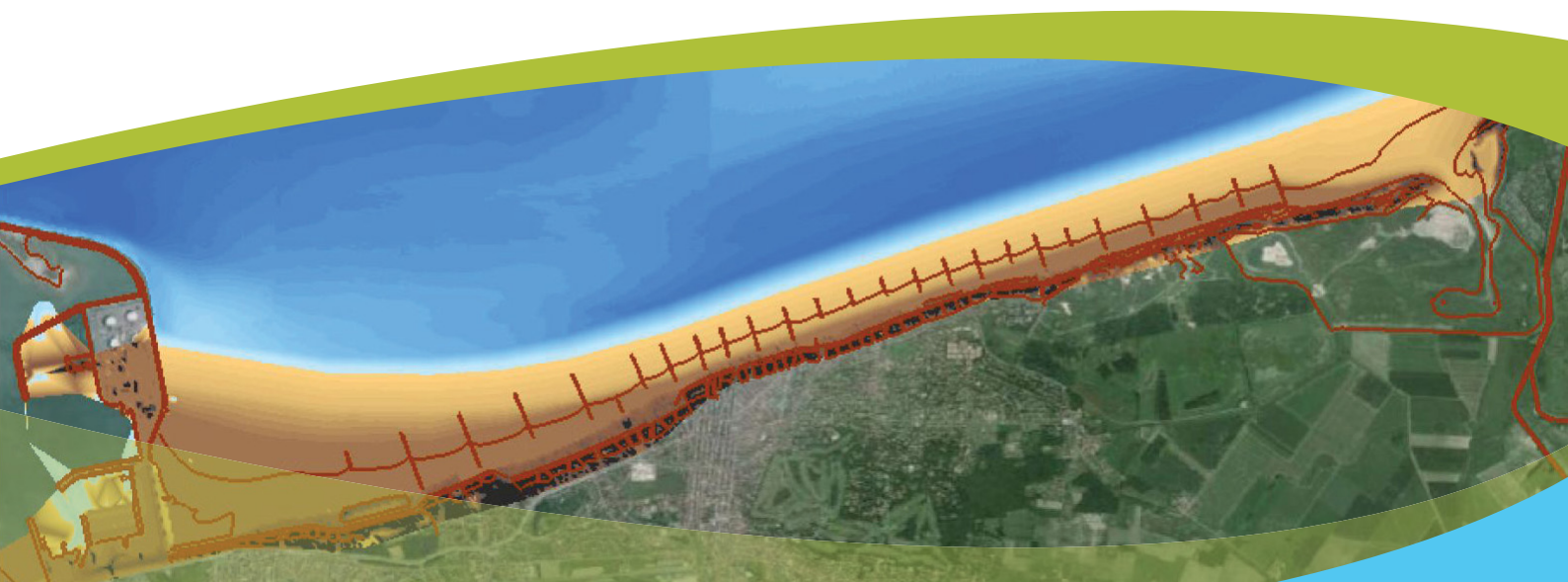




# Strandverbreding Zeebrugge tot Cadzand

## MORFOLOGISCHE EFFECTEN



15\_102

WL Rapporten



# **Strandverbreding Zeebrugge tot Cadzand**

Morfologische effecten

De Maerschalk, B.; van der Werf, J.; Dijkstra, J.; Kolokythas, G.; Verwaest, T.; Mostaert, F.

Oktober 2016

WL2015R15\_102\_1

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

De Maerschalc, B.; van der Werf, J.; Dijkstra, J.; Kolokythas, G.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2015). Strandverbreding Zeebrugge tot Cadzand: Morfologische effecten. Versie 5.0. WL Rapporten, 15\_102. Waterbouwkundig Laboratorium & Deltares: Antwerpen, België.

Deltares rapportnummer: 1210301-009-ZKS-0004



**Waterbouwkundig Laboratorium**

*Flanders Hydraulics Research*

Berchemlei 115  
B-2140 Antwerpen  
Tel. +32 (0)3 224 60 35  
Fax +32 (0)3 224 60 36  
E-mail: [waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be](mailto:waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be)  
[www.waterbouwkundiglaboratorium.be](http://www.waterbouwkundiglaboratorium.be)



**Deltares**


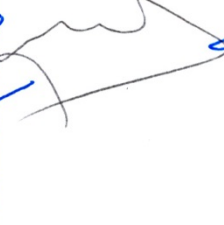

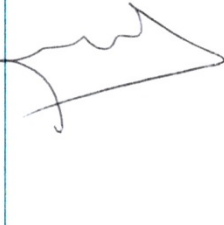

Boussinesqweg 1  
2629 HV Delft  
Nederland  
Postbus 177  
2600 MH Delft  
Tel: +31 (0)88 335 8273  
Fax: +31 (0)88 335 8582

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

Documentidentificatie

Titel:	Strandverbreding Zeebrugge tot Cadzand: Morfologische effecten		
Opdrachtgever:	MOW – afdeling Maritieme Toegang	Ref.:	WL2015R15_102_1
Keywords (3-5):	Morfologie, Vlaamse Baaien, Kust		
Tekst (p.):	61	Bijlagen (p.):	22
Vertrouwelijk:	<input type="checkbox"/> Ja	Uitzondering:	<input type="checkbox"/> Opdrachtgever
			<input type="checkbox"/> Intern
			<input type="checkbox"/> Vlaamse overheid
	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

Goedkeuring

Auteur	Revisor	Projectleider	Coördinator Studie & Advies	Afdelingshoofd
De Maerschack, B.; van der Werf, J.	Verwaest, T.	De Maerschack, B.	Verwaest, T.	Mostaert, F.
				

Revisies

Nr.	Datum	Omschrijving	Auteur(s)
1.0	07/12/2015	Conceptversie	De Maerschack, B.; van der Werf, J.; Dijkstra, J.; Kolokythas, G.
2.0	15/12/2015	Inhoudelijke revisie	Roelvink, D.; Trouw, K.; Verwaest, T.
3.0	22/12/2015	Revisie	De Maerschack, B.; van der Werf, J.; Dijkstra, J.
4.0	23/12/2015	Definitieve versie	De Maerschack, B.
5.0	25/10/2016	Aanpassing confidentialiteit	De Maerschack, B.

Abstract

In het kader van Vlaamse Baaien is een scenario onder ontwikkeling voor de oostelijke kuststrook: Zeebrugge – Nederlandse grens, dat de haven van Zeebrugge toegankelijk moet maken voor binnenscheepvaart via de kustlijn. Bijkomend bevordert dit scenario de kustveiligheid in dit gebied, ook bij zeespiegelstijging al is dit niet de primaire doelstelling. Om deze doelstelling te genereren is de aanleg van een eiland in combinatie met een substantiële strandverbreding voorzien.

De aanleg van de ingrepen zal gefaseerd gebeuren. Er wordt voorgesteld om in eerste instantie de strandverbreding aan te leggen en in latere fase de eilandengordel. Bij afwezigheid van de eilandengordel zal het aangelegde strand ten volle blootgesteld worden aan stroming en golven zoals het huidige strand.

Op basis van de beschikbare literatuur en beschikbare modellen voor dit gebied, wordt in dit rapport een voorstudie gedaan naar de morfologische ontwikkelingen van een dergelijke strandverbreding in vergelijking met de huidige gekende erosie- en sedimentatietrends voor dit deel van de Belgische en Nederlandse kust.

De modelresultaten werden voorgelegd aan een Vlaamse-Nederlandse experten commissie. De opmerkingen en conclusies van de experten werden opgenomen in de conclusies en aanbevelingen van voorliggend document.

## Inhoudstafel

Inhoudstafel .....	I
Lijst van de tabellen .....	II
Lijst van de figuren .....	III
1. Inleiding .....	1
2. Scenario beschrijving .....	3
3. Gebiedsbeschrijving op basis van literatuur .....	5
3.1. Zeebrugge – Westerscheldemonding .....	5
3.2. Zeebrugge – Zwin .....	7
1.1.1. Baai van Heist .....	9
1.1.2. Knokke-Zoute en Appelzak .....	11
3.3. Zwin- Zwarte Polder .....	12
3.4. Het Zwin .....	17
4. Modellerings .....	22
4.1. Modellen .....	22
4.1.1. Nieuwpoort-Vlissingen model (N2V) .....	22
4.1.2. XBeach Knokke model .....	24
4.2. Modelresultaten .....	28
4.2.1. Simulaties Nieuwpoort-Vlissingen model .....	28
4.2.2. Simulaties XBeach model .....	47
4.3. Inschatting effecten op het Zwin .....	56
4.4. Inschatting transporten naar Nederland .....	57
5. Conclusies en aanbevelingen .....	58
6. Referenties .....	60
Bijlage A: Dwarsprofielen strand en vooroever 2013 en scenario Zeebrugge – Cadzand .....	B1
Bijlage B: Eerder gemodelleerde strandsuppleties Knokke .....	B6
Bijlage C: Evolutie dwarsprofielen, XBeach model .....	B8
Bijlage D: Evolutie van de waterlijn (XBeach model) .....	B14
Bijlage E: Positie waterlijn initieel en na 3 jaar .....	B21
Bijlage F: Effect van MorFac op door N2V model berekende morfologische verandering .....	B22

## Lijst van de tabellen

Tabel 1: Ontwikkeling zandvolumes op basis van vaklodingen (periode 1965-2011) en LiDAR-metingen (periode 1997-2011).....	15
Tabel 2: Golf- en windklimaat N2V model voor lange-termijn morfologische berekeningen (Wang et al., 2015).....	23
Tabel 3: Overzicht van de belangrijkste kalibratieparameters van het XBeach model.....	26
Tabel 4: XBeach Knokke model: Gemeten en gemodelleerde sedimentatietrends .....	27
Tabel 5: Berekenende erosietrends waterlijn met en zonder strandverbreding voor verschillende kustprofielen. ....	34
Tabel 6: Berekenende erosietrends waterlijn met en zonder strandverbreding voor verschillende kustprofielen (D50 = 0.3 mm).....	43
Tabel 7: Evolutie strandbreedte (positie 0mNAP) in m/jaar gedurende het eerste en laatste jaar van de simulatie.....	56
Tabel 8: Netto langstransporten en Bruun getallen .....	56
Tabel 9: Netto langstransporten in raai 10 richting Cadzand. Voor het N2V model zijn alleen transporten over de korte raaien gebruikt. ....	57
Tabel 10: Evolutie strandbreedte (positie 0mNAP) in m/jaar gedurende het <b>eerste jaar</b> van de simulatie .....	B19
Tabel 11: Evolutie strandbreedte (positie 0mNAP) in m/jaar gedurende het <b>laatste jaar</b> van de simulatie.....	B19
Tabel 12: Evolutie strandbreedte (positie 0mNAP) in m/jaar <b>gemiddeld over 3 jaar simulatie</b> .....	B20

## Lijst van de figuren

Figuur 1: De kust van Zeebrugge tot iets ten oosten van Cadzand-Bad.....	1
Figuur 2: Scenario Vlaamse Baaien (bron: aMT) .....	2
Figuur 3: Bodem en strand 2013 Zeebrugge - Cadzand .....	3
Figuur 4: Scenario strand en vooroeversuppleties Zeebrugge – Cadzand .....	3
Figuur 5: Strand en vooroeversuppletie: ~38M m <sup>3</sup> (verschilplot Figuur 4 en Figuur 3) .....	4
Figuur 6: Huidige configuratie van geulen en platen in de Westerscheldemonding. Bathymetrie gebaseerd op vaklodingen uit 2011.....	5
Figuur 7: Verschilkaart 1965 - 2011 met de belangrijkste morfologische veranderingen in deze periode. ....	6
Figuur 8: Erosie/sedimentatie trend Zeebrugge – Knokke (Janssens et al, 2013).....	7
Figuur 9: Erosie/sedimentatie trend Knokke– Cadzand (Janssens et al, 2013).....	8
Figuur 10: Erosie en sedimentatie rond Zeebrugge in de periode 1997 - 2010 (Janssens et al, 2013).....	9
Figuur 11: Sedimentbalans op basis van waargenomen trends in de periode 1986 tot 1997 voor stranden en vooroever (tot 1500m offshore) (Trouw et al. 2015).....	10
Figuur 12: Sedimentbalans op basis van waargenomen trends in de periode 1997 tot 2010 voor stranden en vooroever (tot 1500m offshore) (Trouw et al. 2015).....	10
Figuur 13: Evolutie van de Appelzak: Selectie van gemiddelde dwars-profilen voor Knokke-Zoute (Trouw et al., 2015).....	11
Figuur 14: Evolutie van de poistie van de Appelzak (Trouw et al., 2015).....	12
Figuur 15: Maximale diepte van de Appelzak (Trouw et al., 2015) .....	12
Figuur 16: Morfologische ontwikkeling voor de kust van Zeeuws-Vlaanderen tussen 1965 en 2011 .....	13
Figuur 17: Jarkus-raaien langs de kust van Zeeuws-Vlaanderen met trends in kustlijnontwikkeling en onderverdeling in deeltrajecten. ....	13
Figuur 18: Dwarsprofielen van de bodemligging in raai 1136 (oostelijk van Cadzand-Bad, ter hoogte van de Brabander) voor de periode 1965-2013. ....	14
Figuur 19: Basiskustlijn (BKL), Momentane Kustlijn (MKL) en Te Toetsen Kustlijn (TKL) in raai 1450 aan de westkant van Cadzand-Bad.....	15
Figuur 20: Totaal suppletievolume per strekkende meter langs de kust voor de periode 1971-2013 .....	16
Figuur 21: De strekdammen bij de uitwateringssluis te Cadzand-Bad in de situatie tot medio 2015 .....	16
Figuur 22: De historische ontwikkeling van het Zwin. Uit: Wilderom (1972).....	17
Figuur 23: Het huidige Zwin.....	18
Figuur 24: Vergelijking van de ligging van de kustlijn bij het Zwin in 1983, 1989 en 2011 .....	19
Figuur 25: Voorbeeld van aangroei van strandruggen op het intertidale strand en zandtongen boven de hoogwaterlijn .....	20
Figuur 26: Artist impression van de geplande uitbreiding van het Zwin. ....	21
Figuur 27: Schematisatie van het Delft3D Nieuwpoort-Vlissingen model. ....	22
Figuur 28: Resolutie rekenrooster N2V model in kustdwarse (M-) richting. ....	23
Figuur 29: XBeach detailmodel Knokke .....	25
Figuur 30: Tijdreeks van golfcondities en getij. ....	25
Figuur 31: Satellietfoto van het laatste strandhoofd tussen strand Lekkerbek en Zwin .....	27

Figuur 32: 2013 bodem met kustraaian die gebruikt worden voor verdere analyse. Het betreft korte raaien tot ca. NAP -8 m (bruin) en langere raaien (incl. het witte gedeelte).....	28
Figuur 33: Stroomsnelheden tijdens eb zonder (run06, bovenste figuur) en met (run02, onderste figuur) strandverbreding.....	29
Figuur 34: Stroomsnelheden tijdens vloed zonder (run06, bovenste figuur) en met (run02, onderste figuur) strandverbreding.....	30
Figuur 35: Cumulatief watervolume (positief = NO, negatief = ZW) getransporteerd door kustrai P07 .....	31
Figuur 36: Gemiddelde netto debiet (positief = NO, negatief = ZW) door de kustraaian.....	31
Figuur 37: Netto zandtransport (gemiddeld over 10 jaar) zonder strandverbreding (run06, boven) en met strandverbreding (run02, onder).....	32
Figuur 38: Cumulatief zandvolume (positief = NO, negatief = ZW) getransporteerd door kustrai P07 .....	33
Figuur 39: Gemiddeld netto zandtransport (positief = NO, negatief = ZW) door kustraaian (korte raaien: linker figuur, lange raaien: rechter figuur) voor de situatie met (run02) en zonder (run06) strandverbreding na 5 en 10 jaar.....	33
Figuur 40: Berekende bodemligging na 5 jaar voor de situatie zonder (run06, boven) en met (run02, onder) strandverbreding.....	35
Figuur 41: Berekende sedimentatie (rood) en erosie (blauw) na 5 jaar voor de situatie zonder (run06, boven) en met (run02, onder) strandverbreding.....	36
Figuur 42: Berekende bodemligging na 10 jaar voor de situatie zonder (run06, boven) en met (run02, onder) strandverbreding.....	37
Figuur 43: Berekende sedimentatie (rood) en erosie (blauw) na 10 jaar voor de situatie zonder (run06, boven) en met (run02, onder) strandverbreding.....	38
Figuur 44: Morfologische ontwikkeling dwarsraai 1 zonder (run06, boven) en met (run02, onder) strandverbreding.....	39
Figuur 45: Morfologische ontwikkeling dwarsraai 4 zonder (run06, boven) en met (run02, onder) strandverbreding.....	39
Figuur 46: Morfologische ontwikkeling dwarsraai 7 zonder (run06, boven) en met (run02, onder) strandverbreding.....	40
Figuur 47: Morfologische ontwikkeling dwarsraai 10 zonder (run06, boven) en met (run02, onder) strandverbreding.....	40
Figuur 48: Ontwikkeling waterlijn (NAP) bij raaien 1, 4, 7 en 10 met (blauw) en zonder (zwart) strandverbreding.....	41
Figuur 49: Gemiddeld netto zandtransport over 10 jaar (positief = NO, negatief = ZW) door de korte kustraaian voor de situatie met en zonder strandverbreding.....	42
Figuur 50: Berekende sedimentatie (rood) en erosie (blauw) na 10 jaar voor de situatie met strandverbreding en een D50 van 0.2 mm (run02, boven) en 0.3 mm (run05, onder).....	42
Figuur 51: Ontwikkeling waterlijn (NAP) bij raaien 1, 4, 7 en 10 met (blauw) en zonder (zwart) strandverbreding.....	43
Figuur 52: Gemiddelde netto debiet (positief = NO, negatief = ZW) door de kustraaian.....	44
Figuur 53: Gemiddeld netto zandtransport (positief = NO, negatief = ZW) door kustraaian .....	44
Figuur 54: Berekende sedimentatie (rood) en erosie (blauw) na 10 jaar voor de situatie zonder strandverbreding en met (run06, boven) en zonder (run03, onder) wind en golven. ....	45
Figuur 55: Ontwikkeling waterlijn (NAP) bij raaien 1, 4, 7 en 10 zonder strandverbreding en zonder (blauwe lijnen) en met (zwarte lijnen) wind en golven.....	46
Figuur 56: Snelheden bij vloedstroom, bestaande toestand. ....	47



Figuur 57: Snelheden bij vloedstroom, scenario stranduitbreiding.....	48
Figuur 58: Snelheden bij ebstroom, bestaande toestand .....	48
Figuur 59: Snelheden bij ebstroom, scenario stranduitbreiding.....	49
Figuur 60: Gemodelleerd netto zandtransport (m <sup>2</sup> /s) onder huidige omstandigheden .....	49
Figuur 61: Gemodelleerd gemiddeld zandtransport (m <sup>2</sup> /s) scenario stranduitbreiding.....	50
Figuur 62: Gemodelleerde sedimentatie- en erosiepatronen huidige bathymetrie na 3 jaar simulatie.....	50
Figuur 63: Gemodelleerde sedimentatie- en erosiepatronen voor de stranduitbreiding na 3 jaar simulatie .	51
Figuur 64: Jaarlijks gemiddelde netto langstransport berekend in de zone afgebakend door de witte lijn in de bovenste plot. De volumes zijn incl. poriën.....	51
Figuur 65: Evolutie Profiel 1 na drie jaar (XBeach model), boven: strand- en vooroeverprofiel 2013, onder: scenario Vlaamse Baaien.....	52
Figuur 66: Evolutie Profiel 4 na drie jaar (XBeach model), boven: strand- en vooroeverprofiel 2013, onder: scenario Vlaamse Baaien.....	52
Figuur 67: Evolutie Profiel 7 na drie jaar (XBeach model), boven: strand- en vooroeverprofiel 2013, onder: scenario Vlaamse Baaien.....	53
Figuur 68: Evolutie Profiel 10 na drie jaar (XBeach model), boven: strand- en vooroeverprofiel 2013, onder: scenario Vlaamse Baaien.....	53
Figuur 69: Evolutie van de waterlijn (0mNAP) na drie jaar .....	54
Figuur 70: Evolutie van de waterlijn voor profiel 1.....	54
Figuur 71: Evolutie van de waterlijn voor profiel 4.....	55
Figuur 72: Evolutie van de waterlijn voor profiel 7.....	55
Figuur 73: Evolutie van de waterlijn voor profiel "Zwin".....	55
Figuur 74: Locatie van de profielen .....	B1
Figuur 75: Strand en vooroever 2013 en scenario strandverbreding Zeebrugge - Cadzand, dwarsprofiel 1. ....	B1
Figuur 76: Strand en vooroever 2013 en scenario strandverbreding Zeebrugge - Cadzand, dwarsprofiel 2. ....	B2
Figuur 77: Strand en vooroever 2013 en scenario strandverbreding Zeebrugge - Cadzand, dwarsprofiel 3. ....	B2
Figuur 78: Strand en vooroever 2013 en scenario strandverbreding Zeebrugge - Cadzand, dwarsprofiel 4. ....	B2
Figuur 79: Strand en vooroever 2013 en scenario strandverbreding Zeebrugge - Cadzand, dwarsprofiel 5. ....	B3
Figuur 80: Strand en vooroever 2013 en scenario strandverbreding Zeebrugge - Cadzand, dwarsprofiel 6. ....	B3
Figuur 81: Strand en vooroever 2013 en scenario strandverbreding Zeebrugge - Cadzand, dwarsprofiel 7. ....	B3
Figuur 82: Strand en vooroever 2013 en scenario strandverbreding Zeebrugge - Cadzand, dwarsprofiel 8. ....	B4
Figuur 83: Strand en vooroever 2013 en scenario strandverbreding Zeebrugge - Cadzand, dwarsprofiel 9. ....	B4
Figuur 84: Strand en vooroever 2013 en scenario strandverbreding Zeebrugge - Cadzand, dwarsprofiel 10. ....	B4

Figuur 85: Strand en vooroever 2013 en scenario strandverbreding Zeebrugge - Cadzand, dwarsprofiel 11.	B5
Figuur 86: Strand en vooroever 2013 en scenario strandverbreding Zeebrugge - Cadzand, dwarsprofiel 12.	B5
Figuur 87: Strand en vooroever 2013 en scenario strandverbreding Zeebrugge - Cadzand, dwarsprofiel Zwin.	B5
Figuur 88: Bodemwijziging voor suppletie scen012.	B6
Figuur 89: Bodemwijziging voor suppletie scen015.	B7
Figuur 90: Bodemwijziging voor suppletie scen016.	B7
Figuur 91: Evolutie Profiel 1 na drie jaar (XBeach model), boven: strand- en vooroeverprofiel 2013, onder: scenario Vlaamse Baaien.	B8
Figuur 92: Evolutie Profiel 2 na drie jaar (XBeach model), boven: strand- en vooroeverprofiel 2013, onder: scenario Vlaamse Baaien.	B8
Figuur 93: Evolutie Profiel 3 na drie jaar (XBeach model), boven: strand- en vooroeverprofiel 2013, onder: scenario Vlaamse Baaien.	B9
Figuur 94: Evolutie Profiel 4 na drie jaar (XBeach model), boven: strand- en vooroeverprofiel 2013, onder: scenario Vlaamse Baaien.	B9
Figuur 95: Evolutie Profiel 5 na drie jaar (XBeach model), boven: strand- en vooroeverprofiel 2013, onder: scenario Vlaamse Baaien.	B10
Figuur 96: Evolutie Profiel 6 na drie jaar (XBeach model), boven: strand- en vooroeverprofiel 2013, onder: scenario Vlaamse Baaien.	B10
Figuur 97: Evolutie Profiel 7 na drie jaar (XBeach model), boven: strand- en vooroeverprofiel 2013, onder: scenario Vlaamse Baaien.	B11
Figuur 98: Evolutie Profiel 8 na drie jaar (XBeach model), boven: strand- en vooroeverprofiel 2013, onder: scenario Vlaamse Baaien.	B11
Figuur 99: Evolutie Profiel 9 na drie jaar (XBeach model), boven: strand- en vooroeverprofiel 2013, onder: scenario Vlaamse Baaien.	B12
Figuur 100: Evolutie Profiel 10 na drie jaar (XBeach model), boven: strand- en vooroeverprofiel 2013, onder: scenario Vlaamse Baaien.	B12
Figuur 101: Evolutie Profiel 11 na drie jaar (XBeach model), boven: strand- en vooroeverprofiel 2013, onder: scenario Vlaamse Baaien.	B13
Figuur 102: Evolutie van de waterlijn voor Profiel 1. Huidige toestand: scen011, scenario strandverbreding Vlaamse Baaien: scen017.	B14
Figuur 103: Evolutie van de waterlijn voor Profiel 2. Huidige toestand: scen011, scenario strandverbreding Vlaamse Baaien: scen017.	B14
Figuur 104: Evolutie van de waterlijn voor Profiel 3. Huidige toestand: scen011, scenario strandverbreding Vlaamse Baaien: scen017.	B15
Figuur 105: Evolutie van de waterlijn voor Profiel 4. Huidige toestand: scen011, scenario strandverbreding Vlaamse Baaien: scen017.	B15
Figuur 106: Evolutie van de waterlijn voor Profiel 5. Huidige toestand: scen011, scenario strandverbreding Vlaamse Baaien: scen017.	B16
Figuur 107: Evolutie van de waterlijn voor Profiel 6. Huidige toestand: scen011, scenario strandverbreding Vlaamse Baaien: scen017.	B16
Figuur 108: Evolutie van de waterlijn voor Profiel 7. Huidige toestand: scen011, scenario strandverbreding Vlaamse Baaien: scen017.	B17

Figuur 109: Evolutie van de waterlijn voor Profiel 8. Huidige toestand: scen011, scenario strandverbreding Vlaamse Baaien: scen017 .....	B17
Figuur 110: Evolutie van de waterlijn voor Profiel 9. Huidige toestand: scen011, scenario strandverbreding Vlaamse Baaien: scen017 .....	B18
Figuur 111: Evolutie van de waterlijn voor Profiel 10. Huidige toestand: scen011, scenario strandverbreding Vlaamse Baaien: scen017 .....	B18
Figuur 112: Evolutie van de waterlijn voor Profiel Zwin. Huidige toestand: scen011, scenario strandverbreding Vlaamse Baaien: scen017 .....	B19
Figuur 113: Waterlijn (0 m NAP) voor de verschillende scenario's bij aanvang van de simulatie (t=0).....	B21
Figuur 114: Waterlijn (0 m NAP) voor de verschillende scenario's na drie jaar simulatie (XBeach Knokke model).....	B21
Figuur 115: Sedimentatie- en erosiepatronen na 5 jaar met strandverbreding en een morfologische versnellingsfactor van 125.1 (run02, bovenste figuur) en 62.55 (run07, onderste figuur). De zwarte lijn is de omhulling van de strandverbreding. ....	B22

## 1. Inleiding

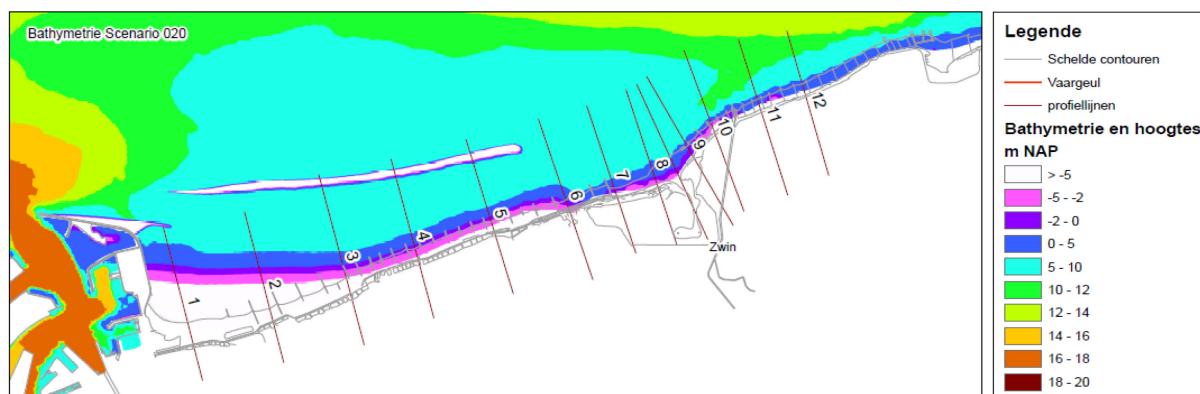
In het kader van Vlaamse Baaien is een scenario onder ontwikkeling voor de kuststrook Zeebrugge – Nederlandse grens, zie Figuur 1, dat de haven van Zeebrugge toegankelijk moet maken voor binnenscheepvaart via de kustlijn<sup>1</sup>. Bijkomend bevordert dit scenario de kustveiligheid in dit gebied, ook bij zeespiegelstijging<sup>2</sup>. Om deze doelstellingen te generen is de aanleg van een eiland in combinatie met een substantiële strandverbreding voorzien, zie Figuur 2. De uitbreiding van de strandzone en vooroever heeft als doel enerzijds de komberging achter het eiland te beperken om zo de stromingen ter hoogte van de nieuwe toegangseul Zeebrugge voor de binnenvaart te beperken, maar anderzijds langsheen de vaargeul achter de eilanden voldoende stroming te voorzien om te verhinderen dat de geul dichtslibt.



Figuur 1: De kust van Zeebrugge tot iets ten oosten van Cadzand-Bad, met daarin aangegeven de locaties zoals in dit memo gebruikt. De oranje lijnen geven de omtrek van het Zwin aan. De gele lijn is de Nederlands-Belgische grens.

<sup>1</sup> Toegankelijkheid van de havens valt onder de bevoegdheid departement MOW, afdeling Maritieme Toegang

<sup>2</sup> Kustveiligheid valt onder de bevoegdheid Vlaamse Overheid, departement Mobiliteit en Openbare Werken, afdeling Kust



Figuur 2: Scenario Vlaamse Baaien (bron: aMT)

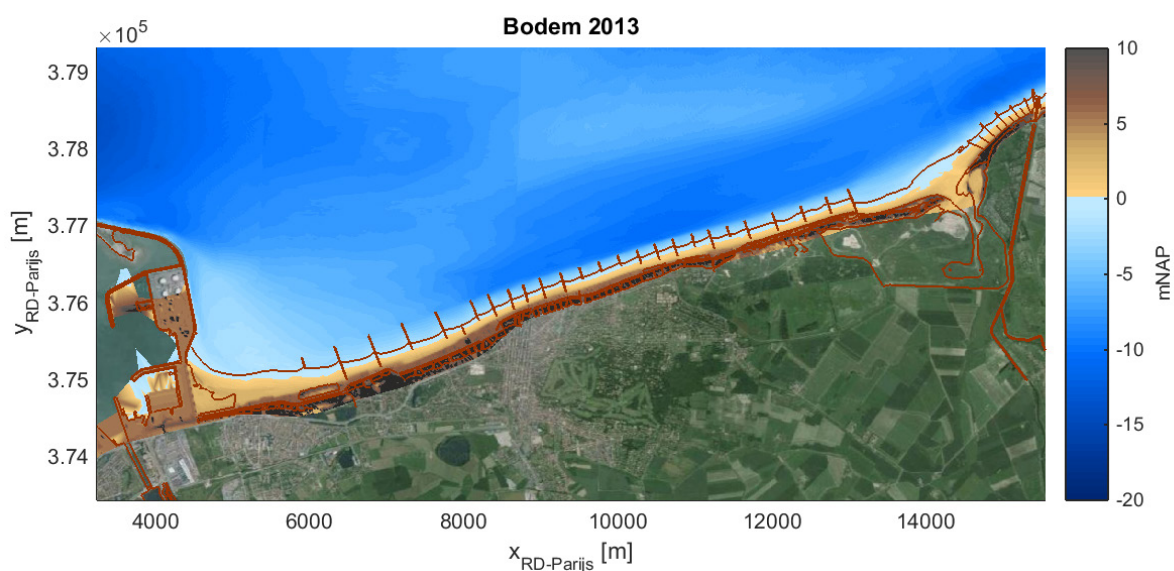
De aanleg van de verschillende ingrepen voorzien binnen het kader van Vlaamse Baaien zal gefaseerd gebeuren. In eerste instantie zal de strandzone en vooroever verbreed worden voorafgaand aan de aanleg van de eilanden. Bij afwezigheid van een eiland zal deze suppletie ten volle blootgesteld worden aan stroming en golven zoals het huidige strand. Deze zone van de Belgische kust is onder de huidige omstandigheden erosiegevoelig en dient op regelmatige basis onderhouden te worden door middel van strand- en vooroeversuppleties.

Binnen deze studie wordt onderzocht wat het morfologisch effect is van een grote suppletie over de volledige breedte van Zeebrugge tot Cadzand in relatie tot de huidige onderhoudsstrategie. De vragen die dit rapport streeft te beantwoorden zijn: Hoe lang blijft deze grote suppletie naar verwachting liggen? Waar gaat dit zand naartoe? En wat zijn de effecten op natuurgebied het Zwin en de Nederlandse kust? In een gezamenlijk verkennend onderzoekstraject worden door Deltares en het Waterbouwkundig Laboratorium twee modelinstrumentaria ingezet: XBeach en Delft3D. De modelresultaten zijn opgenomen in dit verslag alsook een overzicht van de meest relevante literatuur. De resultaten werden op 27/11/2015 voorgelegd aan een experten commissie. De conclusies en aanbevelingen van deze commissie zijn opgenomen in de algemene conclusies. De commissie was samengesteld uit:

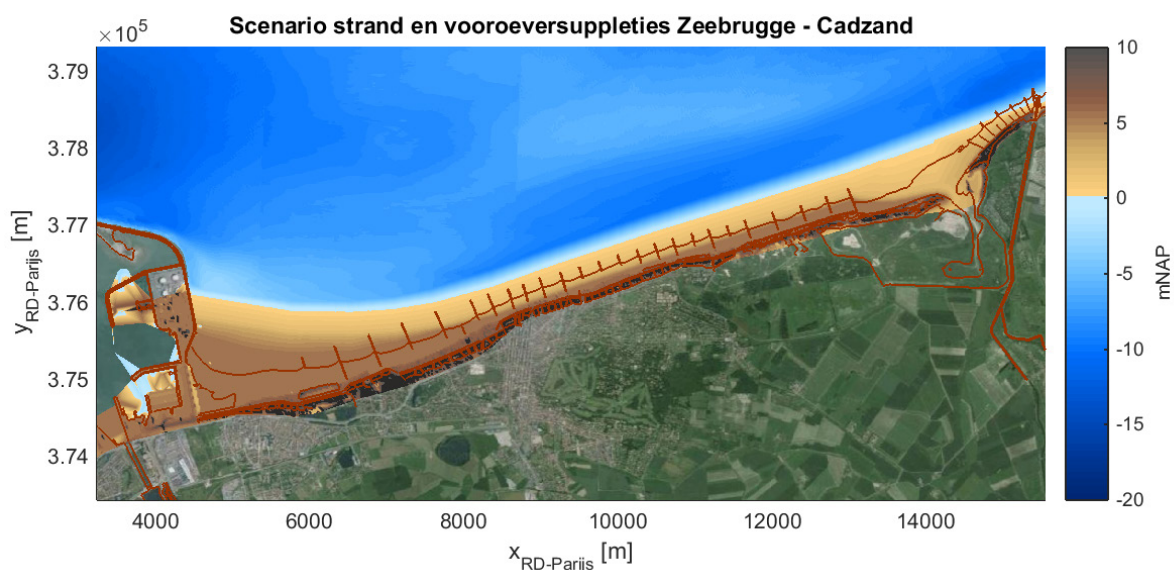
- Marcel Taal - voorzitter (Deltares)
- Zheng Wang (Deltares)
- Youri Meersschaut (aMT, opdrachtgever voor de studie)
- Joris Vanlede (WL)
- Toon Verwaest (WL)
- Dano Roelvink (Deltares, UNESCO-IHE)
- Gerasymos Kolokythas (WL)
- Sebastian Dan (WL)
- Koen Trouw (Fides Engineering)
- Renaat De Sutter (Antea, UGent)
- Jasper Dijkstra - notulen (Deltares)
- Jebbe van der Werf - notulen (Deltares)
- Bart De Maerschalck (WL)

## 2. Scenario beschrijving

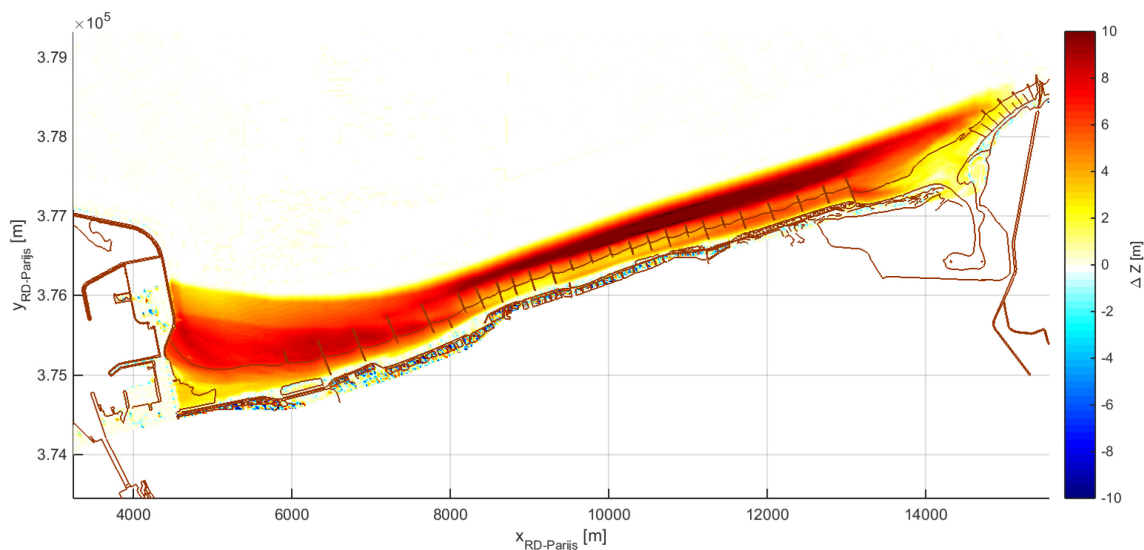
Het Vlaamse Baaien scenario voorziet in een suppletie van  $\pm 38\text{M m}^3$  zand tussen Zeebrugge en Cadzand. Figuur 3 en Figuur 4 geven de bathymetrie zoals opgemeten in 2011 (bathymetrie) - 2013 (Lidar droog strand) en de bathymetrie volgens het Vlaamse Baaien scenario waarbij het strand reeds aangelegd is, maar het eiland nog aangelegd moet worden. Beide bathymetrieën werden aangeleverd door afdeling Maritieme Toegang. Figuur 5 toont het volume van de vooroever- en strandsuppletie. Figuren van de dwars profielen van de huidige toestand (opmeting 2013) en het scenario zijn opgenomen in Bijlage A.



Figuur 3: Bodem en strand 2013 Zeebrugge - Cadzand



Figuur 4: Scenario strand en vooroeversuppleties Zeebrugge – Cadzand



Figuur 5: Strand en vooroeversuppletie:  $\sim 38\text{M m}^3$  (verschilplot Figuur 4 en Figuur 3)

De strandverbreding bestaat uit  $38\text{M m}^3$  zand die tussen  $-8\text{mNAP}$  ( $-5.67\text{mTAW}$ ) en  $+5.5\text{mNAP}$  ( $7.83\text{mTAW}$ ) zal worden aangebracht tussen de oostelijke havendam en de Nederlandse grens ter hoogte van het Zwin. Dit geeft een verbreding van het strand boven NAP van circa één kilometer in de baai van Heist en enkele honderden meters verder oostwaarts, met een onderwaterprofiel dat aanzienlijk steiler is dan het huidige. Tussen  $-9\text{mNAP}$  en  $0\text{mNAP}$  heeft het profiel een helling van rond de  $1/23$  ( $4,3\%$ ). Boven  $0\text{mNAP}$  wordt een breed strand aangelegd met een breedte van 300 tot 350m met een helling van minder dan  $1\%$  ( $\sim 1/120$ ). Op de meeste plaatsen sluit het nieuwe profiel aan op het bestaande via nog een stuk droogstrand met een helling van rond de  $1/30$  ( $\sim 3\%$ ), gevold door een stuk vlak. Het huidige strand en vooroever heeft een gemiddelde helling variërende tussen de  $1/30$  en  $1/50$  ( $3\% - 2\%$ ). De voorgestelde suppletie is een ontwerp van afdeling Maritieme Toegang.

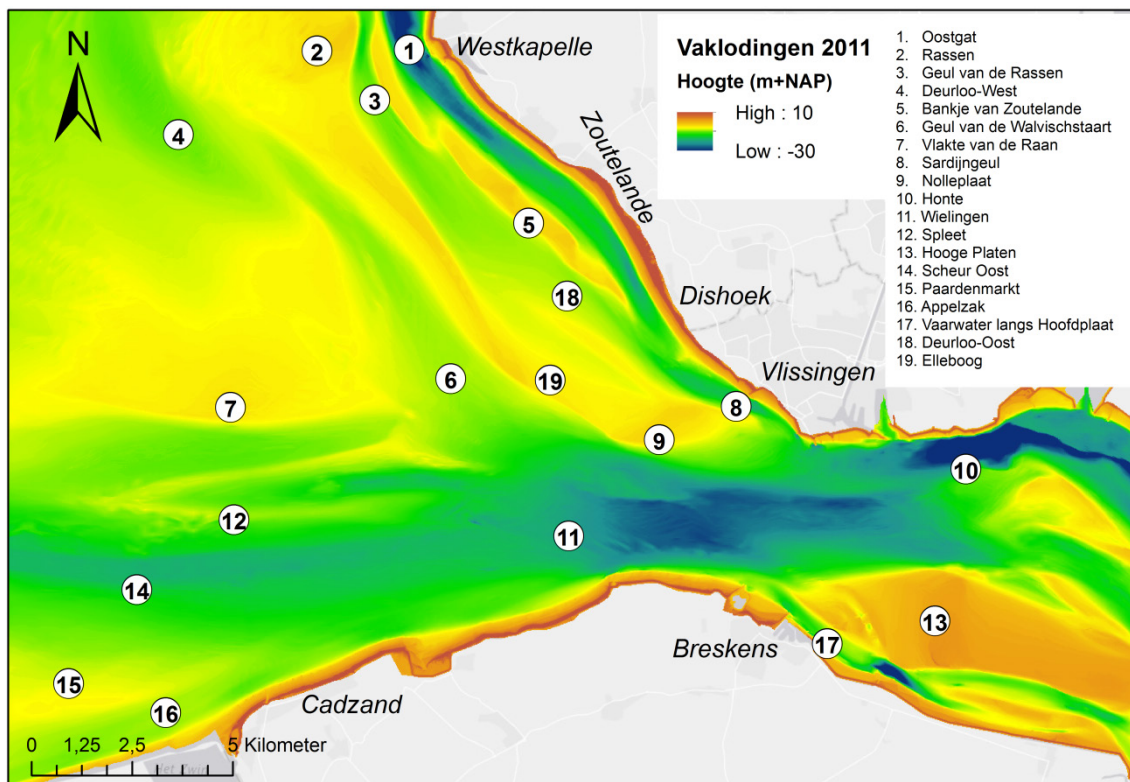
Ten oosten van het Albertstrand (Figuur 1) wordt het huidige strandprofiel begrensd door de ebgeul Appellzak rond  $-7$  tot  $-8\text{mNAP}$ . De voorziene strandverbreding verlegt deze begrenzing circa 300 m zeewaarts, zie profielen in Bijlage A. De huidige strandhoofden komen praktisch geheel onder het zand te liggen.

### 3. Gebiedsbeschrijving op basis van literatuur

Veel van onderstaande informatie is (vrijwel) letterlijk overgenomen uit twee recente documenten die de morfologische processen en ontwikkelingen langs de Vlaamse respectievelijk Nederlandse kust goed samenvatten: 'Scientific support regarding hydrodynamics and sand transport in the coastal zone – Literature and data review coastal zone Zeebrugge - Zwin' door Trouw et al. (2015) en de 'Beheerbibliotheek Zeeuws-Vlaanderen' door Kuijper et al. (2015).

#### 3.1. Zeebrugge – Westerscheldemonding

De belangrijkste geulen en platen in de Westerscheldemonding zijn weergegeven in Figuur 6. Oorspronkelijk liep de geul Deurloo ten zuiden van de ondiepte Rassen door naar het westen, maar door de vorming van een noordwest-zuidoost lopende ondiepte is het oostelijke deel verbonden met de Geul van de Rassen. Het westelijke deel maakt nu verbinding met de Geul van de Walvischstaart (6). De grote vlakte ten zuiden hiervan is bekend als de Vlakte van de Raan (7) en heeft een diepte variërend tussen NAP-2 m en NAP-10 m. De grote oost-west lopende geul in het zuiden, Wielingen (11) in het Nederlandse en Scheur Oost (14) in het Belgische deel, is een belangrijke scheepvaartgeul die toegang biedt tot Zeebrugge en de havens in het Schelde-estuarium, waaronder Vlissingen en Antwerpen. Een belangrijke wijziging in de morfologie van de Westerschelde-monding betreft de verandering van een drie-geulen systeem naar een twee-geulen systeem (Van der Slikke, 1997). Halverwege de 19e eeuw waren Wielingen, Deurloo en Oostgat de belangrijkste geulen, waarbij er een min of meer evenredige verdeling van geulen over de gehele delta was. In de loop van de 20e eeuw is de Deurloo kleiner geworden en zijn de Wielingen en Oostgat in grootte toegenomen, zodat beide laatste nu de dominante hoofdgeulen vormen. De grootste bijdrage aan de vulling en lediging van het Schelde-estuarium verloopt via de Wielingen

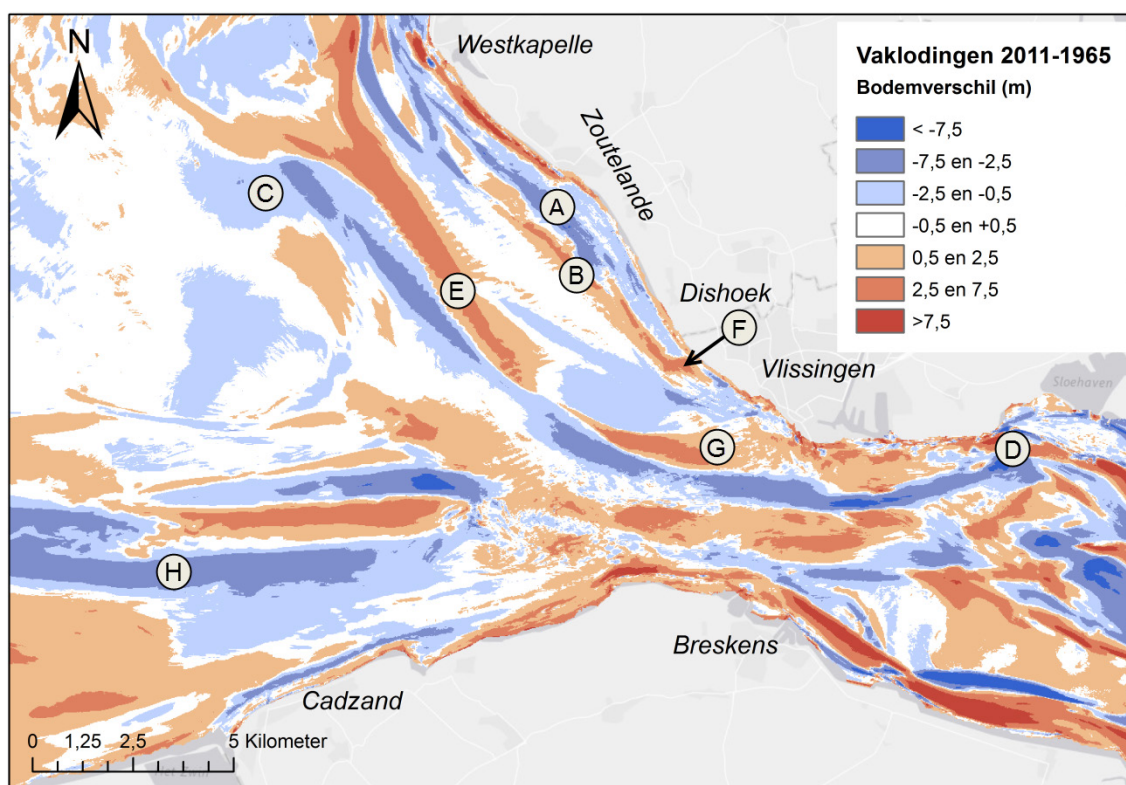


Figuur 6: Huidige configuratie van geulen en platen in de Westerscheldemonding. Bathymetrie gebaseerd op vaklodingen uit 2011.

Figuur 6 toont de morfologische ontwikkeling van de monding van de Westerschelde gedurende de periode 1965 t/m 2011. In deze verschaafte worden de belangrijkste morfologische veranderingen als volgt weergegeven:



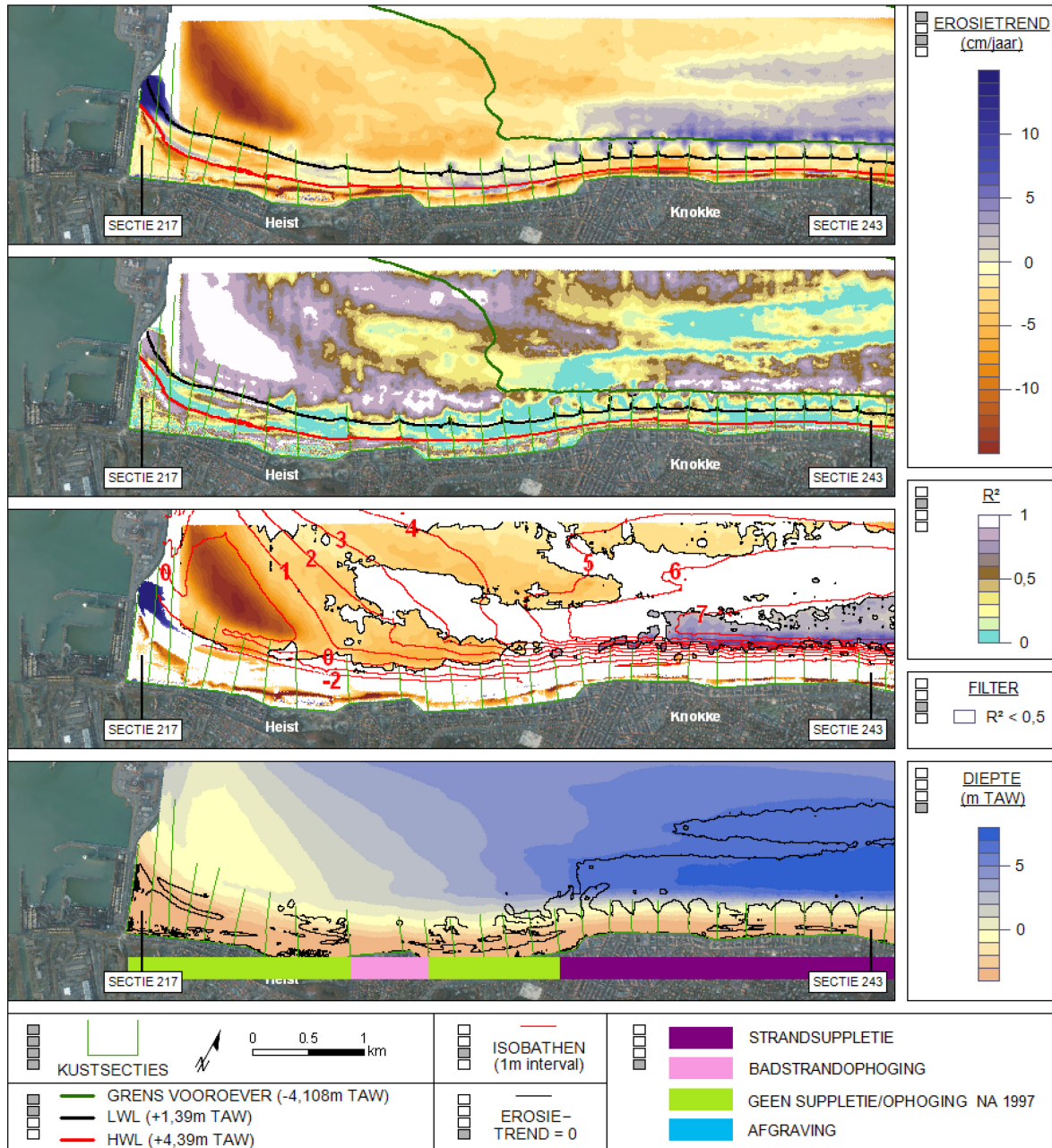
<b>A</b>	Dieper worden van het Oostgat
<b>B</b>	Netto sedimentatie op het Bankje van Zoutelande
<b>C - D</b>	Aansluiting van de Geul van de Walvischstaart op Deurloo-West en Honte
<b>E</b>	Ontstaan van bank vanaf de Rassen richting de Nolleplaat (Elleboog), die zorgt voor de scheiding tussen Geul van de Walvischstaart/Deurloo-West en Geul van de Rassen/Deurloo-Oost
<b>F</b>	Aanzanding van de drempel Oostgat/Sardijngeul (Galgeput)
<b>G</b>	Aanzanding in oostwaartse richting van de Nolleplaat
<b>H</b>	Verdieping van Scheur Oost en westelijk deel Wielingen door baggerwerkzaamheden



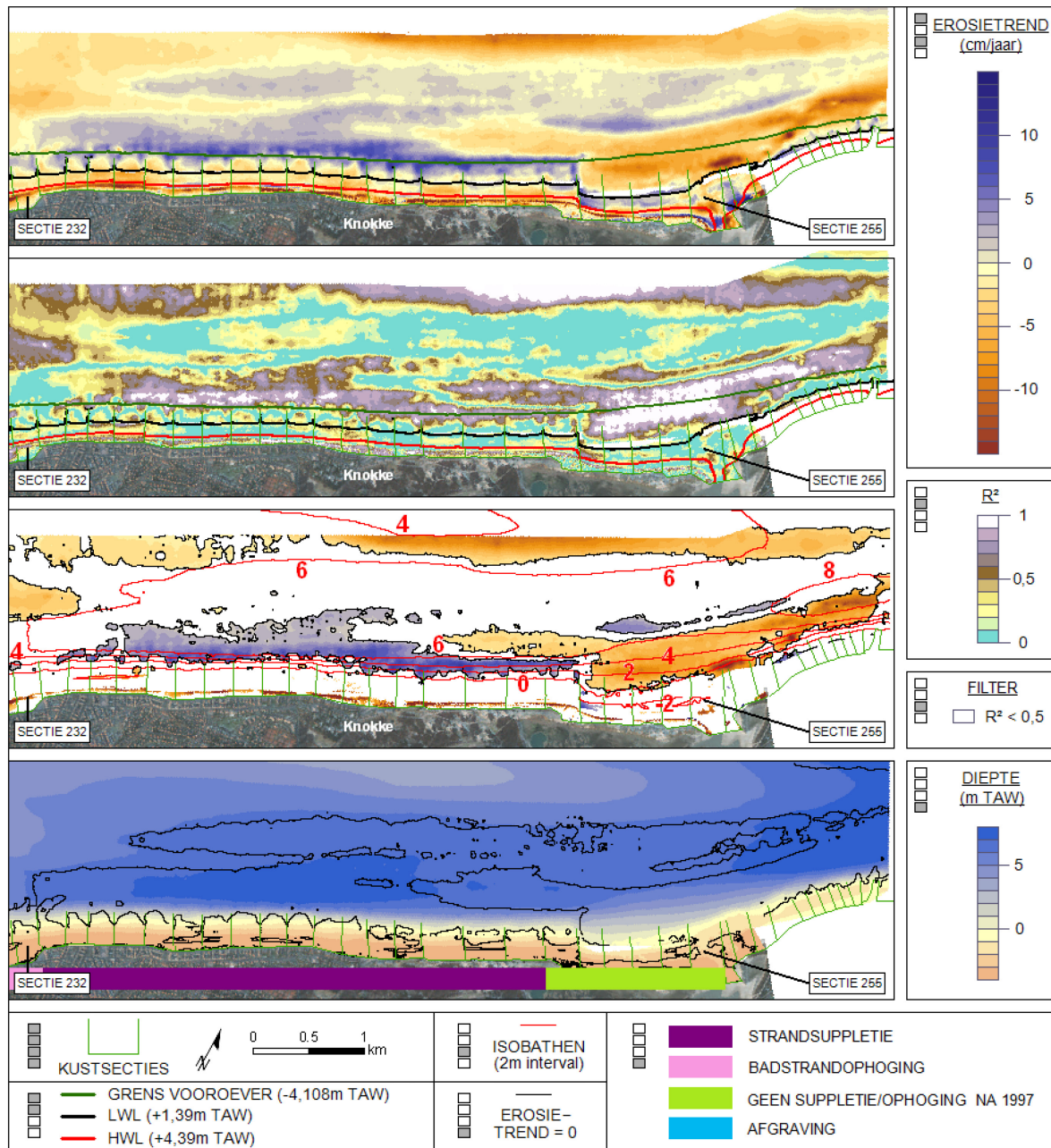
Figuur 7: Verschilkaart 1965 - 2011 met de belangrijkste morfologische veranderingen in deze periode.

### 3.2. Zeebrugge – Zwin

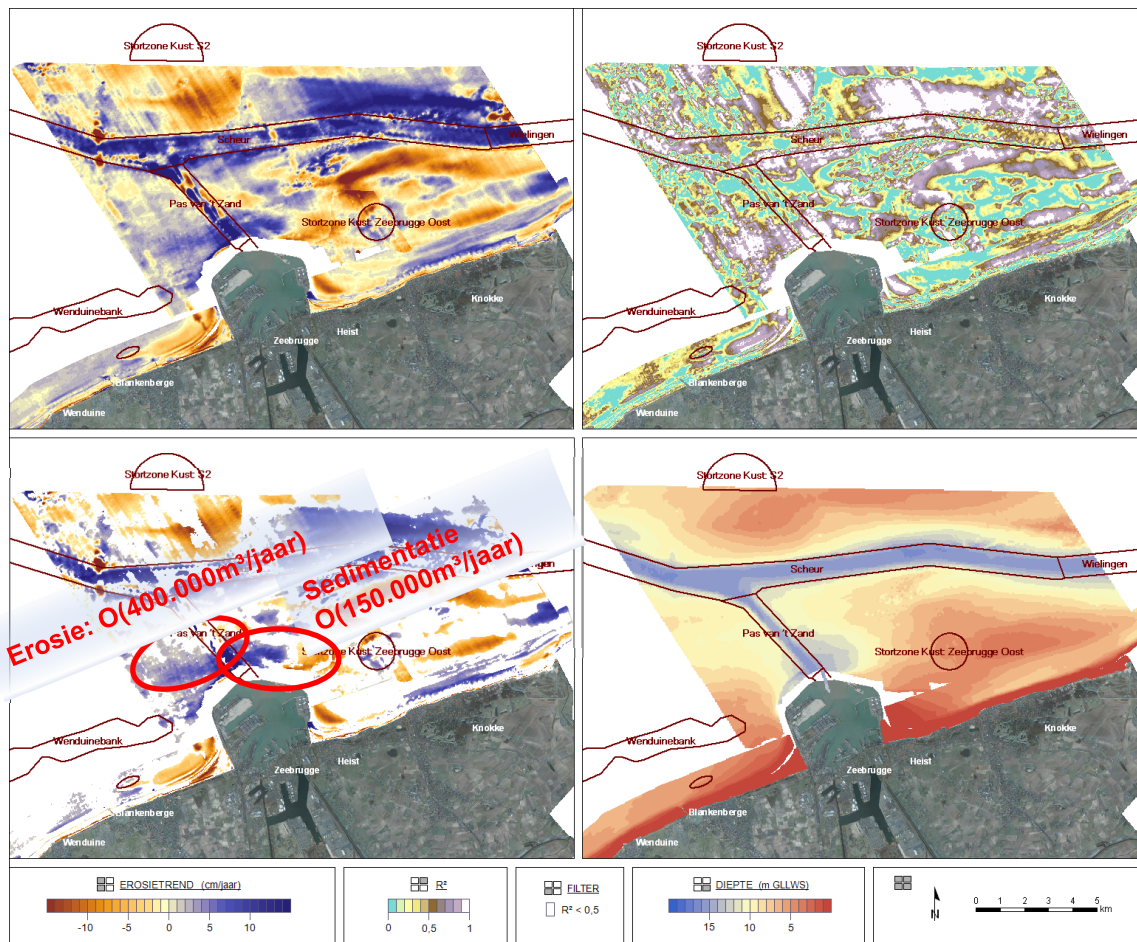
Trouw et al. (2015) beschrijft een literatuurstudie die als doel heeft om het algemene gedrag van het systeem tussen Zeebrugge en het Zwin in kaart te brengen. Ondanks de relatief rechte kustlijn is het gebied vrij complex, omwille van de haven van Zeebrugge en van de nabijheid van de monding van de Westerschelde. Dit is onder andere geïllustreerd in Figuur 8 en Figuur 9 (uit Janssens et al., 2013). De figuren geven de erosie- en sedimentatietrends weer in de periode 1997 – 2010.



Figuur 8: Erosie/sedimentatie trend Zeebrugge – Knokke (Janssens et al, 2013)



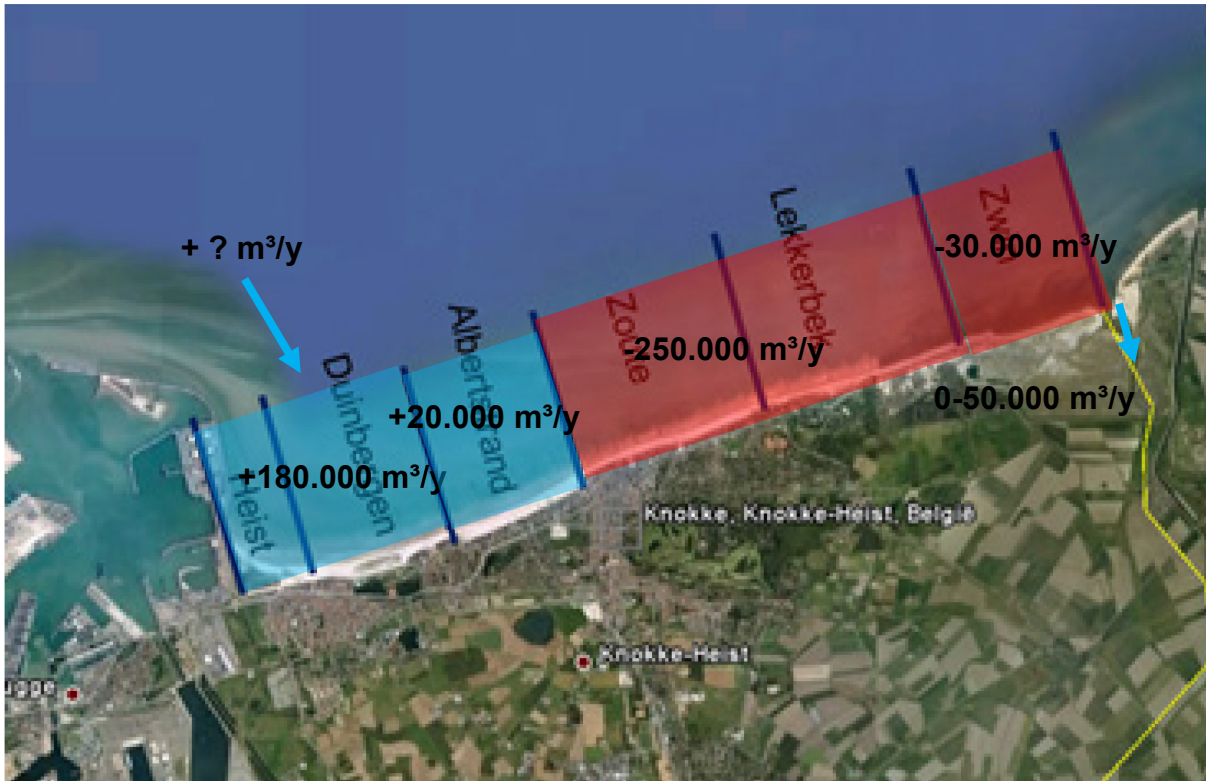
Figuur 9: Erosie/sedimentatie trend Knokke– Cadzand (Janssens et al, 2013)



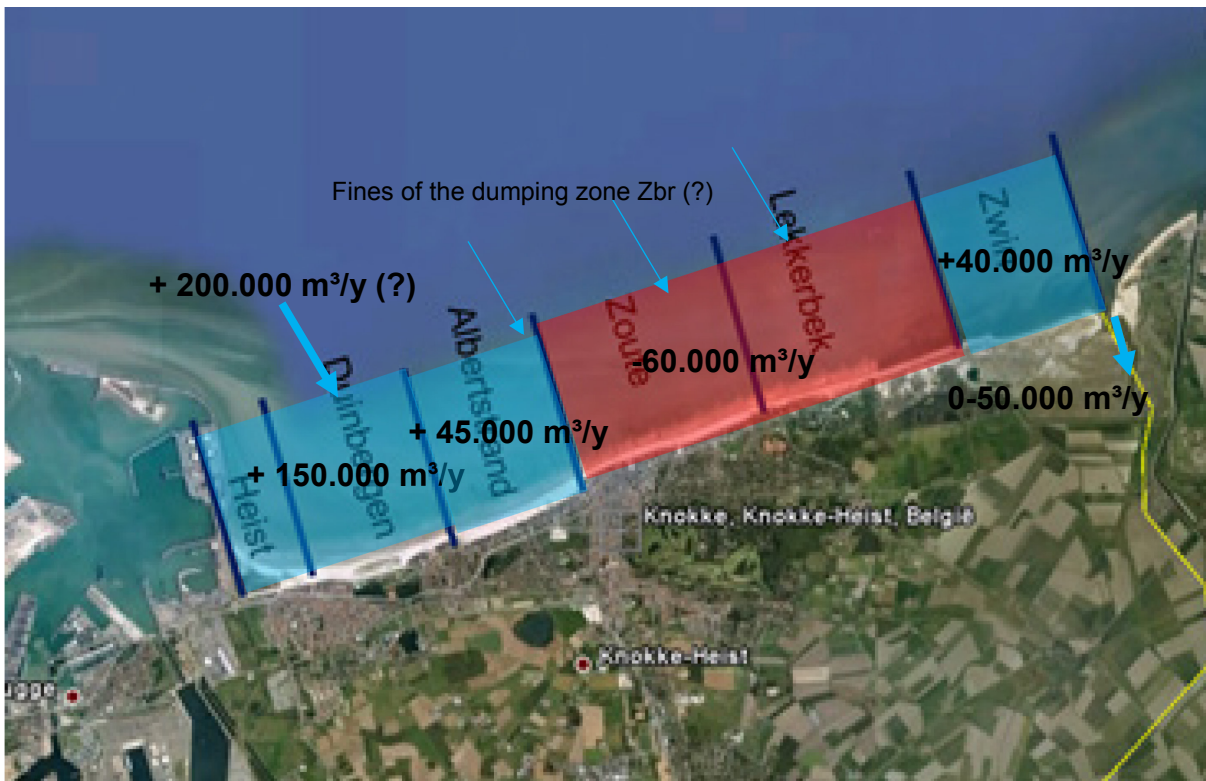
Figuur 10: Erosie en sedimentatie rond Zeebrugge in de periode 1997 - 2010 (Janssens et al, 2013).

### 1.1.1. Baai van Heist

Ongeveer 200.000 m<sup>3</sup> sediment zet zich jaarlijks af in de Baai van Heist sinds de uitbreiding van de haven van Zeebrugge in 1979-1985, zie Figuur 11. Het sediment is waarschijnlijk afkomstig van rond de haveningang. Deze aanvoer van voornamelijk fijn sediment heeft gedeeltelijk de erosie gecompenseerd, die veroorzaakt wordt door de gradiënt in het langtransport (van grof sediment) in de schaduwzone van de haven. In het laatste decennium neemt de sedimentatie van Zeebrugge wat af (Figuur 12). Sedimentatie ter hoogte van het Albertstrand neemt toe. In de Baai van Heist is fijn zand te vinden (100 tot 200 µm).



Figuur 11: Sedimentbalans op basis van waargenomen trends in de periode 1986 tot 1997 voor stranden en vooroever (tot 1500m offshore) (Trouw et al. 2015)

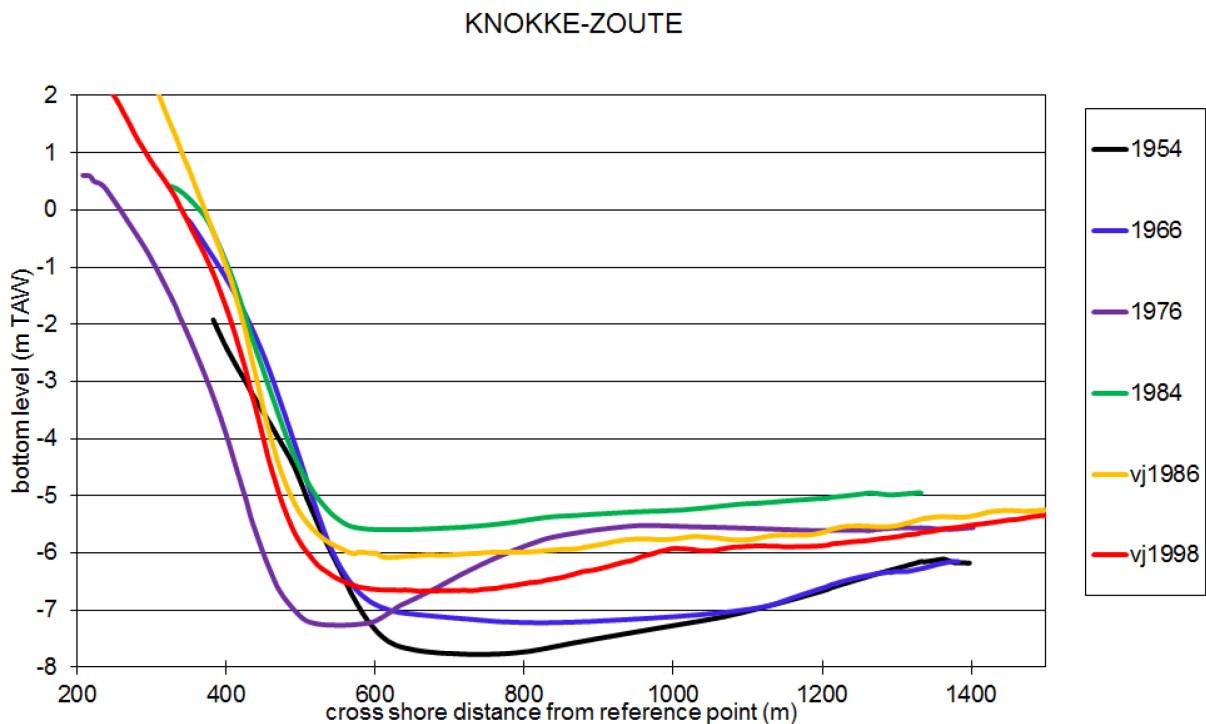


Figuur 12: Sedimentbalans op basis van waargenomen trends in de periode 1997 tot 2010 voor stranden en vooroever (tot 1500m offshore) (Trouw et al. 2015)

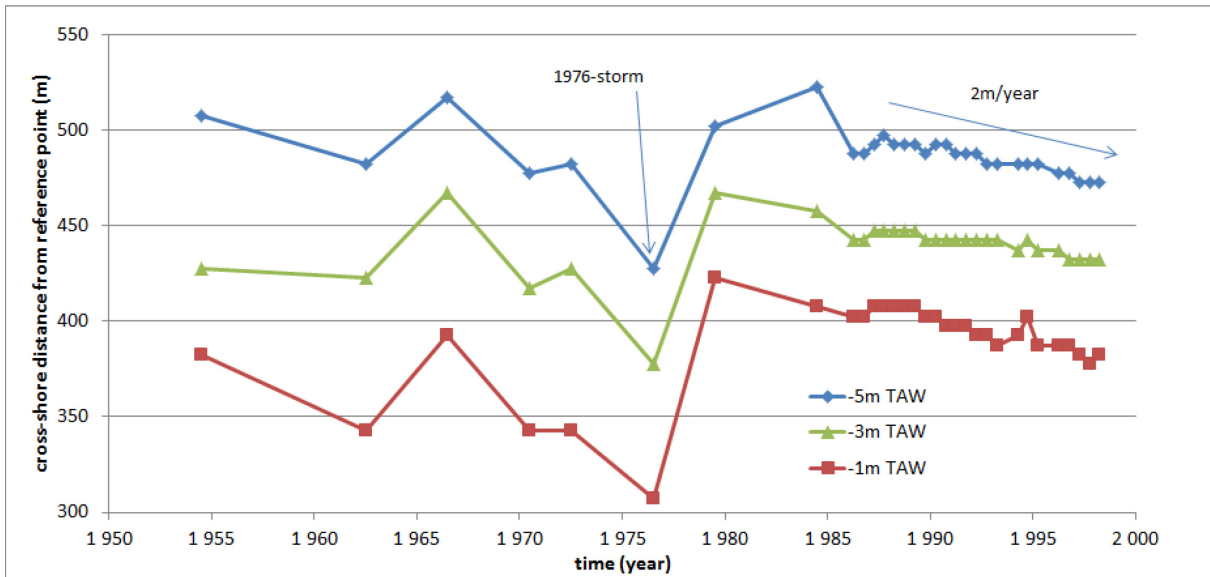
### 1.1.2. Knokke-Zoute en Appelzak

De stranden van Knokke-Heist eroderen door o.a. de aanwezigheid van de Appelzakgeul. Deze geul toont een langdurige trend van landwaartse verplaatsing. Deze evolutie lijkt in de laatste tien jaren langzamer te worden, en suggereert dat een soort van evenwicht bereikt wordt. Het laatste decennium lijkt de meest stabiele periode van de laatste eeuw voor de Appelzak te zijn (Trouw et al., 2015). De stabiliteit is mogelijk te wijten aan de minder hevige stormen en het opnieuw efficiënt worden van de strandhoofden, die nu hoger boven uit het strand uitsteken. Andere oorzaken moeten echter ook een rol spelen om alles te kunnen verklaren (uitbreiding van Zeebrugge dichter bij een evenwicht, invloed van grote strandsuppleties).

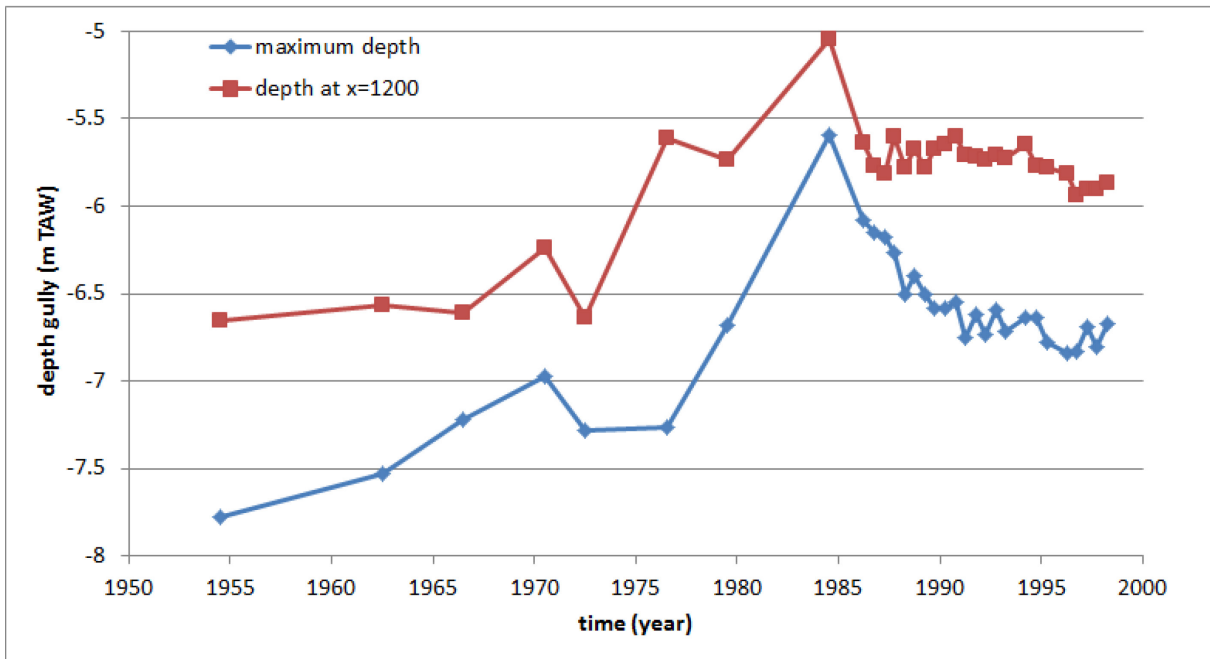
Als gevolg eroderen de stranden van Knokke-Heist nu minder snel dan in het verleden. Weinig informatie is beschikbaar over de lokale transportrichting van de Appelzakgeul. De beperkte literatuur leidt daarenboven zelfs tot tegenstrijdige conclusies.



Figuur 13: Evolutie van de Appelzak: Selectie van gemiddelde dwars-profilen voor Knokke-Zoute (Trouw et al., 2015)



Figuur 14: Evolutie van de positie van de Appelzak (Trouw et al., 2015)

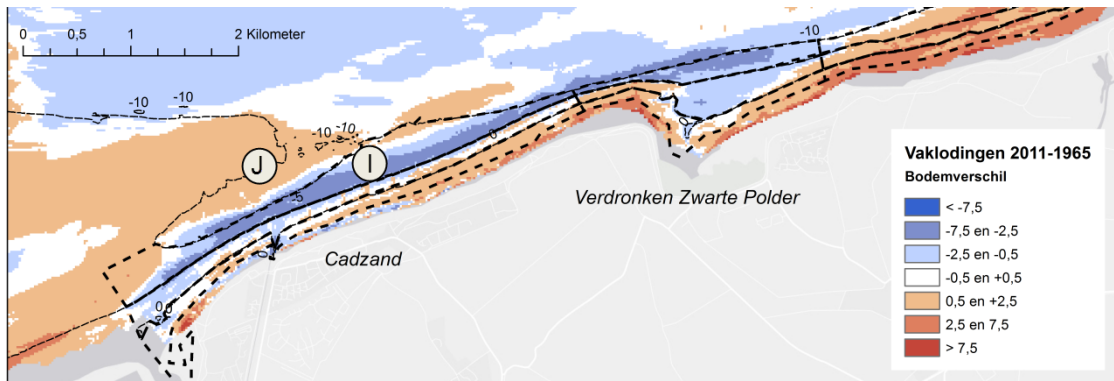


Figuur 15: Maximale diepte van de Appelzak (Trouw et al., 2015)

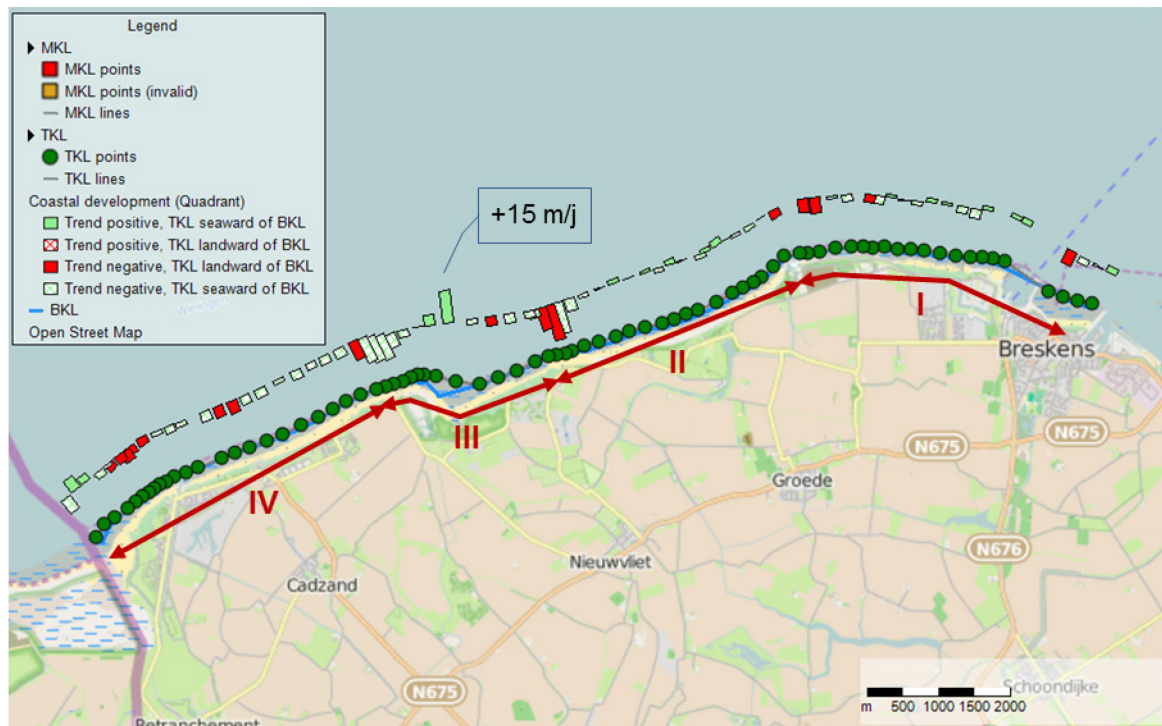
### 3.3. Zwin- Zwarte Polder

De Noordzeekust van Zeeuws-Vlaanderen tussen het Zwin en de Verdrongen Zwarte Polder bestaat uit duin met uitzondering van het gebied rondom Cadzand-Bad waar over een lengte van 1 km de zeewering wordt gevormd door een zeedijk. Ook is hier een uitwateringssluis met twee strekdammen. In 2015 zijn deze dammen vervangen door grotere golfbrekers in combinatie met een jachthaven. De kustoriëntatie is globaal zuidwest-noordoost met enkele lokale afwijkingen. Over de gehele lengte is er een strand en zijn strandhoofden aanwezig voor de kustverdediging. Sinds 1988 worden op regelmatige basis suppleties uitgevoerd. Ten westen van Cadzand-Bad is enkele malen materiaal uit de zandvang van het Zwin op het strand aangebracht, dit betreft enkele tienduizenden m<sup>3</sup>.

Figuur 16 geeft in meer detail de morfologische ontwikkelingen langs de kust van Zeeuws-Vlaanderen weer. Over vrijwel het gehele deel is zijn strand en duinen hoger geworden terwijl erosie van de vooroever is opgetreden (I). Verder zeewaarts is sprake van sedimentatie (J).



Figuur 16: Morfologische ontwikkeling voor de kust van Zeeuws-Vlaanderen tussen 1965 en 2011, trajecten III (Herdijkte Zwarte Polder en Verdrongen Zwarte Polder) en IV (Cadzand-Bad). De dieptelijnen van NAP+3 m, NAP 0 m, NAP-5 m en NAP-10 m hebben betrekking op d



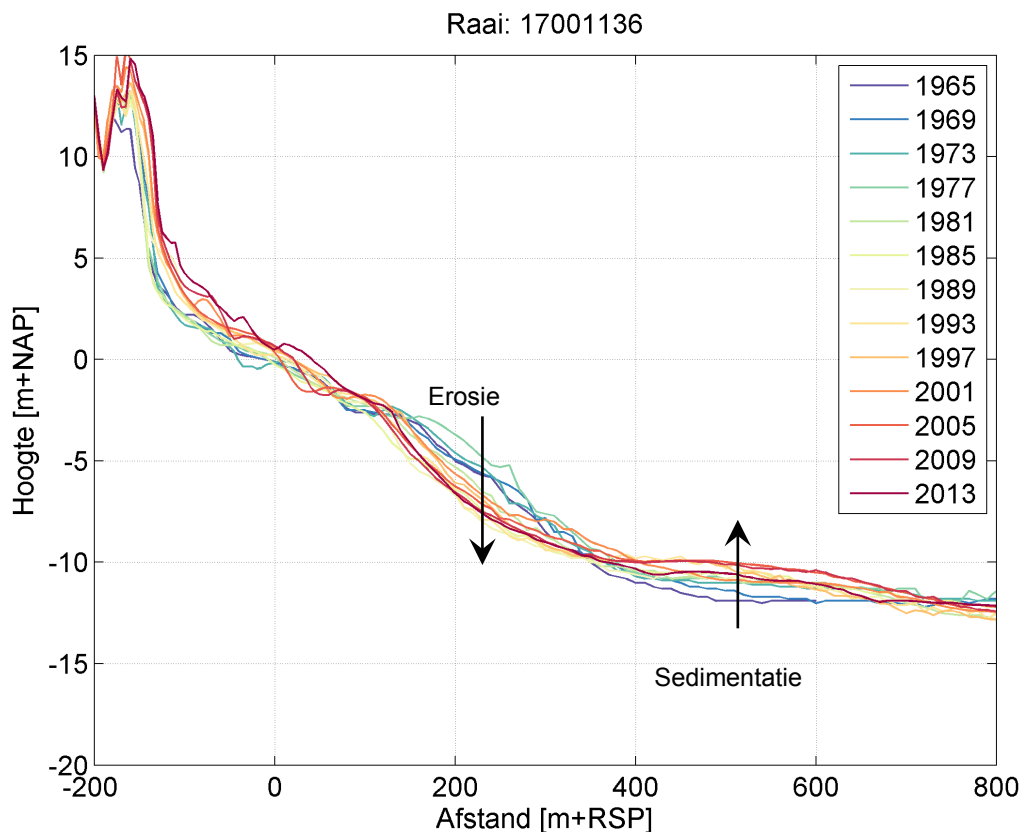
Figuur 17: Jarkus-raaien langs de kust van Zeeuws-Vlaanderen met trends in kustlijnontwikkeling en onderverdeling in deeltrajecten. De basiskustlijn wordt weergegeven met de blauwe lijn. De MKL trends (de licht- en donkerrode en licht- en donkergroene balkjes) zijn bepaald over de periode 2011-2013. De Te Toetsen Kustlijn (TKL-punten) wordt getoond voor 2017

In de trajecten III en IV tussen Cadzand-Bad en Kruishoofd is sprake van een negatieve trend in de Momentane Kustlijn (MKL) (Figuur 17). Uitzonderingen vormen de gebieden gelegen direct voor de Verdrongen Zwarte Polder en bij het Zwin. Bij de Verdrongen Zwarte Polder is in 2010 een strekdam van 300 m aangelegd (Waterschap Zeeuws-Vlaanderen, 2010), wat mogelijk de verklaring vormt voor de



zeewaartse trend van de MKL. Ook kan er een relatie zijn met de verlanding van de in 2010 gegraven verbindingsgeul tussen de Verdrongen Zwarte Polder en zee. Deze is uitgediept om de instroming van zeewater naar het achtergelegen gebied te bevorderen maar neemt in de opvolgende jaren snel in omvang af tot hij in 2013 is verdwenen. De komvullingsstroom is onvoldoende geweest om de geul open te houden.

De sterke landwaartse trend bij Kruishoofd is een reactie op de strand-duin suppletie van 2009 (incl. de aanleg van een erosieberm). De MKL gaat hier weer terug naar de oorspronkelijke situatie. Dit geldt eveneens voor de raaien gelegen voor de Herdijkte Zwarte Polder en de kust verder westwaarts tot Cadzand-Bad waar sprake is van een landwaartse trend als reactie op de in 2009 uitgevoerde strand- en strand-duin suppleties. De raaien direct ten westen van de Zwarte Polder kennen een groot suppletievolume (Figuur 20) en een sterke negatieve trend (Figuur 17). Ook in het verleden is een dergelijke respons na uitgevoerde suppleties waargenomen. Uit een vergelijking van jaarlijkse dwarsprofielen (niet getoond in dit rapport; Kuijper et al. 2015) kan worden afgeleid dat het op strand gesuppleerde zand na 1-2 jaar is weggevoerd. Hierbij is tenminste een deel terecht gekomen op de vooroever tussen NAP en NAP-5 m, zie bijvoorbeeld raai 1136 ten oosten van Cadzand-Bad in Figuur 18. In een klein deel ten westen van Cadzand-Bad vertoont de KML een positieve trend (Figuur 19).

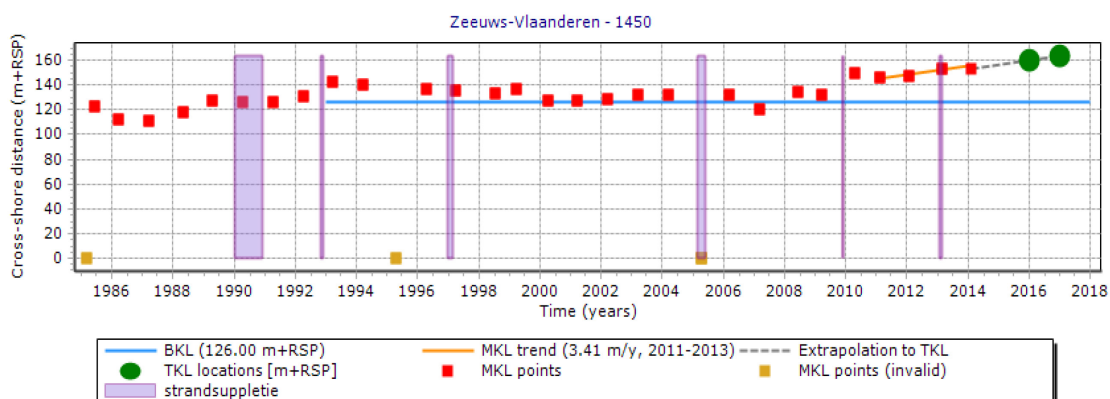


Figuur 18: Dwarsprofielen van de bodemligging in raai 1136 (oostelijk van Cadzand-Bad, ter hoogte van de Brabander) voor de periode 1965-2013.

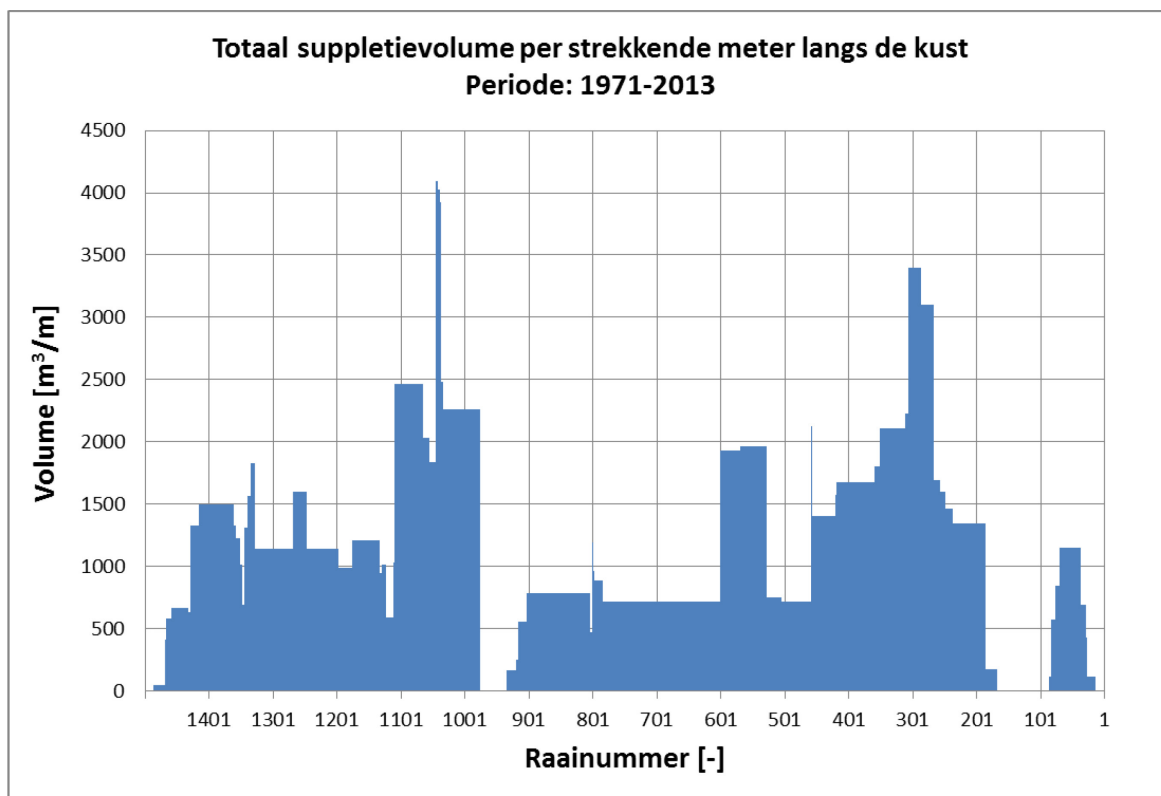
De ontwikkeling van zandvolumes in deeltraject IV is weergegeven in Tabel 1. Deze kwantificeren het beeld in Figuur 16: Strand en duinen hebben meer volume gekregen, vooroever en diepere gebieden zijn zand kwijt geraakt. Doordat de periodes van de metingen verschillen is het niet mogelijk op basis van deze gegevens een zandbalans te maken.

Tabel 1: Ontwikkeling zandvolumes op basis van vaklodgingen (periode 1965-2011) en LiDAR-metingen (periode 1997-2011). Waardes zijn in Mm<sup>3</sup> en niet gecorrigeerd voor suppleties.

Gebied	Gebied	Raai-nummers	KustLiDAR	Strand (A)	Vooroever (B)	Lager gelegen (C)
			1997-2011	1965-2011		
IV	Verdronken Zwarte Polder – Cadzand-Bad	1046-1487	+1,21	+0,32	-0,28	-1,68



Figuur 19: Basiskustlijn (BKL), Momentane Kustlijn (MKL) en Te Toetsen Kustlijn (TKL) in raai 1450 aan de westkant van Cadzand-Bad. De trendbepaling van de MKL is niet erg nauwkeurig in dit gebied (Kuijper et al. 2105)



Figuur 20: Totaal suppletievolumen per strekkende meter langs de kust voor de periode 1971-2013 met onder de grafiek ter referentie de locatie van de raainummers langs de kust van Zeeuws-Vlaanderen. De hoogste raainummers liggen ter hoogte van het Zwin, de laagste bij Breskens.

### Havenaanleg Cadzand-Bad

De omgeving van Cadzand-Bad en de uitwateringssluis zijn aangemerkt als ‘Zwakke schakels’ in de kustverdediging (Waterschap Scheldestromen, 2013). Om deze op te heffen is de waterkering zeewaarts uitgebreid, deels met duinen en deels met een verborgen zeedijk. Om de uitwateringssluis beter te beschermen tegen golven dienden de strekdammen te worden verhoogd en verzaamd. Dit bood ook de gelegenheid om binnen de strekdammen een jachthaven met een capaciteit van 125 ligplaatsen aan te leggen. De bestaande strekdammen aan weerszijden van de uitwateringssluis zijn vervangen door twee golfbrekers die hoger zijn en verder in zee steken (Figuur 13). Het is te verwachten dat de aanzienlijk grotere golfbrekers een grotere barrière voor het kustlans zandtransport zullen vormen.



Figuur 21: De strekdammen bij de uitwateringssluis te Cadzand-Bad in de situatie tot medio 2015 (links, vanuit het zuid westen; het werkschip ligt aan een tijdelijke dam) en de golfbrekers ten behoeve van de sluis en jachthaven (rechts, vanuit het noordwesten) in de huidige situatie.

### 3.4. Het Zwin

Het Zwin is een oude verzande zeearm (Figuur 22) en sinds 1952 een belangrijk natuureservaat van 158 ha. Het bestaat grotendeels uit intergetijdegebied dat bij normaal getij slechts gedeeltelijk onder water loopt door een ca. 250 m brede bres in de duinregel (Figuur 23). Grote delen van het slikken- en schorregebied komen enkel onder water bij springtij of stormvloed.

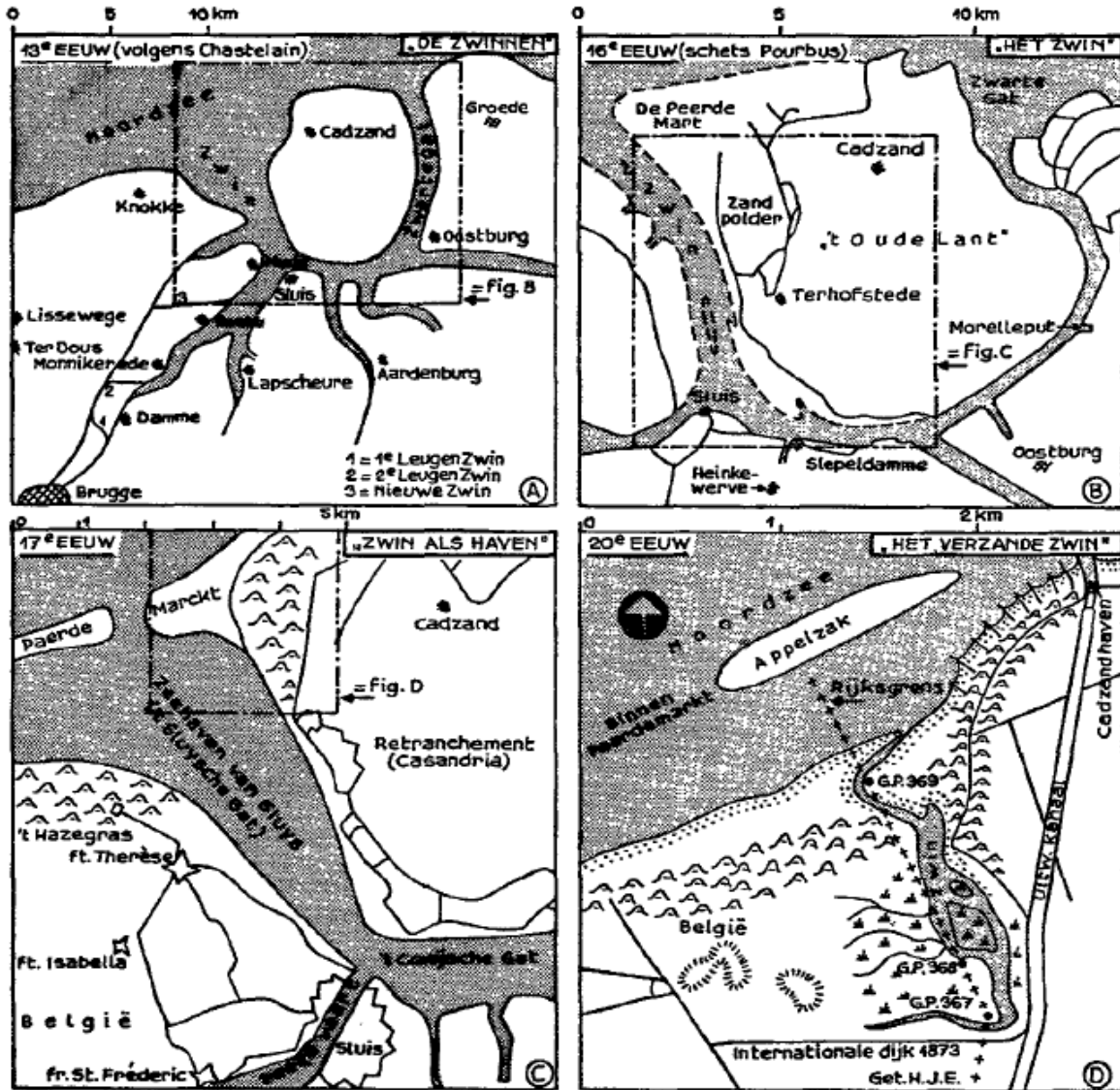


Fig. 20. Een viertal schetsen van het Zwin van de 13e tot de 20e eeuw. De schalen van de fragmenten A, B, C en D verhouden zich ongeveer als 10:5:3:1 en zijn aangegeven op de bovenranden der schetsen. Het grijs getinte gebied is buitenwater.

Figuur 22: De historische ontwikkeling van het Zwin. Uit: Wilderom (1972).



Figuur 23: Het huidige Zwin.

Kustmorfologisch gezien is het Zwin interessant omdat het om een volledig ontwikkelde sluffer met getijgeul gaat, de enige in Vlaanderen. Het systeem is vergelijkbaar met de Sluffer op Texel. De verwachting is dat het systeem zonder menselijk ingrepen gaandeweg verzandt. Er is daarom in het verleden gewerkt met 'zandvangen' landwaarts van de Zwinmonding om te voorkomen dat teveel sediment het systeem binnenkomt. Ook is recent sediment uit het Zwin zelf verwijderd om voldoende intergetijdegebied en getijprisma te behouden. In de nabije toekomst wordt het natuurgebied met 120 ha uitgebreid door gedeeltelijke ontpoldering van de Willem-Leopoldpolder, mede om de open houdende werking van de getijstroom te versterken.

Houthuys (2012) heeft de langdurige morfologische evolutie van het Zwin geanalyseerd op basis van 49 gedigitaliseerde hoogtelijnplannen of DTMs voor het strand (vooral 1979-2011) en 12 gedigitaliseerde vooroeverelingen voor de bathymetrie (1986-2011), met het oog op het effect van suppleties. Zijn voornaamste conclusies zijn:

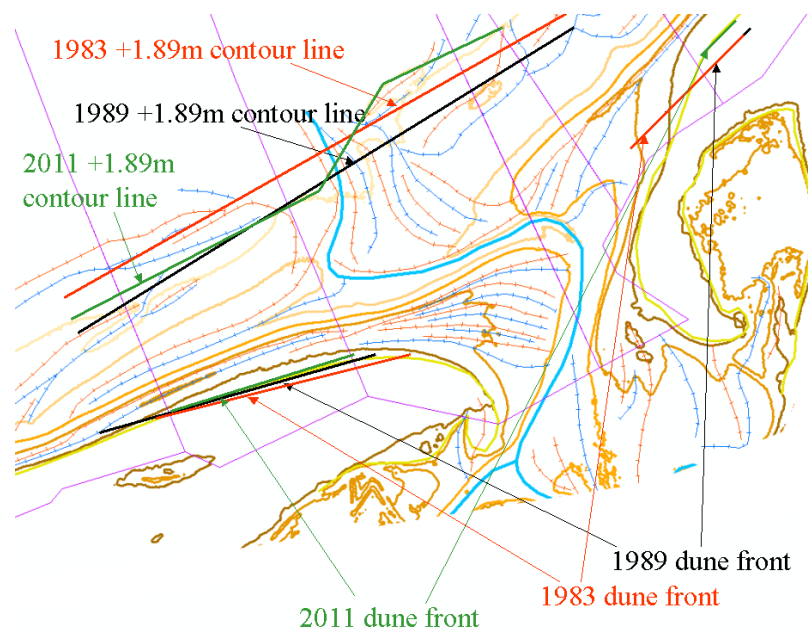
*Zwinmonding :*

- Tussen 1986 en 2011 is de kustpositie rond het Zwin ongewijzigd. Zowel de duinvoet als de +1.89m TAW lijn is stabiel in de tijd gebleven (Figuur 24). Tijdelijke duinafslag kan gebeuren ten gevolge van een storm.
- De monding van het Zwin is een heel dynamisch gebied, wat het meest zichtbaar is in de natuurlijke geulverplaatsing en meanderen, zie bijvoorbeeld verschil in geullocatie tussen Figuur 24 en Figuur 25.
- Morfologische ontwikkelingen tonen een natuurlijk langstransport uit twee richtingen, dat duidelijk sterker is gedurende periodes met stormen. Dit uit zich in de vorming en aangroei van strandruggen. Eolisch transport kan ook tot de vorming van zandtongen leiden.
- Geen verband kan worden gelegd tussen de sterkte van het langstransport vanuit België en suppleties in Knokke-Zoute. Er kan echter een duidelijk verband gelegd worden tussen zandaanvoerwerken aan de Nederlandse zijde (tot het Uitwateringskanaal van Cadzand) en sterker zandtransport richting het Zwin.

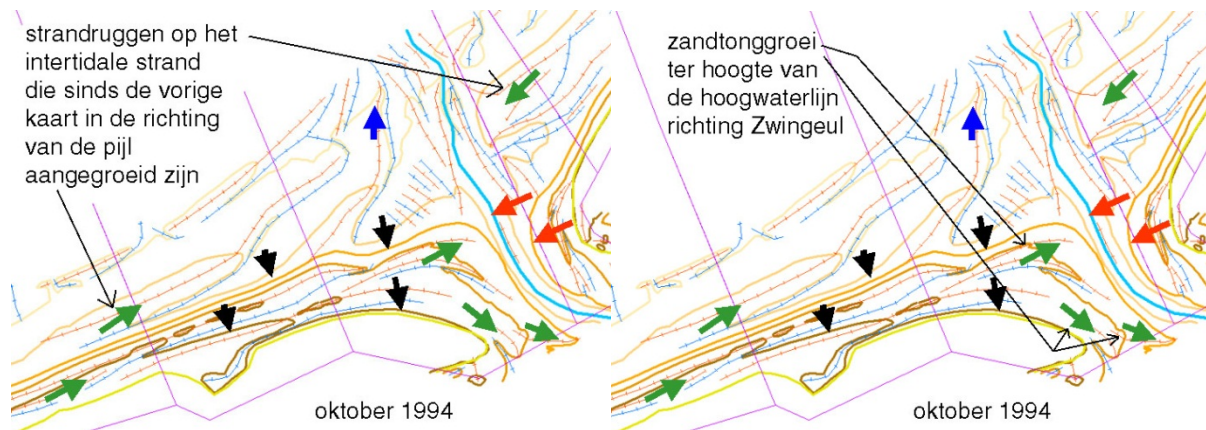
- Gedurende de hele periode kon de geul zelf haar monding open houden, onafhankelijk van mogelijke menselijke ingrepen. Sinds 2006 gebeuren er geen menselijke ingrepen meer en kan er geen sluiting van de monding vastgesteld worden. Wel blijft door de netto invoer van zand het getijprisma afnemen. Strandruggen of zandtongen kunnen door een sterk springtij weggespoeld worden.
- Volumes in deze strandruggen of in de geulverplaatsing zijn zeer beperkt (typisch 10 000 m<sup>3</sup>/jaar) vergeleken met het totale langtransport (typisch enkele 100 000m<sup>3</sup>/jaar).

*Zwinschorre:*

- De Zwinschorre is zuidelijk van de zandvang niet aantoonbaar in hoogte toegenomen tussen 1987 en 2007. De netto invoer van sediment naar de schorre wordt, afgezien van de grote onzekerheid van de metingen, op maximaal 3000 m<sup>3</sup>/jaar ingeschat.
- De aanvoer naar de zandvang zelf wordt tijdens zijn gebruikperiode op 41 000 m<sup>3</sup>/jaar ingeschat. De zandvang fungeert echter mogelijk als zandaantrekker.



Figuur 24: Vergelijking van de ligging van de kustlijn bij het Zwin in 1983, 1989 en 2011 (morfologie van 2011 als achtergrond), uit Houthuys (2013).



Figuur 25: Voorbeeld van aangroei van strandruggen op het intertidale strand en zandtongen boven de hoogwaterlijn t.o.v. de vorige opname (juni en oktober 1994), uit Houthuys (2013).

### Stabiliteit

Getijdebassins zoals het Zwin zijn niet altijd stabiel; dit is afhankelijk van de grootte van de monding en het getijprisma, vaak gevisualiseerd in een zogenaamde Escoffier-curve. Bruun & Gerritsen (1960) geven een kental voor de stabiliteit van een getijdebassin, uitgedrukt als de ratio van het getijprisma ( $P$ ;  $m^3$  water) en het netto langstransport op jaarbasis ( $M$ ;  $m^3$  zand). Hoe groter dit getal, hoe stabiel, en hoe kleiner, hoe groter de kans op sluiting. Voor het Zwin in de huidige situatie is dit –uitgaande van maximaal getijprisma en minimaal langstransport, dus meest optimistisch-  $P/M=400.000/100.000=4$ , wat valt in de meest ongunstige categorie ‘zwak, instabiel, kan sluiten’. De monding van het Zwin is, wellicht met dank aan menselijk handelen, nog steeds open. Menselijk ingrijpen om een verzande monding te heropenen is nog niet nodig geweest. Een verhoogde aanvoer van zand kan de bodemsamenstelling, en daarmee de soortenrijkdom, van het gebied beïnvloeden.

De in dit rapport onderzochte strandverbreding kan effect hebben op het langstransport, waarbij een groter transport de kans op sluiting verhoogt. Het effect op het getijprisma is mogelijk beperkt: dit lijkt vooral bepaald te worden door de komberging en minder door de stromingsweerstand in de monding die door een breder strand wel toe zou kunnen nemen. Ook geeft een breder strand meer ruimte aan eolisch transport en duinvorming nabij de Zwinmonding. Beide processen vergen echter nader onderzoek om tot een conclusie te kunnen komen.

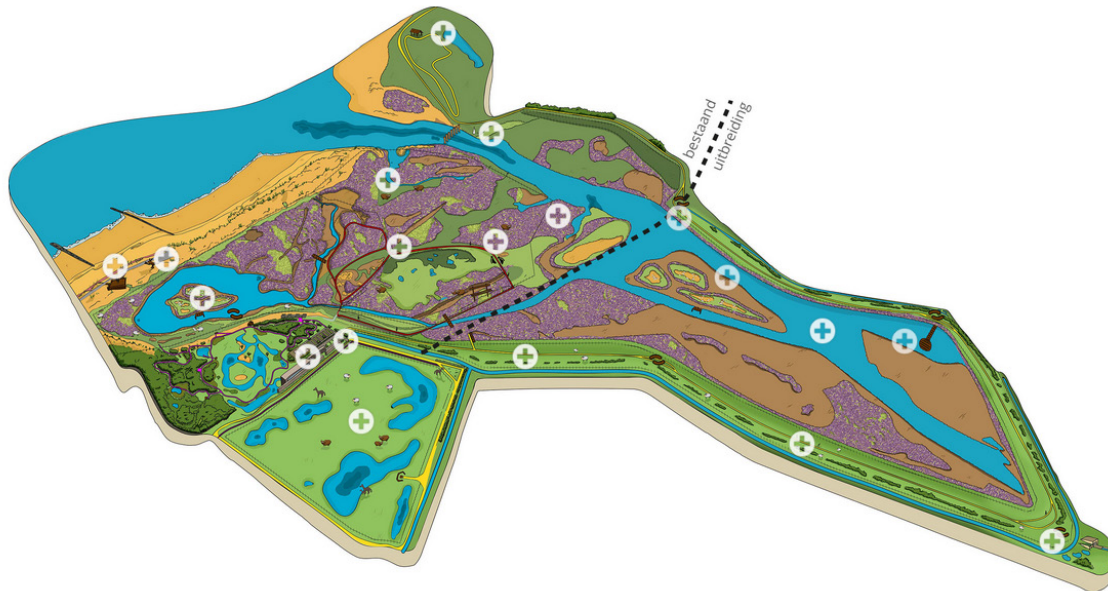
Durieux (2003) heeft met een Sobek (1D) model de stabiliteit van de Slufter op Texel onderzocht. Daar zorgt geulmigratie voor een langere geul en scherpere bochten met plaatopbouw in de binnenbocht. De Slufter is ebdominant (de stroomsnelheden in de geul zijn hoger tijdens eb dan tijdens vloed, wat resulteert in netto zeewaarts transport), wat versterkt wordt door deze langere geul. Deze resultaten kunnen niet direct vertaald worden naar het Zwin want dat is een vloedgedomineerd systeem.

Van Kleef et al. (1997) hebben –ook met een 1D model- onderzocht wat de mogelijke effecten van diverse ingrepen in het Zwin zelf op zandtransporten zullen zijn. Zij geven ook geen uitsluitsel over de stabiliteit, maar geven wel aan dat inpalming van de Willem-Leopoldpolder (zie ‘Uitbreidingsplannen’) kan leiden tot netto zeewaarts transport in de monding.

### Uitbreidingsplannen

De Vlaamse en Nederlandse overheid hebben beslist om een plan voor het Zwin op te zetten waarbij duurzaam behoud en een uitbreiding van het Zwin nagestreefd wordt. De basis voor die beslissing is te vinden in de Langetermijnvisie voor het Schelde-estuarium die een streefbeeld formuleert voor het jaar 2030 en de Ontwikkelingsschets 2010 (OS 2010) die een pakket maatregelen bevat die in het kader van dat streefbeeld moeten worden uitgevoerd. In de geplande uitbreiding van het Zwin (Figuur 26) neemt de komberging toe van de huidige  $270.000 m^3$  bij 158 ha (gelijk aan het getijprisma) tot  $750.000 m^3$  bij 278 ha; Verhaegen et al. 2010). De niet-lineaire toename van de komberging met het oppervlak komt doordat de

Willem-Leopoldpolder 1-1,5 m dieper ligt dan het Zwin. De hydrodynamica is voor verschillende uitbreidingsvarianten gemodelleerd met MIKE21 door Couderé et al. (2010) voor een gemiddeld springtij. De stabiliteit van het Zwin is hierin niet onderzocht, wel is met een eenvoudige kwantitatieve benadering op basis van sedimentconcentratie, trapping efficiency en de ontwikkeling van het getijprisma gekeken naar de globale morfologische ontwikkeling (IMDC, 2007). In alle uitbreidingsvarianten treedt snelle initiële sedimentatie op; de snelheid is sterk afhankelijk van de aangenomen trapping efficiency.



Figuur 26: Artist impression van de geplande uitbreiding van het Zwin.



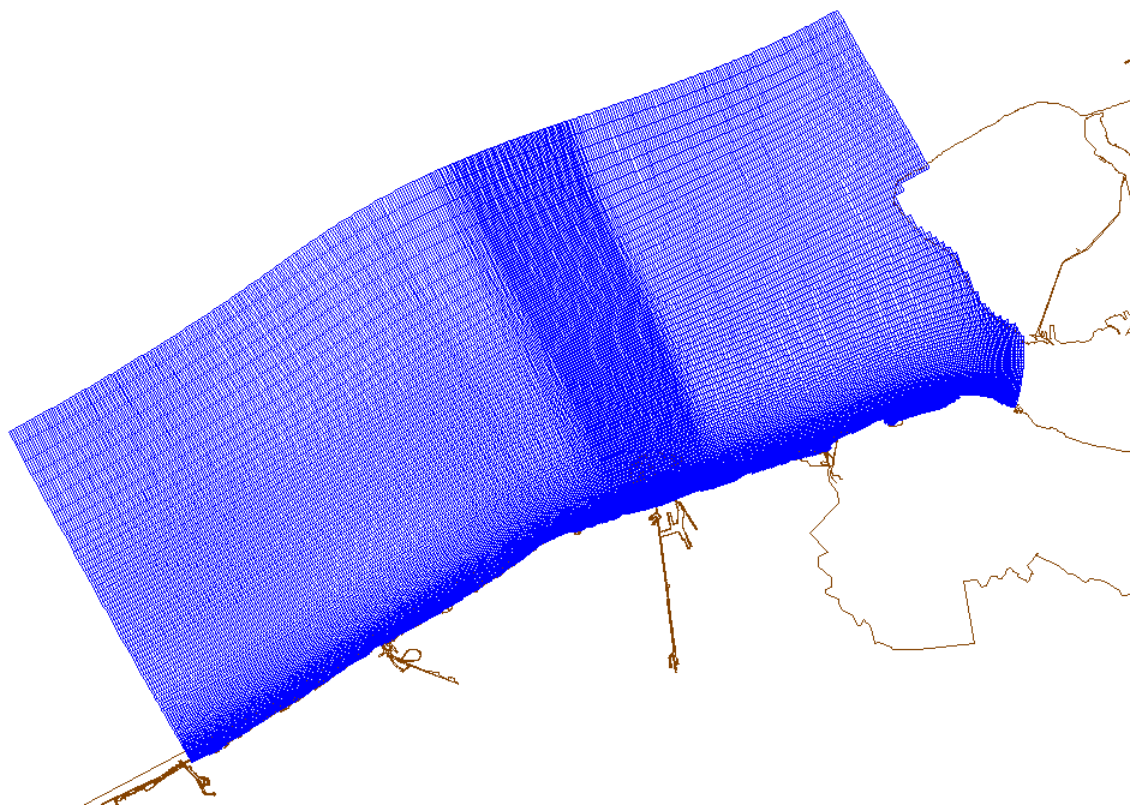
## 4. Modelling

### 4.1. Modellen

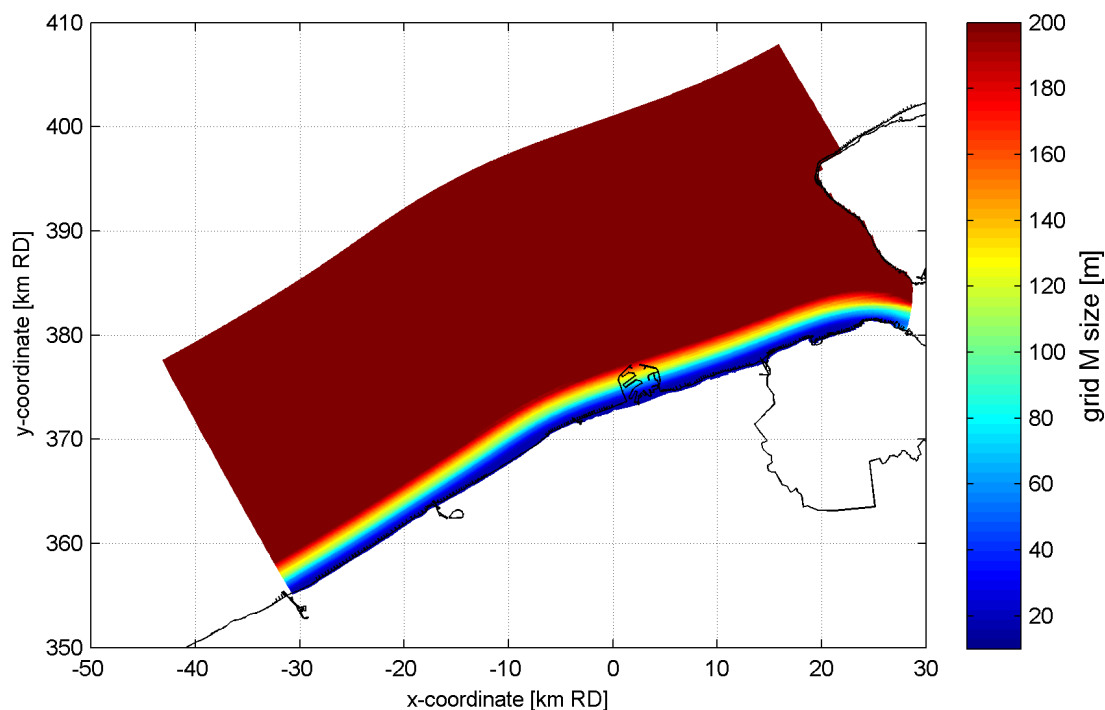
Er is gebruik gemaakt van het bestaande modelinstrumentarium om een preliminaire inschatting te maken van de morfologische effecten van het vooropgestelde scenario. De gebruikte modellen zijn het Delft3D Nieuwpoort-Vlissingen (N2V) model (Figuur 27) en het XBeach detailmodel Knokke (Figuur 29).

#### 4.1.1. Nieuwpoort-Vlissingen model (N2V)

Het Nieuwpoort-Vlissingen is een diepte-gemiddeld Delft3D model met een groot, grofmazig rooster voor de golven en een kleiner, fijnmaziger rooster voor de berekening van golven, stroming, zandtransport en morfologische ontwikkeling. Het domein van het fijne model is ca. 70 km kustlangs en ca. 25 kustdwars (Figuur 28). De resolutie is ~150x1200 m op diep water en ~150x15 m in de brandingszone in Zeeuws-Vlaanderen. Het totaal aantal actieve cellen is ongeveer 56.000. Het effect van de strandhoofden is omwille van de beperkte resolutie niet meegenomen in het model. Dit leidt in het algemeen tot een overschatting van het langstransport, in het bijzonder in de buurt van het Zwin.



Figuur 27: Schematisatie van het Delft3D Nieuwpoort-Vlissingen model.



Figuur 28: Resolutie rekenrooster N2V model in kustdwarze (M-) richting.

De randvoorwaarden zijn afkomstig uit het NeVla model (Maximova et al., 2009). Het betreft waterstanden op de zeerand, Neumann-randvoorwaarden op de laterale randen en stroming op de landwaartse rand. Het N2V model rekent met een representatief morfologisch getij van 24h50m en een representatief golf-wind klimaat bestaande uit 4 condities voor lange-termijn (10 jaar) morfologische berekeningen, zie Tabel 2

Tabel 2: Golf- en windklimaat N2V model voor lange-termijn morfologische berekeningen (Wang et al., 2015).

Conditie	Hs (m)	Tp (s)	$\Theta_{\text{golf}}$ ( $^{\circ}\text{N}$ )	$V_{\text{wind}}$ (m/s)	$\Theta_{\text{wind}}$ ( $^{\circ}\text{N}$ )	Weegfactoren
SW125	1.25	5.4	225	9.6	225	0.4254
N175	1.75	6.0	0	9.0	0	0.1934
W175	1.75	6.0	270	11.5	270	0.0683
W275	2.75	7.0	270	16.7	270	0.0220

Er wordt gebruik gemaakt van de MorMerge cq. parallel-online methode aanpak (Roelvink, 2006) voor het berekenen van de bodemveranderingen. Bij deze methode worden de verschillende golfcondities simultaan doorgerekend gebruikmakend van dezelfde bodem. Na elke tijdstap worden de afzonderlijk berekende bodemveranderingen per golfconditie gewogen opgeteld en teruggekoppeld naar de gezamenlijke bodemligging die in de volgende tijdstap gebruikt wordt.

Er is een onbeperkt aanbod van zand vanaf de bodem. Dit is anders dan b.v. in het Delft3D-NeVla model waarbij via een beperking van het zandaanbod moeilijk-erodeerbare lagen worden meegenomen (LTV Rapport A-27). Baggeren en storten wordt niet meegenomen, terwijl in stortvak ZBO, juist ten westen van de Paardenmarkt (Figuur 1), jaarlijks 2-3 miljoen TDS (ton droge stof) wordt gestort (Vroom & Schrijvershof, 2015). Dit betreft voornamelijk slib en fijn zand uit de haven van Zeebrugge. De strandhoofden zitten ook niet in het model.

Er wordt een uniforme Manning ruwheid van  $0.022 \text{ s/m}^{1/3}$  opgelegd. Er wordt gerekend met een uniforme zandtractie van 0.2 mm. De Van Rijn (1993) transportformule wordt gehanteerd. Verder staan de vermenigvuldigingsfactoren op het golfgerelateerde zandtransport (BedW en SusW) op nul, omdat volgens Wang *et al.* (2015) het strand anders te steil werd. Het rekenrooster van het N2V model is te grof (met name kustlangs) om het Zwin goed mee te nemen.

Het N2V model is gevalideerd aan de hand van gemeten en berekende (NeVla model) waterstanden en stroomsnelheden, en vervolgens aan de hand van langstransporten en sedimentatie- en erosiepatronen in de brandingszone voor de Vlaamse kust. De sterke sedimentatie de eerst 3-4 km ten oosten van de oostelijke havendam van Zeebrugge (Baai van Heist) wordt niet gereproduceerd door het model. Dit is volgens Wang *et al.* (2015) fijn sediment (~100 mu) dat wordt geërodeerd ten NO van deze havendam. Een 3D model met meerdere sedimentfracties kon deze sedimentatie beter berekenen. Daarnaast is volgens Wang *et al.* het representatieve getij (onvoldoende effect springtij) en golfklimaat (onvoldoende noordelijke richtingen) niet voldoende geschikt hiervoor.

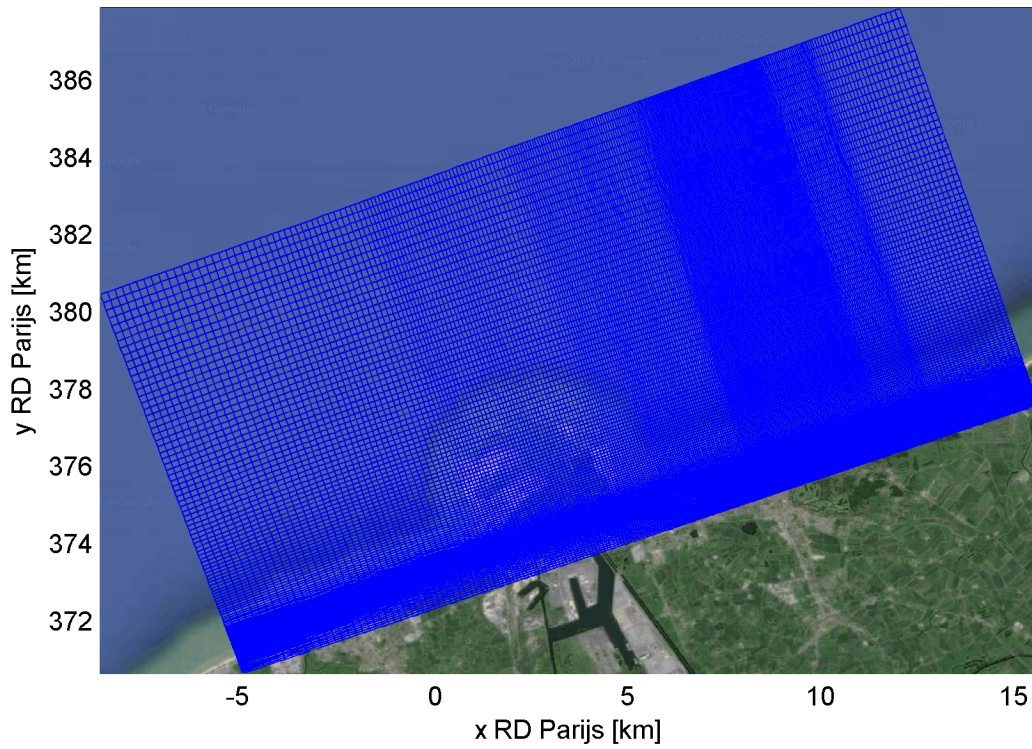
Tussen Knokke-Zoute en Lekkerbek vond in de periode 1997-2010 70,000 m<sup>3</sup> erosie plaats en tussen Lekkerbek en het Zwin een aanzanding van ~50,000 m<sup>3</sup>. Het N2V model geeft voor dit hele gebied erosie, wat volgens Wang *et al.* komt door het ontbreken van strekdammen in het model.

#### 4.1.2. XBeach Knokke model

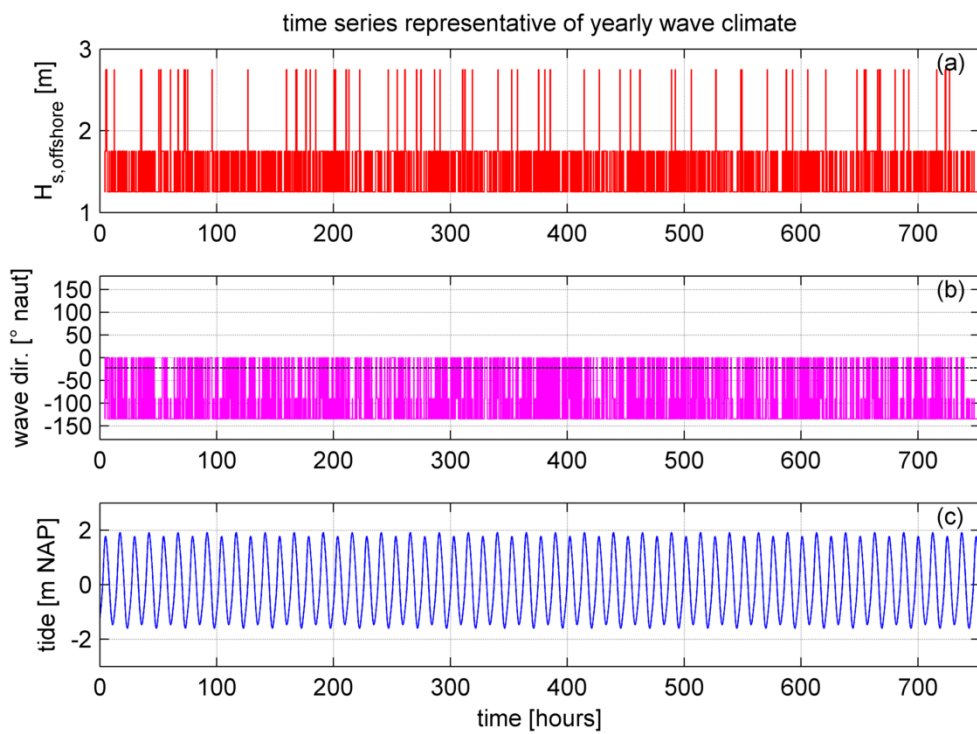
Het XBeach Knokke model is eerder gebruikt voor de morfologische impact studies van kleinere suppleties voor het erosiegevoelige strand van Knokke (Lanckriet *et al.*, 2015). Het betreft een niet-stationair model, met spectrale golfkarakteristieken die op de rand van het model worden opgelegd. De eerder gemodelleerde scenario's zijn opgenomen in Bijlage B. Het model is in staat om de waargenomen erosie en sedimentatie trends kwalitatief te reproduceren (Trouw *et al.*, 2015). Het effect van het meest oostelijke strandhoofd wordt door het model onderschat. Het Zwin, Nederlands-Belgische grens, ligt op de rand van het model.

Het XBeach model heeft een rooster van 121 bij 313 gridcellen. De resolutie varieert en is het kleinst voor de brandingszone en strand van Knokke: 23m (kustdwars) bij 25m (langsrichting). Buiten het interessegebied heeft het grid een maximale resolutie van 240 bij 210m. De stromingen en waterstanden in het model worden gedreven door een representatief getij dat werd opgesteld voor het Oostende-Knokke (OKNO) model zoals beschreven door Zimmermann *et al.* (2012). Eén gereduceerde getijcyclus heeft een tijdsduur van 24.83 uur en bevat dus twee hoogwaters en twee laagwaters. Dit is hetzelfde getij zoals gebruikt in het Nieuwpoort-Vlissingen model.

Dezelfde golfcondities als in Tabel 2 worden gebruikt. Er wordt geen gebruik gemaakt van mormerge, daarom worden de verschillende golfcondities omgezet naar een tijdserie, Figuur 30. Een morfologische acceleratie (morfac) van 35.3 werd gebruikt, zodat de 30 getijcycli overeenkomen met 978930000s (3 jaar). Per (morfologisch) jaar worden dus 10 getijcycli gebruikt.



Figuur 29: XBeach detailmodel Knokke



Figuur 30: Tijdreeks van golfcondities en getij.

Als kalibratieparameters werden de zogenaamde WTI-kalibratieparameters gebruikt (van Geer *et al.*, 2015). Enkel voor de bodemruwheid werd afgeweken van de standaard WTI-parameters: hiervoor werd een Chézy-bodemwrijving gebruikt met een ruwheidsparameter van  $50\text{m}^{1/2}/\text{s}$ . De Chézy-wrijvingswet is, in tegenstelling tot de Manning-ruwheidswet, niet afhankelijk van de waterdiepte, en is de standaardoptie in XBeach. Deze waarde werd bepaald door kalibratie van het langtransport voor de kust. Een overzicht van de belangrijkste kalibratieparameters is weergegeven in Tabel 3. De mediane korrelgrootte in het model is  $300\mu\text{m}$ . In werkelijkheid is de korreldiameter in deze zone variabel. Diepere zones hebben een korrel van rond de  $200\mu\text{m}$ . Door herhaaldelijke strandsuppleties in het verleden met grovere korrel, vindt men op het strand een gemiddelde korreldiameter van ronde de  $300\mu\text{m}$ . In de Baai van Heist vindt men eveneens afzetting van fijner materiaal als gevolg van de erosie voor Zeebrugge.

Tabel 3: Overzicht van de belangrijkste kalibratieparameters van het XBeach model.

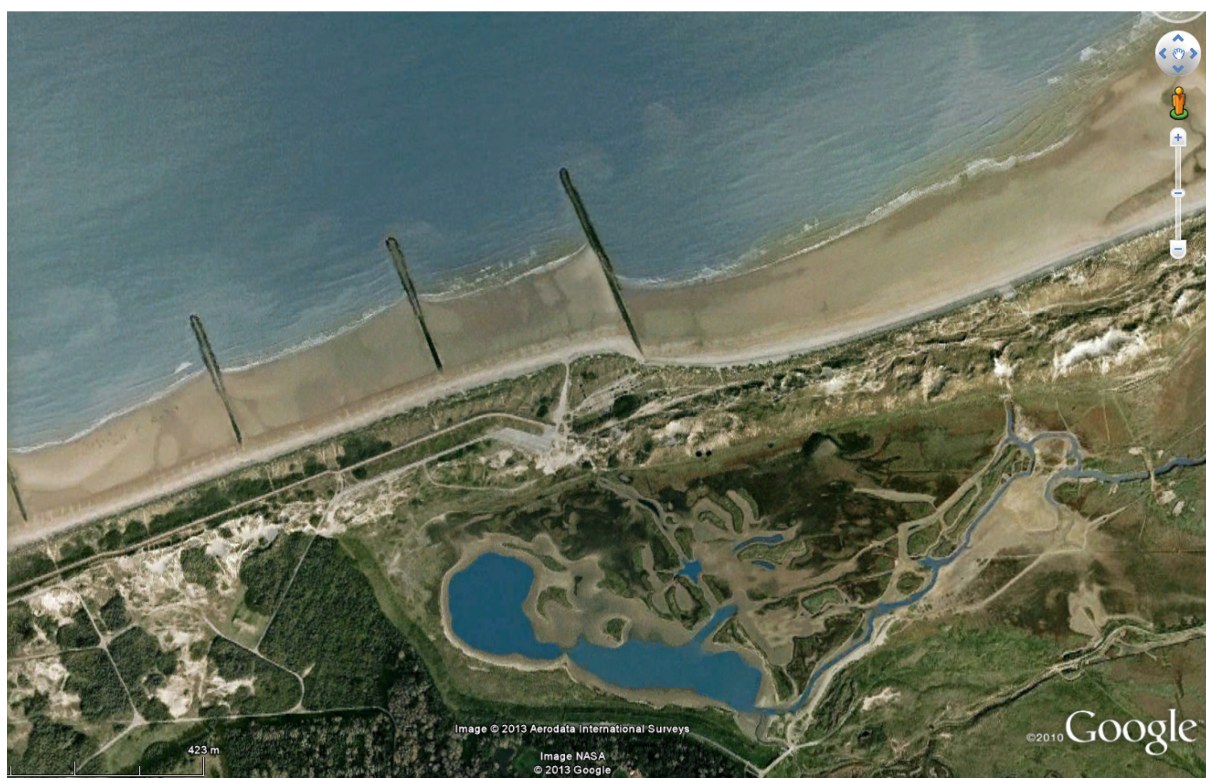
parameter	Beschrijving	Kalibratie-waarde
fw	Wrijvingsfactor voor korte golven	0.000
C	Chézy-ruwheid	$50\text{m}^{1/2}/\text{s}$
gammax	Maximale verhouding golfhoogte-waterdiepte	2.364
beta	Maximale helling van brekende golf in het roller-model	0.138
wetslp	Maximale helling van het strandprofiel onder water	0.260
alpha	Golfdissipatiecoëfficiënt	1.262
facSk	Kalibratie-factor voor het effect van golfscheefheid (skewness) op sedimenttransport	0.375
facAs	Kalibratie-factor voor het effect van golfasymmetrie (asymmetry) op sedimenttransport	0.123
gamma	Brekerparameter	0.541

Tabel 4 geeft een overzicht van de sedimentatie- en erosievolumes in zes secties (Trouw *et al.*, 2015) en voor verschillende delen van het strand. Volumes zijn weergegeven op jaarbasis maar verrekend over de volledige modelduur van drie jaar. Daarnaast zijn ook de gemeten trends uit Trouw *et al.* (2015) over de periode 1997-2010 weergegeven. Over het algemeen worden de sedimentatie en erosietrends door het model in de meeste zones door het model kwalitatief relatief goed gereproduceerd. In het bijzonder voor de het gedeelte boven laagwater en de zone Knokke-Zoute waarvoor het model in eerste instantie opgezet is geweest. De uitwisseling tussen Lekkerbek en Zwin wordt in het model overschat. In werkelijkheid blijkt laatste strandhoofd ten Westen van het zwin bijzonder efficiënt. Dit blijkt ook uit de satellietfoto in Figuur 31.

De sedimentatie in Baai van Heist wordt door het model niet gereproduceerd. Materiaal dat erodeert voor de haveningang wordt door het model afgezet ten Oosten van Zeebrugge maar bereikt de Baai van Heist niet (zie Figuur 63). Dit is een probleem dat eveneens wordt vastgesteld in het Nieuwpoort-Vlissingen model (Wang *et al.* 2015), zie ook Figuur 41, maar ook in andere gelijkaardige situaties zoals het Delft3D model voor de Haven van IJmuiden (Bouthmy, 1998). In het rapport Wang *et al.* (2015) wordt gesuggereerd dat een 3D-model met meerdere golfcondities en een aangepast representatief getij in combinatie met meerdere zandfracties mogelijks betere resultaten kan geven. Het maken van een nieuw model lag echter buiten de scope van dit project.

Tabel 4: XBeach Knokke model: Gemeten en gemodelleerde sedimentatietrends  
(1000 m<sup>3</sup>/jaar per sectie, zie Figuur 1), rood=erosieve zone, blauw=sedimentatiezone

	Baai van Heist	Duinbergen	Albert Strand	Knokke-Zoute	Lekkerbek	Zwin
<b>Boven Laagwater (boven +1.39m TAW)</b>						
Waarnemingen	1	9	4	-40	6	8
Model	-1	11.8	-0.6	-46.8	-45	30.6
<b>Vooroever (tussen +1,39 en -4,11m TAW)</b>						
Waarnemingen	52	88	17	-4	-8	13
Model	-5.3	25.8	1.3	-12	-20.4	42.5
<b>Zeewaarts van -4,11 m TAW</b>						
Waarnemingen	0	0	24	-10	-4	21
Scen011	0	0.2	0.2	-18.3	26.9	6.2
<b>Totaal profiel vanaf -4,11 m TAW tot de dijk</b>						
Waarnemingen	52.5	97	45	-54	-6	43
Model	-6.3	37.8	0.9	-77.1	-38.6	79.3



Figuur 31: Satellietfoto van het laatste strandhoofd tussen strand Lekkerbek en Zwin  
(Bron: Google, Aerodata IS, NASA)

## 4.2. Modelresultaten

### 4.2.1. Simulaties Nieuwpoort-Vlissingen model

De simulatie loopt van 12 oktober 2006 20:30 uur tot 3 november 2006 14:00 uur (21.7 dagen). Het betreft 21 keer het morfologische getij, waarvan de eerste spin-up is waarbij de morfologische veranderingen "uit staan". De morfologische versnellingsfactor is 125.1. De weegfactoren worden in Delft3D automatisch opgeschaald naar 1, i.e. een factor 1.41 hoger weegfactor dan zoals vermeld in Tabel 2. De som rekt dus morfologische veranderingen uit op een tijdschaal van  $(21.7-1.03)*125.1*1.41 = 3651$  dagen oftewel 10 jaar. Ter controle zijn ook sommen gedaan met een lagere morfologische versnellingsfactor. Het effect van de MorFac op de berekende morfologische ontwikkeling blijkt zeer beperkt (zie Bijlage A, Figuur 115).

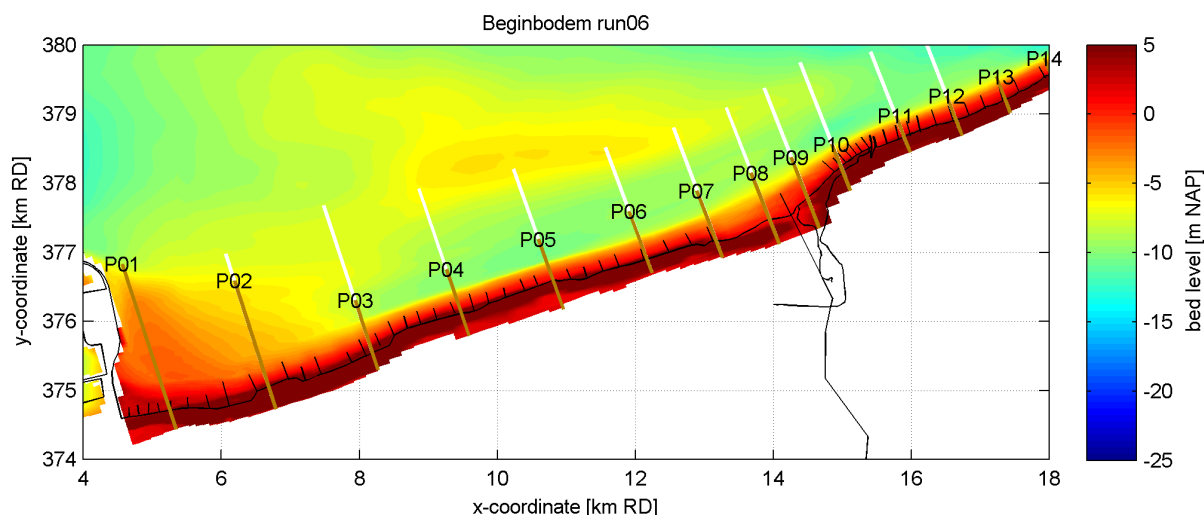
In lijn met Wang *et al.* (2015) is gerekend met een oudere Delft3D versie (5.00.00.1234), omdat deze stabielere modelsimulaties gaf. Met name ter hoogte van het Oostgat heeft het model de neiging instabiel te worden, als gevolg van onrealistisch sterke berekende bodemveranderingen.

Er zijn 4 basissimulaties gedaan:

- 2013 bodem, D50 = 0.2 mm (naam van de simulatie: run06)
- 2013 bodem incl. strandverbreding, D50 = 0.2 mm (run02)
- 2013 bodem, D50 = 0.3 mm (run08)
- 2013 bodem incl. strandverbreding, D50 = 0.3 mm (run05)

Anders dan het N2V model gerapporteerd door Wang *et al.* is de referentiebodem afkomstig uit 2013 in plaats van 2010. De simulaties met een andere korreldiameter zijn bedoeld om een directere vergelijking met het XBeach model mogelijk te maken, en het effect van een eventuele suppletie met grover zand te verkennen.

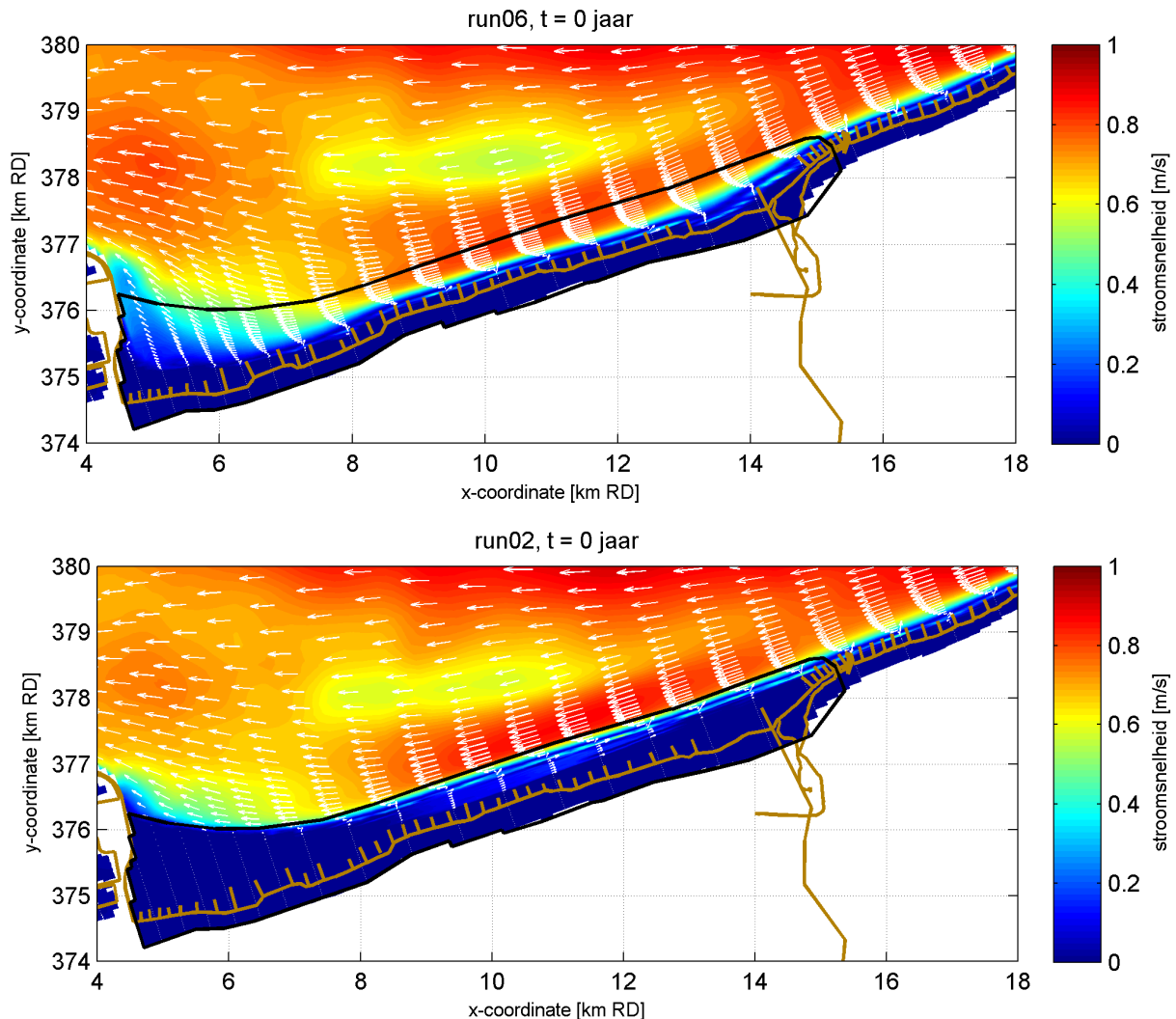
Figuur 32 toont de dwarsraaien die gebruikt worden voor de analyse van debieten, langstransporten en bodemontwikkeling. De korte raaien lopen tot een waterdiepte van 8 m, ook in geval van de strandverbreding en bevatten zo het belangrijkste gedeelte van de brandingszone..



Figuur 32: 2013 bodem met kustraaian die gebruikt worden voor verdere analyse. Het betreft korte raaien tot ca. NAP -8 m (bruin) en langere raaien (incl. het witte gedeelte).

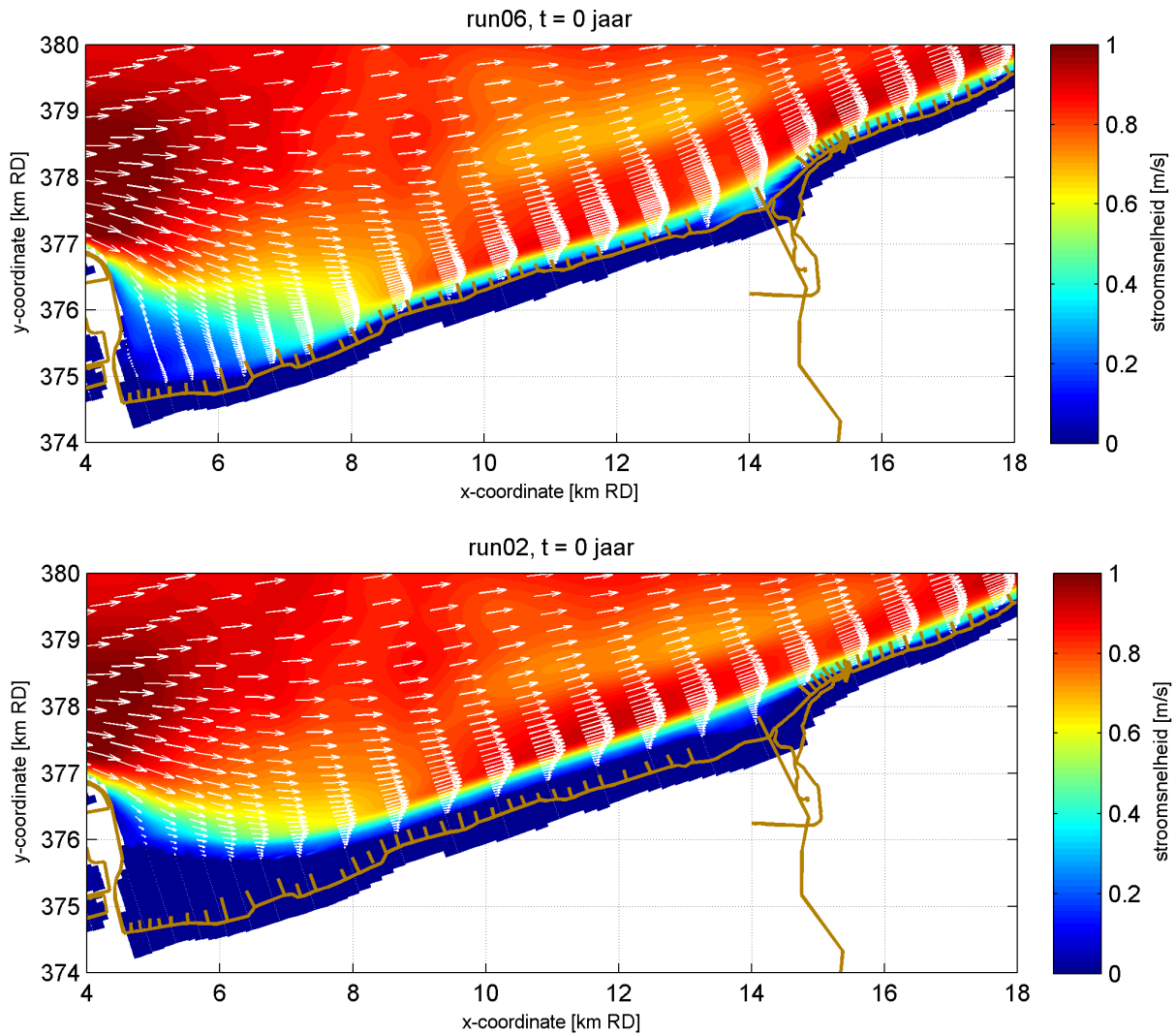
### Stroomsnelheden

Figuur 33 en Figuur 34 tonen het initiële effect van de strandverbreding op de maximale eb- en vloedstroomsnelheden. Uit deze figuren blijkt de toename van de snelheden in de Appelzak (met name goed zichtbaar in de vloedstroomsnelheden) als gevolg van de strandverbreding. Dit is gerelateerd aan de afname van het doorstroomoppervlak. Bij Cadzand nemen de piekvloedsnelheden juist af, omdat door de verbreding de voorliggende kink in de kustlijn teniet doet. Deze zorgt, volgens het model, in de huidige situatie voor een lokale piek door convergentie van de stroomlijnen.



Figuur 33: Stroomsnelheden tijdens eb zonder (run06, bovenste figuur) en met (run02, onderste figuur) strandverbreding. De zwarte lijn geeft de omhulling van de suppletie weer.

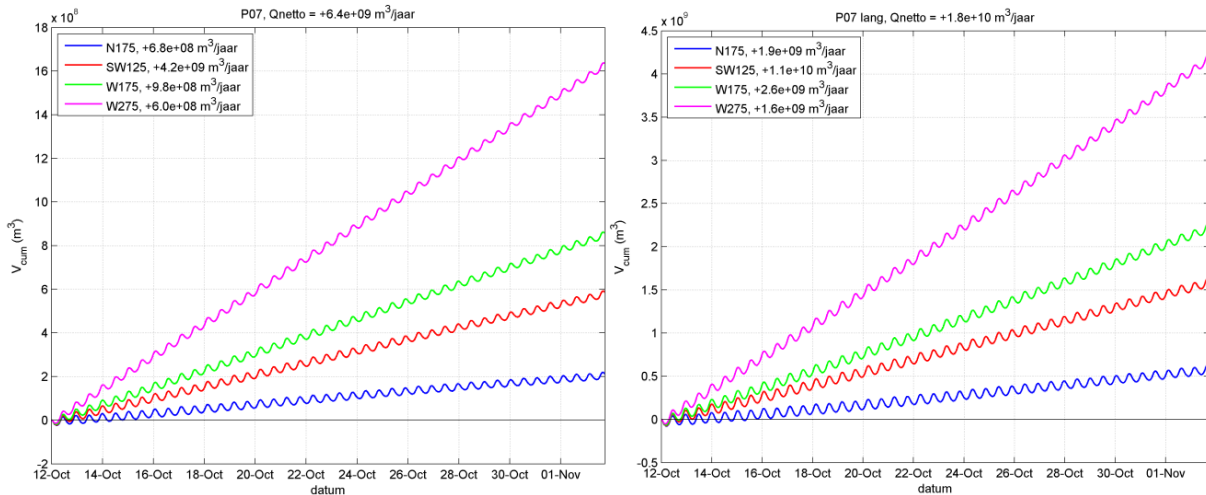




Figuur 34: Stroomsnelheden tijdens vloed zonder (run06, bovenste figuur) en met (run02, onderste figuur) strandverbreding. De zwarte lijn geeft de omhulling van de suppletie weer.

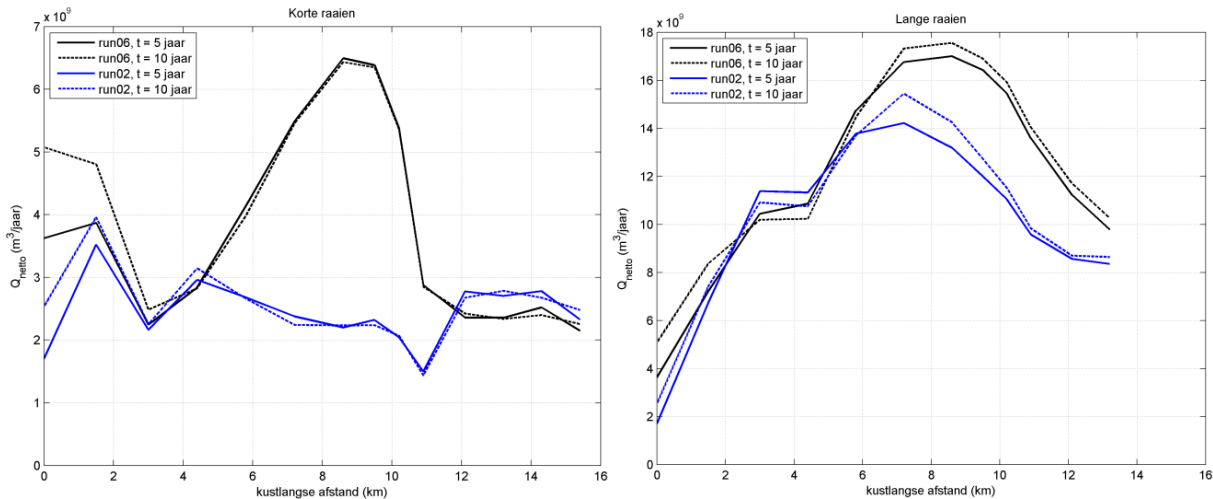
### Debiëten

Figuur 35 toont de watervolumes getransporteerd door raai 7 voor de referentiesituatie (run06). Positief is in noordoostelijke richting. Deze figuur laat zien dat het netto debiet voor alle golfcondities in noordoostelijke richting is. Uit deze figuur blijkt ook dat de golfgedreven stroming een grote bijdrage levert aan het netto watertransport. De hoge golf uit het westen (W275,  $H_s = 2.75$  m) resulteert in het grootste transport. Deze golfconditie komt relatief weinig voor. Als er rekening wordt gehouden met de kans van voorkomen (Tabel 2), dan draagt conditie SW125 het meeste bij aan het totale netto debiet. Dit geldt voor zowel de korte als de lange kustrai.



Figuur 35: Cumulatief watervolume (positief = NO, negatief = ZW) getransporteerd door kustraii P07 , kort (links) en lang (rechts). De legenda geeft de netto jaardebieten per golfconditie waarbij rekening is gehouden met de kans van voorkomen van de betreffende golfconditie. In de titel staat het netto jaardebiet, i.e. de som van de netto debieten per golfconditie.

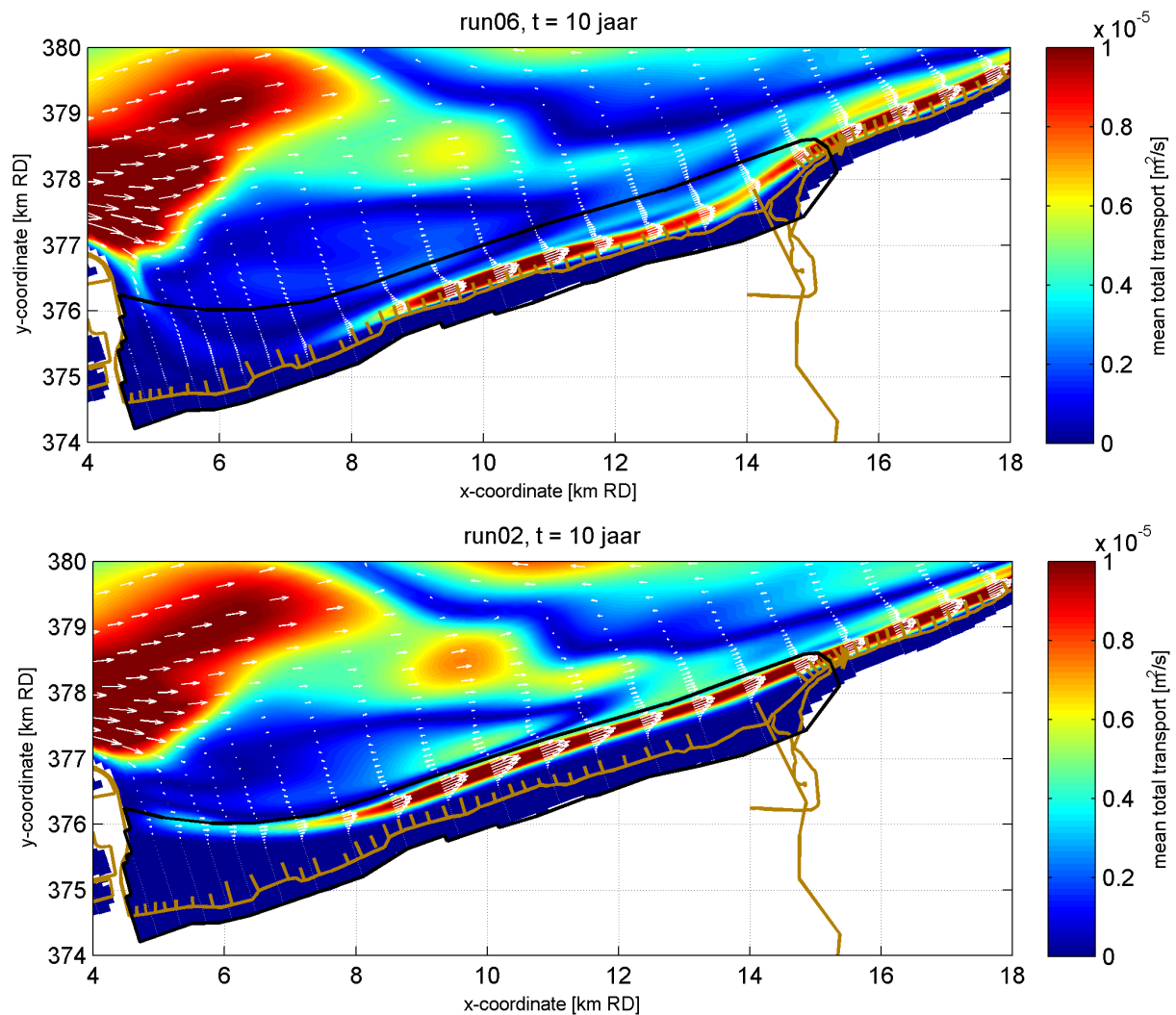
Bovenstaande analyse is gemaakt voor alle kustraien. Dit is gedaan voor de situatie zonder (run06) en met (run02) strandverbreding, en na 5 en 10 jaar morfologische ontwikkeling. Het resultaat wordt getoond in Figuur 36. Deze figuur laat zien dat het netto debiet ter plekke van de strandverbreding afneemt, met name tussen km 6 en 10 (raainummers 5 tot en met 8). Dit is doordat de weerstand die het water ondervindt is toegenomen door de afgenomen waterdiepte. Tussen km 12 en 15 (raaien 11 t/m 14) nemen de debieten juist toe door de strandverbreding. Dit effect speelt met name in de brandingszone (korte raaien). Dit betreft het gebied ten oosten van het Zwin. Verder is zichtbaar dat de debieten over het algemeen relatief weinig veranderen in de tijd.



Figuur 36: Gemiddelde netto debiet (positief = NO, negatief = ZW) door de kustraien (kort: linker figuur, lang: rechter figuur) voor de situatie met (run02) en zonder (run06) strandverbreding voor de eerste 5 jaar en 10 jaar.

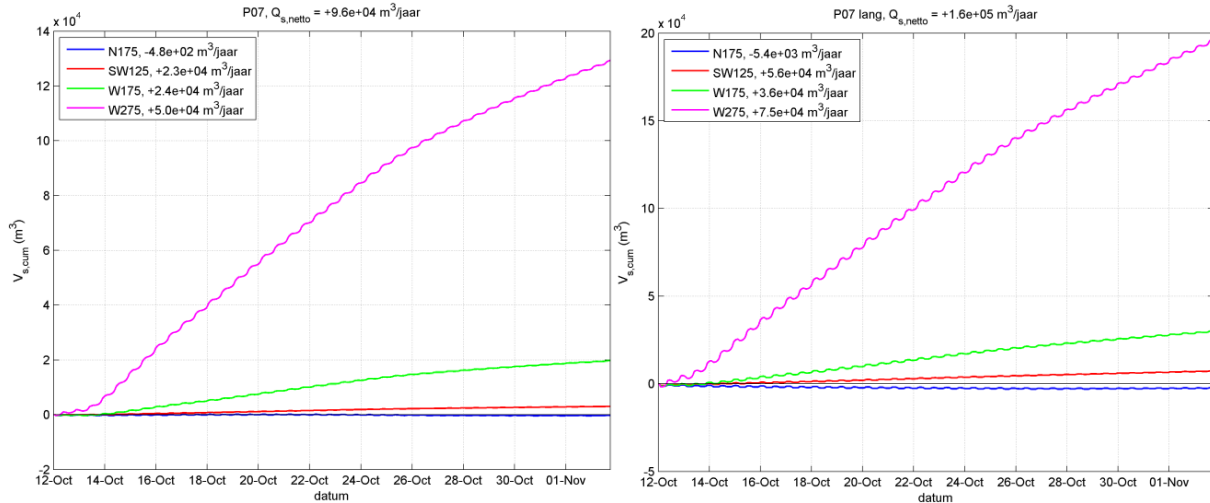
### Zandtransporten

Figuur 37 toont de netto zandtransporten, gemiddeld over 10 jaar, voor de simulatie zonder (run06) en met strandverbreding (run02). Deze figuur laat duidelijk het sterke brandingstransport in noordoostelijke richting zien. De suppletie verschuift zeewaarts. De verbreding zorgt voor een toename van het brandingstransport bij de Baai van Heist. In de Appelzak zijn de netto transporten ebgedomineerd en deze worden sterker door de strandverbreding. Bij het Zwin en de twee kilometer ten westen hiervan nemen de transporten in de brandingszone toe. Bij Cadzand nemen de transporten op dieper water wat af, mogelijk gerelateerd aan een meer gestroomlijnde kustboog. Verder nemen de transporten bij de Paardenmarkt toe door de strandverbreding.



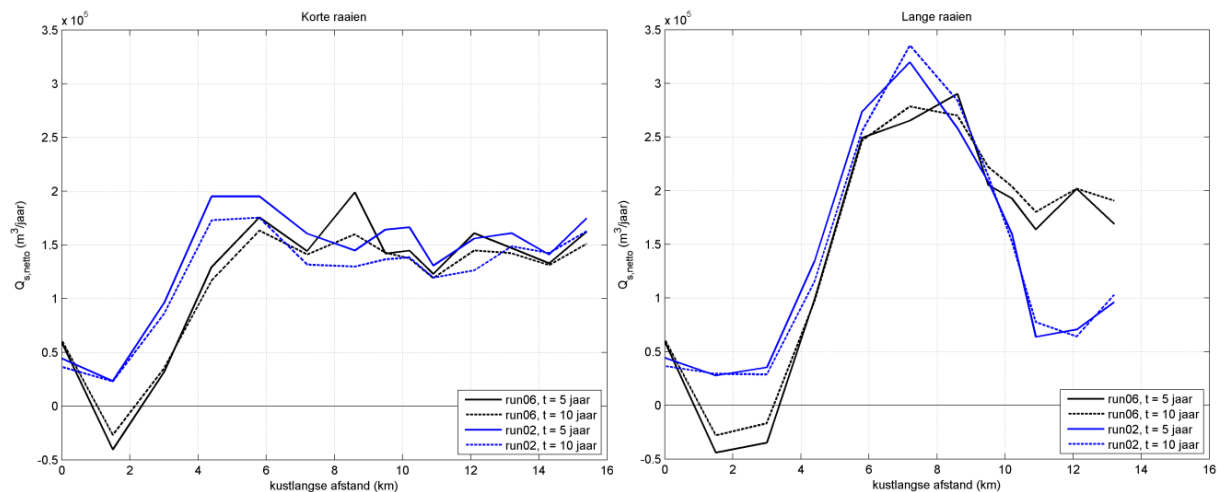
Figuur 37: Netto zandtransport (gemiddeld over 10 jaar) zonder strandverbreding (run06, boven) en met strandverbreding (run02, onder). De zwarte lijn geeft de suppletiecontour weer. De getoonde zandtransporten zijn exclusief poriën.

Voor de raaien hebben we, net zoals voor de debieten, het netto zandtransport bepaald. Figuur 38 laat deze zien voor raai 7; het betreft de referentiesom (run06). Uit deze blijkt dat het zandtransport in de brandingszone (korte raai) de belangrijkste bijdrage levert aan het zandtransport door de gehele raai. Anders dan voor de debieten levert de hoge golfconditie W275 wel een aanzienlijke bijdrage aan het totale zandtransport, wat komt door het niet-lineaire verband tussen stroomsnelheid en zandtransport.



Figuur 38: Cumulatief zandvolume (positief = NO, negatief = ZW) getransporteerd door kustrai P07 (korte raai: linker figuur, lange raai: rechter figuur). De legenda geeft de netto zandtransporten per golfconditie waarbij rekening is gehouden met de kans van voorkomen van de betreffende golfconditie. In de titel staat het netto zandtransport per jaar, i.e. de som van de netto zandtransporten per golfconditie. De getoonde zandtransporten zijn exclusief poriën.

Figuur 39 toont het effect van de strandverbreding op het netto langtransport na 5 en 10 jaar morfologische ontwikkeling. De getoonde zandtransporten zijn inclusief poriën, om een gemakkelijkere vergelijking met eerdere modelresultaten en morfologische veranderingen mogelijk te maken. Daartoe zijn de berekende zandtransporten vermenigvuldigd met een factor  $1/(1-0.4) = 1.67$ , uitgaande van een porositeit van 0.4.



Figuur 39: Gemiddeld netto zandtransport (positief = NO, negatief = ZW) door kustraien (korte raaien: linker figuur, lange raaien: rechter figuur) voor de situatie met (run02) en zonder (run06) strandverbreding na 5 en 10 jaar. De getoonde zandtransporten zijn inclusief poriën.

Het temporele effect is beperkt, al nemen de transporten wel wat af, met name voor de simulatie met strandverbreding (run02). De strandverbreding zorgt voor een toename van het langtransport, met name de eerste 6 km ten oosten van Zeebrugge. Bij het Zwin en direct ten oosten hiervan (10-13 km) neemt het transport door de langere raaien af. Dit betreft een afname van het vloedtransport op dieper water, mogelijk gerelateerd aan een “gladdere” kustboog in de situatie met strandverbreding (zie ook Figuur 37).

Daarnaast neemt het ebtransport op dieper water toe. Hierdoor is voor deze raaien (nummers 10 t/m 12) het vloedtransport door de lange raaien lager dan voor de korte raaien. Dit is niet het geval voor de simulatie zonder strandverbreding. De kustontwikkeling wordt met name gestuurd door het brandingstransport, dus richten we ons hierop in onderstaande analyses.

De berekende netto brandingstransporten zijn met  $\sim 0.5-2.0 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{jaar}$  in lijn met de berekeningen van Wang *et al.* (2015). De gradiënten duiden op sedimentatie de eerste  $\sim 4$  km en een lichte erosie voor de rest van het kustvak. Het brandingstransport bij het Zwin (P09, km 10) neemt gemiddeld over de eerste 5 jaar licht toe (van  $\sim 145$  naar  $\sim 165 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$ ). Na 10 jaar zijn de transporten met  $\sim 140 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$  vergelijkbaar.

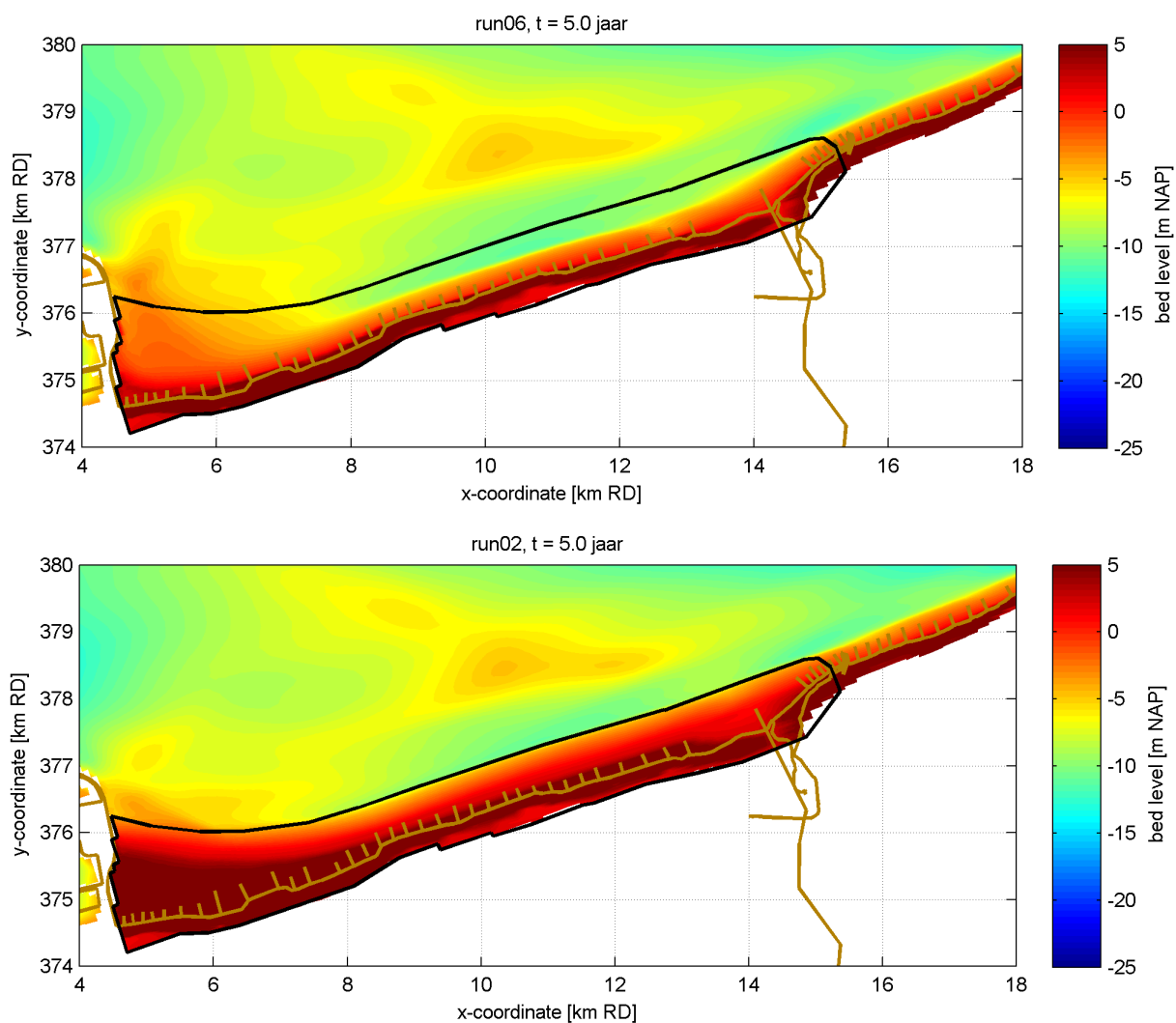
### Morfologische ontwikkeling

Onderstaande figuren tonen de morfologische ontwikkeling na 5 en 10 jaar. Voor de 2013 bodem berekent het model stranderosie bij Knokke-Heist, met name ten oosten van het Albertstrand (8-10 km) en meer oostwaarts (Lekkerbek, 12-13 km). De Baai van Heist sedimenteert licht. Het geërodeerde zand (voornamelijk uit de zone ondieper dan NAP -4 m) komt met name op dieper water terecht, met een verschuiving in oostwaartse richting. Een vergelijkbaar patroon is zichtbaar voor de som met strandverbreding, maar de kustlangse verschillen zijn minder sterk. Dit correspondeert met een gladder verloop van de langstransporten (Figuur 39). Zo is de erosie tussen raaien P06 en P07, gevolgd door sedimentatie P07 en P08 afwezig in de modelresultaten met strandverbreding. Daarnaast zien we dat in de som met strandverbreding de morfologische veranderingen in de Baai van Heist sterker zijn en dat de erosie van het Appelzak toeneemt.

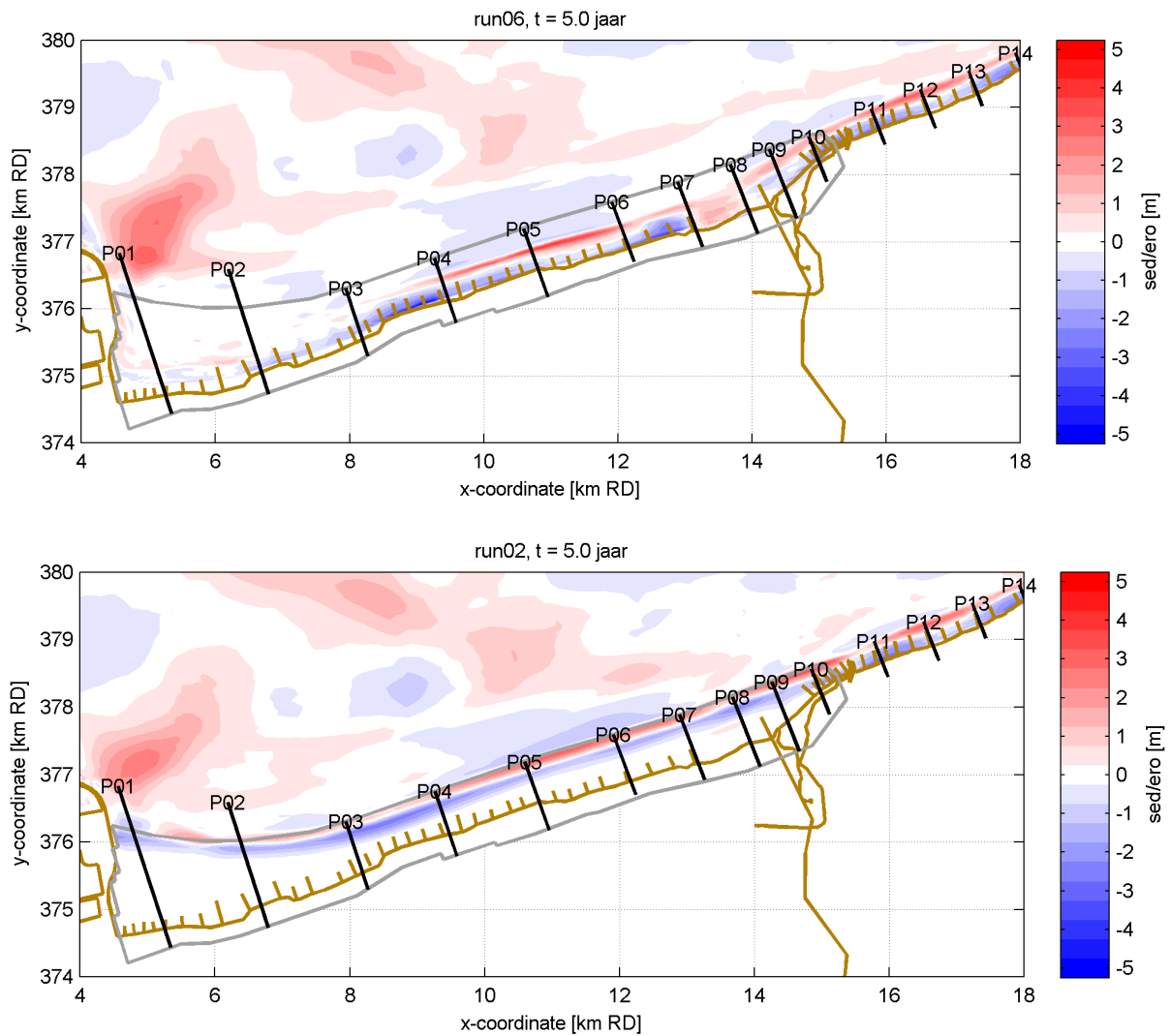
Het kustprofiel verflauwt in beide simulaties (Figuur 44 tot en met Figuur 47), mogelijk mede door toedoen van kustdwars zandtransport. Dit blijkt ook uit de sterke landwaartse verplaatsing van de waterlijn bij profiel 4,  $\sim 110$  m in 10 jaar voor de huidige situatie (Figuur 48, zie ook Tabel 5). Dit is mogelijk een overschatting door het ontbreken van strandhoofden in het model, alsook het niet goed meenemen van het kustdwars zandtransport door de 2DH aanpak en de betreffende modelinstellingen (BedW = SusW = 0). De berekende waterlijnen (NAP 0 m) laten zien dat de strandverbreding zorgt voor een versnelde erosie, en dat deze afneemt in de tijd. Na 10 jaar zijn de erosiewaarden (afgeleide lijnen in figuur) redelijk vergelijkbaar met de referentiesituatie. De waterlijn bij Baai van Heist (P01) is stabiel in de huidige situatie. De strandverbreding heeft de waterlijn meer dan 1 km zeewaarts, gevolgd door een gemiddelde erosie van 20 m/jaar. Initieel is het strand ruim 330 (480) m breder bij raai 4 (7). Na 10 jaar is dit nog altijd 140 (340) m breder dan de 2013 situatie.

Tabel 5: Berekende erosietrends waterlijn met en zonder strandverbreding voor verschillende kustprofielen. Positieve trends betekenen uitbouw, negatieve trends erosie.

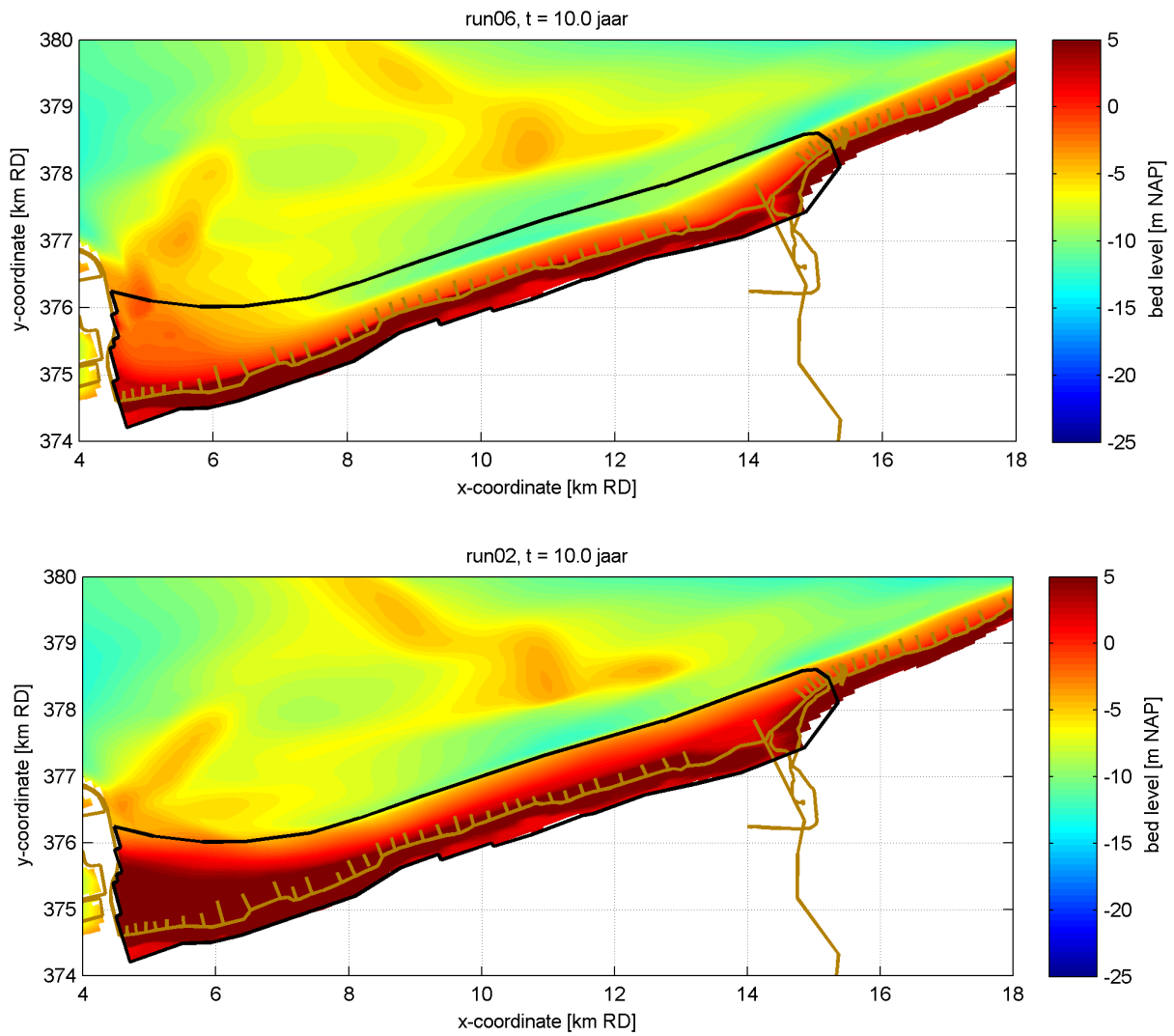
Periode	Profiel 1		Profiel 4		Profiel 7		Profiel 10	
	Zonder	Met	zonder	met	zonder	met	zonder	met
0-1 jaar	0 m/jaar	-57 m/jaar	-18 m/jaar	-58 m/jaar	+70 m/jaar	-36 m/jaar	-18 m/jaar	-35 m/jaar
0-2 jaar	0 m/jaar	-29 m/jaar	-18 m/jaar	-39 m/jaar	+26 m/jaar	-27 m/jaar	-18 m/jaar	-17 m/jaar
0-5 jaar	0 m/jaar	-23 m/jaar	-14 m/jaar	-27 m/jaar	+3 m/jaar	-14 m/jaar	-14 m/jaar	-10 m/jaar
0-10 jaar	0 m/jaar	-17 m/jaar	-11 m/jaar	-19 m/jaar	-3 m/jaar	-14 m/jaar	-9 m/jaar	-9 m/jaar



Figuur 40: Berekende bodemligging na 5 jaar voor de situatie zonder (run06, boven) en met (run02, onder) strandverbreding. De zwarte lijn geeft de suppletiecontour weer.

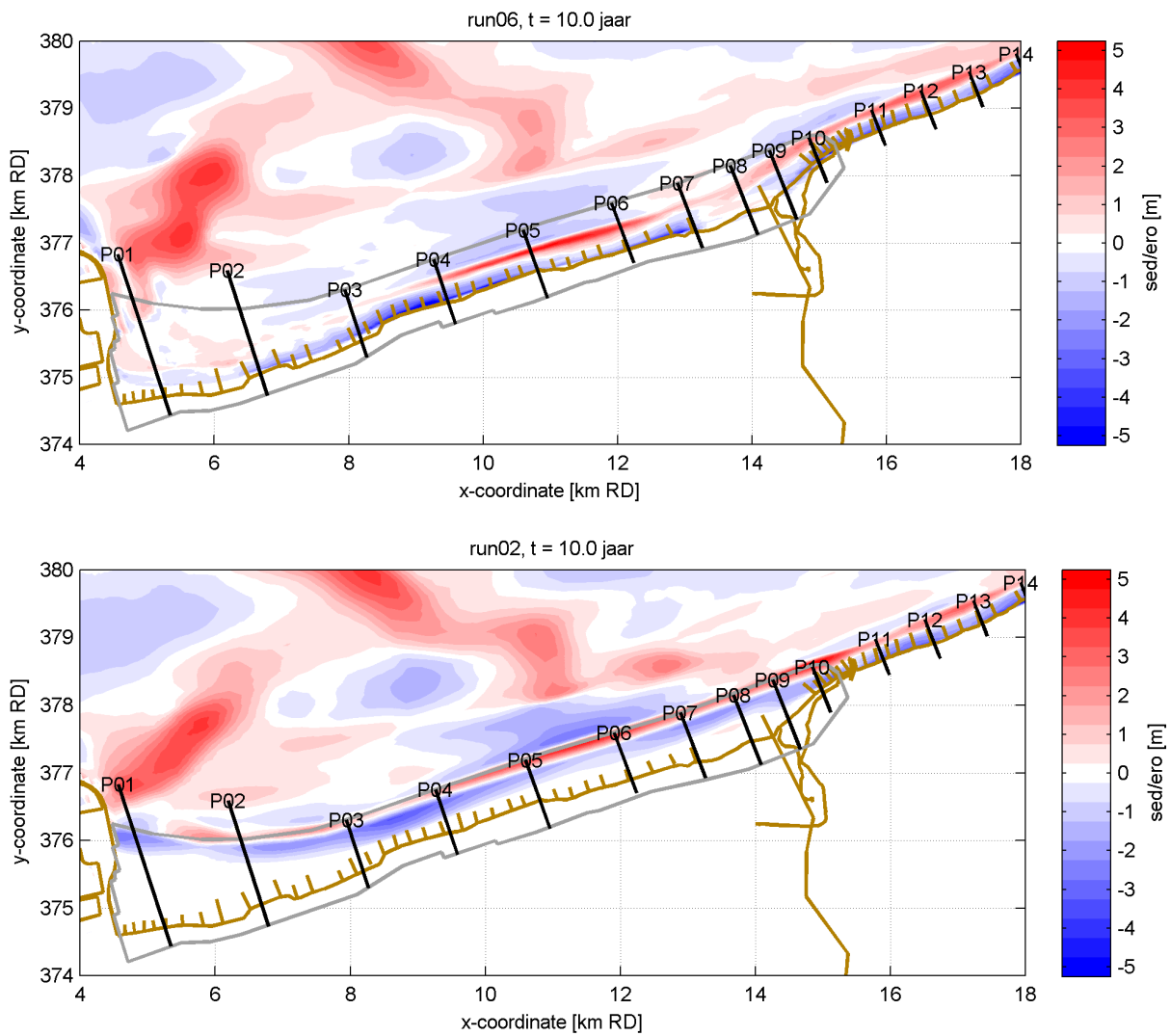


Figuur 41: Berekende sedimentatie (rood) en erosie (blauw) na 5 jaar voor de situatie zonder (run06, boven) en met (run02, onder) strandverbreding. De grijze lijn geeft de suppletiecontour weer.

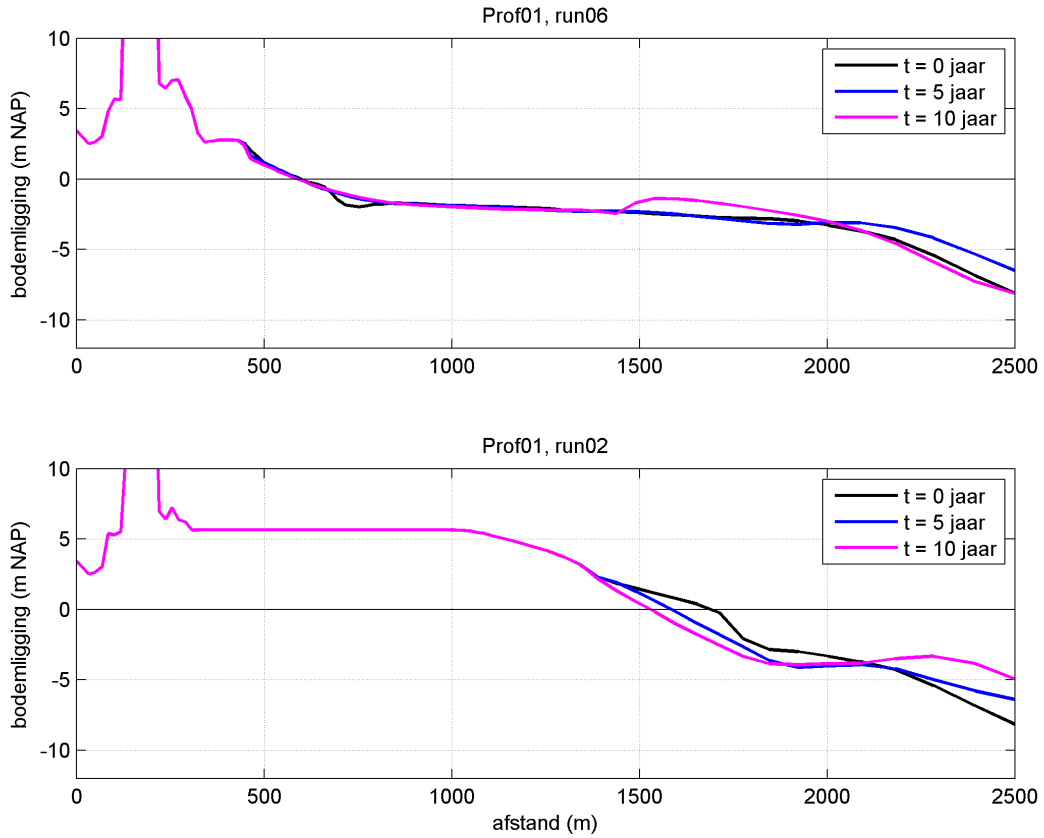


Figuur 42: Berekende bodemligging na 10 jaar voor de situatie zonder (run06, boven) en met (run02, onder) strandverbreding. De zwarte lijn geeft de suppletiecontour weer.

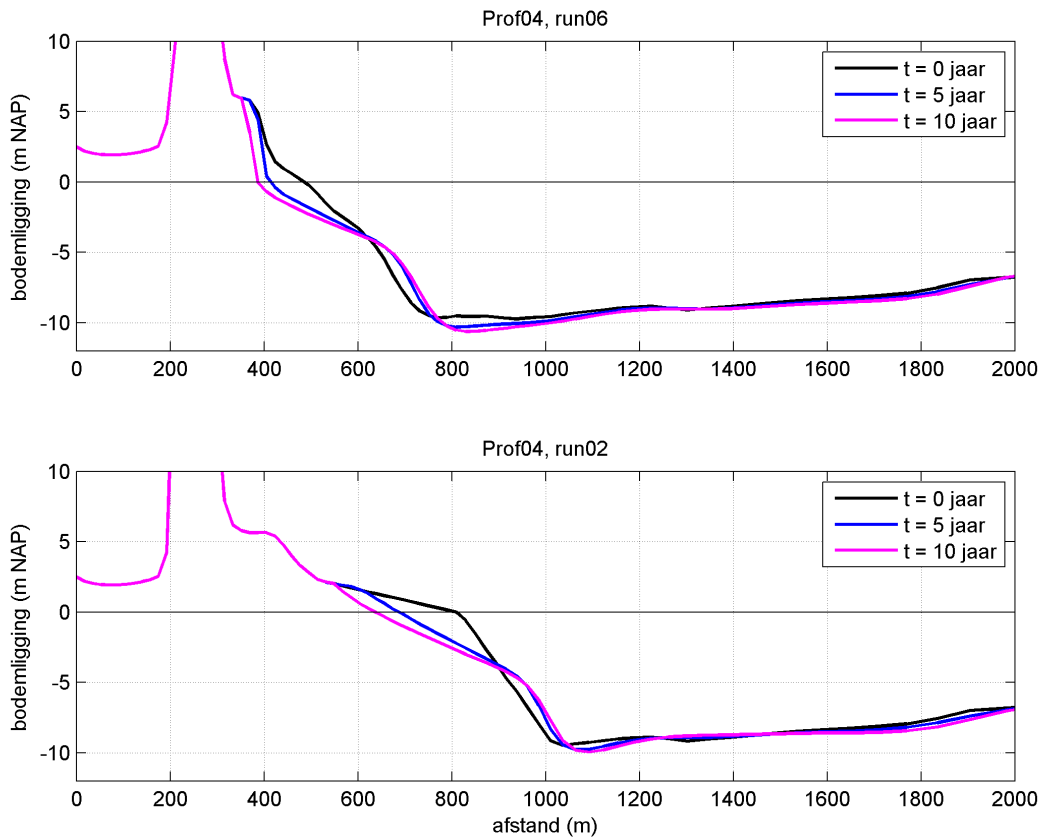




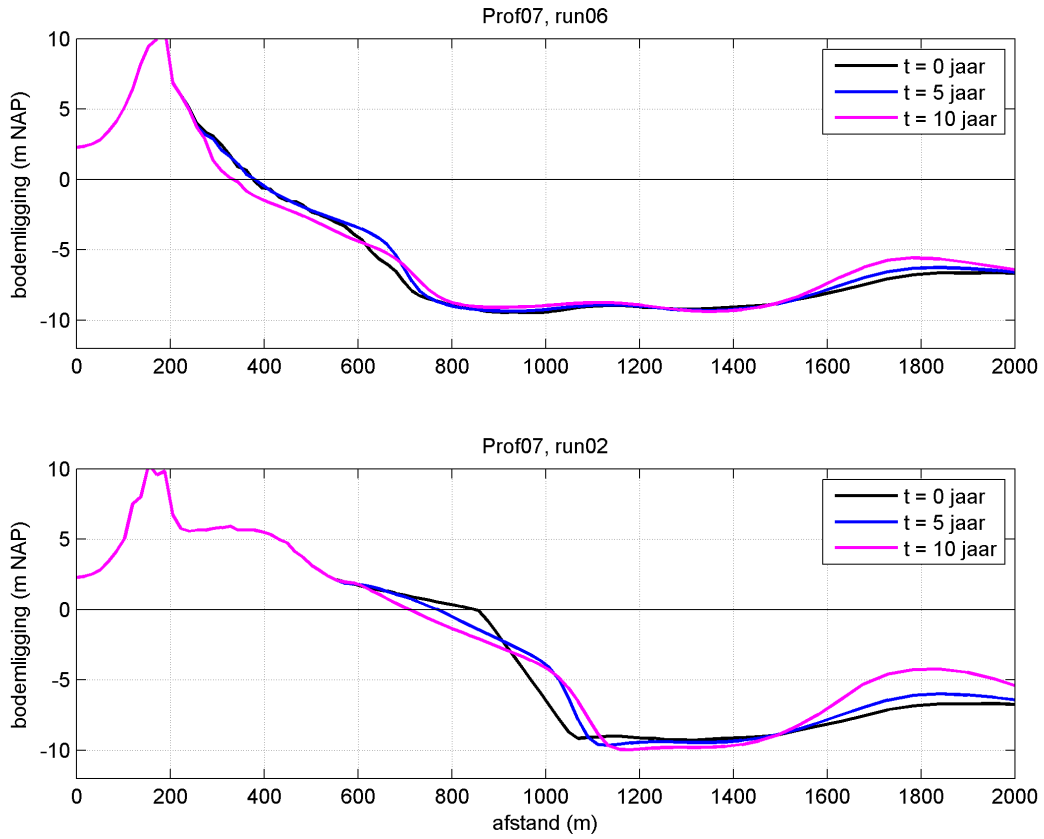
Figuur 43: Berekende sedimentatie (rood) en erosie (blauw) na 10 jaar voor de situatie zonder (run06, boven) en met (run02, onder) strandverbreding. De grijze lijn geeft de suppletiecontour weer.



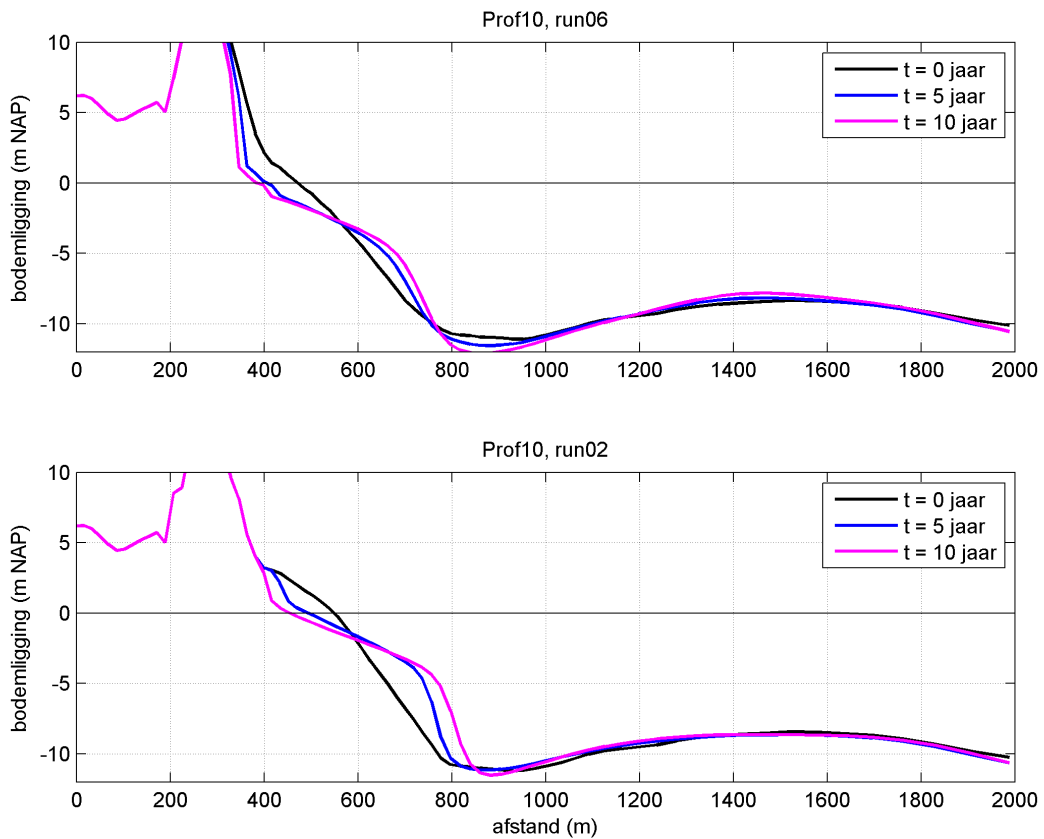
Figuur 44: Morfologische ontwikkeling dwarsraai 1 zonder (run06, boven) en met (run02, onder) strandverbreding.



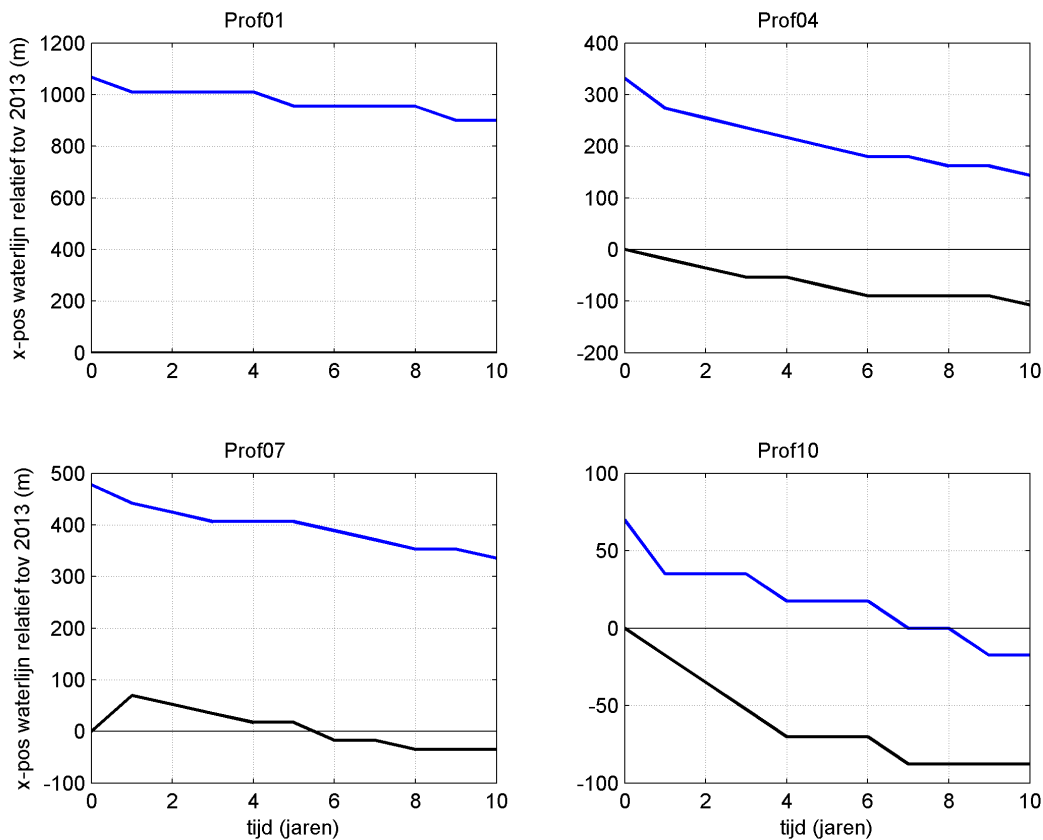
Figuur 45: Morfologische ontwikkeling dwarsraai 4 zonder (run06, boven) en met (run02, onder) strandverbreding.



Figuur 46: Morfologische ontwikkeling dwarsraai 7 zonder (run06, boven) en met (run02, onder) strandverbreding.



Figuur 47: Morfologische ontwikkeling dwarsraai 10 zonder (run06, boven) en met (run02, onder) strandverbreding.

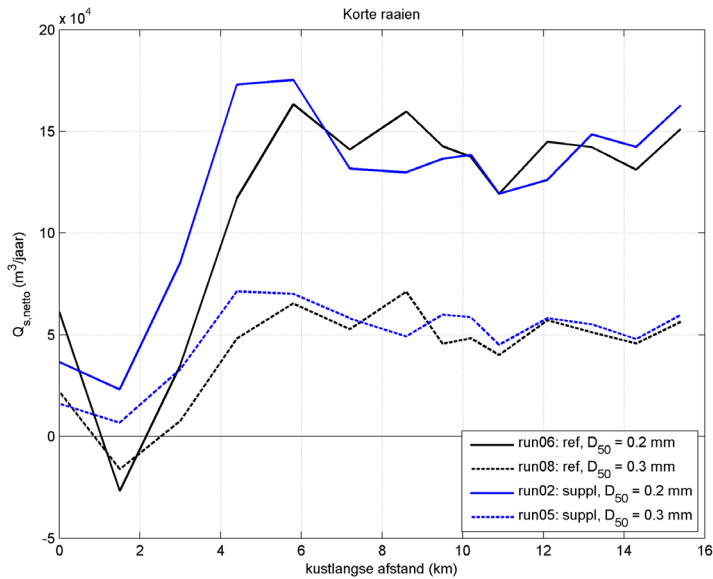


Figuur 48: Ontwikkeling waterlijn (NAP) bij raaien 1, 4, 7 en 10 met (blauw) en zonder (zwart) strandverbreding.

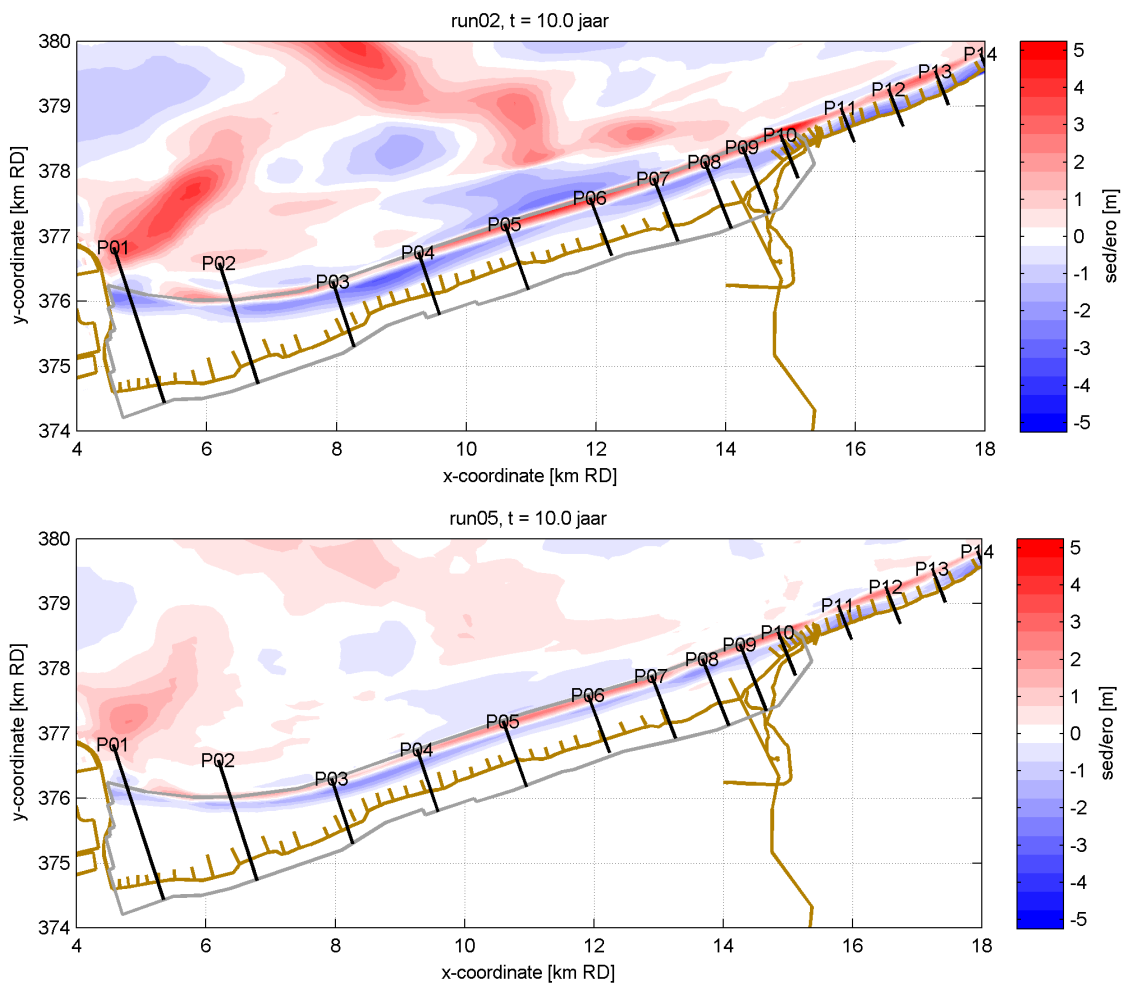
### Effect korrelgrootte

Bovenstaande analyses betreffen modellsimulaties met een mediane korrelgrootte (D50) van 0.2 mm. Op het strand is het sediment over het algemeen wat groffer door toedoen van suppleties. Mede omdat het XBeach model met een D50 van 0.3 mm rekent, laten onderstaande figuren het effect zien van de D50 op de langstransporten en de morfologische ontwikkeling.

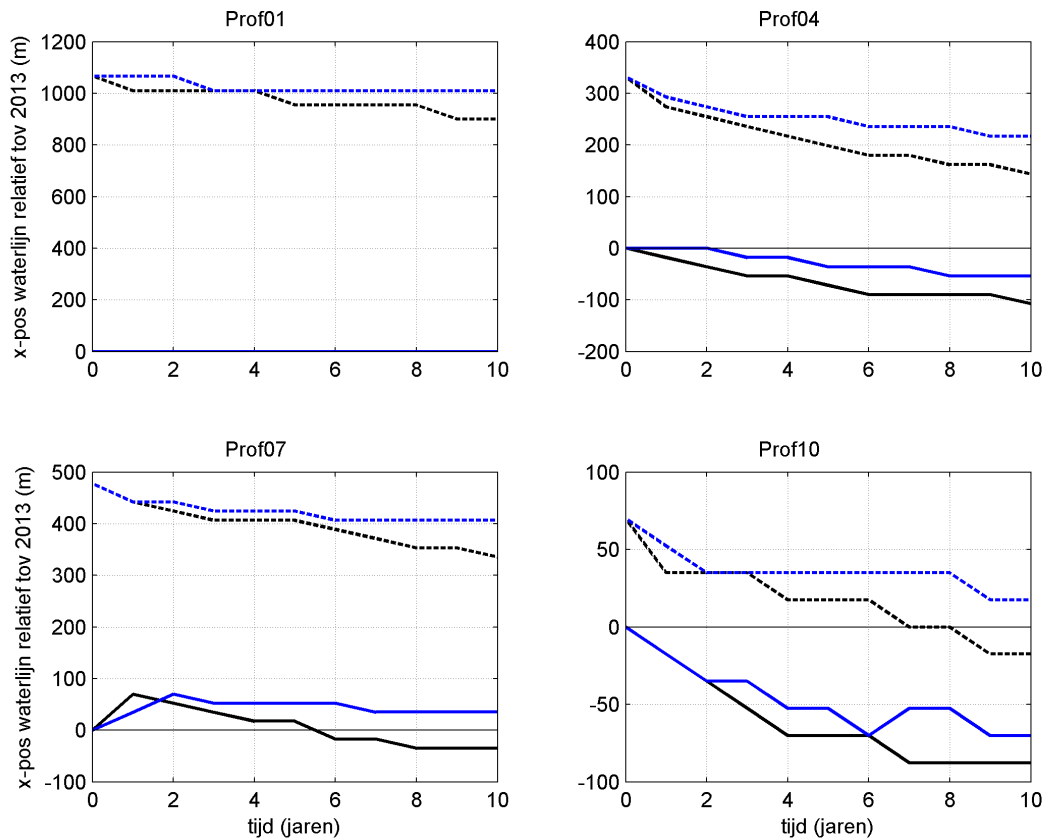
Een korrelgrootte van 0.3 mm in plaats van 0.2 mm heeft een sterk effect. De langstransporten nemen een factor 2 tot 3 af, terwijl het ruimtelijke patroon en het relatieve effect vergelijkbaar zijn (Figuur 49). De sedimentatie-/erosiepatronen zijn dan ook kwalitatief vergelijkbaar, maar de morfologische veranderingen zijn veel minder sterk (Figuur 50). Dit blijkt ook uit de ontwikkeling van de waterlijn, zie Figuur 51 en Tabel 6. Zo verplaatst de waterlijn in 10 jaar gemiddeld 11 m/jaar landwaarts in de huidige situatie met een D50 = 0.2 mm en 5 m/jaar landwaarts met een D50 van 0.3 mm. Bij een strandverbreding wordt dit 19 en 11 m/jaar, respectievelijk.



Figuur 49: Gemiddeld netto zandtransport over 10 jaar (positief = NO, negatief = ZW) door de korte kustraaien voor de situatie met en zonder strandverbreding, en een mediane korrelgrootte van 0.2 en 0.3 mm. De getoonde zandtransporten zijn inclusief poriën.



Figuur 50: Berekende sedimentatie (rood) en erosie (blauw) na 10 jaar voor de situatie met strandverbreding en een D50 van 0.2 mm (run02, boven) en 0.3 mm (run05, onder). De grijze lijn geeft de suppletiecontour weer.



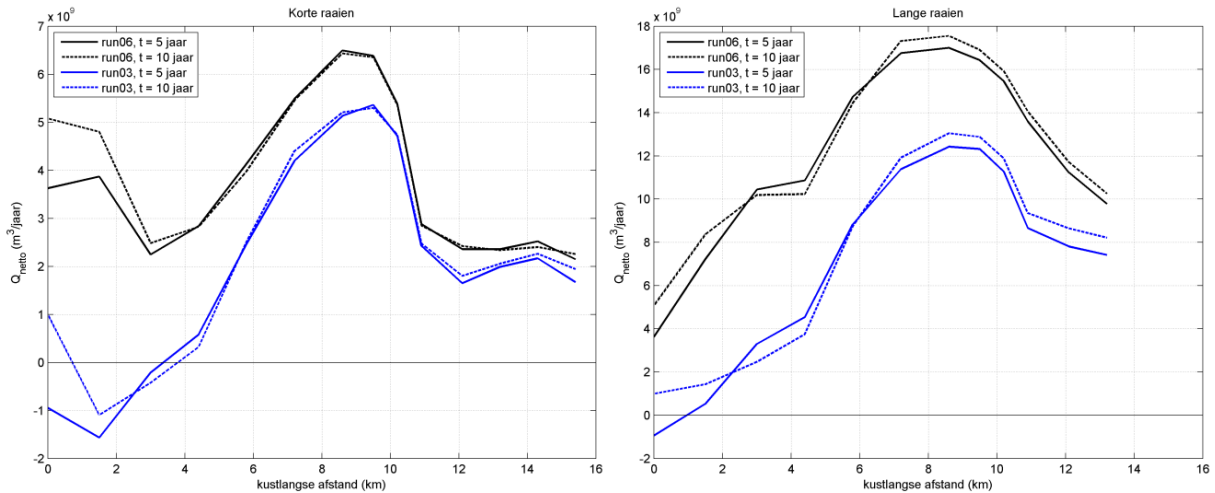
Figuur 51: Ontwikkeling waterlijn (NAP) bij raaien 1, 4, 7 en 10 met (blauw) en zonder (zwart) strandverbreding, en een D50 van 0.2 mm (getrokken lijnen) en 0.3 mm (gestippelde lijnen).

Tabel 6: Berekende erosietrends waterlijn met en zonder strandverbreding voor verschillende kustprofielen (D50 = 0.3 mm). Positieve trends betekenen uitbouw, negatieve trends erosie.

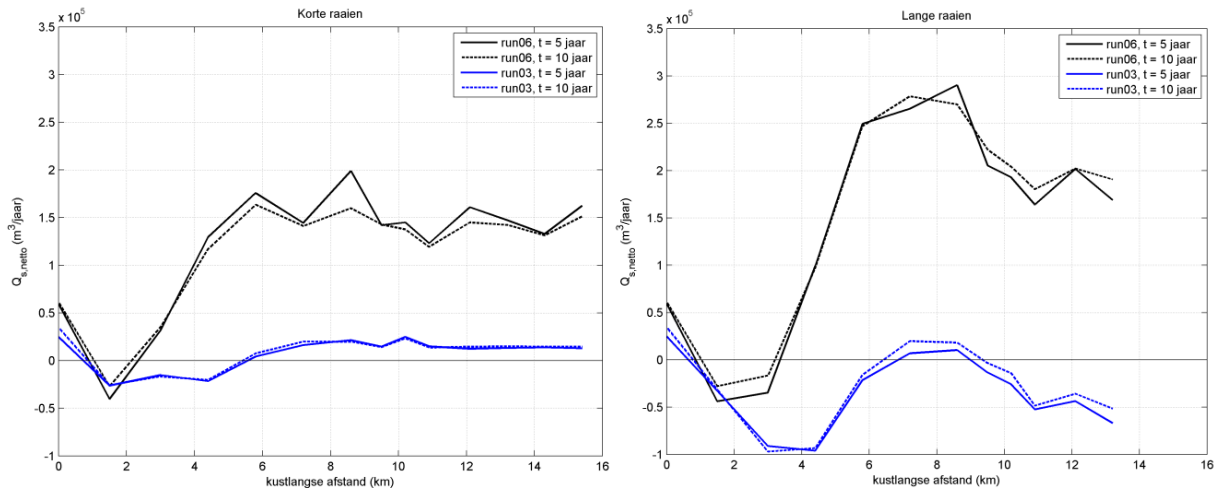
Periode	Profiel 1		Profiel 4		Profiel 7		Profiel 10	
	Zonder	Met	zonder	met	zonder	met	zonder	met
0-1 jaar	0 m/jaar	0 m/jaar	0 m/jaar	-39 m/jaar	+35 m/jaar	-36 m/jaar	-18 m/jaar	-18 m/jaar
0-2 jaar	0 m/jaar	0 m/jaar	0 m/jaar	-29 m/jaar	+35 m/jaar	-17 m/jaar	-18 m/jaar	-17 m/jaar
0-5 jaar	0 m/jaar	-11 m/jaar	-7 m/jaar	-15 m/jaar	+10 m/jaar	-11 m/jaar	-11 m/jaar	-7 m/jaar
0-10 jaar	0 m/jaar	-6 m/jaar	-5 m/jaar	-11 m/jaar	+4 m/jaar	-7 m/jaar	-7 m/jaar	-5 m/jaar

### Effect golven en wind

Om het effect van golven (en wind) te onderzoeken is ook een simulatie gedaan met enkel getij als forcering (run03). Het betreft de referentiesituatie, i.e. zonder strandverbreding. Figuur 52 laat zien dat de debieten lager zijn zonder wind en golven, maar dat het restdebiet nog steeds naar het noordoosten is gericht, met uitzondering van de eerste paar kilometer direct naast Zeebrugge haven. Het effect van golven en wind is veel sterker zichtbaar in de langstransporten (Figuur 53). Bij enkel getij is de vloeddominantie veel minder sterker, en het transport door de lange raaien wordt zelfs ebgedomineerd. Blijkbaar is niet de netto stroming, maar de getijasymmetrie de belangrijkste drijver van het netto zandtransport.

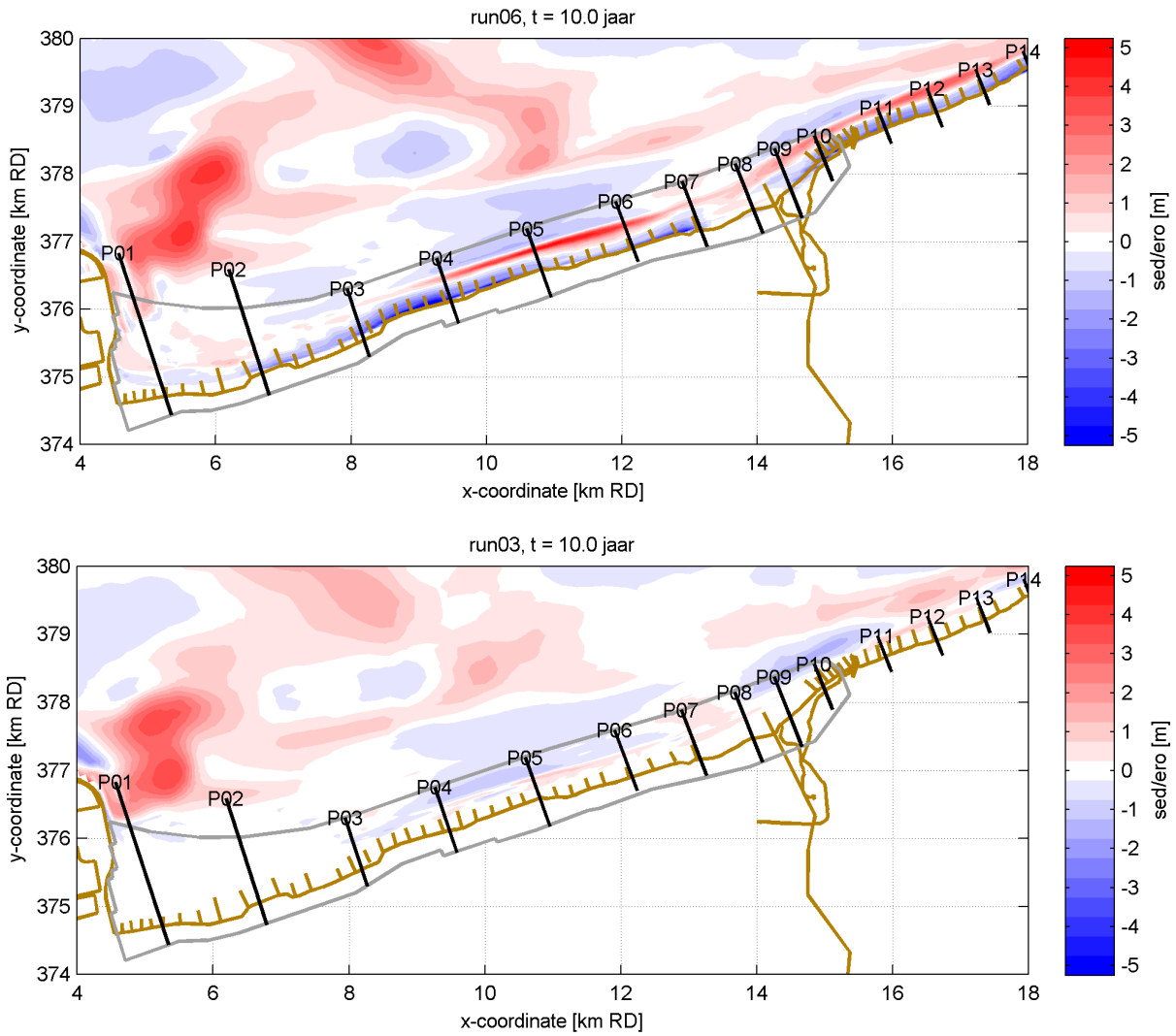


Figuur 52: Gemiddelde netto debiet (positief = NO, negatief = ZW) door de kustraaian (kort: linker figuur, lang: rechter figuur) voor de situatie met (run06) en zonder (run03) golf- en windforcering voor de eerste 5 jaar en 10 jaar.



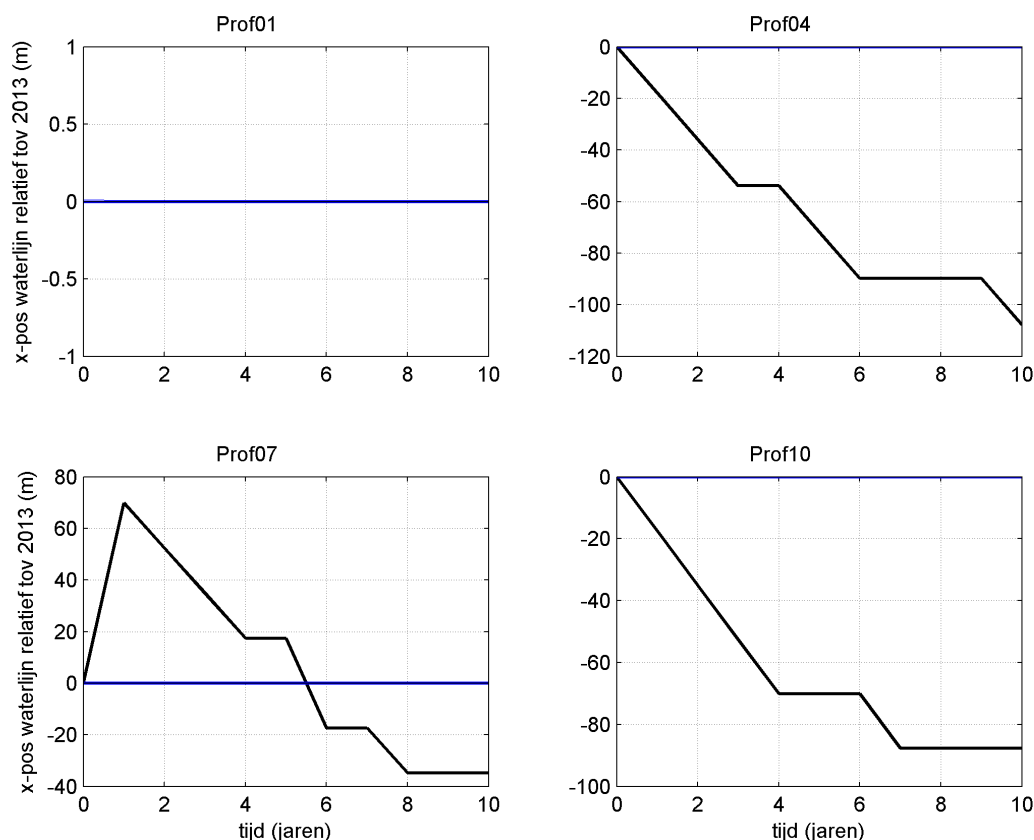
Figuur 53: Gemiddeld netto zandtransport (positief = NO, negatief = ZW) door kustraaian (korte raaien: linker figuur, lange raaien: rechter figuur) voor de situatie met (run06) en zonder (run03) golf- en windforcering na 5 en 10 jaar . De getoonde zandtransporten zijn inclusief poriën.

Zonder wind en golven verloopt de morfologische ontwikkeling een stuk langzamer (Figuur 54). Vooral in ondiep water zijn de veranderingen zonder golfwerking beperkt. Dit blijkt onder andere in de stabiele waterlijnen (Figuur 55). Op dieper water zien we over het algemeen een vergelijkbare, zij het minder sterke morfologische ontwikkeling in het geval van alleen getij. Dit betreft b.v. de erosie van de landwaartse geulwand van de Appelzak (tussen ca. P03 en P07) en de erosie bij Cadzand door vernauwing van de stroomlijnen.



Figuur 54: Berekende sedimentatie (rood) en erosie (blauw) na 10 jaar voor de situatie zonder strandverbreding en met (run06, boven) en zonder (run03, onder) wind en golven. De grijze lijn geeft de suppletiecontour weer.





Figuur 55: Ontwikkeling waterlijn (NAP) bij raaien 1, 4, 7 en 10 zonder strandverbreding en zonder (blauwe lijnen) en met (zwarte lijnen) wind en golven.

### Belangrijkste bevindingen

Met het bestaande N2V Delft3D model is de 2013 bodem met en zonder strandverbreding tussen Zeebrugge en Cadzand 5 jaar morfologisch doorgerekend. Belangrijke bevindingen zijn:

- De strandhoofden zitten niet in de modelschematisatie. Dit lijkt een belangrijke verklaring voor de (te) grote berekende stranderosie in de huidige situatie.
- Het model berekent over het algemeen een verflauwing van de kustprofielen, ook voor de huidige situatie. Dit is mogelijk gerelateerd aan het niet goed modelleren van het kustdwarstransport.
- De berekende kusterosie is met name door toedoen van golfwerking en de interactie tussen getij en golven. De morfologische ontwikkeling zonder golfinvloed verloopt langzaam.
- Het brandingstransport langs de Vlaamse kust verandert niet wezenlijk door de strandverbreding.
- De uitbouw van de Baai van Heist (~1 km) stelt deze meer open voor golfwerking, waardoor deze morfologisch actief wordt.
- De morfologische ontwikkeling in het geval van de strandverbreding is meer uniform langs de kust dan in de huidige situatie. Dit is gekoppeld aan het gladdere verloop van de kustlijn.
- In het begin erodeert het strand sneller, maar na 10 jaar zijn de erosietrends in het geval van de strandverbreding vergelijkbaar met die zonder ingreep.
- De korrelgrootte ( $D_{50} = 0.3$  in plaats van 0.2 mm) heeft een sterk effect op de resultaten. De langstransporten zijn een factor 2 tot 3 kleiner en de morfologische ontwikkelingen verlopen een stuk langzamer. Het relatieve effect van de suppletie met een korrelgrootte van 0.3 mm is kwalitatief vergelijkbaar met een korrelgrootte van 0.2 mm.

#### 4.2.2. Simulaties XBeach model

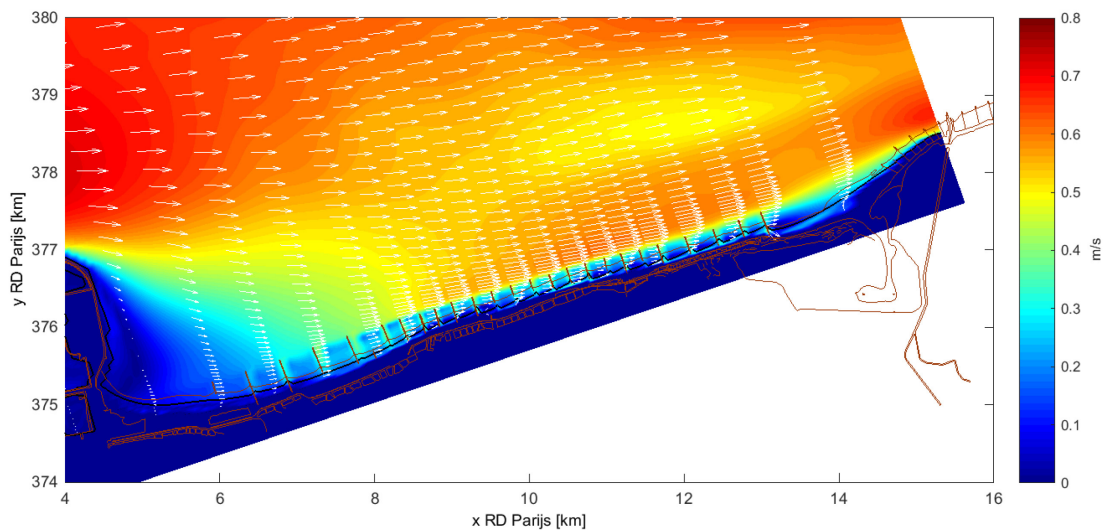
In onderstaande figuren refereert scen011 naar de huidige toestand. Scen017 is het scenario inclusief de strand- en vooroeversuppletie zoals beschreven in Hoofdstuk 2. Er wordt in een aantal figuren een vergelijking gemaakt met kleinere 'gewone' onderhoudssuppleties die eerder aan de hand van het model beproefd zijn geweest: scen012b, scen015b en scen016b<sup>3</sup>, zie ook Bijlage B.

##### Stroomsnelheden

In onderstaande figuren, Figuur 56 tot Figuur 59, worden de snelheden bij eb- en vloedstroom met en zonder stranduitbreiding weergegeven. Tijdens de vloedfase neemt de snelheid in de Appelzak ter hoogte van Knokke-Zoute tot Zwin zoals in het N2V model iets toe. De snelheidstoename ter hoogte van Cadzand als gevolg van de bocht in de kustlijn neemt door het rechtekken van de kustlijn iets af.

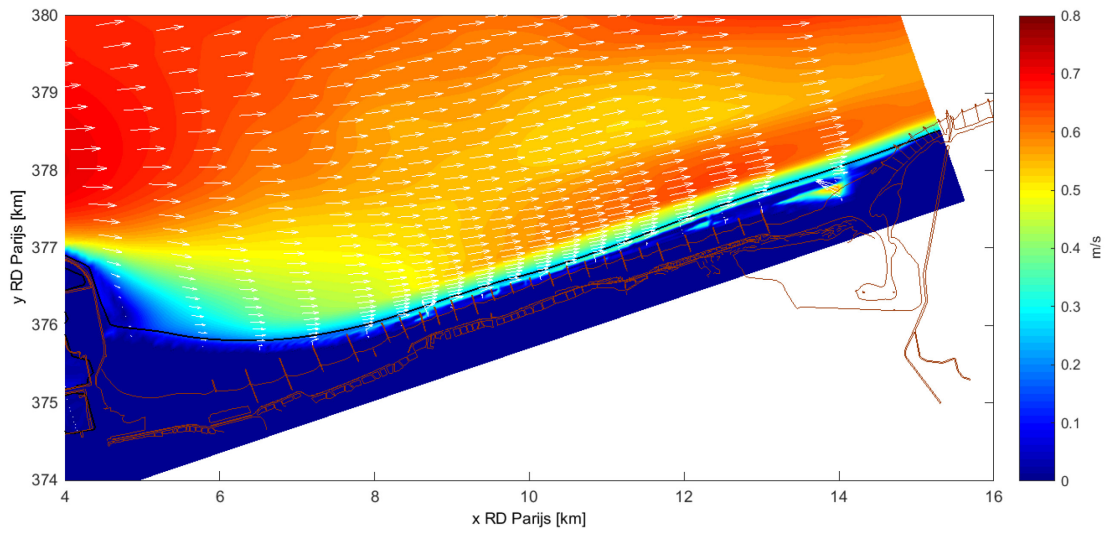
Tijdens de vloedfase zijn de effecten in de Appelzak minder uitgesproken dan in het Nieuwpoort-Vlissingen model. De Appelzak strekt zich uit over een grotere zone dan wordt bestreken door het XBeach detailmodel. Men kan verwachten dat de stromingen in de Appelzak omwille van het beperkte modeldomein en beperkingen in de opgelegde randvoorwaarde in XBeach (enkel waterstanden) minder goed beschreven worden in het XBeach detailmodel.

De recirculatiezone ten westen van Zeebrugge wordt in het model slechts in beperkte mate gereproduceerd. Tijdens de vloedfase is er wel een neervorming waarneembaar. Door het rechtekken van de kustlijn met aansluitend een kustboog ten oosten van Zeebrugge ontstaat er een gladder stromingspatroon.

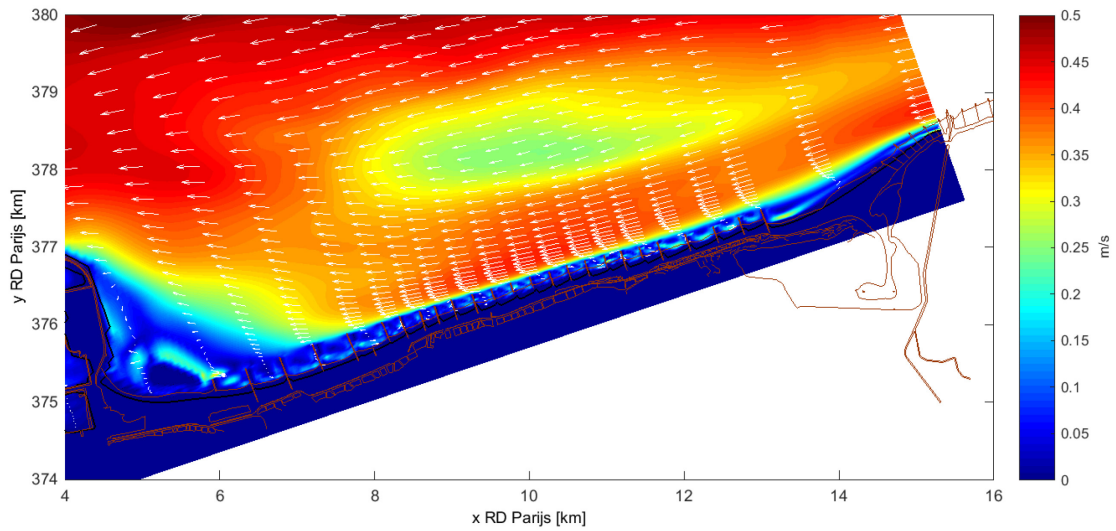


Figuur 56: Snelheden bij vloedstroom, bestaande toestand.

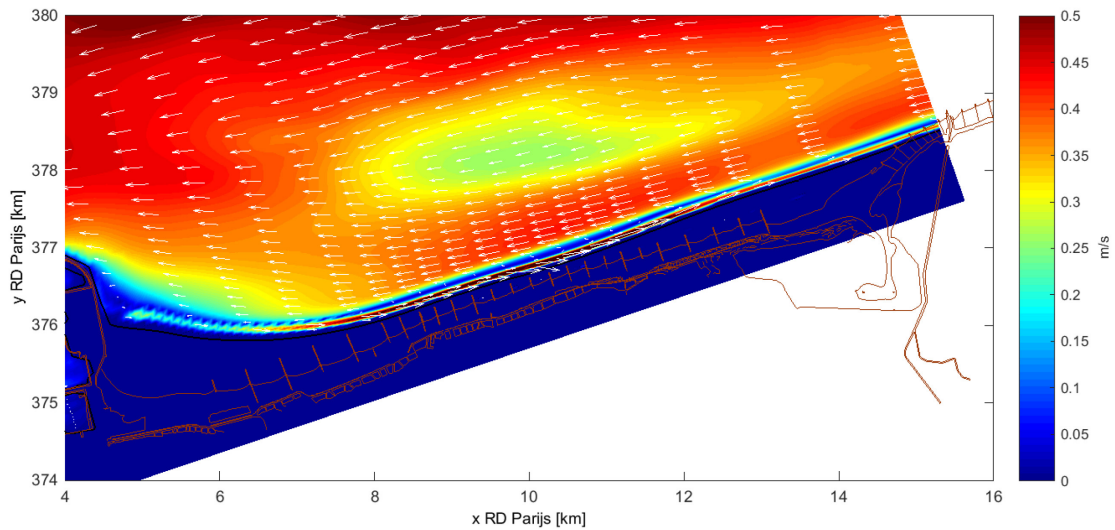
<sup>3</sup> Ten opzicht van het rapport van Lanckriet et al. (2015) zijn de scenario's opnieuw beproefd geweest. Tijdens het onderzoek is gebleken dat in de eerdere simulaties de strandhoofden fout geïmplementeerd zijn geweest waardoor hun effect overschat werd ook al werden ze door de suppletie bedekt. Dit is weergegeven door de toevoeging b aan het scenarionummer.



Figuur 57: Snelheden bij vloedstroom, scenario stranduitbreiding.



Figuur 58: Snelheden bij ebstroom, bestaande toestand

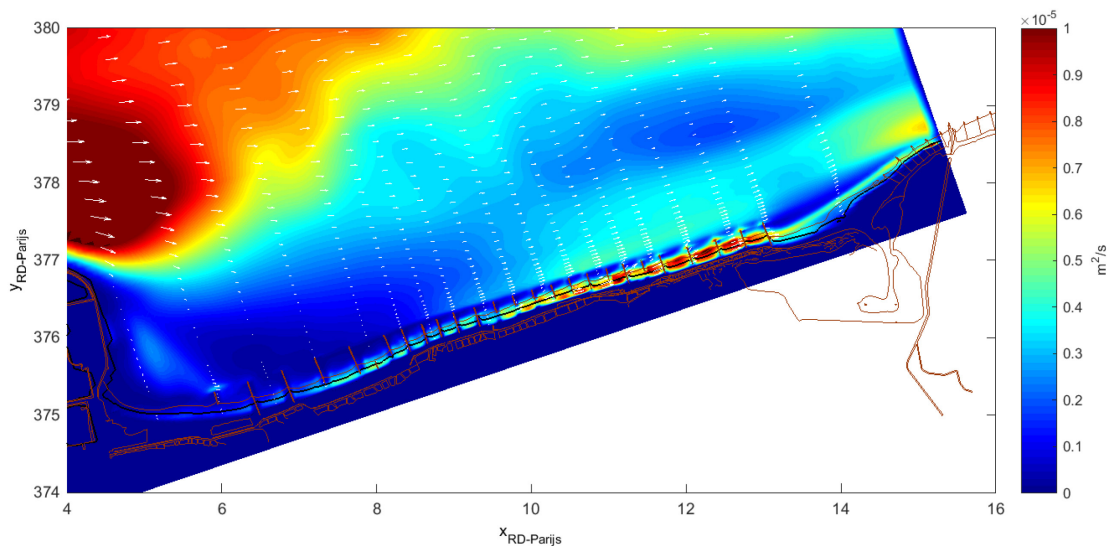


Figuur 59: Snelheden bij ebstroom, scenario stranduitbreiding.

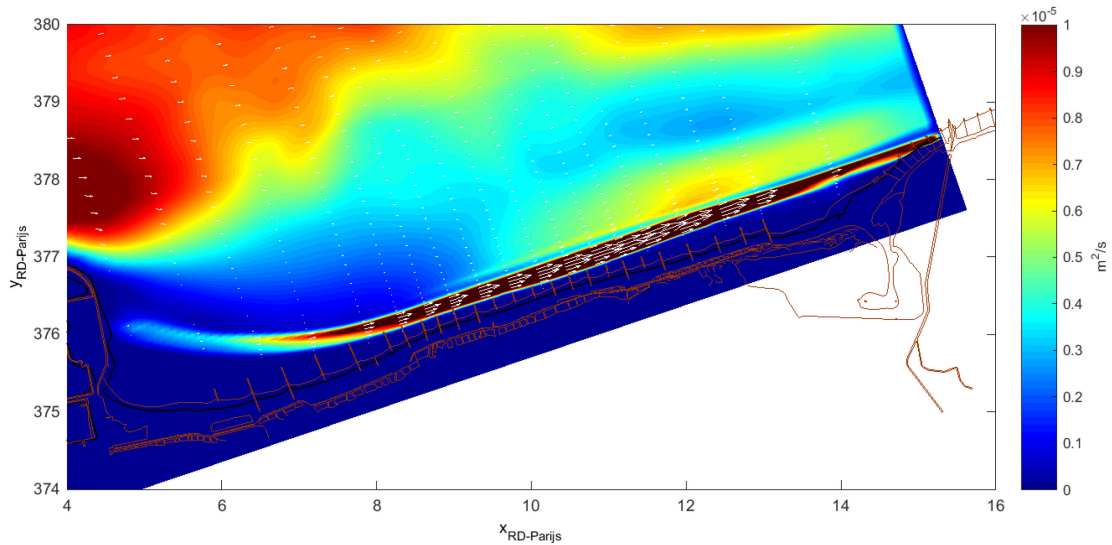
#### Netto zandtransport en bodemverandering

De netto zandtransporten zonder en met stranduitbreiding zijn weergegeven in Figuur 60 en Figuur 61. Het ebdominante karakter van de Appelszak is niet duidelijk waarneembaar. Ter hoogte van strand Lekkerbek is het nettotransport in de Appelszak noordwest georiënteerd. Dit was ook al, hetzij in mindere mate, waarneembaar in het N2V-model. Onder invloed van de stranduitbreiding neemt het nettotransport hier toe.

In Figuur 60 is het effect van de strandhoofden duidelijk waarneembaar. Het transport tussen de strandhoofden neemt toe voor de meer oostelijk gelegen strandhoofden. Deze strandhoofden zijn mogelijk minder efficiënt dan de langere westelijke strandhoofden. Ook de onderlinge afstand tussen de strandhoofden speelt hier een rol.

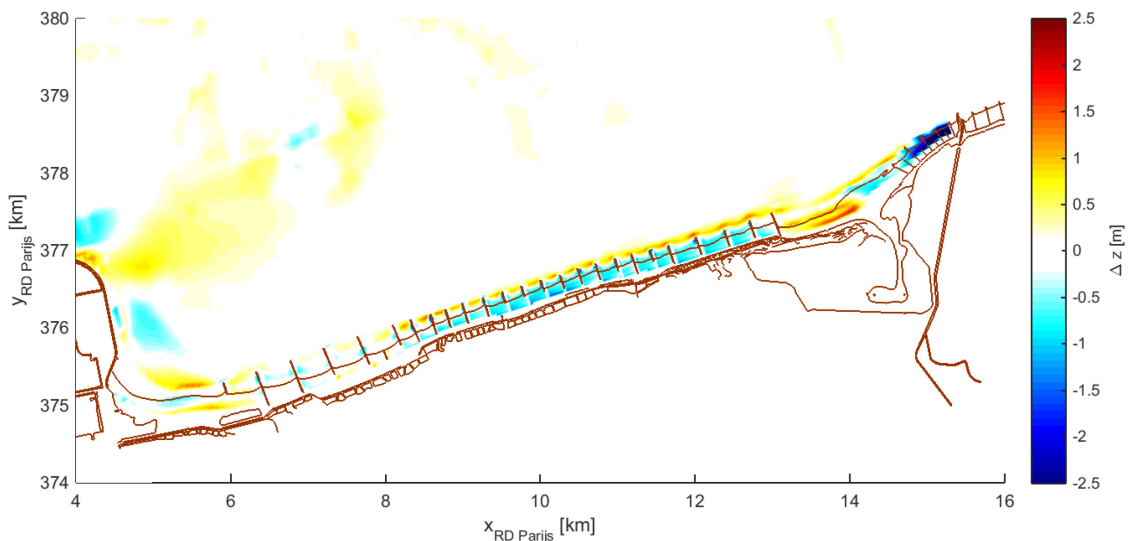


Figuur 60: Gemodelleerd netto zandtransport ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) onder huidige omstandigheden (volumes inclusief poriën).

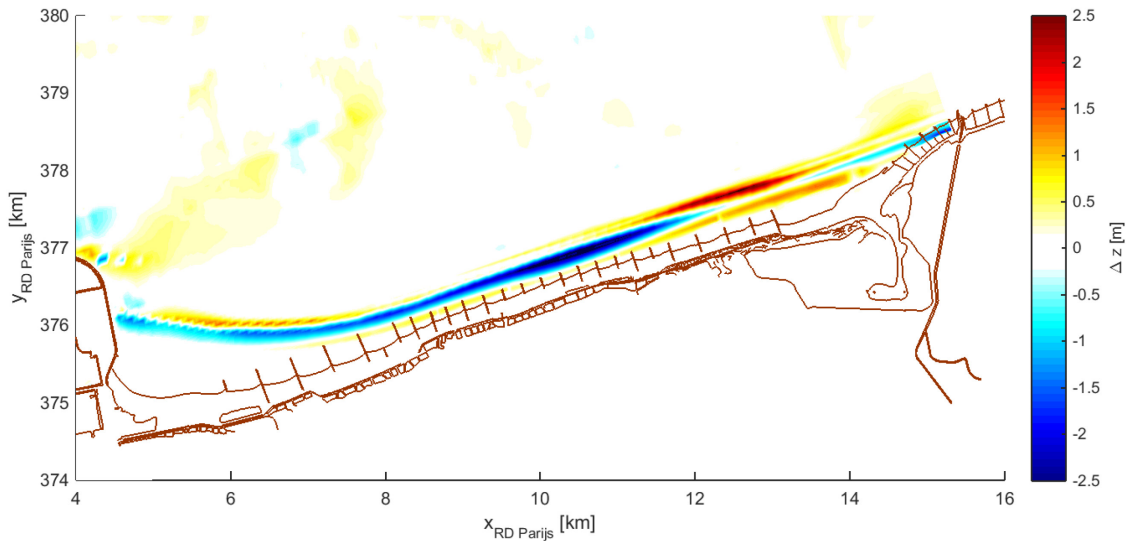


Figuur 61: Gemodelleerd gemiddeld zandtransport ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) scenario stranduitbreiding (volumes inclusief poriën).

Figuur 62 en Figuur 63 geven gemodelleerde sedimentatie- en erosiepatronen weer voor de huidige toestand en voor de strandverbreding. In Figuur 62 is het effect van de strandhoofden zichtbaar. In Figuur 63 zijn de strandhoofden volledig begraven en hebben zij geen effect meer. Sterkste erosie vindt plaats ter hoogte van strand Knokke-Zoute. In het Vlaamse Baaien scenario wordt het geërodeerde materiaal vooral afgezet ten Westen het zwin. De sterke erosie ter hoogte van Cadzand is door het scenario iets afgenomen. Merk hierbij wel op dat deze locatie zich op de rand van het modeldomein bevindt en bovendien zijn de strandhoofden ter hoogte van Cadzand niet opgenomen in het model.

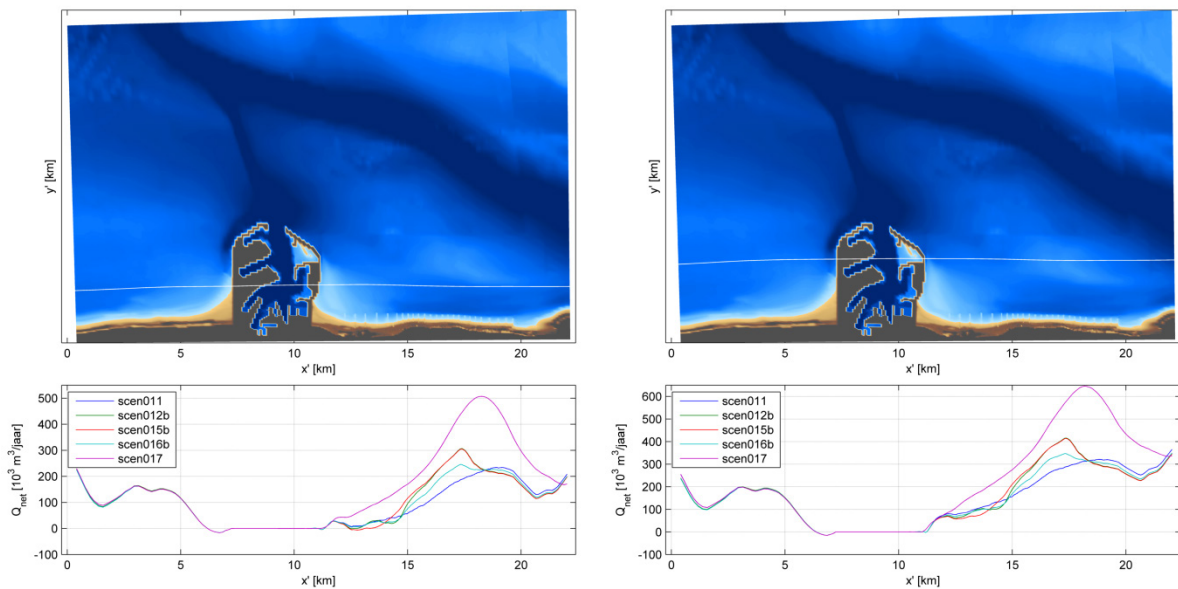


Figuur 62: Gemodelleerde sedimentatie- en erosiepatronen huidige bathymetrie na 3 jaar simulatie



Figuur 63: Gemodelleerde sedimentatie- en erosiepatronen voor de stranduitbreiding na 3 jaar simulatie

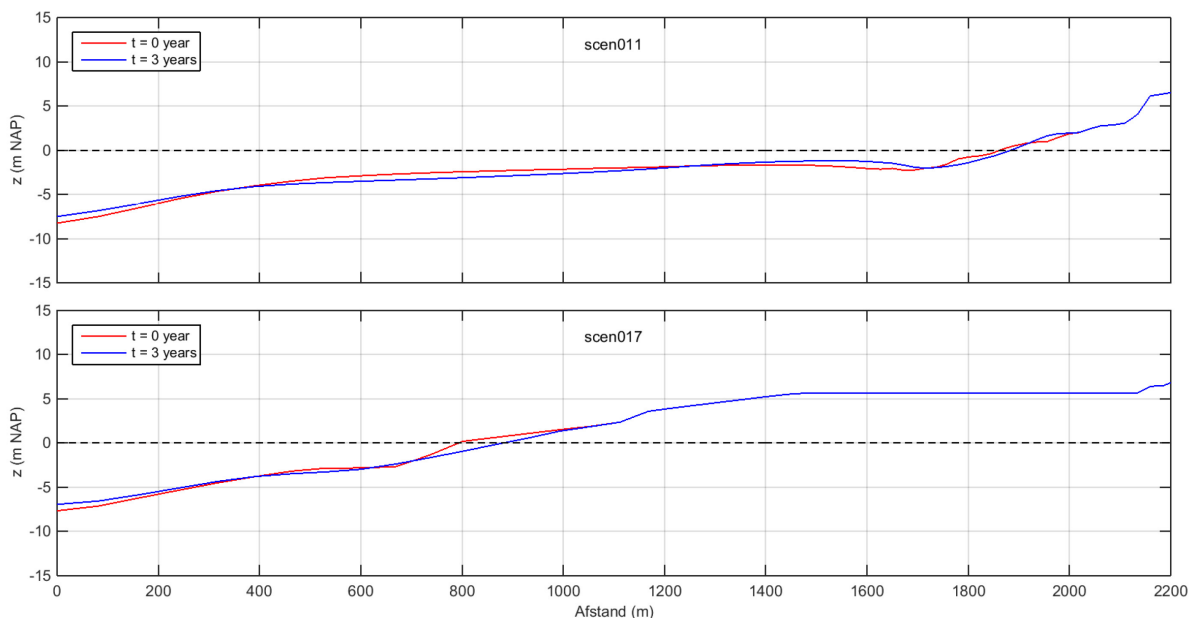
Het gemodelleerde langtransport is weergegeven Figuur 64. In tegenstelling tot het Nieuwpoort-Vlissingen model voorspelt het XBeach model een sterk verhoogde toename van het langtransport. Toename van het langtransport duidt op lokale erosie, zoals ter hoogte van Knokke-Zoute. Afname van het transport duidt op sedimentatie. In tegenstelling tot het Delft3D Nieuwpoort-Vlissingen model, wordt in het XBeach detailmodel in de huidige situatie de strandhoofden meegenomen in het model. In het scenario strandverbreding Vlaamse Baaien worden de strandhoofden volledig begraven door de suppletie en worden geen nieuwe strandhoofden voorzien. Dit verklaart voor een deel waarom in het XBeach model in het scenario het langtransport sterker toeneemt dan in het grovere Nieuwpoort-Vlissingen model.



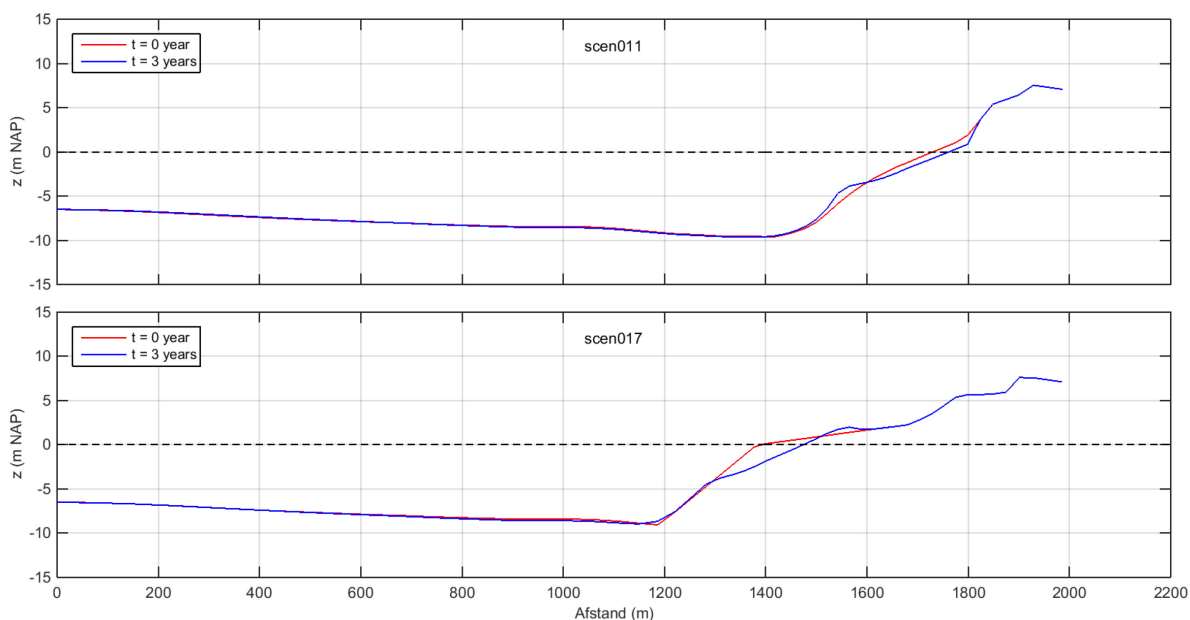
Figuur 64: Jaarlijks gemiddelde netto langtransport berekend in de zone afgebakend door de witte lijn in de bovenste plot. De volumes zijn incl. poriën.

### Evolutie strandprofiel

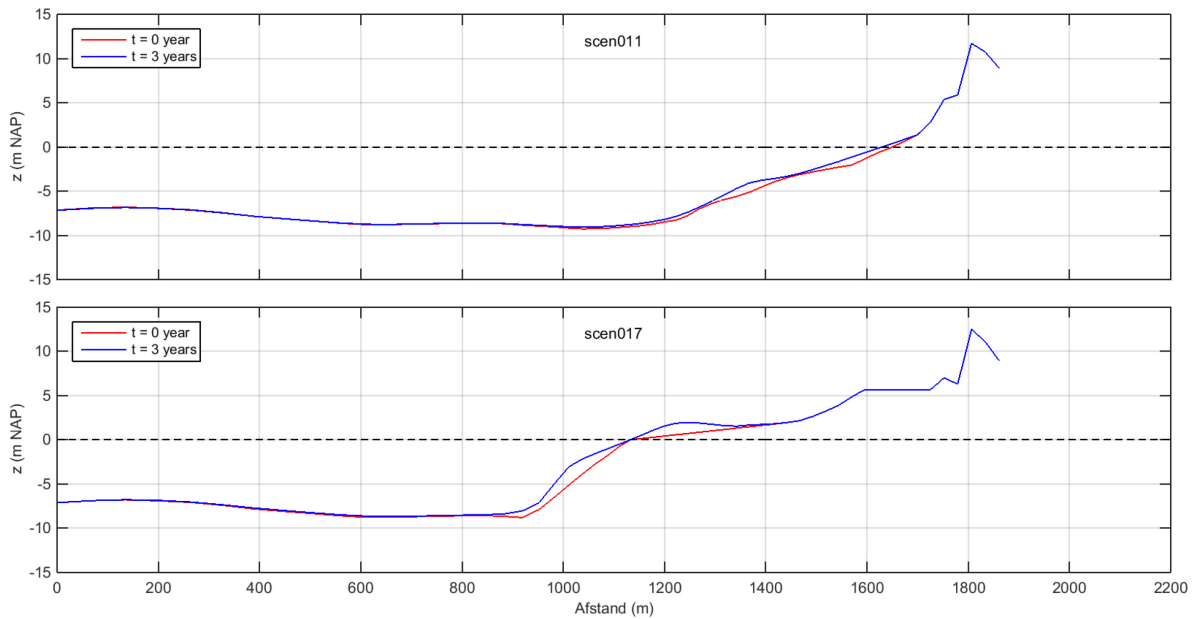
De dwarsprofielen, initieel en na 3 jaar, zijn weergegeven in Figuur 65 tot Figuur 68. In profiel 4 is zichtbaar hoe de steile vooroever afgevlakt wordt. In profiel 7 is dan weer sedimentatie waarneembaar.



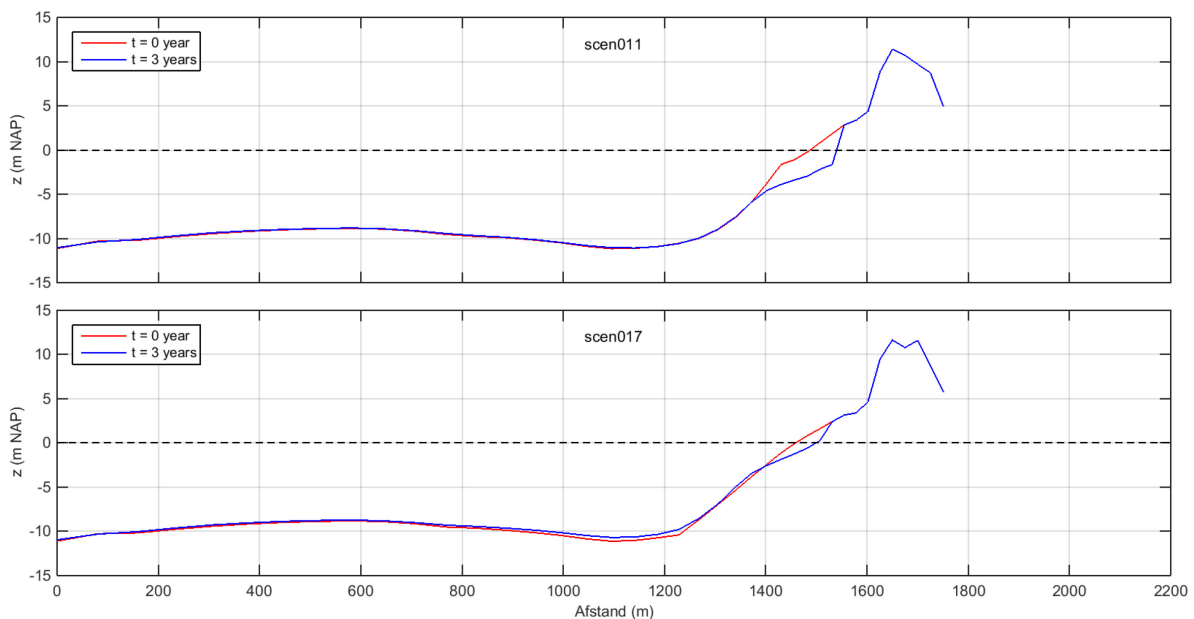
Figuur 65: Evolutie Profiel 1 na drie jaar (XBeach model), boven: strand- en vooroeverprofiel 2013, onder: scenario Vlaamse Baaien



Figuur 66: Evolutie Profiel 4 na drie jaar (XBeach model), boven: strand- en vooroeverprofiel 2013, onder: scenario Vlaamse Baaien



Figuur 67: Evolutie Profiel 7 na drie jaar (XBeach model), boven: strand- en vooroeverprofiel 2013, onder: scenario Vlaamse Baaien



Figuur 68: Evolutie Profiel 10 na drie jaar (XBeach model), boven: strand- en vooroeverprofiel 2013, onder: scenario Vlaamse Baaien

### Evolutie van de waterlijn

Figuur 69 toont de positie van de waterlijn (0mNAP) na drie jaar simulatie. De positie van de waterlijn is gemiddeld tussen de 50 en 100m landwaarts opgeschoven, behalve direct ten westen van het Zwin waar de 0mNAP niet verschoven is. De evolutie van de positie van de waterlijn voor profielen 1, 4, 7 en “Zwin” is weergegeven in Figuur 70 tot Figuur 73 (zie bijlage D voor de overige profielen). Ter vergelijking zijn de eerder onderzochte onderhoudssuppleties eveneens opgenomen in deze figuren (voor de 0mNAP lijnen zie

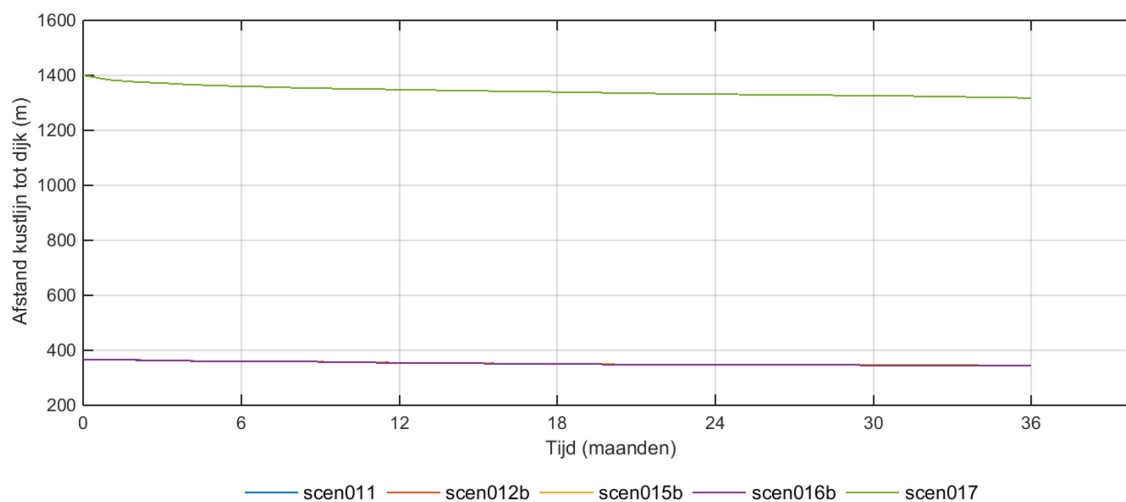


Bijlage E). In het begin van de simulatie gaat de evolutie voor een aantal profielen erg snel. De steile profielen worden op korte termijn afgezwakt. De snelheid neemt daarna af. Voor profiel 4 is het terugschreden van de waterlijn sterker dan in de huidige conditie, maar vergelijkbaar met de kleinere onderhoudssuppleties. Dit is mede te wijten aan het feit dat de huidige strandhoofden door de suppleties bedekt worden en dus geen effect meer hebben.

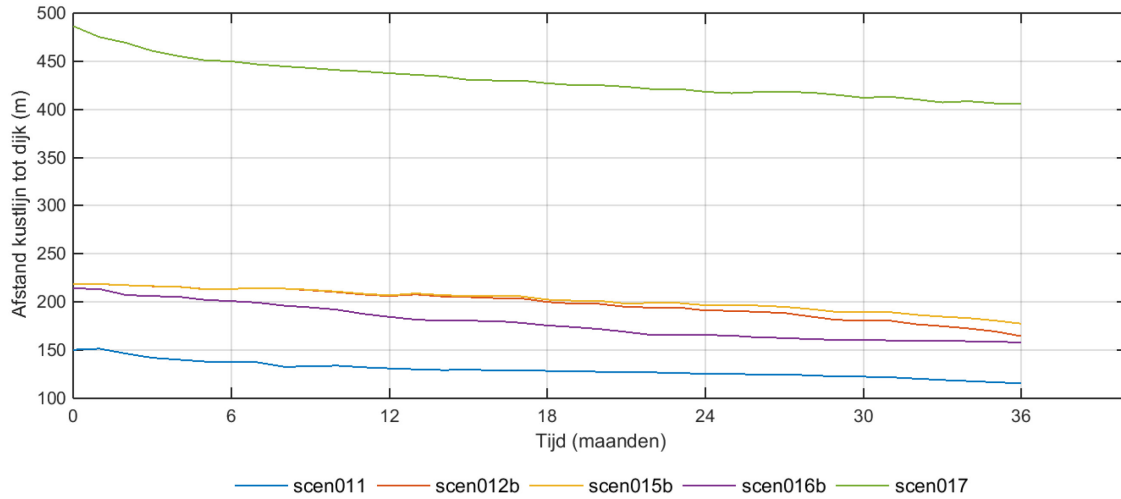
Ter hoogte van profiel 7 blijft de breedte van het strand nagenoeg stabiel en neemt zelfs licht toe. Ter hoogte van het Zwin is de positie van de waterlijn nagenoeg stabiel. De snelheid waarmee de strandbreedte toe- of afneemt is opgenomen in Tabel 7 voor profiel 1, 4, 7 en Zwin. Alle profielen zijn opgenomen in Bijlage D.



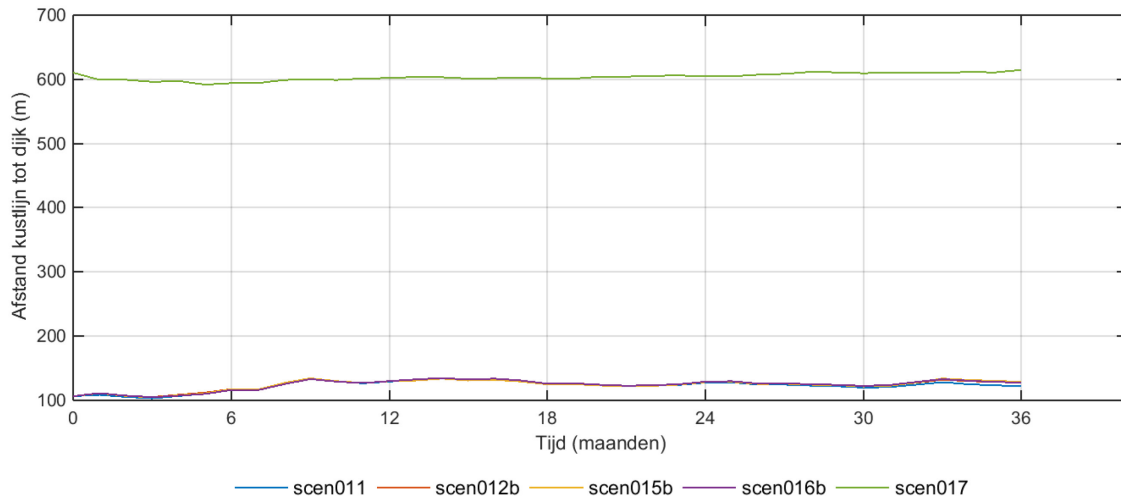
Figuur 69: Evolutie van de waterlijn (0mNAP) na drie jaar, zwarte lijn initiële waterlijn van de ontwerpsuppletie, blauw: positie waterlijn na 3 jaar.



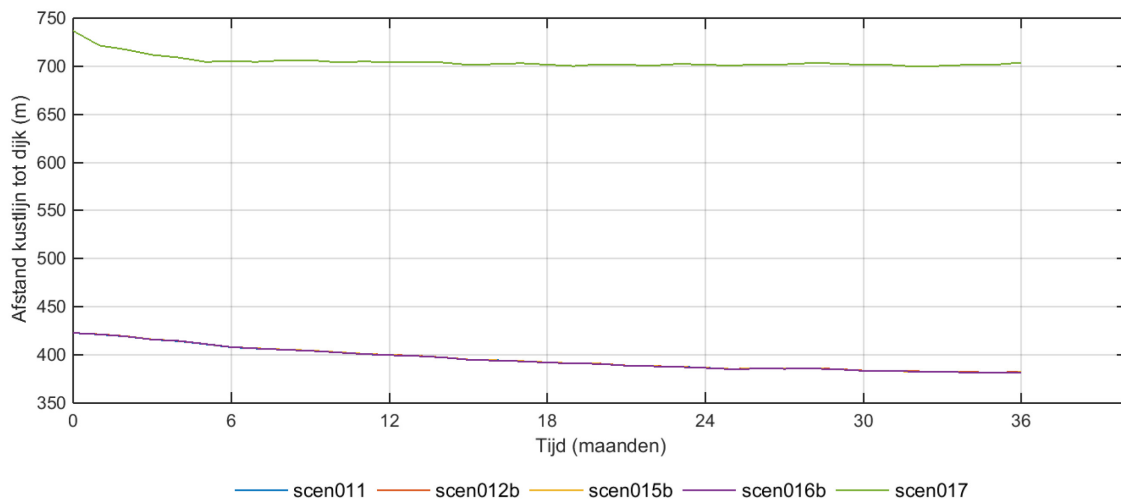
Figuur 70: Evolutie van de waterlijn voor profiel 1.



Figuur 71: Evolutie van de waterlijn voor profiel 4.



Figuur 72: Evolutie van de waterlijn voor profiel 7.



Figuur 73: Evolutie van de waterlijn voor profiel "Zwin".

Tabel 7: Evolutie strandbreedte (positie 0mNAP) in m/jaar gedurende het eerste en laatste jaar van de simulatie (negatief is landwaarts) ; scen011: huidig strand, scen017: strandverbreding Vlaamse Baaien, overige scenario's: reguliere suppleties (zie Bijlage B).

Jaar:	Profiel 1		Profiel 4		Profiel 7		profiel "Zwin"	
	1	3	1	3	1	3	1	3
scen011	-12.2	-4.0	-19.3	-9.8	22.8	-5.8	-23.1	-4.4
scen012b	-12.2	-3.2	-12.6	-26.7	23.4	-0.3	-22.8	-4.2
scen015b	-12.3	-3.2	-11.9	-19.1	23.3	0.4	-23.0	-4.5
scen016b	-12.5	-3.9	-29.6	-7.9	23.5	-1.3	-23.1	-4.4
scen017	-51.5	-14.2	-49.0	-12.2	-8.4	10.2	-32.3	2.3

### 4.3. Inschatting effecten op het Zwin

De strandverbreding kan het Zwin via drie mechanismen beïnvloeden:

1. Strand en vooroever worden breder. Dit geeft een langere verbindingsgeul met meer weerstand. Een breder strand kan bovendien tot toename van het eolisch transport en duinvorming leiden.
2. Het langtransport neemt toe, mogelijk mede als gevolg van het inzanden van het strandhoofd direct ten westen van het Zwin. Meer langtransport betekent dat er meer materiaal aanwezig is om de monding te sluiten gedurende doortij, en dat meer materiaal meegevoerd kan worden het Zwin in.
3. De samenstelling van het materiaal dat het Zwin binnenkomt kan veranderen. Hierdoor kan de bodemsamenstelling in het Zwin, en daarmee de geschiktheid voor bepaalde soorten planten en dieren, veranderen.

Voor alle drie de mechanismen geldt dat hun uiteindelijke effect niet direct te kwantificeren is, zeker niet in combinatie met de effecten van de uitbreidingsplannen. Uit de modelresultaten komt wel naar voren dat het golfgedreven langtransport met de strandverbreding toe zal nemen ter hoogte van de ingang van het Zwin (raai 9 in Figuur 32), Tabel 8. Het Bruun-getal –de verhouding tussen getijprisma en langtransport; een indicatie voor de stabiliteit van een getijbassin (Bruun & Gerritsen, 1960)- zal hierdoor afnemen. De uitbreiding van het Zwin heeft, door een vergroting van het getijprisma, een tegengesteld effect. De twee maatregelen tezamen zorgen voor een groter (gunstiger) Bruun-getal dan in de huidige situatie. De range waarbinnen het Bruun getal varieert ligt in alle gevallen in de meest ongunstige klasse 'zwak, instabiel, kan sluiten'; pas boven de 12.5 is een gunstiger klasse.

Uitgaande van de uitbreidingsplannen die met zekerheid uitgevoerd zullen worden geeft de hier onderzochte strandverbreding wel een negatieve indicatie voor het Zwin.

Met het oog op het belang van het Zwin en de kwantitatieve onzekerheden die nu nog bestaan is het uitvoeren van specifieke simulaties sterk aan te raden. Het volgen van de ontwikkelingen (monitoring) in en rondom het Zwin is sowieso nodig.

Tabel 8: Netto langtransporten en Bruun getallen met en zonder strandverbreding, en met en zonder uitbreiding van het Zwin, uitgaande van een getijprisma van 250.000 m<sup>3</sup> voor het huidige Zwin en 750.000 m<sup>3</sup> na uitbreiding. Voor het N2V model zijn alleen transport

	Zonder (m <sup>3</sup> /jaar)	Met (m <sup>3</sup> /jaar)	Bruun-getal Zonder, nu	Bruun-getal Met, nu	Bruun-getal Zonder, uitbreiding	Bruun-getal Met, uitbreiding
Xbeach	200.000	300.000	1.2	0.8	3.7	2.5
N2V	125.000	140.000	2.0	1.8	6.0	5.4

#### 4.4. Inschatting transporten naar Nederland

Het brandingstransport richting Nederland (bepaald in raai 10) neemt sterk (van 90.000 tot 125.000) toe in het XBeach model, maar blijft gelijk in het N2V model (Tabel 9). Het transport over de lange raaien in het N2V model neemt juist af, omdat de ebstroming voor Cadzand sterker wordt (Figuur 25). De grotere toename in het XBeach model is mogelijk te wijten aan het ontbreken van strandhoofden in het N2V model: In het XBeach model blokkeren deze een deel van het transport in de huidige situatie, maar zijn ze volledig begraven en dus inactief in de situatie met suppletie. In het N2V model is er geen onderscheid in het effect van strandhoofden mogelijk –de kustlangse resolutie van het model staat dit niet toe-, waardoor het verschil tussen de transporten met en zonder strandverbreding kleiner is.

Tabel 9: Netto langstransporten in raai 10 richting Cadzand.  
Voor het N2V model zijn alleen transporten over de korte raaien gebruikt.

	Zonder (m <sup>3</sup> /jaar)	Met (m <sup>3</sup> /jaar)
Xbeach	150.000	209.000
N2V	200.000	200.000

## 5. Conclusies en aanbevelingen

De strandverbreding is morfologisch doorgerekend met een bestaand XBeach en Delft3D (N2V) model. Beide zijn in eerder studies afgeregeld op brandingstransporten en morfologische ontwikkeling langsheen de Belgische kust. Het N2V model bevat geen strandhoofden en rekt standaard met een uniforme korrelgrootte van 0.2 mm. In het XBeach model zitten deze strandhoofden wel en wordt een D50 van 0.3 mm gehanteerd. Het getij en golfklimaat zijn voor beide modellen wel hetzelfde.

De belangrijkste conclusies zijn als volgt:

1. De voorgestelde strandverbreding erodeert volgens beide modellen na een initiële aanpassing met een vergelijkbare snelheid als de huidige situatie en de eerder gemodelleerde reguliere onderhoudssuppleties
2. Het kustprofiel past zich na de strandverbreding aan; een groot gedeelte van het aangebrachte zand wordt in kustdwarse richting (met name zeewaarts) herverdeeld. Dit betekent dat de profielen flauwer worden. Zand dat verplaatst wordt van boven de laagwaterlijn naar onder de laagwaterlijn zal geen effect meer hebben op de komberging. Verondieping van de dieper gelegen zones geeft wel extra weerstand.
3. De strandverbreding heeft volgens het XBeach model een sterker effect op het brandingstransport dan het N2V model. Dit komt in belangrijke mate door het ontbreken van strandhoofden in het N2V model.
4. De berekende brandingstransporten ter hoogte van het Zwin nemen toe als gevolg van de strandverbreding (N2V model: 10%, XBeach model: 50%). Deze toename is niet bevorderlijk voor de stabiliteit van het Zwin. De geplande uitbreiding van het Zwin zorgt voor een toename van het getijprisma die een positief effect heeft op de stabiliteit van het Zwin. Op basis van de gebruikte modellen is het niet in te schatten in welke mate de combinatie van de twee ingrepen al dan niet een positief effect zal hebben op de stabiliteit in vergelijking met de huidige toestand.
5. Een breder strand ter hoogte van het Zwin zorgt voor een langere toegangseul, en dus meer weerstand, naar het Zwin. In de stabiliteitsberekeningen volgens het Bruun getal wordt hier nog geen rekening mee gehouden.
6. De berekende brandingstransporten richting Nederland nemen volgens het XBeach model toe met ~40%, terwijl deze nauwelijks veranderen volgens het N2V model.
7. De korrelgrootte (0.2 of 0.3 mm) blijkt een sterk effect te hebben op de langstransporten en morfologische ontwikkeling.

Belangrijkste aanbevelingen:

1. Het Zwin is een belangrijk natuurgebied. De stranduitbreiding is niet bevorderlijk voor dit gebied volgens deze studie. De geplande uitbreiding van het Zwin heeft naar verwachting wel een positief effect. Het Zwin zelf valt buiten het rekendomein van de in deze studie gebruikte modellen. Om de effecten op het Zwin beter te kunnen kwantificeren, en zodoende onzekerheden over deze ontwikkelingen te verkleinen, verdient het aanbeveling het Zwin zelf in meer detail aan een modelstudie te onderwerpen. Daarbij dient ook aandacht te worden besteed aan de mogelijke rol van eolisch transport en een mogelijke verandering van bodemsamenstelling die de flora en fauna kan beïnvloeden.
2. Het voorliggende ontwerp, een eerste schets, is gebaseerd op een gladde kustboog tussen Zeebrugge en Cadzand. Er zijn verschillende optimalisaties mogelijk:
  - a. Een kortere verbreding tot Lekkerbek in plaats van het Zwin, opdat er minder effect op het Zwin en de Nederlandse kust is.
  - b. Een optimalisatie van de kustdwarse profielen (minder steil) waardoor de initiële morfologische respons verminderd kan worden. Hierbij dient ook rekening met de zwemveiligheid gehouden te worden.

- c. Minder zand boven de hoogwaterlijn: voor de doorstroming achter het eiland in het Vlaamse Baaienplan is het volume onder water van belang. Volume boven water is duurder in aanleg, en kan onwenselijk brede stranden geven (toerisme). Minder volume boven de laagwaterlijn zal dan weer een negatief effect hebben op de komberging.
3. De korrelgrootte heeft een sterk effect. Het is aan te bevelen soortgelijke berekeningen opnieuw uit te voeren als de karakteristieken van het suppletiezand bekend zijn. In het verleden werd er voornamelijk met 300µm zand gesuppleerd. De beschikbare zandvoorraad is mogelijk een beperkende factor voor de keuze van korreldiameter.
4. Andere werken in het kader van het plan Vlaamse Baaien, met name het eiland, zullen de stromingen en golfwerking langsheen de strandverbreding sterk veranderen. Daarom dient het geheel aan ingrepen ook beschouwd te worden. Door de afscherpende werking van de eilanden zou een heel ander strand kunnen ontstaan. Door het ontbreken van opbouwende golfcondities kan een flauwe strandhelling ontstaan. Mogelijk gedraagt het strand zich zelfs erosiever.
5. Deze eerste verkenning is gemaakt met bestaande modellen. De voorliggende studie laat zien deze op een aantal punten verbeterd kunnen worden:
  - a. Bepalen van een uitbreider, voor deze locatie representatiever golfklimaat.
  - b. Het XBeach model heeft een beperkt domein waardoor de modelrand erg dicht bij het interessegebied ligt. Het is aan te bevelen dit uit te breiden tot over de Nederlands-Belgische grens.
  - c. Het N2V geeft onrealistische bodemveranderingen in het Oostgat (Walcheren). Dit is weliswaar buiten het interessegebied maar leidt wel mogelijk tot een sterke verandering van de stromingen en morfologie in de Scheldemonding.
  - d. Volgens de modellen verflauwen de profielen ook in de huidige situatie, wat niet realistisch is. Dit is mogelijk het gevolg van te 'simpel', dieptegemiddeld, modelleren: ontbreken van kustdwarse *undertow* en golfgedreven transport. Als de vorm van het profiel, bijvoorbeeld de strandbreedte, van belang is kan een 3D of 2DV berekening uitkomst bieden.

## 6. Referenties

- Boutmy (1998). Morphological impact of IJmuiden harbour; Validation of Delft3D/Delft3D-RAM 1968-1996; MSc thesis TU Delft.
- Bruun, P., & Gerritsen, F. (1960). Stability of coastal inlets. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(7), 23.
- Couderé, K., Martens, C., Trouw, K., Darras, I. (2010). Internationaal milieueffectrapport over structurele maatregelen voor het duurzaam behoud en de uitbreiding van het Zwin als natuurlijk intergetijdengebied. Technisch Deelrapport Water.
- Durieux, M. (2003). De stabiliteit van de Slufter op Texel. MSc. Thesis Delft University of Technology.
- Elias, E., & Van der Spek, A. J. F. (2014). Grootschalige morfologische veranderingen in de Voordelta 1964-2013 (werkdocument). Delft.
- Houthuys, R. (2012), Morfologische trends van de Vlaamse Kust in 2011, publication by Afdeling Kust
- IMDC (2007) Internationaal MER voor de uitbreiding van het Zwin: Hydrodynamische en morfologische vergelijking van de scenario's. I/RA/11285/07.127/CMA.
- Kuijper, K., Nederhoff, K. & Vergouwen, S. (2015, concept). Beheerbibliotheek Zeeuws-Vlaanderen. Deltares rapport 1220040-002-ZKS-002.
- Lanckriet, T.; Zimmermann, N.; Trouw, K.; Wang, L.; De Maerschalck, B.; Delgado, R., Verwaest, T., Mostaert, F. (2015). Wetenschappelijke bijstand voor de hydrodynamica en zanddynamica in de kustzone Suppletie Knokke: Effect op de morfologie van het Zwin en van de Baai van Heist - XBeach - modellering.. Versie 4.0. WL Rapporten, 12\_107. Waterbouwkundig Laboratorium & IMDC: Antwerpen, België.
- LTV rapport A-27. Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis (2013). Actualisatierapport Delft3D Schelde-estuarium. Maximova, T.; Ides, S.; De Mulder, T.; Mostaert, F. (2009). Verbetering randvoorwaardenmodel: deelrapport 4. Extra aanpassingen in de Zeeschelde. Version 2.0. WL Rapporten, 753\_09. Flanders Hydraulics Research: Antwerp.
- Trouw, K., Zimmermann, N., Wang, L., De Maerschalck, B., Delgado, R., & Mostaert, F. (2014). Scientific support regarding hydrodynamics and sand transport in the coastal zone. Literature review coastal zone Zeebrugge – Zwin. Version 1.0. Antwerp, Belgium. doi:WL Rapporten, 12\_107.
- Roelvink, J.A. (2006). Coastal morphodynamic evolution techniques. *Coastal Engineering*, 53, 277-287. Van Kleef, O., de Wolf, P., de Laet, P, Verwaest, T. (1997). Hydraulische invloed van structurele ingrepen tegen de verzanding van het Zwin. *Infrastructuur in het Leefmilieu* 4/97, p 254-263.
- Van der Slikke, M. J. (1997). Grootschalige zandbalans van de Westerscheldemonding (1969-1993), een inventarisatie van dieptegegevens (1800-1996). Utrecht. doi:Rapport R97-18.
- Van Rijn, L.C. (1993). Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. Aqua Publications, The Netherlands. Verhaegen, K. (2010). Internationaal milieueffectrapport over structurele maatregelen voor het duurzaam behoud en de uitbreiding van het Zwin als natuurlijk intergetijdengebied. Niet-technische samenvatting.
- Vroom, J., Schrijvershof, R. (2015). Overzicht van menselijke ingrepen in de Westerschelde en haar mondingsgebied in de periode 1985-2014. Memo 1210301-001-ZKS-0005, Deltares. Wang, L.; Zimmermann, N.; Trouw, K.; De Maerschalck, B.; Delgado, R.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2015).

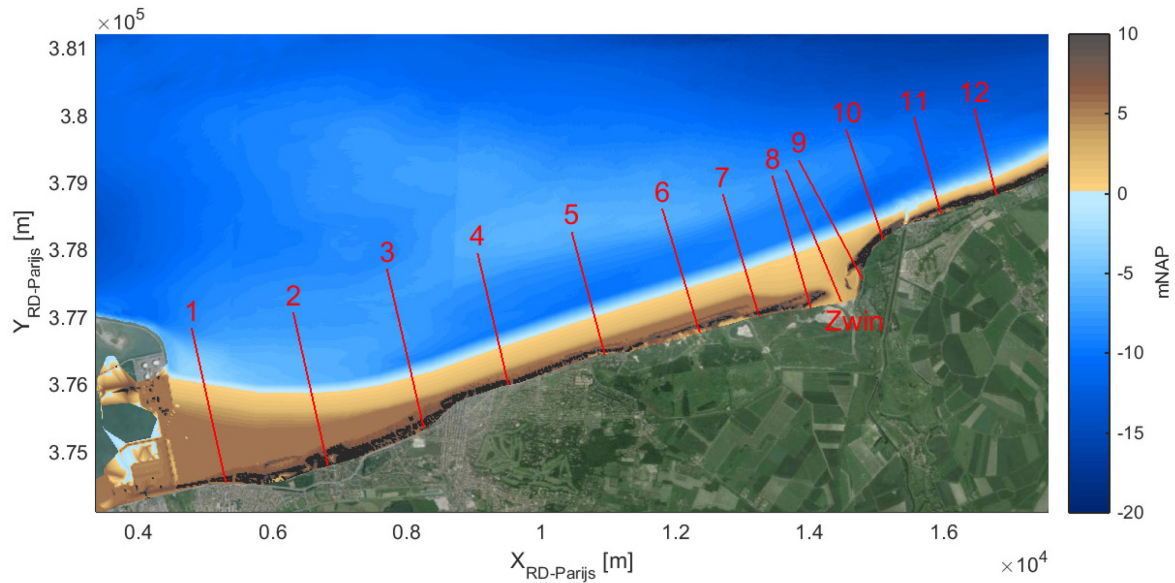
Scientific support regarding hydrodynamics and sand transport in the coastal zone: Calibration of a Long term morphological model of the Belgian shelf. Version 4.0. WL Rapporten, 12\_107. Flanders Hydraulics Research & IMDC: Antwerp, Belgium.

Waterschap Scheldestromen (2013). Ontwerp kustversterkingsplan West Zeeuwsch-Vlaanderen. Projectplan: deelproject Cadzand-Bad. registratienummer : 2013015581

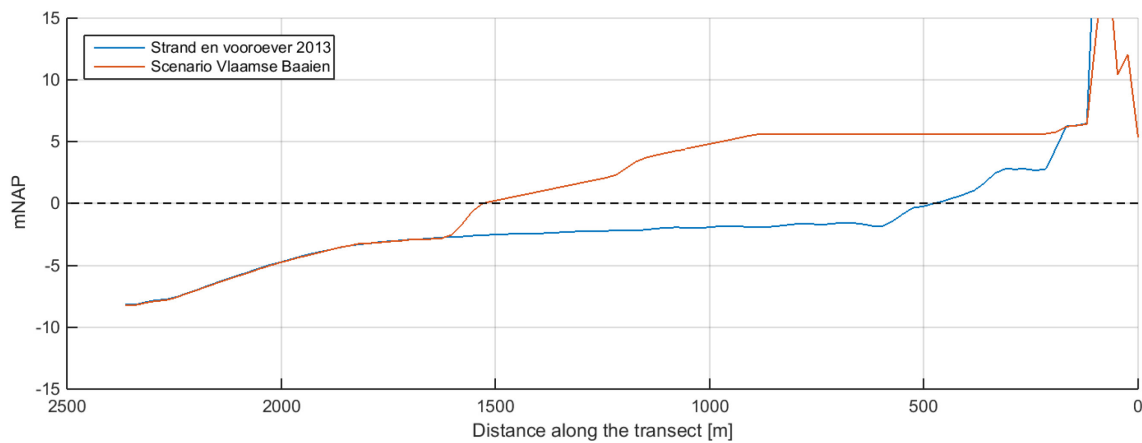
Wilderom, M. H. (1973). Tussen Afsluitdammen en Deltadijken. Deel IV. Zeeuwsch Vlaanderen. doi:ISBN 90 70027 41 0



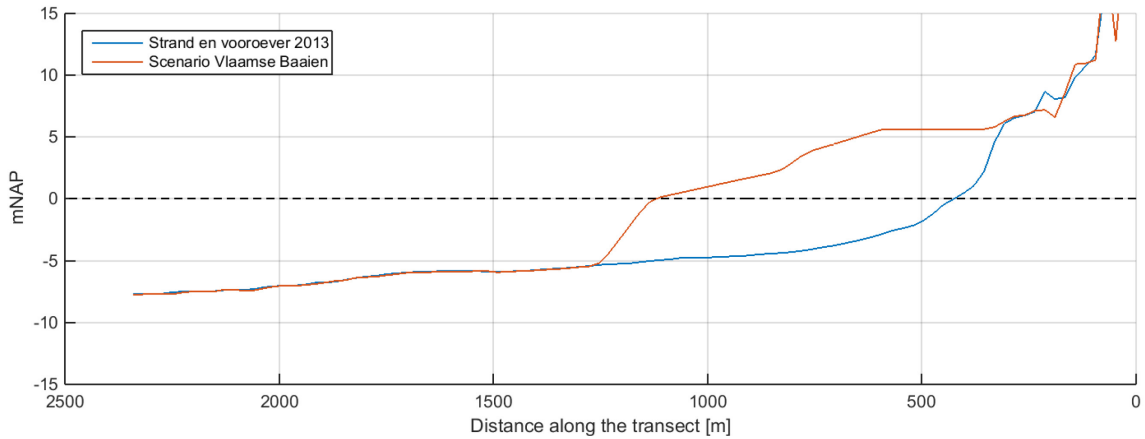
## Bijlage A: Dwarsprofielen strand en vooroever 2013 en scenario Zeebrugge – Cadzand



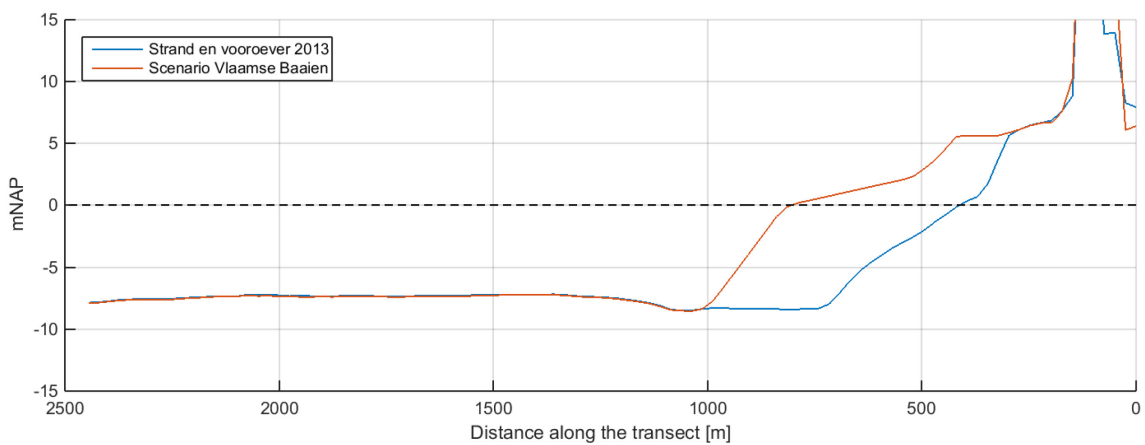
Figuur 74: Locatie van de profielen



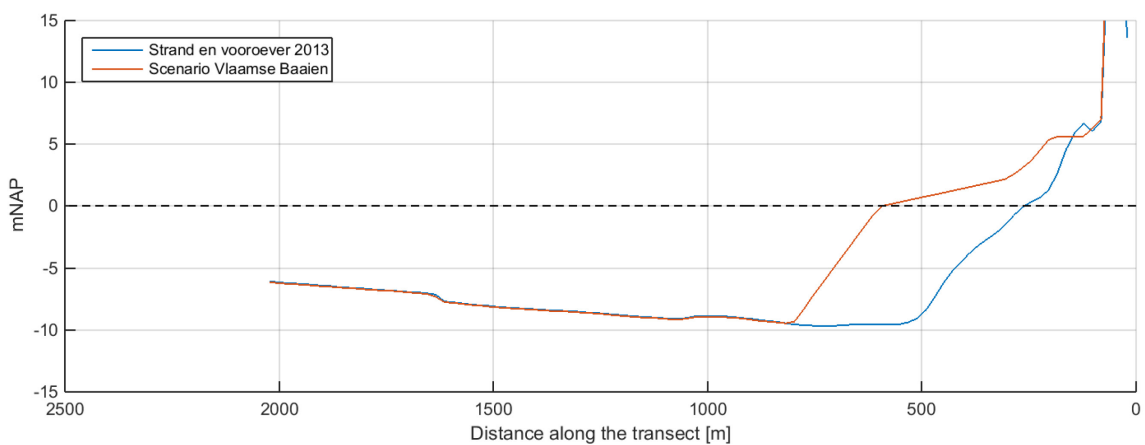
Figuur 75: Strand en vooroever 2013 en scenario strandverbreding Zeebrugge - Cadzand, dwarsprofiel 1.



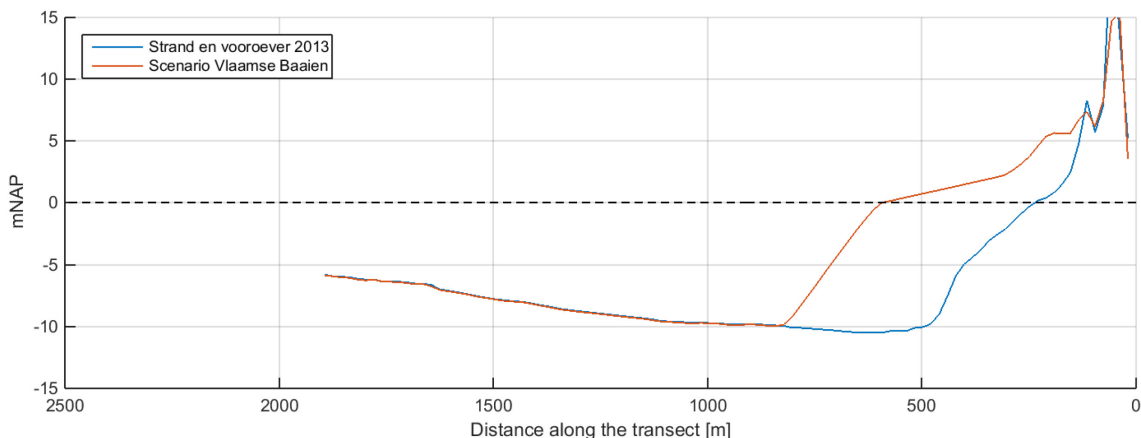
Figuur 76: Strand en vooroever 2013 en scenario strandverbreding Zeebrugge - Cadzand, dwarsprofiel 2.



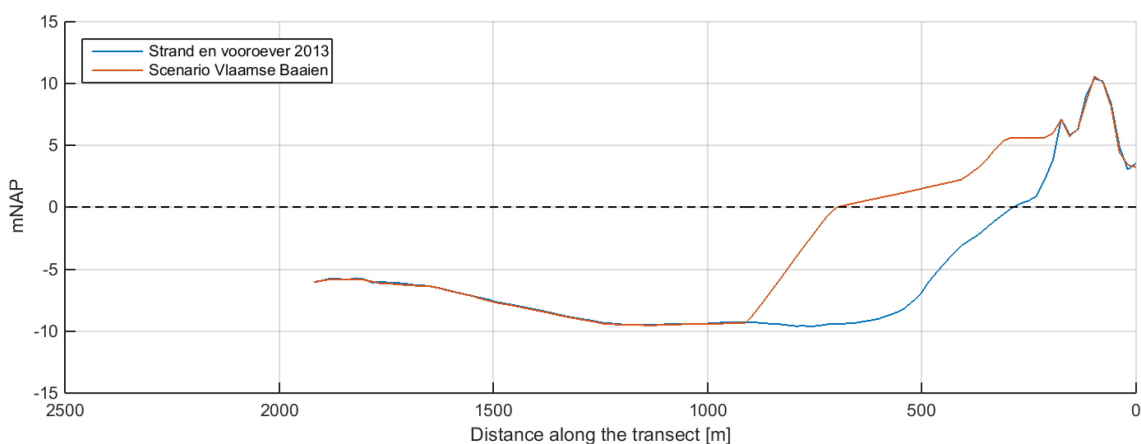
Figuur 77: Strand en vooroever 2013 en scenario strandverbreding Zeebrugge - Cadzand, dwarsprofiel 3.



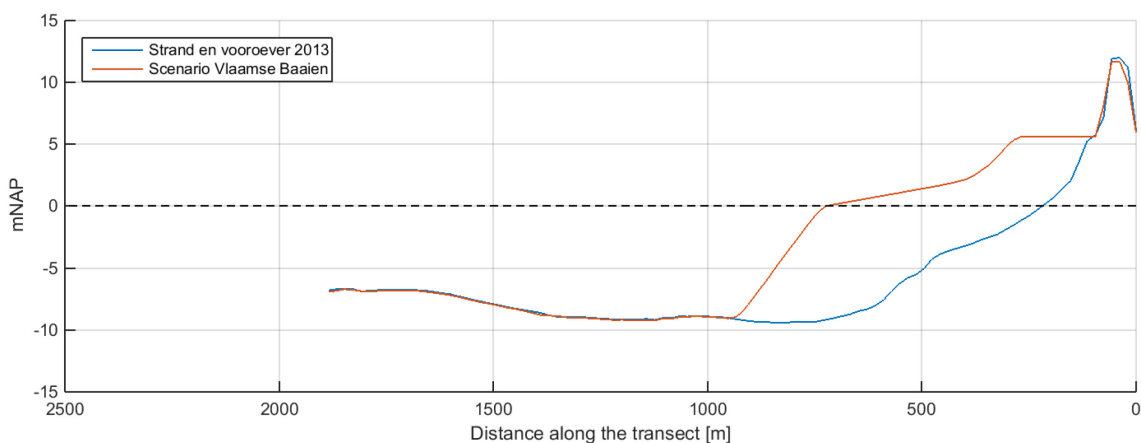
Figuur 78: Strand en vooroever 2013 en scenario strandverbreding Zeebrugge - Cadzand, dwarsprofiel 4.



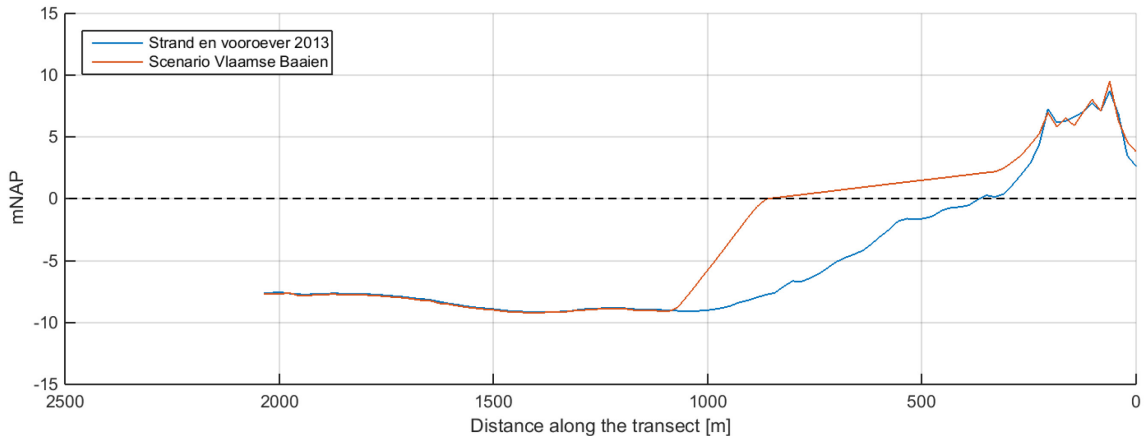
Figuur 79: Strand en vooroever 2013 en scenario strandverbreding Zeebrugge - Cadzand, dwarsprofiel 5.



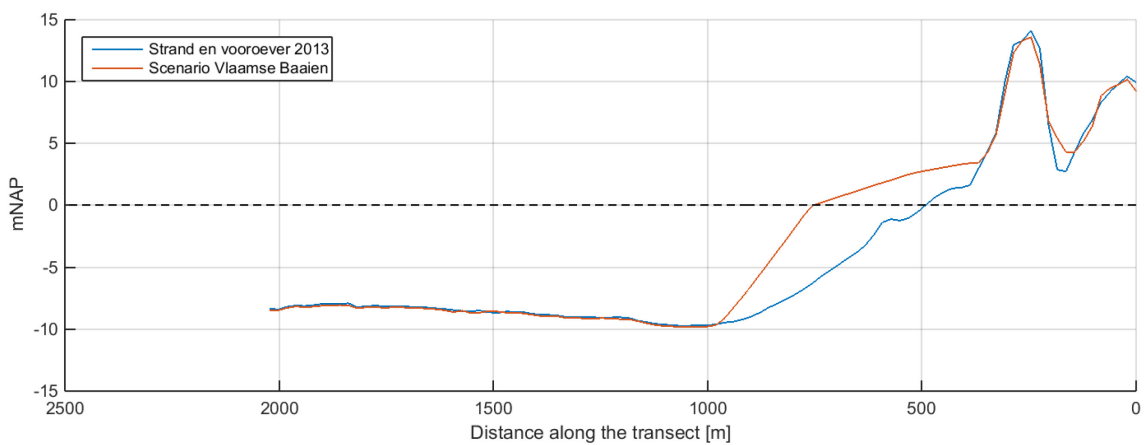
Figuur 80: Strand en vooroever 2013 en scenario strandverbreding Zeebrugge - Cadzand, dwarsprofiel 6.



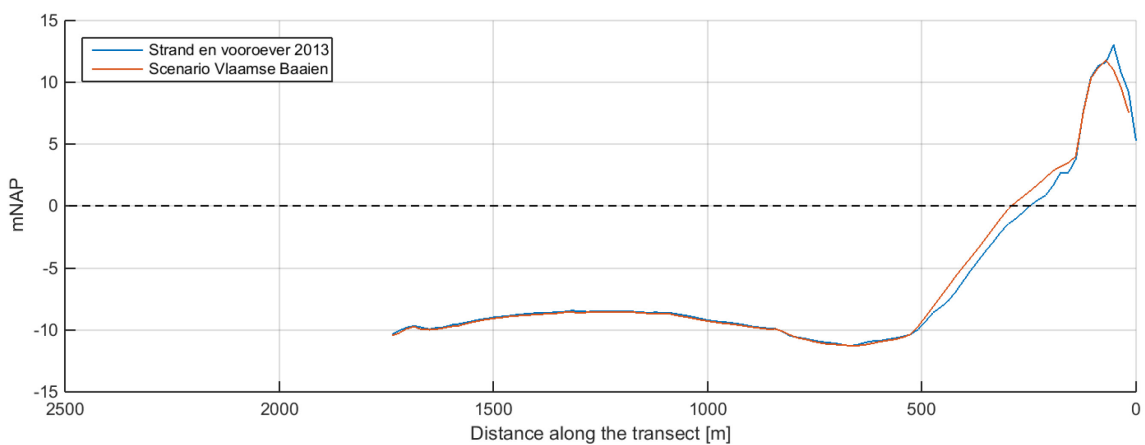
Figuur 81: Strand en vooroever 2013 en scenario strandverbreding Zeebrugge - Cadzand, dwarsprofiel 7.



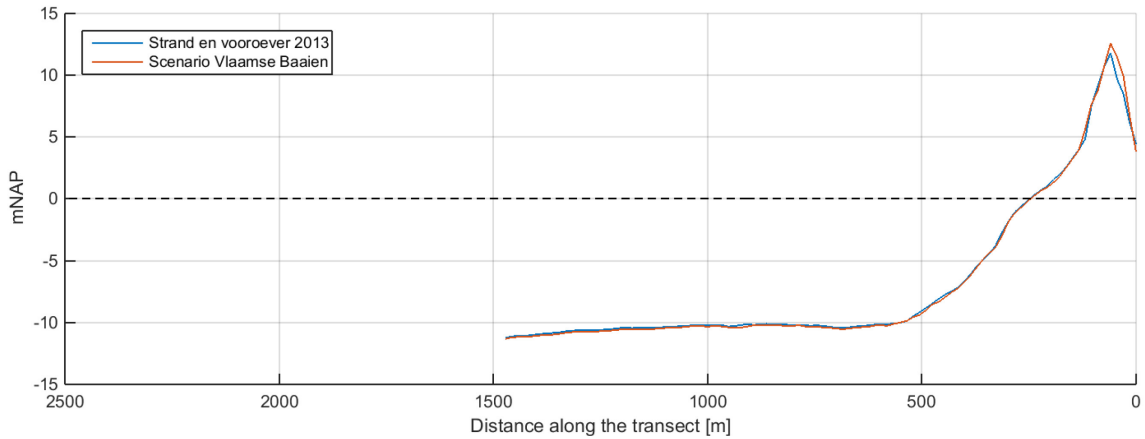
Figuur 82: Strand en vooroever 2013 en scenario strandverbreding Zeebrugge - Cadzand, dwarsprofiel 8.



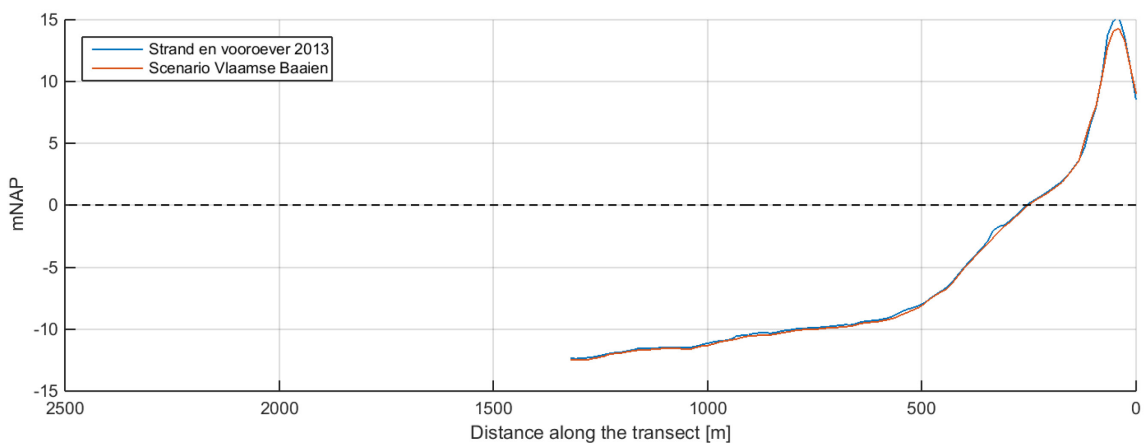
Figuur 83: Strand en vooroever 2013 en scenario strandverbreding Zeebrugge - Cadzand, dwarsprofiel 9.



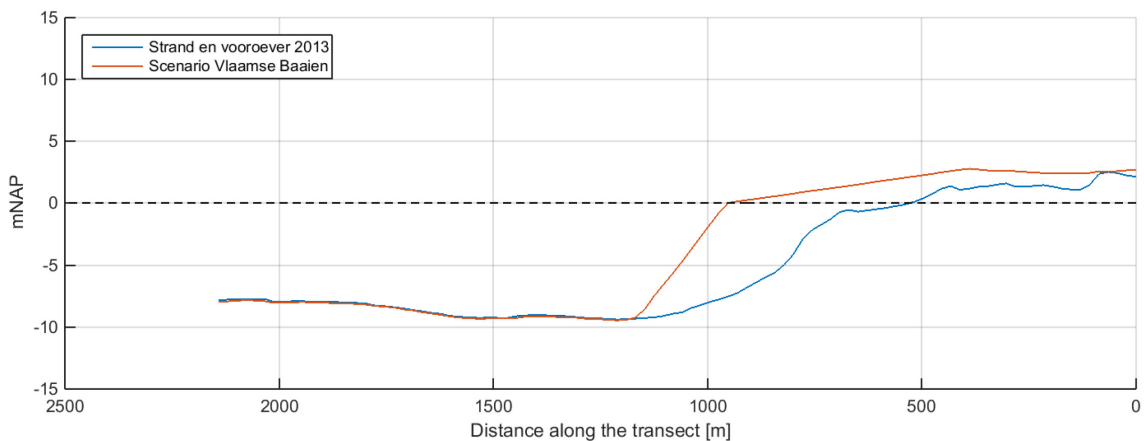
Figuur 84: Strand en vooroever 2013 en scenario strandverbreding Zeebrugge - Cadzand, dwarsprofiel 10.



Figuur 85: Strand en vooroever 2013 en scenario strandverbreding Zeebrugge - Cadzand, dwarsprofiel 11.



Figuur 86: Strand en vooroever 2013 en scenario strandverbreding Zeebrugge - Cadzand, dwarsprofiel 12.



Figuur 87: Strand en vooroever 2013 en scenario strandverbreding Zeebrugge - Cadzand, dwarsprofiel Zwin.

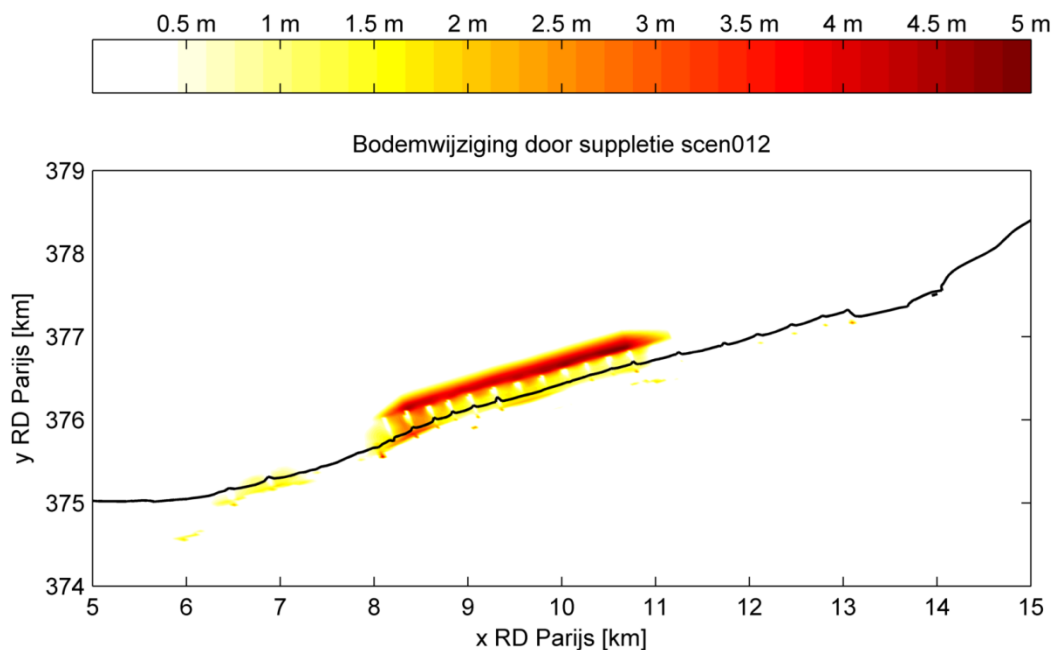
## Bijlage B: Eerder gemodelleerde strandsuppleties Knokke

Onderstaande scenario's stranden en vooroeversuppleties werden eerder beproefd met behulp van het XBeach Knokke model (Lanckriet et al., 2015). Drie suppletiescenario's werden onderzocht aan de hand van het model. Het ontwerp van de suppleties werd vastgelegd in het Masterplan Kust.

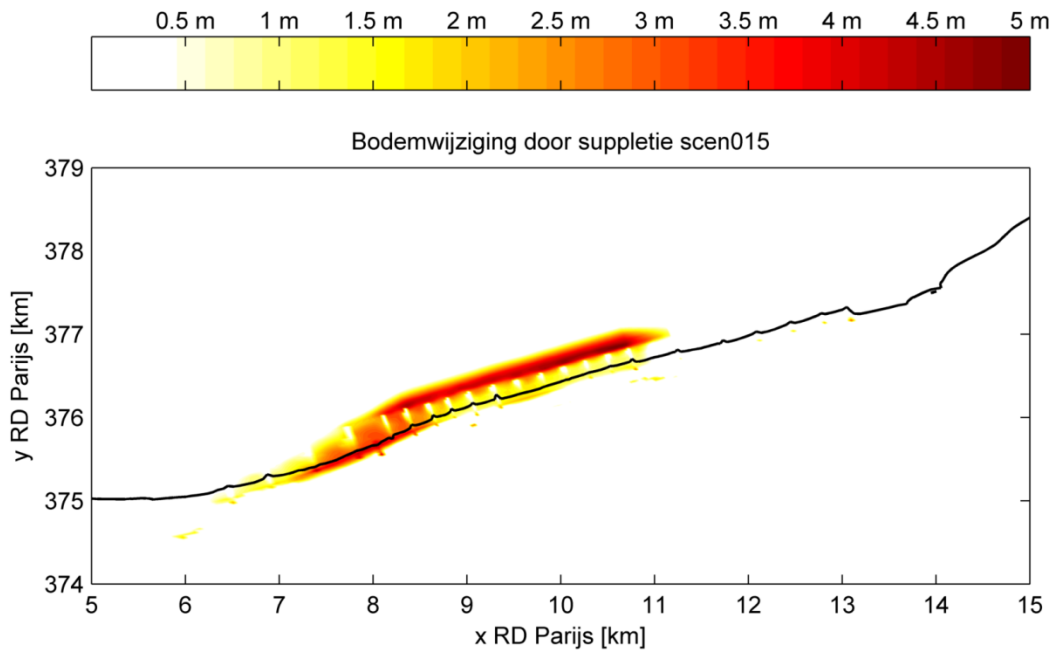
- **Scen012:** Geoptimaliseerde ecologische suppletie, met afgeronde overgangen met een buffer om 5 jaar erosie te compenseren. Het strandprofiel bestaat uit een berm met variabele breedte op +7m TAW (4.7m NAP), een helling van 1/20 tot 5m TAW ( 2.7m NAP) en vervolgens een helling van 1/41 tot aansluiting op bestaande bodem. Voor deze suppletie is 3,8 miljoen m<sup>3</sup> zand vereist (in situ-volume).
- **Scen015:** Geoptimaliseerde ecologische suppletie, met afgeronde overgangen, doorgetrokken over het Albertstrand met een buffer om 5 jaar erosie te compenseren. Het strandprofiel bestaat uit een berm met variabele breedte op +7m TAW (4.7m NAP), een helling van 1/20 tot 5m TAW ( 2.7m NAP) en vervolgens een helling van 1/41 tot aansluiting op bestaande bodem. Hiervoor is 4,8 miljoen m<sup>3</sup> zand vereist (in situ-volume).
- **Scen016:** Suppletie met een steil strandprofiel, met afgeronde overgangen, zonder buffers en niet doorgetrokken over Albertstrand. Het strandprofiel bestaat uit een berm met variabele breedte op +7m TAW (4.7m NAP), een helling van 1/20 tot 5m TAW ( 2.7m NAP) en vervolgens een helling van 1/30 tot aansluiting op bestaande bodem. Hiervoor is 2,3 miljoen m<sup>3</sup> nodig. Als gevolg van de steilere hellingen is de berm op +7 m TAW typisch breder dan in scen012 en scen015, en bevat deze suppletie dus een groter volume zand boven de hoogwaterlijn.

De buffers die zijn voorzien in Scen012 en Scen015 werden in rekening gebracht door het profiel met een bepaalde afstand zeewaarts te verschuiven totdat het volume van de buffer bereikt wordt. Het volume van de buffer is deze zoals gerapporteerd in het Masterplan Kustveiligheid.

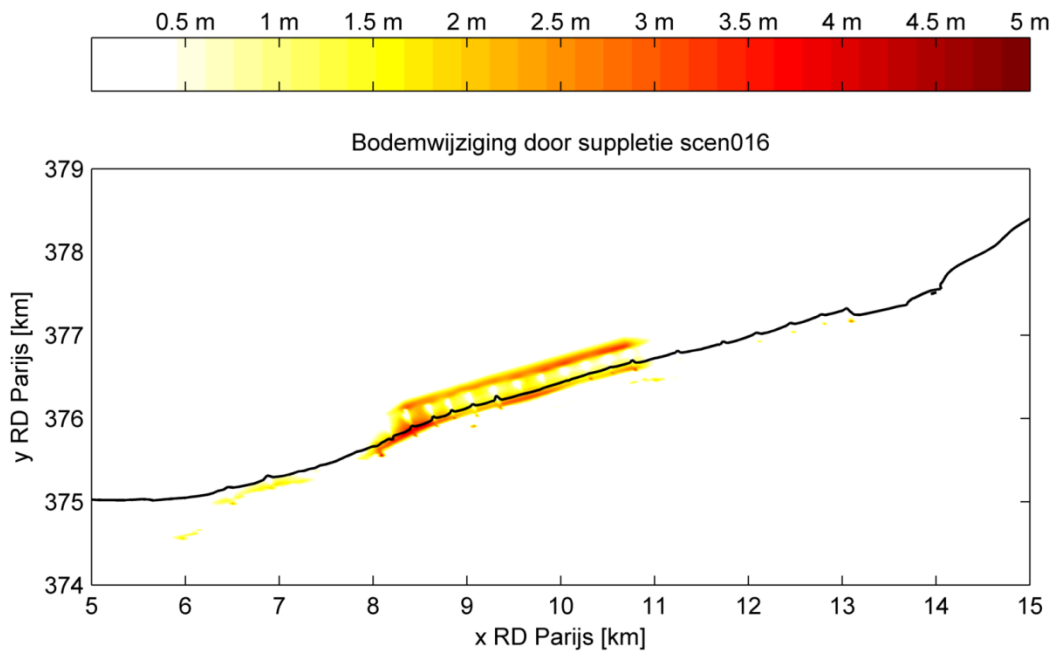
Figuur 88 tot Figuur 90 geven de suppleties weer als bathymetrische verschilkaarten. Doordat de vooroever in de omgeving van Knokke relatief steil is door de aanwezigheid van de Appelzak (een geul voor de kust), wordt lokaal het bodempeil met maximaal 5,0 m verhoogd door de suppleties.



Figuur 88: Bodemwijziging voor suppletie scen012.

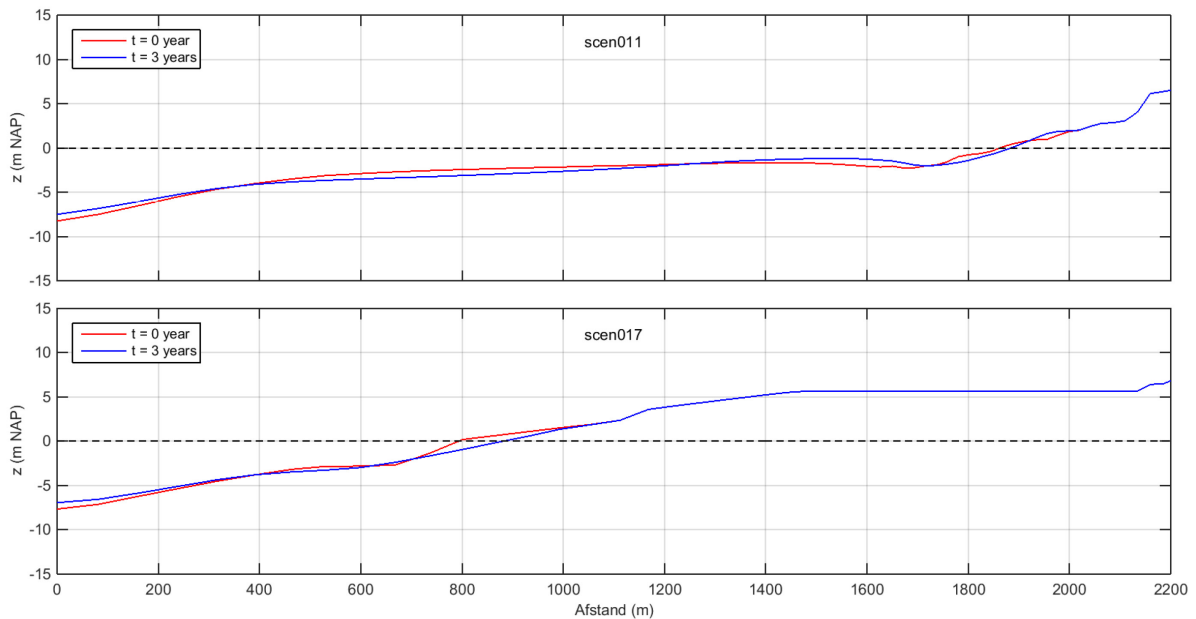


Figuur 89: Bodemwijziging voor suppletie scen015.

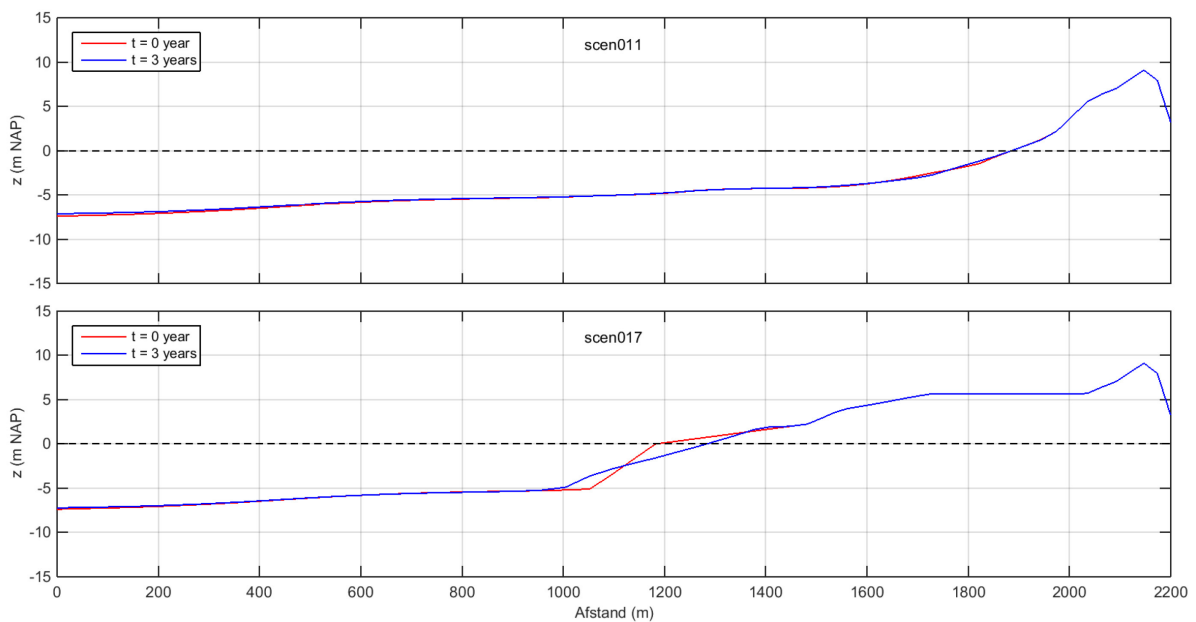


Figuur 90: Bodemwijziging voor suppletie scen016.

## Bijlage C: Evolutie dwarsprofielen, XBeach model

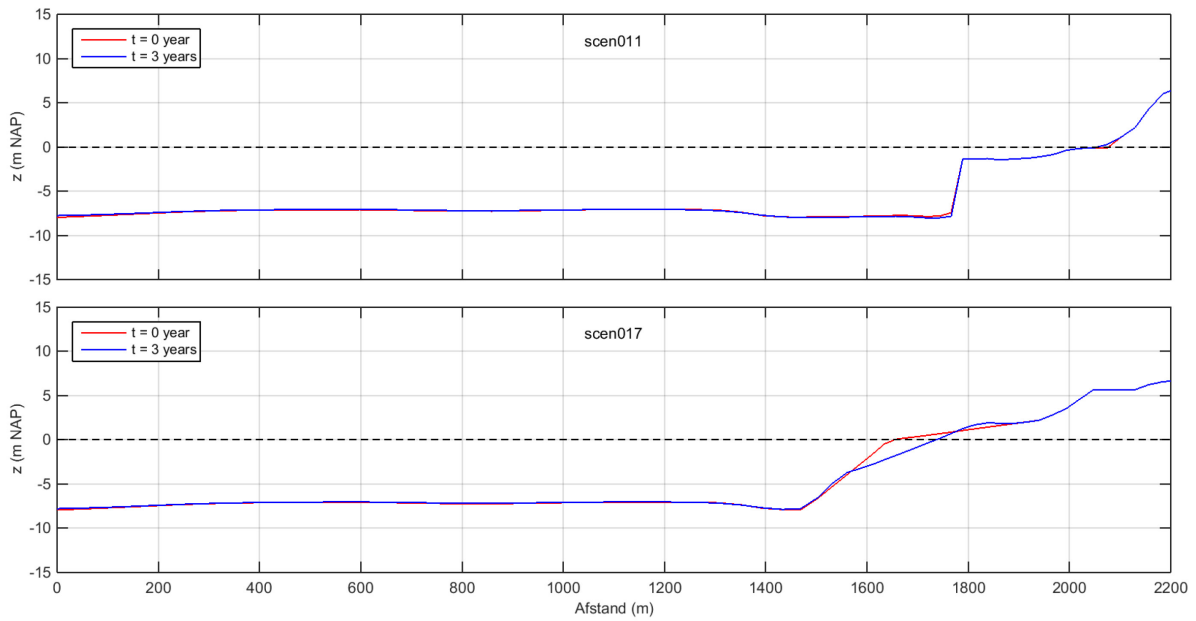


Figuur 91: Evolutie Profiel 1 na drie jaar (XBeach model), boven: strand- en vooroeverprofiel 2013, onder: scenario Vlaamse Baaien

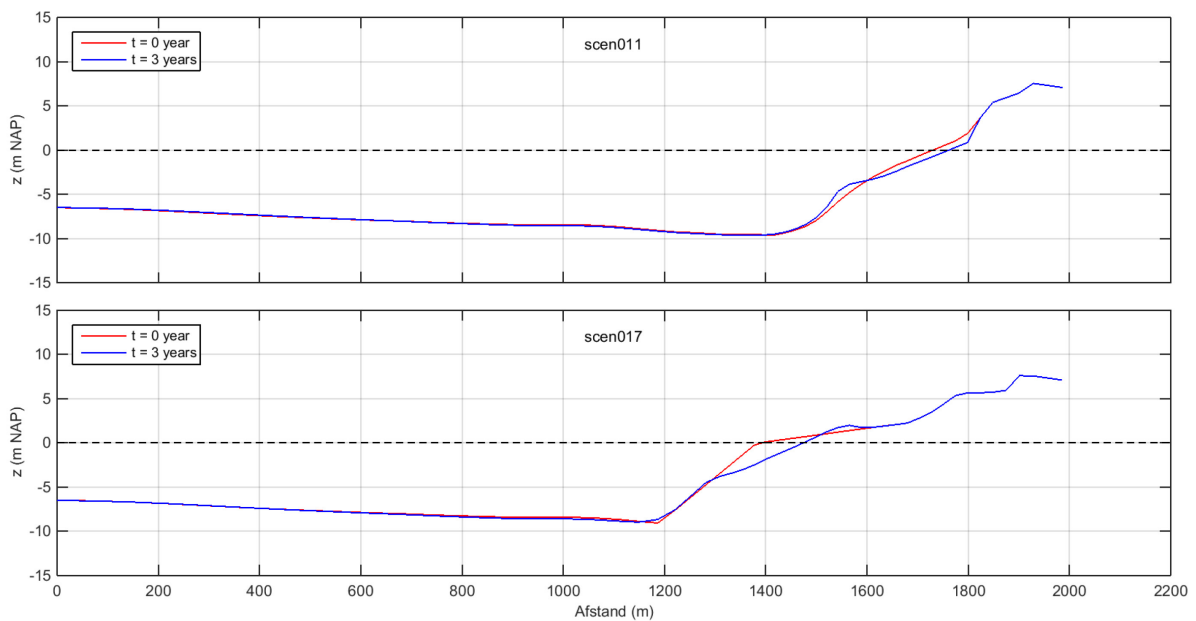


Figuur 92: Evolutie Profiel 2 na drie jaar (XBeach model), boven: strand- en vooroeverprofiel 2013, onder: scenario Vlaamse Baaien

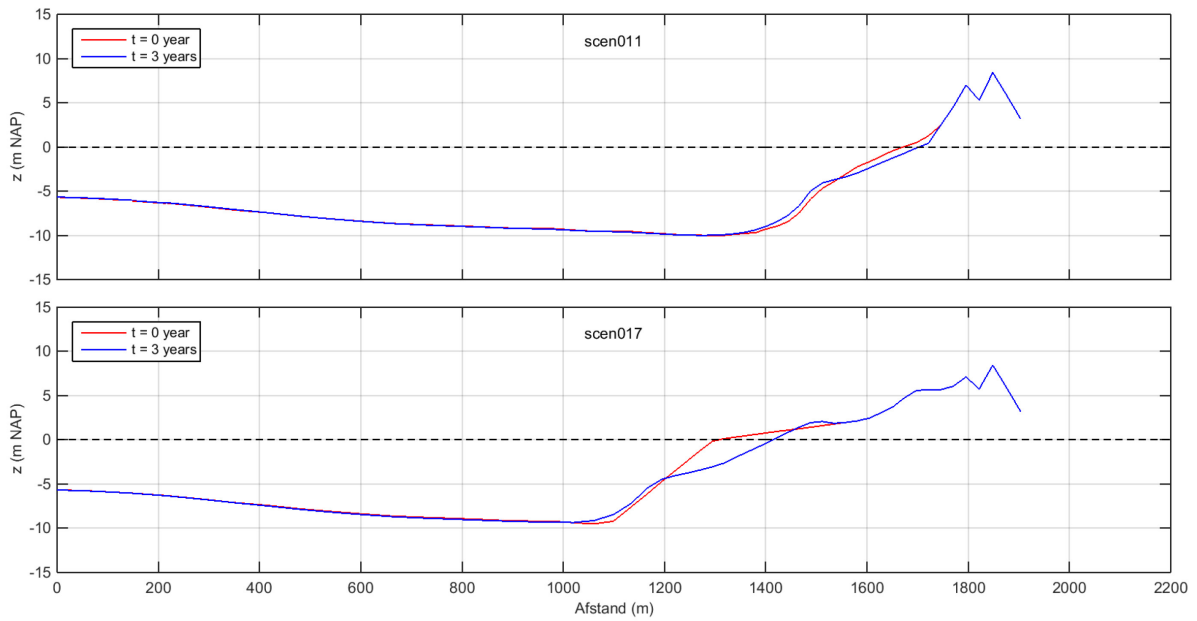




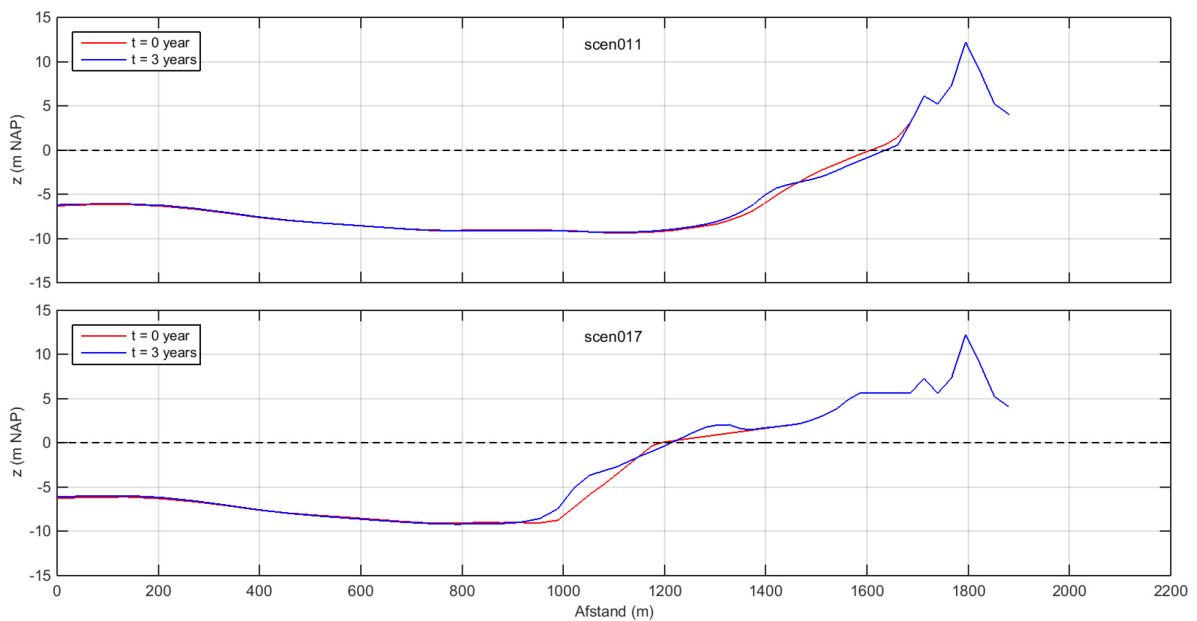
Figuur 93: Evolutie Profiel 3 na drie jaar (XBeach model), boven: strand- en vooroeverprofiel 2013, onder: scenario Vlaamse Baaien



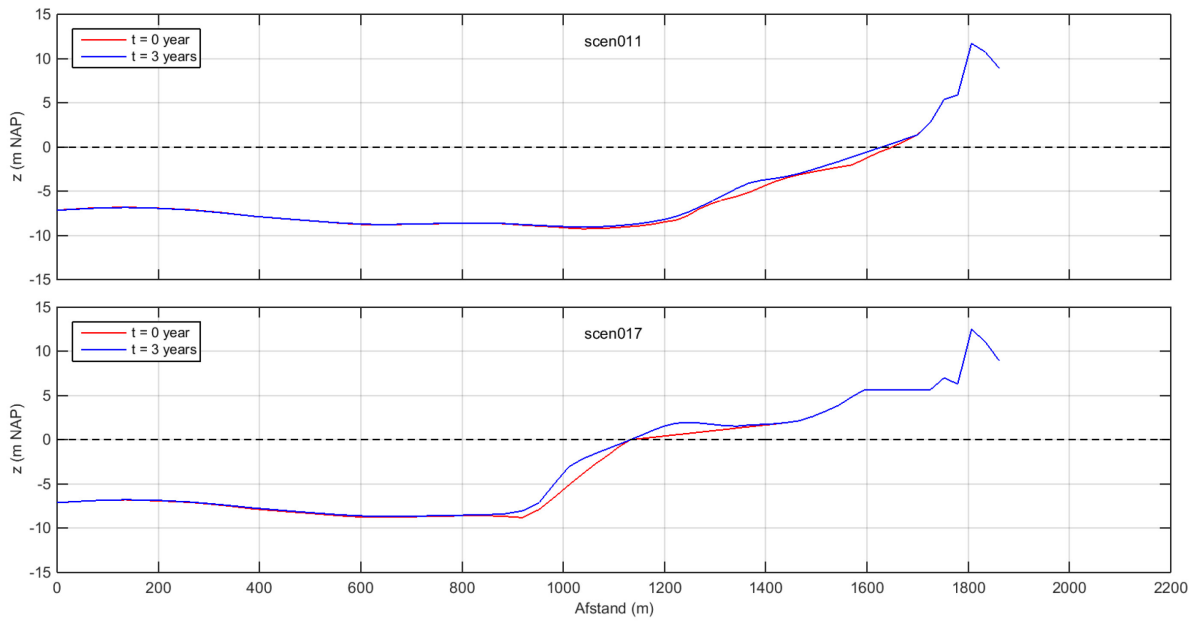
Figuur 94: Evolutie Profiel 4 na drie jaar (XBeach model), boven: strand- en vooroeverprofiel 2013, onder: scenario Vlaamse Baaien



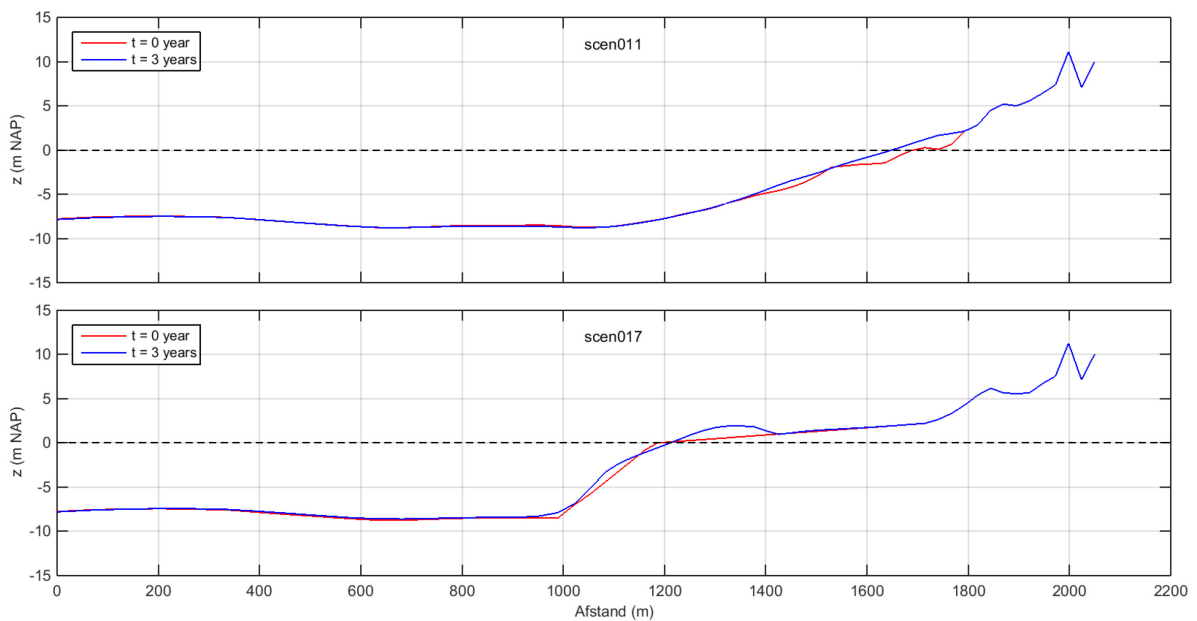
Figuur 95: Evolutie Profiel 5 na drie jaar (XBeach model), boven: strand- en vooroeverprofiel 2013, onder: scenario Vlaamse Baaien



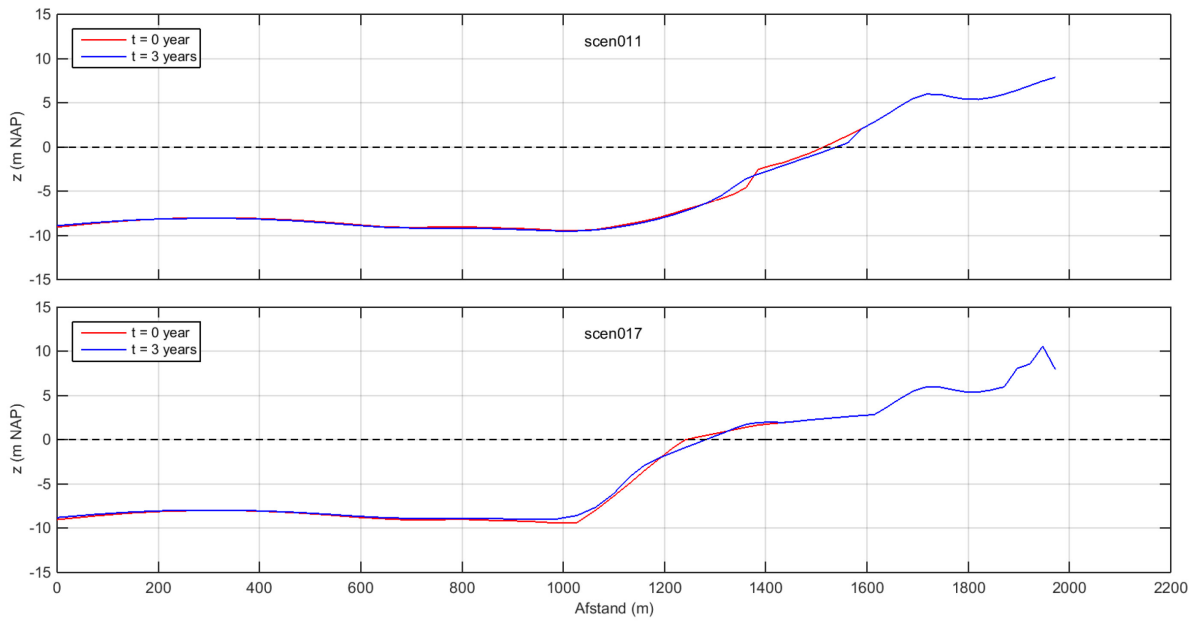
Figuur 96: Evolutie Profiel 6 na drie jaar (XBeach model), boven: strand- en vooroeverprofiel 2013, onder: scenario Vlaamse Baaien



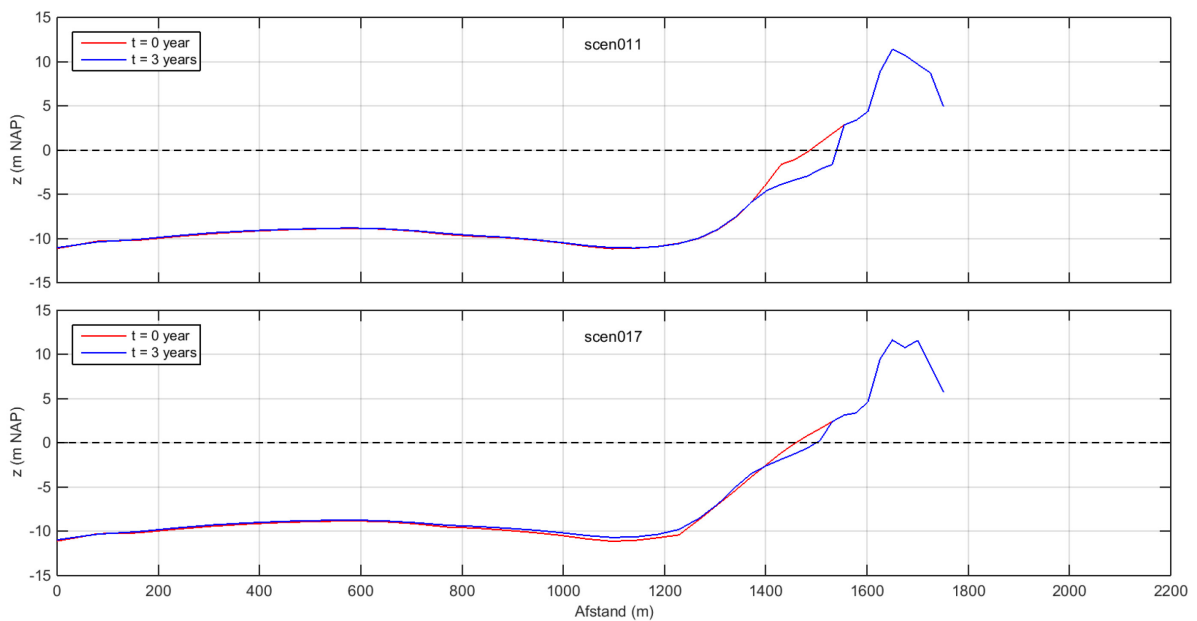
Figuur 97: Evolutie Profiel 7 na drie jaar (XBeach model), boven: strand- en vooroeverprofiel 2013, onder: scenario Vlaamse Baaien



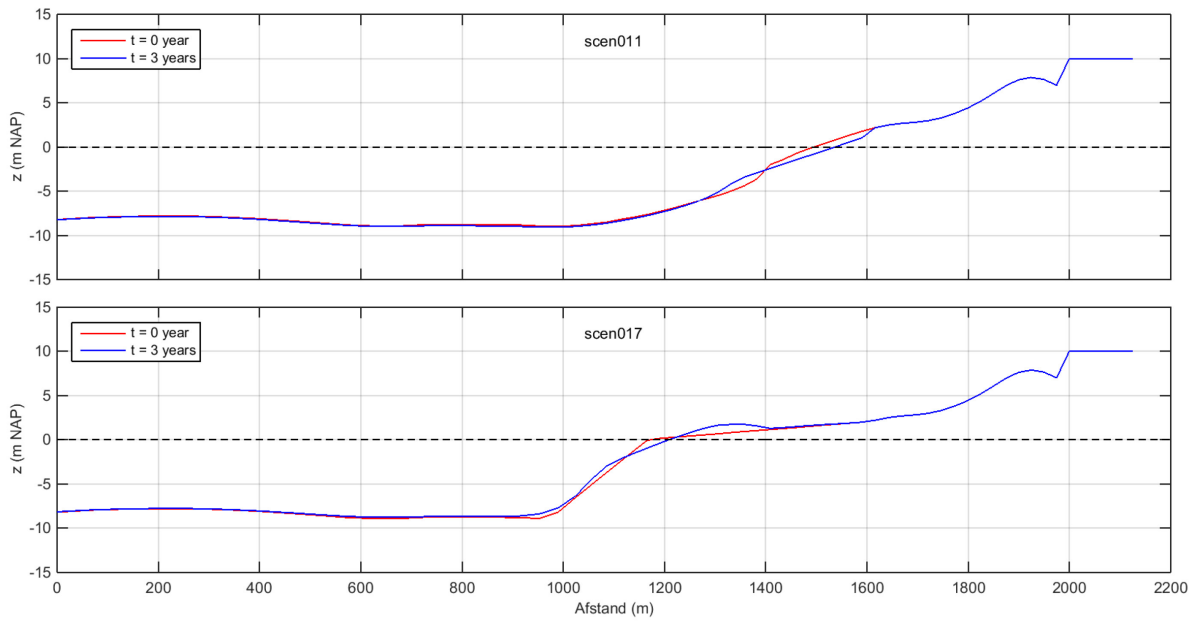
Figuur 98: Evolutie Profiel 8 na drie jaar (XBeach model), boven: strand- en vooroeverprofiel 2013, onder: scenario Vlaamse Baaien



Figuur 99: Evolutie Profiel 9 na drie jaar (XBeach model), boven: strand- en vooroeverprofiel 2013, onder: scenario Vlaamse Baaien

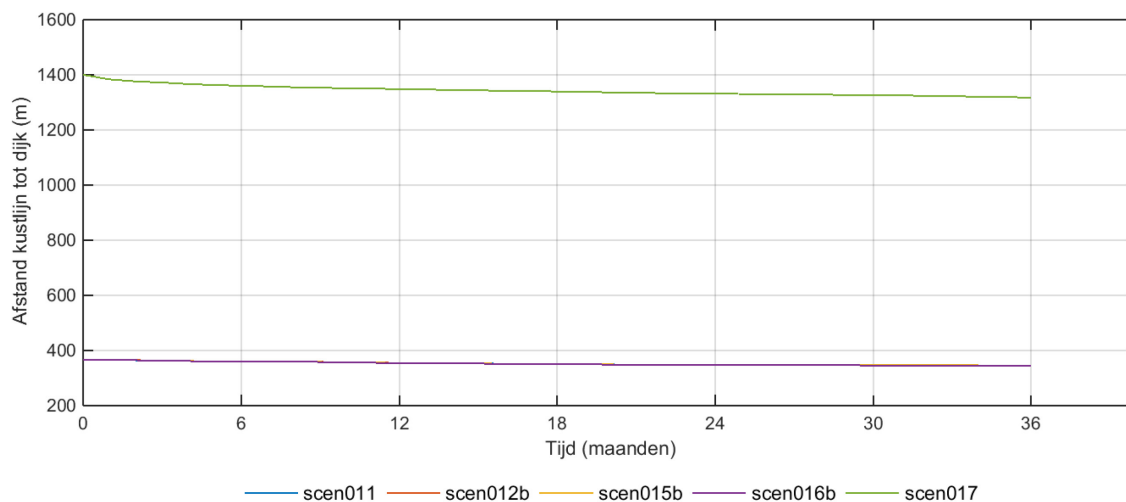


Figuur 100: Evolutie Profiel 10 na drie jaar (XBeach model), boven: strand- en vooroeverprofiel 2013, onder: scenario Vlaamse Baaien

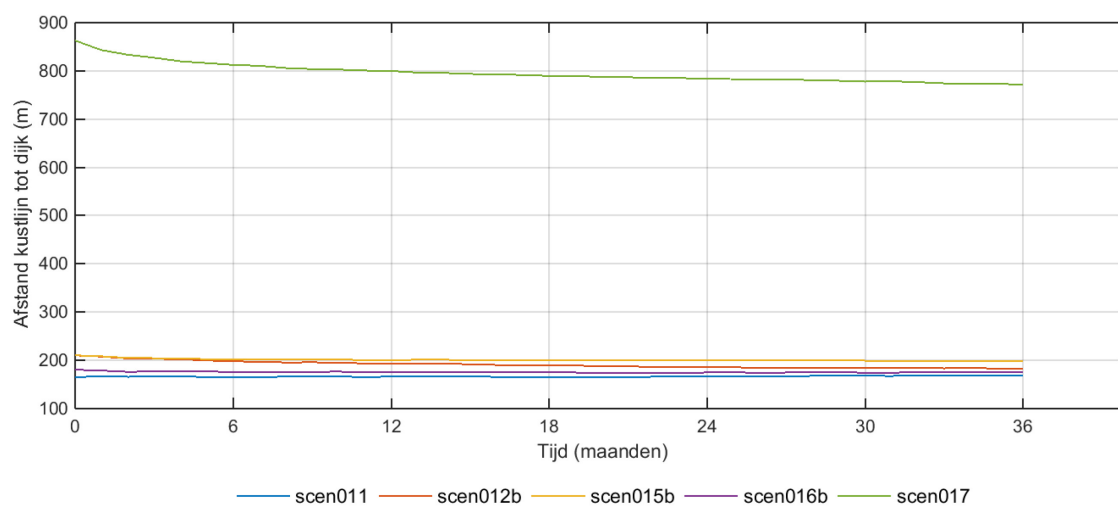


Figuur 101: Evolutie Profiel 11 na drie jaar (XBeach model), boven: strand- en vooroeverprofiel 2013, onder: scenario Vlaamse Baaien

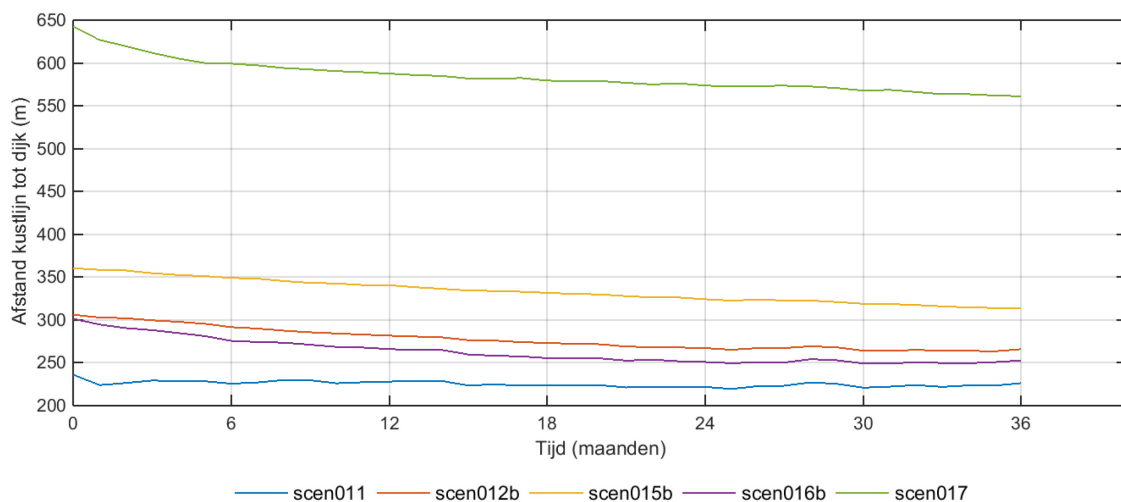
## Bijlage D: Evolutie van de waterlijn (XBeach model)



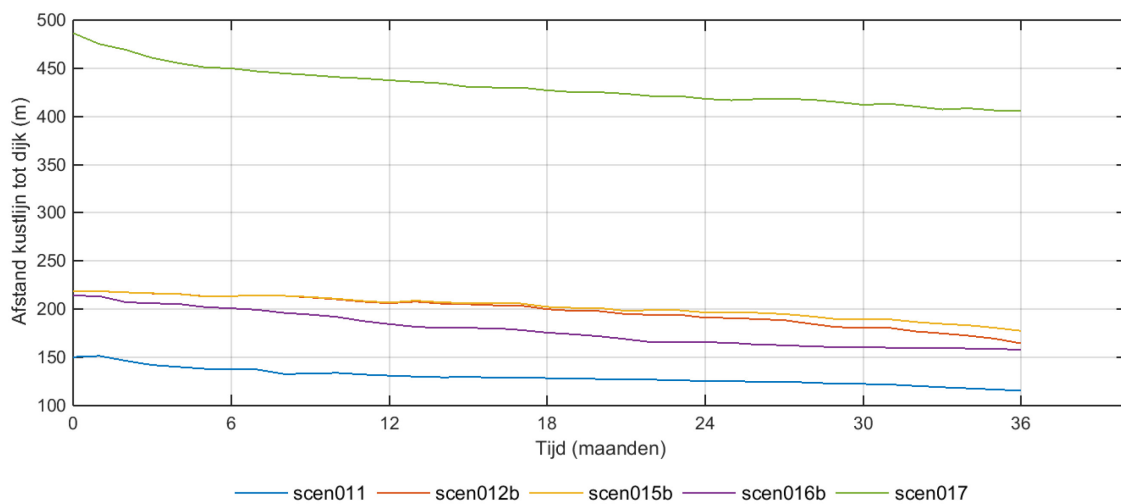
Figuur 102: Evolutie van de waterlijn voor Profiel 1. Huidige toestand: scen011, scenario strandverbreding Vlaamse Baaien: scen017



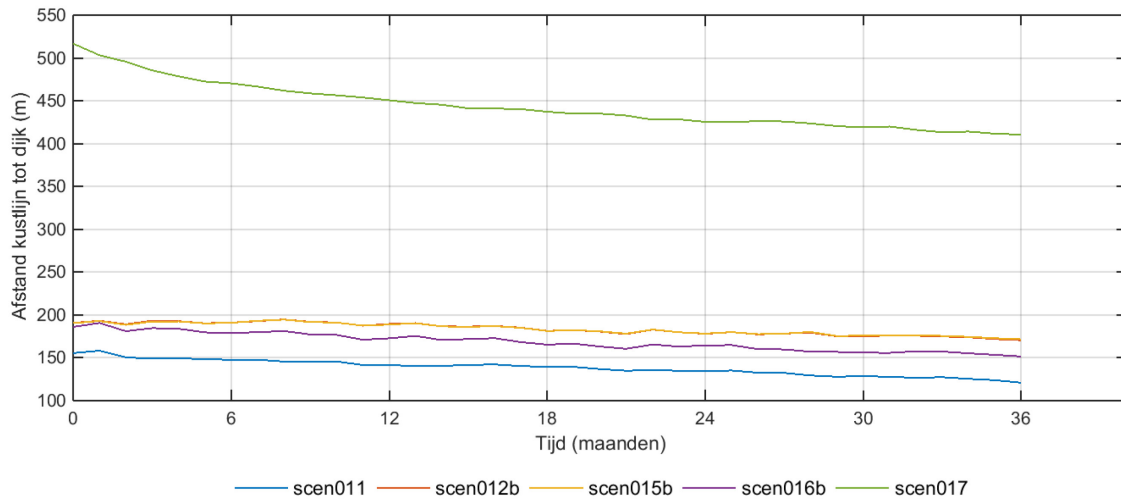
Figuur 103: Evolutie van de waterlijn voor Profiel 2. Huidige toestand: scen011, scenario strandverbreding Vlaamse Baaien: scen017



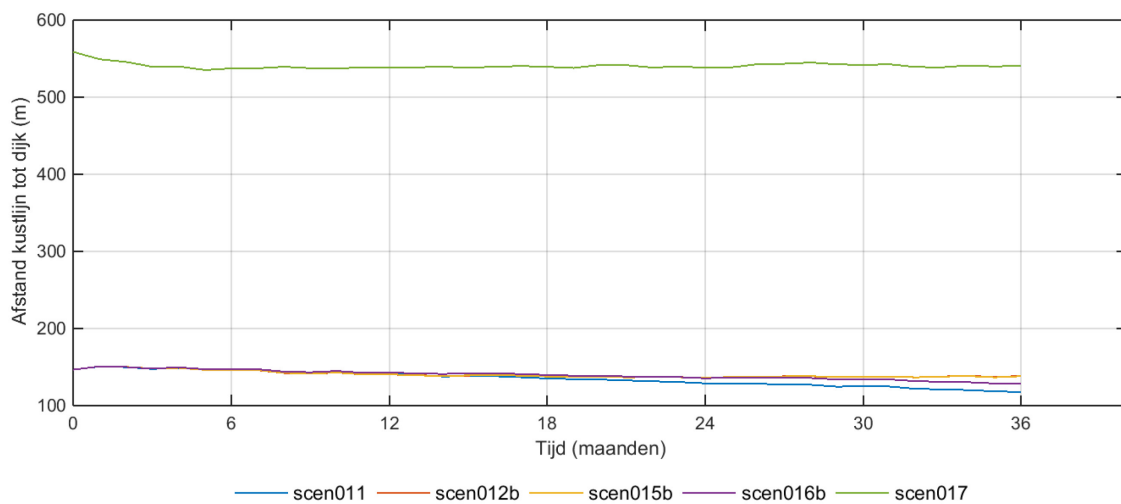
Figuur 104: Evolutie van de waterlijn voor Profiel 3. Huidige toestand: scen011, scenario strandverbreding Vlaamse Baaien: scen017



Figuur 105: Evolutie van de waterlijn voor Profiel 4. Huidige toestand: scen011, scenario strandverbreding Vlaamse Baaien: scen017

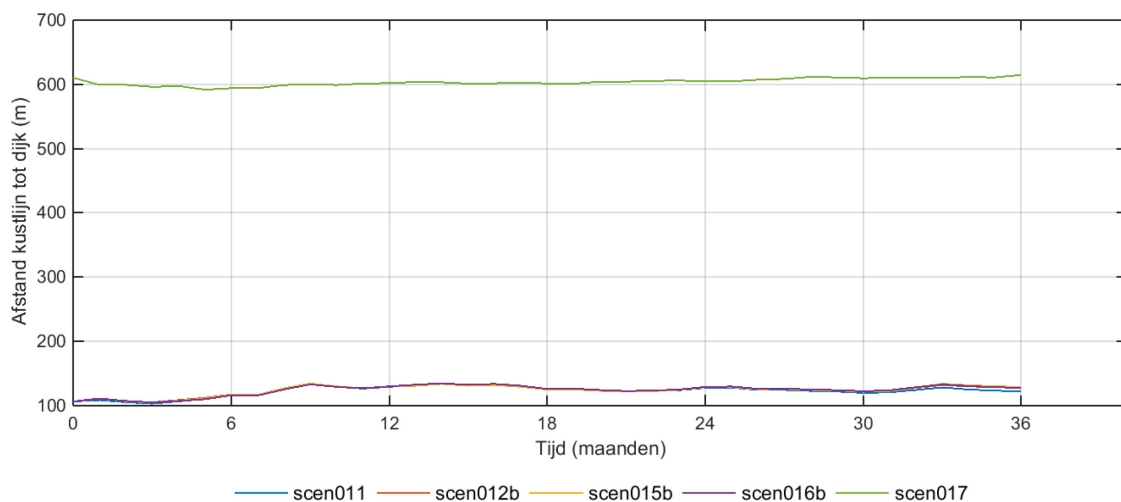


Figuur 106: Evolutie van de waterlijn voor Profiel 5. Huidige toestand: scen011, scenario strandverbreding Vlaamse Baaien: scen017

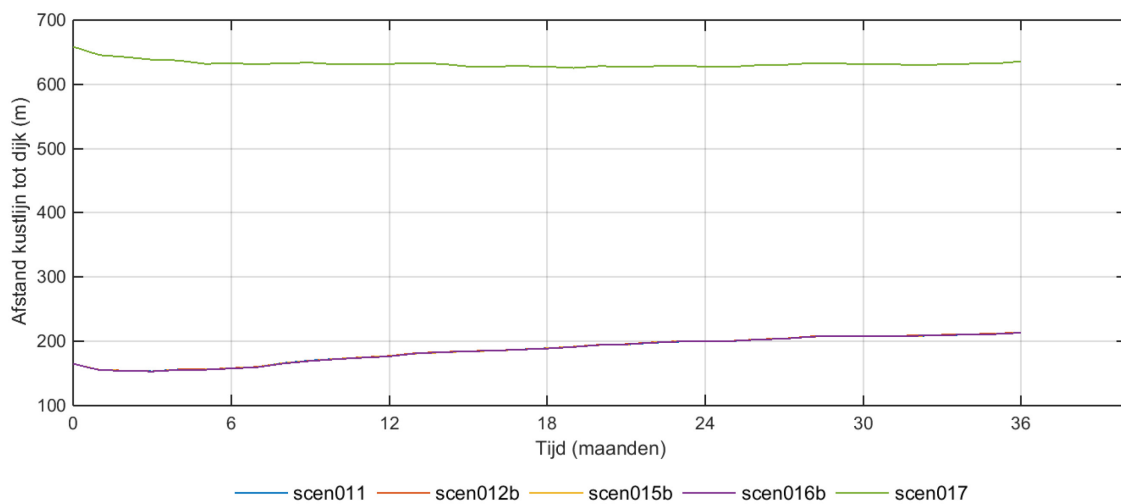


Figuur 107: Evolutie van de waterlijn voor Profiel 6. Huidige toestand: scen011, scenario strandverbreding Vlaamse Baaien: scen017

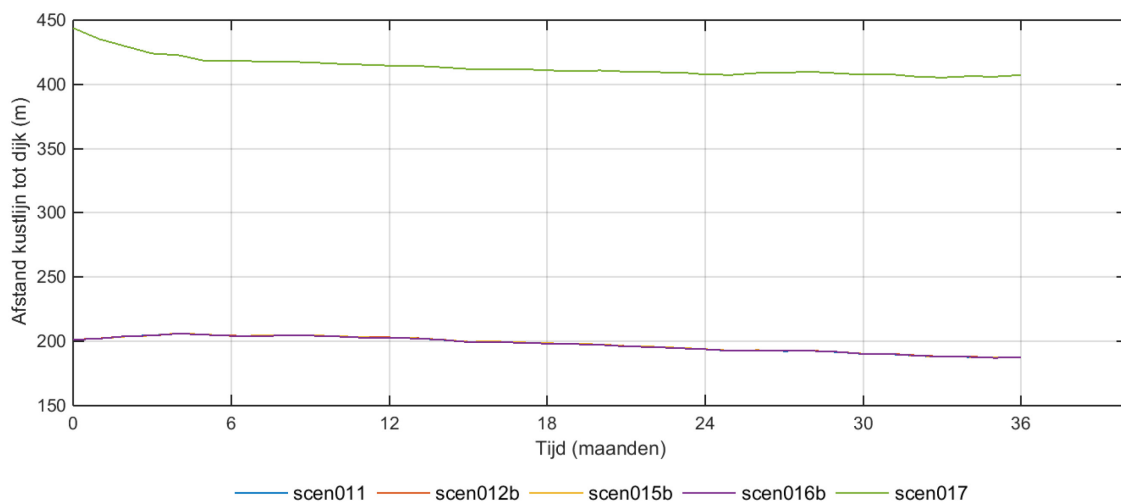




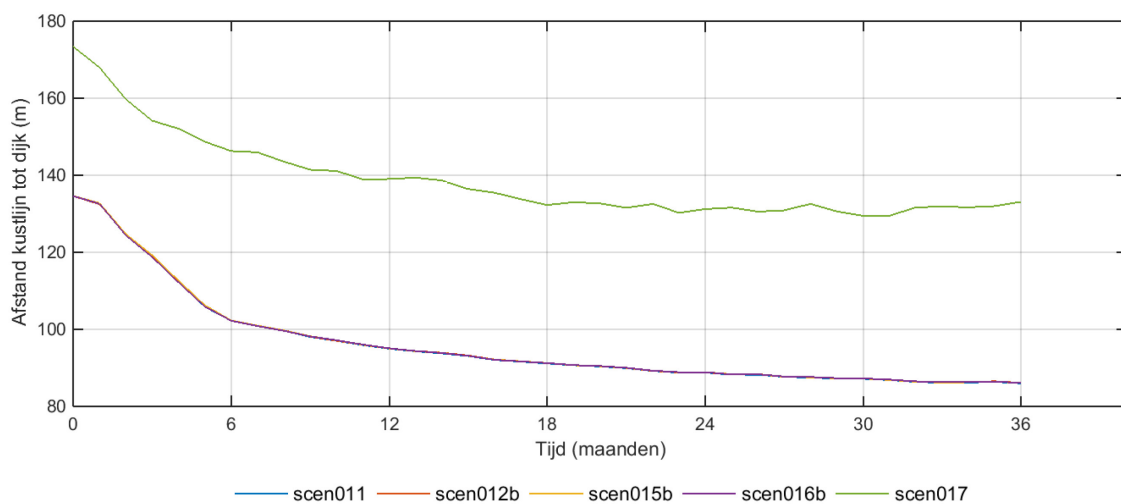
Figuur 108: Evolutie van de waterlijn voor Profiel 7. Huidige toestand: scen011, scenario strandverbreding Vlaamse Baaien: scen017



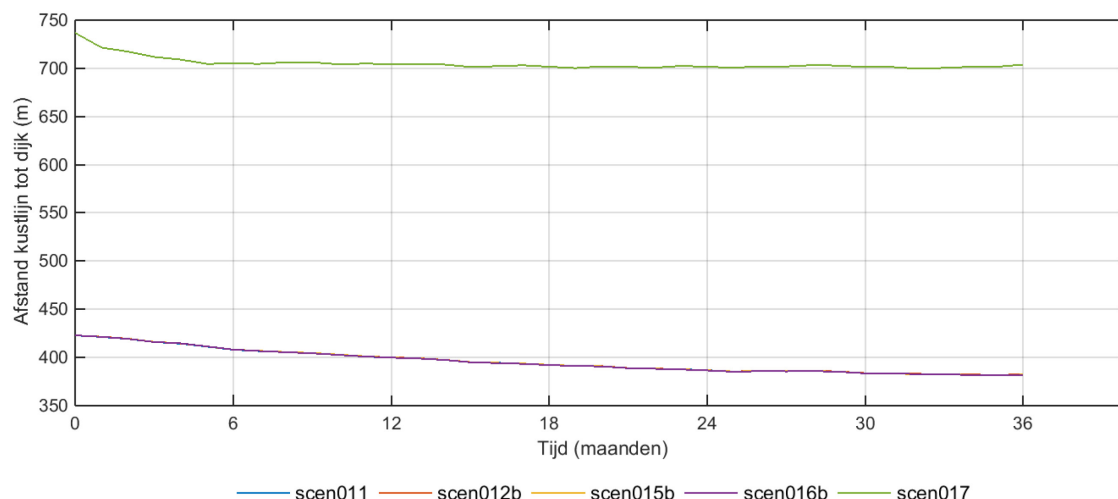
Figuur 109: Evolutie van de waterlijn voor Profiel 8. Huidige toestand: scen011, scenario strandverbreding Vlaamse Baaien: scen017



Figuur 110: Evolutie van de waterlijn voor Profiel 9. Huidige toestand: scen011, scenario strandverbreding Vlaamse Baaien: scen017



Figuur 111: Evolutie van de waterlijn voor Profiel 10. Huidige toestand: scen011, scenario strandverbreding Vlaamse Baaien: scen017



Figuur 112: Evolutie van de waterlijn voor Profiel Zwin. Huidige toestand: scen011, scenario strandverbreding Vlaamse Baaien: scen017

Tabel 10: Evolutie strandbreedte (positie 0mNAP) in m/jaar gedurende het **eerste jaar** van de simulatie (negatief is landwaarts); scen011: huidig strand, scen017: strandverbreding Vlaamse Baaien, overige scenario's: reguliere suppleties (zie Bijlage B).

Profiel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Zwin
scen011	-12.23	1.14	-8.12	-19.3	-14.16	-5.85	22.78	11.96	1.28	-39.68	-23.1
scen012b	-12.19	-16.66	-24.4	-12.56	-1.26	-6.26	23.39	12.32	1.77	-39.58	-22.77
scen015b	-12.31	-9.44	-19.8	-11.89	-1.72	-6.15	23.29	11.87	1.36	-39.6	-22.98
scen016b	-12.54	-4.29	-35.46	-29.57	-13.3	-3.91	23.45	11.51	1.24	-39.56	-23.09
scen017	-51.45	-63.05	-55.06	-48.97	-66.14	-20.4	-8.35	-26.65	-29.23	-34.39	-32.29

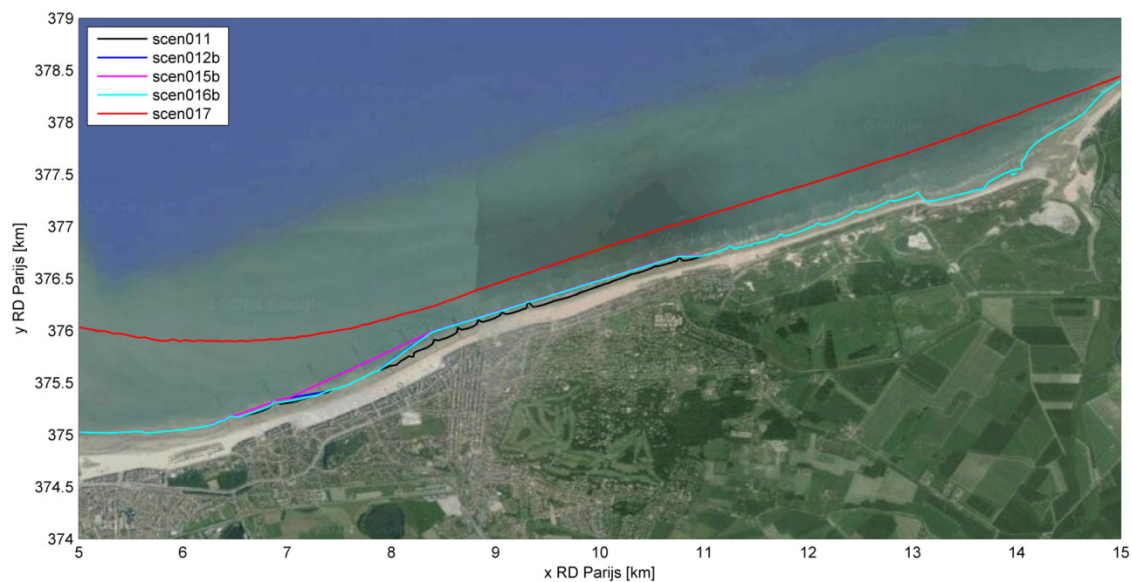
Tabel 11: Evolutie strandbreedte (positie 0mNAP) in m/jaar gedurende het **laatste jaar** van de simulatie (negatief is landwaarts); scen011: huidig strand, scen017: strandverbreding Vlaamse Baaien, overige scenario's: reguliere suppleties (zie Bijlage B).

Profiel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Zwin
scen011	-3.98	1.94	4.52	-9.8	-13.29	-11.27	-5.8	13.6	-6.23	-2.8	-4.44
scen012b	-3.21	-2.53	-1.22	-26.68	-7.54	2.43	-0.32	13.83	-6.12	-2.74	-4.24
scen015b	-3.21	-2.36	-10.39	-19.05	-6.69	2.32	0.37	13.33	-6.38	-2.85	-4.47
scen016b	-3.85	0.09	1.82	-7.87	-12.95	-7.25	-1.3	13.35	-6.29	-2.81	-4.44
scen017	-14.15	-12	-12.48	-12.18	-14.81	2.94	10.16	8.15	-0.35	1.88	2.3

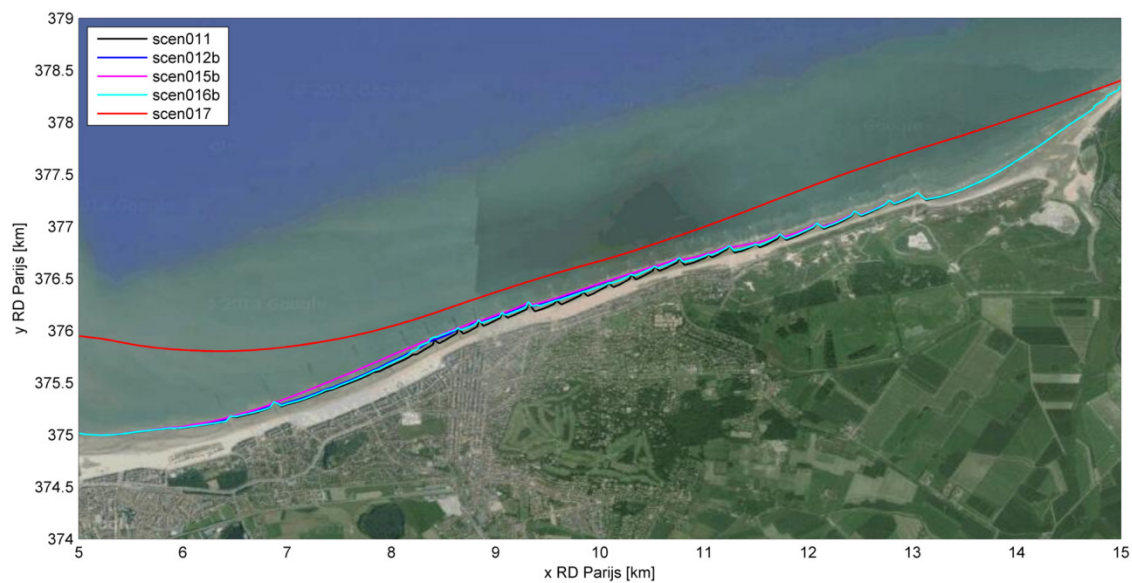
Tabel 12: Evolutie strandbreedte (positie 0mNAP) in m/jaar **gemiddeld over 3 jaar simulatie** (negatief is landwaarts); scen011: huidig strand, scen017: strandverbreding Vlaamse Baaien, overige scenario's: reguliere suppleties (zie Bijlage B).

Profiel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Zwin
scen011	-7.71	1.11	-3.28	-11.64	-11.52	-9.66	5.06	16.15	-4.56	-16.22	-13.54
scen012b	-7.49	-8.98	-13.38	-18.1	-6.76	-2.76	7.3	16.35	-4.51	-16.18	-13.48
scen015b	-7.41	-4.05	-15.54	-13.75	-6.3	-2.81	7.41	16.13	-4.59	-16.2	-13.58
scen016b	-7.71	-1.88	-16.21	-18.76	-11.5	-6.13	7.08	16.13	-4.58	-16.19	-13.61
scen017	-27.61	-30.29	-27.17	-26.81	-35.43	-5.94	1.5	-7.58	-12.17	-13.43	-10.94

## Bijlage E: Positie waterlijn initieel en na 3 jaar

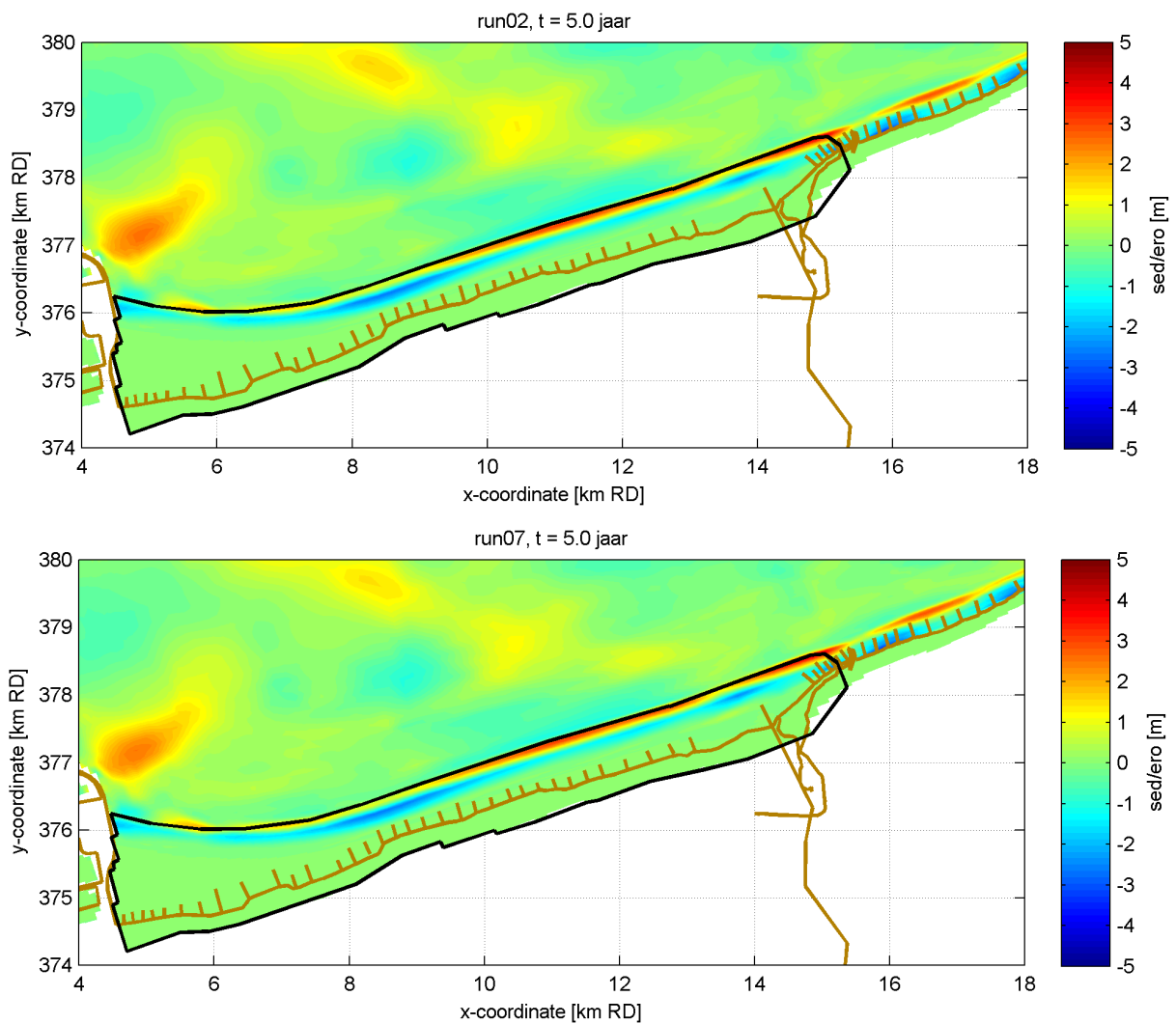


Figuur 113: Waterlijn (0 m NAP) voor de verschillende scenario's bij aanvang van de simulatie (t=0)



Figuur 114: Waterlijn (0 m NAP) voor de verschillende scenario's na drie jaar simulatie (XBeach Knokke model)

## Bijlage F: Effect van MorFac op door N2V model berekende morfologische verandering



Figuur 115: Sedimentatie- en erosiepatronen na 5 jaar met strandverbreding en een morfologische versnellingsfactor van 125.1 (run02, bovenste figuur) en 62.55 (run07, onderste figuur). De zwarte lijn is de omhulling van de strandverbreding.



**Waterbouwkundig Laboratorium**

*Flanders Hydraulics Research*

Berchemlei 115

B-2140 Antwerpen

Tel. +32 (0)3 224 60 35

Fax +32 (0)3 224 60 36

E-mail: [waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be](mailto:waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be)

[www.waterbouwkundiglaboratorium.be](http://www.waterbouwkundiglaboratorium.be)