macrocel gerekend wordt), kalibratie van o.a. bodemwrijving en rekencapaciteit. Golven en dichtheidseffecten (zout/zoet) zijn in de oostelijke Westerschelde meestal minder belangrijk, maar kunnen zeker in de monding wel van belang zijn. De invloed van menging door scheepvaart is vooralsnog niet goed bekend, maar het effect van scheepsgolven is wel onderzocht en er zijn ook metingen beschikbaar (Schroevens, 2015).

Morfologische veranderingen

De volgende stap in de modellering is de morfologische modellering d.w.z. het berekenen van de verandering in bodemhoogteligging en samenstelling op wat langere termijn, inclusief de effecten van baggeren en storten. De verandering per getij zijn groot, maar toch moet over een langere periode naar het uiteindelijke netto effect gekeken worden. De bodemveranderingen

die pas zichtbaar worden over een langere periode bijv. 1 maand of 1 jaar, zoals gemeten en vastgelegd in kaarten in de tweemaandelijksse rapportage Flexibel Storten, worden bepaald door het residuele sedimenttransport na middeling over de betreffende periode, als verschil tussen twee grote waarden tijdens de eb- en vloedstroming.

Sedimentbronnen zijn de bodem voor zover bestaand uit zand, slib of klei, de aanvoer vanaf de Zeeschelde en zijtakken en vanaf de zee en de stortlocaties. Sediment 'sinks' zijn de baggerlocaties op de drempels en vastleggingen door indijking of vegetatie. Het bezinken en weer baggeren en storten van fijn zand en slib in en uit de Westerscheldehavens vormt een belangrijke sedimentflux en mogelijke bron van vertroebeling, maar draagt niet bij aan de totale sedimentbalans van de Westerschelde, omdat het materiaal binnen het systeem blijft.

Bij het baggeren met sleepopperzuigers op de drempels vindt segregatie van fijn materiaal plaats (overvloei) en bij het storten vindt er opnieuw segregatie plaats, afhankelijk van de methode (plume stripping bij klappen of rainbowen). Er wordt dus slib in suspensie gebracht dat mogelijk oorspronkelijk bij de drempels is gebaggerd waar het afgedekt was met zand. Dit slib zal weer bezinken op de plaatranden en op de slikken, maar ook in de havens en mogelijk deels op de drempels als de stroomsnelheden daar voldoende laag zijn of als het ingevangen wordt door het zand dat hier bezinkt of als ribbels of duinen voorbijkomt.

Kennis van de samenstelling en eigenschappen van het op de bodem aanwezige sediment is ook belangrijk. Vaak wordt de McLaren kaart (McLaren, 1994) gebruikt die een eerste indruk geeft van de ruimtelijke verdeling van de korrelgrootte van het sediment op de bodem van de Westerschelde (zand dan wel klei). Daarnaast is de dikte van de zandlagen gegeven (soms vrijwel 0) op basis van de gemeten 'harde lagen', dit zijn erosie-resistente lagen zoals kleiafzettingen en veenlagen, (Figuur 2-4, Dam, 2013). Deze lagen kunnen ook geleidelijk eroderen. In Bijlage B is voor elke macrocel de beschikbare geologische informatie opgenomen in de vorm van een dwarsprofiel. Tenslotte kunnen gesuspendeerd zand en slib via de zee- of rivier-randvoorwaarde instromen.

Analyse van boormonsters genomen op de platen en in de geulen geeft aan dat het zand in de geulen (200-250 μm) grover is dan op de plaatranden (180 μm) en op de plaat zelf (110 μm) en dat op de platen slib in laagjes of in dikkere pakketten als klei wordt aangetroffen. Voor slib en klei is de korreldiameter zoals gegeven door McLaren echter geen relevante parameter, de cohesie is bepalend voor het erosiegedrag en flocculatie voor het sedimentatiegedrag. Harde lagen worden in de Westerschelde behalve door oude klei- of schelpenlagen ook gevormd door de veelal in de buitenbochten aangebrachte vooroeververdediging van dijken, bestaande uit zinkstukken en stortsteen of restanten daarvan (de 'nollen') bij verloren polders. Deze verdedigingen zijn bij aanleg op een bepaalde diepte afgezonken, maar de werkelijke diepteligging is moeilijk in te meten. Er bestaat nog geen digitaal model van de Westerschelde bodem waarin geologische lagen en vooroeververdediging is opgenomen. Omdat de diepteligging vaak niet goed bekend is kan niet altijd goed beoordeeld worden of er erosie plaatsvindt bij de teen of dat er sprake is van verzakking of aantasting van de bestorting. Ook kan de modellering van het sedimenttransport tot overschatting leiden als de geulwandverdediging ten onrechte als zandoppervlak wordt aangemerkt, wat dan weer met een calibratiefactor moet worden gecorrigeerd.

Het samenvatten van de beschikbare geologische informatie op basis van boringen en de informatie die beschikbaar is van de geulwandverdediging met een zo goed mogelijke vaststelling van de diepteligging op basis van aanleggegevens en dieptemetingen, tezamen met de bestaande bijgewerkte informatie over de dikte en samenstelling van de zandlagen in een nieuw digitaal bodemmodel van de Westerschelde zou een belangrijke verbetering kunnen zijn.

Validatie van het berekend sedimenttransport met metingen is op verschillende manieren mogelijk, zoals:

Stroom- en concentratiemetingen met ADCP

Analyse van de migratierichting van de duinen op de plaatranden en in de geulbodem, gemiddeld over meerdere getijcycli geeft ook inzicht in de richting van het zandtransport langs de bodem. Een analyse is uitgevoerd in Plancke et al (2017b, c). Daarbij is ook een dieptegemiddelde stromingsberekening gemaakt (2DH), die aangeeft waar sprake is van eb- en waar van vloeddominantie. In deze studie is de totaaltransportformulering van Engelund-Hansen toegepast. De transporten zijn dan een directe, zij het sterk niet-lineaire functie van het netto stromingsbeeld (zie bijv. Figuur 3-14). Deze formulering geeft een goede eerste indicatie van het sedimenttransport. In het rapport zijn aanbevelingen gedaan om vanwege de onzekerheden de numerieke modellering te verbeteren en te valideren met metingen. Deze metingen zijn in 2018 al deels uitgevoerd en worden nog uitgewerkt. In 2018 zijn door RWS / WLB zandtransportmetingen uitgevoerd rondom de Plaat van Ossensisse, deze metingen leveren mogelijk ook nieuw validatiemateriaal. De meting geeft echter slechts resultaten voor één locatie en het ruimtelijk beeld is dan moeilijk te verifiëren.

Proefstortingen en plaatval 2014 als validatieproeven

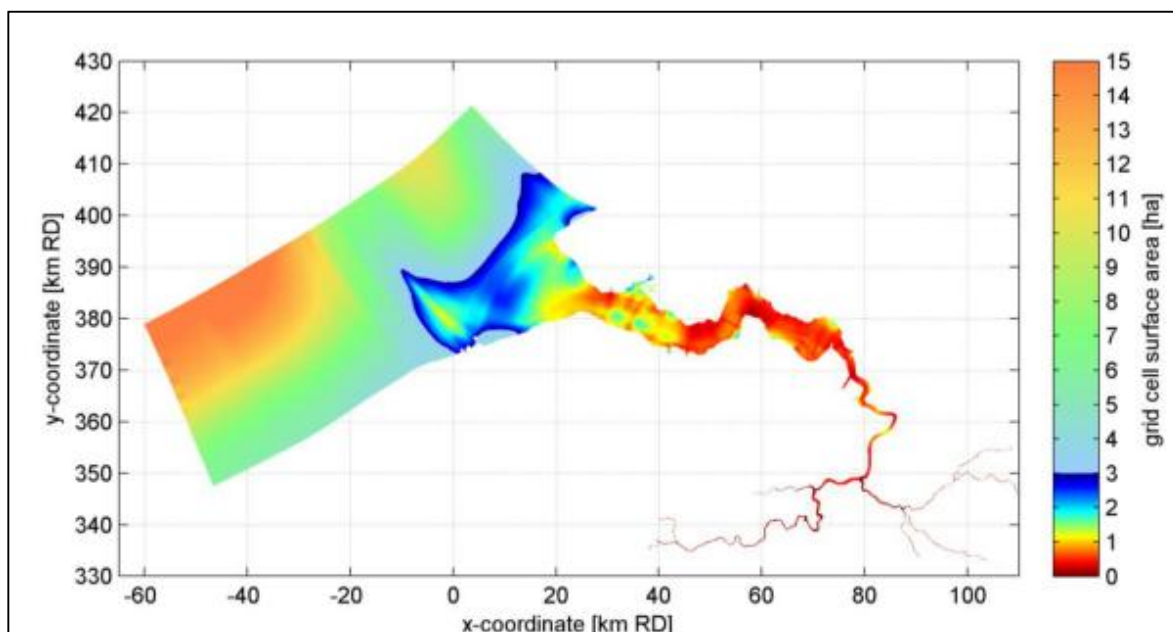
Als precies bekend is hoeveel zand wordt gestort kan een numerieke simulatie vergeleken worden met de metingen van de bodemligging. In 2014 is een grote plaatval opgetreden bij de zuidrand van de Plaat van Walsoorden waarbij in korte tijd ruim 800.000 m³ zand in een ruim 7 m dikke laag in de hoofdgeul is afgezet. In de daaropvolgende maandelijkse bathymetriemetingen van IMDC en RWS kon de migratie van deze hoeveelheid zand in detail gevolgd worden (Van Schaick, 2015). Het zand bewoog als een megaduin in stroomopwaartse richting door het Zuidergat in Macrocel 5 en ging uiteindelijk weer naar de plaatranden. Het volume nam daarbij gestaag af, waarschijnlijk doordat het fijnere deel van het zand geleidelijk in suspensie ging. Tegelijkertijd vulde de ontstane krater in de plaatrand zich langzaam met grote hoeveelheden slib en fijn zand en bouwde zich langs de plaatrand een zandspit uit in stroomafwaartse richting die de krater uiteindelijk afsloot en waarbij het doorgaande zandtransport langs de plaatrand hersteld werd (Mastbergen en Schrijvershof, 2016). Deze metingen vormen een bijzondere kans voor validatie van de beschikbare morfologische modellen op mesoschaal. De grootte en richting van het residuele bodemtransport volgt namelijk direct uit de metingen evenals het deel dat in suspensie gaat, alleen is niet bekend waar het suspensietransport precies heen gegaan is. De eerste berekeningen met een mesoschaal Delft3D model met Engelund-Hansen en Van Rijn formulering gaven nog geen overeenstemming met de metingen te zien, hoewel het model de bezinking van slib wel goed voorspelde. Een vergelijkbaar model is beschikbaar en gebruikt voor de analyse van de plaatrandstortingen bij de Plaat van Walsoorden (zie paragraaf 7.5.2). Daarmee werd een goede overeenstemming bereikt tussen gemeten en berekende bodemligging, maar de transporten konden niet gevalideerd worden.

2.5.2 Beschikbare numerieke modellen van de Westerschelde

Er zijn verschillende numerieke modellen van de Westerschelde beschikbaar, zoals Scaldis (in gebruik bij het Waterbouwkundig Laboratorium te Antwerpen), de FINEL-modellen (Svašek), Delft3D-NeVla (Deltares, open source) en het Delft3D-Flexible Mesh model, dat nog in ontwikkeling is. Daarnaast zijn er database modellen. De drie laatstgenoemde modellen worden hieronder verder besproken.

Het Delft3D-NeVla model is ontwikkeld in het LTV-project A27 (Grasmeijer, 2013). Het betreft een omzetting van het SIMONA NeVla model (enkel waterbeweging) naar Delft3D. Het

rekenrooster beslaat het gehele Schelde-estuarium inclusief de buitendelta en een stuk Noordzee (Figuur 2-12). Het model is 2DH (diepte-gemiddeld) en simuleert waterbeweging, golven, zout, zandtransport en morfologische ontwikkeling, rekening houdend met baggeren, storten en zandwinning, en de aanwezigheid van moeilijk erodeerbare (harde) lagen. Het model is gevalideerd aan de hand van waterstanden, debieten, sedimentatie- en erosiepatronen en baggervolumes (beide voor de periode 1998-2001).



Figuur 2-12 Domein van het Delft3D-NeVla model, met de roosterresolutie in hectare (Vroom et al., 2015).

In LTV-rapport G-4 (Van der Werf en Brière, 2013) is een vergelijking gemaakt met gemeten/geschatte lange-termijn trends in getij-amplificatie en -voortplanting, asymmetrie waterstanden, debietverhoudingen hoofd- en nevengeulen en de zanduitwisseling Westerschelde-Noordzee bij een opgelegde, gemeten en vaste bodem. Het Delft3D-NeVla model is door Vroom et al. (2015) verder ontwikkeld gericht op het mondingsgebied.

Van der Wegen et al. (2017) heeft het Delft3D-NeVla aangepast naar een morfodynamisch model en de morfologische ontwikkeling van het mondingsgebied over een periode van decennia gesimuleerd. Een morfologische variant van het Delft3D-NeVla model is door Schrijvershof & Vroom (2016) toegepast om stortstrategieën mee door te rekenen (zonder golven). Het model is hiervoor eerst gekalibreerd aan de hand van baggerhoeveelheden, zie paragraaf 6.3.3.

Schrijvershof & De Vet (2018) hebben een modelstudie uitgevoerd specifiek gericht op morfodynamische processen op mesoschaal niveau. Er is hiervoor een uitsnede gemaakt van het Delft3D-NeVla model ter plaatse van Macrocel 5 (Plaat van Walsoorden, "PvW" model) en de resolutie in oost-west richting 3x verfijnd. Het model is hydrodynamisch gekalibreerd met waterstanden, golfhoogtes en stroommetingen op de Plaat van Walsoorden en morfologisch aan de hand van bathymetrische opnamen van het gebied van de plaatrandstortingen. Het model kan de morfologische ontwikkeling (periode ~1 jaar) na de plaatrandstortingen in 2010 en 2012 redelijk goed reproduceren, zie paragraaf 7.5.2.

Voor een studie naar de morfologische haalbaarheid van broedeilanden op platen in de Westerschelde zijn het PvW model (Schrijvershof & De Vet, 2018) en het ZWeM model (Vroom

et al., 2016) aangepast en gebruikt om het effect van relatief kleine suppletievolumes aangebracht in het supragetijdengebied te evalueren.

Huisman et al. (2018) hebben het Delft3D-NeVla model, afgesneden bij Kruibeke, gebruikt om stortstrategieën in de diepere delen van de Westerschelde mee door te rekenen. Hierbij zijn sommen gedaan met een morfologisch ingespeelde bodem, met opgevulde putten, die een betere weergave zijn van de sedimentdynamiek in diepe putten. Ook is het Delft3D-NeVla model uitgebreid van 1 naar 5 zandfracties. Met het PvWmodel is de morfodynamiek van de Put van Hansweert, de 2016 proefstorting in het bijzonder, bestudeerd. Een 3D variant gaf enigszins hogere bodemschuifspanningen, maar de mobiliteit in de Put van Hansweert bleef onderschat. Met een ingespeelde/opgevulde bodem, kon de erosie van de proefstorting het eerste jaar na aanleg goed worden gereproduceerd, zie verder paragraaf 6.8.3.

Het Delft3D-NeVla model van de Westerschelde (Vroom et al., 2015) is door Tiessen et al. (2016) omgezet in een Delft3D Flexible Mesh schematisatie. Een schematisatie in deze nieuwe software geeft enkele voordelen ten opzichte van de oude software. Het belangrijkste is dat het rekenrooster ongestructureerd is waardoor er meer vrijheidsgraden zijn in de opbouw van het rooster. Hierdoor is het mogelijk om een zeer fijne roosterresolutie in het interessegebied te definiëren zonder dat dit nadelige effecten heeft voor andere delen van het modeldomein. Berekeningen kunnen hierdoor efficiënter uitgevoerd worden dan met de Delft3D versie met gestructureerde roosters (Delft3D4), daarnaast wordt deze versie niet meer verder ontwikkeld.

Het Delft3D-FM NeVla model (Tiessen et al., 2016) is gekalibreerd/gevalideerd op basis van de hydrodynamica in het estuarium (waterstanden, stroomsnelheden, debieten). Het vernieuwde model geeft een vergelijkbare reproductie als de oude versie. De rekentijd van het model is echter, na optimalisatie van het rekenrooster, gereduceerd tot een kwart van de rekentijd van het Delft3D4 NeVla model.

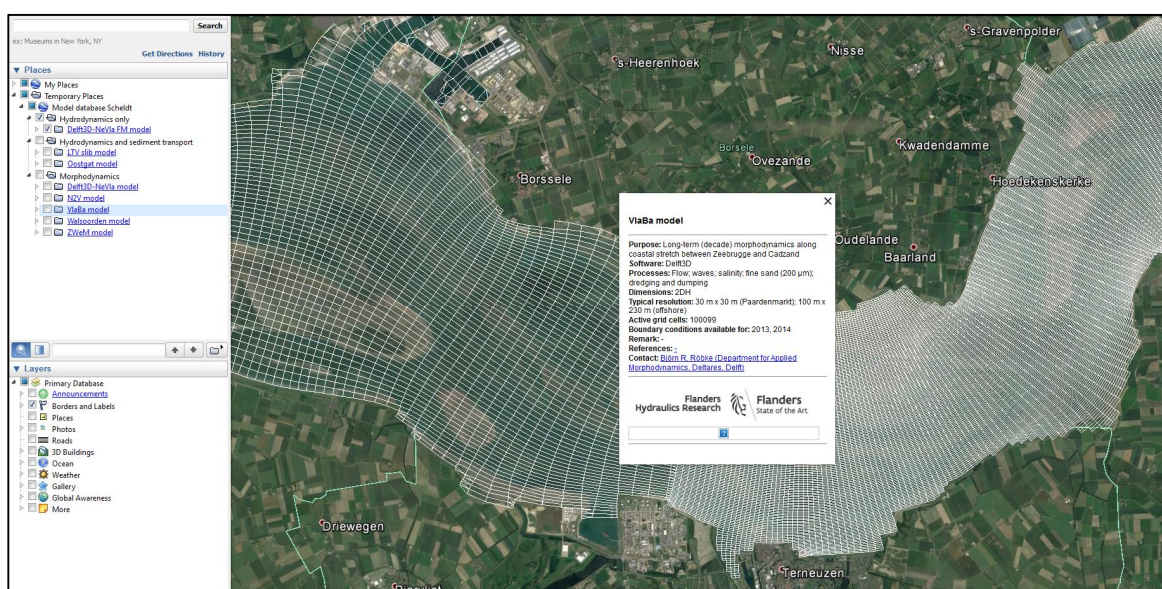
Willemsen (2016) heeft de Flexible Mesh variant van het NeVla model vervolgens gebruikt om een studie op mesoschaal uit te voeren (de plaatrandstortingen bij de Plaat van Walsoorden). Er zijn hydrodynamische en sediment-transportberekeningen gedaan van het gebied op een rekenrooster dat verfijnd is ter plaatse van het interessegebied. Van den Broek (2017) heeft een iets andere aanpak gehanteerd; hij heeft het Delft3D-FM NeVla model afgesneden bij de lijn Vlissingen-Breskens en de Nederland-Belgische grens om het verkleinde domein met een zeer fijne resolutie te kunnen doorrekenen. Hij heeft de roosterresolutie in twee stappen verkleind naar ~15x15 m bij de locaties Knuitershoek en Baalhoek in de Westerschelde; het "KnuBa" model. Het model is bedoeld om, in eerste instantie, het effect van nieuwe en verhoogde strekdammen op de stroming door te rekenen. Het model geeft een goede reproductie van de T0 snelheden op de rand van de geul in op de intergetijdengebieden. Het Delft3D-FM NeVla wordt momenteel door Van der Wegen & Schrijvershof (in voorbereiding) gebruikt om de 3D stromingspatronen in de Put van Borssele na te bootsen, welke bekend zijn van een meetcampagne uitgevoerd in 2011 (zie RWS, 2011). Ook in deze studie wordt er lokaal een verfijning van het rekenrooster toegepast. Deze studies zijn goede voorbeelden van de voordelen die de vernieuwde software met ongestructureerde rekenroosters geeft.

Er is een start gemaakt met de opzet en validatie van een morfologisch Delft3D-FM NeVla model (Röbke & Van der Wegen, in voorbereiding). Het hydrodynamische model is vereenvoudigd (grovere roosterresolutie, geschematiseerde randvoorwaarden) om 110 jaar morfologische ontwikkeling te reproduceren. Het doel van deze exercitie is om het modelinstrument gereed te maken voor lange termijn morfologische processen. Voor de middellange termijn (decennia) morfologische ontwikkeling is er nog geen Flexible Mesh variant van het NeVla model. Binnen het Vlaamse Complex Project Kustvisie wordt er wel gewerkt aan een morfologisch Delft3D-FM-model voor de Vlaamse kustzone en de monding van de

21 maart 2019, definitief

Westerschelde. Dit model is echter aan bovenstroomse zijde afgeknipt bij de overgang van Macrocel 3 en 4. Het model beslaat dus niet het oostelijke gedeelte van de Westerschelde en ook niet de bovenstrooms gelegen riviertakken.

Voor de Westerschelde modellen bestaat een database in de vorm van een kml-bestand voor Google Earth (Figuur 2-13). De database omvat alle modellen van de Vlaamse kust en de Westerschelde die in bezit zijn van Deltares en het Waterbouwkundig Laboratorium Antwerpen (WL). Middels het kml-bestand kan het rekenrooster van elke model gevisualiseerd worden in Google Earth. Verder bevat de database informatie over verschillende kenmerken van elk model, bijvoorbeeld over de toepassing van het model, de gebruikte software en de processen die door het model berekend worden (i.e.: stroming, golven, saliniteit, sedimenttransport, baggeren en storten). In de database zijn de modellen opgedeeld over de categorieën hydrodynamisch, hydrodynamisch met sediment transport (morfostatisch) en morfodynamisch.



Figuur 2-13 : Model database voor de Westerschelde en de Vlaamse kust in Google Earth.

2.5.3 Wat is nodig voor modellering mesoschaal morfologie?

Voor kansrijk morfologisch modelleren op mesoschaal zijn nodig, naast een voldoende geavanceerd hydrodynamisch model en een actuele bodemligging op hoge resolutie, zoals in de vorige paragraaf beschreven, ook een adequate beschrijving van:

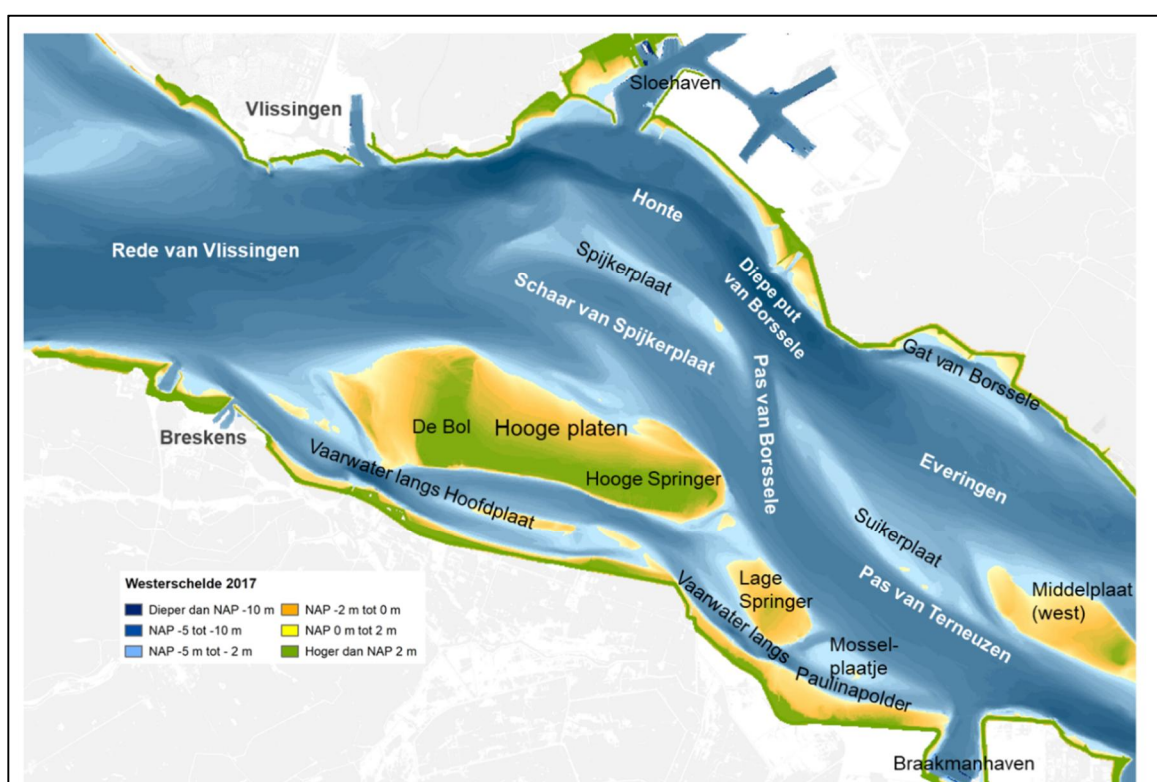
- 3D-stroming (in putten en bochten),
- Afzonderlijk bodem- (duinmigratie) en suspensietransport,
- Meerdere sedimentfracties (bijv. fijn en middelfijn zand en slib)
- Digitaal model van de bodemrandvoorwaarden, zoals de harde geulwanden, vaste klei- en veenlagen en de zandlaagdikte in combinatie met de andere zandeigenschappen, zoals korreldiameter en dichtheid,
- Kalibratie en validatie van de zandtransporten en morfologie op mesoschaal met metingen (een mogelijkheid hiervoor is het narekenen van het herstel van de plaatval 2014 als vervolg op Van Schaick, 2015 en Schrijvershof & De Vet 2016 met het mesoschaal model dat is ontwikkeld voor de Plaat van Walsoorden).
- Ontwikkeling vegetatie op de hogere delen en interactie met slib.

De in paragraaf 2.5.2 genoemde modellen of daarvan afgeleide modellen zijn in principe in staat de gevraagde fysische beschrijvingen op mesoschaal te leveren, maar dergelijke toepassingen zijn nog pas op beperkte schaal uitgevoerd of gevalideerd.

3 Macrocel 1, de Honte en de Spijkerplaat

3.1 Beschrijving morfologisch systeem Macrocel 1

Macrocel 1 ligt het dichtst bij de monding van de Westerschelde. De grens tussen monding en Westerschelde wordt meestal op de lijn Vlissingen-Breskens gelegd, waar het systeem het meest is ingesnoerd (tot ca 4,3 km). De hoofd- of ebgeul van Macrocel 1, de Honte (zie Figuur 3-1), tevens de vaargeul, sluit aan op de Rede van Vlissingen in de monding en strekt zich uit van de Drempel van Vlissingen tot de Pas van Borssele, waar regelmatig wordt gebaggerd om de vaardiepte te handhaven en waar de hoofdgeul over gaat in de Pas van Terneuzen in Macrocel 3.



Figuur 3-1 Overzicht Macrocellen 1 en 3 en Mesocel 2 met morfologische elementen

In de, nog tot in de 20^e eeuw eroderende, noordelijke buitenbocht van de Honte vinden we de steile en zwaar verdedigde geulwand bij Vlissingen (zie dwarsprofiel Figuur 3-7), de slikken van Rammekenshoek, de Sloehaven in de ingedamde zeearm het Sloe, de Kaloot, waar nog strand- en duingebied te vinden is en verder de slikken en de Rug van Borssele als resten van lang geleden ondergelopen polders (Wilderom, 1968). Bij de Noordnol, het restant van de oude zeedijk ter hoogte van de kerncentrale, wordt de grootste diepte van de Westerschelde (-65 m NAP) bereikt. Op de bodem en in de noordelijke geulwand worden slecht erodeerbare, harde lagen aangetroffen (Dam, 2013), zoals kleilagen en verkitten schelpenbanken ('craigs'), deze bevinden zich in het plateau voor de ingang van de Sloehaven (Cleveringa, 2013a).

In de zuidelijke binnenbocht van de Honte (Figuur 3-7) vinden we de fijnzandige randen van de Spijkerplaat, waar versteiling plaatsvindt en nu en dan grote plaatvallen³ optreden (Van Dijk et al, 2018, Wilderom, 1968, 1972, Cleveringa, 2013b), zie Figuur 3-2. Door een plaatval wordt in enkele uren tijds een groot volume sediment (tot 1 Mm³) van de plaatrand, al of niet boven de laagwaterlijn, naar de geulbodem getransporteerd. In de loop van de daaropvolgende maanden herstelt de plaatrand zich weer.



Figuur 3-2 Locatie plaatvallen in Macrocel 1 en Mesocel 2 (1955-2016) (Van Dijk et al, 2018)

De neven- of vloedgeul in Macrocel 1, de Schaar van de Spijkerplaat, ligt tussen de Drempeel van Vlissingen en de Pas van Borsselle en wordt begrensd door de Spijkerplaat en de Hooge Platen. Net als de hoofdgeul heeft hier ook de nevengeul op veel plaatsen al de maximale diepte van de harde lagen bereikt (zie ook dwarsprofiel 3 in Bijlage B).

³ Er wordt meestal gesproken over oever-, dijk-, strand- en plaatvallen, al naar gelang de locatie. Ook wordt wel de term zettingsvloeiing gebruikt (bijvoorbeeld in WBI 2017), dit is een geotechnische term gebaseerd op een aanname over het mechanisme. Dijkvallen zijn in Zeeland sinds de dijkversterkingen in het kader van de Deltawerken niet meer voorgekomen, maar oever- en plaatvallen (soms geheel onder water) komen nog steeds regelmatig voor.

3.2 Gebruiksfuncties Macrocel 1

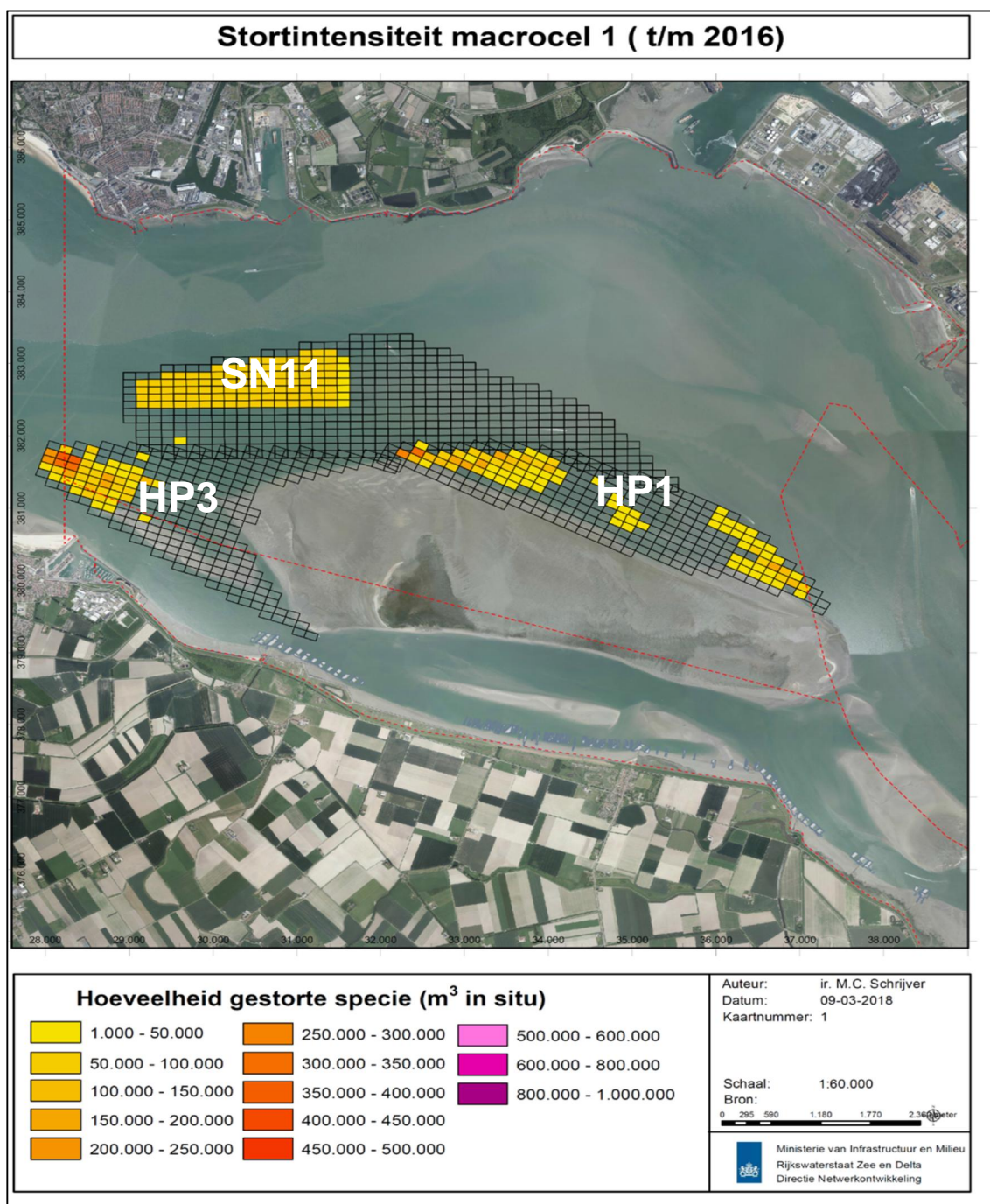
De belangrijkste gebruiksfuncties van de Westerschelde zijn veiligheid, toegankelijkheid en natuurlijkheid (zie paragraaf 1.5).

3.2.1 Veiligheid

In Macrocel 1 ligt de Kaloot, een restant van een duinenkust en liggen de slikken van de voormalige polders bij Borssele. Van Noordhol tot Rug van Borssele is 800 ha polder verloren gegaan tot 1728 door erosie en oevervallen, ten gevolge van de oprukkende Westerschelde (Wilderom, 1968). Nu is dit een uitgestrekt slikkengebied. Deze gebieden kunnen bestaan omdat de stabiliteit van de aanliggende steile geulwand van de Honte tot op heden is gewaarborgd. De geulwand bestaat uit afwisselend fijn zand en kleilagen terwijl er ook nog restanten van oude dijkverdedigingswerken liggen. Soms is er helemaal geen voorland meer aanwezig, zoals bij Vlissingen, dan wordt de stabiliteit van de zeedijk direct bepaald door die van de geulwand.

3.2.2 Toegankelijkheid, baggeren en storten

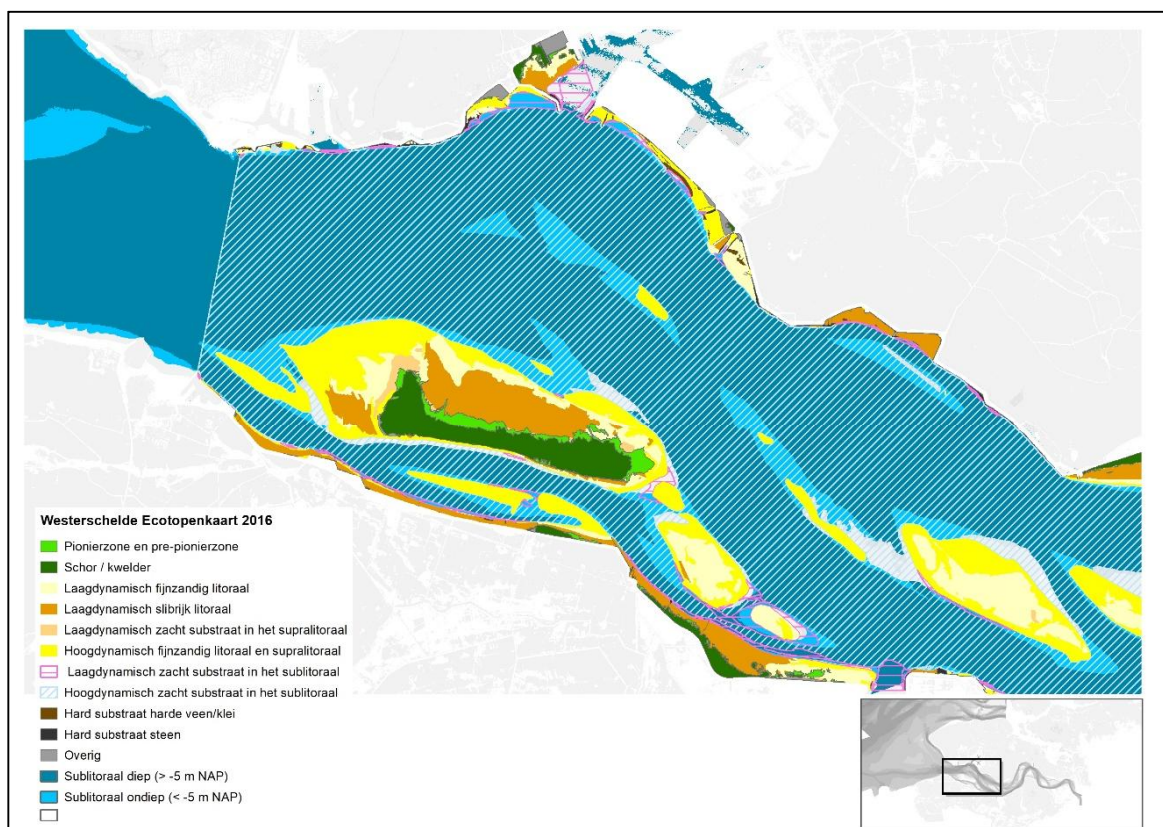
In Macrocel 1 wordt gebaggerd bij de Drempeel van Vlissingen en in de Honte, maar vooral ook bij de Pas van Borssele (zie Figuur 2-7 voor de volumes). Ook wordt er gebaggerd in onder meer de haven van Vlissingen. De gebaggerde specie wordt in principe in dezelfde macrocel teruggestort. Hiervoor liggen in Macrocel 1 de stortlocatie SN11 in de nevengeul, de Schaar van de Spijkerplaat en twee ondiepe zones langs de plaatranden, bij de Hooge Platen Noord en de Hooge Platen West, zie Figuur 3-3.



Figuur 3-3 Stortlocaties en stortintensiteit in Macrocel 1. SN 11 = diepe delen Schaar van de Spijkerplaat, HP1 = plaatrandstortingen Hooge Platen Noord, HP3 = plaatrandstortingen Hooge Platen West. De kleuren in de vakjes geven het totaal volume gestorte specie in de periode 2010 – 2016 weer (Schrijver, 2018).

3.2.3 Natuurlijkheid

De Hooge Platen, het grootste plaatcomplex in de Westerschelde, zijn de belangrijkste foerageerplaats voor overwinterende en doortrekkende kleine en grote steltlopers, vooral het deel tussen ruwweg -1 en +1 m NAP dat laagdynamisch is. Deze delen worden vooral aangetroffen langs de randen van de Hooge Platen (Figuur 3-4).



Figuur 3-4 Ecotopen in 2016 (ingezoomd op Macrocel 1 en Mesocel 2) rood = hoogdynamisch littoraal, groen = schorvegetatie (RWS, 2017)

De Bol op de Hooge Platen is aangemerkt als de belangrijkste broedlocatie van de Westerschelde, zie verder paragraaf 4.2.3.

3.3 Morfologische ontwikkelingen geulen en platen Macrocel 1

3.3.1 Lange-termijn ontwikkelingen

Vergelijking van de huidige situatie (Figuur 3-1 of Figuur 3-2) met Figuur 3-5 geeft een indruk van de morfologische ontwikkelingen in Macrocel 1 op een lange tijdschaal (ruim 100 jaar). Die hebben een autonoom karakter, maar de mens heeft zeker de afgelopen 100 jaar in toenemende mate hierop invloed gehad. In Figuur 3-5 is bijv. de Braakman nog een open geul en zijn de Hooge Platen een gefragmenteerd complex, waarin Hoofdplaat, Oost Springer en Hooge Springer nog als afzonderlijke elementen zijn te onderscheiden.



Figuur 3-5 Gebied Macrocel 1 en 3 en Mesocel 2 rond 1890. Uit F. Müller, 1898 (Zeeuwse Bibliotheek)

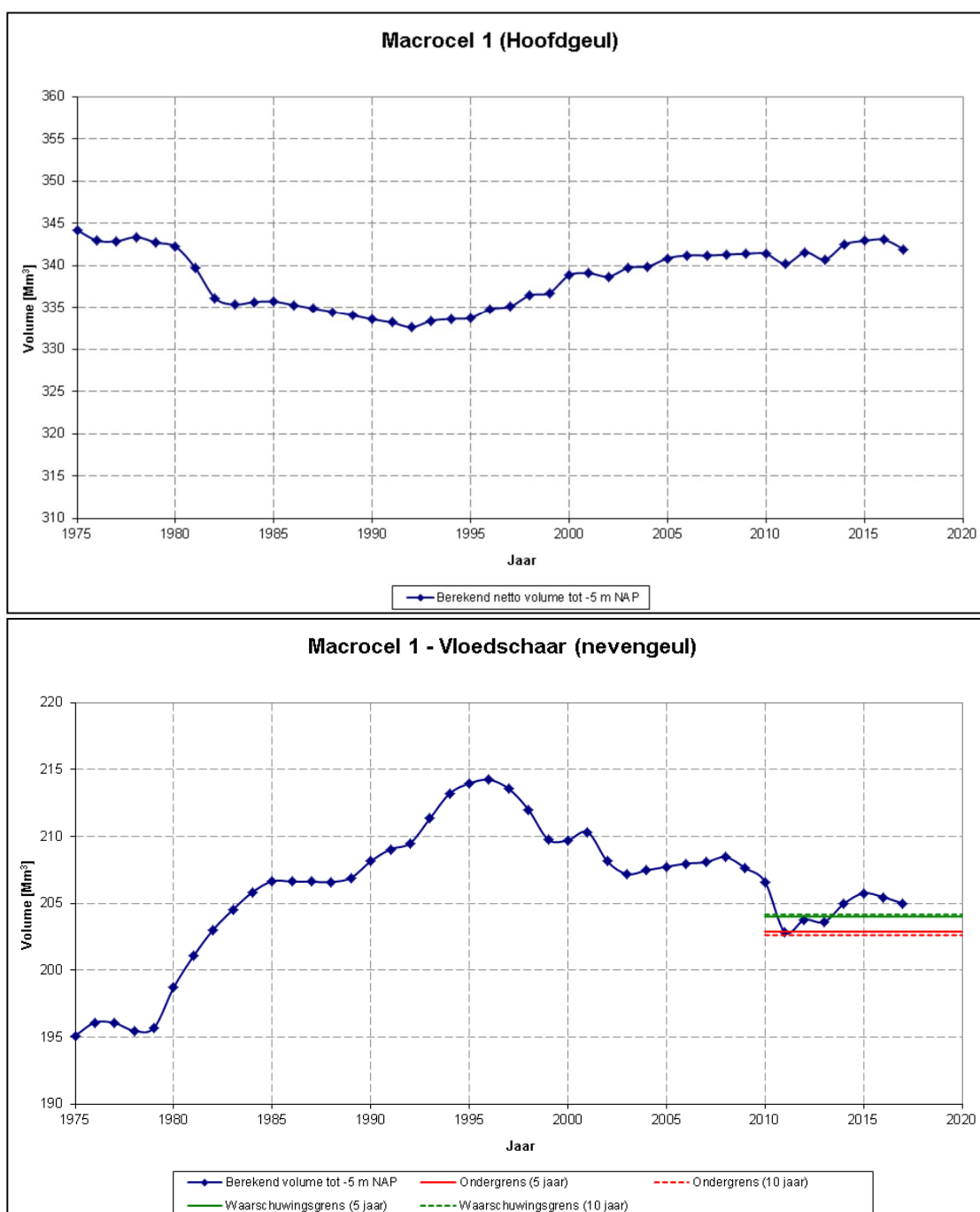
De menselijke invloed op het morfologisch gedrag op mesoschaal-niveau bestond vanaf de 16^e eeuw vooral uit het indijken van drooggevallen schorren en slikken (zoals Hoofdplaatpolder, Thomaes- en Paulinapolder) en in de 19^e en 20^e eeuw uit dijkversterking met vooroever- en geulwandverdediging en afdammen van zeearmen (Sloe, Braakman).

De afgelopen halve eeuw zijn daar de zandwinning (die in 2015 geheel is gestopt), het baggeren van de drempels in de vaargeul, het terugstorten van de baggerspecie en op beperkte schaal ontpoldering (Waterdunen bij Breskens) bijgekomen⁴. De baggerspecie-verspreidingsstrategie (plaatrandstortingen en diepe putten in hoofd- en nevengeulen) is nu de belangrijkste stuurknop in het sedimentbeheer.

Omdat de geulen van de Westerschelde door de eeuwen heen steeds meer in omvang zijn toegenomen en de sedimentvoorraad is afgenomen (paragraaf 2.3.1) is het beleid nu zoveel mogelijk gericht op behoud van (gebaggerd) sediment binnen een macrocel.

De ontwikkeling van het geulvolume wordt jaarlijks gemonitord. Figuur 3-6 geeft de ontwikkeling van het volume van de nevengeul, de Schaar van de Spijkerplaat en de hoofdgeul, de Honte in Macrocel 1.

⁴ Mogelijk kan op sommige locaties in de Westerschelde in de toekomst het concept 'wisselpolder' worden toegepast (een polder tijdelijk, minimaal een jaar of 10, openstellen voor de zee en laten aanslibben, zoals de oude polders zijn ontstaan door op- en aanwas). Monitoring bij ontpolderingen bij Perkpolder (Macrocel 5) en Hedwige-Prosperpolder (Macrocel 8) geven hier de komende jaren waarschijnlijk meer informatie over.



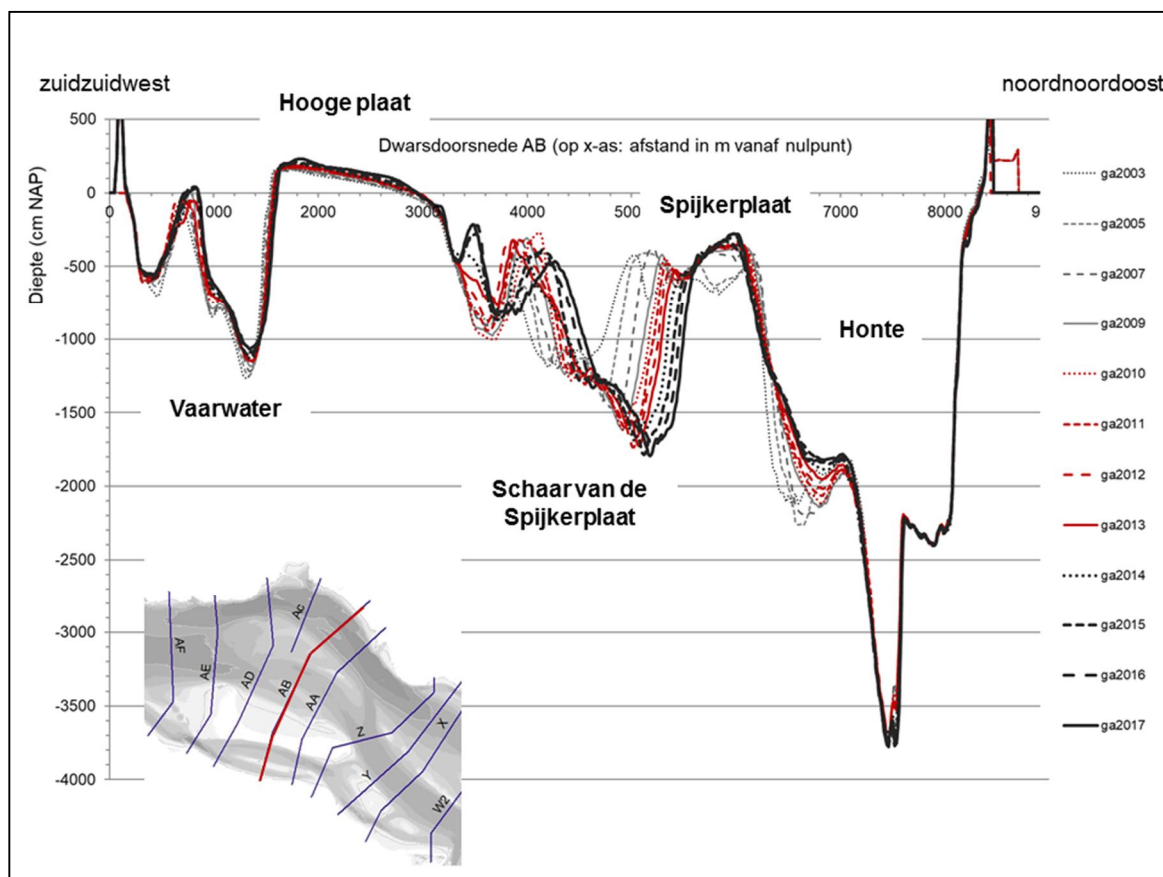
Figuur 3-6 Volumeverandering hoofd- en nevengeul in Macrocel 1 (Schrijver, 2018).

Vier lange-termijn sleutelontwikkelingen zijn bepalend voor dit gebied (Cleveringa, 2013a):

- A. Sedimentatie en afdamming Sloe.
- B. Sedimentatie en afdamming Braakman.
- C. Noordwaartse migratie Honte en de bestortingen bij Vlissingen en Borssele.
- D. Verplaatsing van de noordzijde van de Hooge platen en de Schaar van de Spijkerplaat.

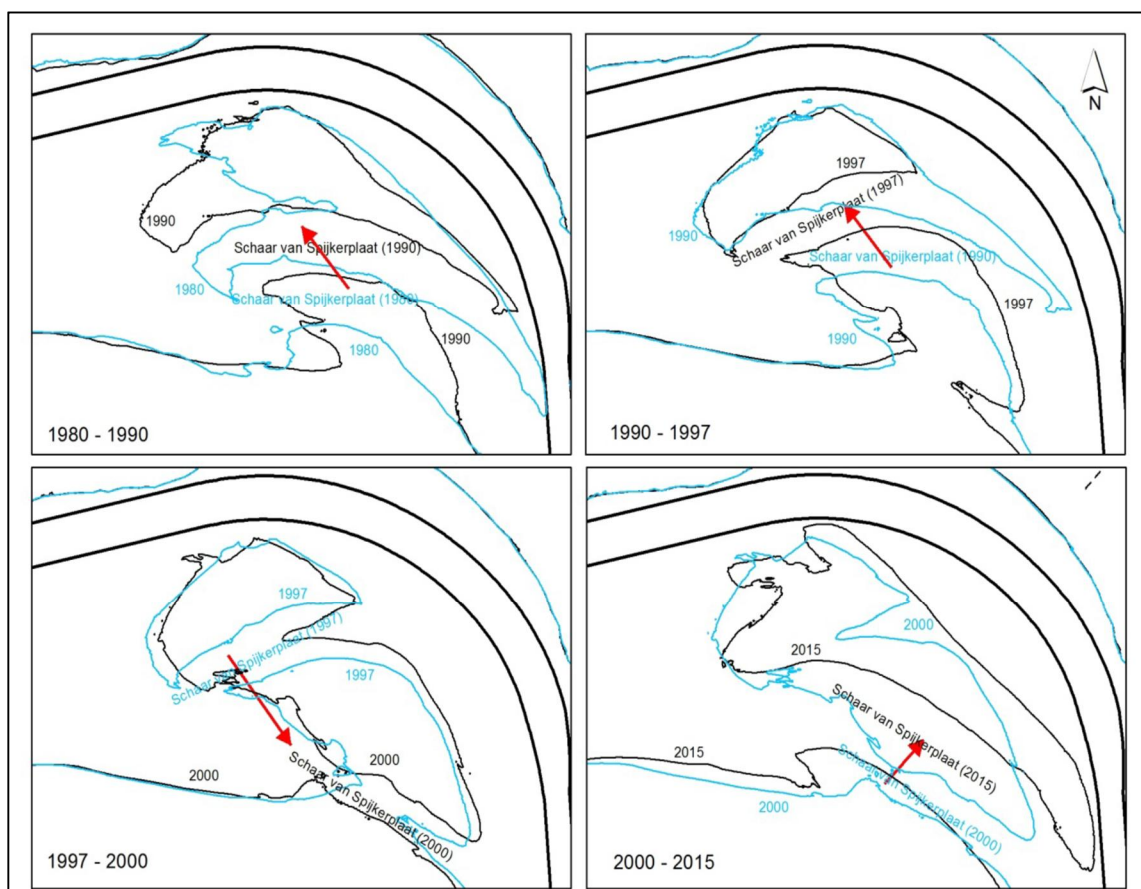
3.3.2 Rond de Schaar van de Spijkerplaat

De ontwikkelingen waar dit rapport op focust vinden plaats op een tijdschaal van orde 10 jaar. De verplaatsing van de noordzijde van de Hooge Platen en de Schaar van de Spijkerplaat, goed te zien in Figuur 3-7, is hiervoor dominant.



Figuur 3-7 Dwarsprofiel AB in Macrocel 1, Mesocel 2 en ontwikkelingen in Schaar van de Spijkerplaat 2003-2017

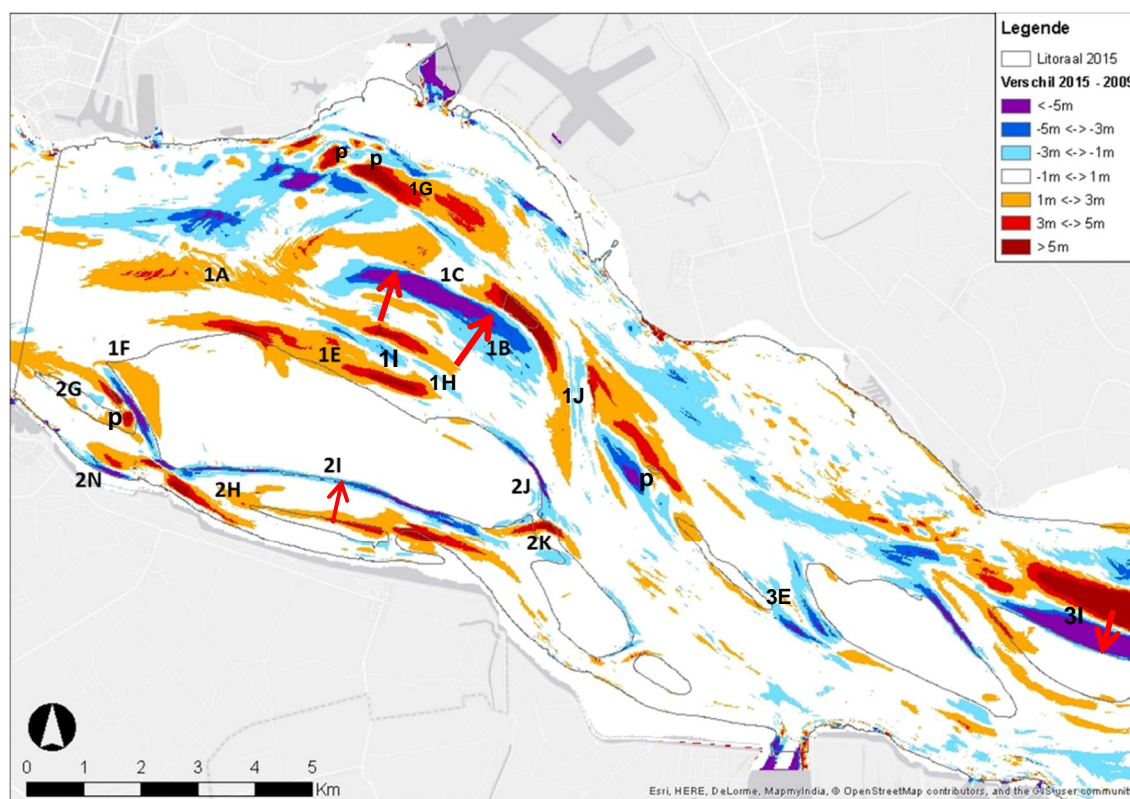
De hoofdgeul de Honte ligt zo goed als vast, omdat de noordwaartse migratie van de buitenbocht, gepaard gaande met landverlies langs de kust van Walcheren, tot staan is gebracht door harde begrenzingen en baggerwerk (o.m. Plancke et al, 2016, 2017a, b), zie Figuur 3-7 (rechts). Alleen bij de Kaloot is nog sprake van erosie. De nevengeul, de Schaar van de Spijkerplaat daarentegen, kent een hoge dynamiek en verlegt zich voortdurend in interactie met de zandige Spijkerplaat. De ontwikkeling van de nevengeul is te zien in Figuur 3-8.



Figuur 3-8 Ontwikkelingen Schaar van de Spijkerplaat (Plancke et al, 2017b)

Figuur 3-8 suggereert een ca. 25-jarige cyclus in de ontwikkeling van de Schaar van de Spijkerplaat, waarbij de vloedgeul vanaf 1980 steeds verder in noordelijke richting migreert en roteert. De Spijkerplaat verplaatst mee totdat de nevengeul in de hoofdgeul de Honte uitloopt. In 1999 breekt een nieuwe vloedschaar ten noorden van de Hooge Platen door en herhaalt het proces zich. Dit gaat gepaard met een meebewegen van het noordelijke deel van de Hooge Platen in de vorm van een zandspit of zandtong.

Ook in de fluctuatie van het volume van hoofd- en nevengeul sinds 1980 (Figuur 3-6) is een langere termijn cyclus te ontdekken (orde 30 jaar), met geringe veranderingen (orde 1 miljoen m³ per jaar, ofwel ongeveer 0,5%). Op basis van de opgetreden cycliciteit zou de verplaatsing van de Schaar van de Spijkerplaat doorgaan tot 2027, waarna opnieuw een doorbraak zou optreden langs de Hooge Platen Noord in 2030. Het verloop in de komende tijd is natuurlijk onzeker. Het volume van beide geulen blijft min of meer gelijk sinds 2010, mogelijk door de plaatrandstoringen bij Hooge Platen Noord. Dit kan het ontstaan van een doorbraak zoals in 1999 tegengaan. Het volume van het sinds 2010 gebaggerde en gestorte materiaal (ca. 1,4 miljoen m³ per jaar, Figuur 3-3, vooral afkomstig van de Pas van Borssele) is van dezelfde orde grootte als de jaarlijkse volumeverandering van de geulen in de periode 1980-2010 (Figuur 3-6).



Figuur 3-9 Morfologische ontwikkelingen Macrocel 1 en Mesocel 2, verschil bathymetrie 2009-2015. Blauw=erosie, oranje = sedimentatie. Rode pijlen: noordwaartse migratie Schaar van de Spijkerplaat (1B), storten en aangroei Hooge Platen Noord (1E), ophogen (1C) en versteiling noordflank Spijkerplaat (1G), ontwikkeling vloedgeultje (1I), baggeren Pas van Borssele (1J), storten SN 11 (1A), verondieping (2H) en noordwaartse migratie Vaarwater langs Hoofdplaat (2I), verruiming Geul van de Suikerplaat (3E), zuidwaartse migratie Straatje van Willem (3I), recente plaatvallen (p) (Barneveld et al, 2018, aangevuld)

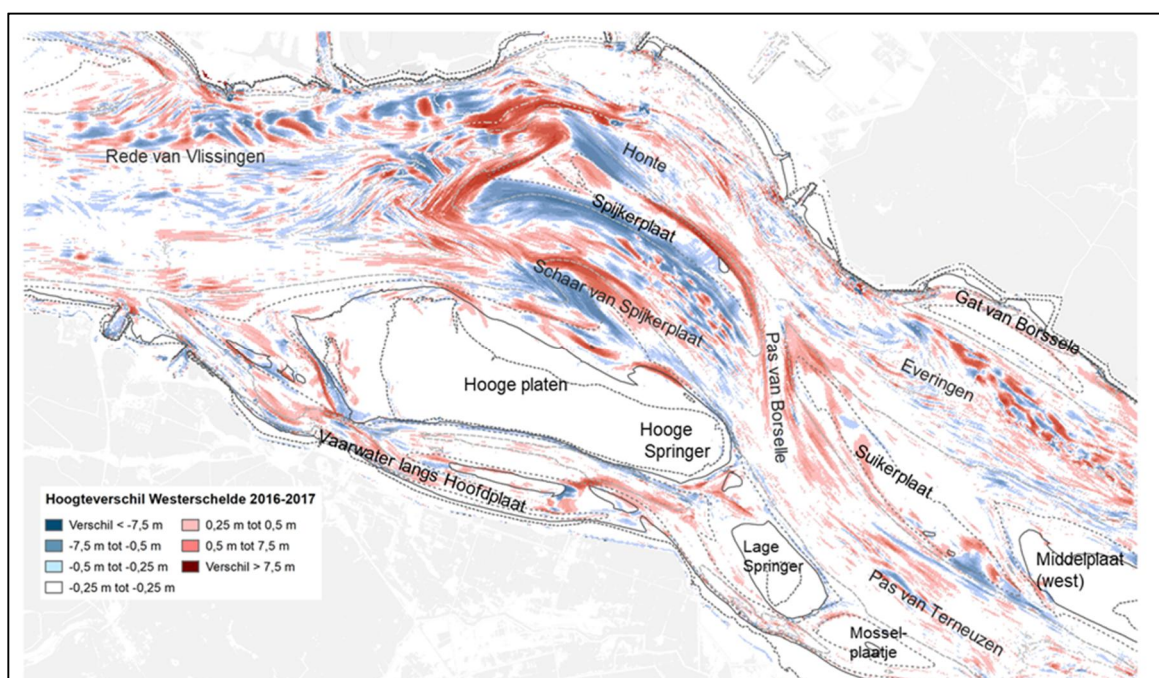
Deze ontwikkelingen zijn ook zichtbaar in de verschilkaart 2009-2015, Figuur 3-9 (Barneveld et al, 2018, aangevuld). Bij (1B), in blauw, is de erosie te zien van de noordelijke geulwand van de Schaar van de Spijkerplaat. Deze combineert (bij 1H, in oranje) met de aangroei van de zuidelijke geulwand en de oostelijke zandtong van de plaat aan de noordrand van de Hooge Platen. Deze aangroei wordt versterkt door de plaatrandstortingen bij (1E). Hierdoor neemt het volume van de nevengeul echter niet af. Tussen de zandtong en de plaatrand ontwikkelt zich een vloedgeultje (1I, in blauw). Dit kan de voorloper zijn van een nieuwe doorbraakgeul in de morfologische cyclus van de Schaar van de Spijkerplaat, maar dit is niet met zekerheid vast te stellen.

De noordelijke rand van de Spijkerplaat (1G) zandt aan en de plaat krijgt een meer langgerekte vorm (1C), waarschijnlijk mede door de stortingen in SN11 (1A). De hoofdgeul, de Honte, blijft ook vrijwel constant in volume, ondanks plaatselijk baggeren, maar kan niet meer in noordelijke richting opschuiven. De grote verdieping van de geul is tegenwoordig tot staan gebracht door het bereiken van de harde lagen. De Spijkerplaat kan ook niet verder opschuiven, maar blijft wel aanzanden. Dit leidt tot versteiling van de onderwateroever en het optreden van plaatvallen, zie Figuur 3-2 en Figuur 3-9 (p), vergelijkbaar met wat plaatsvindt bij de Plaat van Ossensisse (paragraaf 6.5) en de Plaat van Walsoorden (paragraaf 7.3).

Deze ontwikkelingen zijn ook te zien in de meest recente jaarlijkse verschilkaart. In Figuur 3-10 is te zien dat de Schaar van de Spijkerplaat nog wat verder in noordelijke richting is

opgeschoven (erosie in blauw aan de noordzijde en aanzanding in rood aan de zuidzijde). Ook de plaatrandstortingen zijn daarin goed zichtbaar. Tevens is, nog iets beter dan bij 1I in Figuur 3-9, een erosiezone zichtbaar (blauw) ten zuiden van Schaar van de Spijkerplaat, in de kleine doodlopende vloedgeul tussen de plaatrand en de zandspit in de oostelijke arm.

Met het beheer van de stortlocatie Hooge Platen Noord kan deze ontwikkeling beïnvloed worden. De vraag is of het wenselijk is de autonome ontwikkeling zoveel mogelijk te volgen, bijvoorbeeld door het voeden van de oostelijke zandtong of -spit en de doorbraakgeul niet te veel te dempen, of dit juist tegen te gaan, zoals nu het geval lijkt te zijn.



Figuur 3-10 Verschilkaart bathymetrie 2016-2017 Macrocel 1 en Mesocel 2. Blauw = erosie, rood = sedimentatie.

3.3.3 Baggeren op de Pas van Borssele

In Figuur 3-9 (1J) en Figuur 3-10 is te zien dat in het gebied van de drempel tussen Macrocel 1 en 3, de Pas van Borssele, ten oosten van (1B), dus tussen de Spijker- en de Suikerplaat sterke aanzanding optreedt, behalve in de vaargeul die door baggeren op diepte wordt gehouden. Dit lijkt een groeiende trend, want de baggerinspanning is in de periode 2015-2017 gestegen van 1,17 tot 1,45 Mm³ jaarlijks en er wordt nu ook fijn materiaal en slib gebaggerd. De vaargeul breekt hier a.h.w. door een aaneengesloten 'rug' van Spijkerplaat en Suikerplaat heen. Zonder baggeren zou de ebstream vanuit de nevengeul van Macrocel 3, de Everingen, waarschijnlijk meer rechtdoor de Honte in stromen. De vloedstream door de Schaar van de Spijkerplaat zou dan meer richting de Pas van Terneuzen afbuigen. Dit alles suggereert een autonome trend richting meer samenhang tussen de Macrocellen 1 en 3, waarbij het baggeren op de drempel de huidige configuratie in stand houdt. Zonder baggeren in de Pas van Borssele zou ook een kortsluitgeul kunnen ontstaan door de verdere uitdieping van de Geul van de Suikerplaat, een trend die al zichtbaar is in (3E), Figuur 3-9. De kaart met 'harde lagen' (Figuur 2-4) en het dwarsprofiel 3 in Bijlage B tonen ook dat Honte, Pas van Terneuzen, maar ook de Schaar van de Spijkerplaat, zo goed als op maximale diepte in de kleilagen liggen, terwijl ter plaatse van de Pas van Borssele nog een dik pakket zand aanwezig is.

Figuur 3-9 laat verder oostwaarts, in Macrocel 3, duidelijk de zuidwaartse migratie van het Straatje van Willem zien (3I). Mogelijk is ook hier sprake van een langjarige cycliciteit, met consequenties voor vaargeulonderhoud en instandhouding van het meergeulensysteem.

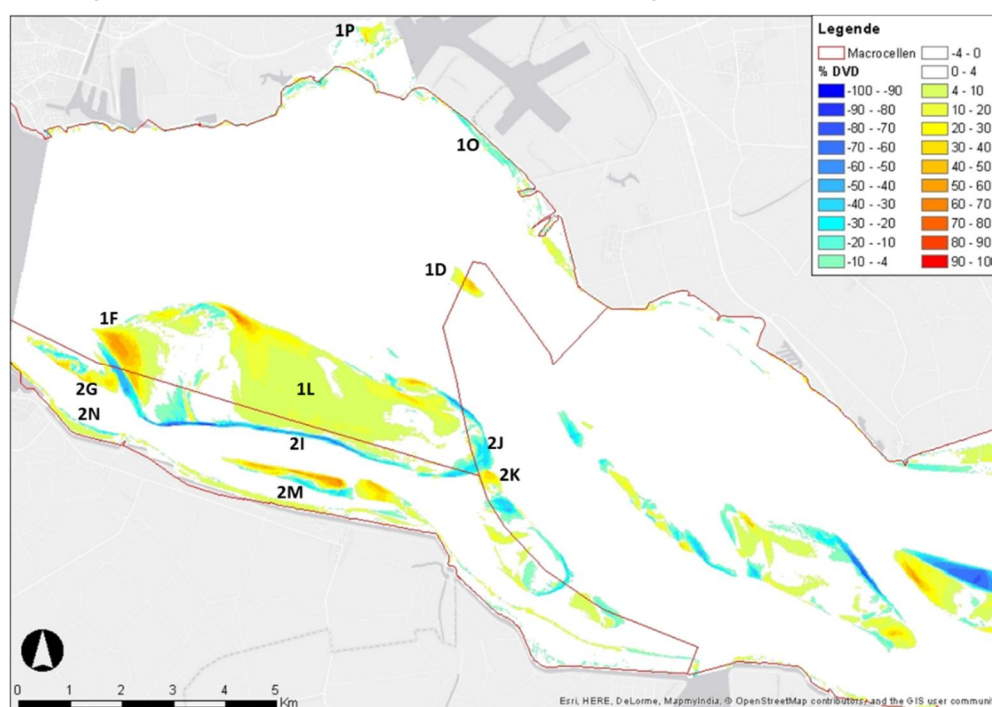
3.3.4 Plaatrandstortingen en ontwikkelingen Hooge Platen Noord

Ten gevolge van de noordelijke migratie van de Schaar van de Spijkerplaat (paragraaf 3.3.2) komt er aan de noordzijde van de Hooge Platen ruimte vrij voor aangroei (zie 1E in Figuur 3-9). Dit resulteert in een verondieping van het sublitoraal. Het areaal laagdynamisch waardevol ecotoop is toegenomen (Goossens et al, 2017). De plaatrandstortingen (HP1, Figuur 3-3) versterken deze ontwikkeling. Of deze het opnieuw ontstaan van een doorbraakgeul door de oostelijke zand tong kunnen of zouden moeten voorkomen is de vraag. Het volume van de vloedgeul neemt niet af en lokaal is weer erosie (Figuur 3-10).

In Figuur 3-12 is te zien dat er aan de noordzijde van de Hooge Platen aanvankelijk meer aangroei plaatsvindt dan er gestort wordt. Later (vanaf 2015) is er wel netto erosie. Dit kan samenhangen met de in paragraaf 3.3.2 benoemde ontwikkelingen van de Schaar van de Spijkerplaat en de locatie van de stortingen en met de observatie dat de afname van het geulvolume (met ca. 1 miljoen m³ per jaar) gestopt lijkt sinds 2010 (Figuur 3-6).

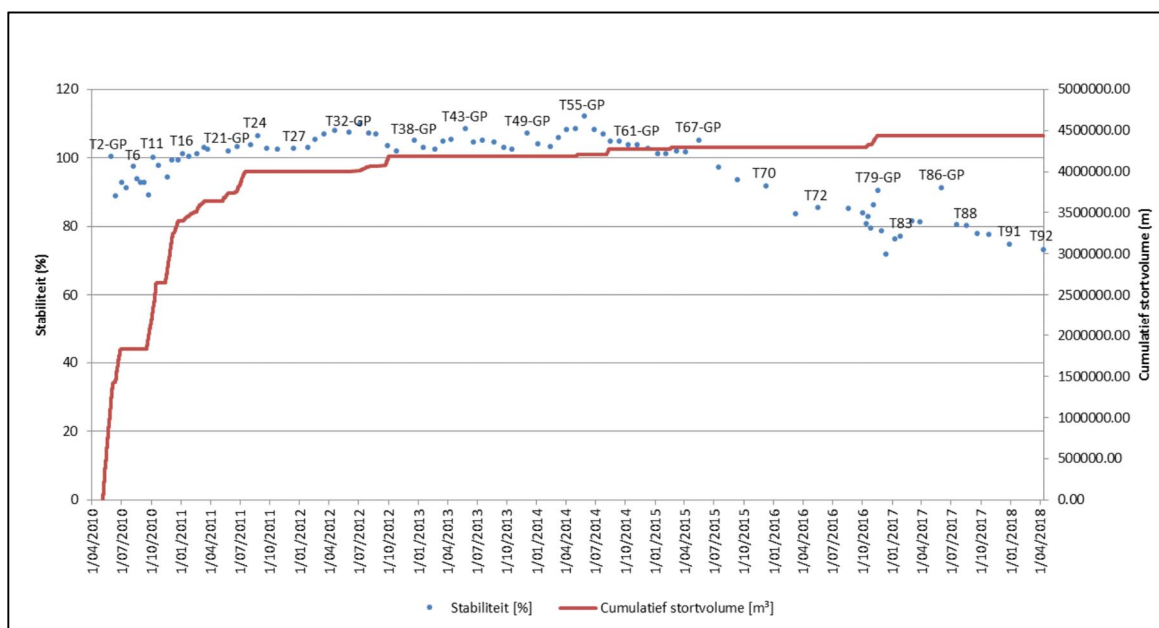
Andere te noemen ontwikkelingen in Figuur 3-11 zijn de ophoging van het intergetijdengebied aan de westzijde (1F) en de erosie bij Kaloot (1O). De ophoging van het litoraal over de gehele plaat (1L) is ook al voor 2009 waargenomen, zie ook Figuur 3-13. Dit betekent dat de ecologische condities veranderen.

Op het zuidelijk deel van de Hooge Platen vinden we hooggelegen schorren. De plaat migreert in zijn geheel noordwaarts, zie hiervoor verder paragraaf 4.3.1.

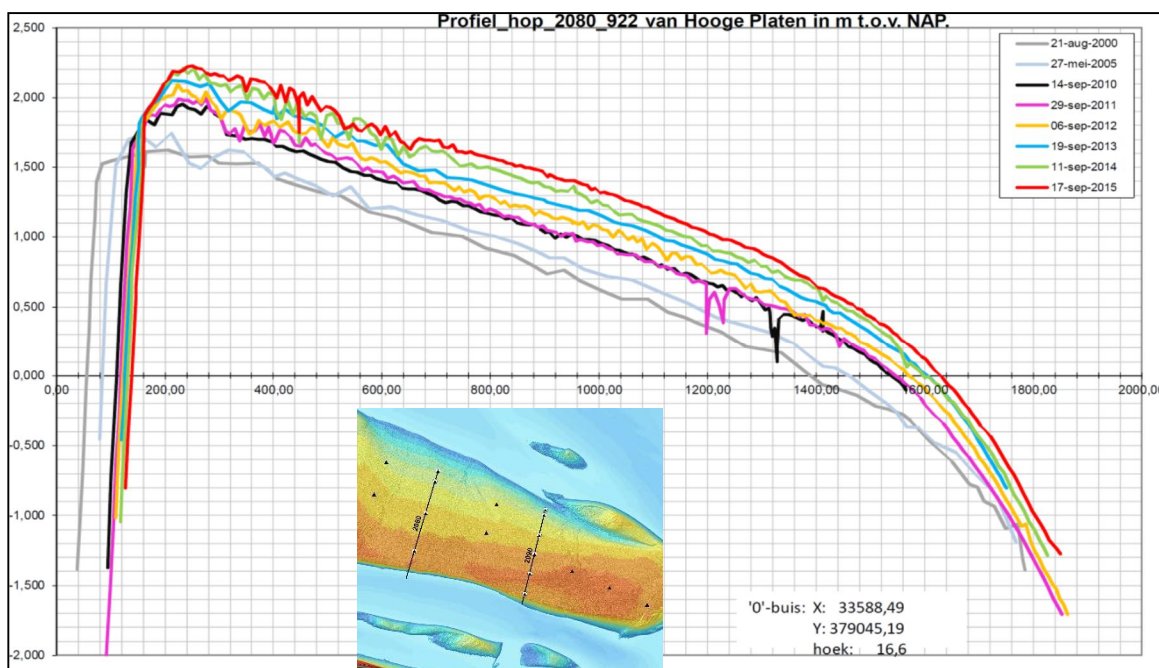


Figuur 3-11 Morfologische ontwikkelingen Macrocel 1 en Mesocel 2, verschil droogvalduur (in %) 2009-2015. Te zien o.m. uitbreiding intergetijdengebied Spijkerplaat (1D), ophogen Hooge Platen (1F, 1L), erosie zuidrand (2I), verondiepen Springergeul (2K), ophogen slikken (2M, 2N), erosie Hooge Springer (2J), erosie zuidrand Hooge Platen (2I), erosie Kaloot (1O) (Barneveld et al, 2018)

21 maart 2019, definitief



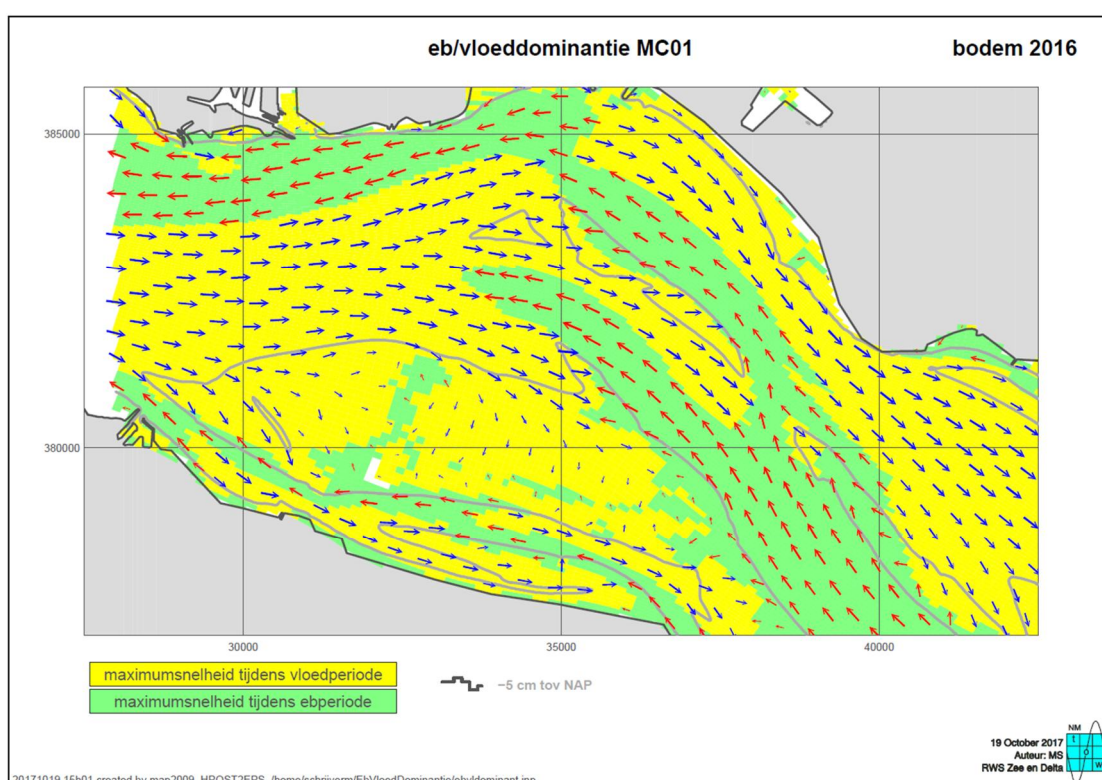
Figuur 3-12 Verloop van de stabiliteit (%) van het gestorte volume en het cumulatief stortvolume (m³) voor de stortzone Hooge Platen Noord (Goossens & Depreiter, 2018)



Figuur 3-13 Ontwikkelingen Hooge Platen 2009-2015 (Goossens et al, 2017)

Omdat verdergaande ophoging van de Hooge Platen, vooral het deel tussen ruwweg -1 en +1 m NAP waar steltlopers foerageren, minder gewenst is, zijn in 2016 de stortingen in het westelijk deel van de stortzone Hooge Platen Noord 'on hold' gezet en is bekeken in hoeverre deze van invloed zijn op deze ophoging (Plancke et al, 2017b). Uit deze studie is gebleken dat de gestorte volumes baggerspecie weliswaar werden getransporteerd binnen enkele maanden, maar na 7 jaar nog grotendeels binnen het controlepolygoon (Figuur 3-3) gebleven zijn, mits niet onmiddellijk tegen de plaatrand aan gestort werd.

In 2016 is bij wijze van proef met rainbowtechniek 150.000 m³ zand aangebracht op het ondiepe deel aan de buitenzijde van de oostarm van Hooge Platen Noord, ter hoogte van de aansluiting aan de plaat. Initieel verspreidde de aangebrachte specie zich in noordelijke en in westelijke richting. De aansluiting tussen het geultje naar dieper water toe vertoonde echter nog geen sedimentatie. Sindsdien vonden hier geen verdere stortactiviteiten plaats. De oostelijke zandspit wordt gevormd door de ebstroom in de Schaar van de Spijkerplaat. Dit wordt bevestigd door de numerieke modellering van de maximale stroomsnelheden die maatgevend zijn voor het zandtransport, zie Figuur 3-14. Op de plaat zelf, voor zover deze al onder water loopt, zijn de stroomsnelheden en dus ook de transporten echter zeer gering. Dit betekent een laagdynamisch litoraal en supralitoraal milieu, waar ook slib zich kan afzetten.

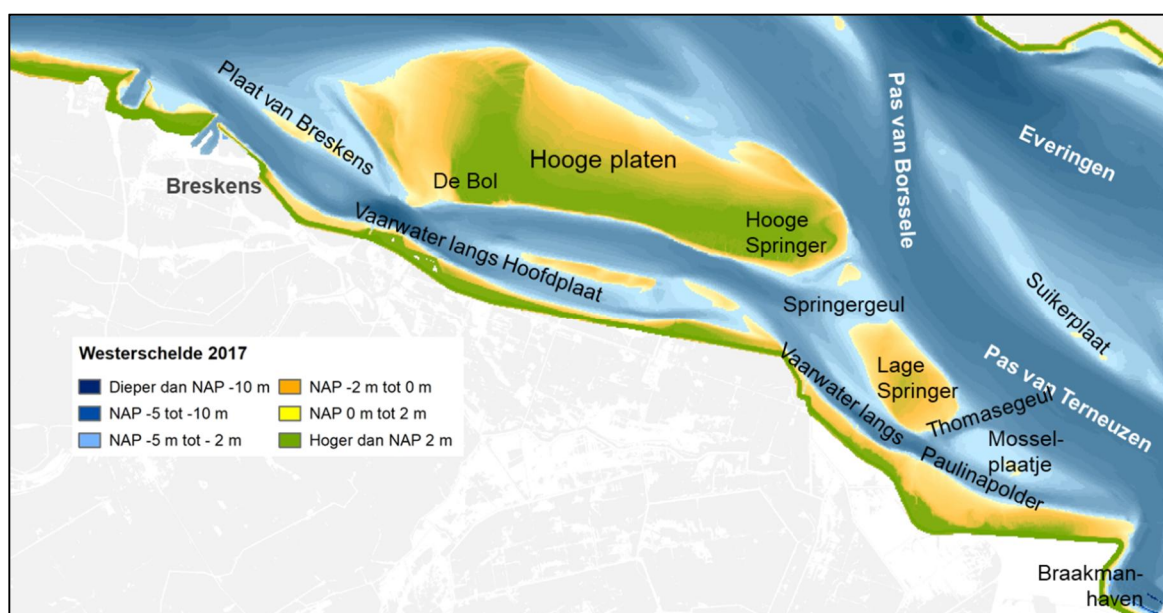


Figuur 3-14 Eb/vloeddominantie berekend met numeriek model (Plancke et al, 2017b)

4 Mesocel 2, Vaarwater langs Hoofdplaat en Hooge Platen

4.1 Beschrijving morfologisch systeem Mesocel 2

Omdat er in het gebied van Mesocel 2 geen aparte eb- en vloedgeulen kunnen worden onderscheiden, maar we te maken hebben met een ééngelustelsel, wordt hier niet gesproken van een macrocel maar van een mesocel (Cleveringa, 2013a). Tussen de platen en het vasteland van Zeeuws-Vlaanderen ligt het Vaarwater langs Hoofdplaat (Figuur 4-1), voorheen Vaarwater naar Gent genoemd. Deze gaat over in het Vaarwater langs Paulinapolder en mondt daarna uit in Braakmanhaven en de hoofdgeul van Macrocel 3 (Pas van Terneuzen). In de geul van Mesocel 2 zijn wel distincte eb- en vloedstromingen te onderscheiden (Figuur 3-14) met eigen erosie- en sedimentatiepatronen (zie Figuur 3-9 t/m Figuur 3-11).



Figuur 4-1 Overzicht geulen en platen Macrocel 1 en Mesocel 2. De zuidelijke oever bestaat van west naar oost uit de haven van Breskens, Nummer Eén, Hoofdplaatpolder, Thomaes- en Paulinapolder

De Hooge Platen zijn in de 20^e eeuw ontstaan uit een complex van zandbanken dat zich in oostelijke richting uitbreidde, de 'Hooge Plaat' en de Hooge Springer, waartussen nog een aantal geulen liep, zie Figuur 3-5. Nu is alleen nog de Lage Springer apart te onderscheiden.

Op het zuidelijke, meest hooggelegen punt van de Hooge Platen, De Bol, is al geruime tijd schorvegetatie te vinden. In het westelijk deel van het platengebied ligt het plaatrandstortgebied Hooge Platen West (HP3 in Figuur 3-3) en het Plaatje van Breskens, eigenlijk een zandtong. In het oosten worden de Hoge en Lage Springer gescheiden door de Springergeul. Nog oostelijker liggen de Nieuwe Springer of Mosselplaatje, gescheiden door de Thomaesgeul. Deze geulen zijn geen echte kortsluitgeulen, omdat ze geen verbinding vormen tussen een eb- en een vloodschaar, het zijn veeleer vertakkingen van het Vaarwater.

De Hoofdplaatpolder aan de zuidelijke oever van het Vaarwater is in de 18^e eeuw ontstaan door het indijken van het met schorvegetatie bedekte deel van de Hooge Platen die zich toen nog in zuidelijke richting uitstrekten tot de toenmalige Kromme Watergang. Na inpoldering bleek al snel dat het Vaarwater langs Hoofdplaat landwaarts opdrong. Tot ver in de 20^e eeuw ging weer veel poldergebied verloren door dijk – en oevervallen (zie Figuur 4-2) en moesten steeds weer nieuwe inlaagdijken worden aangelegd. De indijking van de Borsselepolder, aan

de overzijde van de Westerschelde, die daarna ook weer deels verloren ging lijkt hiermee vergelijkbaar. De Westerschelde is door deze inpolderingen aan twee zijden vernauwd (Wilderom, 1973).

Een belangrijke (sleutel-) ontwikkeling in de 20^e eeuw is de afdamming van de zeearm de Braakman in 1952. Voorheen vormde het Vaarwater de toegang tot de haven van Gent en lag hier een groot kombergingsgebied. Door de afdamming is het getijvolume afgenomen en is de erosie van de oevers van de Hoofdplaatpolder omgeslagen in sedimentatie (Figuur 4-4). In 1977 is de Braakmanhaven met industrieterreinen aangelegd, waarbij wederom een deel van de voormalige geul is verland (Figuur 2-3). De toegang tot Gent wordt nu gevormd door de sluzen bij Terneuzen.

Bij Nummer Eén bereikt het Vaarwater een grote diepte. De geul is hier op zijn smalst en er ligt een uitwateringssluis die wordt beschermd tegen verzanding door een strekdam. Hierdoor is in de periode voor de afsluiting van de Braakman een flinke ontgrondingskuil ontstaan.



Figuur 4-2 Hoofdplaatpolder, oeverval 10 juni 1964 (Provinciaal Zeeuws archief)

4.2 Gebruiksfuncties Mesocel 2

4.2.1 Veiligheid

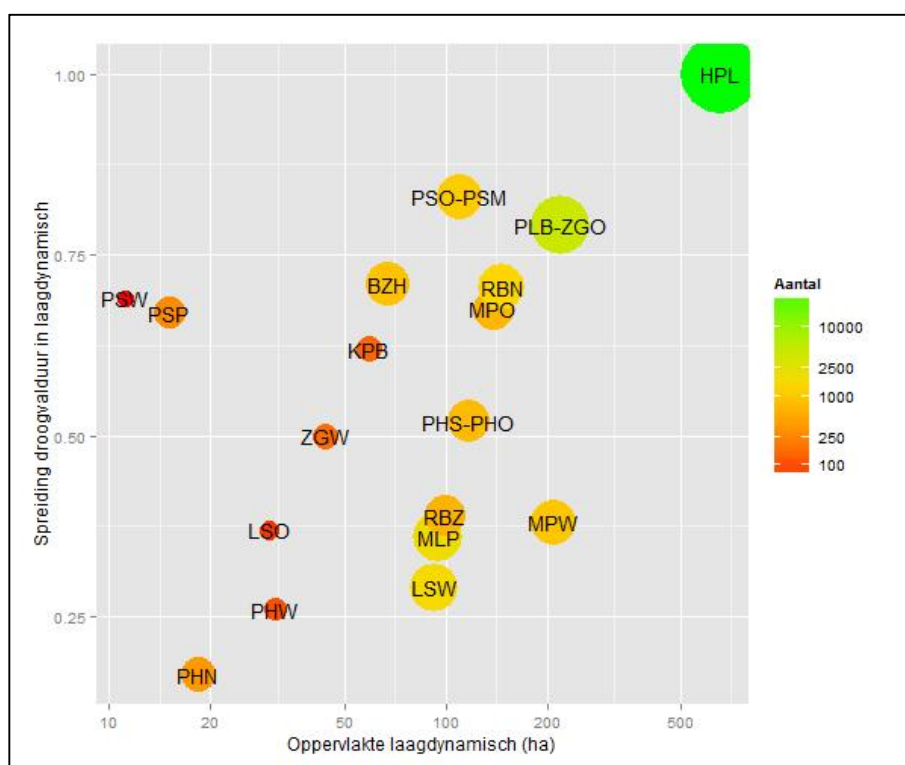
Sinds er geen erosie meer plaatsvindt langs de vooroevers van de Hoofdplaat-, Thomaes- en Paulinapolder (van west naar oost) is het gevaar van dijk- en oevervallen en verdergaand landverlies geweken (Figuur 4-2). Echter, meer in westelijke richting, tussen Breskens en Nummer Eén, is nog wel sprake van vooroevererosie. Daar is mogelijk nog ingrijpen nodig.

4.2.2 Toegankelijkheid

In Mesocel 2 wordt niet gebaggerd, omdat de nevengeulen niet worden onderhouden. De haven van Breskens was tot de aanleg van de Braakmanhaven in 1977 de enige overgebleven haven van Westelijk Zeeuws-Vlaanderen. Met de toegankelijkheid van deze haven moet het beheer rekening houden.

4.2.3 Natuurlijkheid

Figuur 4-3 laat zien dat de Hooge Platen het grootste areaal laagdynamisch litoraal van alle beschouwde gebieden in de Westerschelde heeft en de hoogste aantallen steltlopers herbergt. Het laagdynamisch litoraal is de belangrijkste foerageerplaats voor overwinterende en doortrekkende kleine en grote steltlopers. Zie verder 3.2.3.



Figuur 4-3 Verwachte totale aantallen steltlopers per gebied (som over soorten) als functie van de oppervlakte laagdynamisch litoraal en van de spreiding in droogvalduur voor elk gemonitord telgebied. HPL = Hooge Platen LSO = Lage Springer oost LSW = Lage Springer west PSO = Paulinaschor oost PSM = Paulinaschor midden (Vanoverbeke en Van Ryckegem, 2015).

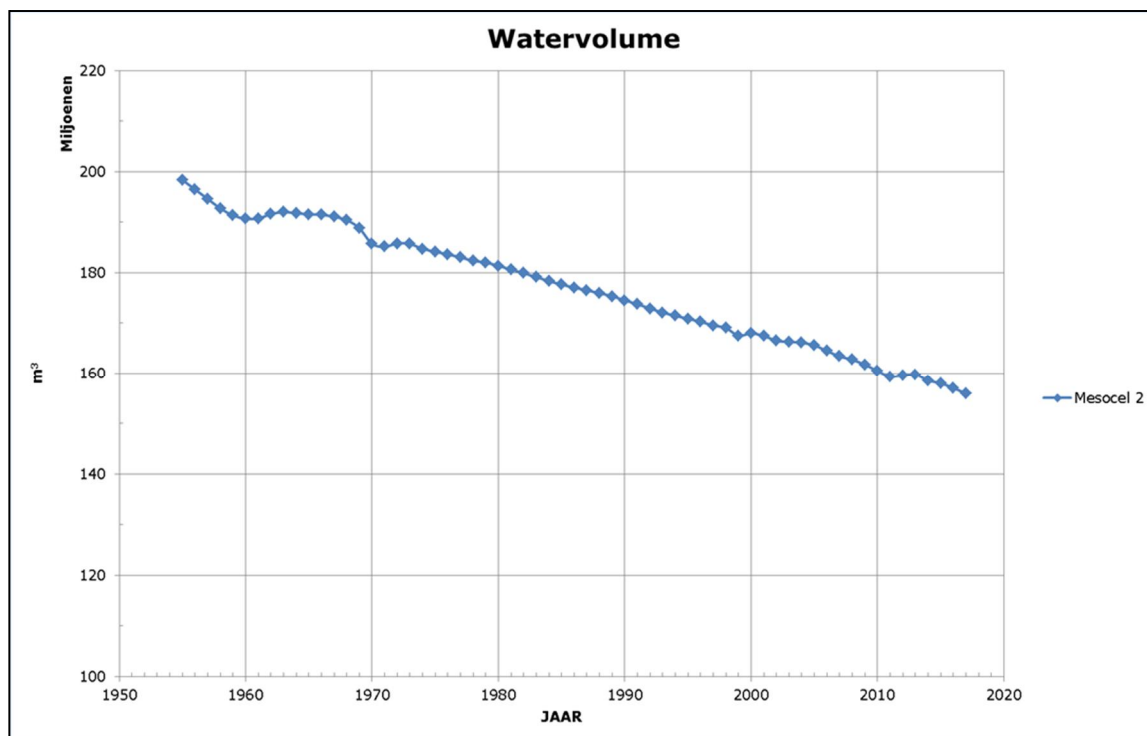
4.3 Morfologische ontwikkelingen geulen en platen Mesocel 2

4.3.1 Vaarwater langs Hoofdplaat

Sinds de afdamming van de Braakman is het getijvolume door het Vaarwater afgenomen. Er treedt gestage sedimentatie op (orde 0,6 Mm³ per jaar) in de vorm van verondieping van de geul en aangroei van de slikken, zie Figuur 4-4, (2H) in Figuur 3-9 en (2M) in Figuur 3-11, zie ook het dwarsprofiel in Figuur 3-7.

Tegelijkertijd vindt afkalving plaats van de steile zuidrand van de Hooge Platen, (2I in Figuur 3-9 en Figuur 3-11), zie ook het dwarsprofiel in Figuur 3-13. Dit alles geeft een kleine noordwaartse migratie van de geul en de plaat. Ook bij de zuidoostelijke rand van de Hooge Springer, grenzend aan de Pas van Terneuzen treedt geringe erosie op (2J in Figuur 3-9 en Figuur 3-11). Deze randen kunnen zo steil zijn omdat ze bestaan uit klei en schelpenlagen. De erosie die nu optreedt is dus onomkeerbaar. In Figuur 2-4 is te zien dat de harde lagen hier dicht bij de oppervlakte liggen, hoewel de diepte van het Vaarwater gering is (- 10 m NAP). De erosie van de noordelijke oever wordt veroorzaakt door de ebstroming, zie Figuur 3-14, terwijl

de aangroei van de slikken langs de zuidelijke oever, (2M in Figuur 3-11), wordt bewerkstelligd door de vloedstroming, waarbij niet alleen fijn zand maar ook slib in laagjes afgezet kan worden.



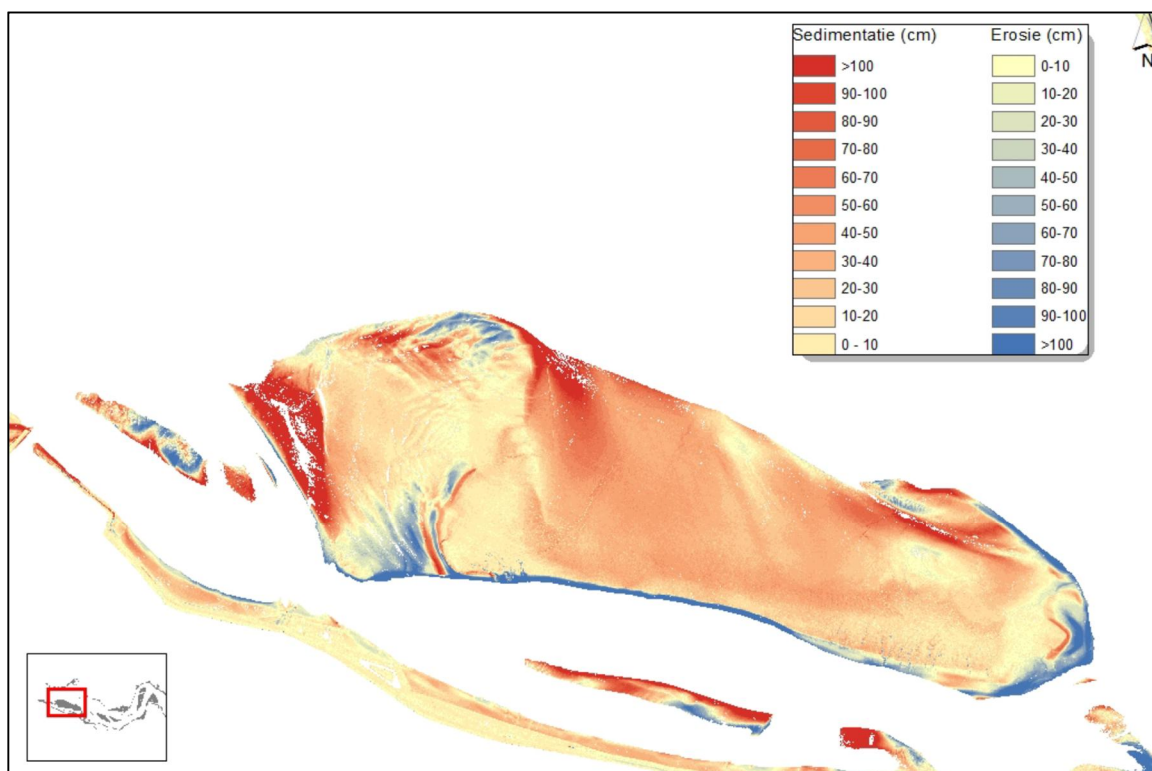
Figuur 4-4 Volume Vaarwater langs Hoofdplaat vanaf 1950 (Rijkswaterstaat Zee en Delta, 2018)

4.3.2 Plaatrandstortingen en ontwikkelingen Hooge Platen West

De morfologische ontwikkelingen bij de Hooge Platen West zijn het resultaat van een complex samenstel van de getijstrooming door het Vaarwater en de geultjes tussen het Plaatje van Breskens en de zuidwestelijke rand van de Hooge Platen (zie ook de verschilfiguren Figuur 3-9 en Figuur 3-11, locatie 2G). Ook de plaatrandstortingen zijn van invloed. Er wordt onder meer gestort op de westelijke en noordelijke ondiepe plaatrandzone van de Hooge Platen, zie Figuur 3-3.

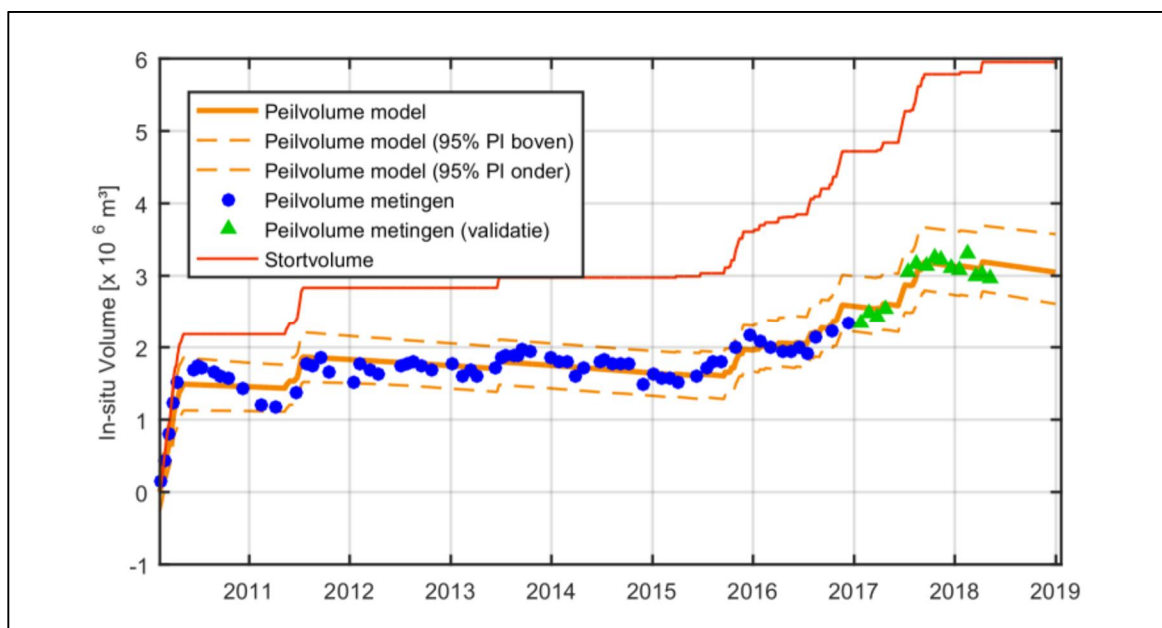
Figuur 4-6 toont het sinds 2010 gestort volume baggerspecie bij Hooge Platen West (HP3). Een vergelijking met Figuur 3-12 leert dat er sinds 2015 veel meer sediment op de Hooge Platen West is gestort dan op Noord. Op HP3 (West) treedt vooral vlak na het storten sterk (initieel) sedimentverlies op.

Het intergetijdengebied is hier opgehoogd, evenals de gehele plaat (1F en 1L in Figuur 3-11 en ook te zien in Figuur 4-5), terwijl het ebgeultje opdringt en nog in 2010 plaatvallen zijn opgetreden (zie Figuur 3-2 en 'p' in Figuur 3-9). Door de sterke vloedstroom is hier ondanks de bodemstijging sprake van een hoogdynamische, zandige omgeving met megaribbels (Goossens et al, 2017). Langs de zuidrand van het plaatje vindt ebgerichte uitbouw plaats (zie Figuur 3-14). In deze complexe ontwikkeling van kleinschalige elementen spelen behalve de getijstrooming ook golven een belangrijke rol, gezien de open verbinding met de Westerschelde-monding.



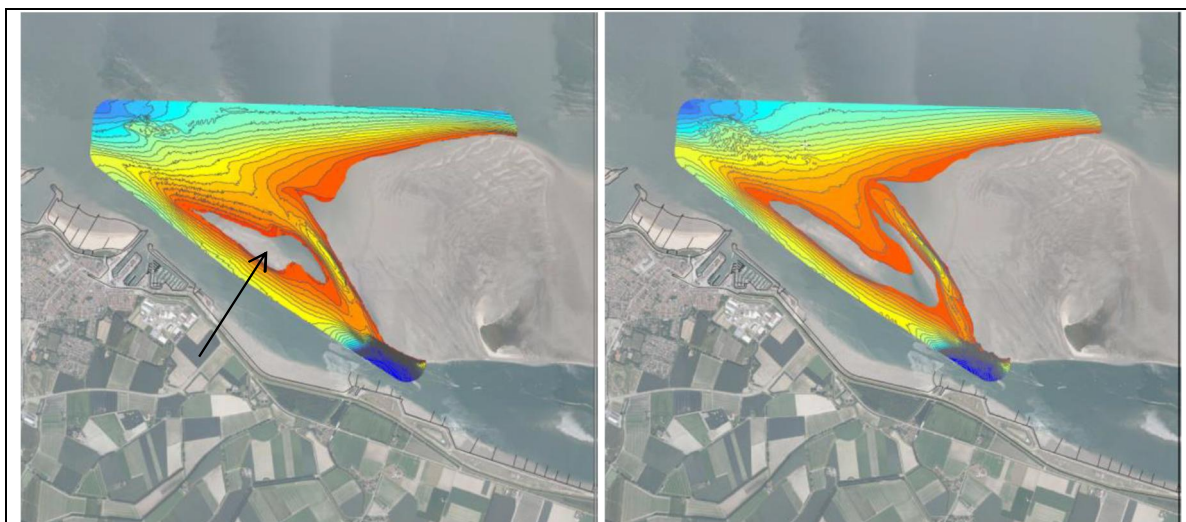
Figuur 4-5 Hooge Platen verschilkaart 2009-2015 Lidar (Plancke et al, 2017b)

De bij de plaatpunt gestorte volumes zijn redelijk stabiel, zie Figuur 4-6. Onder invloed van de vloedstroom is een snelle verspreiding van het bij de plaatpunt gestorte sediment te zien (Figuur 4-7). Vóór de plaatpunt is een verondieping ontstaan en is de vorm van het Plaatje van Breskens (pijl in Figuur 4-7) gewijzigd en is ze opgehoogd.



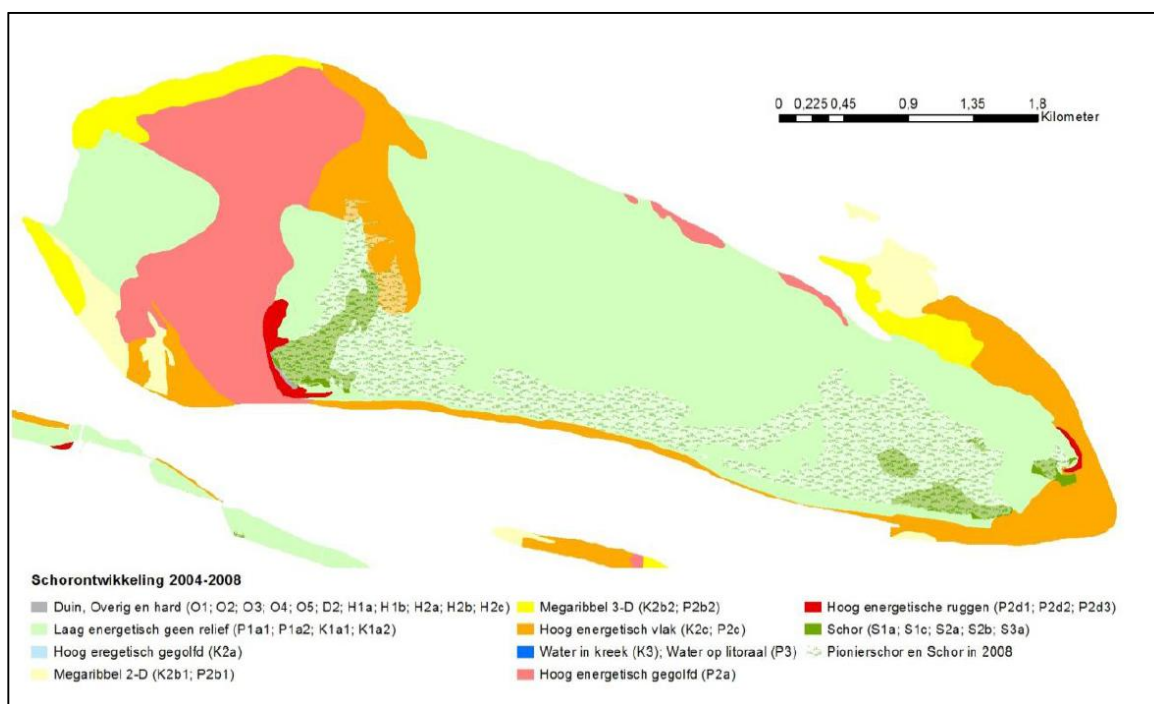
Figuur 4-6 Tijdsverloop van het volume gestort materiaal in vergelijking met gepeilde volumeverschillen sinds 2010 voor de plaatrandstortzone Hooge Platen West (HP3). (Goossens & Depreiter, april-mei 2018).

Een vloedgeultje is ontstaan en naar het oosten gemigreerd (Goossens et al, 2017). Langs de zuidwestrand van de Hooge Platen heeft zich een oeverwal van ca. 1 m hoogte gevormd waarachter een slibrijk, luw en potentieel ecologisch waardevol gebied is ontstaan (Plancke et al, 2017b).



Figuur 4-7 Bathymetrie ter hoogte van plaatrandstortvak Hooge Platen West in 2010 en 2016. Pijl wijst naar het Plaatje van Breskens. (Goossens et al, 2017)

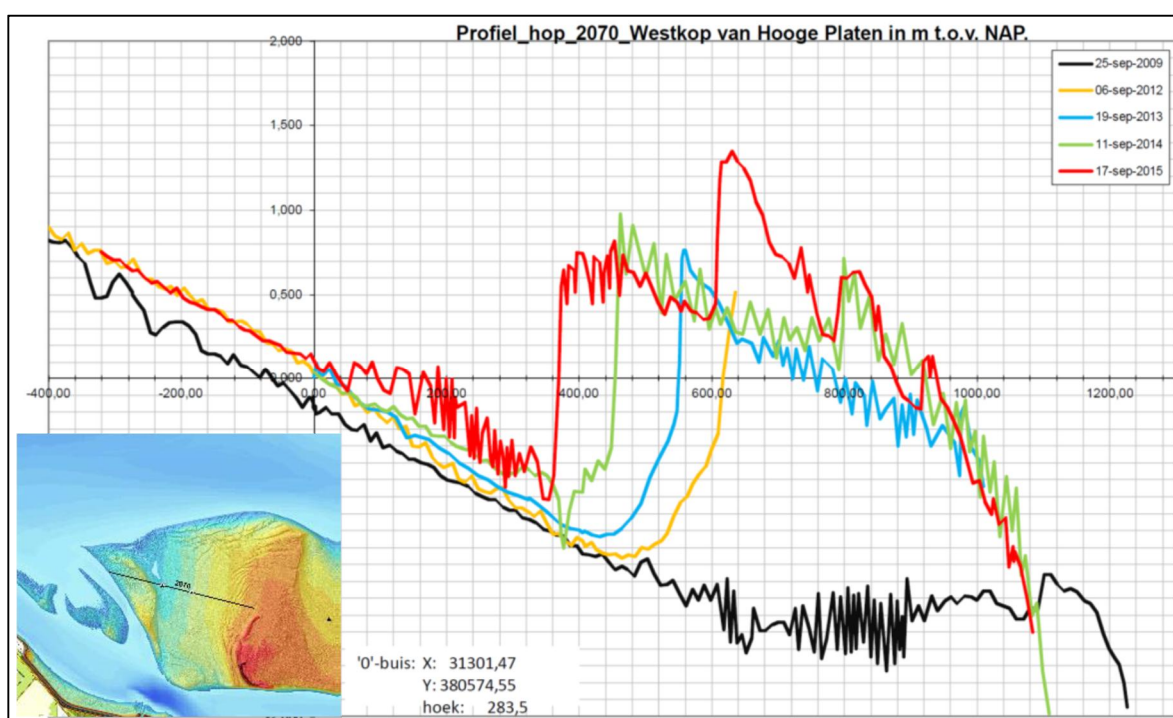
Aan de hoogstgelegen zuidelijke kant hogen de Hooge Platen op (dwarsprofiel Figuur 3-13). Dit geeft omvorming van 'hooggelegen litoraal' naar supralitoraal / schor (zie Figuur 4-8), mede toegeschreven aan het invangen van fijn sediment door vegetatie. Figuur 4-5 toont vooral ophoging, behalve bij de zuidelijke en oostelijke rand, waar enige schorranderosie is.



Figuur 4-8 Geomorfologische kaart Hooge Platen met schorontwikkeling 2004-2008 (Arcadis, 2014). Zie ook Figuur 3-4 waar verdergaande schorontwikkeling is te zien.

De raai in Figuur 4-9, dicht tegen de Bol, toont voor de periode vanaf de plaatrandstortingen (2009-2015) de vorming van de oeverwal, die de plaat op beweegt in de richting van de Bol. Tussen het geultje en het gebied tegen de Bol (een gebied van ca. 2,5 km²) is ongeveer 1 miljoen m³ sediment afgezet tussen 2010 en 2015 (Goossens et al, 2017). Dit is qua grootteorde een derde van de omvang van de plaatrandstorting op Hooge Platen West (Figuur 4-6). Het merendeel van het gestorte sediment blijft echter binnen de controlepolygoon aanwezig en heeft de Bol nog niet bereikt, wat ook niet gewenst zou zijn voor het behoud van de sternbroedplaats. De Bol op de Hooge Platen is immers aangemerkt als de belangrijkste broedlocatie van de Westerschelde.

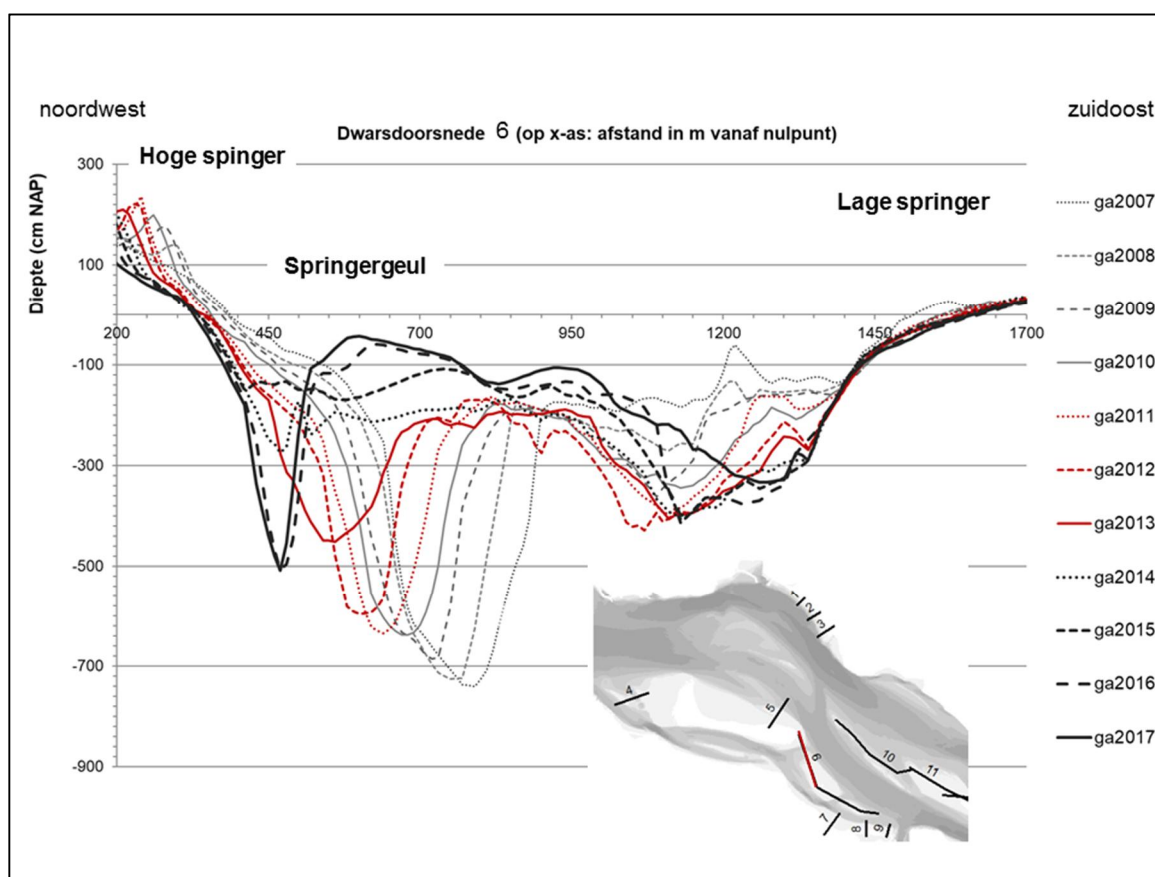
Figuur 4-9 suggereert daarmee dat de plaatrandstortingen niet bijdragen aan de ophoging van de Hooge Platen ten oosten van de Bol. De vraag blijft wel in hoeverre de plaatrandstortingen bijdragen aan verhoogde concentraties gesuspendeerd sediment (fijn zand en slib) en daarmee invloed uitoefenen op een veel groter gebied, vooral die waar vegetatie in staat is sediment in te vangen. Slib kan deels direct vrijkomen tijdens het storten en deels geleidelijk in suspensie gaan nadat het gestort is. De bijdrage van de stortingen bij de Hooge Platen Noord worden (zie 3.3.4 en Plancke, 2017b) (ook) beperkt geacht.



Figuur 4-9 RTK-raai 2070 aan de Hooge Platen West (bron: Jentink, 2015a) (Goossens et al, 2017)

4.3.3 Ontwikkelingen Hooge Springer

Langs de zuidoostelijke rand van de Hooge Springer, grenzend aan de Pas van Terneuzen, treedt geringe erosie op (2J in Figuur 3-9 en Figuur 3-11), zie ook Figuur 4-5. Net als bij de zuidrand van de Hooge Platen, par. 4.3.1, bevinden zich hier harde lagen en is de onderwaterhelling steil, zie ook dwarsdoorsnede in Figuur 4-10. Ook de Lage Springer lijkt behoorlijk erosiebestendig, terwijl de 'kortsluit' geulen in morfologische zin zeer dynamisch zijn, Figuur 4-10, zie ook par. 4.1. De Springergeul werd ondieper, (2K in Figuur 3-9), net als het Vaarwater.



Figuur 4-10 Dwarsprofiel Springergeul 2007-2017

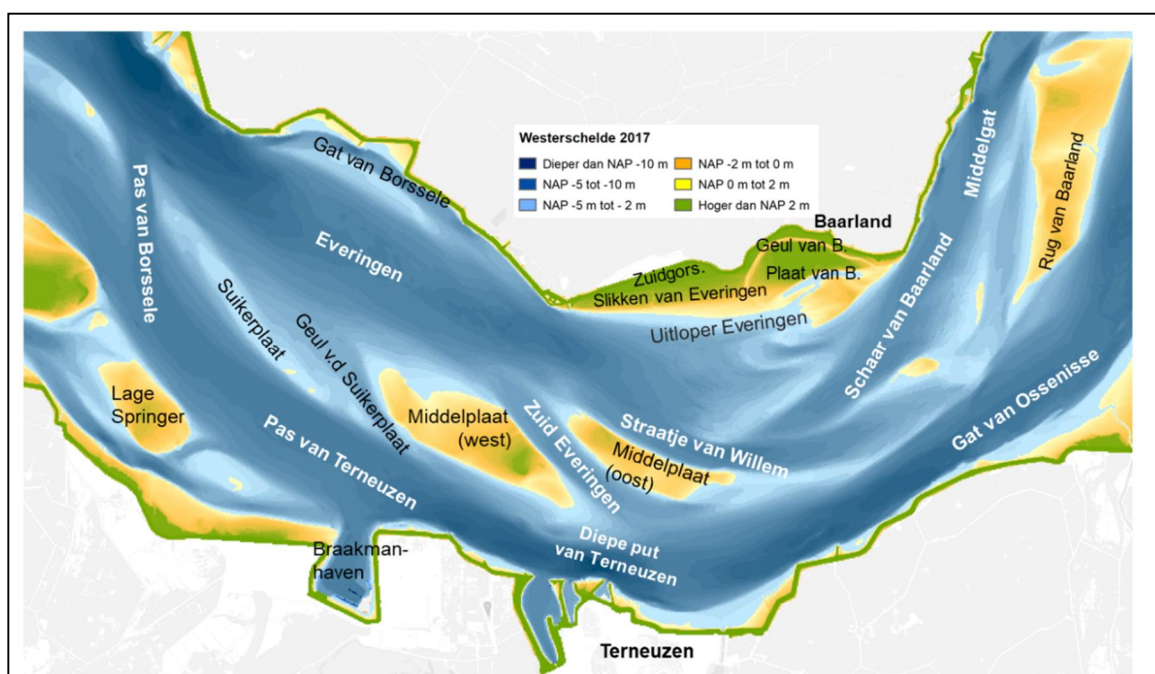
Overige ontwikkelingen in Mesocel 2 die te zien zijn in Figuur 3-9, maar hier niet verder worden ontleed, zijn het ophogen van het slik bij Hoofdplaat (2M), het terugschrijden en ophogen van de slikken bij Breskens (2N) en de ophoging Plaat van Breskens (2G).

5 Macrocel 3, rond Middelpaat, drempelgebied met Macrocel 4

5.1 Begrenzing en beschrijving studiegebied

5.1.1 Grenzen en overgangen

De hoofdgeul van Macrocel 3 heeft de namen Pas van Borssele, Pas van Terneuzen en (op de grens met Macrocel 4) Gat van Ossense. De nevengeul is de Everingen, die op de drempel op de overgang naar Macrocel 4 uitloopt in het Straatje van Willem en enkele andere vloedscharen. Tussen de hoofd- en nevengeul ligt het platencomplex van de Middelpaten, met de Suikerplaat en een oostelijke en een westelijke Middelpaat die van elkaar worden gescheiden door de kortsluitgeul Zuid-Everingen (Figuur 5-1). Ten westen van de Middelpaat-west ligt de Geul van de Suikerplaat.



Figuur 5-1: Macrocel 3, met drempelgebied naar Macrocel 4, met namen morfologische elementen

Aan de noordoever liggen aan de westzijde van Macrocel 3 de Slikken van Borssele, met daarvoor de parallelle geul het Gat van Borssele en de ondiepte Rug van Borssele. Aan de noordoever liggen aan de oostzijde van Macrocel 3 het Zuidgors met daarvoor de Slikken van de Everingen en de grotendeels met de oever verheelde Plaat van Baarland. Dit zijn restanten van de in de 17^e eeuw verdronken polders voor Ellewoutsdijk en Baarland dat een nu buitendijks gebied van 1200 ha besloeg (Wilderom, 1968).

De Plaat van Baarland is afkomstig van het zeer dynamische drempelgebied dat de overgang markeert van Macrocel 3 naar Macrocel 4. Aan de zuidwestzijde grenst Macrocel 3 aan Mesocel 2, waarbij de Pas van Terneuzen in verbinding staat met het Vaarwater langs Paulinapolder, via de kortsluitgeulen bij de platen Lage Springer en het Mosselplaatje. Aan de noordwestzijde grenst Macrocel 3 aan Macrocel 1. Daar splitst de hoofdgeul Pas van Terneuzen zich, waarbij de vaargeul via de gebaggerde Pas van Borssele loopt. Het andere deel van de splitsing vormt de Schaar van de Spijkerplaat.

5.2 Gebruiksfuncties

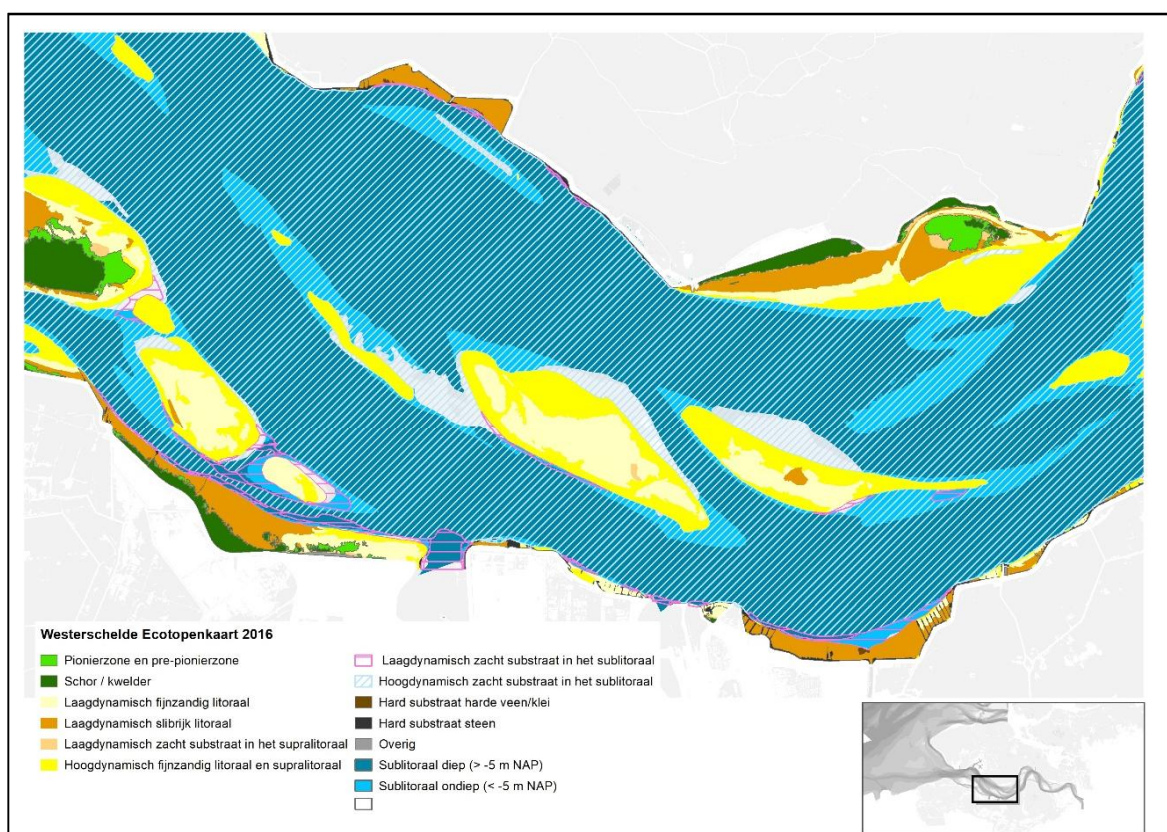
5.2.1 Veiligheid en Toegankelijkheid

De hoofdgeul fungeert als de hoofdvaarweg. Aan Macrocel 3 ligt de Braakmanhaven en via de sluisen van Terneuzen worden de havens aan het Kanaal van Gent naar Terneuzen bereikt. Via de sluisen bij Terneuzen varen zowel zeeschepen en binnenvaartschepen van en naar de Westerschelde. De Everingen fungeert als nevengeul en omvat ook een aantal noodankergebieden. Ook de Zuid-Everingen is een betonde geul.

Van Terneuzen naar Ellewoutsdijk lopen een aantal kabels en leidingen onder de bodem van Macrocel 3. Ook de Westerscheldetunnel ligt diep onder Macrocel 3.

5.2.2 Natuurlijkheid

De ecotopenkaart van Macrocel 3 staat in Figuur 5-2. Het Middelplatencomplex omvat hoog- en laagdynamisch areaal, waarbij het laagdynamische gebied op het centrale deel van de platen ligt. De rol van de Middelplaten voor foeragerende vogels is in vergelijking met de Hooge platen beperkt, waarschijnlijk vanwege het laaggelegen karakter (met een korte droogval en beperkte foerageerduur) in combinatie met de beperkte beschikbaarheid van andere platen en slikken. Het belangrijkste schorregebied in Macrocel 3 is het Zuidgorsgebied. De Plaat van Baarland is ondertussen zo hoog en luw dat ook hier schorvorming plaatsvindt.



Figuur 5-2 Ecotopenkaart uit 2016 van Macrocel 3.

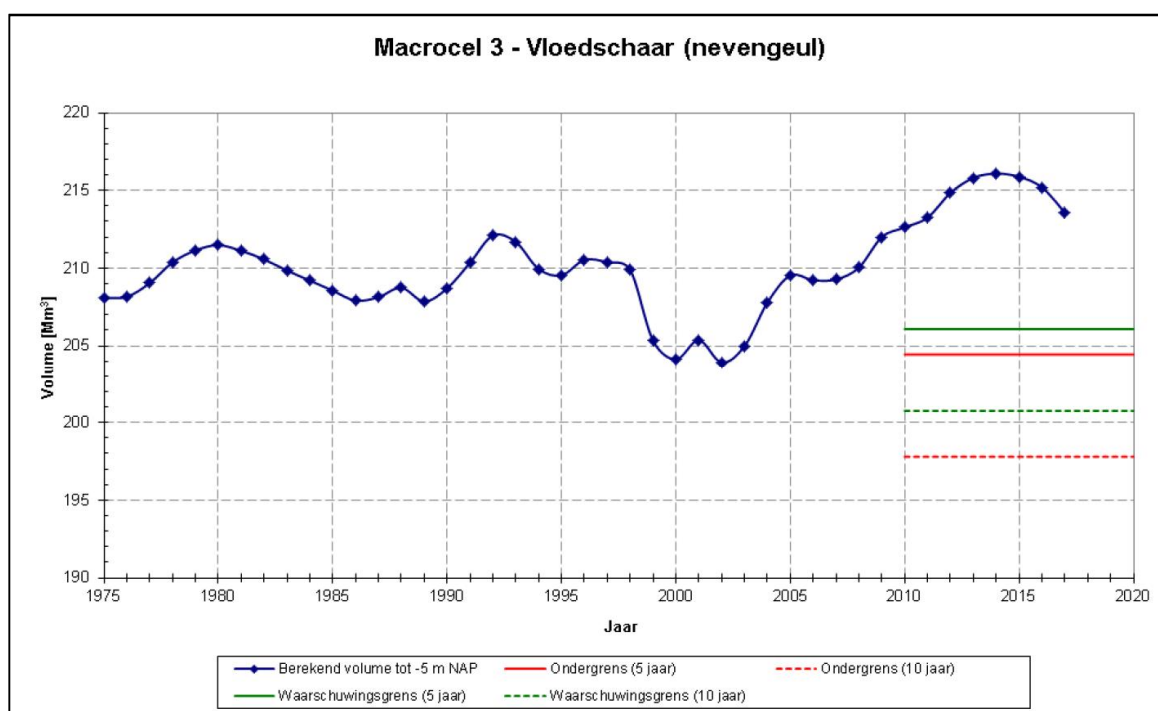
5.3 Morfologie op de schaal van de hele macrocel: sedimentvoorraden

In deze en de volgende paragraaf worden belangrijke ontwikkelingen op de schaal van de gehele macrocel besproken. Daarna worden kleinere morfologische elementen besproken, zoals kortsluitgeulen, intergetijdengebieden en de bagger- en stortlocaties.

Ontwikkeling watervolume per geul

Het watervolume in de periode 1975 tot 2017 staat in Figuur 5-3 voor de nevengeul, de Everingen en in Figuur 5-4 voor de hoofdgeul, de Pas van Terneuzen. Tot begin jaren 2000 was het watervolume van de nevengeul relatief stabiel, waarna een toename volgde tot 2014. De afgelopen drie jaar is een beperkte afname opgetreden. Het is belangrijk om de veranderingen te relativeren: de totale omvang van het watervolume in de nevengeul ligt in deze periode tussen ruwweg 205 en 215 $\times 10^6$ m³. De maximale verandering van ruim 10 $\times 10^6$ m³ is ongeveer 5% van het totale volume.

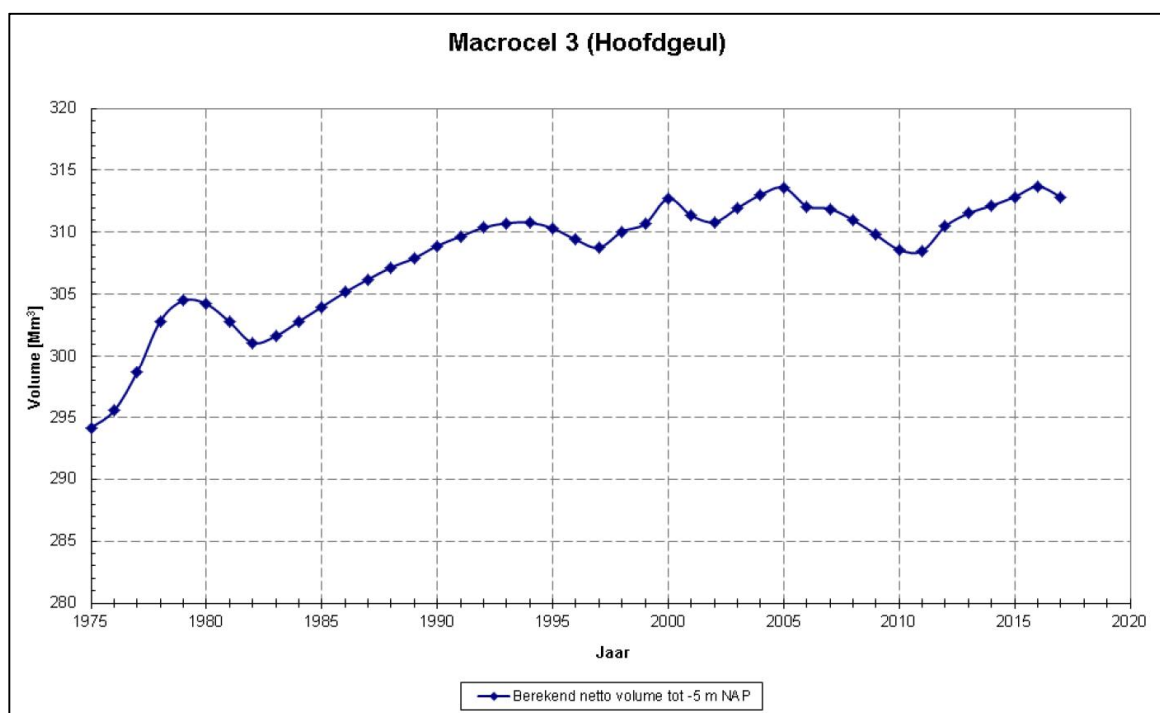
In de hoofdgeul is het watervolume tot halverwege de jaren '90 toegenomen, gevolgd door een redelijke stabiele periode. Ook voor de hoofdgeul geldt dat de omvang van de veranderingen ten opzichte van het totale volume beperkt zijn. De lange termijn volumetrend in het westen van de Westerschelde is een ruimer wordend systeem, waarbij veel van de volumetoename gebeurde in Macrocel 3, zie ook paragraaf 2.3.1.



Figuur 5-3: Water volume nevengeul Everingen in Macrocel 3 (bron: (Schrijver, 2018)).

De toename van het watervolume in de nevengeul van Macrocel 3, de Everingen (Figuur 5-3) vond plaats ondanks de stortingen die daar plaatsvonden. Wel valt de afname van het watervolume in de tweede helft van de jaren negentig samen met de periode met zeer grote stortingen. Deze stortingen hebben waarschijnlijk ook invloed gehad op de dynamiek van de Zuid-Everingen en de sedimentatie bij de Slikken van de Everingen. De lange termijn trend van de Everingen is erosief en deze overstemt de aanvoer van sediment door stortingen. Vanaf 2015 is weer een afname zichtbaar, mogelijk ook weer ten gevolge van de stortingen net als eind jaren '90. Het is niet duidelijk of dit doorzet bij ongewijzigd beheer.

De toename van het watervolume van de hoofdgeul Pas van Terneuzen (Figuur 5-4) is kleiner dan wat door baggeren uit de geul wordt verwijderd. Er is blijkbaar netto aanvoer van sediment. De uitruiming van de hoofdgeul wordt dus volledig veroorzaakt door baggeren (Barneveld et al, 2018). Tegelijkertijd vindt een sterke zuidwaartse migratie plaats van het Straatje van Willem, zie ook (3I) in Figuur 3-9.



Figuur 5-4 Water volume hoofdgeul Pas van Terneuzen in Macrocel 3 (bron: (Schrijver, 2018)).

5.4 Evolutie oostelijk deel nevengeul Everingen

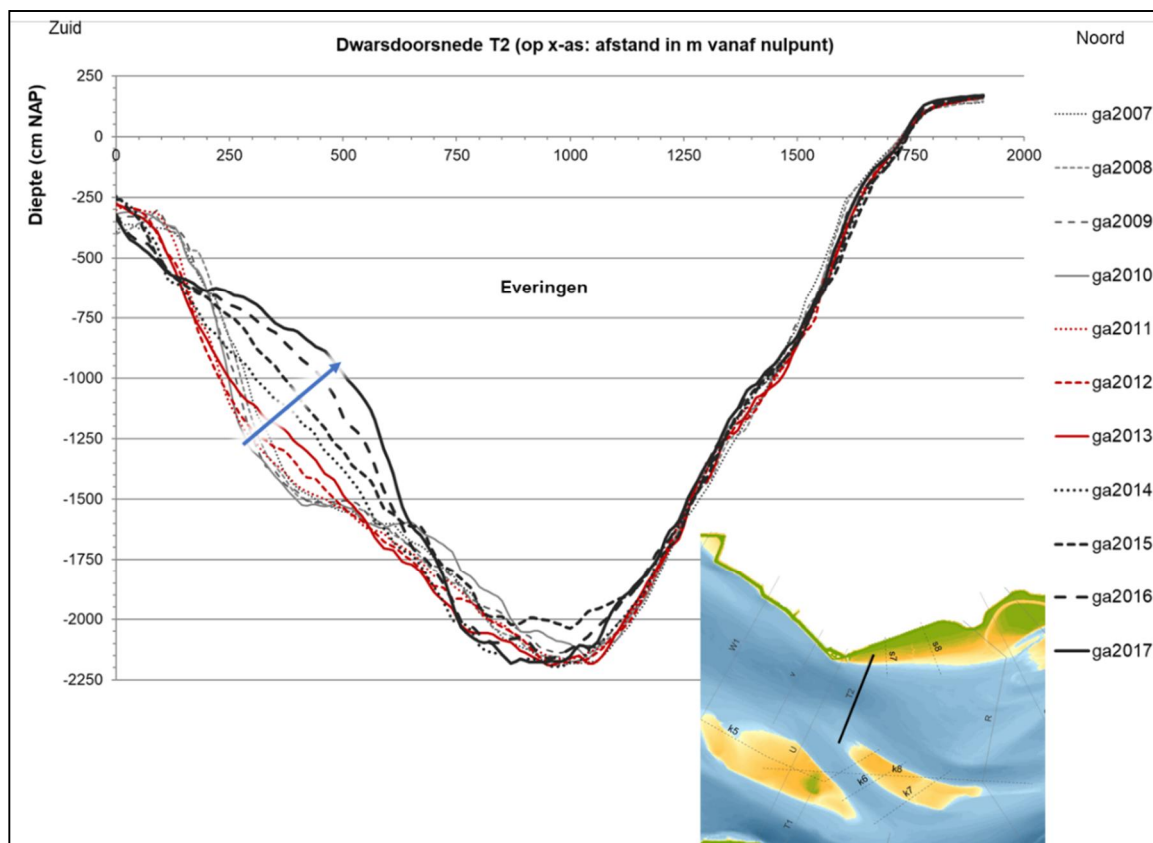
5.4.1 Waarnemingen oostelijk deel Everingen

Cleveringa & Vroom (2014) gaan in op de dynamiek in en rond de oostelijke helft van de Everingen. Daar zijn in de periode 1997-1998 op één locatie veel stortingen uitgevoerd, met een duidelijke verondieping van de geul tot gevolg. In de periode na deze stortingen heeft de invloed op de stromingen en de herverdeling van het sediment er mogelijk toe geleid dat de kortsluitgeul Zuid-Everingen minder snel verplaatste en ook geleid tot meer sedimentatie op de Slikken van Borssele en de Zuidgors aan de noordoever. Dit wijst op het belang van de lokale (mesoschaal) morfologische impact van stortingen. De waarnemingen zijn verder uitgewerkt en gepubliceerd door De Vet (2019, in prep.). Hij gaat daarbij verder in op de interactie tussen intergetijdengebied en geul en de invloed van de stortingen op de gemiddelde korrelgrootte.

De recente veranderingen van de oostelijke helft van de Everingen zijn zichtbaar in de kaarten in Figuur 5-12 en in de verschilkaart in Figuur 5-14. Deze hangen sterk samen met de ontwikkelingen in het drempelgebied. Dit zijn:

- i. het 'loskomen' van het Straatje van Willem door het ontstaan van een drempel tussen Everingen en het Straatje van Willem (1 in Figuur 5-13 en Figuur 5-14),
- ii. een uitbreiding van de vloodschaar voor de Plaat van Baarland (B in Figuur 5-14) en
- iii. veranderingen in de put voor het zwaar verdedigde ophangpunt bij Fort Ellewoutsdijk.

De dwarsdoorsnede in Figuur 5-5 toont dat deze autonome morfologische veranderingen hebben geleid tot sterke verondiepingen, in dit geval aan de zuidoever van de geul.

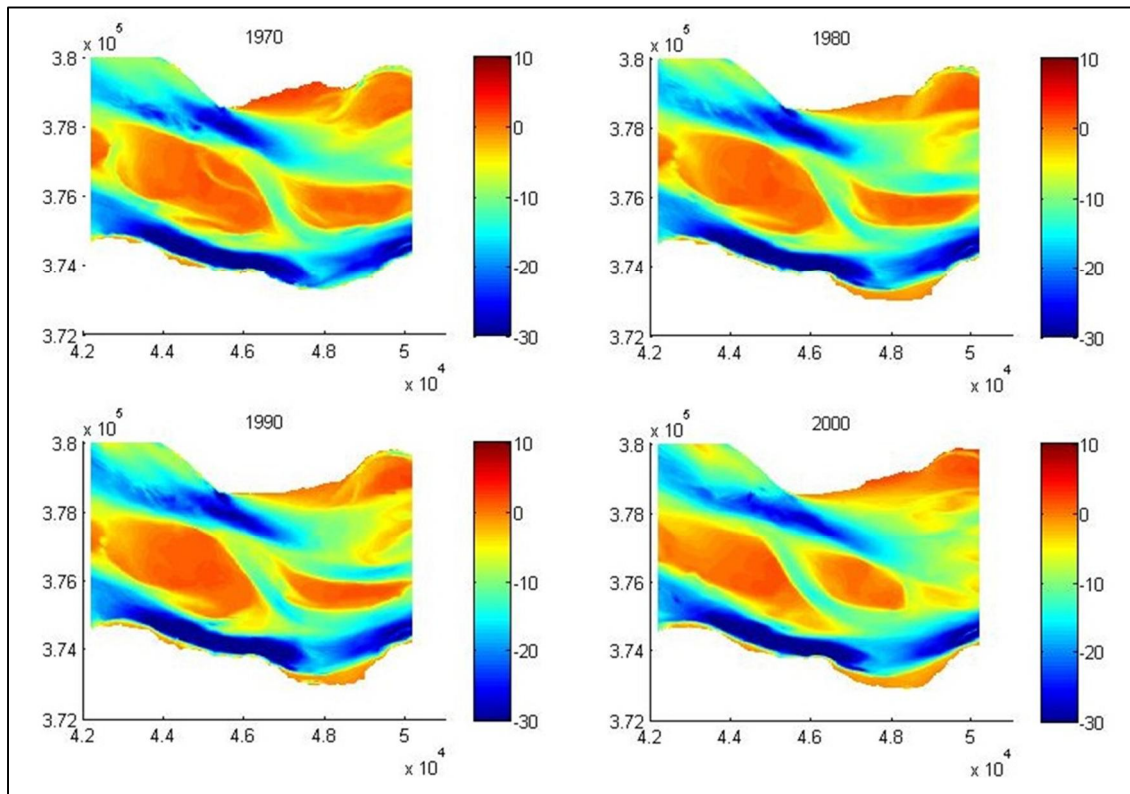


Figuur 5-5 Dwarsdoorsnede T2 Evolutie Everingen juist stroomopwaarts van de kortsluitgeul. De plotselinge sedimentatie in de laatste vier jaar is geen storting, maar een 'natuurlijke evolutie' die waarschijnlijk is gekoppeld aan het losmaken van het Straatje van Willem van de Everingen.

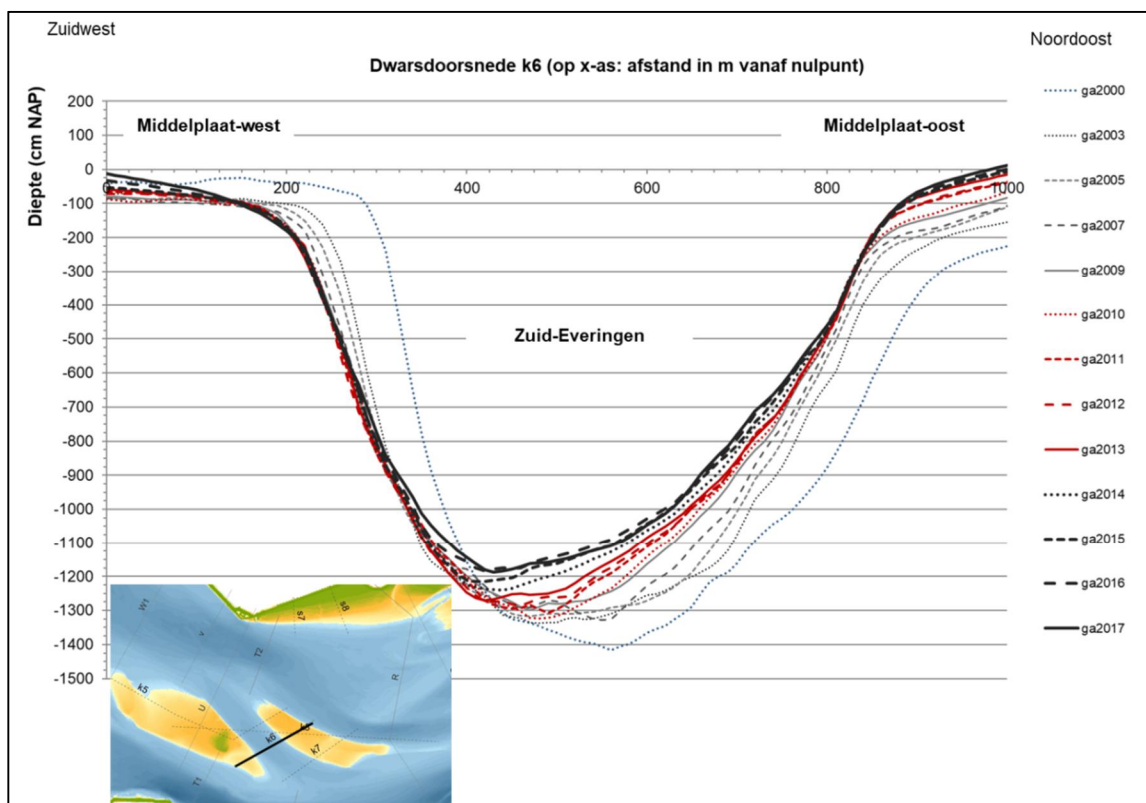
5.4.2 Waarnemingen kortsluitgeul Zuid-Everingen

De Zuid-Everingen is de grootste kortsluitgeul die nog aanwezig is in de Westerschelde. In het verleden was deze dynamischer, migreerde westwaarts en vertoonde een rotatie tegen de klok in (Figuur 5-6). Die dynamiek lijkt tot stilstand gekomen, wat zichtbaar is in de dwarsdoorsneden in Figuur 5-7. De migratie van de westelijke oever vertraagt en komt als eerste tot stilstand (vanaf 2009), terwijl het diepere deel van de oostoever nog iets langer verplaatst (tot 2015). Er ligt een schelpenbankje aan de oostzijde van de middelste Middelplaat, maar die kan, omdat de migratie over de volledige westoever van de Zuid-Everingen tot stilstand is gekomen, niet de belangrijkste oorzaak zijn. Er is ook afname van de diepte. Dit leidt sinds halverwege de jaren '90 tot trendmatig afnemen van de doorstroomoppervlakte (Figuur 5-9).

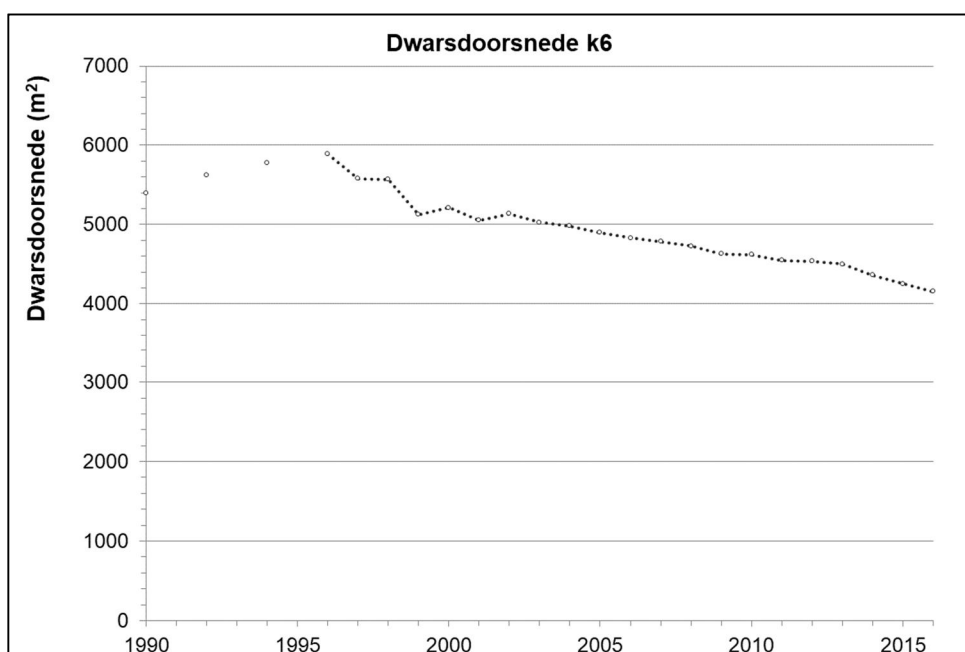
Eerder in de ontwikkeling van de Zuid-Everingen is sprake geweest van toename van het doorstroomoppervlak, gevolgd door afname. Deze veranderingen gingen samen met de verplaatsing van deze kortsluitgeul (en zijn voorgangers) van oost naar west, 'door' het Middelplaten complex. Belangrijk verschil met de huidige afname van de doorstroomoppervlakte is dat deze niet meer samengaat met de migratie van de kortsluitgeul. De huidige verondieping en afname van de doorstroomoppervlakte van de Zuid-Everingen past bij de ontwikkeling dat steeds meer debiet naar het 'Straatje van Willem' gaat. De evolutie lijkt verder niet gekoppeld aan de drempeldynamiek.



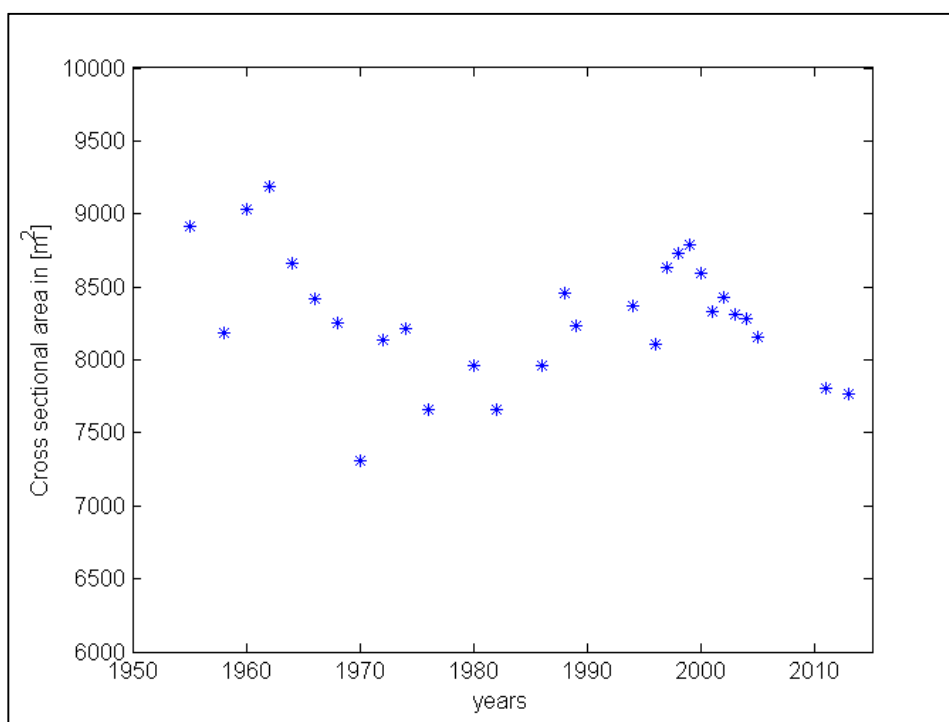
Figuur 5-6 Evolutie kortsluitgeul Zuid-Everingen 1970 – 2000 (Van Kooten, 2016)



Figuur 5-7 Dwarsdoorsnede door de kortsluitgeul Zuid-Everingen, centraal deel, sinds 2007.



Figuur 5-8 Doorstroomoppervlakte Zuid-Everingen, onder de NAP -2 m. Locatie: zie Figuur 5-7



Figuur 5-9 Evolutie doorstroomoppervlakte Zuid-Everingen. De trendmatige afname sinds 1995 blijkt te zijn voorafgegaan door een veel afwisselender beeld in de decennia ervoor. Locatie: zie Figuur 5-7

Het gedrag van de Zuid-Everingen past in de trend van de kortsluitgeulen in de Westerschelde, zie ook de geul door de Molenplaat (6.4). Alle kortsluitgeulen die reesteren zijn momenteel stabiel en/of afnemend in omvang.

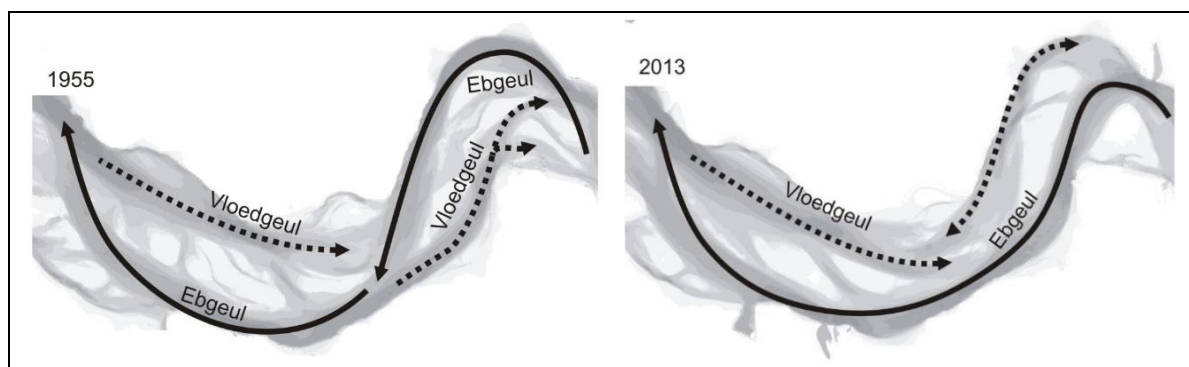
Een modelstudie van de stroming door een kortsluitgeul door de Middelpmaat, zoals de Zuid-Everingen is gedaan door Van Kooten (2016).

5.5 Drempelgebied Everingen tussen Macrocel 3 en Macrocel 4

5.5.1 Patroonwisseling eb- en vloedgeulen

Het drempelgebied tussen Macrocel 3 en 4, waar de Everingen en de Schaar van Baarland / Middelgat elkaar ontmoeten, was en is een van de meest dynamische gebieden in de Westerschelde. Vanuit het klassieke model van de sedimentcirculatiecellen (Van Veen, 1950) was het niet vanzelfsprekend dat de dynamiek op de drempel behouden is gebleven, ondanks de wisseling van de rollen van de hoofd- en nevengeul in Macrocel 4 (zie Figuur 5-10 en ook paragraaf 6.3, Cleveringa&Vroom, 2014, Huisman et al, 2018). Er was een geleidelijke ontwikkeling die ertoe leidde dat in de jaren '80 van de 20^e eeuw de hoofdvaarweg is verlegd van het Middelgat naar de Overloop van Hansweert. In de oorspronkelijke situatie was het drempelgebied een kruispunt van de eb- en de vloedgeul (links in Figuur 5-10). Tegenwoordig lopen de vloed- en ebgeul parallel. De ebgeul loopt door, zonder duidelijke drempel (Figuur 5-10 rechts). Waar de vloedgeulen elkaar ontmoeten is nog steeds een drempelgebied. De morfologische ontwikkelingen geven nu geen aanleiding te veronderstellen dat de vloedgeulen op elkaar gaan aansluiten, zoals de ebgeulen dat doen.

Anderzijds is er de theorie (Wang et al, 2015, De Vriend et al, 2011) dat plaatlengte een belangrijke parameter is voor de stabiliteit van een macrocel. Hier ligt een belangrijke kennisvraag omtrent de stabiliteit van de huidige drempelconfiguratie op langere termijn.



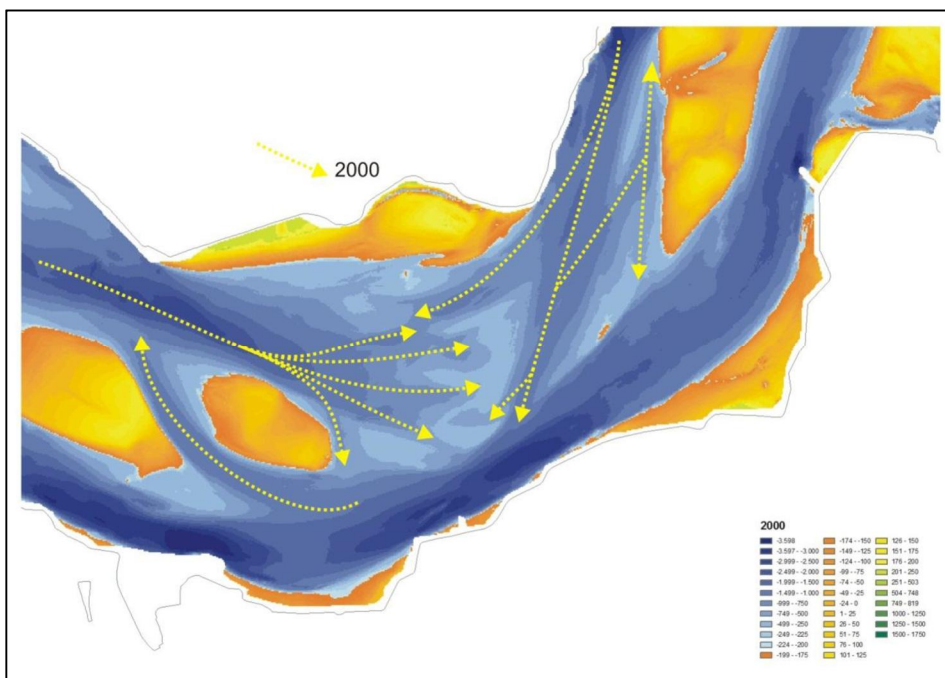
Figuur 5-10 Schematische weergave van het systeem van eb- en vloedgeulen in Macrocellen 3 en 4 in 1955 en tegenwoordig (uit Cleveringa & Vroom, 2014).

Het drempelgebied doorloopt herhalende patronen, beschreven door Jeuken (2000) en Cleveringa en Vroom (2014). Er kunnen grofweg twee verschillende patronen worden onderscheiden. Deze wisselen elkaar af zonder vaste tussenperiode.

Bij het eerste patroon zijn meerdere kleine eb- en vloedscharen aanwezig, die in elkaar grijpen (zie Figuur 5-11). Doordat er kleine cellen met residueel transport actief zijn, wordt het sediment effectief vastgehouden in het drempelgebied, dat daardoor sedimenteert. De ondieptes in het drempelgebied migreren zuidwaarts en verhelen met de Middelpaalt.

Het tweede patroon wordt gekenmerkt door een ebgeul uit het Middelgat die ten noorden van de vloedgeul uit de Everingen ligt. Dit komt het meest overeen met de huidige situatie (Figuur 5-13). Door de ligging van de geulen wordt sediment dat aangevoerd wordt vanuit het Middelgat, direct teruggewerkt richting de Rug van Baarland. Ondieptes in het drempelgebied kunnen verhelen met de Rug van Baarland.

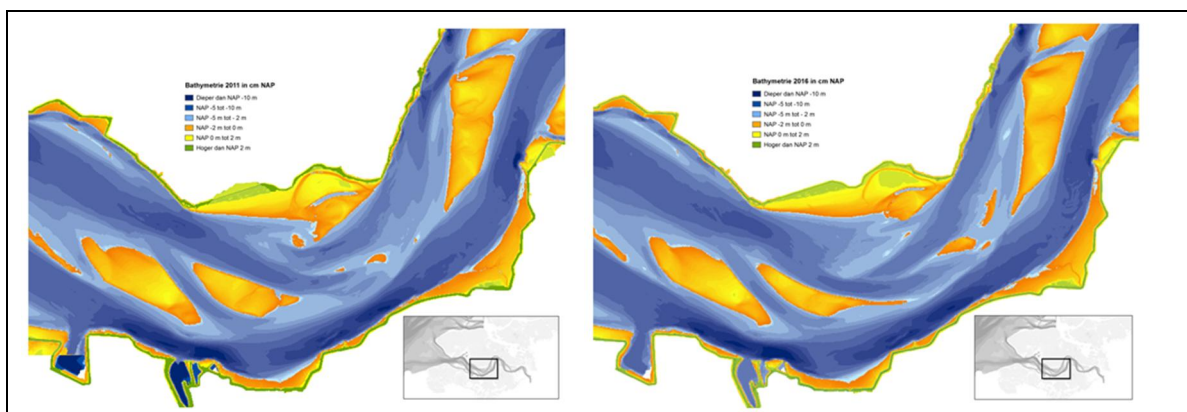
21 maart 2019, definitief



Figuur 5-11 Drempelgebied van de Everingen in 2000. De geulassen zijn gemarkeerd (Cleveringa, 2013a)

Vanaf ongeveer 2000 is in het drempelgebied de ebschaar vanuit het Middelgat, die ten noorden van de vloodschaartjes uit de Everingen ligt, aan het uitruimen en naar het zuiden aan het migreren. Hiermee lijkt de weg vrij te zijn gemaakt voor een overgang van het eerste patroontype naar het tweede patroontype.

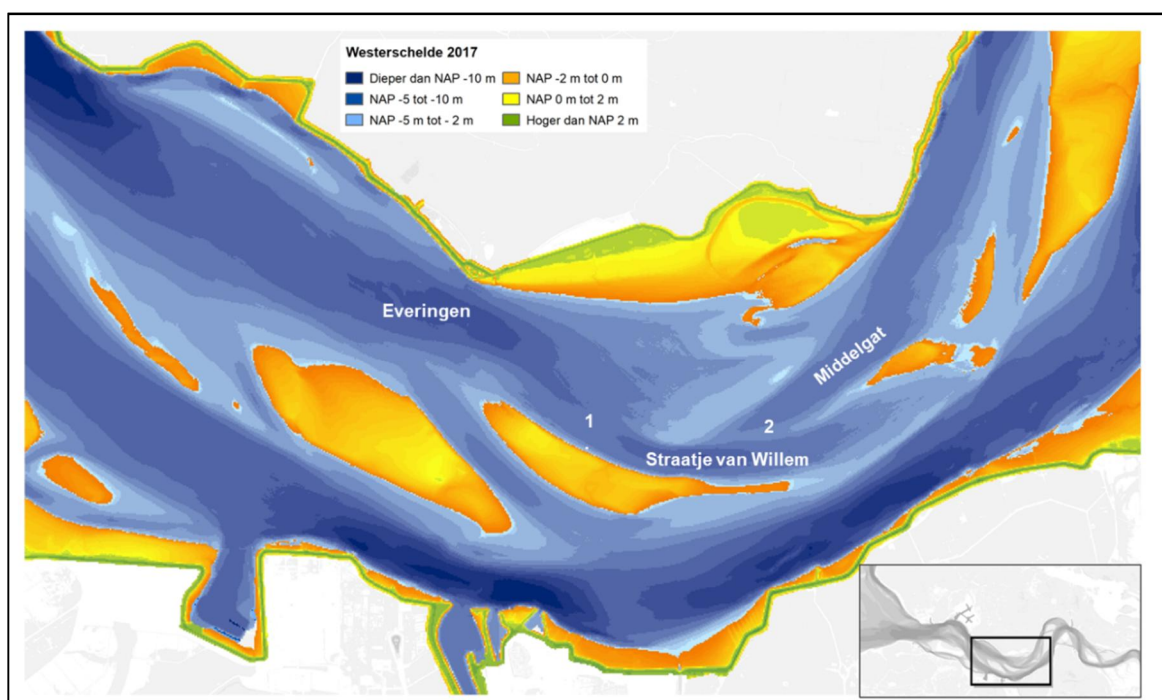
Figuur 5-12 toont twee kaarten, uit 2011 en 2016, waarin duidelijk zichtbaar is welke verschillen zijn opgetreden. Het Middelgat loopt nu zonder interne drempel door tot in het drempelgebied. Het Straatje van Willem komt los. Dit wordt in paragraaf 5.5.2 in meer detail beschreven. Verder zijn de erosie van de meest oostelijke Middelplaat en het ontstaan van een nieuwe vloodschaar bij de Plaat van Baarland goed te zien. Dit laatste kan een aanwijzing zijn dat het andere drempelpatroon aan het ontstaan is. Op basis van de evolutie in de laatste jaren wordt verwacht dat het huidige patroon (begonnen rond 2000) nog enkele jaren te gaan heeft, alvorens het andere patroon (met meerdere schaaftjes en meestal minder erosie van het drempelgebied) weer zal intreden.



Figuur 5-12: Kaart met de bodemligging van het drempelgebied in 2011 (links) en 2016 (rechts).

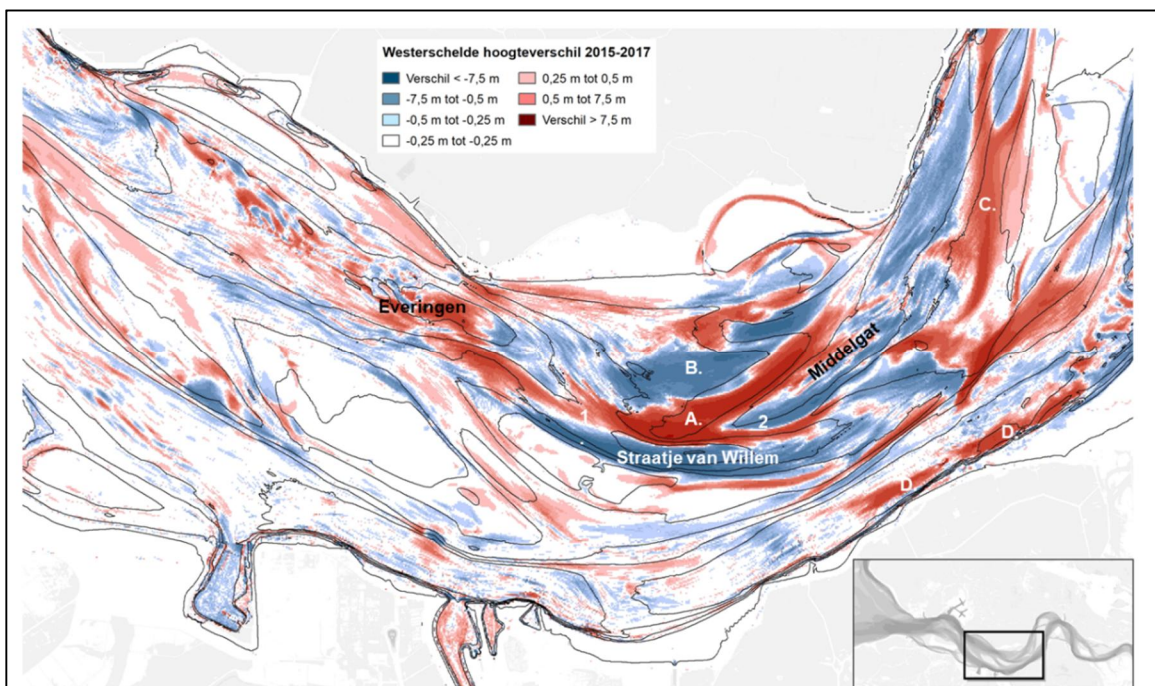
5.5.2 Ontwikkeling Straatje van Willem

De afgelopen jaren komt het Straatje van Willem 'los' van de Everingen. Tussen de Everingen en het Straatje van Willem is sprake van een ondiepte (1 in Figuur 5-13 en Figuur 5-14). Het Straatje van Willem is snel naar het zuiden verplaatst en een meer gebogen geul geworden. Dat is anders dan in eerdere drempelcycli. In de verschilkaart (Figuur 5-14) is zichtbaar dat Het Straatje van Willem als geheel erodeert. Ten noorden van het Straatje is een omvangrijk sedimentatiegebied (A in Figuur 5-14), waarvan ten noorden weer erosie optreedt (B in Figuur 5-14). Opvallend is ook de omvangrijke sedimentatie in de plaatrandstortzone Rug van Baarland (C in Figuur 5-14), voor een belangrijk deel autonoom.

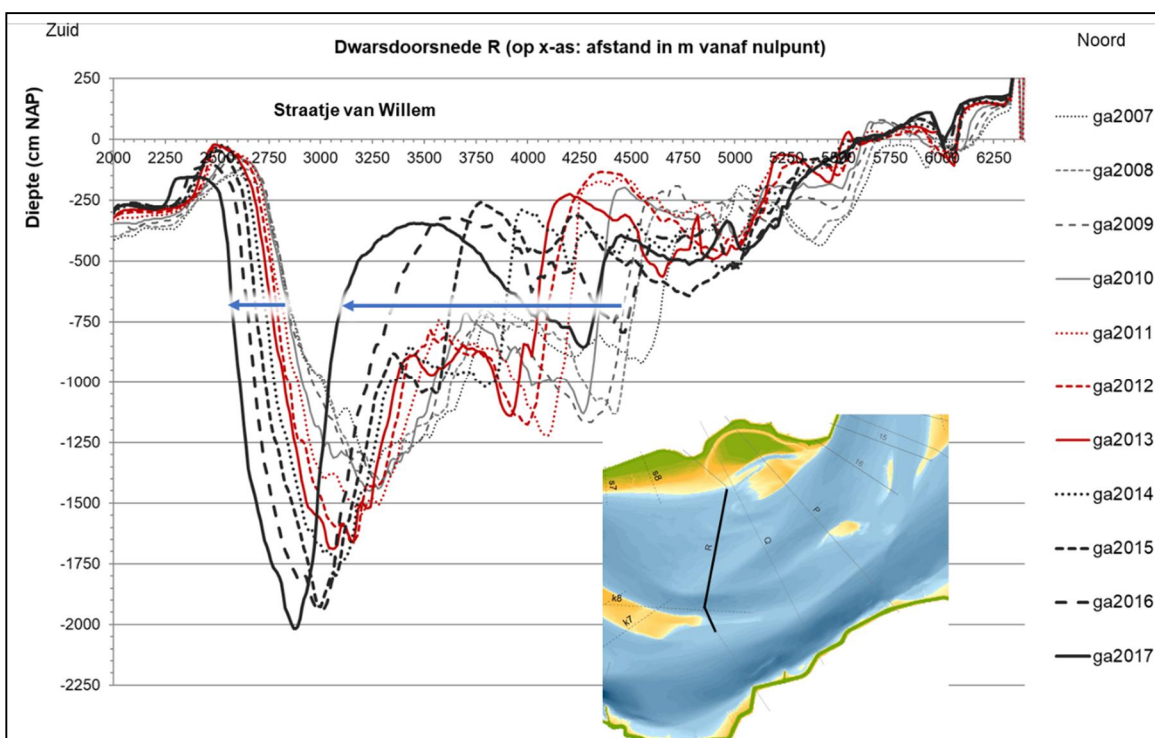


Figuur 5-13 Morfologie van het drempelgebied tussen Macrocellen 3 en 4 in 2017. 1 = ondiepte 2 = vloedschild
Schaar van Baarland

In de dwarsdoorsnede, Figuur 5-15, is de verplaatsing van het Straatje van Willem naar het zuiden goed zichtbaar. De verplaatsing van de zuidelijke geulwand verloopt minder snel dan die van de noordelijke geulwand, maar is de laatste jaren sneller verlopen. De geul verdiept ondertussen ook. Aan de noordzijde is de grote variatie in de ligging van de schaartjes en drempels zichtbaar in de wirwar van lijnen. Te zien is de regelmatige, snelle afbraak van de plaat, samenhangend met het uitbochten van het Straatje van Willem. De grote dynamiek op de drempel resulteert in migratiesnelheden tot ca. 200 meter per jaar.



Figuur 5-14 Sedimentatie (rood) en erosie (blauw) in drempelgebied van Macrocellen 3 en 4 gedurende de laatste 2 jaar (2015-2017) 1 = drempel 2 = erosie Schaar van Baarland. A = sedimentatie noordzijde Straatje van Willem, zuidwaarts daarvan erosie, B = erosie uitloper Everingen, voor Plaat van Baarland C = stortvak Rug van Baarland D = geulwandstortingen Gat van Ossensisse.



Figuur 5-15 Dwarsdoorsnede R door het Straatje van Willem (locatie in inzet).

Op basis van de denkmodellen en observaties die in 5.5.1 en 5.5.2 zijn beschreven is de hypothese dat, ondanks de functiewisseling van Middelgat en Gat van Ossensisse (zie 6.3) er

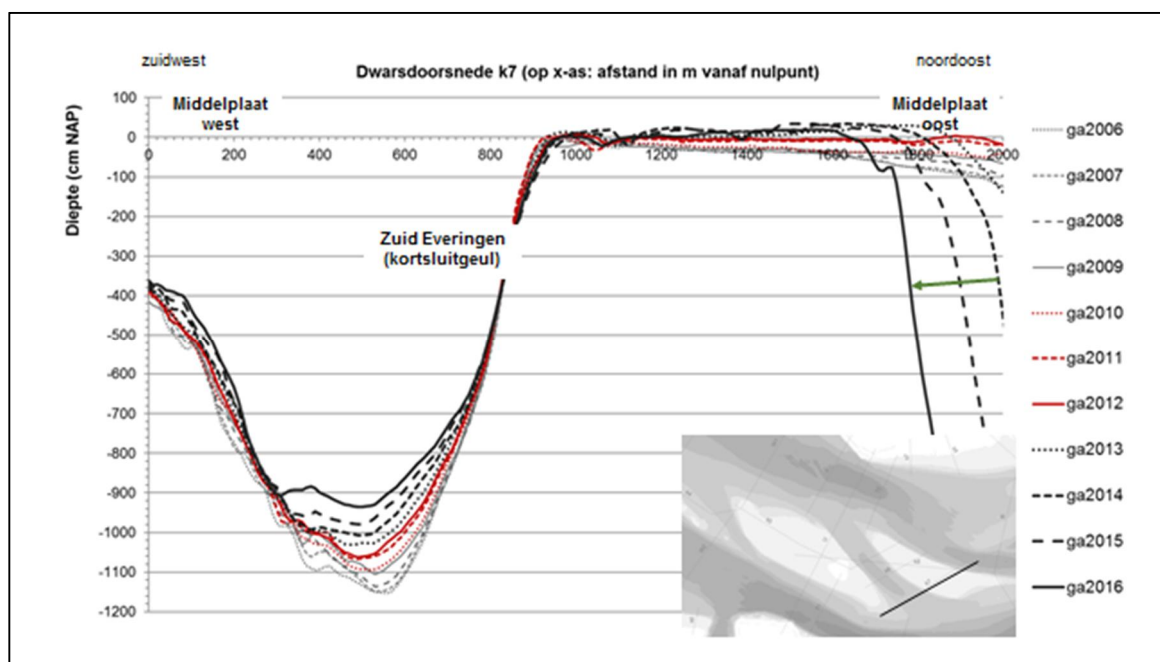
nog een actief drempelgebied is. Die activiteit toont zich in de huidige transitie van een patroon met meerdere kleine eb- en vloedscharen (Figuur 5-11) naar een patroon waarin een ebgeul uit het Middelgat ten noorden van de vloedgeul uit de Everingen ligt (Figuur 5-13). Een goede stap om de hypothese te testen is te onderzoeken of het drempelgebied erodeert door daarvan een aparte sedimentbalans te maken.

5.6 Oostelijke Middelplaat en de Plaat van Baarland

5.6.1 Waarnemingen

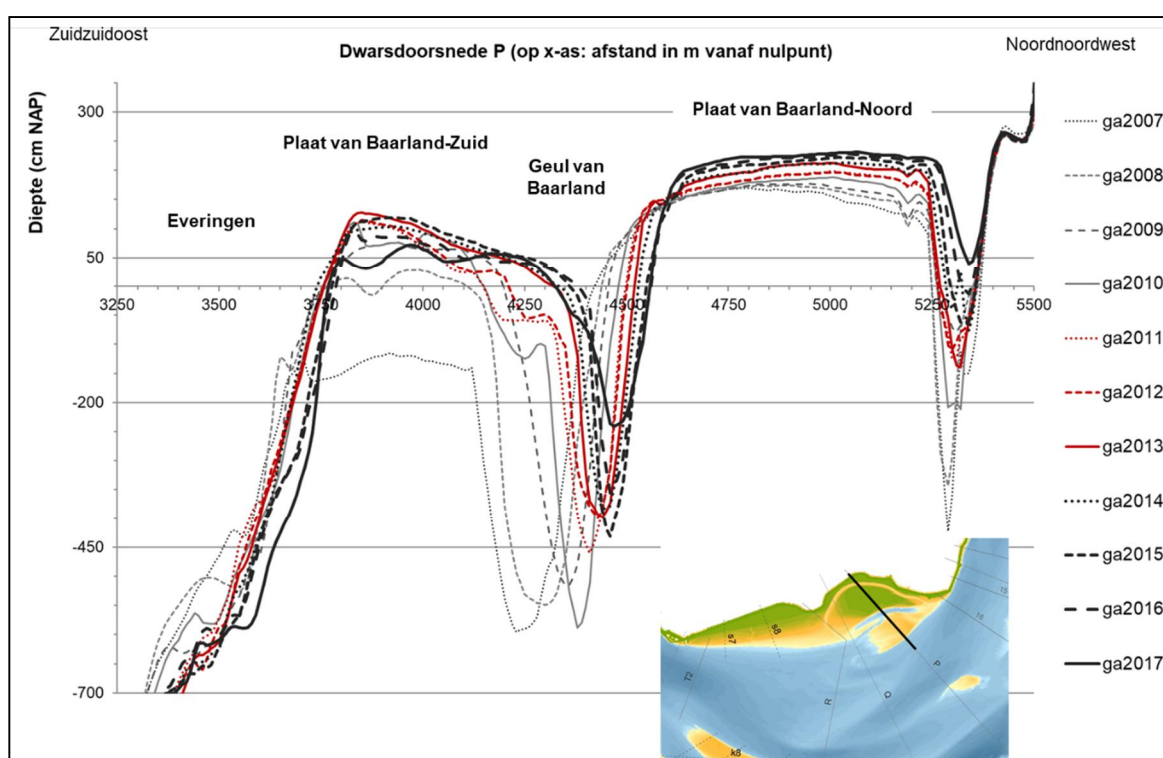
De oostelijke Middelplaat wordt aan de oostzijde steeds smaller, zichtbaar in de kaarten in Figuur 5-12 en Figuur 5-14. Hierdoor is er substantieel verlies van intergetijdengebied (Goossens et al 2018). Dit gebeurt onder invloed van uitruimen en zuidwaartse verplaatsing van het Straatje van Willem (Figuur 5-15). In de huidige configuratie in het drempelgebied lijkt weinig plaats te zijn voor de generatie van nieuwe droogvallende platen, die bij het Middelplaat-complex kunnen aansluiten.

Tegenover dit verlies van intergetijdengebied staat een aanwinst aan de noordzijde van de Everingen (de Plaat van Baarland) en bij de Rug van Baarland (in Macrocel 4). De veranderingen bij de Plaat van Baarland zijn duidelijk zichtbaar in de dwarsdoorsnede in Figuur 5-17. De Plaat van Baarland-Noord is nog altijd aan het verhogen. De ecotopenkaart laat geen uitgebreide vestiging van vegetatie zien (Figuur 5-2). Tussen de oever en de Plaat van Baarland ligt nog een restant van de vroegere geul 'Boerengat'. Deze geul ligt inmiddels zo hoog dat deze geheel droogvalt bij laagwater. Momenteel is de Geul van Baarland snel aan het verondiepen, zodat de Plaat van Baarland-Zuid zal verhelen met 'Noord'. De zuidzijde van de Plaat van Baarland-Zuid erodeert nu door de opdringende vloedschaar (de uitloper van de Everingen, zie Figuur 5-1).



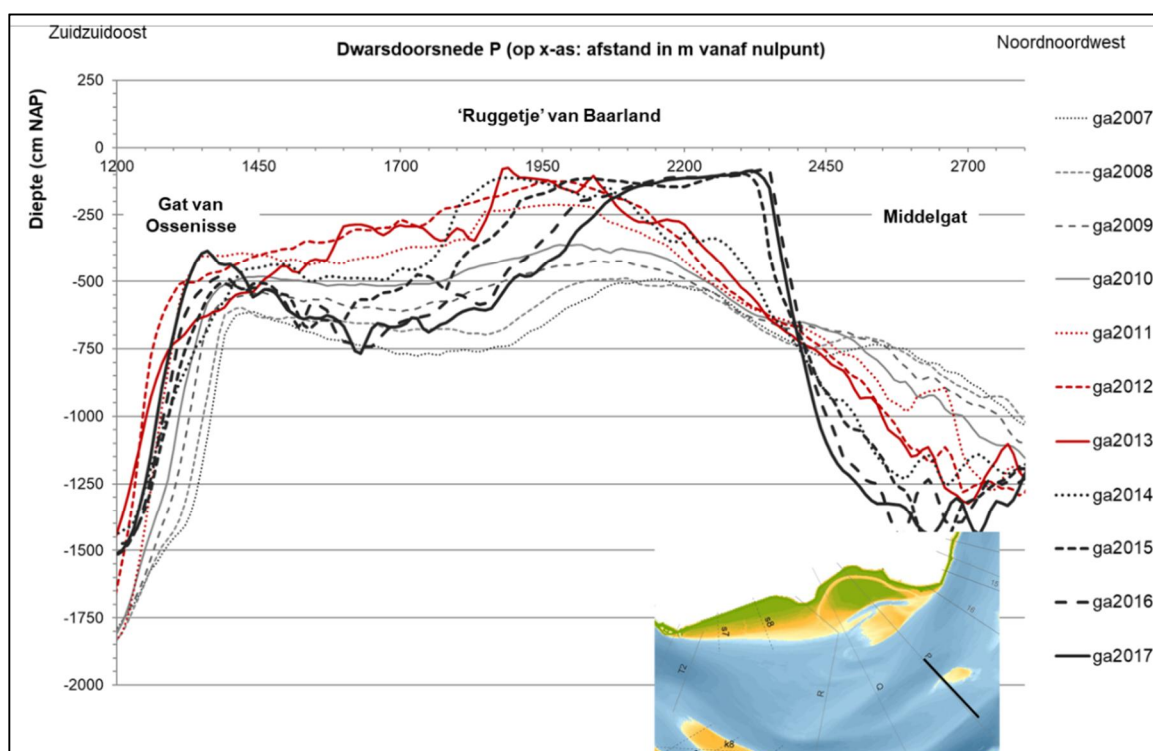
Figuur 5-16 Evolutie van oostelijke Middelplaat, met snelle erosie aan oostzijde. Ook de trendmatige verondieping van de kortsluitgeul 'Zuid-Everingen' is goed te zien.

Aan de zuidzijde van de Rug van Baarland is bij de huidige ligging van de geulen op het drempelgebied ruimte voor het ontstaan van droogvallende platen. In de dwarsdoorsnede in Figuur 5-18 is zichtbaar hoe een ruggetje is gevormd, dat rond 2012 zo hoog is geworden dat het in het intergetijdgebied ligt. De jaren daarna is dit ruggetje hoger geworden en is een snelle verplaatsing in gang gezet naar het noord-noordwesten. In het drempelgebied van Macrocel 3 en 4 vindt geregeld het ontstaan, snelle verplaatsing en wederom verdwijnen plaats van vergelijkbare platen. Alleen wanneer deze naar een locatie nabij een van de bestaande plaatcomplexen migreren (Middelplaten, Rug van Baarland of Plaat van Baarland), lijken deze platen een langer leven beschoren. Ondanks (of dankzij) de grote dynamiek van de platen is dit deel van het estuarium (het drempelgebied en de aangrenzende platen in Macrocellen 3 en 4) uiteindelijk quasi-neutraal voor wat betreft areaal intergetijdgebied.



Figuur 5-17 Deel van dwarsdoorsnede P door de Plaat van Baarland (locatie in inzet).

Denkmodellen over de hiervoor beschreven dynamiek zijn gekoppeld aan de denkmodellen over de dynamiek op de drempel van Macrocel 3 naar 4. De positie en het aantal van de (drempel-) geulen is zeer bepalend voor de ruimte die aanwezig is voor de vorming en de migratie van droogvallende platen. De geulen en hun drempels en niet de platen worden bepalend geacht voor de dynamiek. Welke verplaatsing van de platen plaats kan vinden, wordt ook bepaald door de drempelgeulen. De huidige configuratie van de drempelgeulen laat weinig ruimte voor het ontstaan en de migratie van platen naar de Middelplaten. Daarbij leidt de ontwikkeling van het Straatje van Willem tot erosie van de bestaande Middelplaat-Oost. Eerder werd al gemeld dat de zuidelijke Plaat van Baarland minder ruimte heeft en erodeert door de migratie van een vloodschaar. Ruimte voor de vorming van de platen ligt (in dit gebied) nu bij de Rug van Baarland en ten zuiden daarvan.



Figuur 5-18 Dwarsdoorsnede door de kleine plaat ('ruggetje') ten zuiden van de Rug van Baarland (locatie in inzet).

5.7 Bagger- en verspreidingslocaties in Macrocel 3

5.7.1 Overzicht stortlocaties

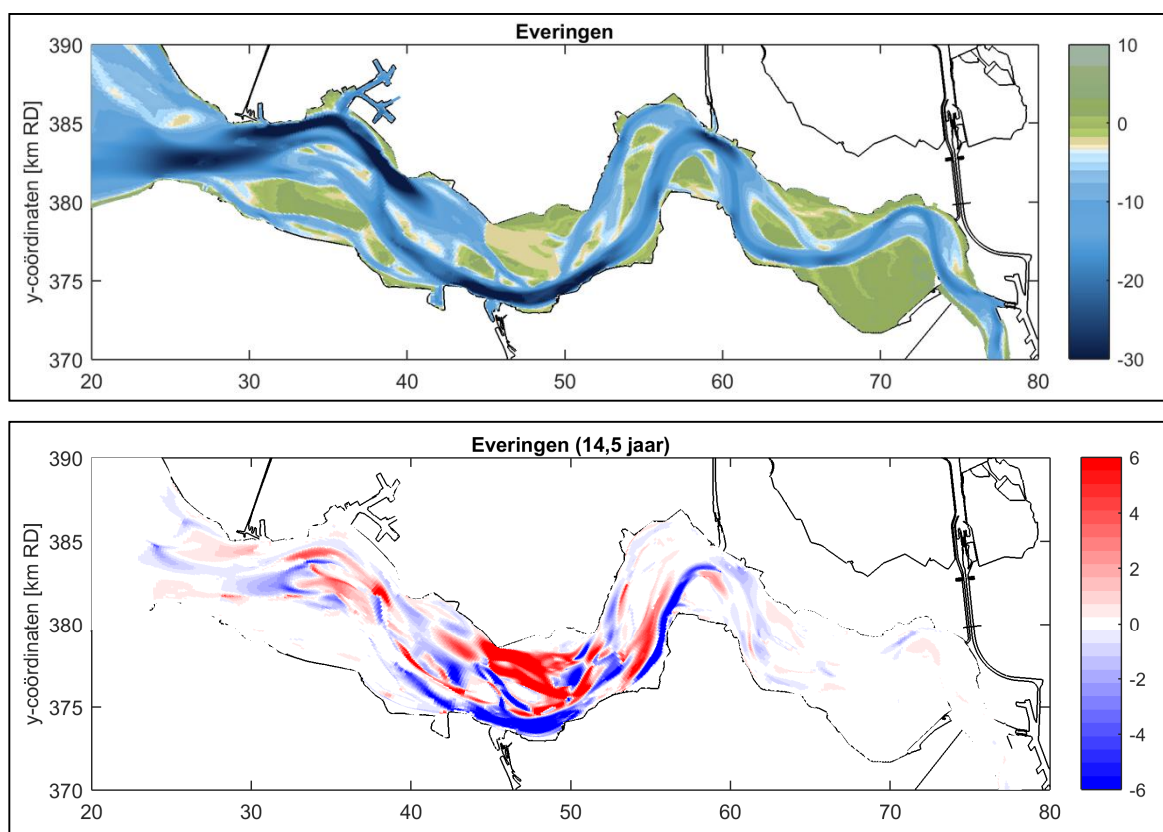
Bij de beschrijving van de oostelijke helft van de Everingen in paragraaf 5.4 is al kort stilgestaan bij de invloed van grootschalige stortingen bij Fort Ellewoutsdijk in 1997-1998 (SN31). Dit voorbeeld illustreert hoe stortingen lokale ontwikkelingen kunnen beïnvloeden.

Bij de Rug van Baarland ligt een plaatrandstortzone. Een doel ervan was toename van laagdynamische areaal. De stortingen gebeurden toen de autonome ontwikkeling rond dit gebied al een toename van het sedimentvolume liet zien. De stortingen sloten daarop aan en het areaal ondiep water en laagdynamisch areaal groeiden door beide oorzaken tezamen. De totale omvang van de plaatrandstortingen op deze locatie is mede daarom minder groot geweest dan voorzien bij de planvorming. Daarvoor zijn twee redenen. Er werd gaandeweg onderkend dat de stortingen ook een bijdrage leverden aan de afname van het watervolume van de nevengeul in Macrocel 4, het Middelgat (waarover meer in hoofdstuk 0). Bovendien bleek de uitvoering van de plaatrandstortingen lastiger dan voorzien, mede vanwege de autonome sedimentatie in het gebied.

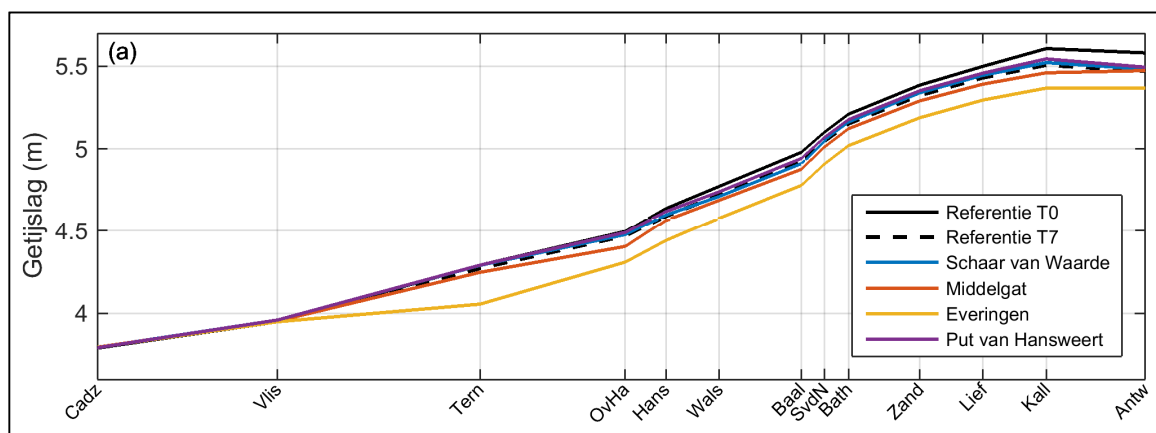
Daarnaast liggen belangrijke stortzones in de hoofdgeul. Er liggen een aantal opeenvolgende zones vanaf het drempelgebied stroomopwaarts (dus deels in Macrocel 4). Daar zijn twee bijzondere stortzones bij: de vakken behorende bij de geulwandverdediging (GVO) en bij de proefstortzones Inloop van Ossenis (IvO, Figuur 1-7). Vanwege de nabijheid tot het drempelgebied lijkt het logisch om de potentiële interactie van het drempelgebied met de stortzones te bekijken. De dominante stroming en het sedimenttransport parallel aan de drempel door de hoofdgeul maakt een directe interactie minder waarschijnlijk.

5.7.2 Modeluitkomsten extreem stortscenario in oostelijk deel Everingen

Er zijn modelsimulaties uitgevoerd, waarbij alle vrijkomende baggerspecie uit de hele Westerschelde in de nevengeul Everingen (SN31) is gestort (Schrijvershof en Vroom, 2016). Dit is ook gedaan voor twee andere nevengeulen (Middelgat en Schaar van Waarde, zie 6.3.3 en 7.6.4). Hiermee werd het meest extreme, in theorie uitvoerbare baggerbeheer bekeken. De conclusie daaruit was dat, wanneer met de huidige uit onderhoud beschikbare hoeveelheden sediment wordt getracht de getijslag te beïnvloeden via verondieping van een nevengeul, Macrocel 3 hiervoor waarschijnlijk de beste optie is (effect tot 10 cm). Die afname hangt samen met een afname van het totale debiet. De afname van de gemiddelde geuldiepte zorgt bij dit scenario verder voor een sterkere vloeddominantie. Figuur 5-19 en Figuur 5-20 tonen de bijbehorende modelresultaten, waaronder een grafiek met de gevolgen voor de getijslag van alle onderzochte extreme scenario's.



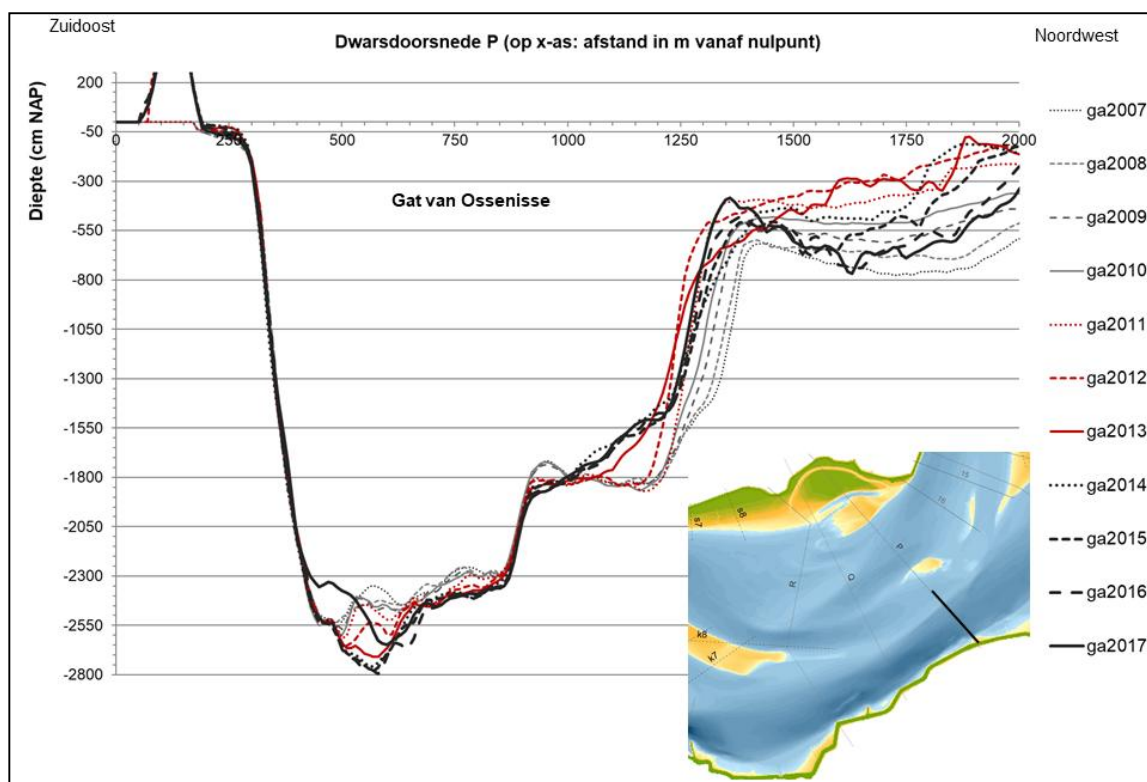
Figuur 5-19 Modelresultaat waarbij alle vrijkomende baggerspecie consequent in Everingen, SN31 is gestort (Schrijvershof en Vroom, 2016).



Figuur 5-20 Modelresultaat consequent storten volgens extreme scenario's: evolutie getijslag (Schrijvershof en Vroom, 2016).

5.7.3 Geulwandstorting Gat van Ossenisse

In Figuur 5-14 valt zone D op. Daar is als proef sediment gestort op de vooroever van het Gat van Ossenisse om de bestaande geulwandverdediging te ondersteunen. Deze stortlocatie sluit aan op de proefstort Inloop van Ossenisse en SH41 in Macrocel 4 (zie paragraaf 6.8.1). Het is niet zeker of, gezien de steilheid van de oever het zinvol is hier via storten bescherming en ondersteuning van de vooroever te bereiken. De ontwerphelling van het gestorte materiaal kan getoetst worden, zoals bij geulwandsuppleties (bijv. in het Oostgat). Meestal is hoogstens 1:15 haalbaar om zettingsvloeiing te voorkomen. Daarnaast is de erosie door de getijstrooming in de buitenbochten en vooral dichterbij de oppervlakte zeer sterk.



Figuur 5-21 Dwarsdoorsnede P bij Gat van Ossenisse (locatie in inzet).

Het dwarsprofiel (Figuur 5-21) laat uitsluitend enige ophoging zien (2017) bij de teen van de steile verdedigde geulwand. Doel van de proefstort was vooral het opvullen van het geconstateerde erosiegat onder de verdediging en daar is inderdaad sediment afgezet. Rijkswaterstaat heeft inmiddels besloten dat hier nog wel een steenbestorting uitgevoerd moet worden. In de door Rijkswaterstaat ingemeten raaien zijn soms duinmigratiepatronen zichtbaar in de verschilkaarten (RWS, 2017). Deze dwarsprofielen laten, evenals Figuur 5-21, zien dat na de stortingen alleen de teen van de geulwand is af gedekt (van de geulbodem tot maximaal -15 m), de hogere delen worden dus niet beschermd.

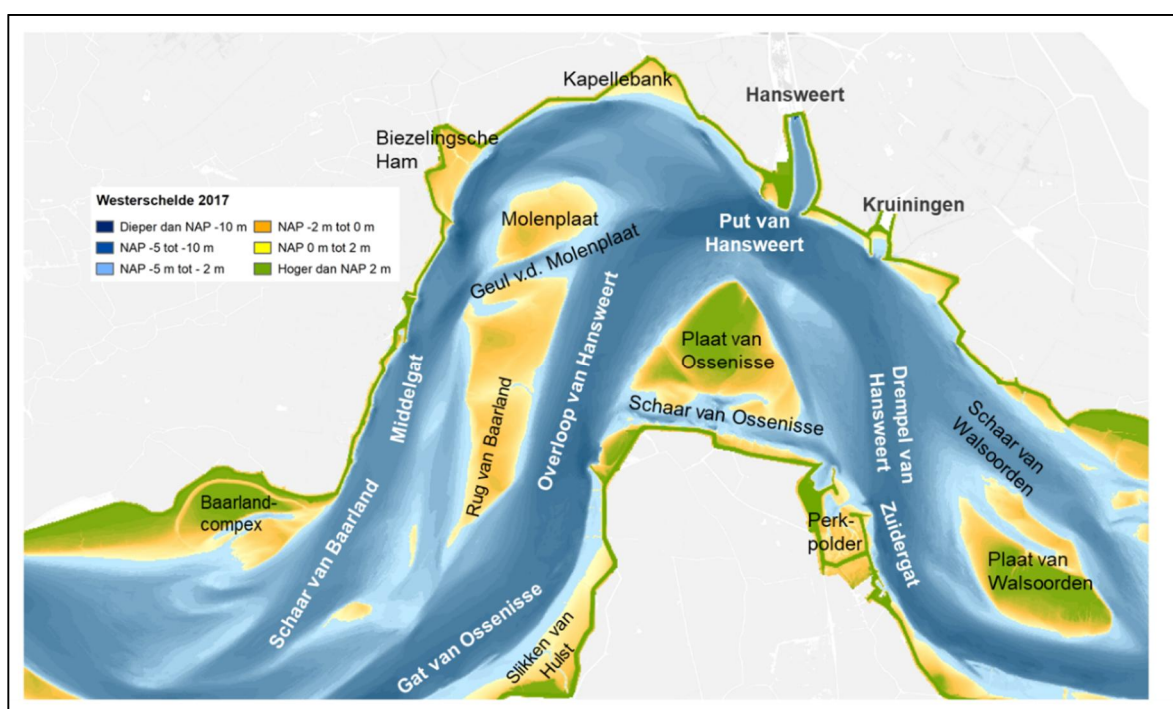
Geconcludeerd wordt dat de stabiliteit van de stortingen gering is. Door erosie en geotechnische instabiliteiten (zettingsvloeiing) verdwijnt snel veel zand en mogelijk is tijdens de stortingen direct al veel materiaal verloren (in suspensie) gegaan. De vraag is of de stortingen bijdragen aan het volumebehoud in dit vak. Mogelijkerwijs treedt zonder stortingen volumeafname op door erosie van de geulbodem, maar dit is minder waarschijnlijk, omdat hier de harde lagen vrijwel zijn bereikt, zie Figuur 2-4. Het betreft de Formatie van Boxtel, zie profiel 10 Bijlage B.

6 Macrocel 4 en drempel Hansweert, rond Plaat van Ossenisse

6.1 Begrenzing en beschrijving studiegebied

Figuur 6-1 toont de kaart van Macrocel 4, met de hoofdgeul Gat van Ossenisse - Overloop van Hansweert en de nevengeul Middelgat. Tussen de hoofd- en de nevengeul ligt het platencomplex van Macrocel 4 dat bestaat uit de zuidelijke Rug van Baarland en de noordelijke Molenplaat met daartussen de Geul van de Molenplaat. De Rug van Baarland was ooit echt een rug aan de zuidzijde van het plaatcomplex, maar verwijst nu naar de gehele zuidelijke plaat. In dit hoofdstuk staan ook de ontwikkelingen van de Plaat van Ossenisse (deze valt namelijk zowel buiten Macrocel 4 als Macrocel 5 volgens de officiële indeling, zie 1.2). Deze plaat wordt omspoeld door de hoofdgeul Put van Hansweert en de neven- of kortsluitgeul Schaar van Ossenisse.

In Macrocel 4 liggen verschillende slikken. Aan de noordoever liggen de Biezelingsche Ham en de Kapellebank, gevormd door inhammen in de dijken. Aan de Zuidoever liggen de Slikken van Hulst, die naar het noorden overgaan in de Platen van Hulst.



Figuur 6-1 Macrocel 4, met namen van de morfologische elementen

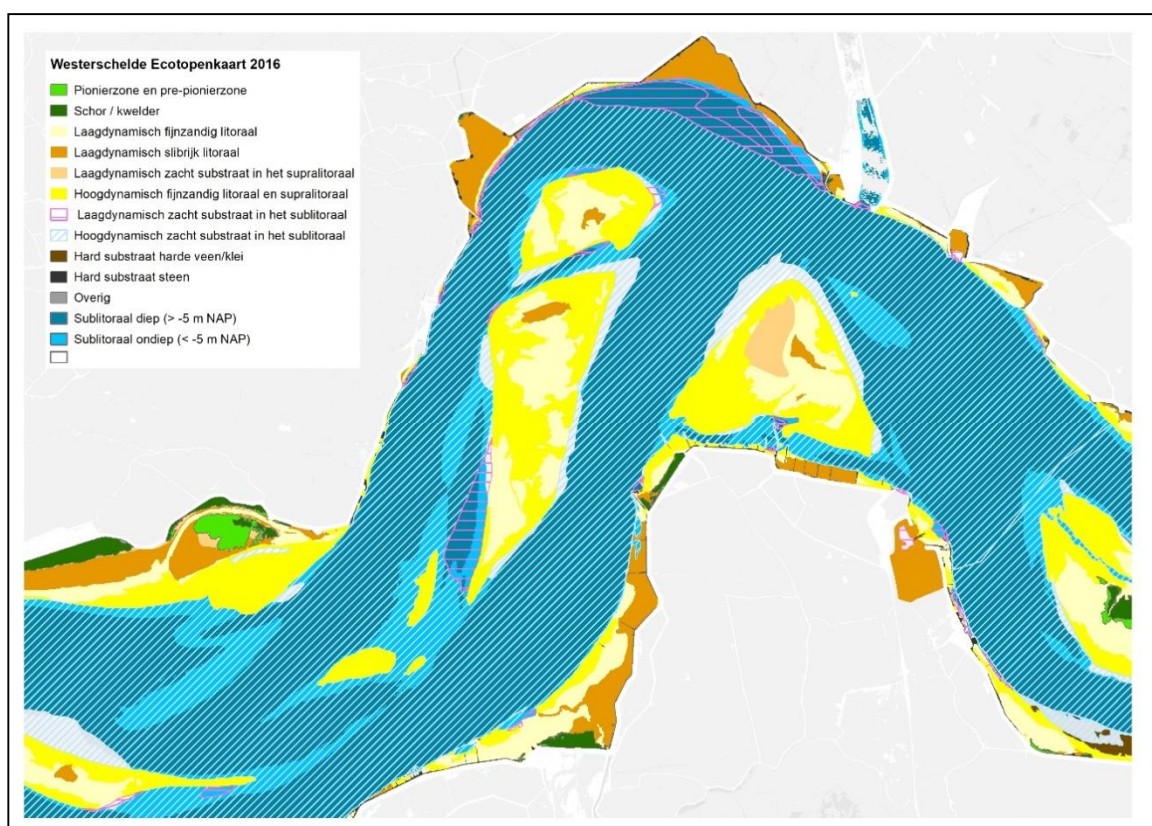
6.2 Gebruiksfuncties

Vanwege de waterveiligheid liggen er steenbestortingen op de meeste plaatsen waar de hoofd- en de nevengeul dicht onder de oever liggen, soms met slikken op de vooroever. De hoofdgeul Gat van Ossenisse - Overloop van Hansweert is in gebruik als de hoofdvaarweg, met aan de westzijde een betonde vaarweg voor de binnenvaart, die bekend staat als het 'Fietspad'. Ook de nevengeul Middelgat is betond en in gebruik als vaarweg voor de binnenvaart.

De ecotopenkaart van het gebied staat in Figuur 6-2. Zichtbaar is dat de Rug van Baarland bestaat uit hoog- en laagdynamische delen. Dit geldt ook voor de Molenplaat. Supralitorale

delen ontbreken op beide platen. Op de Plaat van Ossenis is wel supralitoraal areaal aanwezig, maar zonder (pionier-)schorren. Het meeste hoogdynamische areaal grenst aan de geulen. In het midden van de Rug van Baarland en de Molenplaat is ook hoogdynamisch areaal aanwezig.

Bij de Slikken van Hulst ligt zowel laagdynamisch als hoogdynamisch areaal. Het laatste vormt een rand langs de geul. Bij de slikken aan de noordoever is geen hoogdynamisch areaal. Macrocel 4 heeft twee gebieden in de nevengeul met laagdynamisch sublitoraal areaal, aan de noordzijde bij de Kapellebank en aan de zuidwestzijde van de Rug van Baarland. Bij Knuitershoek wordt gewerkt aan een strekdam in het kader van het Natuurprogramma Westerschelde, om daar het areaal laagdynamisch litoraal te vergroten (zie ook paragraaf 6.6).



Figuur 6-2 Ecotopenkaart uit 2016 van Macrocel 4.

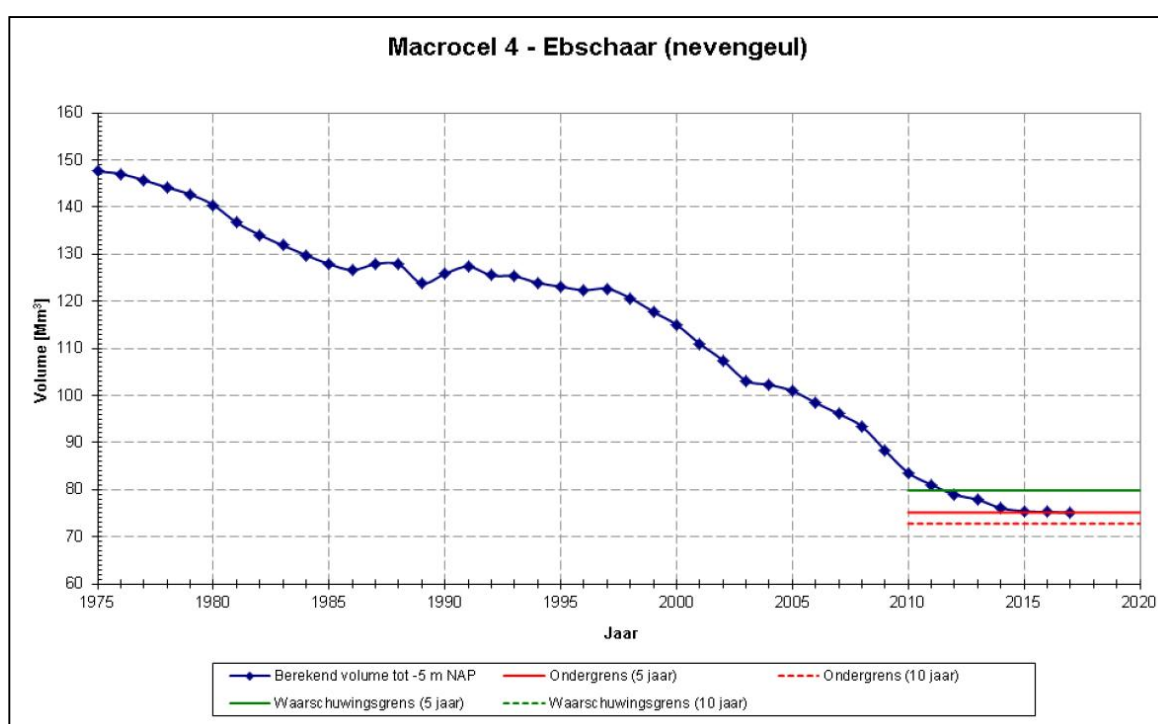
6.3 Op schaal van de Macrocel: verondiepen Middelgat en uitruimen hoofdgeul

6.3.1 Waarnemingen

Figuur 6-3 toont de ontwikkeling van het watervolume van de nevengeul, het Middelgat. De afname ervan is opvallend. Het watervolume is vanaf 1975 (begin van deze grafiek) vrijwel gehalveerd. De snelheid waarmee de afname plaatsvindt is niet constant. Er zijn twee perioden met snelle afname (van 1975-1985 en vanaf 1997 tot ca. 2010) met daartussen beperktere afname. Hierbij speelt een naijlingseffect van de hoofd-/nevengeul patroonwisseling die in de jaren '80 plaatsvond zeker een rol, zie paragraaf 5.5.1 en Figuur 5-10 (Cleveringa & Vroom, 2014, Huisman et al 2018).

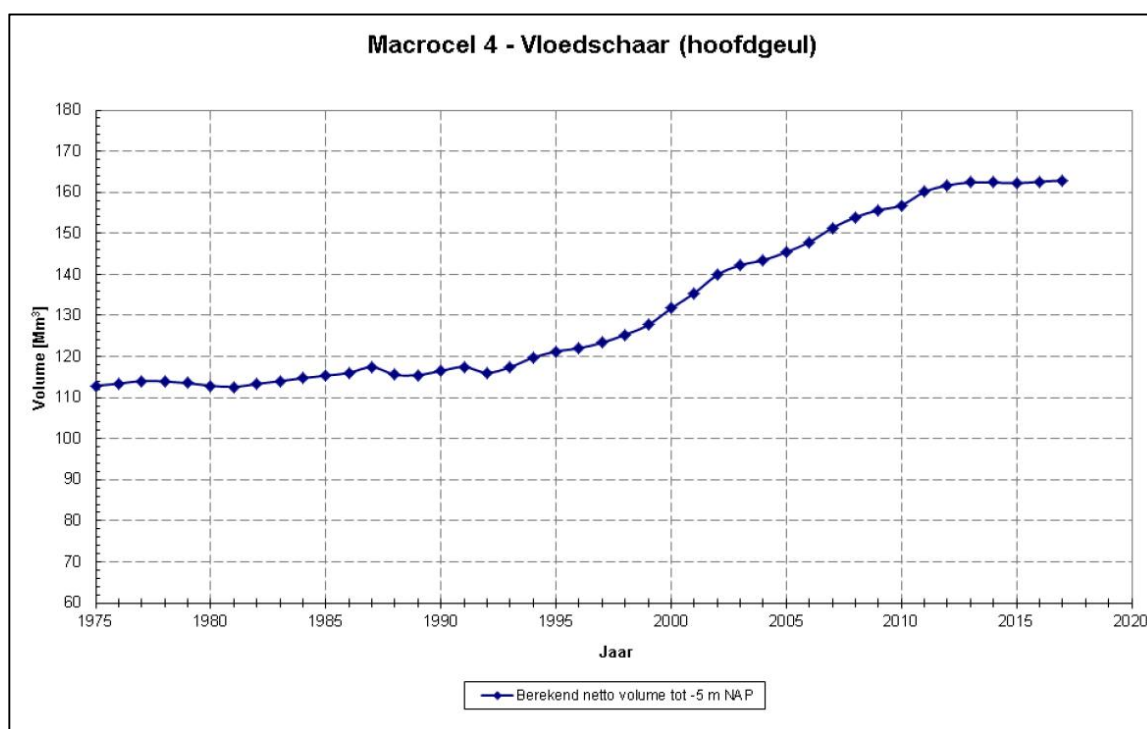
In (Cleveringa, 2013b) zijn de trends in de sedimentatie bepaald, die over de periode 1955-2008 1,7 miljoen m³ per jaar bedraagt. Hij vermoedt dat de tijdelijk lagere sedimentatiesnelheid van rond 1985 tot ongeveer 1997 het gevolg is van de geuldynamiek bij de drempel. Het verschuiven van de geulen over de vaste grenzen van de macrocel zorgde voor tijdelijke toename van het watervolume.

Dat de stortstrategie een rol speelt in periodes met snelle volumeafname lijkt duidelijk. De afgelopen jaren neemt het watervolume steeds minder af en lijkt nu min of meer stabiel. Het stortvak is, ondanks dat dit is vergund, niet meer gebruikt na 2008, om een sterkere afname van het watervolume te voorkomen. Dat lijkt succesvol, maar de minder snelle afname kan ook door autonome ontwikkelingen in het drempelgebied komen, net als in de jaren negentig. Een gedetailleerde sedimentbalans kan hier inzicht in geven.



Figuur 6-3 Netto watervolume nevengeul Middelgat in Macrocel 4 (bron: Schrijver, 2018).

De ontwikkeling van het watervolume in de hoofdgeul Gat van Ossensisse - Overloop van Hansweert staat in Figuur 6-4. Voor 2010 ontwikkelden de watervolumes van de hoofd- en de nevengeul tegengesteld. Het watervolume van de gehele macrocel was hierdoor min of meer neutraal. De ontwikkelingen na 2010 voor de hoofdgeul laten, net als voor de nevengeul, een stabilisatie zien. De reden voor de stabilisatie is niet bekend, dit kan zowel een autonome verandering zijn, als een gevolg van de toename van het storten in de hoofdgeul na 2010.

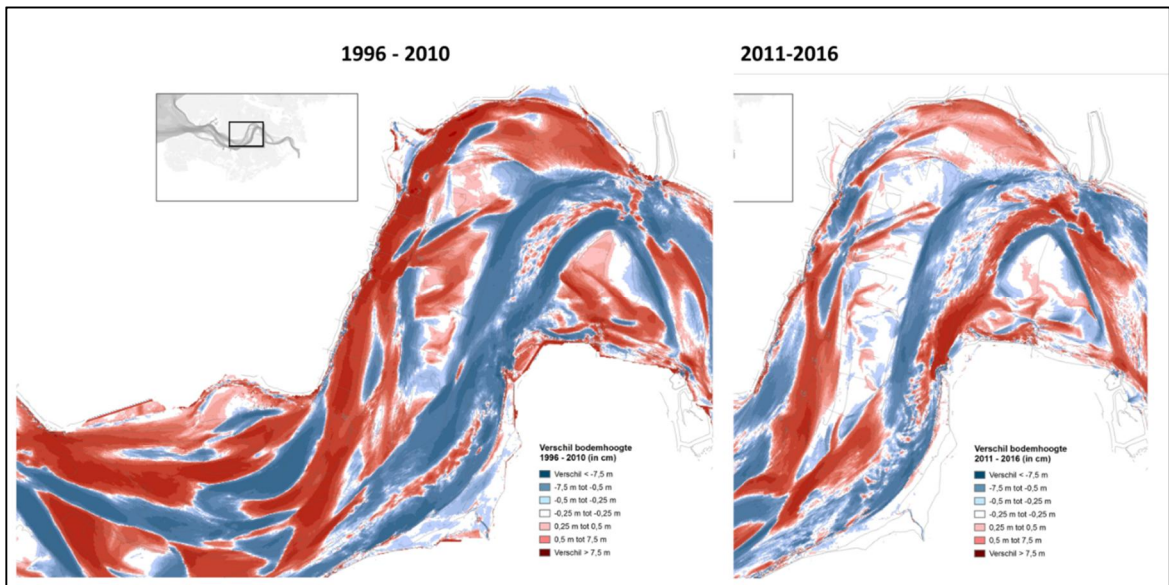


Figuur 6-4 Netto watervolume hoofdgeul Gat van Ossensisse - Overloop van Hansweert in Macrocel 4 (bron: Schrijver, 2018).

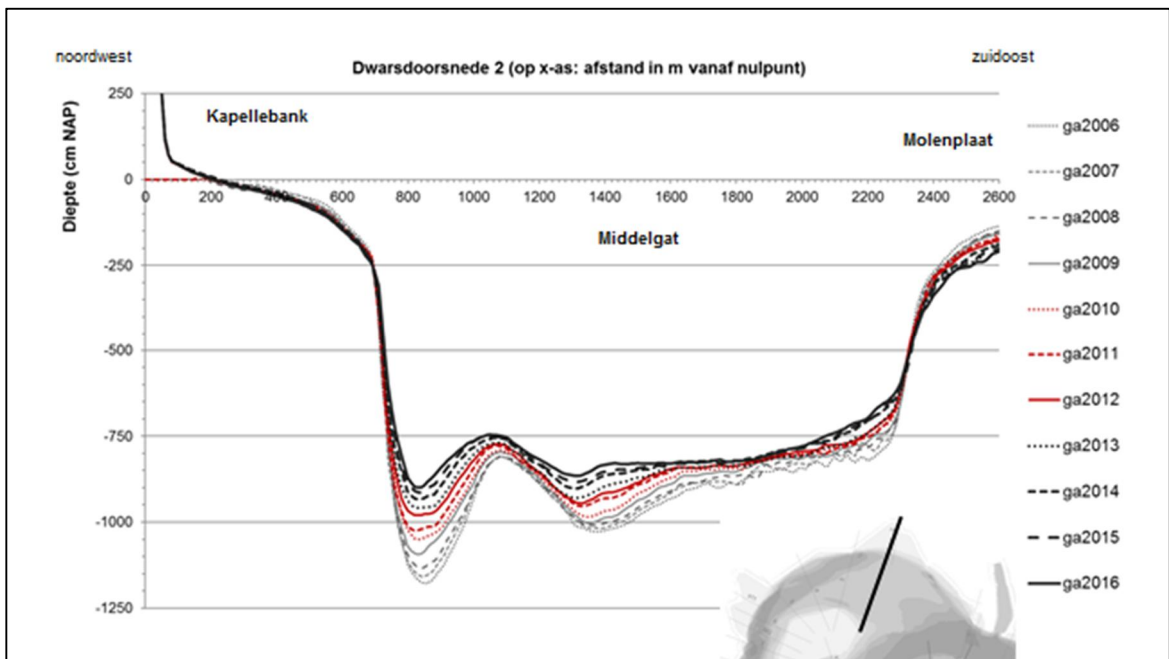
De verandering in de trend in het watervolume van het Middelgat lijkt ook tot uitdrukking te komen in verschillen in de morfologische ontwikkeling. Hiervoor zijn de verschilkaart van twee perioden voor en na 2010 weergegeven in Figuur 6-5. In de verschilkaart 1996-2010 is over vrijwel de gehele bodem van het Middelgat een verondieping zichtbaar. Deze waarneming past bij de grootschalige en snelle sedimentatie in de nevengeul in die periode (Figuur 6-3).

In de recente verschilkaart 2011-2016, Figuur 6-5 rechts, is de trendmatige verondieping aan de noordzijde (tegen de Kapellebank) doorgegaan, over de gehele breedte, maar wel met een stabiele (vastgelegde) oever en geen toename van intergetijdengebied (zie dwarsprofiel Figuur 6-6). Het Middelgat is hier nog overal dieper dan -7,5 m, zoals duidelijk zichtbaar is in de dwarsdoorsnede in Figuur 6-6. De meeste sedimentatie in de noordwesthoek vindt plaats in de diepere delen (de bodem is ter plekke 3 meter omhooggekomen, nu -17,5 m). Het stroomafwaarts gelegen deel (tot en met de Biezelingsche Ham), maar ook het zuidelijk deel van het Middelgat hebben nu geuldelen waar de erosie overheerst. Dit is goed zichtbaar in de dwarsdoorsnede in Figuur 6-7, behalve in de stabiele verdedigde geulwand (links). Ook is te zien dat de sedimentatie aan de zuidwestzijde van de Rug van Baarland is doorgegaan. Het Middelgat is duidelijk geen gebied (meer) met alleen sedimentatie: er zijn gebieden met overheersende sedimentatie en ook met overheersende erosie.

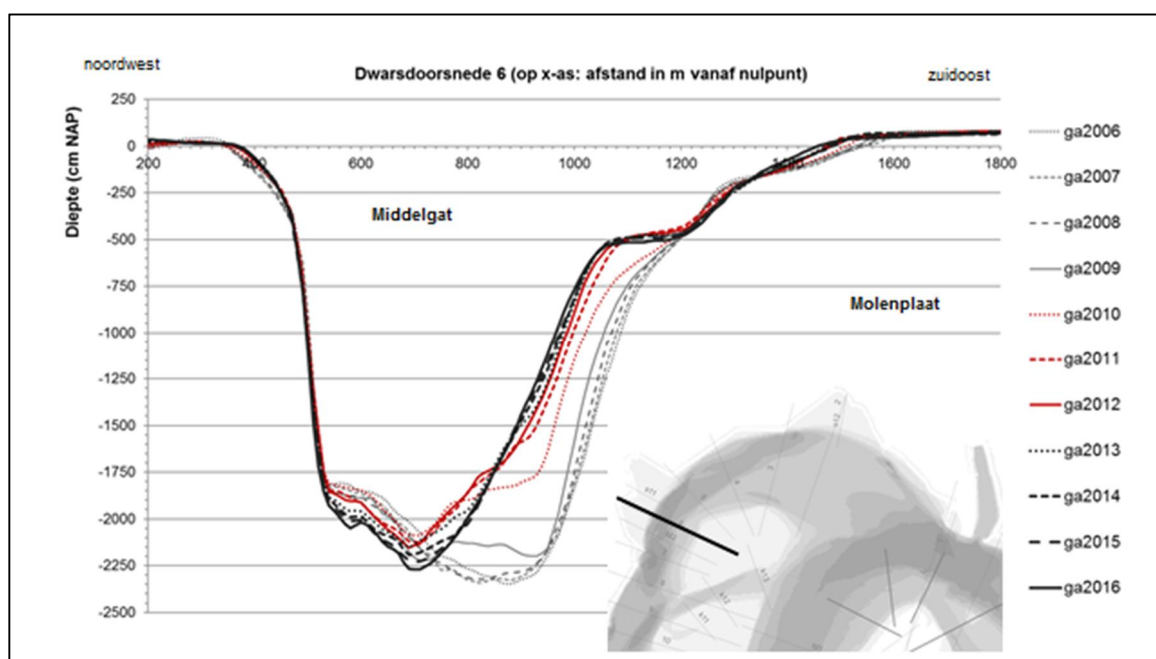
Figuur 6-5 toont ook dat de kortsluitgeul een rotatie vertoont (zie verder 6.4 en Figuur 6-11) en in omvang toeneemt. Waarschijnlijk is dit omdat een deel van het debiet van het noordelijk deel van het Middelgat wordt overgenomen.



Figuur 6-5 Opvallende verandering in erosie-sedimentatiepatroon in het Middelgat in de laatste 5 jaar in vergelijking met de 15 jaar ervoor



Figuur 6-6 Evolutie Middelgat nabij Kapellebank, met trendmatige sedimentatie



Figuur 6-7 Evolutie Middelgat nabij Biezelingsche Ham. Een duidelijke trend van sedimentatie is aanwezig van 2006 – 2011. Toen ontstond in ca vijf jaar een plateau aan de oostzijde. De laatste vijf jaar overheerst eerder erosie van het diepere deel.

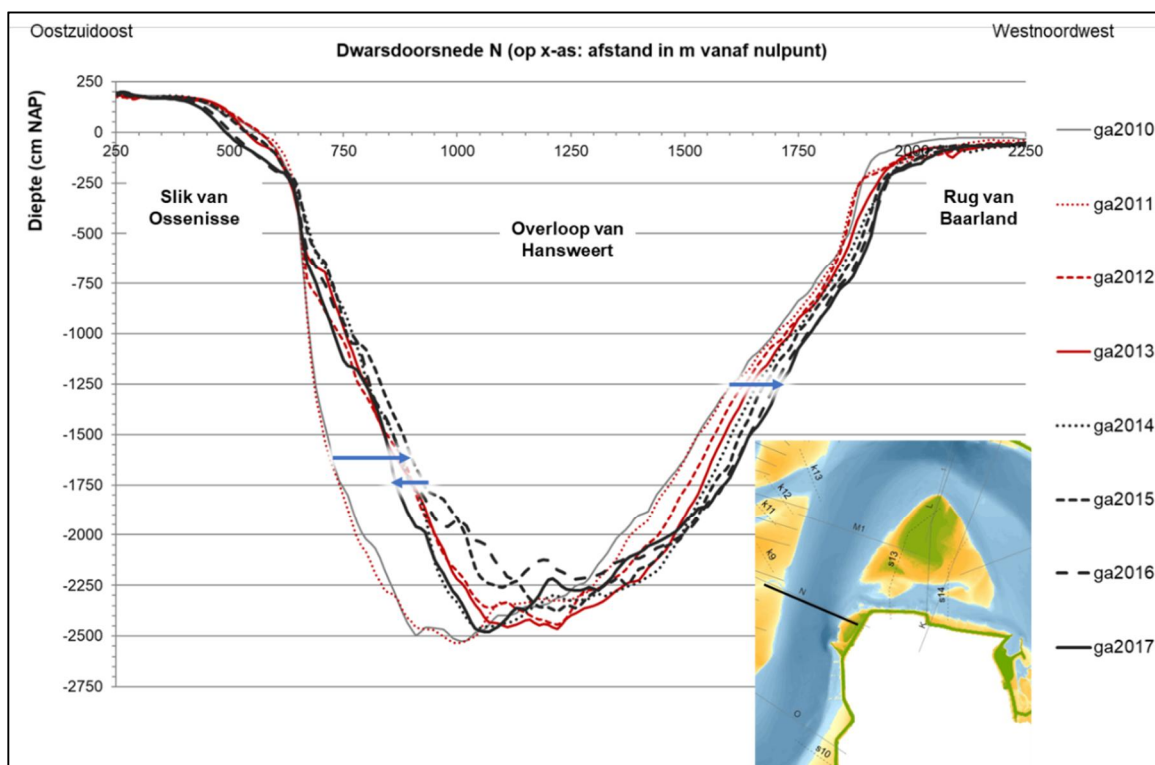
Figuur 6-5 toont ook het patroon van sedimentatie en erosie in de hoofdgeul. In de periode 1996-2010 vond erosie plaats aan beide zijden van de hoofdgeul. Tegenwoordig is er sprake van erosie aan de ene en sedimentatie aan de andere zijde. De sedimentatiezijde wisselt ter hoogte van de Platen van Hulst. Ten noorden hiervan valt het sedimentatiegebied samen met de stortzone SH41 in de hoofdgeul. Uit de dwarsdoorsnede in Figuur 6-8 blijkt dat de ontwikkelingen complexer zijn dan de verschilkaart aangeeft. De westelijke geulwand naar de Rug van Baarland laat een stelselmatige verplaatsing zien naar het westen. De oostelijke geulwand is van 2010-2016 sterk uitgebouwd en verondiept. In 2017 heeft wederom erosie plaatsgevonden. De sterke uitbouw is ongetwijfeld het gevolg van het aanbrengen van baggerspecie. De herverdeling van de baggerspecie en latere stortingen hebben daarna geresulteerd in veranderingen. Figuur 6-9 toont dwarsdoorsnede O, zuidelijk van dwarsdoorsnede N in Figuur 6-8, met in de hoofdgeul erosie aan de zuid-oostoever, behalve in de geulwand en sedimentatie aan de noordwestoever.

6.3.2 Gevolgen voor gebruiksfuncties

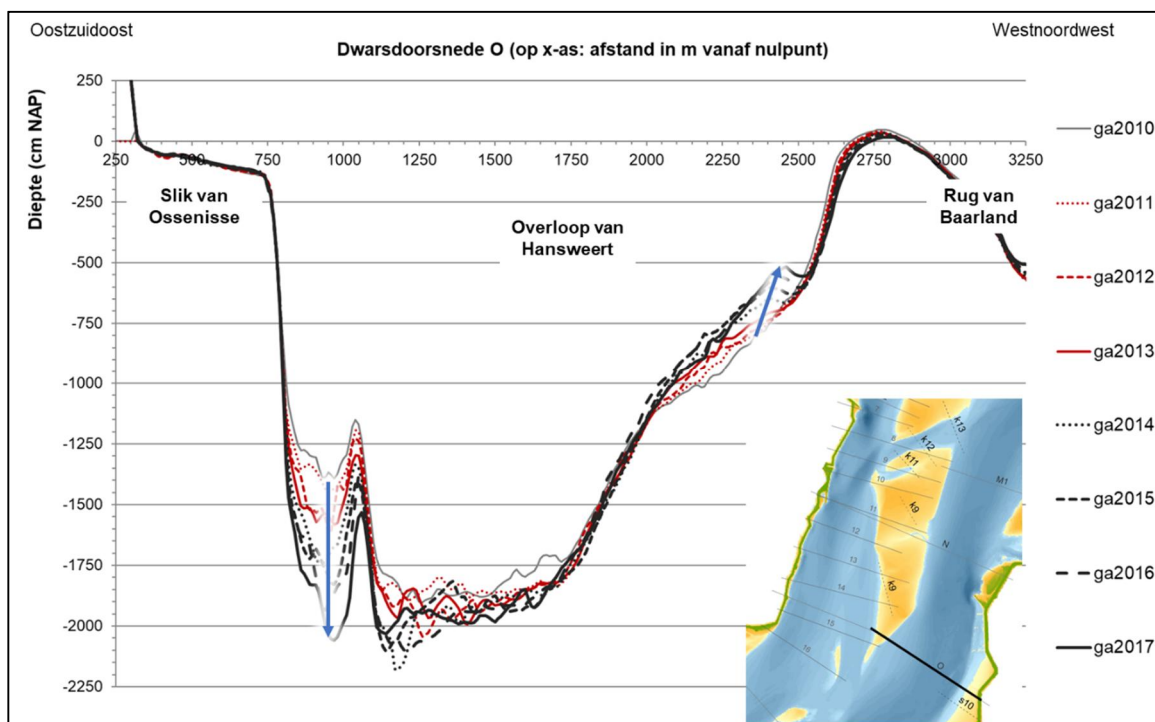
Ondanks de sedimenterende trend van het Middelgat in de laatste decennia is er langs de oevers weinig ruimte ontstaan voor andere functies. De steile vooroevers langs de hele geul bij Hoedekenskerke zijn stabiel door een zeewering en geulwandverdediging (Figuur 6-6 en Figuur 6-7), maar er is geen ontwikkeling van intergetijdengebied in de vooroever mogelijk. Door de vastgelegde vooroevers kunnen de slikken niet uitbreiden, maar blijven daardoor ook behouden. Alleen ophoging of verlaging is mogelijk.

Alleen ten westen van de opening van de kortsluitgeul is er trendmatige sedimentatie te zien van een ontgrondingskuil (geul) die daar ligt. Hier heeft het Middelgat ooit een diepste punt van ruim 40 m bereikt bij de nol (voormalige inlaagdijk) de Kleine Ham, grenzend aan de Biezelingse Ham, een slikkengebied dat is overgebleven na afdamming van de Zwake (Wilderom, 1968).

21 maart 2019, definitief



Figuur 6-8 Dwarsdoorsnede N door de Overloop van Hansweert (locatie in inzet).

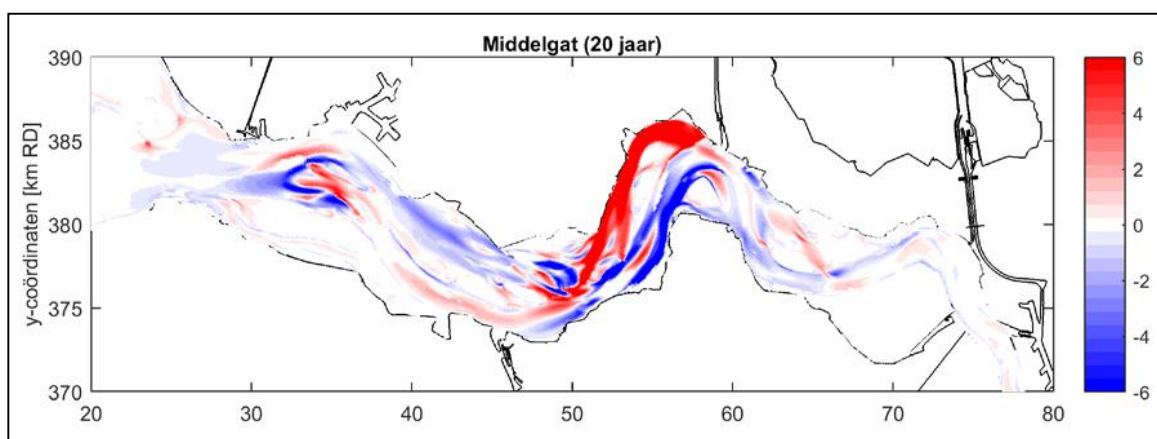


Figuur 6-9 Dwarsdoorsnede O door de Overloop van Hansweert (locatie in inzet).

Langs het Gat van Ossenisse en de Overloop van Hansweert zijn ook vele oeverwerken uitgevoerd. De Nol van Ossenisse bij Knuitershoek is het restant van de in 1811 doorgebroken zeedijk. Bij dijkwerkzaamheden zijn hier in 1967 afschuivingen opgetreden (Wilderom, 1973). Mogelijk zien we in de richel op de bodem in Figuur 6-9 hiervan de restanten. De geul heeft hier vrijwel de harde kleilagen bereikt.

6.3.3 Modeluitkomsten extreem stortscenario in SN41 Middelgat

Er zijn modelsimulaties uitgevoerd waarbij alle vrijkomende baggerspecie uit de hele Westerschelde in de nevengeul Middelgat is gestort (stortlocatie SN41), (Schrijvershof en Vroom, 2016). Dit is ook gedaan voor twee andere nevengeulen (Everingen, SN31 en Schaar van Waarde, SN51), zie paragrafen 5.7.2. en 7.6.4. Hiermee is het meest extreme, in theorie uitvoerbare, baggerbeheer bekeken. De conclusie is dat, wanneer met de huidige uit onderhoud beschikbare hoeveelheden sediment wordt getracht de getijslag te beïnvloeden via verondieping van een nevengeul, Macrocel 3 (Everingen) hiervoor waarschijnlijk de beste optie is. Resultaten voor het Middelgat zijn getoond in Figuur 6-10, in de vorm van een erosie-sedimentatiekaart na een periode van 20 jaar. Daarnaast was er nog de 'autonome' trend tot sedimentatie.



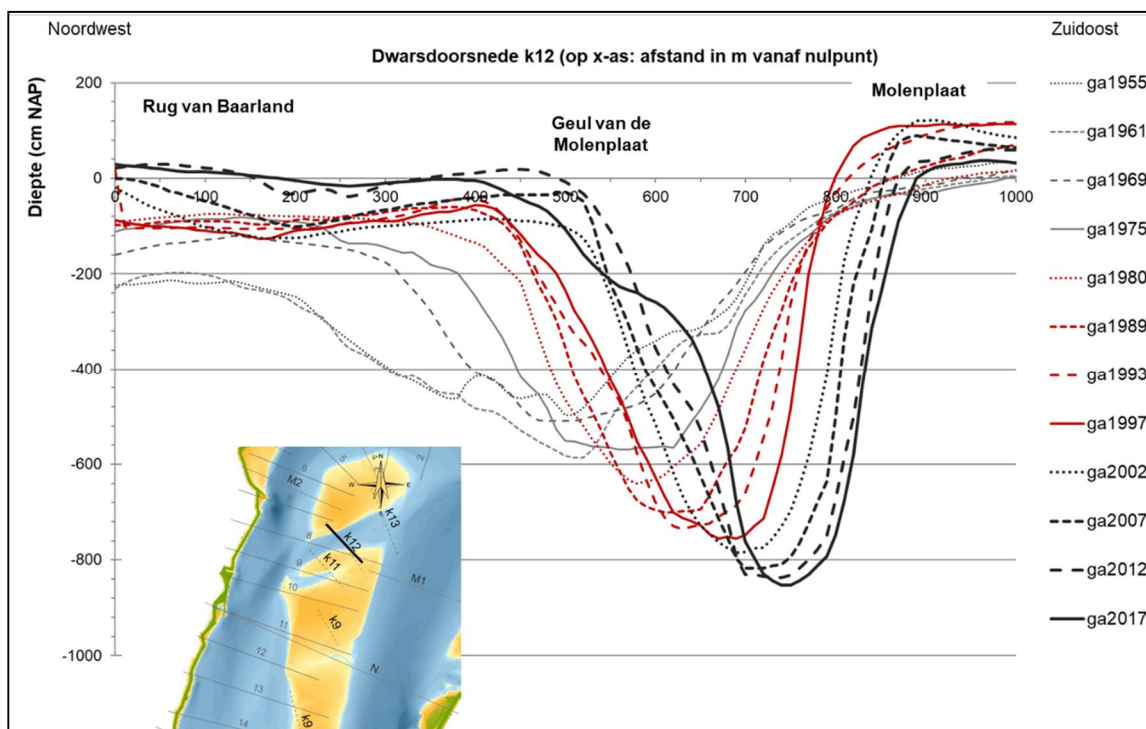
Figuur 6-10 Modelresultaat van een rekenmodeloefening waarbij Middelgat SN41, consequent is volgestort met alle vrijkomende baggerspecie (Schrijvershof en Vroom, 2016)

Door alles in het Middelgat te storten verruimt het Gat van Ossenisse. Ook is er uitstraling naar de aangrenzende macrocellen. Er is enige extra sedimentatie in de nevengeul van Macrocel 5 (Schaar van Waarde) en in Macrocel 3 is de reactie juist extra sedimentatie in de hoofdgeul. Er lijkt dus effect op de verhouding tussen hoofd- en nevengeulen in de aangrenzende cellen. Het effect op de getijslag is beperkt (enkele centimeters bij Antwerpen, zie Figuur 5-20). Het verdwijnen van het Middelgat maakt ook de voortplantingssnelheid van het laagwater kleiner.

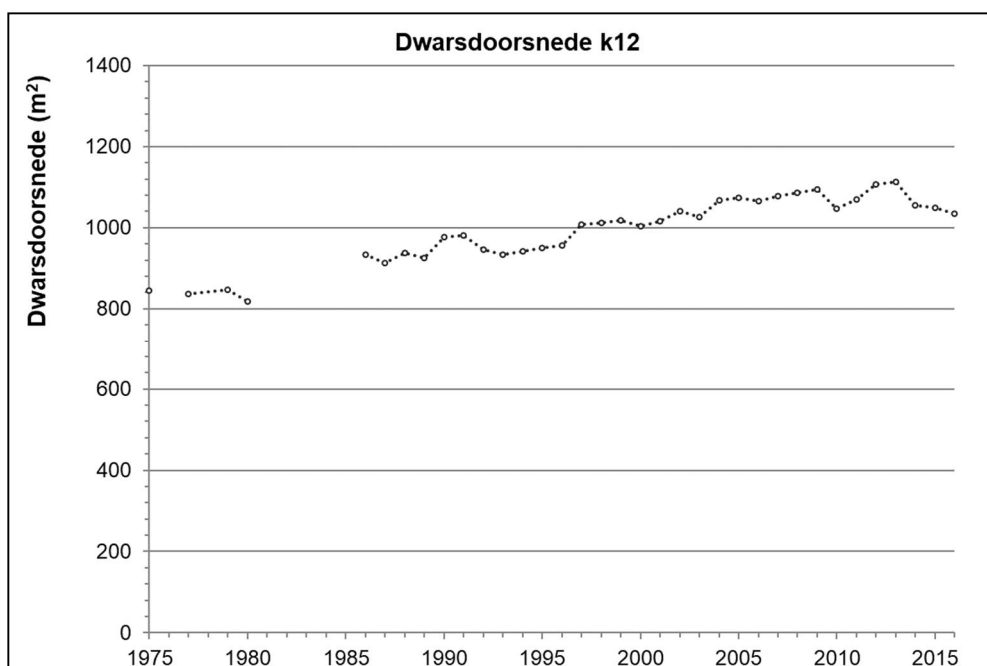
6.4 Kortsluitgeul door de Molenplaat

In Macrocel 4 is nog één kortsluitgeul aanwezig: de Geul van de Molenplaat, die de Rug van Baarland scheidt van de Molenplaat. Figuur 6-11 toont een dwarsdoorsnede door het midden van de kortsluitgeul. Duidelijk is dat de kortsluitgeul op deze locatie gaandeweg is verdiept en dat het zwaartepunt van de geul is verschoven naar het zuidoosten. De snelheid waarmee de zuidoostelijke geulwand is opgeschoven is kleiner dan de snelheid waarmee de noordwestelijke geulwand is opgeschoven, zodat de geul gaandeweg smaller is geworden. Deze ontwikkelingen (verdiepen, verplaatsen, versmallen) vinden ook tegenwoordig nog plaats. Daarbij is ook sprake van een beperkte draaiing van de geul, die niet in de dwarsdoor-

snede kan worden afgelezen, maar wel zichtbaar is in de patronen van erosie en sedimentatie in de verschilkaarten (Figuur 6-5). De ontwikkelingen hebben geleid tot een beperkte toename van het doorstroomoppervlakte van de geul, zoals zichtbaar is in de grafiek in Figuur 6-12. De laatste drie jaar is sprake van een beperkte afname.



Figuur 6-11 Evolutie kortsluitgeul door de Molenplaat. De omvang is niet sterk veranderd. Opvallend is het ontstaan van een zekere bochtigheid (zie ook Figuur 6-5)

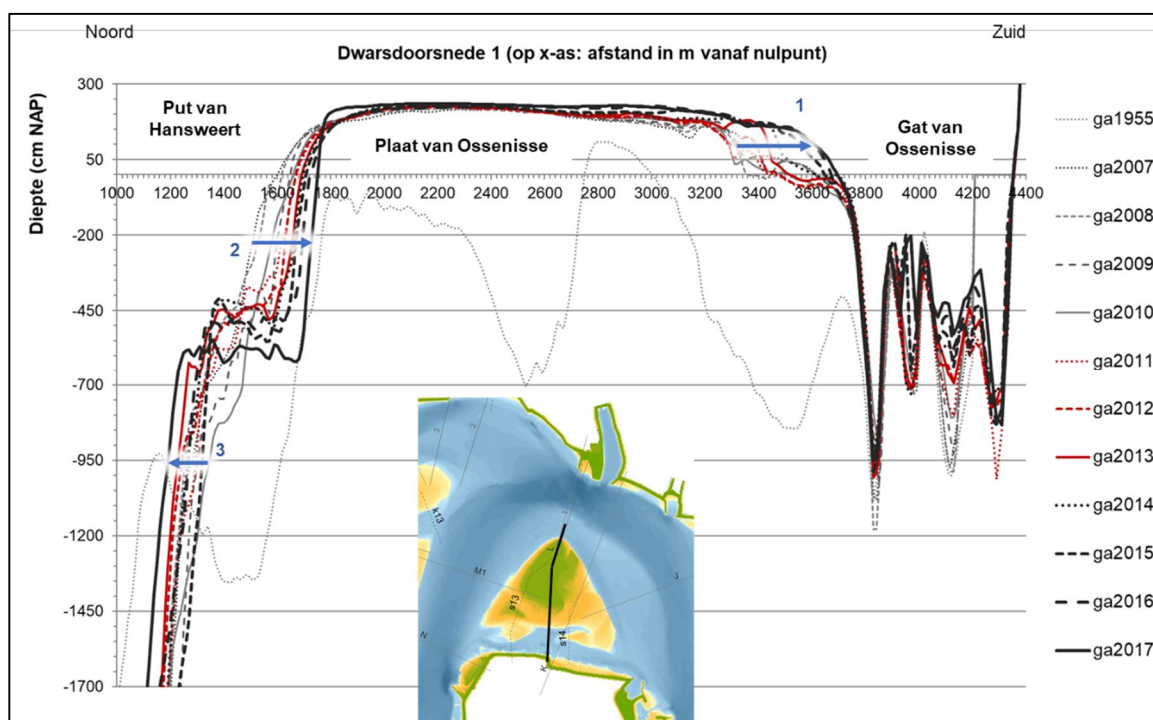


Figuur 6-12 Grafiek van de doorstroomoppervlakte van de Geul van de Molenplaat (locatie in Figuur 6-11).

Verrassend aan de ontwikkeling van de Geul van de Molenplaat is dat deze een oorsprong heeft in de situatie waarbij de rol van de tegenwoordige hoofd- en nevengeul nog omgekeerd waren. Blijkbaar lag deze kortsluitgeul op een locatie die ook geschikt was als kortsluitgeul 'de andere kant op'.

6.5 De Platen van Ossenisse

De Plaat van Ossenisse is gevormd door het samengaan van verschillende kleinere platen in de periode 1955-1996. De geometrie is daarbij, tenminste aan het oppervlak, ingrijpend gewijzigd, zoals zichtbaar is in de kaarten in Figuur 6-14. Het areaal van de droogvallende platen is daarbij toegenomen tot halverwege de jaren '90, vooral door het (geheel) opvullen van de oorspronkelijke geultjes ('scharen') en afname van de omvang van de Schaar van Ossenisse. Ook heeft een kleine uitbreiding plaatsgevonden ten koste van de hoofdgeul aan de noordwestzijde van de Plaat van Ossenisse. Daarbij is de plaat gaandeweg steeds hoger geworden met een maximum rond dezelfde periode als het bereiken van het maximale oppervlakte (ca. halverwege de jaren '90).

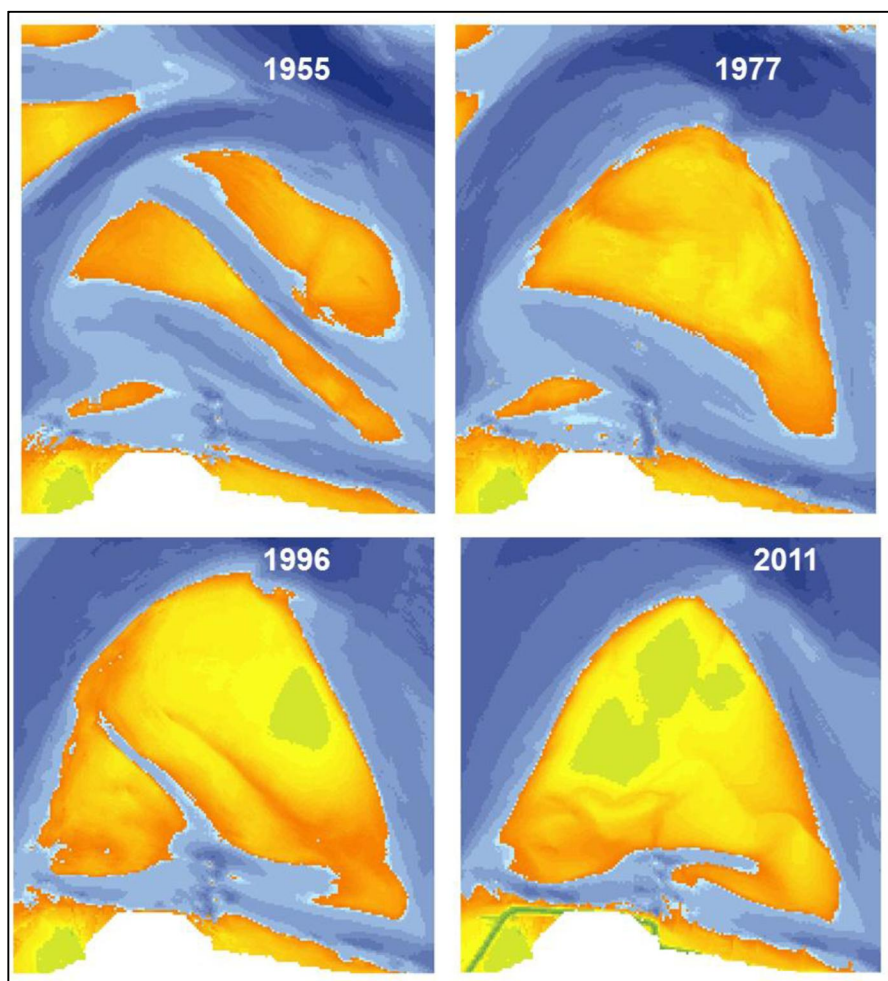


Figuur 6-13 Dwarsdoorsnede 1 door de Plaat van Ossenisse (locatie in inzet).

Het is niet duidelijk waarom op deze plaat nooit uitgebreide vestiging van schorvegetatie heeft plaatsgevonden. De hoogte van de plaat is niet minder dan de delen van de Plaat van Walsorden en de Hooge Platen waar dat rond 2004 wel is gebeurd. Blijkbaar is de hoogteligging alleen niet voldoende voor een succesvolle vestiging en uitbreiding van schorvegetatie. Er zijn wel sporen van vegetatie zichtbaar, maar dit blijft beperkt. Mogelijk is de stroming over de plaat bij vloed toch sterker dan bij de andere platen, zodat er onvoldoende slib wordt afgezet en kiemplantjes worden weggespoeld, zie ook paragraaf 6.9.

In de dwarsdoorsnede in Figuur 6-13 is zichtbaar dat de plaat de afgelopen jaar qua hoogte geen duidelijke ontwikkelingen laat zien. In de dwarsdoorsnede is de plaat overal vrijwel even hoog en daarmee "zo plat als een pannenkoek". Figuur 6-13 toont een kleine uitbreiding van

de plaat aan de zuidzijde (bij de 1 in Figuur 6-13). Aan de noordzijde is sprake van erosie door uitbreiding van de geul (bij de 2 in Figuur 6-13). Verrassend is dat deze erosie van de plaat door uitbreiding van de geul alleen in de bovenste meters van het geulprofiel plaatsvindt. Dieper dan 6 m bouwt de geulwand juist uit (bij de 3 in Figuur 6-13), zodat een soort onderwaterplateau is ontstaan.

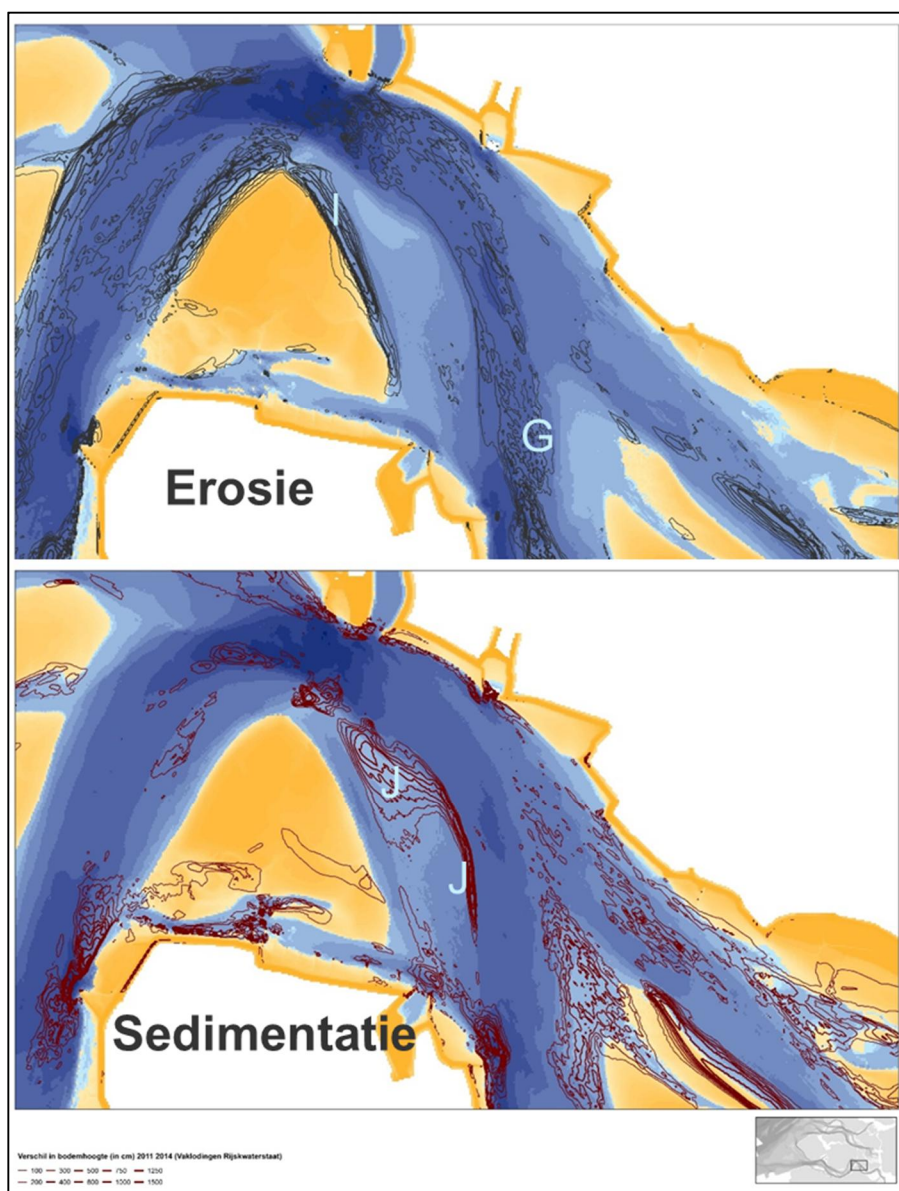


Figuur 6-14 Kaarten van de Platen van Ossenisse in vier jaren (Cleveringa, 2013b)

In Figuur 6-15 zijn de volgende ontwikkelingen te zien, zie ook de letters in de figuur welke aansluiten bij de nog te bespreken Figuur 7-7:

- G. Erosie aan de oostzijde van de drempel van Hansweert; een doorgaande ontwikkeling van het naar het oosten opschuiven van deze grens, die al lange tijd bezig is. Het baggeren vanwege de 3^e verdieping heeft mede bijgedragen aan de verdieping (erosie) op de drempel.
- I. Langs de gehele noordzijde van de Plaat van Ossenisse vindt erosie plaats, zodat de vorm van de gehele plaat wijzigt en het oppervlak van de plaat afneemt. Deze evolutie leek tijdelijk geremd door de stortingen in de Put van Hansweert (Huisman et al, 2018).
- J. Ten oosten van het erosiegebied van de Plaat van Ossenisse vindt sedimentatie plaats.

De erosie langs de noordzijde van de Plaat van Ossensisse (I) is niet simpelweg het resultaat van het opschuiven of uitbreiden van de hoofdgeul. De oost- en de noordoever van de plaat blijken een complexe morfologie te hebben, met aan de noordzijde de vorming van een plateau op ondiep water waar plaatvallen optreden en ten oosten de vorming van een geultje en een plateau tussen dit geultje en de hoofdgeul. Het geultje vormt een parallelle geul aan de hoofdgeul, een ontwikkeling die zich ook op andere plekken heeft voorgedaan. Deze ontwikkelingen zijn nog slecht begrepen.



Figuur 6-15 Nabij de drempel van Hansweert: bodemligging 2013 met de contouren van de erosie (boven) en de sedimentatie (onder) 2004-2014. G = Erosie aan de oostzijde van de drempel van Hansweert, I = Erosie en plaatvallen noordzijde van de Plaat van Ossensisse J = sedimentatie ten oosten van erosiegebied G

Bij de noord-west punt van de plaat, tegenover de verdedigde steile geulwand bij Hansweert ligt een al tientallen jaren zeer actief plaatvallengebied, zie Figuur 6-16. Vrijwel jaarlijks verdwijnt hier op zeker moment in een paar uren tijd een volume van enkele 100.000-en tot miljoenen m³ fijn zand van de plaatrand in de geul, die daarbij tijdelijk met enkele meters wordt

verondiept, zie ook paragraaf 6.8.2. De oorzaak is de natuurlijke ophoging en versteiling van de plaat, terwijl de geul niet kan uitbochten door de geulwandverdediging. Binnen enkele maanden is de oorspronkelijke situatie weer hersteld. Zie ook paragraaf 6.8.2.



Figuur 6-16 Plaatvallen in Macrocellen 4 en 5. Hotspots zijn Plaat van Ossenisse en Plaat van Walsoorden (Van Dijk et al, 2018 in Google Earth)

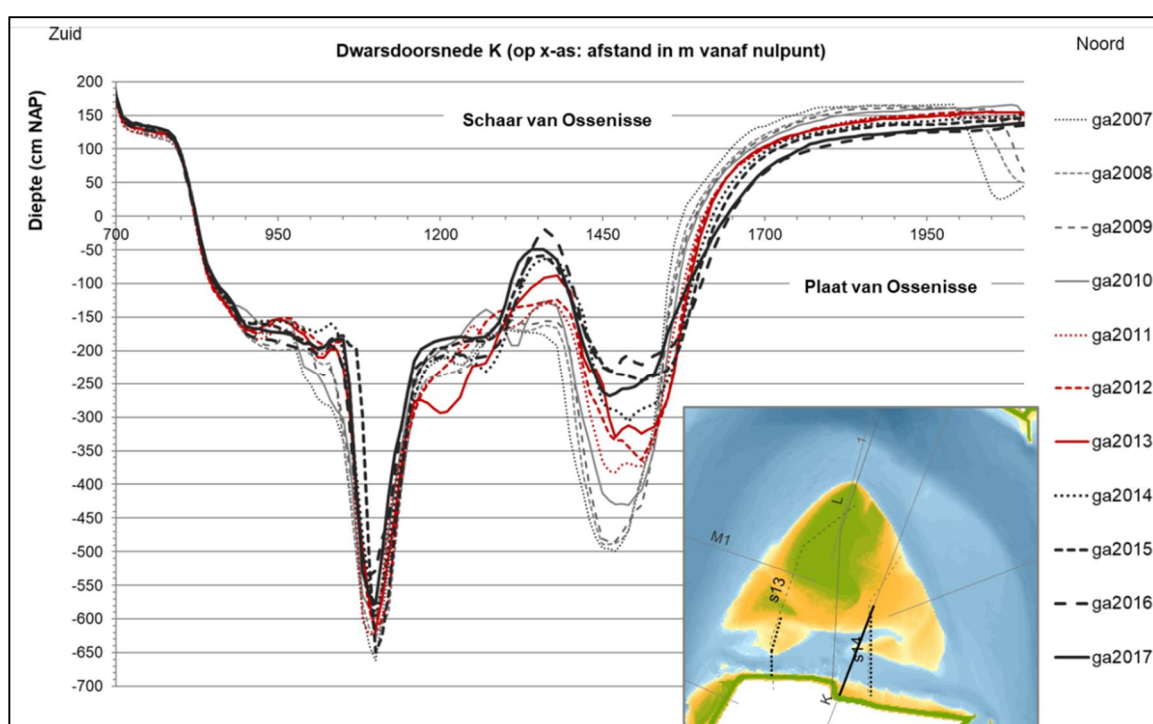
6.6 De Schaar van Ossenisse

De grote bocht in de Westerschelde bij Hansweert bestaat al eeuwenlang en is veroorzaakt door de aanwezigheid van moeilijk erodeerbare kleilagen bij Ossenisse en Knuitershoek (zie geologisch dwarsprofiel in Bijlage B). Kloosterzande werd al in 1170 vermeld. In de noordelijke geulwand van de Put van Hansweert ligt een zware oeververdediging. Ook langs de zuidelijke geulwand van de Schaar van Ossenisse ligt een vooroeververdediging (de steile onveranderlijke zuidrand in Figuur 6-13 en Figuur 6-17). Hier gingen polders verloren tussen 1570 en 1670, nu ongeveer op -2 m, met dijkrestanten ten noorden van Perkpolder. Nu is er sprake van verondieping van de geul en is het gevaar voor de oevers verminderd. De rol van de strekdammen op de huidige geulomvang is niet uitvoerig onderzocht. Er zijn plannen geweest om de dammen te verhogen of de grootste ervan weg te halen (in te korten) en zo tot natuurherstel te komen (Dam, 2009, Nolte et al, 2012).

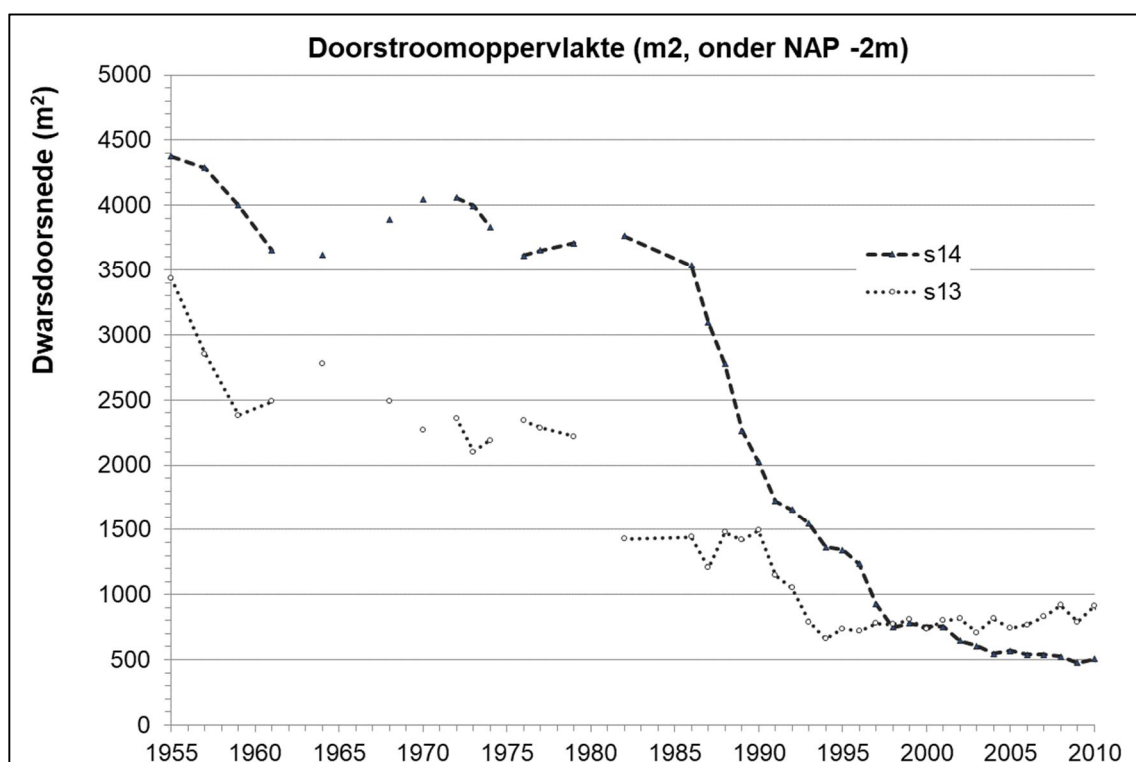
De Schaar van Ossenisse is wat resteert van de oorspronkelijk veel grotere geul, die de Overloop van Hansweert en het Zuidergat verbond toen de Overloop van Hansweert nog

fungeerde als de nevengeul van Macrocel 4 (zie paragraaf 5.5). In die configuratie was de Schaar van Ossensisse een 'echte' kortsluitgeul en maakte een verbinding tussen een hoofd- en een nevengeul, zij het in twee verschillende macrocellen. In de huidige situatie verbindt de Schaar van Ossensisse een hoofdgeul met een andere hoofdgeul. De opgetreden afname van de omvang van de geul is dus gerelateerd aan de grootschalige veranderingen in Macrocel 4, waarbij de hoofd- en de nevengeul van positie zijn gewisseld en de aandrijvende kracht van de kortsluitgeul (het verhang) was verminderd. Sindsdien, ongeveer vanaf 1985, vertoonde de Schaar van Ossensisse een zeer duidelijke en snelle trend van sedimentatie, zoals zichtbaar in Figuur 6-17 en in de grafiek met het doorstroomoppervlakte, Figuur 6-18, vooral in doorsnede s13. Een deel van de vloedstroom eindigt in kleinere schaaftjes op de plaat, zie ook Figuur 6-14, daarom is de sedimentatie in s14 of K mogelijk minder geprononceerd.

Vanaf ongeveer 2005 lijkt de situatie gestabiliseerd en is de sedimentatie tot stilstand gekomen of treedt er weer erosie op (Figuur 6-18). Ook in de getoonde dwarsdoorsnede in Figuur 6-17 is wel variatie, maar geen duidelijke afname meer zichtbaar. Uitzondering is het verdwijnen van het kleine schaaftje in dwarsdoorsnede s14. Een aannemelijke hypothese voor het mechanisme achter de stabilisatie is dat er na de eerdere snelle aanpassing nu een evenwicht tussen doorstroomoppervlakte en verhang is bereikt.



Figuur 6-17 Dwarsdoorsnede K door de Schaar van Ossensisse (locatie in inzet).



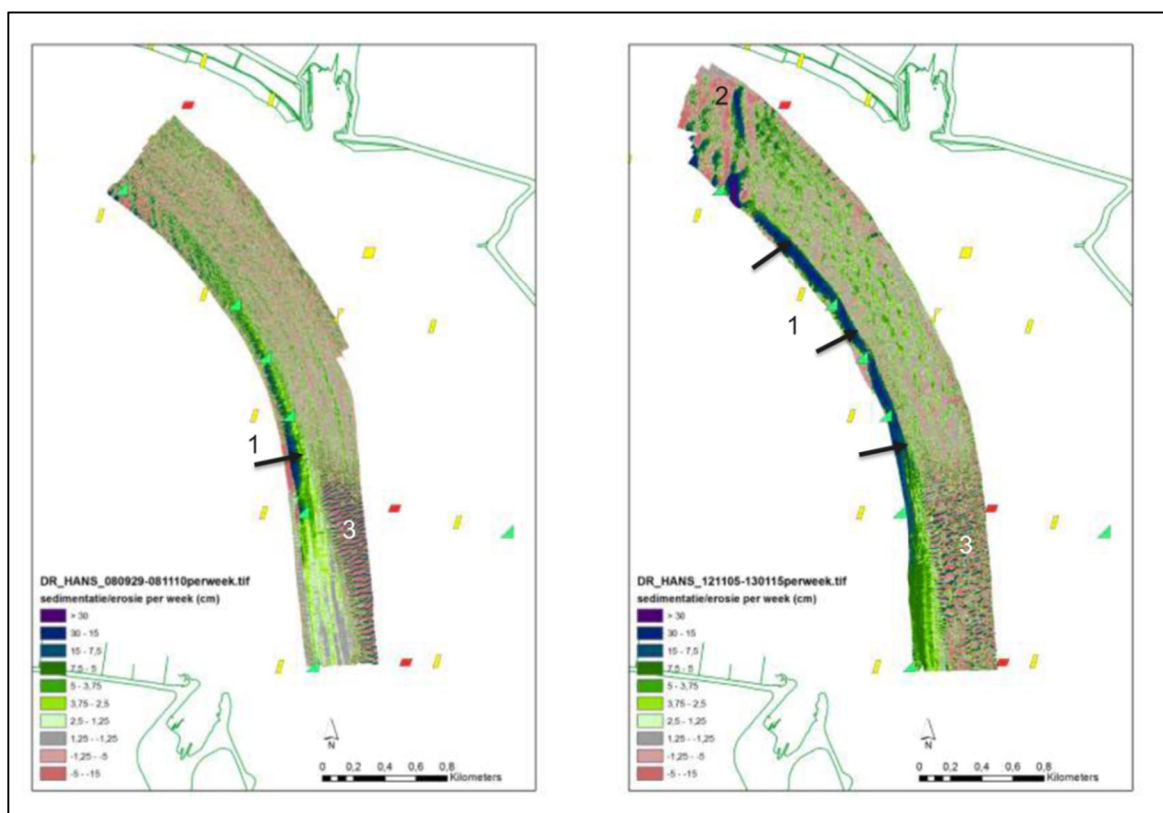
Figuur 6-18 Doorstroomoppervlakte (onder NAP -2m) in de dwarsdoorsnedes s13 en s14 door de Schaar van Ossenisse (locaties in Figuur 6-17).

6.7 Baggeren op de drempel van Hansweert

Binnen de Agenda voor de Toekomst is door het Waterbouwkundig Laboratorium onderzoek gedaan naar de sedimentatiepatronen van de Drempel van Hansweert (en de Drempel van Frederik in de Zeeschelde, maar deze valt buiten de scope van dit mesoschaalrapport), zie Stark et al (2017), Plancke et al (2016, 2017a). Uit deze data-analyse blijkt dat het baggerwerk op de drempel voor een groot deel wordt veroorzaakt door sedimentatie langs de geulwand. Dit blijkt uit Figuur 6-19, die gedetailleerd de verschillen weergeeft tussen twee lodingen van de vaarweg. In deze figuur zijn gemarkeerd:

1. De sedimentatie aan de westelijke geulwand die optreedt door het 'binnenschuiven' van de geulwand aan de westzijde van de geul;
2. Variaties in de bodemhoogte die optreden rond de meer westelijk gelegen Put van Hansweert;
3. Opbouw en migratie van een megaribbelveld.

De aanvoerroute(s) voor het zand dat aan de westzijde van de geulwand wordt afgezet, zijn nog niet goed bekend. Verschillende brongebieden zijn in beeld voor de uitbouw van deze geulwand, waaronder de diepe Put van Hansweert. Voor de opbouw van het ribbelveld hoeft geen aanvoer van zand plaats te vinden, door de lokale herverdeling van zand kunnen de ribbels opbouwen zodanig dat de kammen van de ribbels nopen tot een herhaling van het baggeren. Voor de opbouw van de bodemvormen nabij de Put van Hansweert (paragraaf 6.8.2) geldt hetzelfde. Het is niet uitgesloten dat van daar zand wordt aangevoerd dat mede bijdraagt aan de verondieping en daarmee de baggerinspanning verhoogt.



Figuur 6-19 Detail multibeamlodingen drempel van Hansweert, met links 29 september 2008-10 november 2008 en rechts 5 november 2012-11 januari 2013, waarbij de hoogteverschillen zijn omgerekend naar veranderingen in cm per week.

6.8 Verspreiden in de diepe delen van / bij Macrocel 4

De verspreidingsvakken in de diepe delen van de hoofdgeul zijn SH51 in Macrocel 5, ter plaatse van de diepe delen van het Zuidergat (zie paragraaf 7.6.2), de proefstortzone Put van Hansweert (paragraaf 6.8.2 en 6.8.3) en SH41 in Macrocel 4. Iets stroomafwaarts liggen de proefstortlocaties Geulwand-verdediging Ossensisse (GVO) en Inloop van Ossensisse (IvO), zie paragraaf 5.7.3. Zie voor locaties stortgebieden Figuur 1-7 en volumes Figuur 2-8.

6.8.1 Verspreiden op SH41 en transporten naar aangrenzende macrocellen

De locatie SH41 ligt in de diepe delen van de hoofdgeul van Macrocel 4 (Gat van Ossensisse / Overloop van Hansweert). De mobiliteit van het gestorte zand in SH41 is groot, over de analyseperiode bleef slechts ongeveer een vijfde liggen (stabiliteit = 20%), zie Plancke et al (2017a). Initieel lag de stabiliteit hoger, tot er een soort evenwichtsdiepte van het gat werd bereikt, waarbij de netto erosiesnelheid en stortintensiteit gelijk waren. Het lijkt erop dat uiteindelijk al het gestorte materiaal wordt gemobiliseerd, hoogstens zal op lange termijn er ordegrrootte 1 miljoen m³ blijven liggen. Dat betekent dat er zo op lange termijn ook geen substantiële vermindering van doorstroomoppervlakte van de hoofdgeul ter plekke bereikt kan worden en dus ook weinig effect op de getijslag mag worden verwacht.

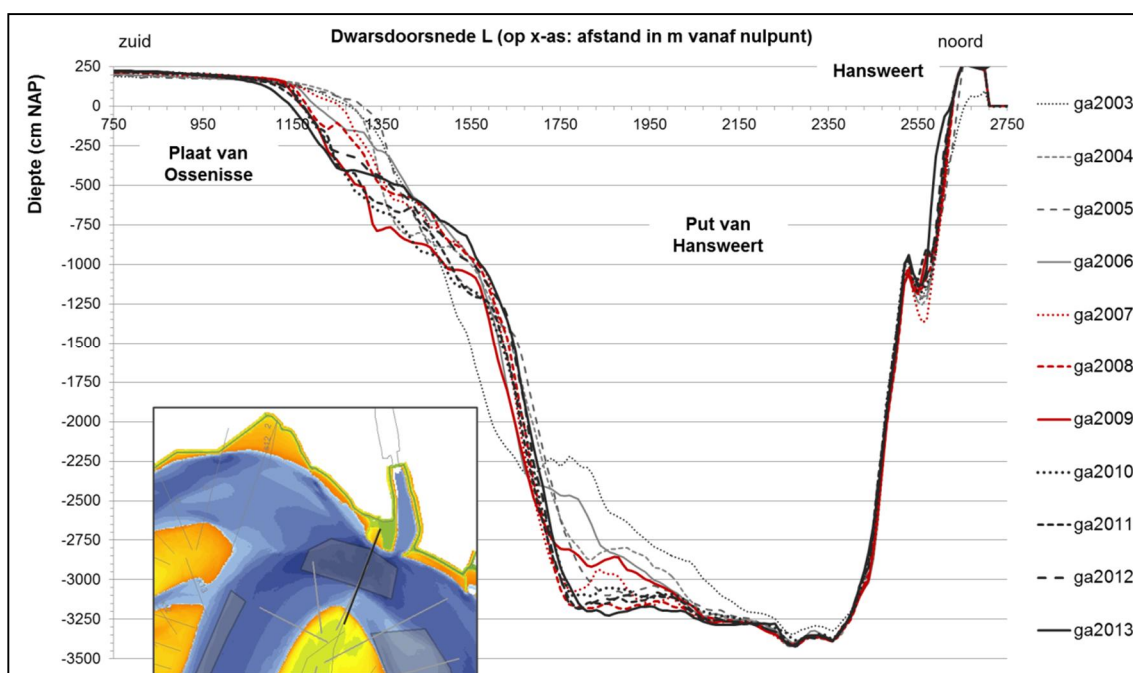
Observaties van de bodemligging en de morfologische veranderingen rond SH41 geven de indruk dat tenminste een deel van het sediment naar het westen wordt getransporteerd. Als de gestorte specie afkomstig was van de stroomopwaarts gelegen drempel van Hansweert leidt

dit overduidelijk tot een (in de kern menselijk aangedreven) geleidelijk transport van zand in stroomafwaartse richting. Balansberekeningen laten ook een omvangrijk zandtransport zien terug van Macrocel 4 naar Macrocel 5 (Cleveringa en Dam, 2013). Welk transportpad hierbij dominant is, is niet meteen duidelijk. Wel is zeker dat sediment dat naar het oosten wordt getransporteerd beter past bij de wens om het sedimentvolume van de macrocellen op peil te houden.

6.8.2 Proefstortingen in Put van Hansweert, metingen

Diepe putten in de hoofdgeul kwamen in beeld als zinvolle verspreidingslocaties tijdens het LTV V&T-onderzoek (o.m. Plancke et al, 2017a). Uit modelsimulaties (Menninga en Dam, 2013) bleek een voldoende groot potentieel effect op de getijslag om in de Put van Hansweert een praktijkproef uit te voeren. De modellen voorspelden dat de morfologische ontwikkelingen volgend op stortingen in de Put van Hansweert lokaal en snel plaats gingen vinden, zonder gevolgen voor de morfologie op de grotere schaal. Er zijn inmiddels twee proefstortingen uitgevoerd, van elk bijna 1 miljoen m³. Die hebben de modelvoorspellingen op hoofdlijnen bevestigd.

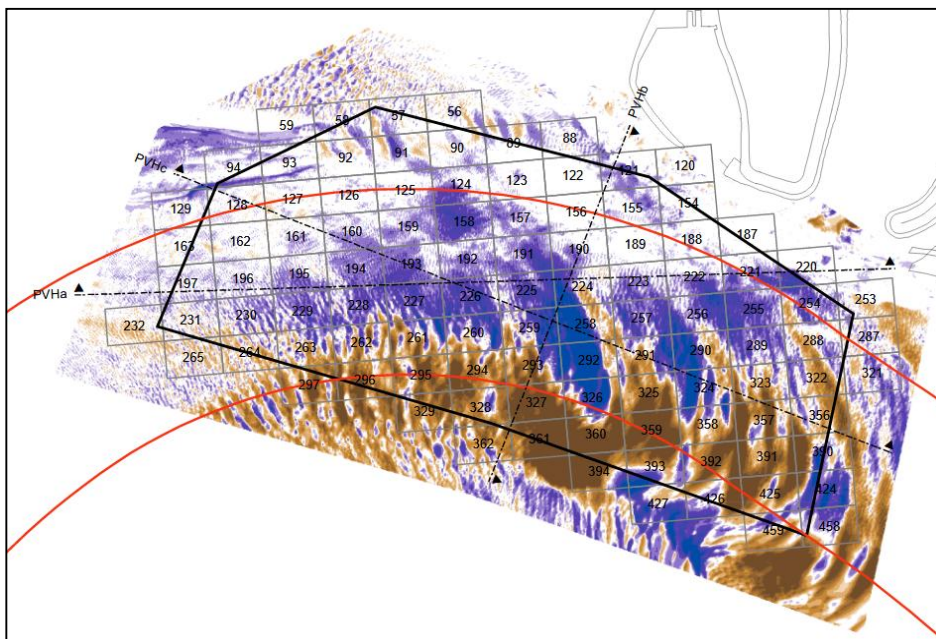
Figuur 6-20 geeft de ontwikkeling van de Put van Hansweert over een tiental jaren. Aan de noordzijde is de verdedigde steile geulwand bij Hansweert zichtbaar. Daartegenover ligt de zeer dynamische noordwestelijke plaatrand van de Plaat van Ossenis. Te zien is dat er sprake is van plaatval met daarna weer opbouw. Opmerkelijk is ook het plateau in de onderwateroever van de plaat, zie ook Figuur 6-13.



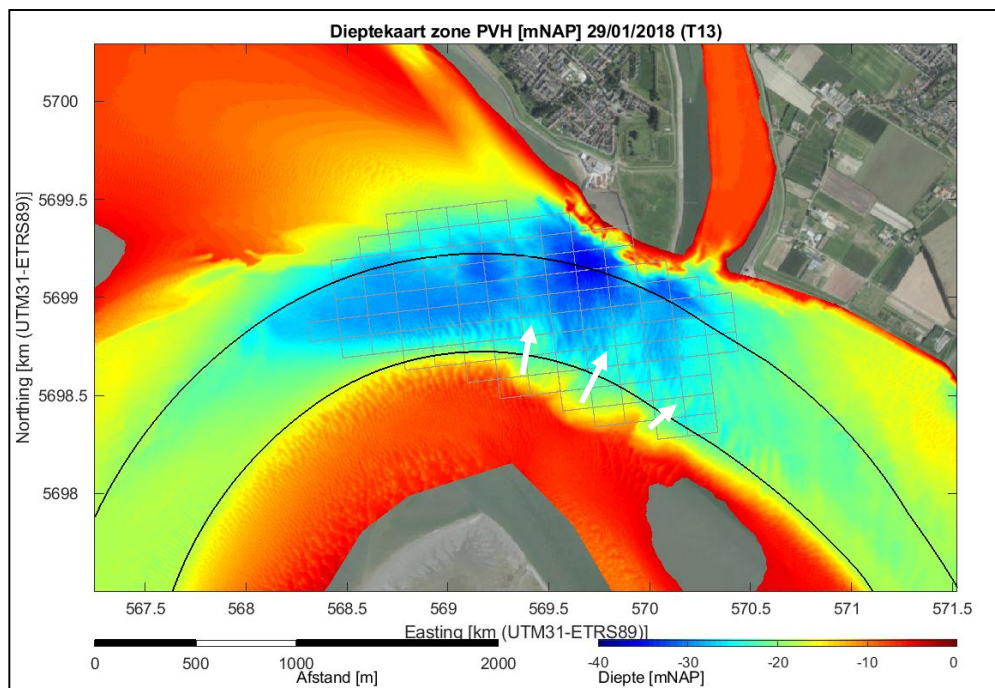
Figuur 6-20 Dwarsprofiel Put van Hansweert

In de korte periode tussen de proefstortingen en de eerste metingen na de twee periodes van stortingen blijkt dat al veel van het gestorte sediment uit het stortvak verdwenen is (Figuur 6-21). Na beide stortingen is ongeveer 45% van de gestorte baggerspecie in de Put van Hansweert 'verdwenen' (Figuur 6-23). Dit sediment wordt grotendeels teruggevonden in de binnenbocht, waar (versnelde) sedimentatie optreedt (Huisman et al, 2018). Dit is ook sedimentatiegebied als er geen sediment gestort wordt in de geul. Het daadwerkelijke transportproces na de storting in de diepe put is nog niet duidelijk (zie kader). Een grote plaatval

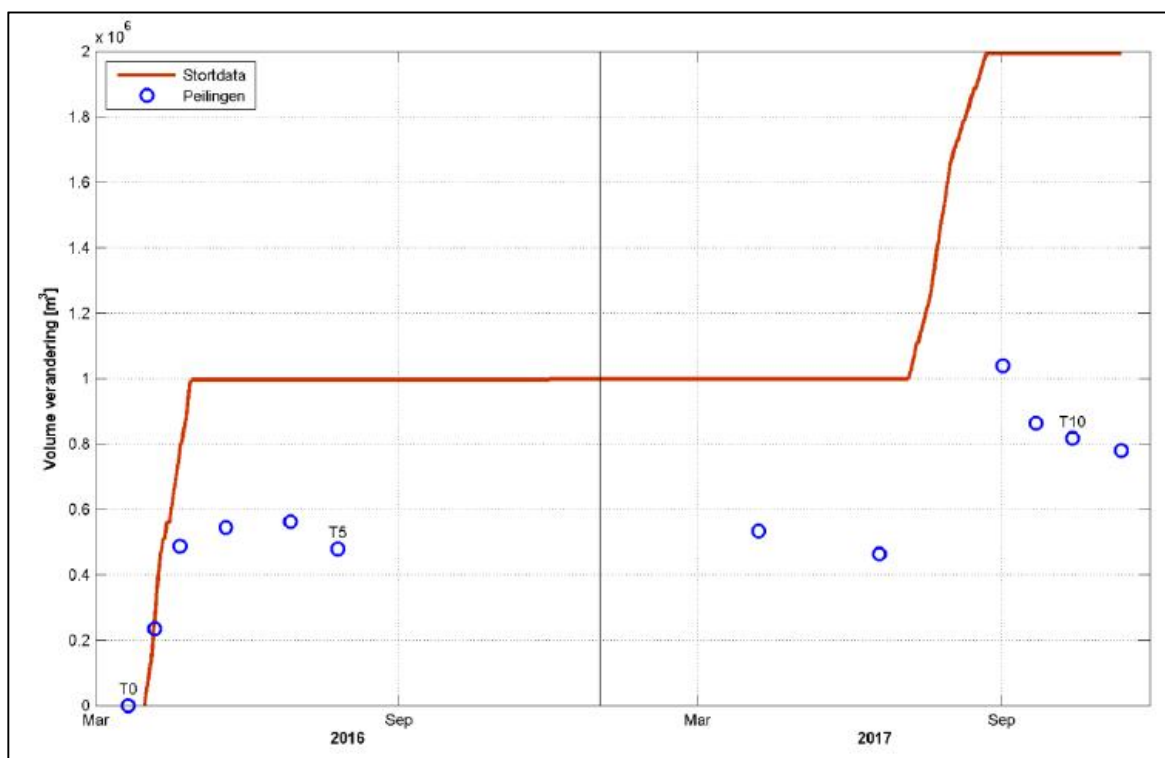
(‘zettingsvloeiing’), die viel tussen metingen in december 2017 en januari 2018 (Goossens en Depreiter, 2018a, b) zorgde ervoor dat ca 1,1 miljoen m³ zand terug in het stortvak kwam. In Figuur 6-22 is te zien dat er feitelijk drie afzonderlijke plaatvallen waren, die geheel onder water zijn gebleven.



Figuur 6-21 Verschilkaart proefstortvak Put van Hansweert tussen twee opnames na het uitvoeren van de proefstorting (T5: 5 juli 2016 en T6: 7 april 2017 (Goossens & Depreiter. 2017b).



Figuur 6-22 Bathymetrische kaart van de Put van Hansweert voor peiling T13. (Goossens & Depreiter 2018b, Huisman et al, 2018). De kraterrand van de drie opgetreden plaatvallen is goed zichtbaar (pijlen geven uitstroombichting aan).



Figuur 6-23 Volumeontwikkeling van de gestorte baggerspecie in de Put van Hansweert. De rode lijn geeft het gestorte volume weer en de blauwe rondjes de waarneming op de bodem (Goossens & Depreiter, 2017b).

Het gestorte zand dat kort na de storting wel op de bodem van de diepe put wordt teruggevonden, erodeert (zoals theoretisch verwacht) via een exponentiële relatie. Analyse van de dwarsdoorsneden suggereert dat deze erosie plaatsvindt tot een zekere diepte. Daar ligt waarschijnlijk een harde (slecht erodeerbare) kleilaag, zoals ook geconcludeerd in Huisman et al (2018).

Transportproces en 'verliezen' na een storting in een diepe put

In Huisman et al (2018) zijn de proefstortingen met een numeriek model nagerekend, maar is ook onderzocht waardoor het grote initiële stortverlies wordt veroorzaakt. De systematische verschillen in gemeten volumes sediment op de bodem en het beunvolume zijn niet de verklaring. Er wordt namelijk al gerekend met 'in-situ volume zand = 1,12x beunvolume'. Beter verklaringen zijn (i) dat een groot deel van het gestorte sediment direct in suspensie gaat en niet in het stortvak terecht komt of (ii) dat een deel van het gestorte sediment alweer geërodeerd voor de eerstvolgende peiling, dus binnen enkele weken.

Het is bekend dat bij storten uit een sleephopperzuiger het ladingvolume binnen enkele minuten gelost wordt en dan als een bulkmassa naar de bodem beweegt en daarbij in een pluimstroming overgaat, afhankelijk van de diepte en de stroming, waarbij een deel in suspensie gaat (stripping). Op de inslaglocatie ontstaat een krater waar het zand-watermengsel zich verspreidt over enkele tientallen tot honderden meters rondom dit punt, ook afhankelijk van de bodemligging. Het zand wordt dus dichtbij de bodem door een dichtheidsstroming verspreid en daarbij kan ook weer een deel in suspensie gaan en afgevoerd worden door de getijstrooming. Al deze processen verlopen binnen ten hoogste enkele tientallen minuten. In de dagen en weken daarna kan het zand alsnog door natuurlijke processen verder getransporteerd worden. Dit gebeurt hetzij door resuspensie (de fijnere fracties), hetzij als bodemtransport in de vorm

van duinmigratie (de grovere fracties). Voordat de eerstvolgende bodemmeting wordt uitgevoerd kan dus al weer een aanzienlijk deel uit het meetvak getransporteerd zijn.

Bij metingen tijdens de stortingen (Plancke et al, 2017a) bleken sedimentconcentraties in de waterverticaal op enige afstand van het schip gering. Er is niet gemeten in de onderste 1,5 m. Het sediment in het beun bestond hoofdzakelijk uit middelfijn zand (180-190 μm).

6.8.3 Proefstortingen in Put van Hansweert, berekeningen

In (Huisman et al, 2018) zijn berekeningen uitgevoerd met het NeVla Westerscheldemodel en met een detailmodel op mesoschaal met een uitsnede ter grootte van Macrocel 5. De proefstorting van 2016 van 1 miljoen m^3 (zonder de initiële verliezen) is nagerekend met een 2DH- en een 3D-16-lagen model over een periode van 5 jaar.

In het NeVla-model moest een 'ingespeelde' bodem gebruikt worden om het transport realistisch te kunnen narekenen. Dan pas bleken de autonome bodemveranderingen (metingen 2011-2014) van vergelijkbare grootte als de berekeningen, evenals de erosie- en sedimentatiepatronen. Deze onderschatting van het transport in de putten in het 2DH-model betekent dat het werkelijke baggerbezwaar hoger is dan in het model zonder ingespeelde bodem. Het rekenen met meerdere fracties (gegradeerd sediment) verbeterde de resultaten. In de vaargeul is gerekend met grover zand, wat minder transport geeft. Daarbuiten is fijner sediment gebruikt, wat meer verspreiding geeft in vergelijking met uniform zand. Het sediment in het model zette zich ook hoofdzakelijk af aan de binnenbocht van het Zuidergat. Dit geeft versteiling, maar plaatvallen zoals gemeten kan het model niet berekenen.

De Put van Hansweert heeft een bergend volume van 11 miljoen m^3 . Met een berekende transportcapaciteit van 4 miljoen m^3/jaar en een gestort volume van 4-6 miljoen m^3/jaar zou dit een levensduur als stortplaats van 4-6 jaar betekenen. De verwachting is echter dat het transport in werkelijkheid groter is en ook zal toenemen als het bodempeil toeneemt zodat de levensduur waarschijnlijk hoger is.

Het 2DH-model en ook het 3D model blijkt de hydrodynamica en transport in de diepe put (met een bodem met vaste kleilagen en belangrijke 3D-effecten) dus nog niet voldoende te kunnen narekenen. Met de resultaten van een modelstudie naar de stroming in de Put van Borssele (Van der Wegen en Schrijvershof, in voorbereiding), in combinatie met gebruikmaking van data uit een intensieve meetcampagne kan mogelijk een volgende stap gezet worden voor de Put van Hansweert. Het blijkt in deze studie onder meer dat dichtheidsverschillen tussen de zoutere vloedstroming en de (met Scheldewater verdunde) ebstroming het circulatiepatroon kunnen beïnvloeden. Zoiets leidt tot meer stroming en transport in de putten. Mogelijk is er ook een analogie met de ontwikkeling van de ontgrondingskuilen bij de stormvloedkering Oosterschelde, die ook dieper worden dan gedacht. Hierin lijken 3D-effecten die worden gegenereerd door een vortex als gevolg van stromingsdivergentie een belangrijke rol te spelen (Broekema, 2017).

Een ander verschil tussen de waarnemingen en het model is de geconstateerde stabiele ligging van de put, terwijl het model erosie van het oostelijk deel berekent. In de rapportage (Huisman et al, 2018) wordt, na analyse van beschikbare boringen, gesuggereerd dat dit verschil wordt veroorzaakt door de geologie. De put heeft hier de 'harde lagen' bereikt, die niet in het model zijn opgenomen, maar wel uit het geologisch onderzoek bekend zijn (niet alleen in de bodem van de put, maar ook in de wanden). In Bijlage B is een geologisch dwarsprofiel opgenomen door de Put van Hansweert, samengesteld op basis van de boringen in DINO en in aanvulling op de overige Westerschelde profielen van de Rijks Geologische Dienst (1995).

Zowel de waarnemingen als de modelresultaten leiden tot de conclusie dat het effect van de proefstortingen in de Put van Hansweert op het getij gering is. Het overgrote deel van het sediment verspreidt zich en er wordt nauwelijks tot geen verondieping bereikt.

De modelstudie suggereert tenslotte dat er enige recirculatie van sediment plaatsvindt naar de Drempeel van Hansweert. Dit zou de onderhoudsbaggerhoeveelheden kunnen verhogen met 10-20%. Echter, zolang niet goed duidelijk is wat er met de initiële verliezen gebeurt, blijft dit een onzekere uitspraak.

6.9 Giertij ten oosten van Platen van Ossenissee

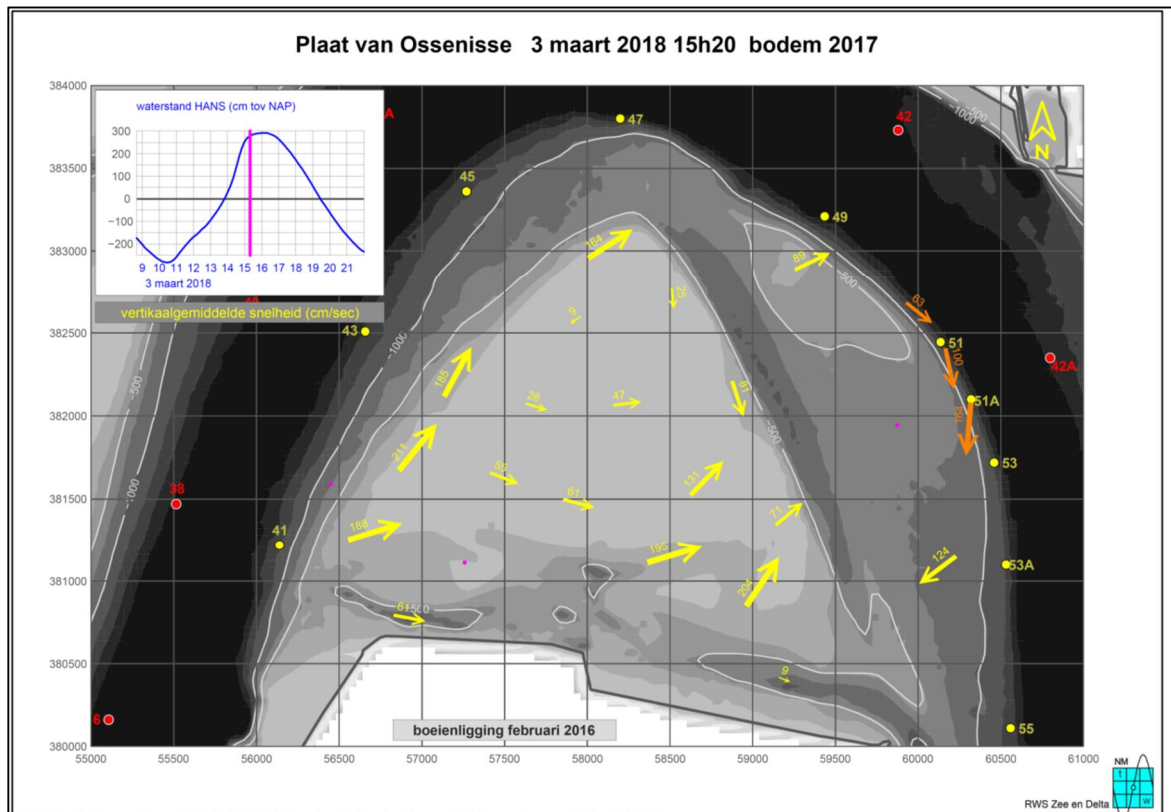
In het Zuidergat tussen de platen van Ossenissee en de Schaar van Waarde treden af en toe bij 'giertij' (een loodsterm voor springtij met extra hoge waterstanden) sterke dwarsstromingen op die een gevaar kunnen vormen voor de scheepvaart. In 2005 liep daardoor het containerschip Foiewaret op de plaat vast (Figuur 6-24). Door de vloedstroming ontstaat bij snelle waterstandsstijging langs de verdronken plaatrand een ingewikkeld nerenpatroon, zie Figuur 6-25. De dwarsstromingen komen slechts tot ontwikkeling bij specifiek springtij. Dan is er een groot verhang tussen Terneuzen en Hansweert (>0,85m), een snelle rijzing van de waterstand (>3,5 cm/min) en bij hoogwaterstanden > 3,25m NAP (Lipari, 2013). Het risico van het optreden (en dus ook de urgentie van maatregelen) wordt gestuurd door de morfologie ter plekke, die zeer dynamisch is.

Onderzocht is met modelberekeningen of maatregelen voor mitigatie mogelijk zijn (Sas, 2013, Lipari, 2013), zoals suppleties langs de ondiepe plaatrand of baggeren. De stabiliteit van een dergelijke suppletie is nog niet onderzocht. Ook is meer inzicht in het stromingspatroon van de neren nodig door in-situ metingen tijdens giertij. Door Rijkswaterstaat zijn recent metingen uitgevoerd (zie Figuur 6-25).



Figuur 6-24 Containerschip Foiewaret vastgelopen op de Plaat van Ossenissee, 2005. Op de achtergrond voormalige veerhaven Kruiningen (Beeldbank RWS).

21 maart 2019, definitief



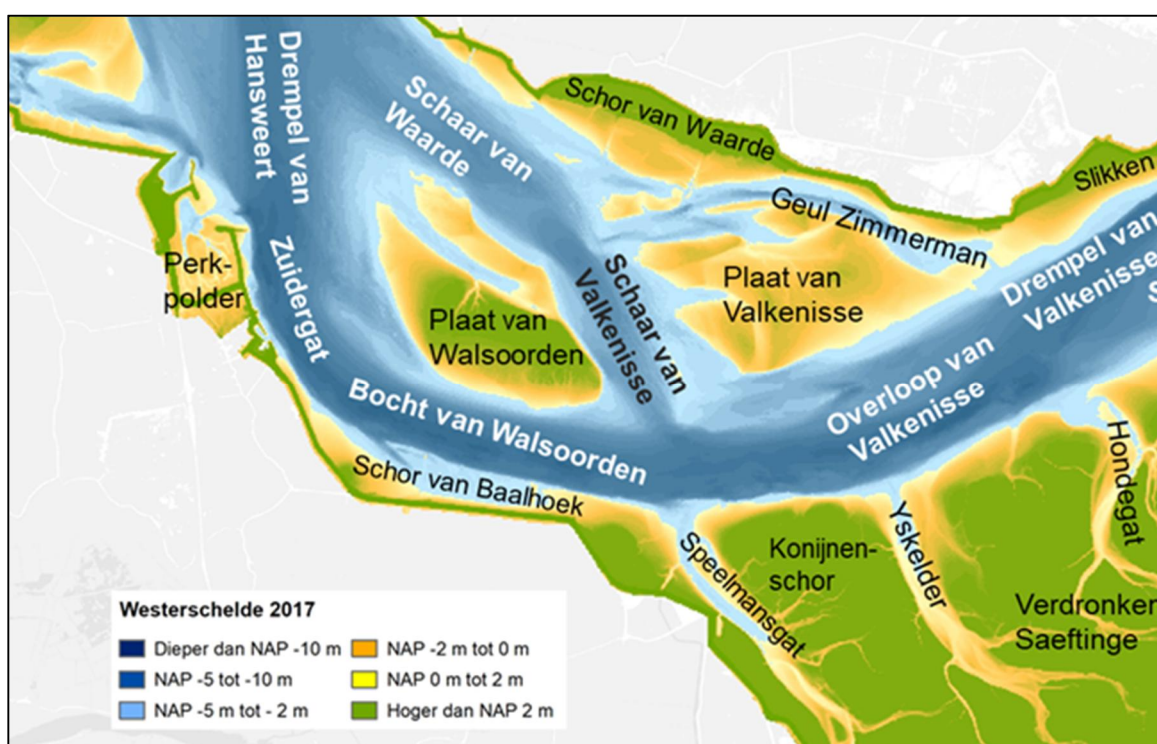
Figuur 6-25 Gemeten snelheden Plaat van Ossensisse bij hoogwater (M. Schrijver, Rijkswaterstaat Zee en Delta, 2018).

7 Macrocel 5, rond de Platen van Valkenisse

7.1 Begrenzing en beschrijving studiegebied

7.1.1 Grenzen en overgangen

De hoofdgeul passeert in Macrocel 5 van west naar oost achtereenvolgens de Drempel van Hansweert, wordt daarna het Zuidergat genoemd en vervolgens 'Bocht van Walsoorden' en 'Overloop van Valkenisse' (Figuur 7-1, zie aansluitend Figuur 8-1). In de buitenbocht bij Walsoorden en Baalhoek zijn de steile oevers verdedigd. In het Zuidergat ligt een stortzone in de hoofdgeul (SH51).



Figuur 7-1 Overzichtskaart van Macrocel 5, geprojecteerd op de bathymetrie uit 2017.

De nevengeul van Macrocel 5 is de Schaar van Waarde die later Schaar van Valkenisse wordt genoemd. Deze verschillende namen geven al aan dat er in het verleden niet altijd zo'n eenduidige nevengeul is geweest als nu. De beide scharen en de Zimmermangeul waren toen afwisselend dieper in een morfologisch zeer dynamisch gebied. Aan de westzijde van de nevengeul ligt de stortzone SN51.

Tussen de hoofd- en de nevengeul ligt de Plaat van Walsoorden, met aan de westzijde daarvan de plaatrandstortzone met dezelfde naam. Op de Plaat van Walsoorden ligt sinds ongeveer 2004 een zich gestaag uitbreidend schorgebied. Aan de zuidzijde vindt ophoging en versteiling plaats zodat er regelmatig plaatvallen voorkomen (zie ook Figuur 6-16).

Tussen de nevengeul en de noordoever ligt de Plaat van Valkenisse. Tussen de westzijde van de Plaat van Valkenisse en de oever ligt de Geul Zimmerman, aan de oostzijde is de Plaat van Valkenisse inmiddels verheeld met de oever. Aan de oever ligt ook het Schor van Waarde, met

daarin twee lange strekdammen, die in 2004 zijn aangelegd om de cultuurhistorische waarden in het slikkengebied te beschermen (zie verder paragraaf 7.7).

De regel bij het trekken van grenzen tussen macrocellen is de plaats te nemen waar hoofd- en nevengeul elkaar kruisen. De hoofd- en de nevengeul van Macrocel 5 ontmoeten elkaar ten zuiden van Hansweert, bij het diepste punt van de Put van Hansweert. Ten westen daarvan, in Macrocel 4, liggen het Middelgat en de Overloop van Hansweert. Er is dus feitelijk geen sprake meer van kruisende geulen, maar van het samenkomen in een zone waarin aan stroomafwaartse zijde een diepe put ligt en aan stroomopwaartse zijde een drempel waar gebaggerd moet worden. Dat het leggen van de grens tussen de Macrocellen 4 en 5 bij de Put van Hansweert lastig is, blijkt uit de vakindeling die wordt gehanteerd bij het bepalen van de morfologische ontwikkelingen. De Put van Hansweert is hierbij niet toegerekend aan een van beide cellen, dat geldt ook voor de Plaat van Ossensisse, zie hiervoor paragraaf 6.5 t/m 6.6.

De grens tussen Macrocellen 5 en 6 ligt bij de Overloop van Valkenisse, daar waar de nevengeul Schaar van Valkenisse de hoofdgeul kruist naar de Schaar van Noord. Daar ligt de drempel van Valkenisse. Aan de zuidwestzijde grenst Macrocel 5 ook aan het Land van Saeftinghe, dat overigens ook grenst aan de Macrocellen 6 en 7, zie verder paragraaf 8.1 en 8.3.3.

7.1.2 Gebruiksfuncties

Scheepvaart

In Macrocel 5 is de hoofdgeul ook de hoofdvaarweg. De nevengeul fungeert als vaarweg voor de binnenvaart. Via de sluisen bij Hansweert en het Kanaal door Zuid-Beveland vindt veel binnenvaart plaats tussen de haven van Antwerpen en het Volkerak en verder. Dit maakt de vaarwegfunctie voor de binnenvaart relatief belangrijk in Macrocel 5 (evenals 6 en 7). Veranderingen in de ligging van de nevengeulen en van de drempel tussen de Schaar van Valkenisse en de Overloop van Valkenisse zijn daarom extra van belang.

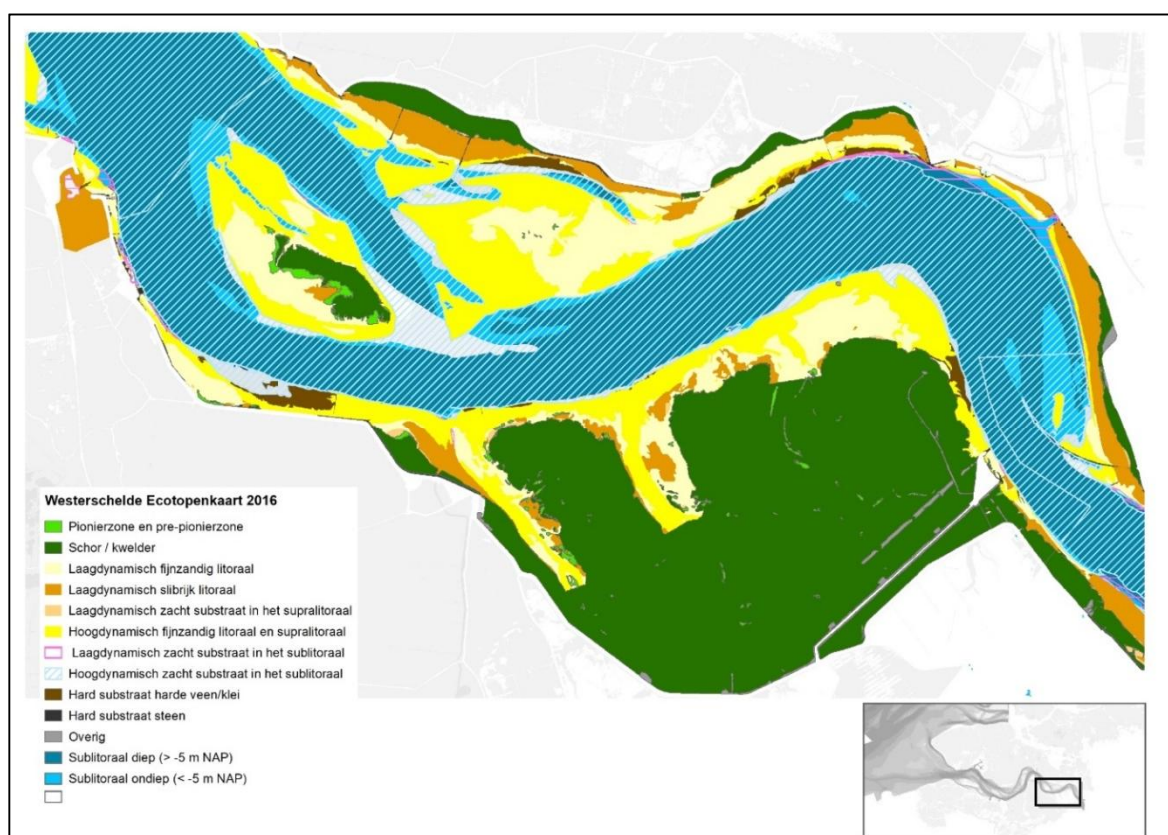
Ecotopen

De ecotopenkaart voor Macrocel 5 staat in Figuur 7-2. Duidelijk zichtbaar zijn de schorren op de Plaat van Walsoorden. Deze schorren worden gebruikt voor de oogst van zeeaster (dit is de zilte groente 'lamsoor'). De droogvallende delen aan de noordzijde van de Plaat van Walsoorden zijn voor een belangrijk deel hoogdynamisch, met weinig bodemleven. Ten zuidwesten van de schorren vinden we relatief slibrijk laagdynamisch gebied.

De Plaat van Valkenisse vertoont een mix van hoog- en laagdynamische delen. De oever van deze plaat aan de Geul Zimmerman vormt een belangrijk rust-, baar- en zooggebied voor zeehonden in de oostelijke helft van de Westerschelde.

Het Schor van Waarde vormt het meest uitgebreide schorrengebied aan de (noord)oever van Macrocel 5. Voor het Schor ligt een laagdynamisch slik, dat na de aanleg van de verlengde strekdammen in hoogte is toegenomen. Aan de zuidoever ligt het Schor van Baalhoek, waar in 2016/17 strekdammen zijn aangelegd als onderdeel van het Programma Natuurherstel Westerschelde. Doel daarvan is creatie van laagdynamisch areaal door het beperken van de stroomsnelheden. De onderwateroever is ter plekke steil en geheel bestort om het verder uitbochten te voorkomen.

Aan de westzijde van het Zuidergat is in 2014 door ontpoldering een schor- en slikgebied gecreëerd tussen de oude veerhaven van Perkpolder en de haven van Walsoorden, ter hoogte van het Oude Hoofd aan de Noorddijksedijk, dat als dijkrestant is gehandhaafd.



Figuur 7-2 Ecotopenkaart uit 2016 van Macrocellen 5, 6 en 7.

7.2 Morfologische ontwikkeling Macrocel 5 op de schaal van macrocel en geulen

De grenzen van Macrocel 5 worden bepaald door de ligging van de oevers. Het Zuidergat is gefixeerd tegen de oostelijke en zuidelijke oever. Daar liggen ook bestortingen langs de geulwand. De nevengeul is niet gefixeerd. Vooral de overgang van de Schaar van Valkenisse naar de hoofdgeul blijkt zeer veranderlijk. Een gevolg daarvan is dat de Plaat van Walsoorden en de Plaat van Valkenisse (vroeger een ononderbroken complex dat Platen van Valkenisse werd genoemd) ter plekke sterk veranderen. Dit is goed zichtbaar in luchtfoto's van het gebied uit 2009 (Figuur 7-3) en 2016 (Figuur 7-4). Vooral de rotatie van de Schaar van Valkenisse is hiervan de oorzaak. Ook de westzijde van de Plaat van Walsoorden is veranderd. Deze plaat heeft in plaats van de langgerekte vorm in 2009 (Figuur 7-3) een veel compactere vorm gekregen in 2016 (Figuur 7-4).

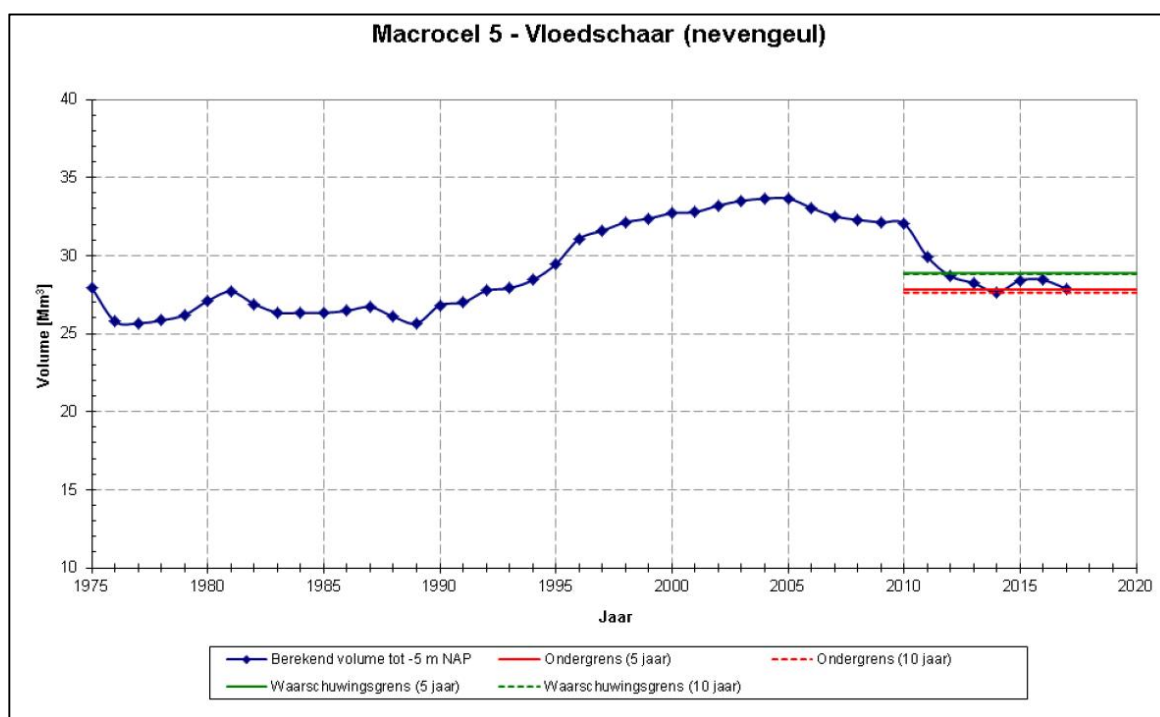
Sleutelfactoren voor de morfologische ontwikkelingen zijn de ontwikkelingen van het sedimentvolume van de macrocel als geheel en de ontwikkelingen van de hoofd- en de nevengeul. Daarover wordt jaarlijks gerapporteerd binnen 'Flexibel Storten', waaruit de grafieken over het watervolume van nevengeul (Figuur 7-5) en hoofdgeul (Figuur 7-6) zijn overgenomen (Schrijver, 2018). De gestage verruiming van de hoofdgeul (orde 1,25 miljoen m³ per jaar, maar vanaf 2010 minder) is verbonden met de verdiepingen en het onderhoud van de vaargeul. De evolutie van de nevengeul is mede gestuurd door stortingen. Na het stopzetten van de stortingen in de nevengeul in 2012 lijkt het volume stabiel.



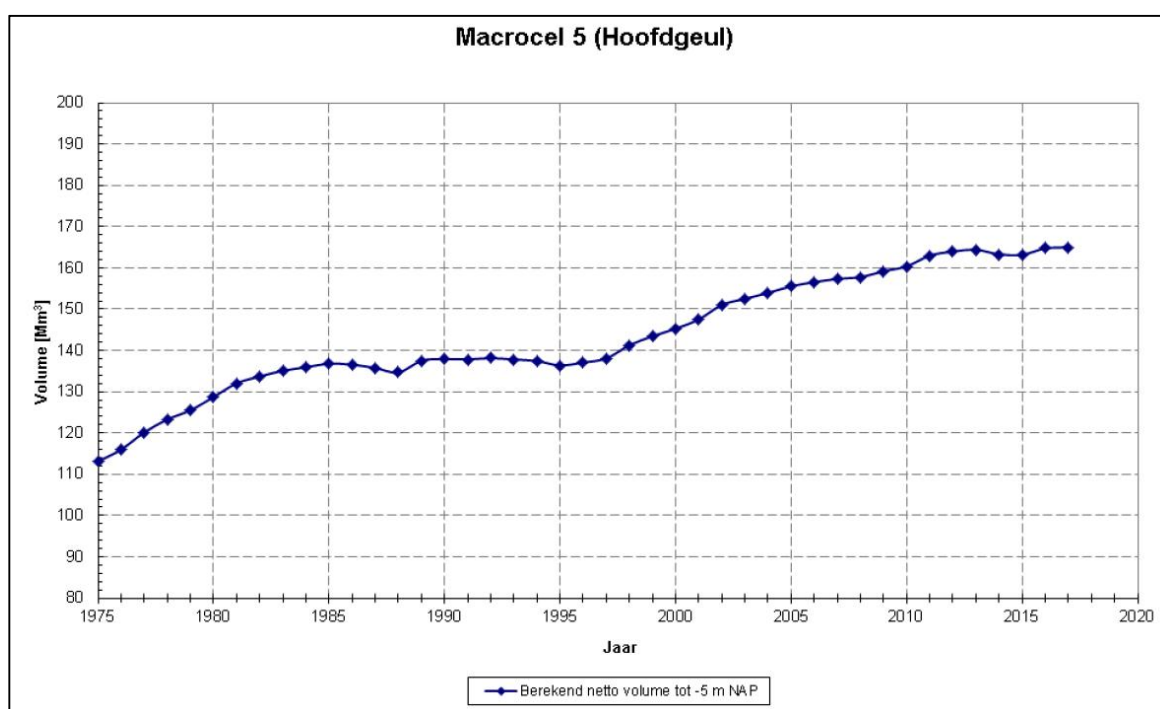
Figuur 7-3 Luchtfoto (Google) van 2009 van Macrocel 5.



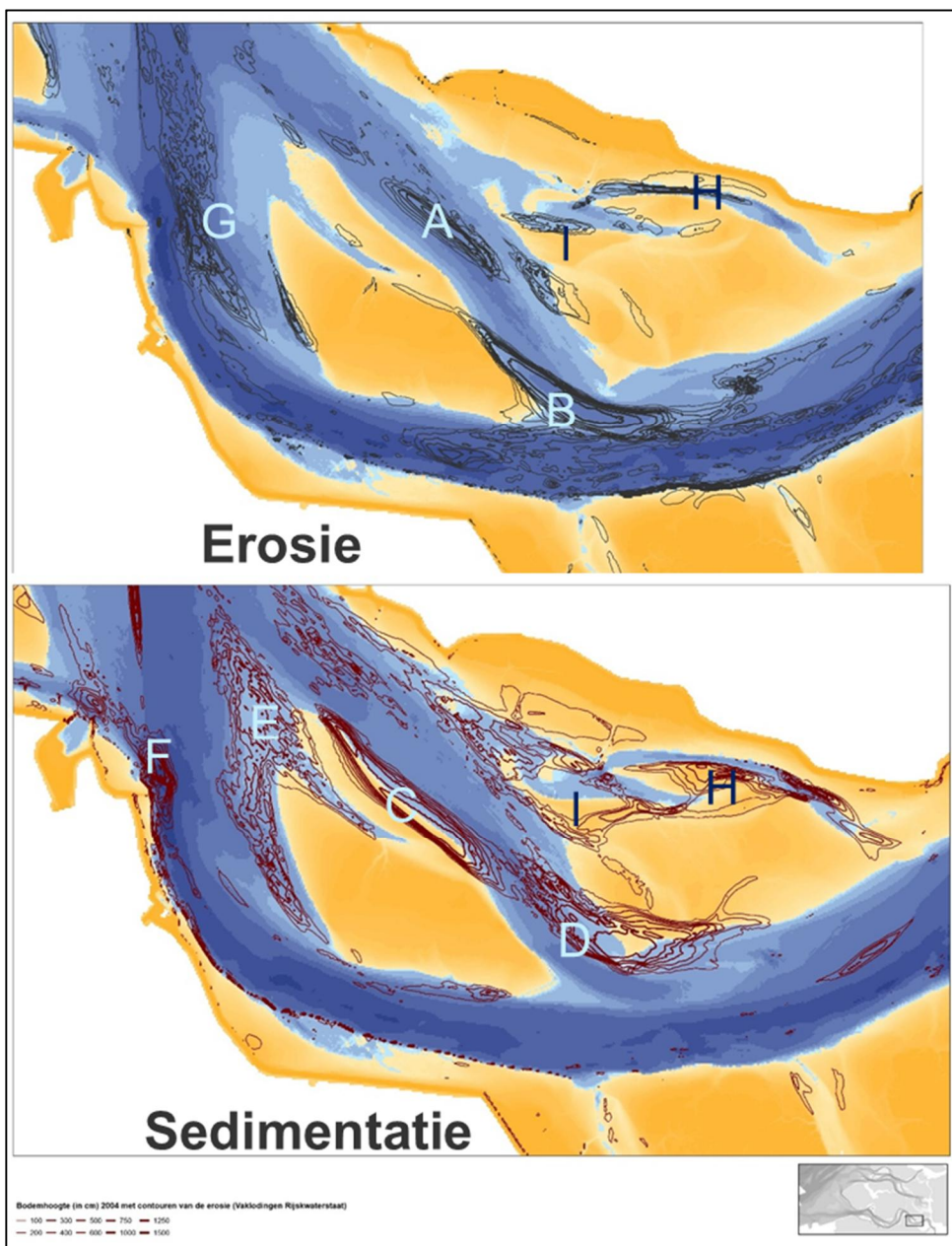
Figuur 7-4 Luchtfoto (Google) van 2016 van Macrocel 5.



Figuur 7-5 Netto volume nevengeul Macrocel 5 Schaar van Waarde / Valkenisse (Schrijver, 2018).



Figuur 7-6 Netto watervolume hoofdgeul Macrocel 5 Zuidergat (Schrijver, 2018)



Figuur 7-7 Rondom Plaat van Walsoorden: bodemligging 2013 met de contouren van de erosie (boven) en de sedimentatie (onder) van 2004-2014. Zie tekst voor verklaring symbolen.

De morfologische veranderingen van de geulen en de macrocel als geheel, in de periode van 2004-2014, zijn weergegeven in Figuur 7-7 (op dezelfde wijze als in Figuur 6-15). Deze kunnen als volgt omschreven worden:

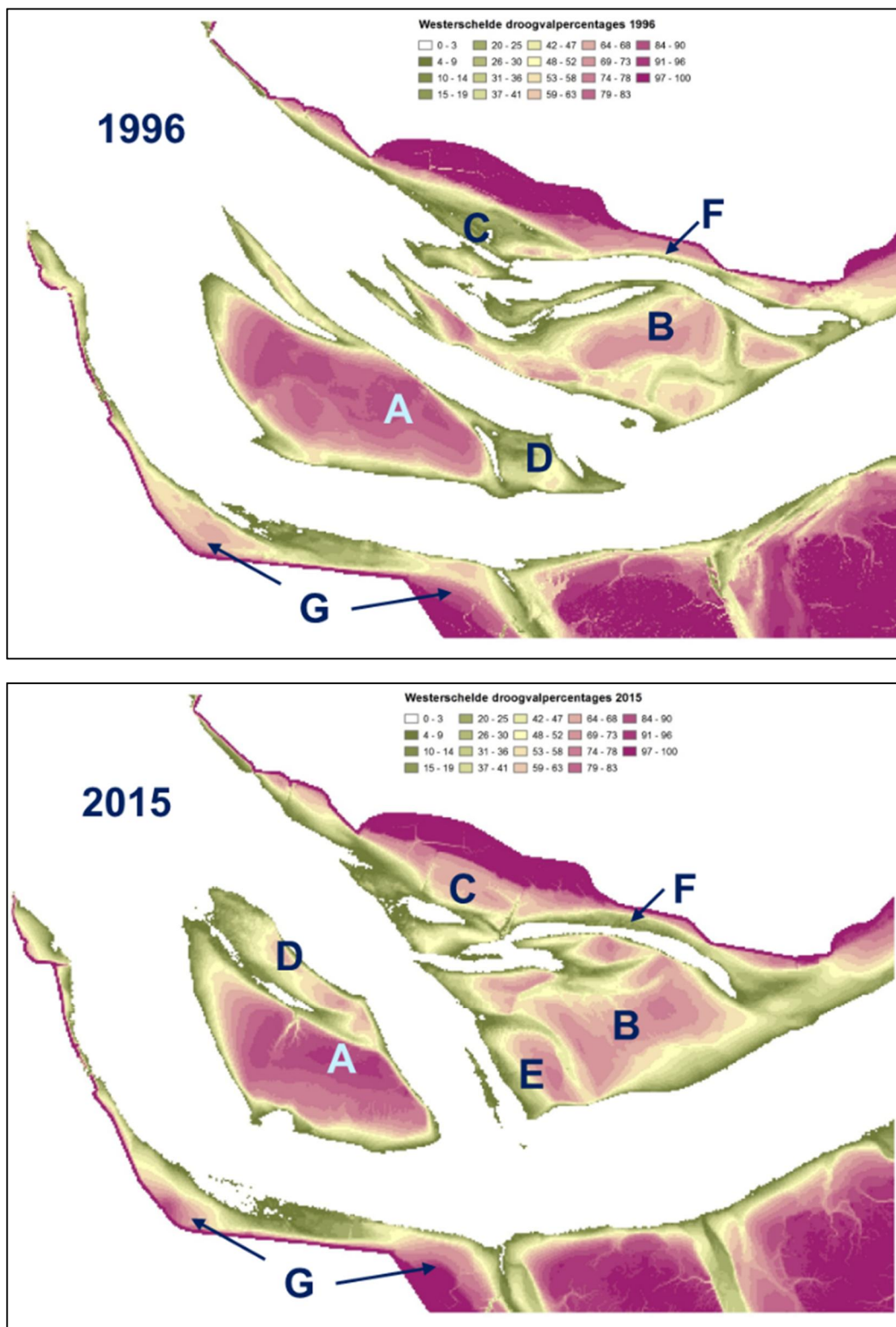
- A. Erosie in de Schaar van Waarde in het centrale deel van de geul,
- B. Erosie in de Schaar van Valkenisse aan de zuidzijde van de geul, misschien zelfs beter te duiden als erosie van de meest oostelijke punt van de Plaat van Walsoorden.

- C. Sedimentatie aan de zuidwestzijde van de Schaar van Waarde, tegenover de erosie bij A, ook in het verlengde van erosie bij B. Dit betekent een noordoostwaartse uitbreiding van de Plaat van Walsoorden.
- D. Sedimentatie aan de noordoostzijde van de nevengeul. Dit heeft een uitbreiding van de Plaat van Valkenisse tot gevolg en in combinatie met B een westwaartse verplaatsing en draaiing van de Schaar van Valkenisse ten koste van de Plaat van Walsoorden. De combinatie van A-D levert een gekromde oriëntatie van de nevengeul. Ook wordt de oorspronkelijk doorlopende geul nu een samenstelling van korte geuldelen (enerzijds de Schaar van Waarde, anderzijds de Schaar van Valkenisse, met drempels daartussen. De eindigheid van deze ontwikkeling is niet duidelijk.
- E. Sedimentatie als gevolg van de plastrandstortingen (en eerder de proefstorting) Plaat van Walsoorden.
- F. Sedimentatie aan de noordzijde van het Zuidergat, noordzijde van het stortvak, maar ook in het verlengde van de sedimentatie bij de Schaar van Ossensisse.
- G. Erosie aan de oostzijde van de drempel van Hansweert. Het oostelijk opschuiven van deze grens is een ontwikkeling die al lange tijd bezig is. Het baggeren vanwege de 3^e verdieping heeft mede bijgedragen aan de verdieping (erosie) op de drempel.
- H. Erosie en sedimentatie in het restant van de Geul Zimmerman. De overall afname van de geul gaat samen met het verschuiven van het zwaartepunt ervan.
- I. Sedimentatie Slik van Waarde.

7.3 Morfologische ontwikkeling rondom de Plaat van Walsoorden

De morfologische veranderingen boven laagwater (platen, slikken, schorren) staan in Figuur 7-8 als een vergelijking van de droogvalpercentages tussen 1996 en 2015. De ontwikkelingen kunnen als volgt omschreven worden:

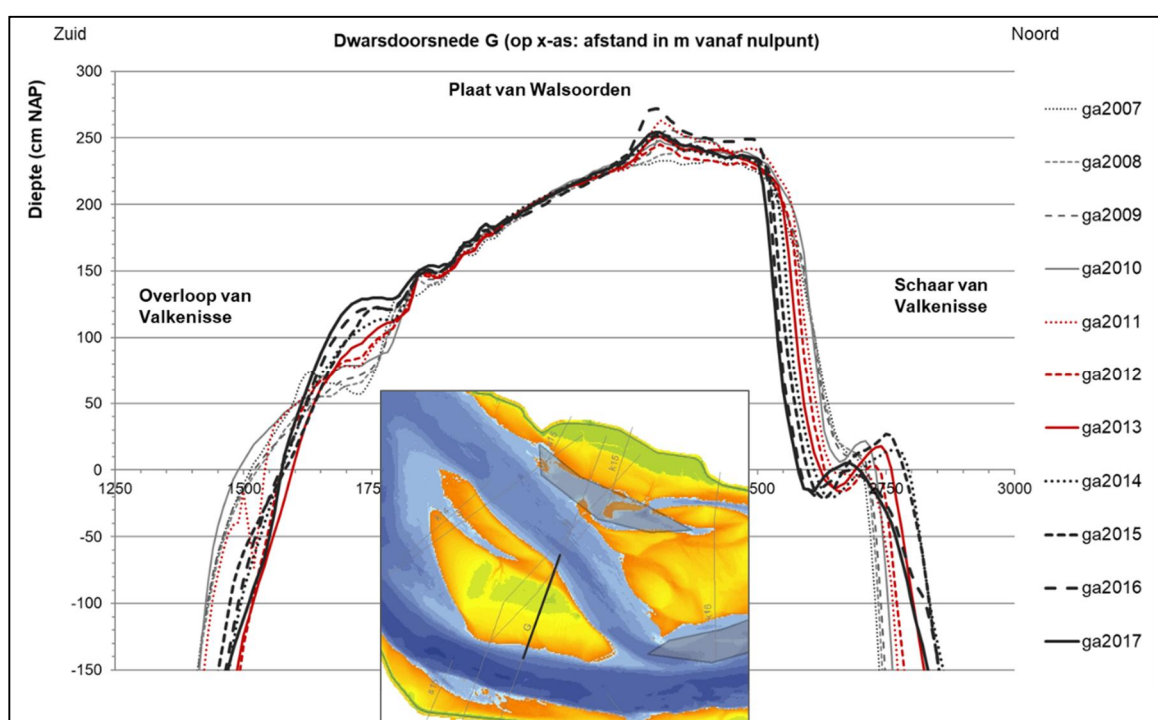
- A. Toename droogvalpercentage Plaat van Walsoorden, zodanig dat schorvorming kon plaatsvinden. Soorten: Zeeaster/ Zeekraal/ Spartina. Met opvallend grote velden Zeeaster. Merk hierbij op dat de Plaat een relatief 'plat' karakter heeft gehouden.
- B. Relatief lage Platen van Valkenisse.
- C. Sedimentatie op het slik na de aanleg van de lange dammen bij Waarde.
- D. Erosie van de lage oostelijke punt van de Plaat van Walsoorden (geulverplaatsing).
- E. Aangroei van de zuidelijke punt van de Platen van Valkenisse (geulverplaatsing).
- F. Erosie van het slik ten oosten van de lange dammen bij Waarde, samenhangend met de ontwikkeling van de Geul Zimmerman.
- G. Hogere slikken en uitbouw schor op sommige plekken aan de (beschermd) zuidoever.



Figuur 7-8 Droogvalpercentages (onderliggend aan de ecotopenkaarten) voor 1996 (boven) en 2015 (onder). Zie tekst voor verklaring symbolen.

De dominante veranderingen in de vorm van de Plaat van Walsoorden vinden plaats door de verplaatsing van de aangrenzende geulen. Dit is te zien in de dwarsdoorsnede in Figuur 7-9.

Aan de noordoostelijke zijde (rechts) is er gestage erosie van de plaatrand door migratie van de Schaar van Valkenisse. Deze geulmigratie is ook aangeduid in Figuur 7-7 (B). Aan de overzijde van de geul, ten oosten van deze dwarsdoorsnede in de Platen van Valkenisse is juist sprake van sedimentatie door de verplaatsing en draaiing van de nevengeul (D in Figuur 7-7 en E in Figuur 7-8 en zie ook Figuur 7-10).



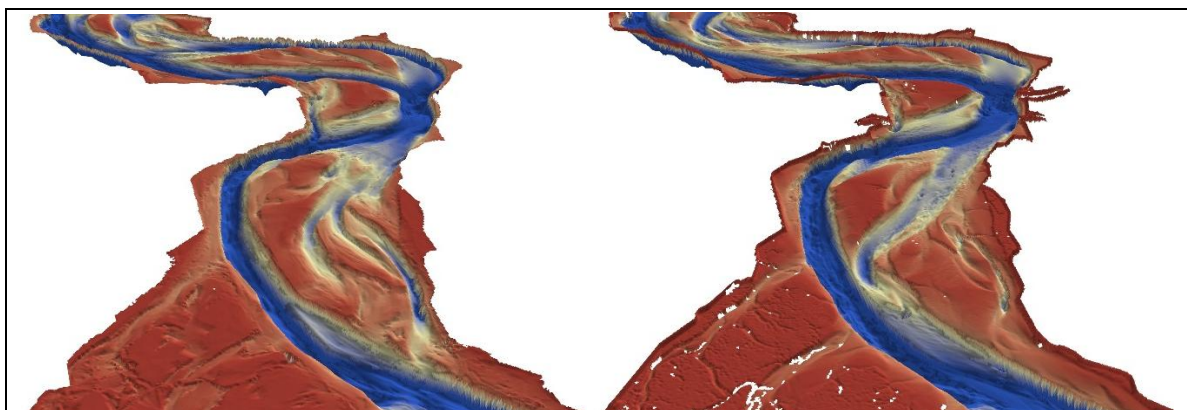
Figuur 7-9 Dwarsdoorsnede G door de Plaat van Walsoorden (locatie in inzet). Links/zuid: plaatrandophoging en verstelling na plaatval. Rechts/noord: erosie door geulmigratie Schaar van Valkenisse

Aan de zuidzijde van de Plaat van Walsoorden is in Figuur 7-9 (links) zichtbaar dat de plaatrand grenzend aan de hoofdgeul Zuidergat en Overloop van Valkenisse na 2012 relatief stabiel is. Migratie van de hoofdgeul is hier niet mogelijk, omdat de buitenbocht is vastgelegd. Doordat wel voortdurend sedimentatie van de plaatrand optreedt, leidt dit tot verstelling en periodiek een plaatval, waarna weer herstel plaatsvindt, zoals ook te zien in het dwarsprofiel (links).

In Figuur 7-8 (bij A) is de krater van de plaatval van 2014 zichtbaar. De rol van plaatvallen is gedocumenteerd aan de hand van de plaatval van 22 juli 2014 (Van Schaick, 2015), zie ook Figuur 6-16. Het materiaal dat toen in de hoofdgeul terechtkwam, bewoog in de vorm van duinmigratie in de maanden na de plaatval in oostelijke richting, door het centrale deel van de hoofdgeul, waaruit bleek dat het (bodem)transport hier vloeddominant is. Zichtbaar was dat de oorspronkelijke bodem weer werd bereikt, deze bestaat hier dus uit een harde kleilaag (Profiel 14, Bijlage B).

Tegelijkertijd met het transport in vloedrichting in het midden van de geul vindt er ebwaarts transport plaats aan de noordzijde van de hoofdgeul, langs de rand van de Plaat van Walsoorden. Hierdoor werd de krater van de plaatval geleidelijk afgesloten en kon fijn zand en slib bezinken (Mastbergen en Schrijvershof, 2016). Het sediment circuleert rondom de plaat (Figuur 7-10). Door het bezinken van fijn materiaal op de plaat en in de kraters van het plaatvalgebied wordt fijn sediment ingevangen terwijl het grovere sediment (> 200 µm) als duinmigratie richting Drempel van Valkenisse wordt getransporteerd. Daar wordt het gebaggerd of bij de zuidelijke plaatrand weer afwaarts getransporteerd.

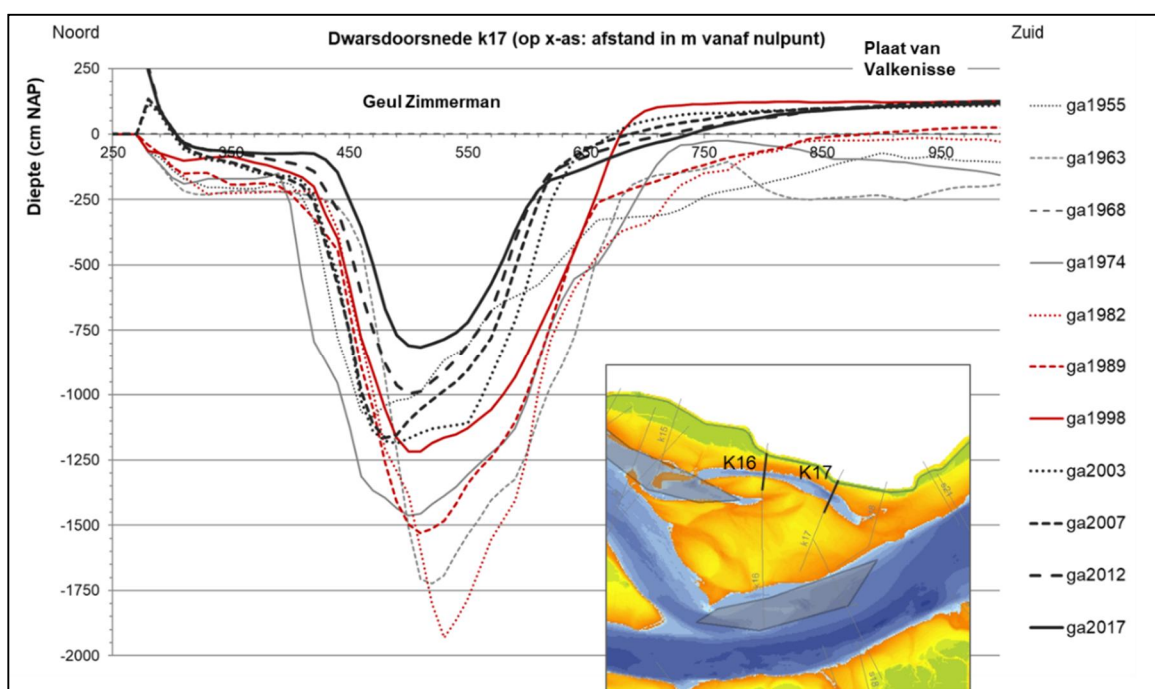
Wordt de gehele sequentie 1996 – 2005 – 2016 beschouwd dan lijkt het of de veranderingen bij de Plaat van Walsoorden in de periode 1996-2005 minder groot zijn dan de veranderingen in 2005-2016. De vraag is of deze toegenomen dynamiek (geulmigratie en plaatophoging) samenhangt met het morfologisch beheer sinds die tijd.



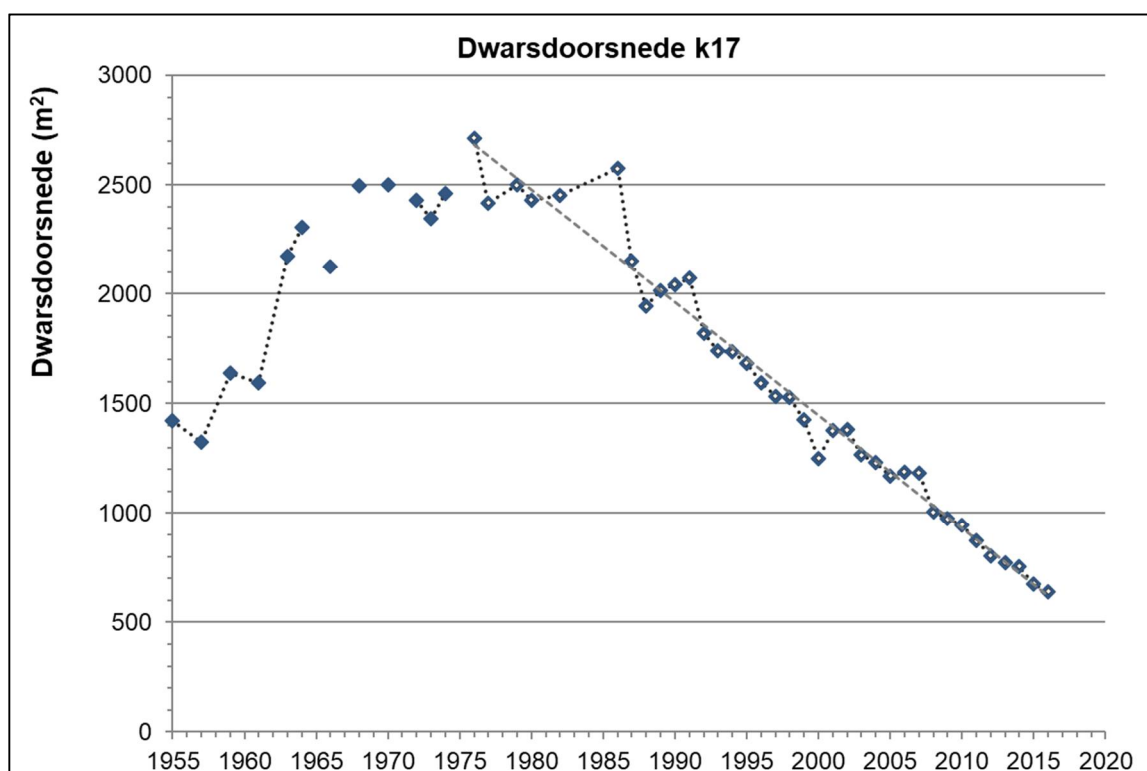
Figuur 7-10 3D weergave van de metingen rond de Plaat van Walsoorden (links 1980, rechts 2012). De doorbraak van de Schaar van Valkenisse is duidelijk zichtbaar (Rijkswaterstaat).

7.4 Rondom de Plaat van Valkenisse

Recente ontwikkelingen rond de Plaat van Valkenisse resulteerden in een toename van de omvang. Van belang zijn de migratie van de Schaar van Valkenisse naar het zuidwesten (waardoor oostzijde van de Plaat van Walsoorden is geërodeerd) en de doorgaande afname van de omvang van de Geul Zimmerman. De verheling van de Plaat van Valkenisse met de noordoever is een doorgaand proces.



Figuur 7-11 Dwarsdoorsnede k17 door de Geul Zimmerman (locatie in inzet).



Figuur 7-12 Grafiek met de doorstroomoppervlakte Geul Zimmerman onder NAP -2 m (locatie in Figuur 7-11).

De afname van de Geul Zimmerman is zichtbaar in de dwarsdoorsnede in Figuur 7-11 en in de grafiek van het doorstroomoppervlakte in Figuur 7-12. In de grafiek is ook de trendlijn aangegeven die een uitstekende fit ($R^2=0,97$) vertoont met een afname van de doorstroomoppervlakte van 52 m^2 per jaar. Als deze trend doorzet is de doorstroomoppervlakte onder de NAP -2 m ter plaatse van raai k17 binnen 13 jaar afgenomen tot 0 m^2 . Overigens verloopt de afname minder uitgesproken in de meer westelijk gelegen raai k16. Uit de opeenvolgende kaartbeelden is op te maken dat de opvulling van de Geul Zimmerman vanuit het oosten naar het westen trekt. Het opvullen van de Geul Zimmerman betekent dat de Plaat van Valkenisse geleidelijk verandert in een groot slikkengebied. Een vervangende geul voor de Geul Zimmerman lijkt zich nog niet aan te dienen. In vergelijking met de Plaat van Walsoorden is de Plaat van Valkenisse relatief laag (zie de droogvalpercentages in Figuur 7-8).

7.5 Plaatrandstoringen in Macrocel 5: Plaat van Walsoorden

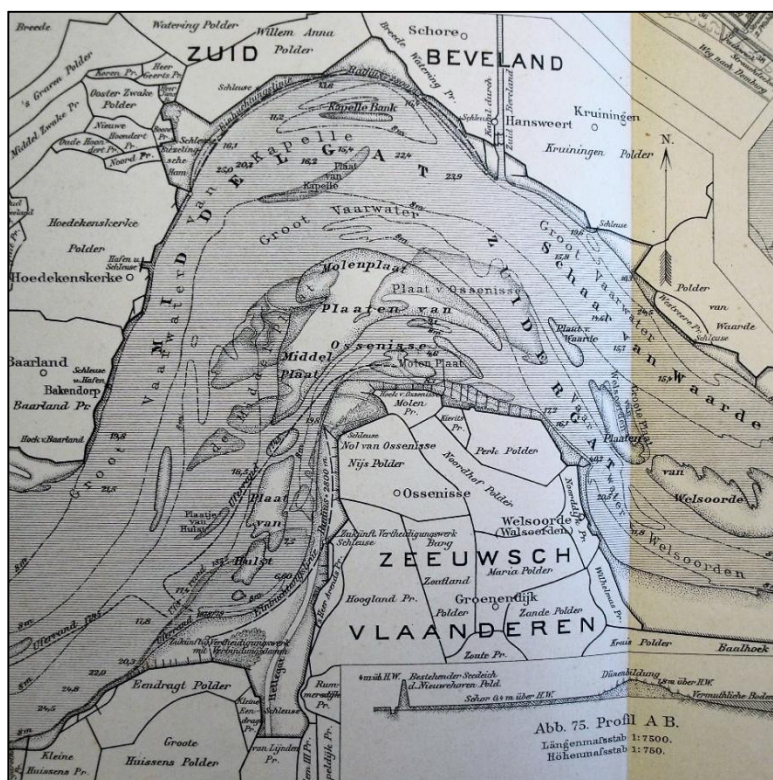
7.5.1 Waarnemingen

De Plaat van Walsoorden is in de loop van de tijd naar het oosten opgeschoven. Hiermee is de ruimte voor het plaatcomplex van Valkenisse aan de westzijde afgenomen (Cleveringa, 2013a). Zo'n ontwikkeling is nu niet meer waar te nemen, zie E in Figuur 7-7, waar nu juist sedimentatie optreedt, dankzij de plaatrandstoringen.

De ontwikkeling van de Plaat van Walsoorden wordt zowel gestuurd door de plaatrandstoringen op het noordwestelijke deel van de plaat (PWA, in Figuur 1-7) als door de verplaatsing van de aangrenzende nevengeulen (Schaar van Waarde en Schaar van Valkenisse). De verplaatsing van de geulen leidde tot erosie bij van de zuidoostelijke plaatpunt en uitbreiding aan de noordoostzijde (zie Figuur 7-7 en Figuur 7-8). Tegelijkertijd vond ophoging van de gehele plaat plaats (A in Figuur 7-8) en langs de zuidelijke plaatrand (Figuur

21 maart 2019, definitief

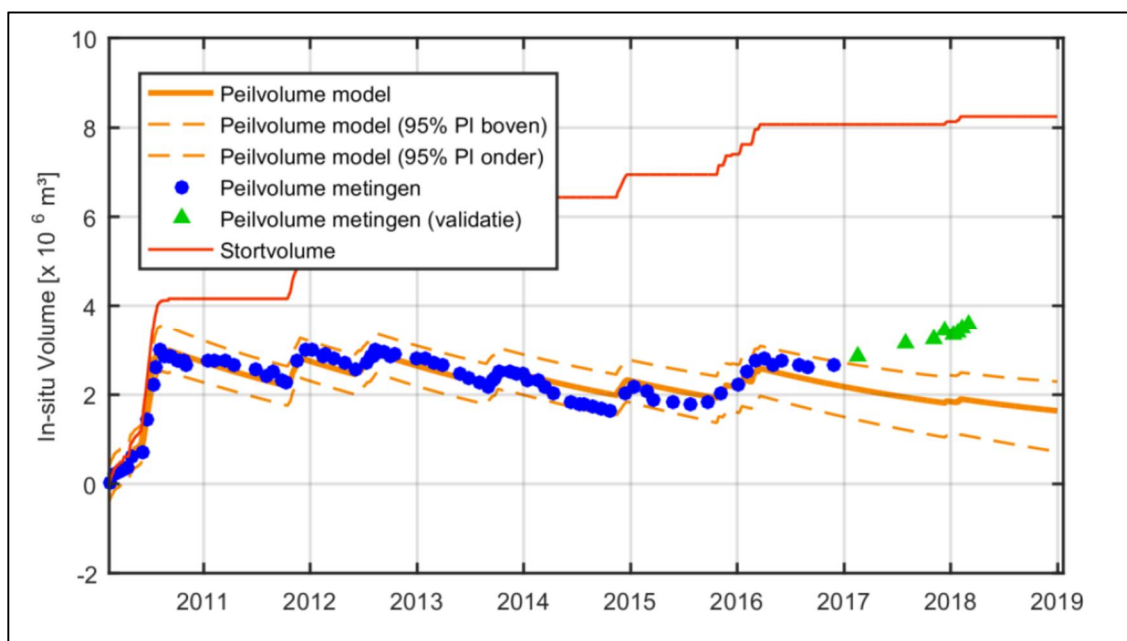
7-9). Plaatophoging en versteiling vindt van nature voortdurend plaats, maar het is niet duidelijk of er sprake is van een versnelling ten gevolge van toegenomen baggerwerkzaamheden, sedimentconcentraties of getij. Ter vergelijking geeft Figuur 7-13 de situatie van ruim 100 jaar geleden waar een gefragmenteerd beeld van de platen is te zien. De aangroei op het noordwestelijke deel (E in Figuur 7-7) is zeker een direct gevolg van de plaatrandstortingen.



Figuur 7-13 Gebied van Macrocel 4 en 5 rond 1895 (Müller, 1898)

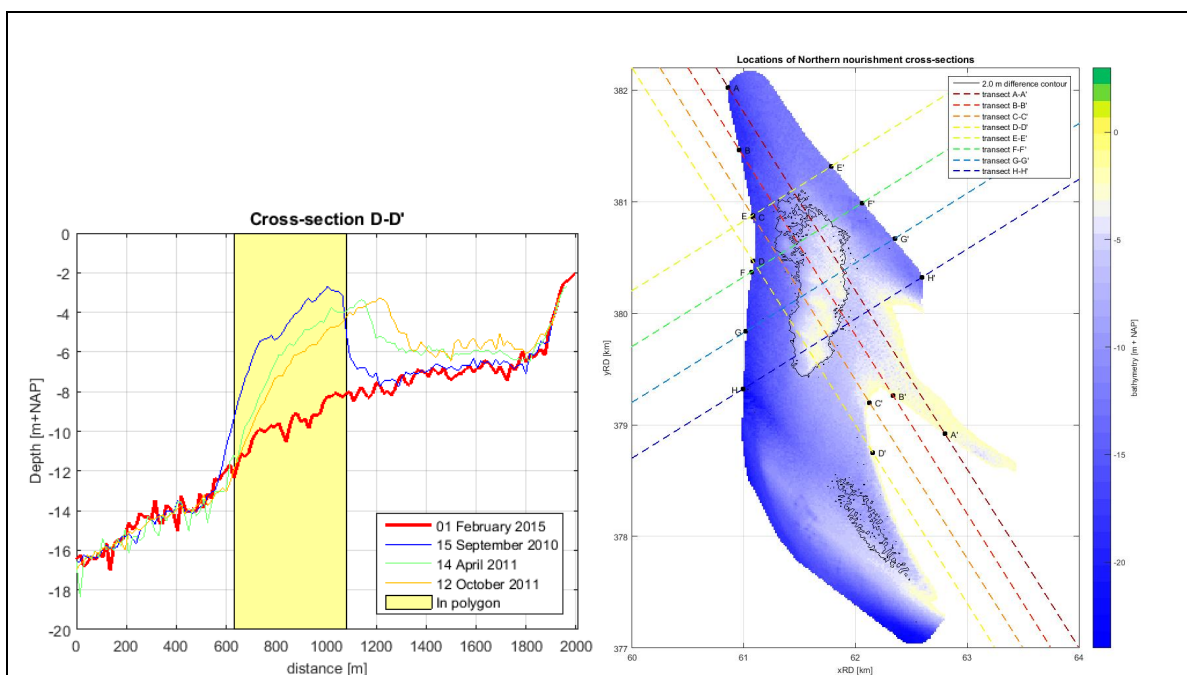
Figuur 7-14 laat zien hoeveel en wanneer de plaatrandstortingen zijn uitgevoerd en welk cumulatief volume is aangebracht. Tot nog toe is er ruim 8 miljoen m³ gestort, gemiddeld bijna 1 miljoen m³ per jaar. Dat is een behoorlijk volume, van dezelfde orde van grootte als de opgetreden geulverruiming in de hoofdgeul (paragraaf 7.2). Figuur 7-14 toont ook de ontwikkeling van het sedimentvolume in de plaatrandstortzone. Hieruit valt af te leiden dat er sterke erosie plaatsvindt van het gestorte materiaal en het volume ongeveer lineair afneemt, met ongeveer 0,5 miljoen m³ per jaar⁵. Vanaf 2016 neemt de erosie wat af waardoor meer gestort materiaal blijft liggen (het stabiliteitspercentage neemt toe). Waarschijnlijk wordt de afname van het aangebrachte sedimentvolume gelimiteerd door de netto transportcapaciteit. Voor de storting erodeerde het gebied (ook) met ca 0,5 miljoen m³ per jaar. Een aannemelijk denkmodel voor verspreiding vanaf de plaatrandstorting is dat de vloedstroming het sediment naar het Zuidergat brengt en dat het vanaf daar (terug) naar de drempel gaat. Door veranderingen van de bodemligging zou het sedimenttransport wel kunnen toenemen. De toegevoegde hoeveelheid in de afgelopen vijf jaar lijkt vergelijkbaar met wat jaarlijks afgevoerd kan worden. Dat is daarmee relatief groot.

⁵ In Figuur 7-7 is 'sedimentatie' te zien is, maar dat is het gevolg van het menselijk aangebrachte sediment



Figuur 7-14 Tijdsverloop van het volume gestort materiaal en de gepeilde volumeverschillen vanaf T0 (2010) voor plaatrandstoring Plaat van Walsoorden (Goossens & Depreiter, 2018).

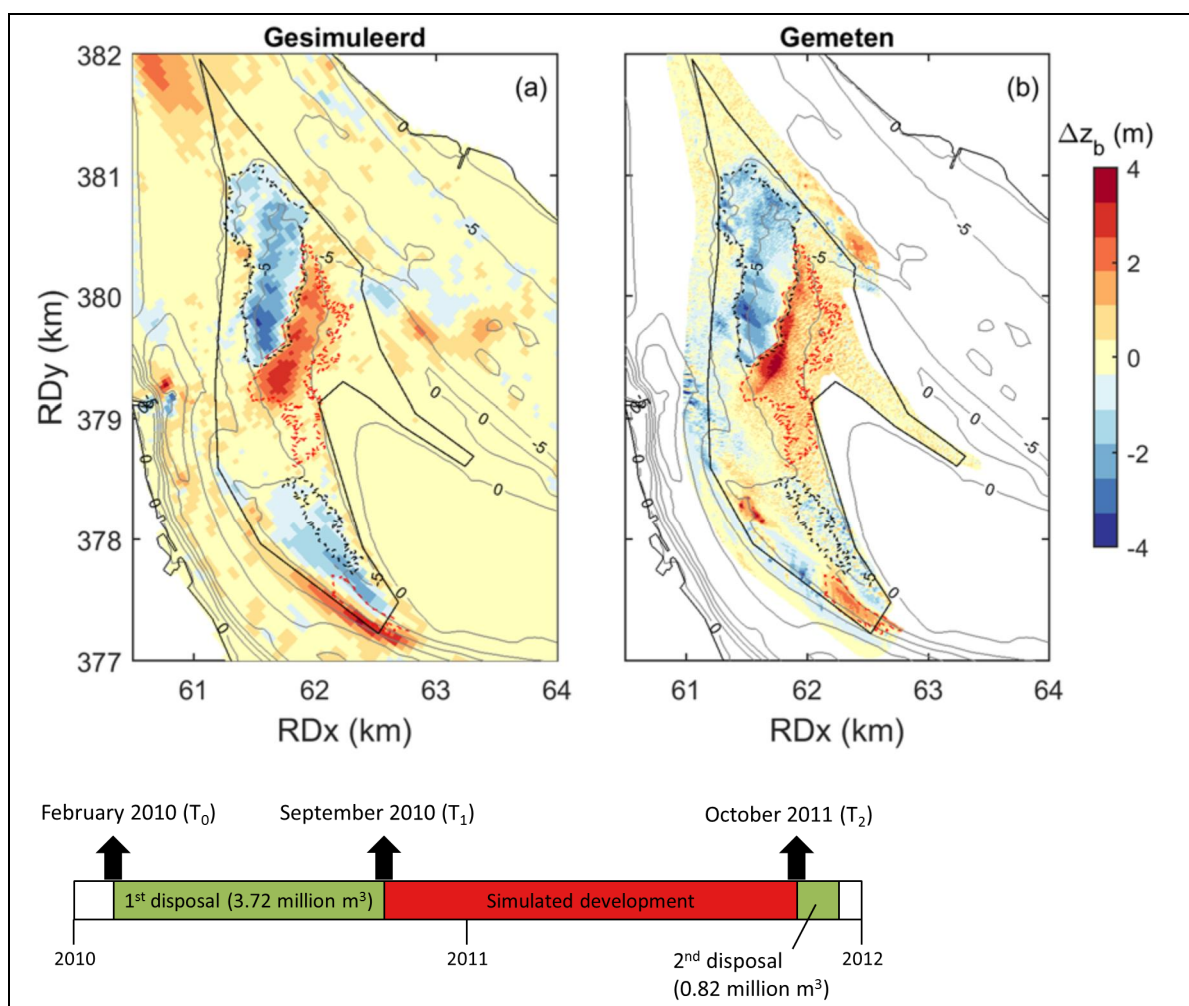
Behalve dat de plaatrandstortingen zorgen voor een luwte waar laagdynamisch gebied achter kan ontstaan, zijn ze ook een bron van sediment voor de plaat. De migratie van het gestorte sediment in de richting van de plaat is zichtbaar in de gedetailleerde lodingen die onderdeel zijn van de monitoring van de plaatrandstorting. Dit is zandtransport in de vorm van duinmigratie in het diepere, hoogdynamische deel van de plaatrand. Het gebaggerde en gestorte sediment is in het algemeen grover dan het van nature op de hogere delen van de platen afgezette sediment.



Figuur 7-15 Evolutie van de plaatrandstorting. Met representatieve raai aan zuidwestzijde

Figuur 7-15 toont de detaillodingen in een dwarsdoorsnede. De verplaatsing is duidelijk zichtbaar. Het sediment wordt echter niet verder de plaat op getransporteerd boven de gemiddelde waterlijn, omdat de stroming bij vloed daarvoor onvoldoende is. Alleen het gesuspendeerde fijnere materiaal wordt de plaat op getransporteerd.

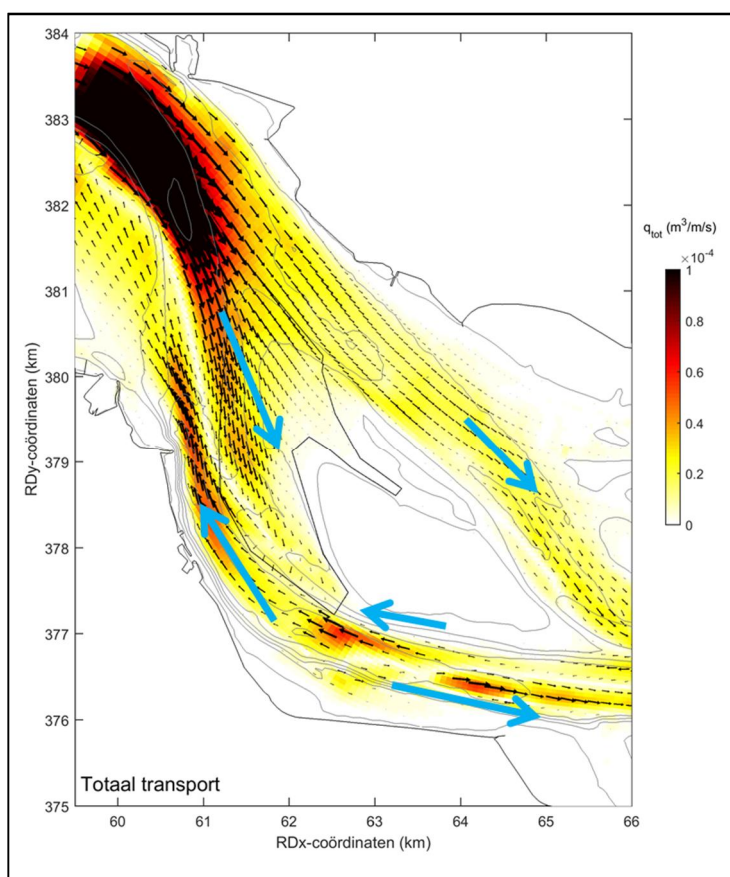
De aanwezigheid van schorren op de Plaat van Walsoorden is een bijzondere verandering ten opzichte van de situatie van vóór 2004, toen kweldervegetatie op de platen van de Westerschelde afwezig was. Waarschijnlijk was de hoogtetoename zodanig dat het zogenaamde 'window of opportunity' (Balke et al, 2011) voor de blijvende vestiging van kweldervegetatie werd geopend. Zodra kweldervegetatie is aangeslagen en het eerste jaar heeft overleefd is er sprake van een zelfversterkend proces door invang van sediment, voornamelijk slib, en blijven de schorren aanwezig. Door de hoge ligging van de plaat en de aanwezige schorren gaat minder stroming over de plaat en meer er langs (zie Figuur 7-17). Hierdoor krijgt de plaat steeds meer het karakter van 'een groot blok' waar de stroming 'langs gaat'. Het lijkt waarschijnlijk dat hierdoor weinig transport over de plaat heen gaat en er alleen invang van fijn zand en slib is tijdens hoogwater. Zoiets past in het conceptueel model voor geulplaatinteractie in paragraaf 2.4.3. De toename van de hoogte van de plaat heeft zich al eerder voorgedaan, tot halverwege de jaren '90 (Cleveringa, 2013a). De hoogte van de plaat en zeker van het centrale deel is nu stabiel: zie de dwarsdoorsnede in Figuur 7-9.



Figuur 7-16 Modelling van de plaatrandstorting (links) en metingen (rechts) van het erosie-sedimentatiepatroon. (Schrijvershof et al, 2018)

7.5.2 Modelling Plastrandstortingen Walsoorden

Schrijvershof en De Vet (2018) hebben de plastrandstortingen bij de Plaat van Walsoorden gemodelleerd. Zij maakten een uitsnede van het Delft3D NeVla numerieke model (paragraaf 2.5.2). Hierbij bouwden ze voort op Van Schaick (2015) en Willemsen (2016). Het onderzoek richtte zich op het morfodynamische gedrag van de plastrandstortingen: hoe snel eroderen ze en waar gaat het geërodeerde sediment naar toe? Daarvoor zijn de proefstortingen van 2010 en 2011 gesimuleerd. Figuur 7-16 laat zien dat het patroon van verplaatsing van de zuidelijke storting goed wordt gereproduceerd. De beste overeenkomst werd verkregen met een ruimtelijk variërende korrelgrootteverdeling van 210 μm (op de ondiepere delen) tot 300 μm (in de diepe geul). Het model laat zien dat het sediment dat erodeert (binnen een jaar ongeveer 40% van het gestorte materiaal) hoofdzakelijk in zuidoostelijke richting wordt getransporteerd (vloeddominant). De stortingen op de noordwestelijke plaatpunt migreren richting de plaat, zoals in Figuur 7-15. De studie laat zien dat de invloed van golven hierbij gering is. Het laagdynamisch areaal (het gebied met voldoende lage stroomsnelheden) neemt door de stortingen initieel toe, maar door de erosie daarna verdwijnt dit weer. Een belangrijke les van dergelijke modelsimulaties is dat de sedimenttransporten minstens zo complex zijn als de morfologische veranderingen en dat de korrelgrootteverdeling belangrijk is.



Figuur 7-17 Berekende en waargenomen transporten langs de Plaat van Walsoorden (Van der Werf, 2017)

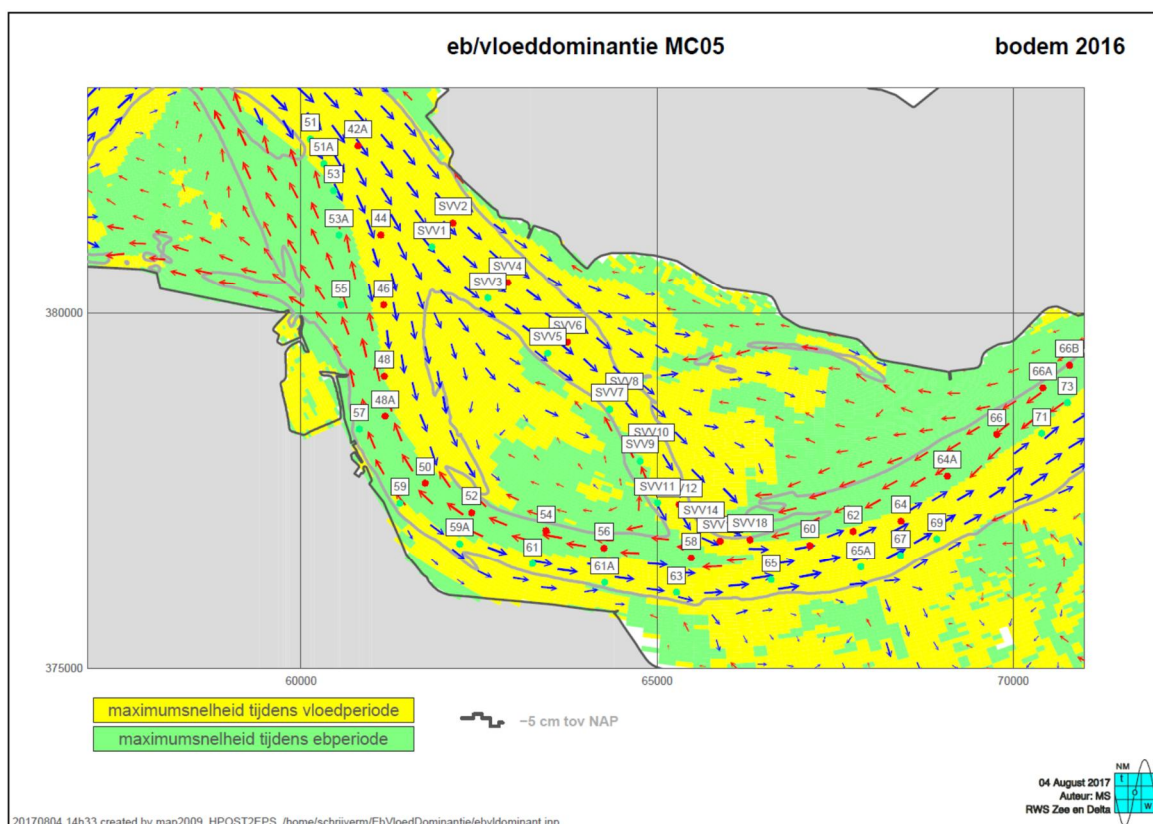
Figuur 7-17 toont de resultaten van modelonderzoek naar de waterbeweging en initiële sedimenttransporten in het Zuidergat en rond de Plaat van Walsoorden. De pijlen in Figuur 7-17 geven de sedimenttransportrichting op basis van duinmigratie in de detailpeilingen. Ten zuiden van de Plaat van Walsoorden is in de hoofdgeul sprake van vloedgericht transport terwijl langs de plastrand het transport in ebrichting plaatsvindt, waardoor zich hier een zandspit

uitbouwt. De grootste transporten treden op in de Put van Hansweert (de donkere vlek linksboven in de figuur). De transporten vanuit de Put van Hansweert zijn naar het zuidwesten en zuiden gericht, naar de Schaar van Waarde en de oostzijde van de Drempel van Hansweert. Dit is een vloed-gedomineerd transport, wat afwijkt van het beeld van de hoofdgeul als eb-gedomineerd. Omdat in het Zuidergat bij de oever en direct ten oosten van de Plaat van Ossensisse de transporten naar het noorden zijn gericht (ebrichting) en in de nevengeul het transport vloed georiënteerd, lijkt toch gesproken te kunnen worden van een circulatiecel van sediment.

7.6 Verspreiden in Macrocel 5

7.6.1 Storten in de hoofdgeul SH51

De stortzone in de hoofdgeul van Macrocel 5 ligt bij het Zuidergat (Figuur 1-7), daarnaast wordt gestort op de plaatranden (al besproken in paragraaf 7.5) en in de nevengeul (paragraaf 7.6.3). In Plancke et al (2017c) is de stortstrategie in Macrocel 5 in de omgeving van de Plaat van Walsoorden bekeken, en ook specifiek in SH51, op basis van de beschikbare monitoringsgegevens en modelberekeningen. Bezorgdheid was er over het afnemend volume van de nevengeulen (Schaar van Waarde, Schaar van Valkenisse en Zimmermangeul), Figuur 7-5, en de versnelde ophoging van de plaatranden. Figuur 7-18 geeft de berekende eb/vloeddominantie. Geconcludeerd wordt dat de stortingen in SH51 tot op heden geen ongewenste effecten heeft gehad, zoals verhoogde aanzanding van de haven van Walsoorden of de drempel van Hansweert en daarom voortgezet kunnen worden.



Figuur 7-18 Eb/vloeddominantie langs de Plaat van Walsoorden (Plancke et al, 2017c)

7.6.2 Voormalige stortingen in nabijheid Konijnenschor

Tot halverwege de jaren '90 werd er gestort bij een stortzone verder oostelijk dan SH51, in de nabijheid van het Konijnenschor. Het storten van specie op deze locatie was mogelijk een oorzaak van de sterke aanzanding op het Land van Saeftinghe die destijds optrad. Die zou vooral hebben plaatsgevonden in de geulen (Storm en Pieters, 1994) en is niet in de sedimentatiemetingen op de schorren waargenomen (Stapel en de Jong, 1998). De beperkte beschikbaarheid van (hoogte)gegevens van het Land van Saeftinghe maakt het lastig om een kwantitatieve analyse van een mogelijke relatie tussen stortingen bij het Konijnenschor en de sedimentatie op het Land van Saeftinghe uit te voeren (Menninga en Dam, 2013). Recent is nog een studie uitgevoerd naar de aanzanding in de krekken op het Land van Saeftinghe (Van Til en Clevering, 2018), zie hiervoor paragraaf 8.3.3.

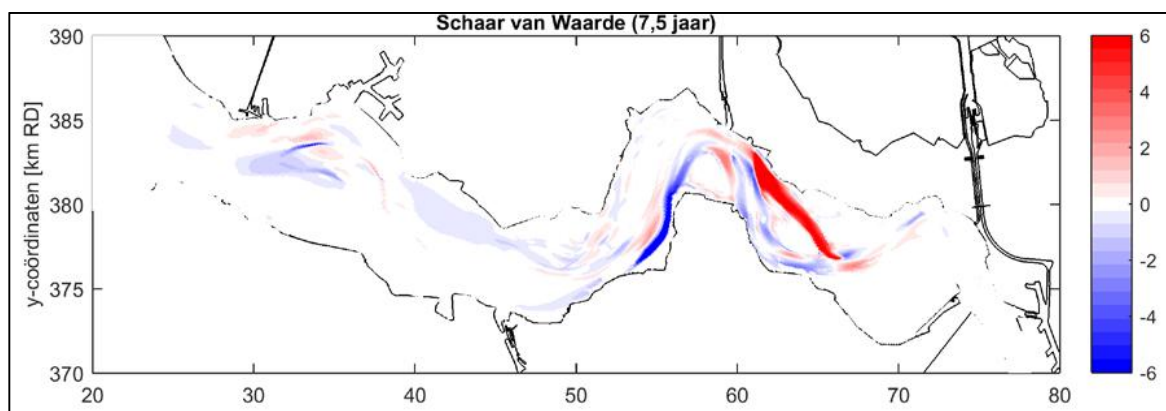
7.6.3 Verspreiden op SN51 in Schaar van Waarde

Naast het verspreiden op de plaatrandstortzone Plaat van Walsoorden is in de nevengeul Schaar van Waarde de stortzone SN51 aanwezig (Figuur 1-7). In SN51 is na 2012 niet meer gestort, vanwege de afname van het watervolume tot de waarschuwings- en ondergrens (Figuur 7-5). Merk op dat ruwweg de helft van de plaatrandstortzone Plaat van Walsoorden in (het rekenvak van) de nevengeul ligt.

Halverwege de jaren '90 is ook geconstateerd dat het watervolume in de nevengeul werd beperkt door de stortingen en dit heeft destijds geresulteerd in een wijziging van de stortstrategie in de Westerschelde. In de periode daarna, waarbij meer sediment naar het westen is gebracht en minder in de nevengeul is gestort, is het watervolume weer toegenomen en daaruit bleek de omkeerbaarheid van de ontwikkeling.

7.6.4 Modelsimulatie extreem storten in Schaar van Waarde

Er zijn modelsimulaties uitgevoerd waarbij alle vrijkomende baggerspecie uit de hele Westerschelde in de Schaar van Waarde (SN51) is gestort, net als voor twee andere nevengeulen (Everingen, en Middeltgat, zie 5.7.2 en 6.3.3), (Schrijvershof en Vroom, 2016). De conclusie uit deze meest extreme, in theorie nog uitvoerbare, scenario's is dat, wanneer wordt getracht de getijslag te beïnvloeden via verondieping van een nevengeul, Macrocel 3 hiervoor waarschijnlijk de beste optie is (zie Figuur 5-20). De opvulling van de Schaar van Waarde had een marginaal effect op de waterstanden in de andere delen van de Westerschelde en ook slechts beperkte invloed op de evolutie van de geulen in aangrenzende macrocellen. Figuur 7-19 geeft de erosie-sedimentatiekaart van het scenario 'Schaar van Waarde'.



Figuur 7-19 Modelresultaat extreem stortscenario Schaar van Waarde (Schrijvershof en Vroom, 2016)

7.7 Slikken en schorren langs de oevers

De Slikken en Schorren van Waarde langs de noordelijke oever in Macrocel 5 vertonen aanslibbing (I in Figuur 7-7, C in Figuur 7-8). Alleen het uitbochten van de Geul van Zimmerman geeft lokaal wat erosie (H in Figuur 7-7, F in Figuur 7-8). Ooit lagen hier het in 1682 verdrongen dorp Valkenisse en het fort Keizershoofd, nu archeologische monumenten. In 1884 werden hier strekdammen aangelegd als slikvangers nadat in 1864 al een schorgebied was ingedijkt, de Emmanuelpolder. In 1953 is de zeedijk hier bezweken, maar daarna is hier weer een 'rijp' schorrengebied ontstaan. In 1967 werd besloten dit gebied niet verder in te dijken uit natuurwetenschappelijk oogpunt (Wilderom, 1968).

Ophoging van de Slikken van Waarde wordt nu bevorderd door de twee lange strekdammen die in 2003 zijn aangelegd om het archeologisch monument Valkenisse te beschermen tegen erosie door de toen kustwaarts migrerende geul, de Schaar van Waarde, zie Figuur 7-20.

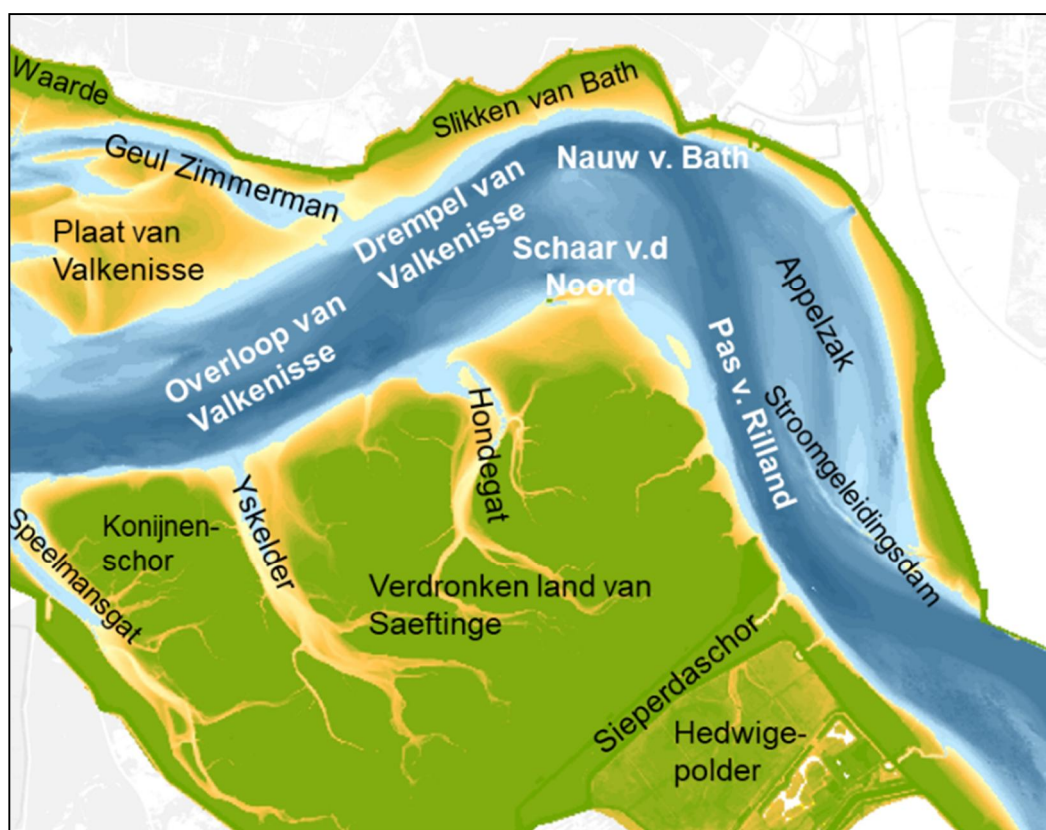


Figuur 7-20 Luchtfoto 2017 met de strekdammen bij Waarde en de locatie van het archeologisch monument Valkenisse.

8 Macrocel 6, rond het nauw van Bath

8.1 Beschrijving morfologisch systeem Macrocel 6

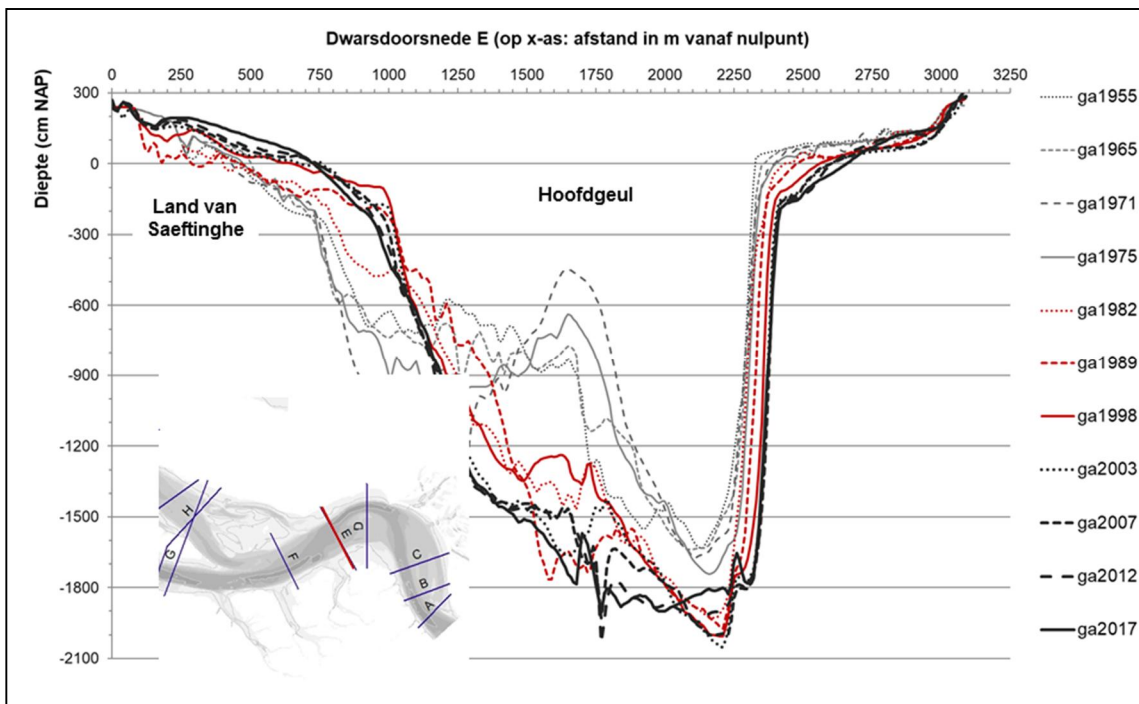
In de Macrocellen 6 en 7 loopt de hoofdgeul door diep uitgesleten buitenbochten van de Westerschelde. Na de Overloop van Valkenisse (Macrocel 5) heet ze Nauw van Bath en gaat in Macrocel 7 over in de Pas van Rilland (Figuur 8-1). De nevengeul slingert door de binnenbochten en heet Schaar van de Noord in Macrocel 6, Appelzak in Macrocel 7 en Schaar van Ouden Doel in België. Het overblijfsel van het zandbankencomplex in Macrocel 6 komt tegenwoordig nog nauwelijks boven water (het ligt onder -5 m, zie dwarsprofielen Figuur 8-3). Er is geen sprake meer van een zandplaat met laagdynamisch areaal en vegetatie. Voorheen wel, getuige de naam Plaat van de Noord of Plaat van Saeftinghe. De voormalige zandbank die de scheiding vormde tussen hoofd- en nevengeul in Macrocel 7 (nu geheel onder water) heet de Ballastplaat.



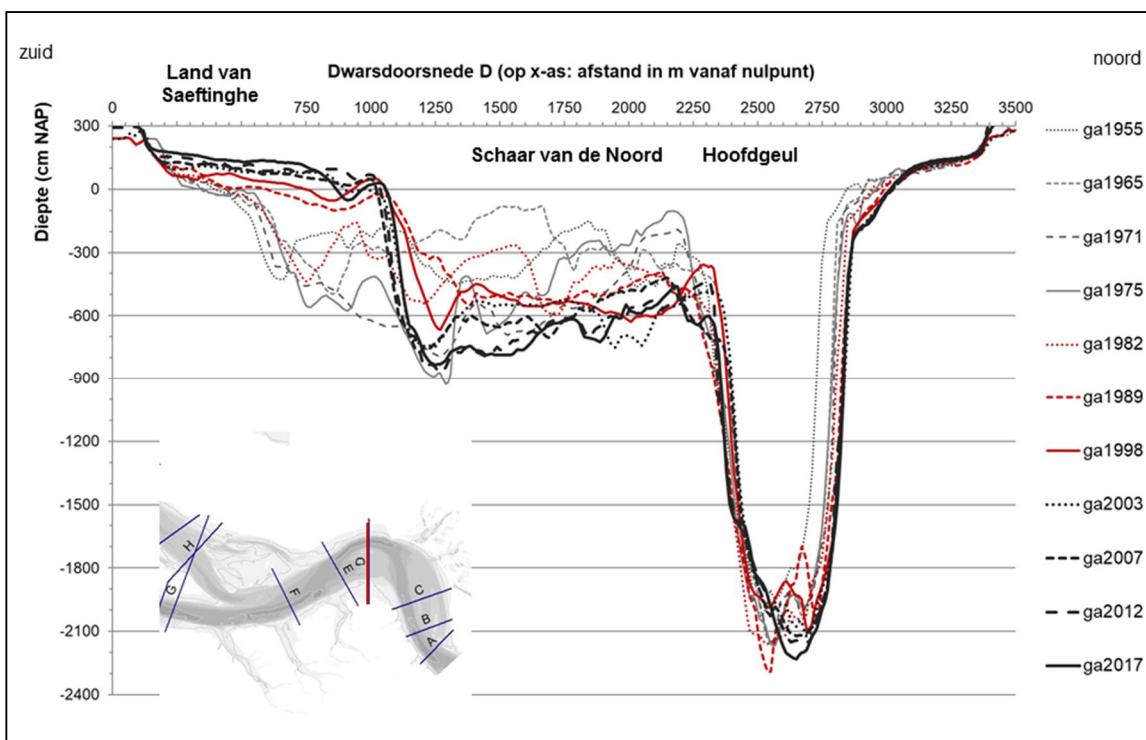
Figuur 8-1 Morfologische elementen Macrocellen 6 en 7

Het 36 km² grote Verdronken Land van Saeftinghe grenst aan de Macrocellen 5, 6 en 7. Het gebied is na de militaire inundatie van 1584 nooit meer helemaal ingedijkt. Sinds 1975 valt het onder de Natuurbeschermingswet. Het bestaat uit geulen, slikken en hoog (tot +3 m) opgeslibde brakwatergetijdeshorren (Storm & Pieters, 1994). De voormalige Polder van Namen heet nu Konijnenschor, de Speyerpolder Nol van Baalhoek. Door de introductie van Engels slijkgras (*Spartina Maritima*) op de Zeeuwse slikken vanaf 1924 is de schorvorming hier sterk bevorderd.

Figuur 8-2 en Figuur 8-3 geven dwarsprofielen door hoofd- en nevengeul in Macrocel 6 met daartussen de langzaam lager wordende zandbanken. Sinds 2010 is de dynamiek gering.



Figuur 8-2 Dwarsprofiel E in Macrocel 6, 1955-2010



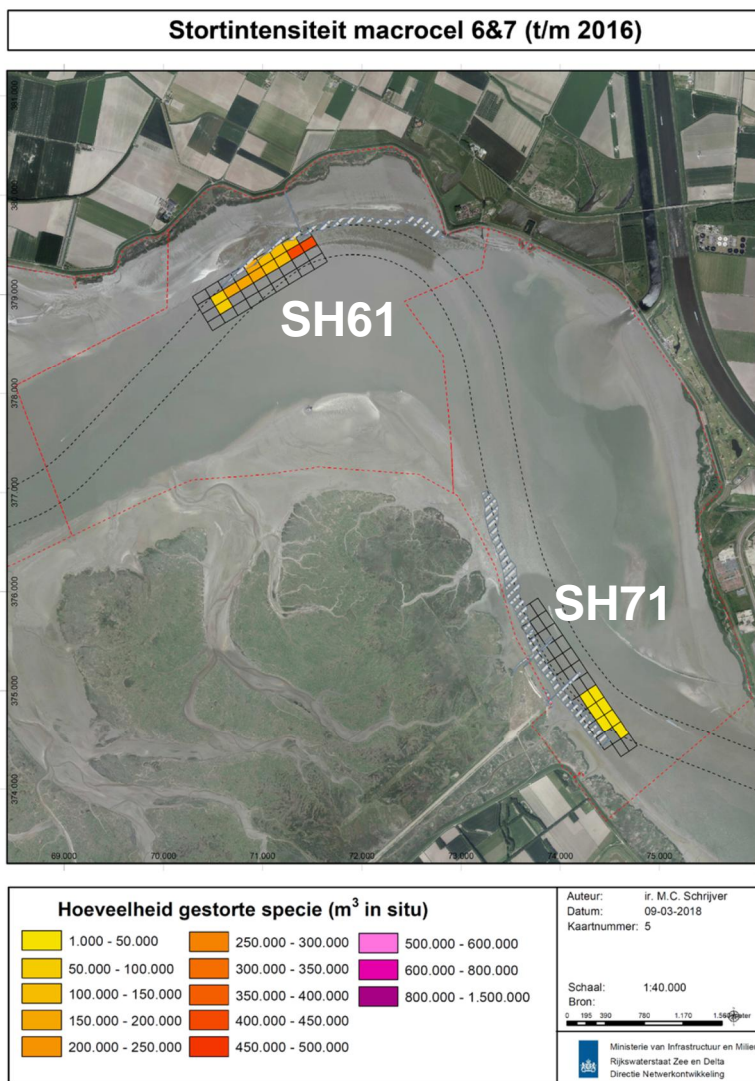
Figuur 8-3 Dwarsprofiel D in Macrocel 6, 1955-2010

In 1867 werd als onderdeel van de aanleg van de spoorverbinding van Bergen op Zoom naar Middelburg het Kreekrak afgedamd en daarmee werd de verbinding tussen Ooster- en Westerscheldeverbinding feitelijk verbroken. Er ontstonden nieuwe schorgebieden in het oostelijk deel van de Macrocellen 6 en 7, die vervolgens weer zijn ingepolderd. Bij Bath, waar in 1786 een fort werd gebouwd voor de tolheffing voor de scheepvaart naar Antwerpen, liggen buitendijks nu de gelijknamige slikken.

Bij de aanleg van de Schelde-Rijnverbinding, voltooid in 1986 met sluiting van de Oesterdam, waarbij het zoete Volkerak-Zoommeer is ontstaan en waarvoor de Bathse spuisluis is gemaakt, is langs het kanaal in 1971 nog een strook schorgebied van enkele honderden ha bij Ossendrecht ingedijkt, waarvan nu nog een smalle strook schorgebied resteert.

8.2 Toegankelijkheid

Om de vaardiepte te onderhouden wordt er gebaggerd op de Drempel van Valkenisse en in de Bocht van Bath. Als stortlocaties doen alleen de diepe geulen dienst, SH61 in het Nauw van Bath en SH71 in de Appelzak, zie Figuur 8-4.



Figuur 8-4 Stortlocaties en stortintensiteit in Macrocel 6 en 7 (2010 t/m 2016), SH61 en SH71 (Schrijver, 2018)

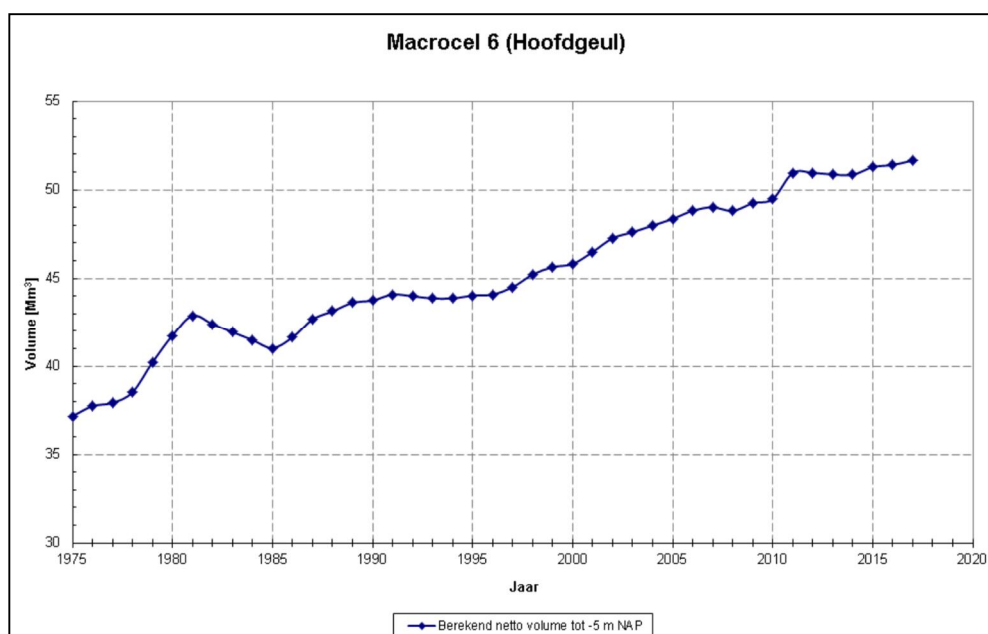
De nevengeul Schaar van de Noord wordt gebruikt voor de binnenscheepvaart en moet dus ook op diepte blijven. Er wordt een proefbaggeractie voorbereid om de nevengeul te baggeren tot LAT -2,70 m (-5,70 m NAP) inclusief overdiepte en tolerantie.

De stortlocatie SN61 in de diepe delen van de nevengeul Schaar van de Noord is wel vergund, maar werd tot nog toe uit voorzorg niet benut, vanwege de beperkte beschikbare vaardiepte. Uit recente kuberingen blijkt dat er toch operationele ruimte is. Om te bepalen waar stortingen in SN61 dan het beste zouden kunnen plaatsvinden is een eerste, modelmatige analyse van het sedimenttransport uitgevoerd (Plancke et al, 2018). Hieruit bleek dat er sprake is van vloedgericht transport. Een vervolganalyse en/of pilot moet helpen te bepalen of materiaal naar de stroomopwaarts gelegen drempel in de Schaar van de Noord toe (vloeddominant) of juist daarvandaan (ebdominant) migreert, zie verder paragraaf 8.3.2.

8.3 Morfologische ontwikkelingen

8.3.1 Ontwikkelingen geulen en slikken

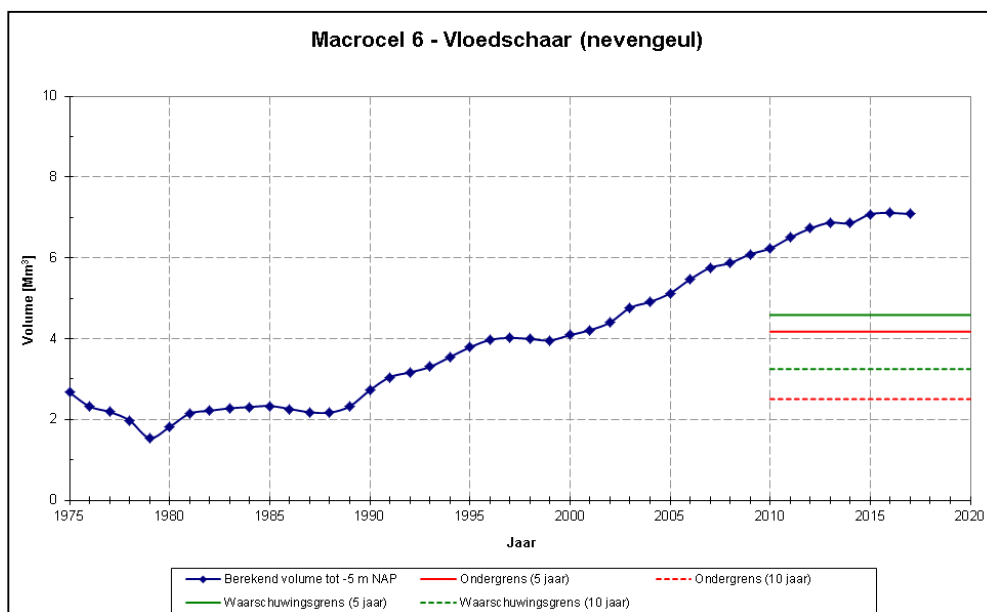
Zowel de hoofd- als de nevengeul in Macrocel 6 nemen toe in volume, zie Figuur 8-5 en Figuur 8-6. Het is aannemelijk dat deze uitruiming komt omdat gebaggerd sediment stroomafwaarts wordt gestort en een groot deel van het sediment dat op de drempel in de hoofdgeul sedimenteert, afkomstig is uit de nabije omgeving, waaronder de hoofdgeul. Hoewel de Schaar van de Noord uitruimt (Figuur 8-6 en Figuur 8-7, 6B) zijn er lokaal toch hogere zandribbels waardoor overwogen wordt te baggeren.



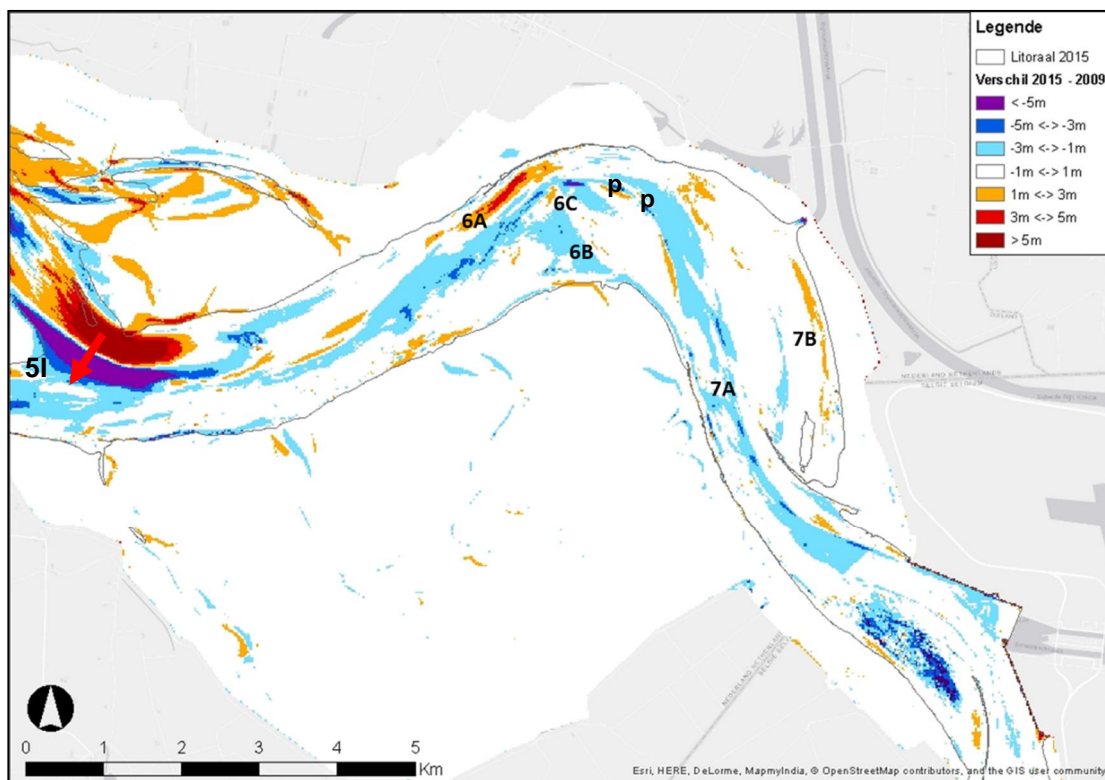
Figuur 8-5 Volumeverandering hoofd-geul (Nauw van Bath) in Macrocel 6 (Schrijver, 2018).

Barneveld et al (2018) rapporteert over de morfologische ontwikkelingen in de periode 2009-2015 (Figuur 8-7 en Figuur 8-8 voor de Macrocellen 6 en 7). Het areaal intergetijdengebied nam af. Er is wel sedimentatie op het ondiepere sublitoraal aan de randen (7B). De slikken van het Land van Saefinghe erodeerden, (7C). Het slik ten noorden van de uitlaat van Bathse Spuikanaal sedimenteerde (7D) en het slik ten zuiden erodeerde (7E). Het slik nabij Groot Buitenschor heeft sedimentatie (7F). De lokale zandbank tussen de eb- en vloedgeulen, die niet meer boven de laagwaterlijn uitkomt erodeert verder, zie Figuur 8-7 (6C) en is herkenbaar

als plaatvallengebied (p), dat met het afnemen van de zandbanken nu minder actief is. Vergeleken met de overige macrocellen is de morfodynamiek in Macrocellen 6 en 7 gering. In de figuren is ook de rotatie van de Schaar van Valkenisse te zien in Macrocel 5 (5I), die veel meer morfodynamiek vertoont.

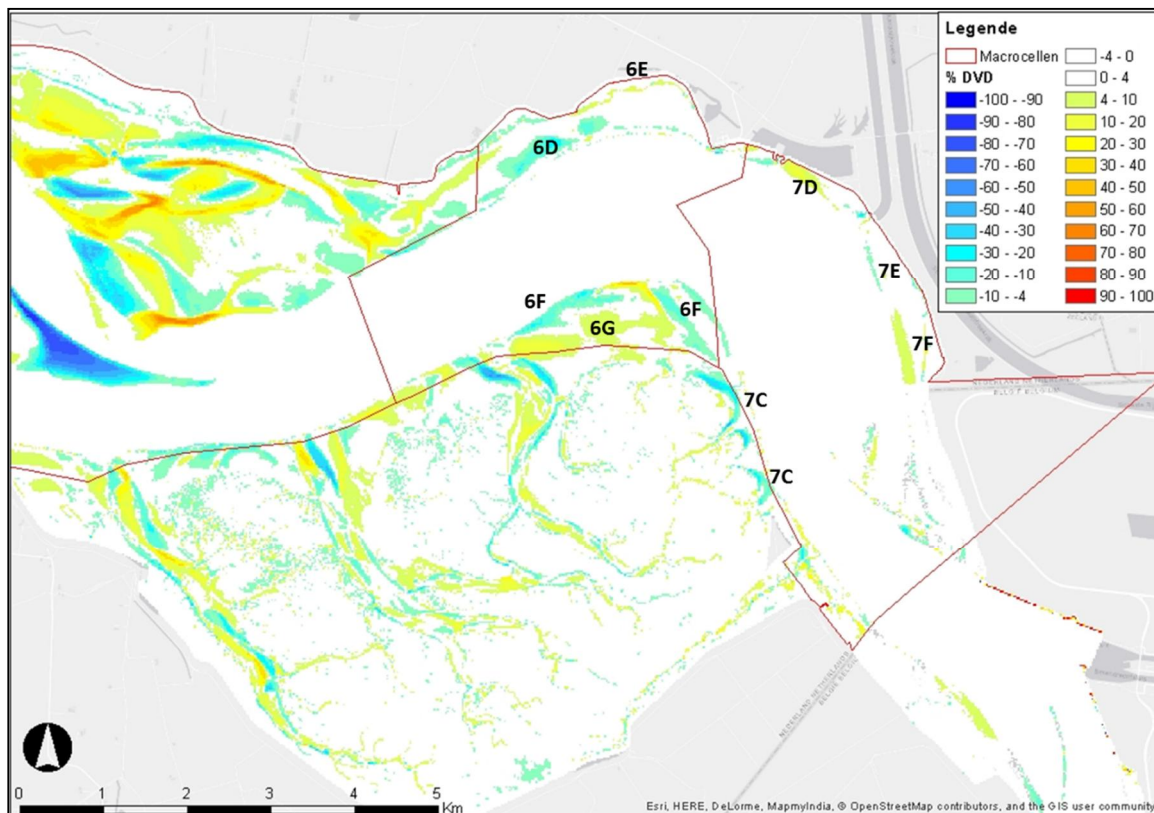


Figuur 8-6 Volumeverandering nevengeul (Schaar van de Noord) in Macrocel 6 (Schrijver, 2018).



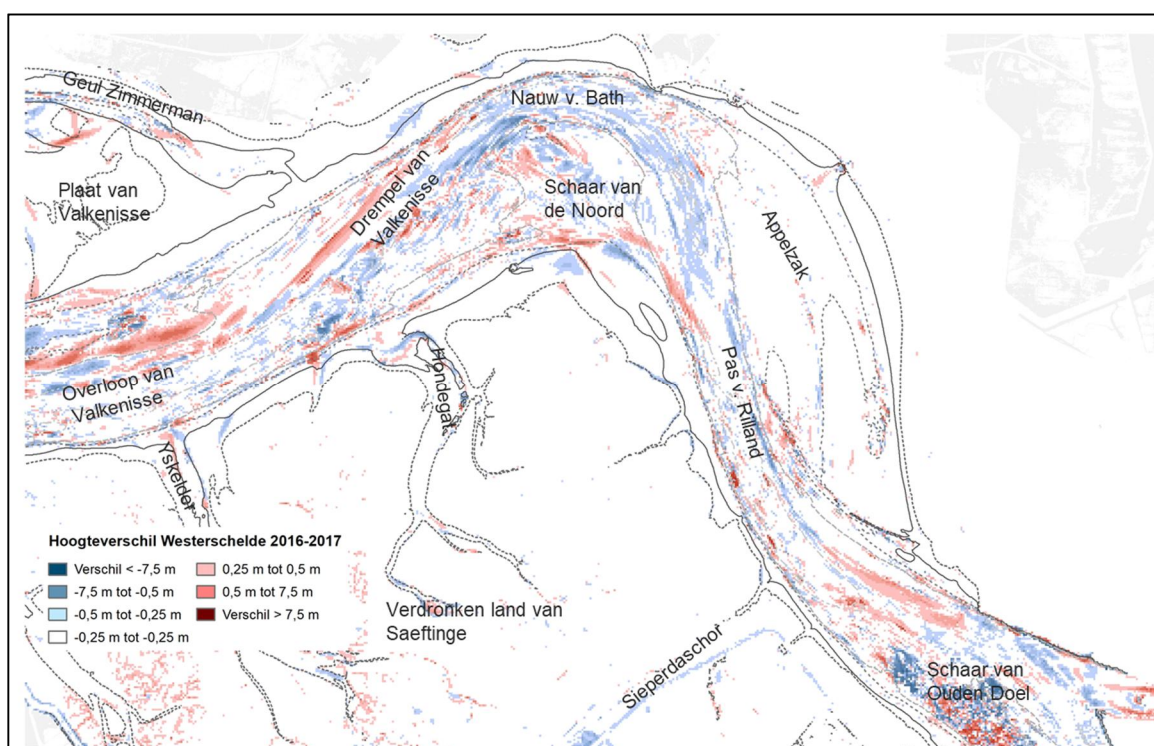
Figuur 8-7 Verschil bathymetrie 2009-2015. (6A) stort SH61, (6B) uitruimen Schaar van de Noord, (6C) erosie zandbanken (p) plaatvallen. (5I) rotatie Schaar van Valkenisse. (7A) uitruiming Pas van Rilland, (7B) sedimentatie randen Appelzak (Barneveld et al, 2018, aangevuld).

De ontwikkelingen in de hoger gelegen delen in de Macrocellen 6 en 7 is te zien in Figuur 8-8, met het verschil tussen 2009-2015 in droogvalduur. Terwijl de onderwateroeveren op sommige plaatsen afkalven bijv. Land van Saefthinghe, Figuur 8-8 (6F), (7C), hogen de hoger gelegen delen verder op (6G), net als (7D) en (7F).



Figuur 8-8 Morfologische ontwikkelingen Macrocel 6 en 7, verschil droogvalduur (in %) 2009-2015. Erosie slikken bij Bath (6D) en laaggelegen litoraal Saefthinghe (6F), (7C). Hooggelegen litoraal hoogt op (6E), (6G). Sedimentatie slikken ten noorden van Bathse Spuikanaal (7D) en Groot Buitenschor (Barneveld et al, 2018).

In de recente verschilkaart 2016-2017 (Figuur 8-9) zijn dezelfde ontwikkelingen wel terug te zien, maar in zeer geringe mate vanwege de beperkte dynamiek.

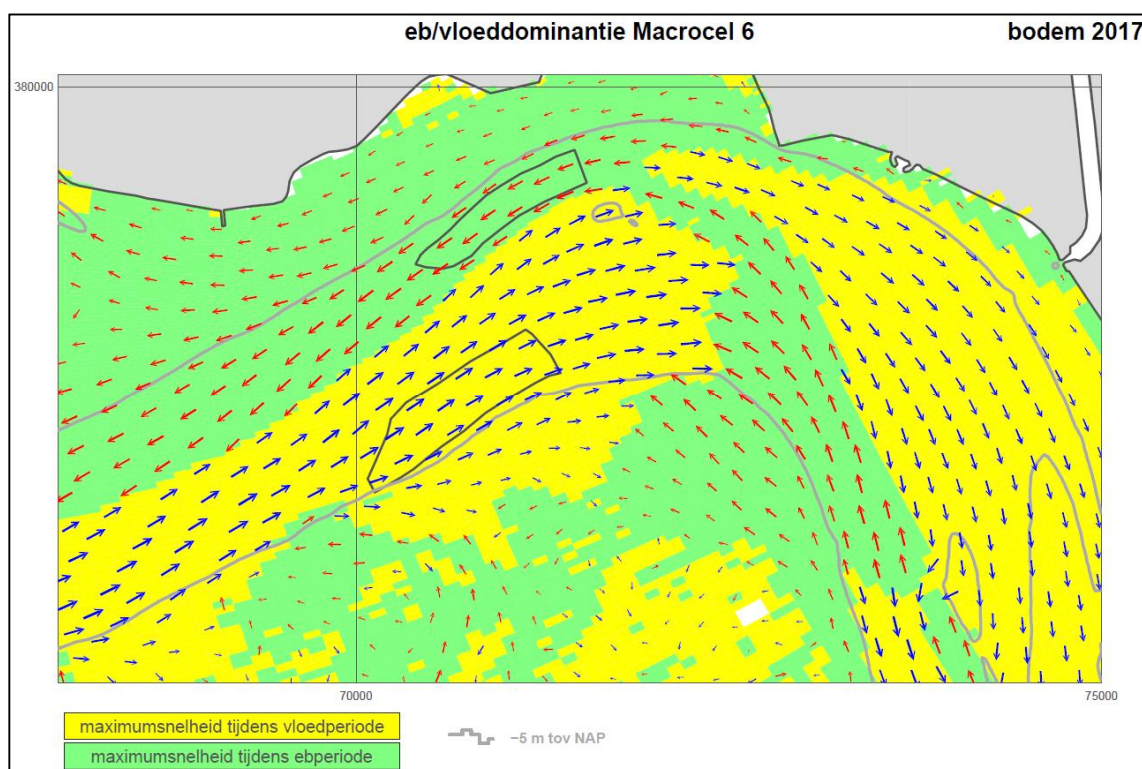


Figuur 8-9 Verschilkaart bathymetrie 2016-2017 Macrocel 6 en 7

8.3.2 Verspreiden in de nevengeul SN61

Het stortvak SN61 is vergund voor 300.000 m³/jaar. Omdat deze nevengeul ook bevaarbaar moet blijven (-2 m LAT) wordt het stortvak tot nog toe niet gebruikt, ondanks feit dat het dicht bij de voornaamste baggerlocaties ligt.

Plancke et al (2018) deed hierom een studie naar het effect van de stortingen in Macrocel 6, zoals eerder is gedaan voor de Macrocellen 5 en 1 (Figuur 3-14). Figuur 8-10 geeft de berekende eb/vloeddominantie. Er is er ook gekeken naar het sedimenttransport op basis van gemeten duinmigratie. Omdat er sprake is van vloeddominant transport kan het gestorte sediment terugkeren in de Schaar van de Noord en op de drempel in de Bocht van Bath. Voorgesteld is een beperkte (250.000 m³) stortproef uit te voeren in het zuidelijk deel van het stortvak en het effect op de geuldiepte te monitoren.

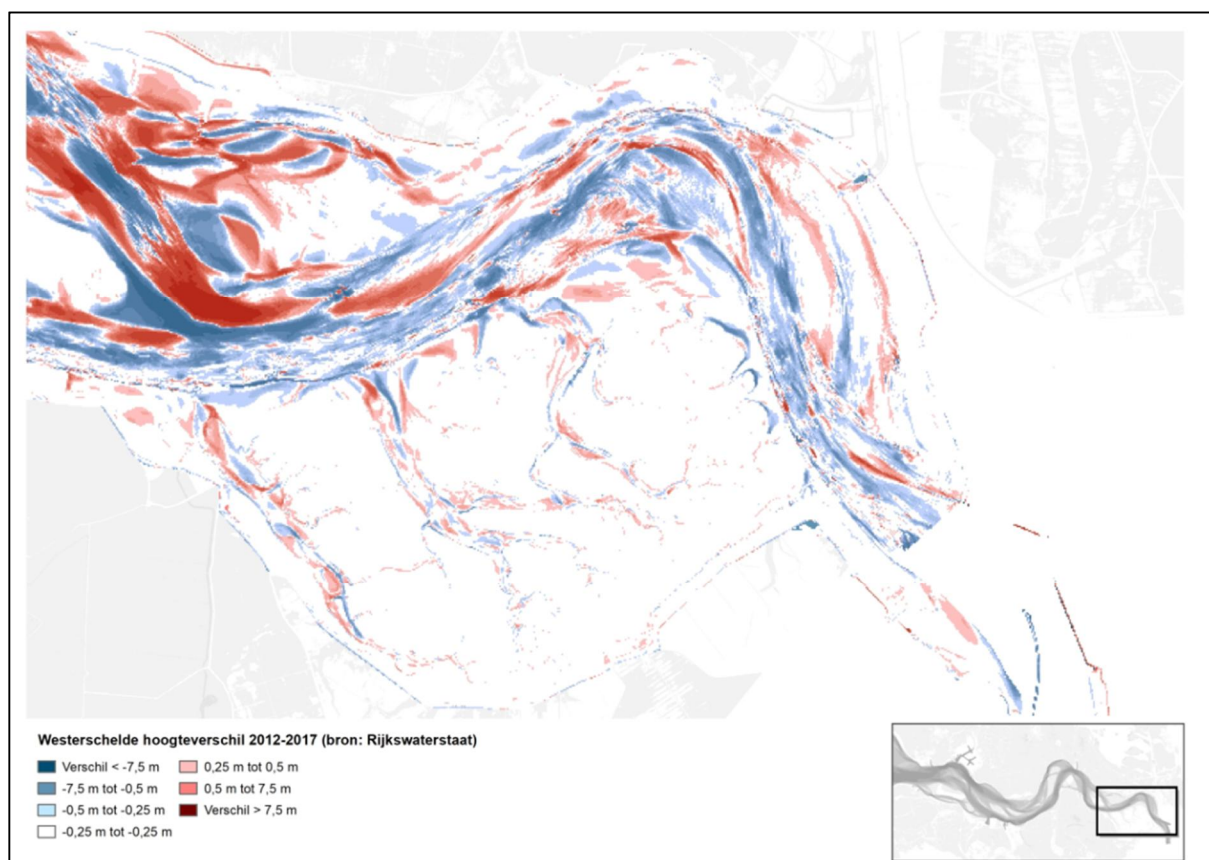


Figuur 8-10 Eb/Vloeddominantie Schaar van de Noord (Plancke, 2018)

8.3.3 Ontwikkelingen in het Land van Saeftinghe

Het Land van Saeftinghe is een omvangrijk schorregebied in het oosten van de Westerschelde (paragraaf 8.1). Tweederde van het gebied is begroeid en circa eenderde bestaat uit onbegroeide platen en getijdegeulen. Tijdens veldobservaties in de jaren '90 van de vorige eeuw werd een snelle sedimentatie geconstateerd na uitvoering van omvangrijke stortingen van meer dan 6 miljoen m³ op de stortzone "Konijnenschor" (zie ook paragraaf 7.6.2). Veldmetingen van de hoogte hebben destijds niet plaatsgevonden en de metingen van de sedimentatiesnelheden (Stapel & de Jong, 1998) waren beperkt, zodat een kwantitatieve analyse van deze ontwikkeling niet kon worden uitgevoerd.

Van Til en Cleveringa (2018) deden onderzoek naar het effect van de proefstortingen op de geulen in het Land van Saeftinghe. De verschilkaart in Figuur 8-11 laat zien dat de meeste veranderingen in de bodemhoogte plaatsvonden in de geulen. De trendmatige hoogtetoename van het schor in het Land van Saeftinghe bedraagt van 2009 tot en met 2017 gemiddeld 6 mm per jaar. De hoogteveranderingen in de geultjes in het Land van Saeftinghe zijn groter, waarbij de geultjes in oost en west gemiddeld een toename van de hoogte laten zien en het middelste geultje een afname. Doordat de schorren niet vaak overstromen treden de meeste morfologische veranderingen op in de geulen en niet op het schor.



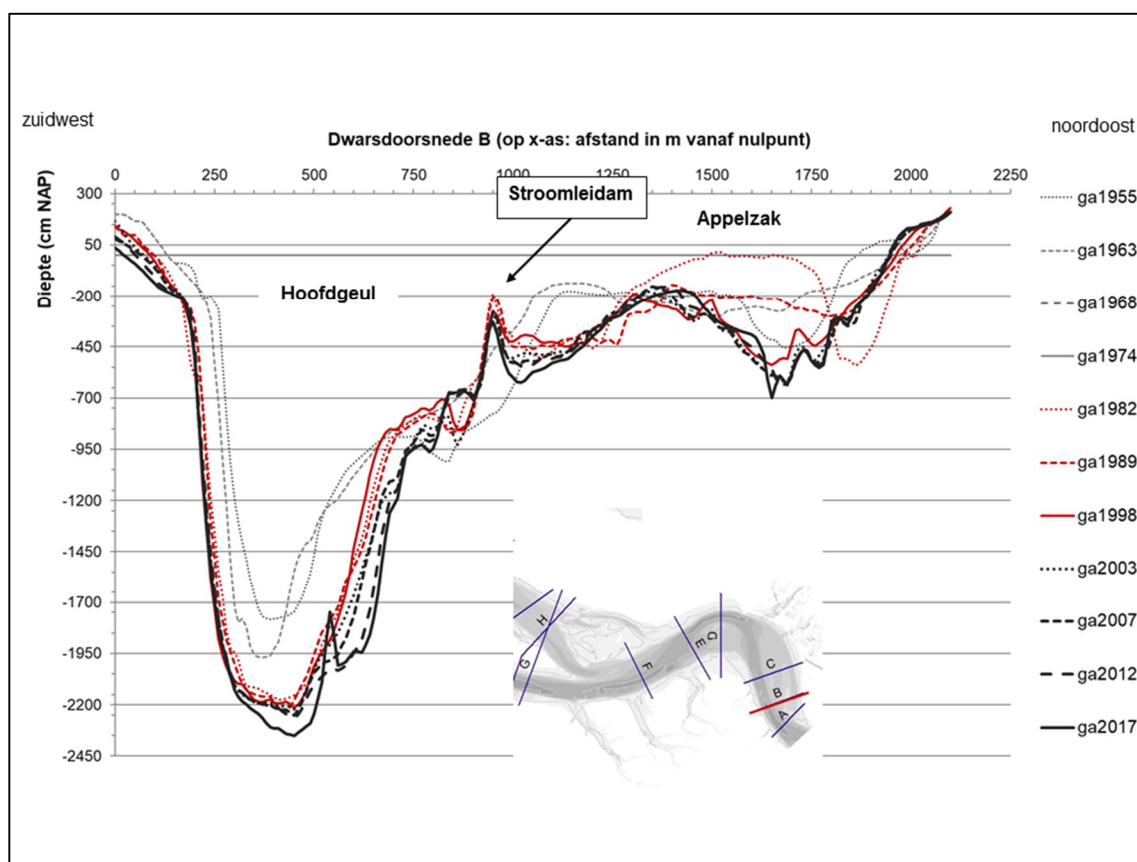
Figuur 8-11 De bodemveranderingen op het Land van Saeftinghe in de periode 2012-2017, gebaseerd op de Vaklodingendata (Van Til en Cleveringa, 2018)

9 Macrocel 7, rond Pas van Rilland

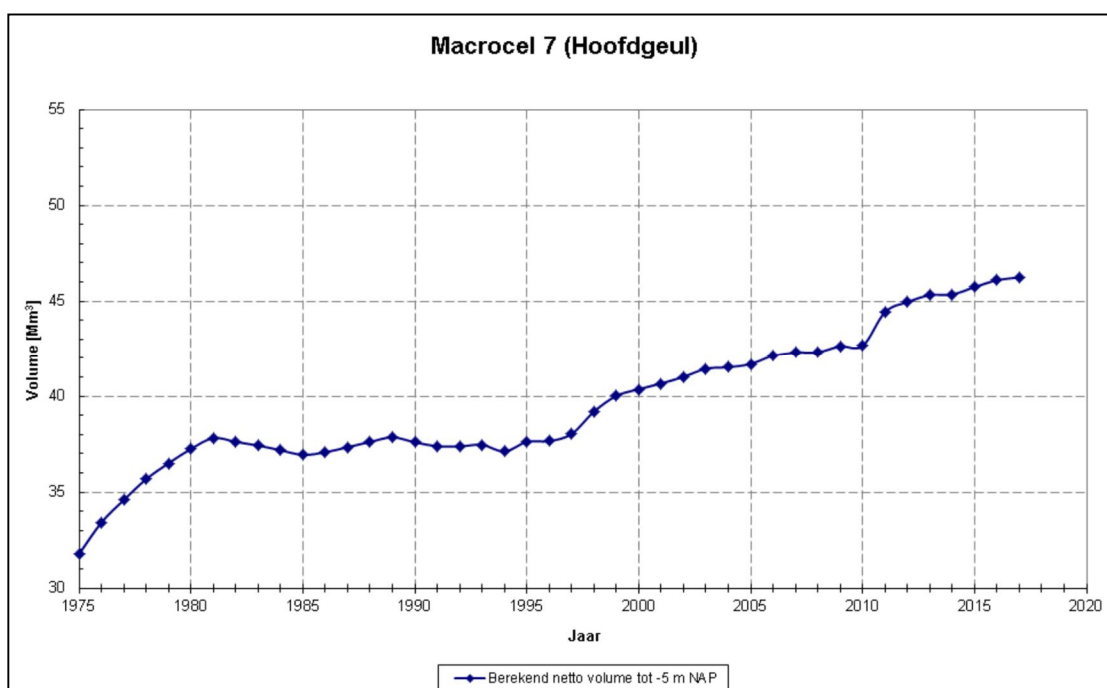
9.1 Beschrijving

De geulen en hun namen zijn al beschreven in paragraaf 8.1 aan de hand van Figuur 8-1. In Macrocel 7 vormt de Ballastplaat de natuurlijke scheiding tussen hoofd- en nevengeul, maar sinds 1971 ligt hier de Stroomleidam die nu de scheiding vormt tussen hoofd- en nevengeul, zie Figuur 9-1. Het is aannemelijk dat deze dam invloed heeft op het sedimenttransport. Andere grote ingrepen in dit gebied zijn geweest de afdamming van het Kreekrak (1867), de inpoldering van schorgebieden ten behoeve van de Schelde-Rijnverbinding (tot 1986) en de uitbreidingen van de haven van Antwerpen.

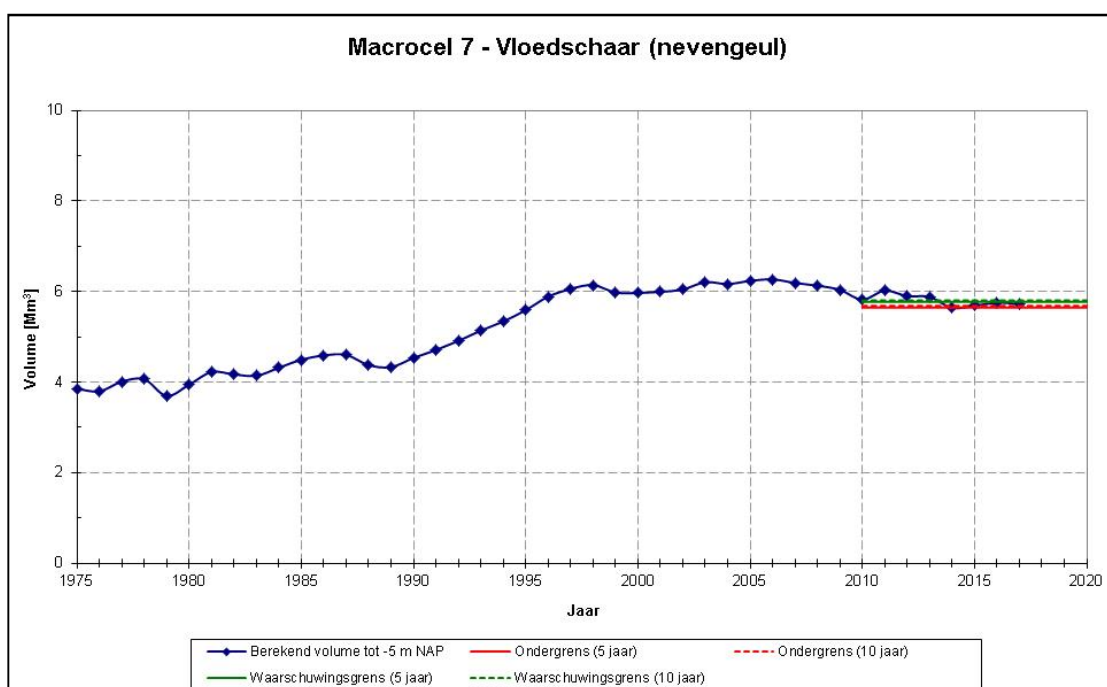
Ongeveer op de Nederlands-Belgische grens tussen Saeftinghe en Zandvliet, is in 1965 een grote zinker aangelegd in een gebaggerde sleuf, om de Westerschelde te kruisen voor gas- en zoetwatertransportleidingen van Noord-Brabant naar Zeeuws-Vlaanderen. Deze leidingenstraat loopt zuidelijk verder door het Verdronken Land van Saeftinghe: de met grond afgedekte Gasdam (Figuur 8-1), die nu de grens vormt tussen het Land van Saeftinghe en het Sieperdaschor, dat weer grenst aan de in 1907 heringedijkte Hertogin Hedwigepolder en de Prosperpolder. Het Sieperdaschor is ontstaan toen in 1990 bij storm de zomerdijk bezweek en het gebied, toen nog de Selenapolder genoemd, onderliep. Deze onbedoelde ontpoldering is sindsdien als natuurgebied gehandhaafd.



Figuur 9-1 Dwarsprofiel B in Macrocel 7 met Stroomleidam tussen hoofdgeul Pas van Rilland en nevengeul Appelzak (1955-2017)



Figuur 9-2 Volumeverandering hoofdgeul (Pas van Rilland) in Macrocel 7 (Schrijver, 2018).



Figuur 9-3 Volumeverandering nevengeul (Appelzak) in Macrocel 7 (Schrijver, 2018).

9.2 Morfologische ontwikkelingen

In Macrocel 7 neemt de hoofdgeul, net als in Macrocel 6, toe in volume, zie Figuur 9-2, Figuur 9-3 en Figuur 8-7 (7A). Er wordt gestort in de hoofdgeul (SH71, Figuur 8-4). De nevengeul de Appelzak is in feite afgesloten door de Stroomleidam, hier vindt sedimentatie plaats, Figuur 8-7 (7B). Het volume van de nevengeul blijft min of meer gelijk (Figuur 9-3). Het areaal intergetijdengebied nam toe (Barneveld et al, 2018).

De ontwikkelingen in de hoger gelegen delen in Macrocel 7 zijn te zien in Figuur 8-8. Terwijl de onderwateroevers op sommige plaatsen afkalven, zoals langs de oostelijke rand van het Land van Saefthinghe, Figuur 8-8, (7C) hogen de hoger gelegen delen verder op (6G), net als de slikken ten noorden van Bathse Spuikanaal (7D) en Groot Buitenschor (7F), maar er vindt erosie plaats bij het schor van Ossendrecht ten zuiden van Bathse Spuikanaal (7E).

10 Referenties

- Arcadis (2014), Ecotopen in de Westerschelde, LTV Veiligheid en Toegankelijkheid, C003041.002666
- Beirinckx et al, (2014), Plan van Aanpak Onderzoek Agenda voor de Toekomst. Vlaams Nederlandse Schelde Commissie
- Balke, Thorsten, Tjeerd J. Bouma, Erik M. Horstman, Edward L. Webb, Paul L.A. Erftemeijer and Peter M.J. Herman (2011) Windows of opportunity: thresholds to mangrove seedling establishment on tidal flats, *Mar Ecol Prog Ser*, 440, 1-9
- Barneveld, H.J., R.P. Nicolai, T.J. Boudewijn, I. van de Moortel en R. Postma (2018) Evaluatierapport T2015-rapportage Schelde-estuarium, PR3152, juni 2018, Opdrachtgever: Vlaams-Nederlandse Scheldec commissie; HKV, Bureau Waardenburg en Antea
- Bergsma, J. (2018) Overzicht flexibele stortvakken en wijzigingen beslisprotocol (Excel-sheet), Arcadis
- Bouma, H., D.J. de Jong, F. Twisk & K. Wolfstein, 2005. Zoute Wateren Ecotopenstelsel (ZES-1). Voor het in kaart brengen van het potentiële voorkomen van levensgemeenschappen in zoute en brakke rijkswateren. Rapport RIKZ/2005.024. Rijkswaterstaat, Middelburg.
- Broekema, Y.B. (2019, in progress) Scour holes at the Eastern Scheldt: Flow and turbulence. PhD. Report Delft University of Technology
- Cleveringa, J. (2007) Achtergrond document morfologische ontwikkeling Westerschelde; Fenomenologisch onderzoek naar de ontwikkelingen op mesoschaal; Milieueffectrapport Verruiming vaargeul Beneden-Zeeschelde en Westerschelde; Consortium Arcadis Technum.
- Cleveringa, J. (2013a), Ontwikkeling mesoschaal Westerschelde (factsheets), Basisrapport kleinschalige ontwikkeling K-16, Project Instandhouding vaarpassen Schelde Milieuv vergunningen terugstorten baggerspecie, LTV Veiligheid en Toegankelijkheid, Opdrachtgever Afdeling Maritieme Toegang, Versie 2.0 01/10/2013; Arcadis
- Cleveringa, J. (2013b) LTV-Veiligheid en Toegankelijkheid. Samenhang in ontwikkelingen op verschillende tijd - en ruimteschalen. Basisrapport kleinschalige ontwikkeling K-17; Arcadis 01 oktober 2013
- Cleveringa, J. en G. Dam (2013c) Grootschalige sedimentbalans van de Westerschelde G-2, Project Instandhouding vaarpassen Schelde Milieuv vergunningen terugstorten baggerspecie, LTV Veiligheid en Toegankelijkheid, Opdrachtgever Afdeling Maritieme Toegang, Versie 2.0 01/10/2013; Arcadis
- Cleveringa, J., J. Vroom en M. Taal (2014) Morfologische consequenties stortingen Everingen, Arcadis memo PG Flexibel Storten
- Cleveringa, J. en J. Vroom (2014) Fysische toestand en ontwikkeling van de macrocellen 3 en 4, Arcadis, 078147857:0.2 - Definitief
- Dam, G. (2013), Harde lagen Westerschelde, Achtergrondrapport A-28 Project Instandhouding Vaarpassen Schelde Milieuv vergunningen terugstorten baggerspecie, Opdrachtgever Afdeling Maritieme Toegang, Documentref I/RA/11387/12.107/GVH; Svašek.

- Dam, Gerard en Jelmer Cleveringa (2013), Slib in de sedimentbalans van de Westerschelde, Eindrapport G-3 Project Instandhouding Vaarpassen Schelde Milieuvergunningen terugstorten baggerspecie, Opdrachtgever Afdeling Maritieme Toegang, Documentref I/RA/11387/13.080/GVH; Svašek.
- Dam, G. (2017), Lange-termijn sedimentbalans van de Westerschelde, Referentie 1778/U16516/D/GD; Svašek
- Decrop B., De Clercq B., Vanlede J., Van Holland G., Ides S., Plancke Y., De Mulder T. en Mostaert F. (2009). WL Rapporten 753_07. Dwarsstromingen Ossensisse-Zuidergat – rapport numeriek modelonderzoek. Waterbouwkundig Laboratorium en IMDC-rapport nr. I/RA/11313/09.009/BDC, Antwerpen, België.
- De Vet, P.L.M., B.C. van Prooijen, Z.B. Wang (2017) The differences in morphological development between the intertidal flats of the Eastern and Western Scheldt, *Geomorphology*, Volume 281, 31-42 <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.12.031>
- De Vet, P.L.M., B.C. van Prooijen, R. A. Schrijvershof, J.J. van der Werf, T. Ysebaert, M.C. Schrijver, and Z.B. Wang (2018) The Importance of Combined Tidal and Meteorological Forces for the Flow and Sediment Transport on Intertidal Shoals. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123. <https://doi.org/10.1029/2018JF004605>
- De Vet, P.L.M., B.C. van Prooijen, T. Ysebaert, P.M.J. Herman, Z.B. Wang. (in prep, 2019). Sediment Disposals in Estuarine Channels Alter the Eco-Morphology of Intertidal Flats. *Geophysical Research Letters*.
- De Vriend, Huib J., Zheng Bing Wang, Tom Ysebaert, Peter M. J. Herman & Pingxing Ding (2011) Eco-Morphological Problems in the Yangtze Estuary and the Western Scheldt, *Eco-Healthy Est. Wetlands*, <https://doi.org/10.1007/s13157-011-0239-7>
- Dijkstra, Y. (2015) Morphological equilibria in the multi-channel system of the Western Scheldt Estuary. Development of an idealised 1D tidal model, Final report, Deltares
- Goldbach, O. (2003) Twee eeuwen Westerschelde. Een morfologisch referentiekader. Stagerapport RIKZ Middelburg
- Goossens, M., Lanckriet, T., Pandelaers, C. & D. Depreiter (2017a) Monitoringsprogramma flexibel storten, Voortgangsrapportage 2014-2015: Syntheserapport, RA16117, 28-04-2017, IMDC, Universiteit Antwerpen en HWE
- Goossens, M.G. & Depreiter, D. (2017b) Maandrapport Flexibel Storten februari-maart 2017, Project Vaarwegbeheer 2016-2021 Bestelopdracht 1: Flexibel Storten 2017, Opdrachtgever Vlaamse Overheid - Afdeling Maritieme Toegang, Documentref I/RA/11498/17.040/JMA; IMDC
- Goossens, M.G. & Depreiter, D. (2018a) Maandrapport Flexibel Storten december 2017-januari 2018, Project Vaarwegbeheer 2016-2021 Bestelopdracht 1: Flexibel Storten 2017, Opdrachtgever Vlaamse Overheid - Afdeling Maritieme Toegang, Documentref I/RA/11498/18.004/JMA; IMDC
- Goossens, M.G. & Depreiter, D. (2018b) Maandrapport Flexibel Storten februari-maart 2018, Project Vaarwegbeheer 2016-2021 Bestelopdracht 1: Flexibel Storten 2017, Opdrachtgever Vlaamse Overheid - Afdeling Maritieme Toegang, Documentref I/RA/11498/18.040/JMA; IMDC

- Goossens, M.G. & Van Holland, G. (2018c) Maandrapport Flexibel Storten oktober 2018, Project Vaarwegbeheer 2016-2021 Bestelopdracht 1: Flexibel Storten 2017, Opdrachtgever Vlaamse Overheid - Afdeling Maritieme Toegang, Documentref I/RA/11498/18.176/MGO; IMDC
- Grasmeijer, B. (2013). Actualisatierapport Delft3D Schelde-estuarium, LTV-rapport A-27. Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis
- Groenenboom, Julien (2015) Modelling sand-mud-bed interaction in the Scheldt estuary. M.Sc. Thesis, Delft University of Technology
- Gruijters, S.H.L., J. Schokker & J.G. Veldkamp, 2004, Kartering moeilijk erodeerbare lagen in het Schelde estuarium, TNO-rapport 03-213-B1208 Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen, Utrecht
- Huisman, B., Schrijvershof, R., Lanckriet, T., Van der Werf, J. (2018). Baggerdepositie in diepe geulen, Strategie voor het plaatsen van gebaggerd materiaal in de diepere getijdegeulen van de Westerschelde. Deltares rapport 1210301-000-ZKS-0027.
- Jentink, R. (2017) Kwalitatieve benthos opname Hoogeplaten Noord, Rijkswaterstaat CIV, Datum 9 februari 2017, Status Definitief, HPN_M151007166_KBO1601
- Jeuken, M.C.J.L. (2000), On the morphologic behaviour of tidal channels in the Westerschelde estuary. PhD. Thesis, Utrecht University, 378 pp.
- Jeuken, C., I. Táncoz, P. Thoolen, M. van Helvert, M. Rozemeijer & Z.B. Wang (2002). Onderbouwing van het cellenconcept Westerschelde als instrument voor beleid en beheer (1). Rapport WL | Delft Hydraulics Z2838 / Z3288.
- Jeuken, M.C.J.L., Wang, Z.B. (2010). Impact of dredging and dumping on the stability of ebb-flood channel systems. Coastal Engineering, 57, 553–566.
- Jeuken, M.C.J.L., J. Vroom, Z.B. Wang, D. Depreiter, G. Van Holland, G. Dam, S. Poortman, J. Cleveringa (2014). Advies flexibel storten, Verbeteren van het Criterium Nevengeulen - Voorstel voor het afleiden van koerslijnen en ondergrenzen voor het watervolume van (neven)geulen. Deltares rapport 1209395-000
- Kleinhans, M.G., Van Rosmalen, T.M., Roosendaal, C., & Van der Vegt, M. (2014). Turning the tide: mutually evasive ebb-and flood-dominant channels and bars in an experimental estuary. Advances in Geosciences, 39, 21.
- Kuijper, Kees, Gerard Dam, Jebbe van der Werf, Zheng Bing Wang (2015) Effecten van morfologische veranderingen in het Middellgat, Deltares rapport 1220095
- Lipari, G. (2013) Mitigatie dwarsstroming Zuidergat, Basisrapport specifieke beheervragen B-25, IMDC nv i.s.m. Deltares, Svasek en ARCADIS Nederland
- Mastbergen, D.R. en Schrijvershof, R.A. (2016) Sedimentatiepatronen Plaat van Walsoorden na plaatval 22 juli 2014, Deltares, 1220094
- Mastbergen, D.R., S.J. van Schaick, J.J. van der Werf en R.A. Schrijvershof (2016b) Flow slide in the tidal flat of Walsoorden, poster NCK days, 2016
- McLaren, Patrick (1994) Sediment transport in the Westerschelde between Baarland and Rupelmonde, Rijkswaterstaat, Middelburg
- Menninga, P.J en G. Dam (2013) LTV - Veiligheid en Toegankelijkheid. Simulaties met effectenanalyse op mesoschaal. Basisrapport kleinschalige ontwikkeling K-20, Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, Arcadis rapport 077010281:0.1
- Müller, Friedrich (1898) Das Wasserwesen der Niederländischen Provinz Zeeland, Berlin, W. Ernst, met Atlas met 10 Tafeln met gedetailleerde illustraties (Zeeuwse Bibliotheek)

- Nolte, A.J. et al. (2012). Vervolgonderzoek drie buitendijkse maatregelen voor natuurherstel in de Westerschelde. Deltares rapport 1204087-000-ZKS-0154
- Palaiogianni, Nefeli (2014) Numerical modelling of Western Scheldt with different grids with use of Delft3D and D-Flow Flexible Mesh, Delft University of Technology, Internship report
- Plancke, Y.; Goossens, M.; Mostaert, F. (2016). Overleg Flexibel Storten: Deelrapport 28 – Analyse van baggerhoeveelheden in de Westerschelde sinds 2000. Versie 1.0. WL Rapporten, 00_031_28. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Plancke, Y.; Meire, D.; De Maarschalck, B., Mostaert, F. (2017a). Agenda van de Toekomst-Morfologie Mesoschaal: Deelrapport 12 Sedimentatie ter hoogte van drempels: scenario's stortingen diepe delen Versie 1.0. WL Rapporten, 14_024_12. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Plancke, Y., Schrijver, M., Meire, D., Mostaert, F. (2017b). Overleg Flexibel Storten: Deelrapport 20 – Analyse van de waterbeweging, het sedimenttransport en de morfologie nabij de Hooge Platen. Versie 1.0. WL Rapporten, 00_031_20. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen & Rijkswaterstaat Zee & Delta: Middelburg.
- Plancke, Y.; Schrijver, M.; Meire, D.; Mostaert, F. (2017c). Overleg Flexibel Storten: deelrapport 22. Analyse van de waterbeweging, het sedimenttransport en de morfologie nabij de Plaat van Walsoorden. Versie 3.0. RPRT. WL Rapporten, 00_031_22. Rijkswaterstaat, Zee en Delta: Antwerpen; Middelburg.
- Plancke, Y.; Schrijver, M.; Meire, D.; Mostaert, F. (2018). Overleg Flexibel Storten - Advies stortstrategie MC6: Deelrapport 29 – Analyse van de waterbeweging, het sedimenttransport en de morfologie in Macrocel 6. Versie 2.0. WL Rapporten, 00_031_29. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen & Rijkswaterstaat Zee & Delta: Middelburg.
- Rijks Geologische Dienst (1995) Geologische informatie van de Westerschelde, rapport BP 11.132, in opdracht van RWS Directie Zeeland; RGD, Nuenen
- Rijkswaterstaat Dienst Zeeland (2011). Stroommeting Put van Borssele. Meetplan t.b.v. het uitvoeren van een 13-uurs meting.
- RWS Bedrijfsinformatie (2017) Ontwikkeling ecotopen Westerschelde 2016, De veranderingen van de ecotopen in de Westerschelde in beeld gebracht, Datum 4 juli 2017
- RWS, 2017, Stortingen Geulwand Ossensisse (presentatie 2017), met gemeten profielen Geulwandverdediging Ossensisse GVO, M. Schrijver
- Sas, M. (2013) Instandhouding Vaarpassen Schelde, Mogelijkheden tot reductie van de dwarsstromingen in het Zuidergat, Deelrapport oplegnotitie, IMDC NO 13.356
- Schrijver, M. (2018), Monitoring meergeulensysteem Westerschelde, Toetsing nevengeulen op criterium watervolume, Rijkswaterstaat Zee en Delta, Rapportnr. 7210A/MMGW-2018-01, maart 2018
- Schrijvershof, R.A. en Vroom, J. (2016). Effecten van realistische (extreme) stortstrategieën in de Westerschelde. Deltares rapport 1220094.
- Schrijvershof, R.A. en De Vet, P.L.M. (2018). Morfologisch modelleren plaatrandstortingen Plaat van Walsoorden. Deltares rapport 1230096-000-ZKS-0025.

- Schrijvershof, R.A., P.L.M. de Vet, J.J. van der Werf en G. Willemsen (2017) Understanding sediment disposals on the Walsoorden tidal flat in the Western Scheldt, Poster NCK days
- Schroevers, M. (2015) Relatief belang van golven in Westerschelde, Deltares rapport 1220095
- Sinke, O. (2017) Monitoring geulwanden Westerschelde, Rijkswaterstaat Centrale informatievoorziening, Inwinning & gegevens analyse
- Stapel, J., & de Jong, D. (1998). Sedimentatiemetingen op het schor bij Waarde en het Verdrongen Land van Saeftinghe, Westerschelde (ZW Nederland): sedimento et submergo. Rapport RIKZ 98(22). Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat (RWS), Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ): Middelburg.
- Stark, J.; Vandenbruwaene, W.; De Maerschallck, B.; Plancke, Y.; Mostaert, F. (2017) Morfologie mesoschaal, Deelrapport 7 Sedimentatie ter hoogte van drempels: validatie numeriek model; Versie 4.0. WL-rapport 14_024_7 Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.
- Storm, Kees en Tom Pieters (1994) Het Verdrongen Land verlandt, RIKZ, Middelburg
- Swinkels, Cilia M., Claire M.C.J.L. Jeuken, Zheng B. Wang and Robert J. Nicholls (2009), Presence of Connecting Channels in the Western Scheldt Estuary, *Journal of Coastal Research*, 25, 3, p. 627–640
- Taal, Marcel, Zheng Bing Wang en Jelmer Cleveringa (2013) LTV Veiligheid en Toegankelijkheid G-13: Synthese en conceptueel model Basisrapport grootschalige ontwikkeling, 1207720, Deltares
- Taal, M. et al (2015) Scheldt Estuary. Physics and integrated management. Special Session of the 36th IAHR WORLD CONGRESS, 28 June – 3 July 2015, Delft & The Hague, the Netherlands.
- Taal, Marcel (2016) Memo bovenstrooms storten, Deltares
- Tiessen, M., Vroom, J., & Van der Werf, J. (2016). Ontwikkeling van het Delft3D FM NeVla model voor het Schelde estuarium. Waterbeweging in de Westerschelde en stroming over de Plaat van Walsoorden, Deltares rapport 1220095-000
- Van den Broek, T. (2017). Understanding the hydrodynamic effect of groins at intertidal flats in Estuaries, A case study at Baalhoek and Knuitershoek in the Western Scheldt. M.Sc. thesis, University of Twente, The Netherlands.
- Vandenbruwaene, W.; Vos, G.; Plancke, Y.; Mostaert, F. (2012). Werkgroep O&M - Projectgroep Veiligheid en Toegankelijkheid: Onderzoek naar de morfologie op mesoschaal ter hoogte van stortlocaties. Versie 3.0. Rapport K15. WL Rapporten, 791_10a. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België
- Van der Wegen, M. & Schrijvershof, R.A., (2019, in voorbereiding). Hydrodynamica in de Put van Borssele. Deltares rapport 1210301-005.
- Van der Wegen, M., Van der Werf, J.J., De Vet, P.L.M, Rübke, B.R. (2017). Hindcasting Westerschelde mouth morphodynamics (1963-2011). Rapport 1210301-001-ZKS-0006, Deltares, Nederland.
- Van der Werf, J.J. & Brière, C.D.E. (2013). Influence morphology on tide and sand transport, LTV rapport G-4. Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis

- Van Dijk, Wout M., Dick R. Mastbergen, Geeralt A. van den Ham, Jasper R.F.W. Leuven and Maarten G. Kleinhans (2018), Location and probability of shoal margin collapses in a sandy estuary, *Earth Surf. Process. Landforms*, Volume 43, Issue 11, John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/esp.4395>
- Van Kooten, V. (2016) The morphological behavior of shoal connecting channels, M.Sc. Thesis Delft Univ. Technology, Fac. CiTG
- Vanoverbeke, J. & Van Ryckegem, G. (2015). Statistische analyse van het gebruik van het litoraal door steltlopers in de Westerschelde. Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2015 (INBO.R.2015.11358580). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel.
- Van Schaick, S. (2015) Morphological development after the July 2014 flow slide on the tidal flat of Walsoorden in the Western Scheldt, master's thesis, Delft University of Technology, Dep. Civil Engineering.
- Van Til, Sjoerd en Jelmer Cleveringa (2018) Morfologisch modelleren grensoverschrijdende proefstortingen. Ontwikkelingen bij het Land van Saeftinghe ten gevolge van proefstortingen, Arcadis (CONCEPT)
- Van Veen, J. (1944). Schelderegiem en Schelderegie; Opmerkingen over Scheldepublicaties, (1945), Rijkswaterstaat, Heruitgave: Middelburg, 1993.
- Van Veen, J. (1950). Eb- en Vloedschaar Systemen in de Nederlandse Getijwateren, Tijdschrift van het Koninklijk Nederlandsch Aardrijkskundig Genootschap, Vol. 67, ook als speciale uitgave ter gelegenheid van het Waddensymposium 1949. HERDRUK ORIGINELE TEKST VOORZIEN VAN ENGELSE VERTALING EN ANNOTATIES. Published, with permission of the KNAG (Royal Dutch Geographical Society), on the occasion of the retirement of Professor Kees d' Angremont, who held the Coastal Engineering Chair at the Department of Hydraulic Engineering at Delft University of Technology from 1989 to 2001, Delft, November 2001
- Van Veen, J. (1962). Dredge, drain, reclaim: the art of a nation, Fifth edition, Martinus Nijhoff, The Hague. H.J. Stuvell contributor
- Van Veen, J., A.J.F. van der Spek, M.J.F. Stive, and T. Zitman (2005) Ebb and flood channel systems in the Netherlands tidal waters. *Journal of Coastal Research*, 21(6):1107–1120, 2005. ISSN 0749-0208. <https://doi.org/10.2112/04-0394.1>
- Vroom, J., de Vet, P.L.M., & van der Werf, J.J. (2015). Validatie waterbeweging Delft3D-NeVla model Westerscheldemonding. Deltares rapport 1210301-001, p. 76.
- Vroom, J., van Maren, B., van der Werf, J.J. & van Rooijen, A. (2016). Zand-slib modellering voor het mondingsgebied van het Schelde-estuarium.
- Wang, ZB, Elias, EPL, Van der Spek, AJF, Lodder, QL (2018). Sediment budget and morphological development of the Dutch Wadden Sea - impact of accelerated sea-level rise and subsidence until 2100. In: A van der Spek, N van den Berg (eds.), *Sea-level Rise, Subsidence and Morphodynamics in the Dutch Wadden Sea, 2030, 2050, 2100*. *Netherlands Journal of Geosciences* 97 (3), 183-214.
- Wang, Z.B., D.S. Van Maren, P.X. Ding, S.L. Yang, B.C. Van Prooijen, P.L.M. De Vet, J.C. Winterwerp, H.J. De Vriend, M.J.F. Stive, Q. He (2015) Human impacts on morphodynamic thresholds in estuarine systems, *Cont. Shelf Res.* 111, 174-183
- Willemsen, G. (2016) Understanding the morphological development of the Walsoorden sediment disposals. M. Sc. Thesis, Delft University of Technology

21 maart 2019, definitief

Wilderom, M.H. (1968) Tussen Afsluitdammen en Deltadijken, deel 3, Midden Zeeland (Walcheren en Zuid-Beveland)

Wilderom, M.H. (1973) Tussen Afsluitdammen en Deltadijken, deel 4, Zeeuws-Vlaanderen

Wilderom, M.H. (1972) Plaatvallen, OTAR 57, blz. 288-305

Winterwerp, J.C., M.C.J.L. Jeuken, M.A.G. van Helvert, C. Kuijper, A. van der Spek, M.J.F. Stive, P.M.C. Thoolen, Z.B. Wang (2000). Lange Termijnvisie Schelde-estuarium. Cluster Morfologie. Uitvoeringsfase. Deel 1: Hoofdrapport en Deel 2: Appendices. Z2878. WL | Delft Hydraulics.

A Stortcapaciteit Westerschelde

Aanleiding

- Nieuwe vergunning vanaf 2021: stortruimte zoeken / verbeteren
 - Hebben gebieden in praktijk meer ruimte dan nu is vergund?
- Hoeveel stortcapaciteit is er in de nevengeulen i.r.t. 'behoud meergeulenstelsel'?
- Op welke kwaliteitsparameters moet Flexibel Storten toetsen?

| | |
|-----------------|-----------------|
| -31.99 - -30.00 | +0.01 - +2.00 |
| -29.99 - -28.00 | +2.01 - +4.00 |
| -27.99 - -26.00 | +4.01 - +6.00 |
| -25.99 - -24.00 | +6.01 - +8.00 |
| -23.99 - -22.00 | +8.01 - +10.00 |
| | +10.01 - +12.00 |

Deltares

Stortcapaciteit en toetsing kwaliteitsparameters, hoe is het geregeld nu?

- Per stortvak wordt in de vergunning een maximum te storten volume vastgelegd.
- De ontwikkeling van het estuarium wordt continu gemonitord en getoetst aan de hand van kwaliteitsparameters
- In totaal is de vergunde stortruimte groter dan het minimum benodigd, zodat er ruimte is om uit te wijken ('Flexibel Storten'), bijvoorbeeld als toetsing kwaliteitsparameters daarom vraagt.
- Dit wordt gedaan en vastgelegd via 'Overleg Flexibel Storten'. Dit besluit over de uit te voeren stortstrategie binnen vergunning.

Deltares

Hoe het maximum stortvolume te bepalen?

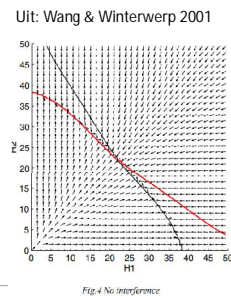
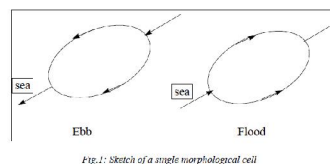
Het maximum stortvolume is volgens een richtlijn bepaald:

- Afleiden 'veilig' stortvolume volgens paper Jeuken & Wang 2010
 - Dit is gebaseerd op de transportcapaciteit en factor α .
 - Factor α is 0,05 of 0,1, afhankelijk van ontwikkelingstendens. Deze afleiden op basis van bathymetrische data en volume ingrepen.
 - Sedimenttransportcapaciteit bepalen met een numeriek model
 - Als er netto onttrekkingen zijn vergroten deze maximum volume
- Dit is de 'veilige' ondergrens (volgens richtlijn), maar omdat er meer wordt gebaggerd moet ook meer gestort kunnen worden. Het qua effecten optimale maximum stortvolume per element is te bepalen met numeriek model. Bij 3^e verruiming is dit gedaan door stortscenario's te simuleren en effecten te bepalen. Destijds was het stortvolume volgens de richtlijn Jeuken & Wang 2010 ca. 9 miljoen m³ en is dit met Delft3D op een optimale wijze vergroot naar ca. 12 miljoen m³.

Deltares

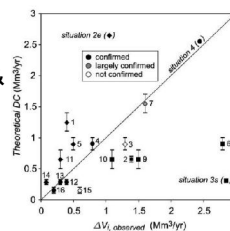
Achtergrond: theorie stortcapaciteit (1)

- Macrocel vergeleken worden met splitsingspunten rivieren:
 - 3 stabiele oplossingen: 2 takken open/1 van beide takken open
- Als 2 takken open moeten blijven (behoud meergeulenstelsel) dan is er een maximum stortvolume: dit is de theoretische stortcapaciteit op basis van analytische benadering van Wang & Winterwerp (2001)



Achtergrond: theorie stortcapaciteit (2)

- De analyse van historische ingreepgegevens en geulvolumes voor de Westerschelde door Jeuken & Wang (2010) heeft de theorie bevestigd en een praktische richtlijn voor storten opgeleverd.
- De richtlijn neemt de ontwikkeling van macrocel en geulen mee: groter stortvolume bij erosietendens en vice versa voor sedimentatietendens.
- De uitwisseling tussen macrocellen is op die manier meegenomen.
- Na overschrijding van de stortcapaciteit voor een aantal jaren kan meestal wel herstel optreden -> een bijstelling / verandering van de stortstrategie is wenselijk.

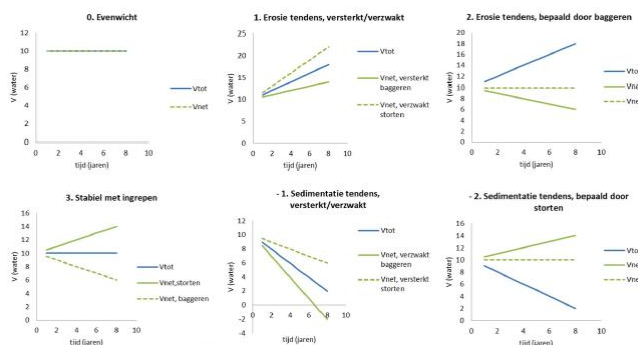


Uit: Jeuken & Wang 2010

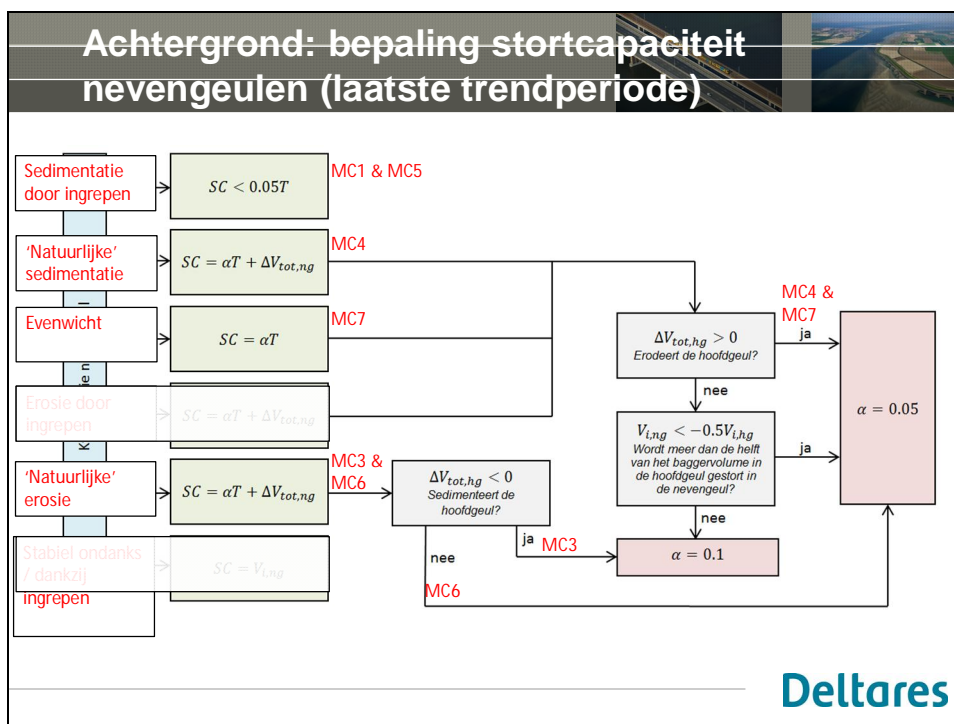
Achtergrond: bepaling stortcapaciteit (3)

Tabel C.1 Kwalificatie geulgedrag op basis van volumeveranderingen in V_{tot} en V_{net} .

| ΔV_{tot} | ΔV_{net} | Kwalificatie | Omschrijving |
|------------------|------------------|--------------|--|
| 0 | + of - | 3 | Stabiel, ondanks/dankzij ingrepen |
| 0 | 0 | 0 | Evenwicht (geen verandering, geen ingrepen) |
| - | 0 of + | -2 | Sedimentatie, gestuurd door ingrepen |
| - | - | -1 | Natuurlijke tendens tot sedimentatie, versterkt/verzwakt door ingrepen |
| + | 0 of - | 2 | Erosie, gestuurd door ingrepen |
| + | + | 1 | Natuurlijke tendens tot erosie, versterkt/verzwakt door ingrepen |



Figuur C.1 Schematische visualisatie van verschillende kwalificaties



Achtergrond: vergunning 3e verruiming & 2015-2021

- Totaal vergund: 13.2 miljoen m³/jaar

| MC | Jeuken & Wang, 2010 | | | Vergunning gemiddeld p.j. | | | Gestort in 2010-2015 gemiddeld p.j. | | | Gestort 2016 | | | |
|--------|---------------------|---------|---------|---------------------------|-----|-----|-------------------------------------|-----|-----|--------------|-----|-----|-----|
| | HG | NG | PR | HG | NG | PR | HG | NG | PR | HG | NG | PR | |
| 1 | | 1,0-1,4 | | 0,0 | 1,1 | 1,0 | 0,0 | 1,1 | 1,4 | 0,0 | 0,5 | 1,0 | |
| 3 | | | 1,8 | 0,0 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 1,1 | 0,0 | 0,0 | 0,7 | 0,0 | |
| 4 | | | 0,0 | 3,1 | 0,4 | 0,5 | 2,9 | 0,0 | 0,3 | 0,3 | 0,0 | 0,0 | |
| 5 | | | 0,3 | 0,7 | 1,4 | 0,9 | 0,6 | 0,6 | 1,2 | 0,4 | 0,0 | 0,4 | |
| 6 | | | 0,6 | 0,7 | 0,3 | 0,0 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | |
| 7 | | | 0,2 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | |
| totaal | | | 3,9-4,3 | 4,9 | 4,4 | 2,3 | 2,4/1,9 | 3,9 | 2,8 | 2,9 | 1,0 | 1,2 | 1,4 |

- De actuele stortruimte is kleiner, want enkele vakken kunnen niet worden gebruikt. Oorzaken: autonome sedimentatie (nevengeul en plaatrand macrocel 4); sterke verondieping (nevengeul macrocel 5) en te weinig waterdiepte (nevengeul macrocel 6): Resterend is 8,5 miljoen m³/jaar
- De proefstortingen hielpen aldus ook stortruimte op niveau te brengen .
- Laatste jaren was het onderhoudsvolumes 9-10 miljoen m³

Deltares

Flexibel Storten

Strategie beoordelen via toetsing kwaliteitsparameters die zijn aangeduid in de vergunning:

- Instandhouding meergeulenstelsel
 - **Watervolume nevengeulen:**
Ondergrens = Minimum volume nevengeul 2006-2010 – standaarddeviatie nevengeul 2006-2010 – stortruimte vergunning
- Ecologische winst plaatrandstortingen
 - **Toename laagdynamisch ondiepwater- & intergetijdengebied**
 - **Stabiliteit gestorte baggerspecie**
- Behoud oppervlakte ecologisch waardevol gebied

Belangrijk:

Huidige toetsing houdt geen rekening met ontwikkelingstrends, zoals (autonome) verondieping
In Jeuken et al. (2014) is een alternatief gepresenteerd dat tendensen én beleidskeuzes meeneemt

Deltares

Aanbevelingen (1)

- De 'vuistregel' in Jeuken & Wang 2010 is een goed startpunt:
 - Deze is wetenschappelijk onderbouwd & geverifieerd,
 - Levert dit te weinig stortruimte, dan moet die gezocht worden in nadere analyse en modelmatige effectenstudies.
 - Meer stortruimte maken door sleutelen aan α is af te raden (te generiek).
 - De uitwisseling tussen macrocellen is al impliciet meegenomen door het kijken naar ontwikkelingstrends van individuele geulen
 - Merk op dat 'Jeuken & Wang 2010' weinig ingaat op 'bijzondere' stortlocaties (diepe putten) die de totale capaciteit wel vergroten. Hetzelfde geldt voor stortingen op plaatranden die niet in nevengeulen plaatsvinden.
 - Doe een update op basis van meest recente ontwikkeling (stroomschema + sedimenttransportcapaciteit)
- Analyseer de ontwikkelingen op macrocelniveau en gebruik de systeemkennis die daar uit volgt. Hetzelfde voor de kennis en waarnemingen van grootschalig gedrag. Die kunnen leiden tot een afwijken van de vuistregel.
- Op macrocelniveau ook kijken naar de gewenste situatie in acht nemend de evolutie en de functies. Dit kan tot andere keuzes voor ontwikkeling van nevengeulen en/of kortsluitgeulen leiden

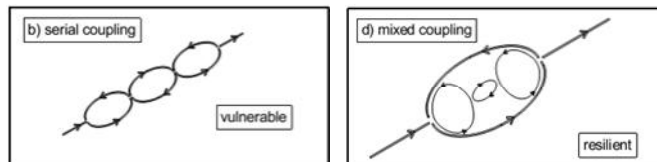
Aanbevelingen (2)

- Optimaliseer stortstrategie via monitoring en modelstudies
 - Het model berekent lokaal de sedimenttransportcapaciteit (op schaalniveau < geul). In diepe put zijn lokale transportcapaciteiten bijvoorbeeld veel hoger.
 - Verbeter door monitoring (over gedrag van de geul, omkeerbaarheid van specifieke storting, storten nabij drempelgebieden etc)
- Toets aan de hand van koerslijnen, zie voorstel Jeuken et al. 2014
 - Vervanging watervolume nevengeul: meenemen ontwikkelingstrends
 - Neemt expliciet mee 'wat de gewenste toekomst is (wat willen we bereiken met 'behoud meergeulensysteem'. Een beleidskeuze leidt tot andere koerslijn. Voorbeeld: toestaan dat een geul sedimenteert. Mede hierom is traject over Lange Termijn Perspectief Natuurlijkheid zo belangrijk. Ander voorbeeld is een minimale diepte van -5m LAT voor bevaarbaarheid van een nevengeul.

Deltares

Aandachtspunten bij vervolgwerk (1)

- De Westerschelde bestaat uit een gemixte koppeling van cellen:



- Theorie zegt dat mixed coupling stabiel is dan seriele koppeling. Kortsluitgeulen en drempelgeulen zijn dan ondersteunend aan de stabiliteit. Dit te checken is een belangrijke opgave voor onderzoek
- Zorg dat de roosterresolutie van numerieke modellen voldoende is om kortsluitgeulen op een goede manier mee te nemen en hun rol in debietverdeling te onderzoeken. Met FM moet dit mogelijk zijn.
- Drempelgebieden zijn belangrijk voor de uitwisseling tussen macrocellen en mogelijk (in verleden?) als aandrijving voor ontstaan van nieuwe platen en kortsluitgeulen.

Deltares

Aandachtspunten bij vervolgwerk (2)

- Hypothese zegt dat als cellen te lang worden, ze instabiel worden. Kijk vanuit dit oogpunt goed naar de ontwikkelingen aan beide zijdes van macrocel 4. Doe hier gericht onderzoek op.
- Hoe werkt herverdeling van sediment via drempelgebieden? Patroonwisselingen op drempel van de Everingen hebben invloed op sedimentatie Middelgat. Welke invloed hebben stortingen in de Everingen op de patroonwisselingen?
- Kan de morfodynamiek van drempelgebieden met een numeriek model worden onderzocht? Als het lukt de patroonwisseling in overgang macrocel 3-4 te reproduceren waarschijnlijk wel. Onderzoek daarna welke invloed stortingen in de Everingen op die patroonwisselingen hebben.
- We kunnen in richtlijnen fysische processen gaan meenemen die we tien jaar terug slechter begrepen. Vraagt doctoraalonderzoek of wat ermee vergelijkbaar kan zijn.

Deltares

Aandachtspunten bij vervolgwerk (3)

- Nieuwe stortvakken blijven onderzoeken. Zij zorgen ook voor afwisseling in de stortstrategie. Nu in beeld:
 - Lessons learned proefstortingen
 - Diepe putten/ delen van de vaargeul
 - Zijn er stortvakken met meer ruimte, zoals wellicht in Everingen?
- Werk ook aan verbeteren van het modelinstrumentarium
 - De stortmodule is niet geschikt om het initiële effect van sedimentverlies tijdens een storting mee te nemen. De storting komt in model nu geheel op de bodem (geen verliezen tijdens storting) en is uitgespreid over heel vak of groot gebied
 - Blijf investeren in mesoschaal. Hoe goed modelleren we (plaatrand)stortingen en hoe krijgen we gedrag storting in diepe delen beter?

Deltares

B Geologische dwarsprofielen per macrocel

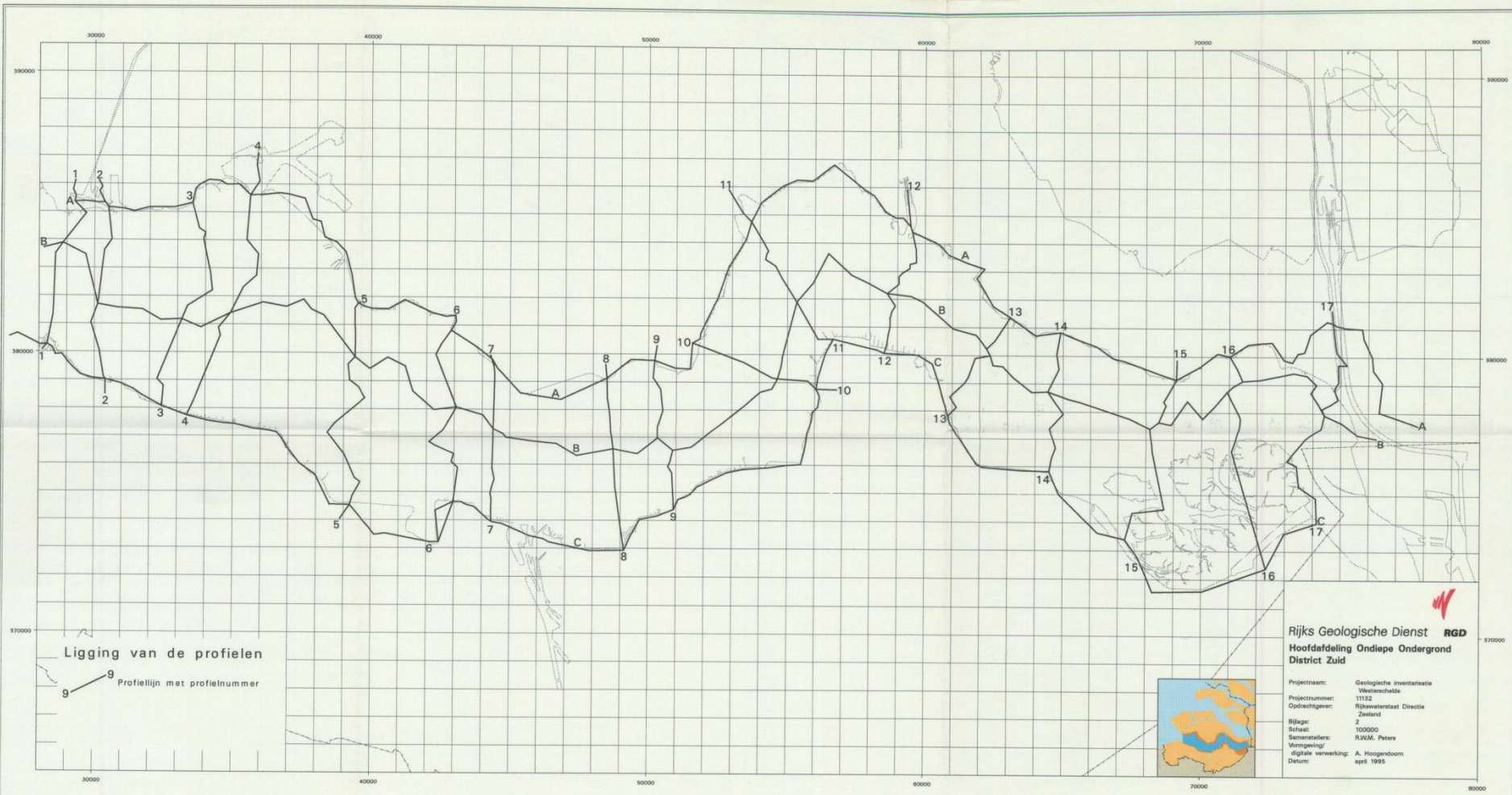
Tabel B.1 Geselecteerde geologische dwarsprofielen Westerschelde (RGD, 1995) per macrocel

| Macro cel | Geologische dwarsprofiel | Belangrijkste mesoschaal elementen |
|-----------|---|--|
| 1/2 | Profiel 3 Zuidwatering – Hoogeweg | Honte – Spijkerplaat – Hooge Platen – Vaarwater |
| 3 | Profiel 7 Ellewoutsdijk – Terneuzen | Everingen – Middelpaat – Pas van Terneuzen |
| 4 | Profiel 10 Baarland – Zeedorp | Middelgat – Rug van Baarland – Gat van Ossenisse |
| 4 / 5 | Nieuw profiel tussen 11 en 12 gelegen Hansweert – Kreverhille | Put van Hansweert – Platen van Ossenisse – Schaar van Ossenisse |
| 5 | Profiel 14 Oud Valkenisse – Baalhoek | Schaar van Valkenisse – Plaat van Walsoorden – Overloop van Valkenisse |
| 6 / 7 | Profiel 17 Bathpolder – Saeftinghe | Appelzak – Pas van Rilland – Land van Saeftinghe |

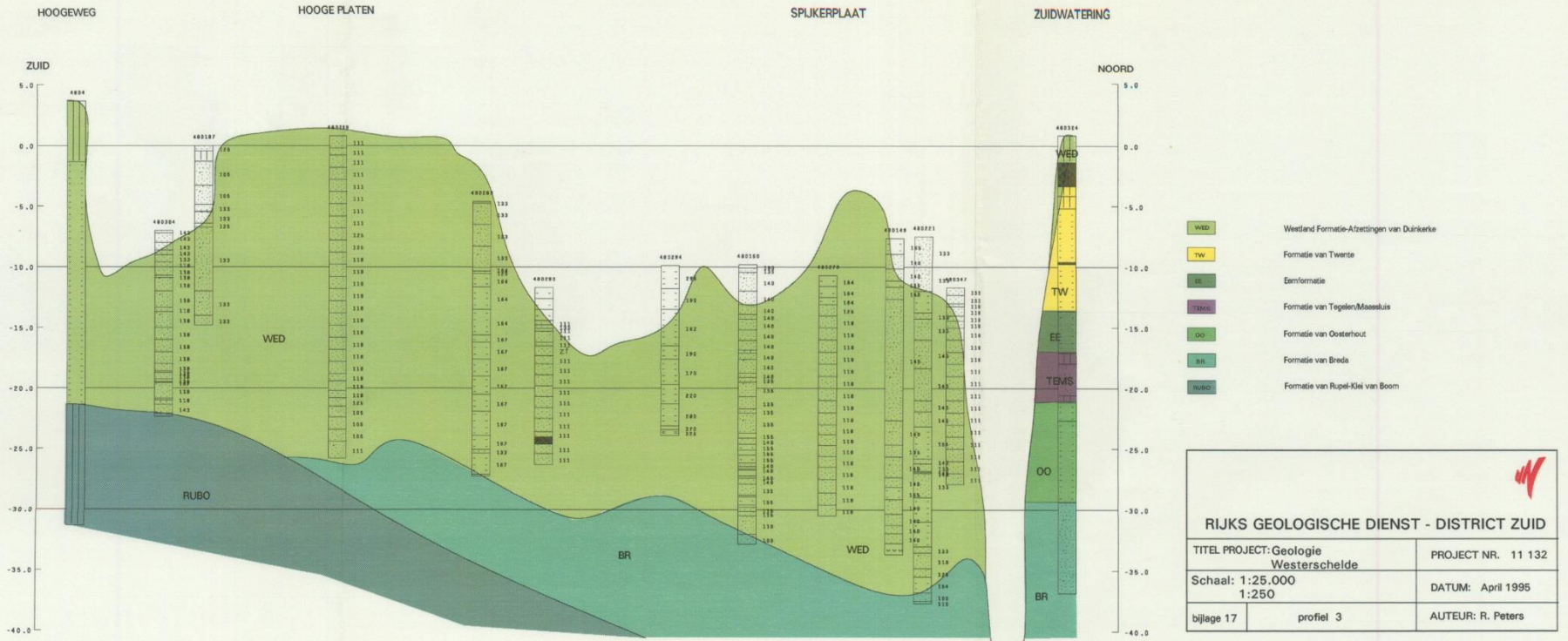
Tabel B.2 Naamgeving formaties in de geologische dwarsprofielen (RGD, 1995). In deze tabel worden zowel de verouderde als de nieuwste formatie indeling weergegeven, zodat ook oudere publicaties met recente vergeleken kunnen worden.

| oude stratigrafie | | nieuwe stratigrafie | |
|-------------------|--|---|---|
| formatie | laagpakket | nieuwe formatie | laagpakket |
| Westland Fm | Afz van Duinkerke Hollandveen Afz van Calais Basisveen | Naaldwijk Fm Fm van Nieuwkoop Naaldwijk Fm Fm van Nieuwkoop Fm van Koewacht | Walcheren Hollandveen laagpakket Wormer Basisveen laag |
| Fm van Twente | | Fm van Boxtel | |
| Eem Fm | | Eem Fm | |
| Fm van Tegelen | | Fm van Waalre | |
| Fm van Maassluis | | Fm van Maassluis | |
| Fm van Oosterhout | | Fm van Oosterhout | |
| Fm van Breda | | Fm van Breda | |
| Rupel Fm | Klei van Boom | Rupel Fm | Laagpakket van Boom |
| Fm van Zelzate | Zand van Ruisbroek Klei van Watervliet Zand van Bassevelde | Tongeren Fm | Laagpakket van Zelzate |
| Fm van Dongen | Klei van Asse | Fm van Dongen | Laagpakket van Asse |

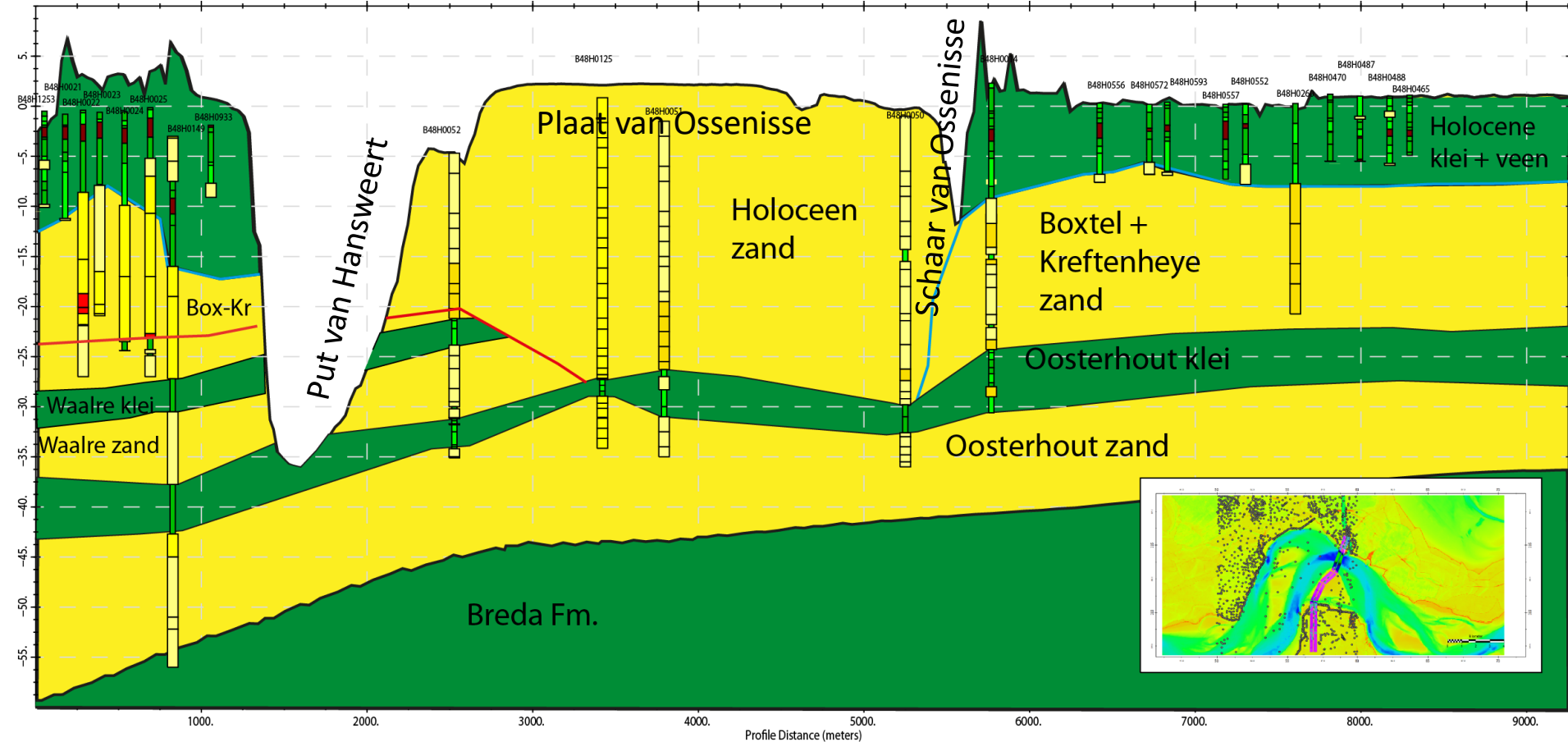
Ligging profielen



Profiel 3; Zuidwatering - Hoogeweg



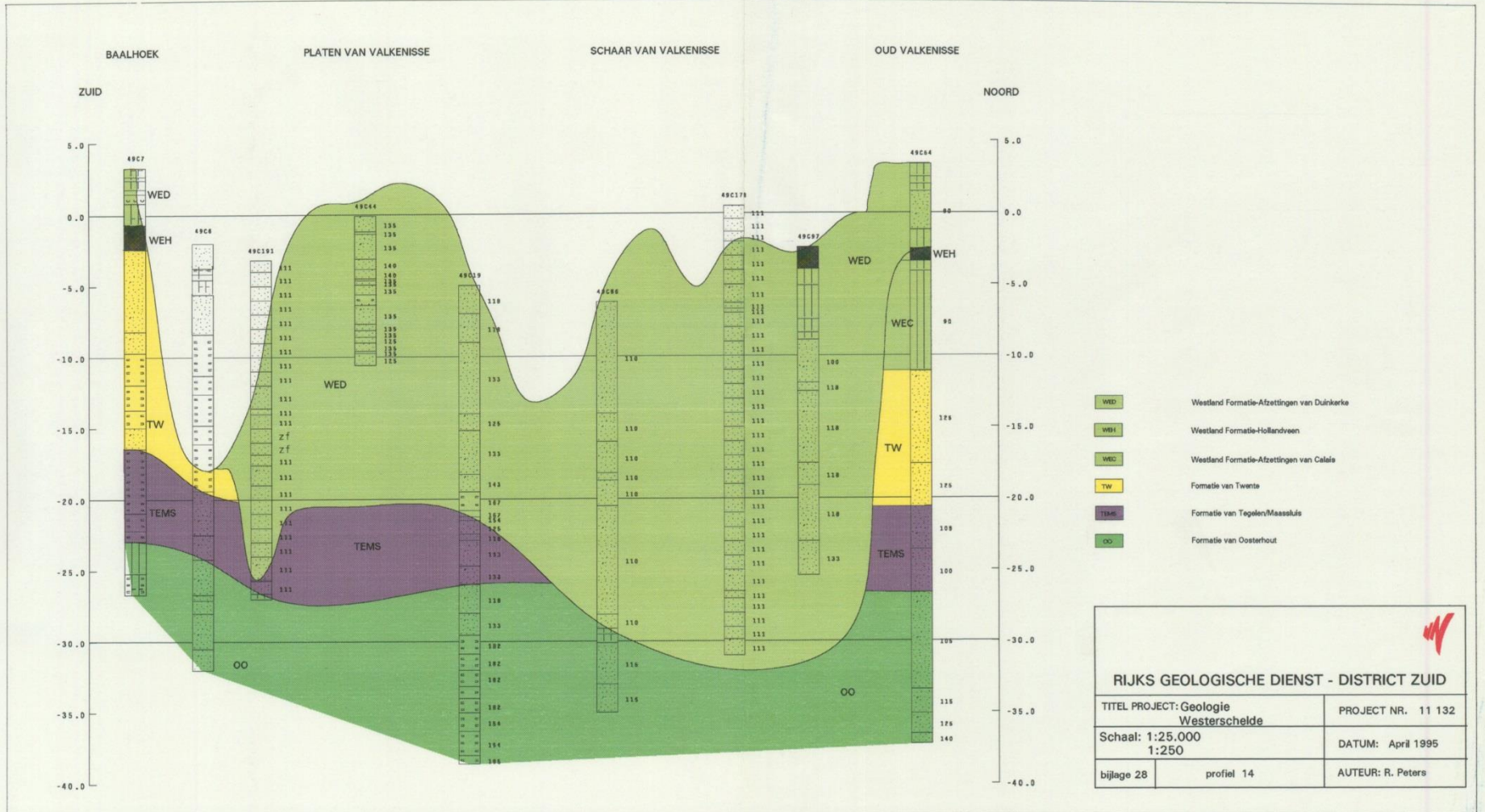
Profiel 11/12; Hansweert - Kreeverhille



- Zand
- Veen
- Klei
- Zandige klei/leem
- Fijn zand
- Matig fijn/grof zand
- Grof zand

- Top Waalre Fm.
- Top Boxtel Fm. + Krefthenheye Fm.

Profiel 14; Oud Valkenisse - Baalhoek



RIJKS GEOLOGISCHE DIENST - DISTRICT ZUID

| | |
|--|--------------------|
| TITEL PROJECT: Geologie Westerschelde | PROJECT NR. 11 132 |
| Schaal: 1:25.000 1:250 | DATUM: April 1995 |
| bijlage 28 | profiel 14 |
| AUTEUR: R. Peters | |

Profiel 17; Bathpolder - Saeftinghe

