



Vlaanderen
is wetenschap



15_068_2
WL rapporten

Modelleren **Belgische Kustzone en Scheldemonding**

Deelrapport 2
Morfologische analyse scenario's Vlaamse Baaien

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Modellering Belgische Kustzone en Scheldemonding

Deelrapport 2 – Morfologische analyse scenario's Vlaamse Baaien

De Maerschalck, B.; van der Werf, J.; Kolokythas, G.; Quataert, E.; Van Oyen, T.; Vroom, J.; Dijkstra, J.; Wang, Z.B.; Vanlede, J.;
Verwaest, T.; Mostaert, F.

Juridische kennisgeving

Het Waterbouwkundig Laboratorium is van mening dat de informatie en standpunten in dit rapport onderbouwd worden door de op het moment van schrijven beschikbare gegevens en kennis.

De standpunten in deze publicatie zijn deze van het Waterbouwkundig Laboratorium en geven niet noodzakelijk de mening weer van de Vlaamse overheid of één van haar instellingen.

Het Waterbouwkundig Laboratorium noch iedere persoon of bedrijf optredend namens het Waterbouwkundig Laboratorium is aansprakelijk voor het gebruik dat gemaakt wordt van de informatie uit dit rapport of voor verlies of schade die eruit voortvloeit.

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2017
D/2017/3241/90

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

De Maerschalc, B.; van der Werf, J.; Kolokythas, G.; Quataert, E.; Van Oyen, T.; Vroom, J.; Dijkstra, J.; Wang, Z.B.; Vanlede, J.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2017). Modellerings Belgische Kustzone en Scheldemonding: Deelrapport 2 – Morfologische analyse scenario's Vlaamse Baaien. Versie 4.0. WL Rapporten, 15_068_2. Waterbouwkundig Laboratorium & Deltares, Antwerpen.

Deltares referentie: 1210301-010-ZKS-0003

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

Documentidentificatie

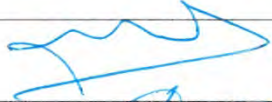
Opdrachtgever:	Vlaams Nederlands Scheldecocomissie (VNSC)	Ref.:	WL2017R15_068_2
Keywords (3-5):	Vlaamse Baaien, morfologie, kust		
Tekst (p.):	107	Bijlagen (p.):	36
Vertrouwelijk:	☒ Nee	☒ Online beschikbaar	

Auteur(s):	De Maerschalc, B.; van der Werf, J.; Kolokythas, G.; Quataert, E.; Van Oyen, T.; Vroom, J.; Dijkstra, J.
------------	--

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Vanlede, J.; Wang, Z.B.; van der Werf, J.	
Projectleider:	De Maerschalc, B.	

Goedkeuring

Coördinator onderzoeksgroep:	Verwaest, T.	
Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	

Samenvatting

In het kader van Vlaamse Baaien wordt ten oosten van Zeebrugge tot de Nederlandse grens de aanleg van een aantal kunstmatige eilanden voorgesteld. Op basis van een hydrodynamische studie (De Maerschallck et al., 2016) werd een aantal potentiële scenario's weerhouden. Het effect van de ingreep op de nautische toegankelijkheid voor estuaire vaart werd verder geanalyseerd door de afdeling Maritieme Techniek van Universiteit Gent (Van Zwijsvoorde en Vantorre, 2016a-2016b).

Het op basis van bovenvermelde studies meest potentiële scenario met betrekking tot nautische toegankelijkheid (scenario E3) bestaat uit één langgerekt eiland voor de kust van Knokke in combinatie met een geleiddam in de doorgang tussen het eiland en de oostelijke havendam en Zeebrugge. Het scenario voorziet eveneens in een substantiële uitbereiding van het huidige strand van Heist tot de Nederlandse grens. In een variant op dit scenario werd het eiland en de dam verlaagd tot net onder de laagwaterlijn (scenario E4). Ook de stromingen langs een eerste ontwerp van een pilooteiland op de ondiepte van de Paardemarkt voor de kust van Knokke werd reeds berekend.

In voorliggende studie wordt de morfologische evolutie van deze scenario's verder onderzocht, alsook het effect op aanslibbing. Hiervoor zijn verschillende modellen ingezet: het XBeach Knokke-model, het Delft3D ZWeM en het Nieuwpoort-Vlissingen model. De modelresultaten werden ter beoordeling voorgelegd aan een Vlaamse-Nederlandse commissie van experts.

De verschillende modellen voorspellen erosie van de toppen van de eilanden, de erosiesnelheid verschilt van model tot model. De modellen tonen ook een duidelijke erosie in de openingen tussen de oostelijke dam van Zeebrugge en het eiland. De noordelijke zijde van het eiland is onderhevig aan de golfwerking met een verandering van het strandprofiel tot gevolg en litoraal transport in oostelijke richting. Ten zuidoosten van het eiland wordt sedimentatie waargenomen. Vooral in het Nieuwpoort-Vlissingen model is dit waarneembaar.

Door de afschermende werking van het eiland in scenario E3 neemt het litoraal transport langsheen de stranden van Knokke-Heist tot Cadzand sterk af. De stranden zijn op die manier minder gevoelig voor erosie maar de zuidzijde van de geul is wel gevoeliger voor aanslibbing. De bodemschuifspanning in de geul direct achter de ingrepen blijft voldoende hoog om grootschalige aanslibbing in deze geul te voorkomen. Op basis van de opgestelde Escoffier curve heeft dit scenario een positief effect op de stabiliteit van het Zwin.

Het overstroombaar eiland (scenario E4) kent vooral een afvlakking van het strand aan noordelijke zijde. Omdat er ook transport over de kruin van het eiland heen kan plaatsvinden, treedt er sedimentatie op langs zuidelijke (lij)zijde. Het eiland migreert op die manier richting kust. De afschermende werking van het overstroombaar eiland voor de kustlijn tussen Zeebrugge in Cadzand resulteert lokaal in een verlaging van het langstransport in de brandingszone tussen Knokke en het Zwin. Het effect is echter minder uitgesproken dan in scenario E3. Bovendien voorziet het scenario ook in een significante stranduitbreiding waardoor de bestaande strandhoofden bedekt worden en hun beschermende werking verliezen. Hierdoor neemt in het scenario E4 lokaal het langstransport zelfs nog toe tussen Heist en Knokke.

Het pilooteiland (scenario H1) is onderhevig aan erosie. Het pilooteiland migreert in oost, noordoostelijke richting. Het gebied tussen het eiland en het strand erodeert. Dit sediment komt grotendeels direct ten oosten hiervan terecht. Het ZWeM zand-slib model geeft naast aanslibbing ten oosten van het eiland en vóór het Zwin ook een duidelijke sedimentatietrend ter hoogte van de munitiestortplaats. Door de toegenomen getijstrooming tussen het eiland en de huidige kust neemt het langstransport lokaal sterk toe. Het effect op de kustlijn is zeer lokaal met afwisselend zones van erosie en sedimentatie. Ter hoogte van het Zwin is het langstransport lager dan in de huidige situatie. De verschillende modellen tonen echter wel een sterke convergentiezone in het gebied ten Noorden van het Zwin. In deze zone treedt sedimentatie op.

Deze sedimentatie wordt niet meegenomen in de methode van Escoffier. Op basis van de huidige modellen is het niet te voorspellen of deze sedimentatie effect zal hebben op het Zwin.

In het huidige onderzoek werd het effect van zeespiegelstijging tot dusver niet in rekening gebracht. Dit is een aandachtspunt voor verder onderzoek. Ook het effect van een individueel extreem event is nog niet in detail onderzocht. Er dient ook opgemerkt te worden dat het ontwerp van het pilooteiland nog voor verbetering vatbaar is. Onder het huidige ontwerp gedraagt het pilooteiland zich morfologisch anders dan de overige scenario's. In het toegankelijkheidsonderzoek werd tot op heden vooral gefocust op het golfklimaat langsheen het vaartraject voor estuaire vaart. Het is aangewezen om ook op basis van de stromingen de nautische toegankelijkheid verder te onderzoeken.

Inhoudstafel

Samenvatting.....	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VIII
Lijst van de figuren	IX
1 Inleiding	1
1.1 Vlaamse Baaien	1
1.2 Methodiek	2
1.3 Beschrijving van de scenario's.....	3
1.3.1 Scenario E3: Vlaamse Baaien Eilanden en strandverbreding	3
1.3.2 Scenario E4: Overstroombaar eiland.....	5
1.3.3 Scenario H1: Piloot eiland.....	6
1.4 Leeswijzer	6
2 Systeembeschrijving.....	7
2.1 Zeebrugge – Westerscheldemonding.....	7
2.2 Zeebrugge – Zwin	9
2.2.1 Baai van Heist	11
2.2.2 Knokke-Zoute en Appelzak	13
2.3 Zwin- Zwarte Polder	14
2.4 Het Zwin.....	19
2.4.1 Situering.....	19
2.4.2 Morfologie	19
2.4.3 Stabiliteit.....	23
2.4.4 Uitbreidingsplannen	23
2.5 Paardenmarkt	24
2.5.1 Situering.....	24
2.5.2 Morfologische ontwikkeling	26
2.5.3 Sedimentsamenstelling	28
2.5.4 Discussie	31
3 Modellering	32
3.1 ZWeM zand-slib	32
3.1.1 Modelbeschrijving	32

3.1.2	Residuele stroomsnelheden	33
3.1.3	Slibconcentraties en transporten richting Westerschelde	36
3.1.4	Verandering samenstelling bodem en flufflaag	38
3.2	ZWeM zand model	46
3.2.1	Modelbeschrijving	46
3.2.2	Uitgevoerde simulaties	47
3.2.3	Zandtransporten	47
3.2.4	Morfologie	48
3.2.5	Belang 3D effecten	51
3.2.6	Effect korrelgrootte en instellingen transportmodel	52
3.3	XBeach Knokke model	54
3.3.1	Modelbeschrijving	54
3.3.2	Scenario E3 – Eiland en dam	57
3.3.3	Scenario E4 – Onderwatereiland	61
3.3.4	Scenario H1 – Piloot eiland	64
3.3.5	Comparison between scenarios and present situation	68
3.3.6	Discussion about avalanche effect on erosion of islands	77
3.4	Nieuwpoort-Vlissingen model	79
3.4.1	Modelbeschrijving	79
3.4.2	Stroomsnelheden	80
3.4.3	Zandtransporten	81
3.4.4	Morfologische ontwikkeling	83
3.4.5	Dwarsprofielen	88
3.4.6	Gevoeligheid D50	91
3.4.7	Gevoeligheid droge cel erosie	93
3.4.8	Vergelijking met ZWeM zand en XBeach model	95
3.5	Modellerings effecten Zwin: Escoffier curve	95
4	Discussie	100
4.1	Slibdynamiek	100
4.2	Lange-termijn ontwikkeling eilanden en geul	100
5	Conclusies en aanbevelingen	102
5.1	Paardenmarkt	102
5.2	Scenario's Vlaamse Baaien	102
5.3	Aanbevelingen	103
	Referenties	106

Bijlage A: Expertmeeting 29/6/2016	B1
Bijlage B: Beschrijving ZWeM-DD inclusief representatieve golven en wind ZWeM-DD.....	B2
Bijlage C: Vergelijking gemodelleerde en waargenomen erosie en sedimentatietrends XBeach model	B6
Bijlage D: Dwarsprofielen XBeach	B8
Bijlage E: Dwarsprofielen N2V model.....	B20
Bijlage F: Sediment transport formulering XBeach en Delft3D	B32
XBeach	B32
Advection-diffusion equation	B32
Effects of wave nonlinearity & bed slope.....	B33
Avalanching	B33
Boundary conditions.....	B33
Delft3D.....	B34
Introduction.....	B34
Suspended sediment transport	B34
Initial and Boundary conditions.....	B34
Bed load sediment transport.....	B35
Bed slope effects	B35
Discussion	B36

Lijst van de tabellen

Tabel 1: Overzicht modellen.....	3
Tabel 2: Samenvatting morfologische veranderingen 1965 – 2011, zoals weergegeven in Figuur 7	8
Tabel 3: Ontwikkeling zandvolumes op basis van vaklodingen (periode 1965-2011) en LiDAR-metingen (periode 1997-2011).....	17
Tabel 4: Overzicht belangrijke instellingen transport model ZWeM en N2V model.....	47
Tabel 5: Golf- en windklimaat N2V model voor lange-termijn morfologische berekeningen (Wang et al., 2015).....	55
Tabel 6: Overzicht van de belangrijkste kalibratieparameters van het XBeach model.....	57
Tabel 7: Evolutie strandbreedte (positie 0m NAP) in m/jaar gedurende het eerste en laatste jaar van de simulatie	77
Tabel 8: overzicht van de waardes van de input parameters.	97
Tabel 9: Samenvatting impact van de ingrepen.	104
Tabel 10: Vergelijking maandelijks golfklimaat met jaarklimaat.....	B3
Tabel 11: Vergelijking maandelijks windklimaat met jaarklimaat.	B4
Tabel 12: XBeach Knokke model: Gemeten en gemodelleerde sedimentatietrends	B6

Lijst van de figuren

Figuur 1: Masterplan Vlaamse Baaien zoals voorgesteld door minister Crevits op 26 november 2014.	2
Figuur 2: Ontwerp Eilandenden Vlaamse Baaien (scenario E3).	4
Figuur 3: Toegang Zeebrugge voor estuaire vaart, scenario E3.	4
Figuur 4: Vlaamse Baaien scenario E4 - overstroombaar eiland (kruinhoogte 0mLAT).....	5
Figuur 5: Vlaamse Baaien Scenario H1 – Pilot eiland, kruinhoogte +2,5 m NAP.....	6
Figuur 6: Huidige configuratie van geulen en platen in de Westerscheldemonding. Bathymetrie gebaseerd op vaklodingen uit 2011.	7
Figuur 7: Verschilkaart 1965 - 2011 met de belangrijkste morfologische veranderingen in deze periode.	8
Figuur 8: Erosie/sedimentatie trend Zeebrugge – Knokke (Janssens et al, 2013)	9
Figuur 9: Erosie/sedimentatie trend Knokke– Cadzand (Janssens et al, 2013).....	10
Figuur 10: Erosie en sedimentatie rond Zeebrugge in de periode 1997 - 2010 (Janssens et al, 2013).	11
Figuur 11: Sedimentbalans op basis van waargenomen trends in de periode 1986 tot 1997 voor stranden en vooroever tot 1500m offshore.	12
Figuur 12: Sedimentbalans op basis van waargenomen trends in de periode 1997 tot 2010 voor stranden en vooroever tot 1500 m offshore	12
Figuur 13: Evolutie van de Appelzak: Selectie van gemiddelde dwarsprofielen voor Knokke-Zoute (Trouw et al., 2015).....	13
Figuur 14: Evolutie van de positie van de Appelzak (Trouw et al., 2015)	14
Figuur 15: Maximale diepte van de Appelzak (Trouw et al., 2015).....	14
Figuur 16: Morfologische ontwikkeling voor de kust van Zeeuws-Vlaanderen tussen 1965 en 2011.....	15
Figuur 17: Jarkus-raaien langs de kust van Zeeuws-Vlaanderen met trends in kustlijnontwikkeling en onderverdeling in deeltrajecten.....	15
Figuur 18: Dwarsprofielen van de bodemligging in raai 1136 (oostelijk van Cadzand-Bad, ter hoogte van de Brabander) voor de periode 1965-2013.....	16
Figuur 19: Basiskustlijn (BKL), Momentane Kustlijn (MKL) en Te Toetsen Kustlijn (TKL) in raai 1450 aan de westkant van Cadzand-Bad.	17
Figuur 20: Totaal suppletievolumen per strekkende meter langs de kust voor de periode 1971-2013.....	18
Figuur 21: Aanleg van de strekdammen en de golfbrekers ten behoeve van de sluis en jachthaven nabij Cadzand.	18
Figuur 22: De historische ontwikkeling van het Zwin. Uit: Wilderom (1972).	19
Figuur 23: Het huidige Zwin.....	20
Figuur 24: Zwin, locatie van de noordelijke en zuidelijke zandvang.	20
Figuur 25: Vergelijking van de ligging van de kustlijn bij het Zwin in 1983, 1989 en 2011	22
Figuur 26: Voorbeeld van aangroei van strandruggen op het intertidale strand en zandtongen boven de hoogwaterlijn	22

Figuur 27: Artist impression van de geplande uitbreiding van het Zwin.....	24
Figuur 28: 2011 bodemligging in de nabijheid van de haven van Zeebrugge.	25
Figuur 29: Stortvolumes stortvak Zeebrugge-Oost in de periode 1984-2014.....	25
Figuur 30: Bodemligging Paardenmarkt en omgeving in 1970. Bruine polygonen: vaarpassen en stortvak Zeebrugge-Oost.	26
Figuur 31: Bodemligging Paardenmarkt en omgeving in 2011.	27
Figuur 32: Verschilbodem Paardenmarkt en omgeving, 2011-1970.....	27
Figuur 33: Volumeverandering (relatief t.o.v. 1970) erosiekuil Zeebrugge en Paardenmarkt.	28
Figuur 34: Kaart met D50 in interessegebied.....	29
Figuur 35: Percentage slib interessegebied.....	30
Figuur 36: Verdeling van cohesief sedimenten op het BCP.	31
Figuur 37: Residuele stroomsnelheden (m/s) in de huidige (referentie) situatie.	34
Figuur 38: Residuele dieptegemiddelde stroomsnelheden voor de onderzochte ingrepen. Van boven naar beneden: E3, E4, H1.	35
Figuur 39: Berekende bodemschuifspanning (Pa) voor variant met Holocene bron (en verlaagde ruwheid ter plaatse van bron) die gedurende de helft van de tijd overschreden wordt. Met de klok mee: referentie, scenario E3, H1 en E4.	36
Figuur 40: Berekende gemiddelde concentratie van fijn sediment (mg/l) in de oppervlaktelaag (variant met Holocene bron). Met de klok mee: referentie, scenario E3, H1 en E4.....	37
Figuur 41: Cumulatieve sedimenttransporten (alle fracties) over de maand mei, voor een doorsnede Wielingen – kust.	38
Figuur 42: Toe- (rode kleuren) of afname (blauwe kleuren) van de massa slib (variant met Holocene bron), in het referentiescenario, na 30 dagen.	39
Figuur 43: Toe- of afname van de massa slib na 30 dagen. Van boven naar beneden: verandering in massa voor E3, E4, en H1.	40
Figuur 44: Locaties van de observatiepunten ten opzichte van de ingrepen.	41
Figuur 45: Verandering in de massa slib (alle fracties) in de bodem (fluff + bodem) in de tijd.	41
Figuur 46: Toe- of afname van de massa slib (variant zonder Holocene bron), in het referentiescenario, na 30 dagen.	43
Figuur 47: Toe- of afname van de massa slib na 30 dagen. Van boven naar beneden: verandering in massa voor E3, E4, en H1 (.	44
Figuur 48: Verandering in de massa slib (alle fracties) in de bodem (flufflaag = bodem) in de tijd.....	45
Figuur 49: Gemiddelde zandtransporten in de referentiesituatie en Scenario's E3, E4 en H1 volgens 2D berekeningen.....	48
Figuur 50: Berekende morfologische ontwikkeling na 3 jaar voor de referentie, scenario E3 (eiland), E4 (overstroombaar eiland) en H1 (piloot).	49
Figuur 51: Berekende sedimentatie/erosie na 3 jaar voor de referentie, scenario E3 (eiland), E4 (overstroombaar eiland) en H1 (piloot).	50
Figuur 52: Berekende sedimentatie/erosie na 3 jaar voor de referentie, scenario E3 (eiland), E4 (overstroombaar eiland) en H1 (piloot) met het 3D model.	51

Figuur 53: Berekende sedimentatie/erosie na 3 jaar voor scenario E3 (eiland) en H1 (piloot) met het 2D ZWeM model met een D50 van 0,2 mm (linker figuren) en 0,3 mm (rechter figuren).....	52
Figuur 54: Berekende sedimentatie/erosie na 3 jaar voor scenario E3 (eiland) en H1 (piloot) met het 2D ZWeM model default (linker figuren) en N2V transportmodelinstellingen (rechter figuren).	53
Figuur 55: Initiële bathymetrie van het numeriek model. Niveau is in m NAP.....	54
Figuur 56: XBeach detailmodel Knokke.....	55
Figuur 57: Tijdreeks van golfcondities en getij.....	56
Figuur 58: Initiële bathymetrie van het numeriek model voor scenario E3. Niveau is in m NAP.	57
Figuur 59: Snelheden bij vloedstroom, scenario E3; zwarte lijn: 0m NAP na 3 jaar simulatie.....	58
Figuur 60: Snelheden bij ebstroom, scenario E3. zwarte lijn: 0m NAP na 3 jaar simulatie.....	58
Figuur 61: Gemodelleerd gemiddeld zandtransport (m^2/s) scenario E3 (volumes inclusief poriën); zwarte lijn: initiële 0m NAP lijn.	59
Figuur 62: Gemodelleerde bathymetrie na 3 (links) en 9 jaar (rechts).....	59
Figuur 63: Gemodelleerde sedimentatie- en erosiepatronen voor scenario E3 na 3 jaar simulatie (links) en na 9 jaar (rechts).....	60
Figuur 64: Evolutie van de waterlijn (0m NAP) scenario E3.	60
Figuur 65: Initiële bathymetrie van het numeriek model voor scenario E4. Niveau is in m NAP.	61
Figuur 66: Snelheden bij vloedstroom, scenario E4.	62
Figuur 67: Snelheden bij ebstroom, scenario E4. zwarte lijn: 0m NAP na 3 jaar simulatie.....	62
Figuur 68: Gemodelleerd gemiddeld zandtransport (m^2/s) scenario E4 (volumes inclusief poriën).	63
Figuur 69: Gemodelleerde bathymetrie na 3 (links) en 9 jaar (rechts).....	63
Figuur 70: Gemodelleerde sedimentatie- en erosiepatronen voor scenario E4 na 3 jaar (links) en 9 jaar (rechts) simulatie.....	63
Figuur 71: Evolutie van de waterlijn (0m NAP) scenario E4.	64
Figuur 72: Initiële bathymetrie van het numeriek model voor scenario H1. Niveau is in m NAP.....	65
Figuur 73: Snelheden bij vloedstroom, scenario H1.....	65
Figuur 74: Snelheden bij ebstroom, scenario H1. zwarte lijn: 0m NAP na 3 jaar simulatie.	66
Figuur 75: Gemodelleerd gemiddeld zandtransport (m^2/s) scenario H1.	66
Figuur 76: Gemodelleerde bathymetrie na 3 (links) en 9 jaar (rechts).....	67
Figuur 77: Gemodelleerde sedimentatie- en erosiepatronen voor scenario H1 na 3 jaar (links) en 9 jaar (rechts) simulatie.....	67
Figuur 78: Evolutie van de waterlijn (0m NAP) scenario H1;.....	68
Figuur 79: Jaarlijks gemiddelde netto langstransport berekend in de zone afgebakend door de witte lijn in de bovenste plot.....	69
Figuur 80: Locatie van de profielen voor scenario's E3 (links) en H1 (rechts).	70
Figuur 81: Evolutie Profiel 2 na drie en negen jaar (XBeach model), scenario's E3, E4 en H1. T0 is de huidige situatie.	71
Figuur 82: Evolutie Profiel 4 na drie en negen jaar (XBeach model), scenario's E3, E4 en H1. T0 is de huidige situatie.	72

Figuur 83: Evolutie Profiel 6 na drie en negen jaar (XBeach model), scenario's E3, E4 en H1. T0 is de huidige situatie.	73
Figuur 84: Evolutie Profiel 'Zwin' na drie en negen jaar (XBeach model), scenario's E3, E4 en H1. T0 is de huidige situatie.	74
Figuur 85: Evolutie van de waterlijn voor profiel 2.	75
Figuur 86: Evolutie van de waterlijn voor profiel 4.	76
Figuur 87: Evolutie van de waterlijn voor profiel 6.	76
Figuur 88: Evolutie van de waterlijn voor profiel 'Zwin'.	76
Figuur 89: Gemodelleerde sedimentatie- en erosiepatronen voor scenario E3 na 3 jaar simulatie voor verschillende instellingen voor de <i>wet slope</i> parameter (<i>wetslp</i>)	78
Figuur 90: Resolutie rekenrooster oorspronkelijk en aangepast N2V model	79
Figuur 91: Berekende stroomsnelheden tijdens eb voor de referentie, scenario E3 (eiland), E4 (overstroombaar eiland) en H1 (pilot).	80
Figuur 92: Berekende stroomsnelheden tijdens vloed voor de referentie, scenario E3 (eiland), E4 (overstroombaar eiland) en H1 (pilot).	81
Figuur 93: Berekende gemiddelde totale zandtransporten over de eerste 3 jaar voor de referentie, scenario E3 (eiland), E4 (overstroombaar eiland) en H1 (pilot).	82
Figuur 94: Berekende morfologische ontwikkeling na 3 jaar voor de referentie, scenario E3 (eiland), E4 (overstroombaar eiland) en H1 (pilot).	84
Figuur 95: Berekende morfologische ontwikkeling na 10 jaar voor de referentie, scenario E3 (eiland), E4 (overstroombaar eiland) en H1 (pilot).	85
Figuur 96: Berekende sedimentatie (rood) en erosie (blauw) na 3 jaar voor de referentie, scenario E3 (eiland), E4 (overstroombaar eiland) en H1 (pilot).	86
Figuur 97: Berekende sedimentatie (rood) en erosie (blauw) na 10 jaar voor de referentie, scenario E3 (eiland), E4 (overstroombaar eiland) en H1 (pilot).	87
Figuur 98: Ligging dwarsraaien en de initiële bodemligging.	88
Figuur 99: Morfologische ontwikkeling dwarsraai 6.	89
Figuur 100: Morfologische ontwikkeling dwarsraai 7.	90
Figuur 101: Berekende sedimentatie (rood) en erosie (blauw) na 3 jaar voor scenario's E3 en H1 met een D50 van 0.2 mm (links) en een D50 van 0.3 mm (rechts).	91
Figuur 102: Berekende sedimentatie (rood) en erosie (blauw) na 10 jaar voor scenario's E3 en H1 met een D50 van 0.2 mm (links) en een D50 van 0.3 mm (rechts).	92
Figuur 103: Berekende morfologische ontwikkeling na 10 voor scenario's E3 en H1 met een ThetSD van 1 (links) en een ThetSD van 0 (rechts).	93
Figuur 104: Berekende sedimentatie (rood) en erosie (blauw) na 10 jaar voor scenario's E3 en H1 met een ThetSD van 1 (links) en een ThetSD van 0 (rechts).	94
Figuur 105: overzicht van de kustlijn ten oosten van Zeebrugge.	96
Figuur 106: Schetsmatige weergave van processen die de evolutie van de morfologie bij het Zwin beïnvloeden.	96
Figuur 107: variatie van U als functie van de dwarsdoorsnede A , samen met de waarde van U_e	98

Figuur 108: netto sediment transport (m^3/jaar) in de kust-langse richting voor de verschillende scenario's, berekend met behulp van XBeach.	99
Figuur 109: Variatie van U t.o.v. de dwarsdoorsnede A samen met U_e voor verschillende scenario's.	99
Figuur 110: ZWeM rekengrid.....	B3
Figuur 111: Golfcondities voor het jaar 2014.....	B4
Figuur 112: Windroos 2014 (Vlissingen).....	B5
Figuur 113: Windrozen voor de meest representatieve maanden van 2014.	B5
Figuur 114: Satellietfoto van het laatste strandhoofd tussen strand Lekkerbek en Zwin.	B7
Figuur 115: Locatie van de profielen voor scenario's E3 (boven) en H1 (onder).	B8
Figuur 116: Evolutie Profiel 1 na drie en negen jaar (XBeach model), scenario's E3, E4 en H1. T0 is de huidige situatie.	B9
Figuur 117: Evolutie Profiel 2 na drie en negen jaar (XBeach model), scenario's E3, E4 en H1. T0 is de huidige situatie.	B10
Figuur 118: Evolutie Profiel 3 na drie en negen jaar (XBeach model), scenario's E3, E4 en H1. T0 is de huidige situatie.	B11
Figuur 119: Evolutie Profiel 4 na drie en negen jaar (XBeach model), scenario's E3, E4 en H1. T0 is de huidige situatie.	B12
Figuur 120: Evolutie Profiel 5 na drie en negen jaar (XBeach model), scenario's E3, E4 en H1. T0 is de huidige situatie.	B13
Figuur 121: Evolutie Profiel 6 na drie en negen jaar (XBeach model), scenario's E3, E4 en H1. T0 is de huidige situatie.	B14
Figuur 122: Evolutie Profiel 7 na drie en negen jaar (XBeach model), scenario's E3, E4 en H1. T0 is de huidige situatie.	B15
Figuur 123: Evolutie Profiel 8 na drie en negen jaar (XBeach model), scenario's E3, E4 en H1. T0 is de huidige situatie.	B16
Figuur 124: Evolutie Profiel 9 na drie en negen jaar (XBeach model), scenario's E3, E4 en H1. T0 is de huidige situatie.	B17
Figuur 125: Evolutie Profiel 10 na drie en negen jaar (XBeach model), scenario's E3, E4 en H1. T0 is de huidige situatie.	B18
Figuur 126: Evolutie Profiel Zwin na drie en negen jaar (XBeach model), scenario's E3, E4 en H1. T0 is de huidige situatie.	B19
Figuur 127: Ligging dwarsraaien en de initiële bodemligging.	B20

1 Inleiding

1.1 Vlaamse Baaien

Om de Belgische kust op lange termijn, tot 2100, en op middellange termijn, tot 2050, te beschermen tegen de effecten van de Klimaatopwarming en zeespiegelstijging heeft de Vlaamse overheid het project Vlaamse Baaien geïnitieerd. Het masterplan 'Vlaamse Baaien' werd op 9 mei 2014 door minister Crevits voorgesteld aan de Vlaamse regering.

Het Project Vlaamse Baaien wil ervoor zorgen dat de Belgische kust bestand is tegen de veranderende klimaatomstandigheden. De kust moet bestand zijn tegen stormen en overstromingen, maar ook aantrekkelijk blijven, de economie kansen geven en zorgen voor duurzame energie.

Voor de bescherming van de Oostkust, Zeebrugge tot Cadzand, werd in 2014 de aanleg van een aantal eilanden vooropgesteld, zie Figuur 1. De eilanden beschermen de kust tegen erosie door stormen en tevens wordt er de mogelijkheid gecreëerd tot het aanleggen van een luwe vaarroute die Zeebrugge toegankelijk moet maken voor estuaire vaart.

In het rapport van De Maerschalck et al. (2016) wordt het ontwerp van de eilanden op basis van hydrodynamische simulaties geoptimaliseerd. De impact van de eilanden op het golfklimaat met oog op estuaire vaart is verder onderzocht door de afdeling Maritieme Techniek van Universiteit Gent, onder leiding van Professor M. Van Torre (Van Zwijnsvoorde et al., 2016a, 2016b). De scenario's die als meest kansrijk beschouwd worden, worden in voorliggend rapport verder morfologische beproefd. De stabiliteit van de eilanden en geulen, de morfologische impact van de ingrepen op de omgeving en de invloed van de ingrepen op de slibhuishouding worden onderzocht. Op basis van een uitgebreid modelinstrumentarium worden volgende onderzoeksvragen nader onderzocht:

- 1) In welke mate is een artificieel eiland voor de oostkust stabiel? Zullen er extra maatregelen nodig zijn om het eiland te beschermen tegen getij en golven?
- 2) Wat is de impact op de directe omgeving? Door de grootschalige ingrepen worden de lokale stromingen en golfklimaat gewijzigd. Veroorzaken deze veranderingen lokale veranderingen in sedimentatie en erosiepatronen?
- 3) Wat is de impact van een aangelegd eiland op de stranden van Zeebrugge tot het Zwin? Onder de huidige condities blijkt het strand van Knokke erosiegevoelig. Op regelmatige basis moet het strand opnieuw gesuppleerd worden om de veiligheid te garanderen. Een aantal van de scenario's voorziet bovendien ook in de uitbreiding van het bestaande strand. Ook dit kan een invloed hebben op de morfologische evolutie van het strand en de vooroever.
- 4) Wat zijn de effecten van de aanleg van een artificieel eiland op het Zwin, meer bepaald op de stabiliteit van de Zwingeel: De stabiliteit van de geul van het Zwin wordt bepaald door de verhouding van de getij-gedreven wateruitwisseling en het golf-gedreven litoraal transport voor de toegangseel. De aanleg van een eiland, maar ook de substantiële stranduitbreiding van het bestaande strand kan een effect hebben op het langstransport en op die manier de stabiliteit beïnvloeden.
- 5) Wat is de invloed van de ingrepen op de lokale slibhuishouding? De omgeving van Zeebrugge wordt gekenmerkt door slibrijke bodems. Door de grootschalige ingrepen worden de lokale stromingen en golfklimaat gewijzigd. Dit kan een effect hebben op de lokale slibhuishouding. Eén van de doelen van de ingrepen is het mogelijk maken van estuaire vaart door het creëren van een golf-luw vaartracé. Het is niet gewenst dat in deze zone slib gaat accumuleren. Het is ook niet gewenst dat slib zich gaat afzetten op de vooroever en stranden.

Figuur 1: Masterplan Vlaamse Baaien zoals voorgesteld door minister Crevits op 26 november 2014.



1.2 Methodiek

Onzekerheid is inherent aan morfologisch modelleren. Elk morfologische model heeft zijn beperkingen: hetzij in de beschrijving van de complexe fysische processen (zoals transport in de brandingsstroom, interactie zand en slib, en golf-stroom-interactie), hetzij in resolutie (gestructureerde grids, lange rekentijden), dimensies: 2D versus 3D, en in de simulatietijd: van enkele maanden tot decennia. Daarom wordt ervoor gekozen de studie niet te beperken tot het inzetten van één morfologisch model, maar 3 beschikbare state-of-the-art morfologische modellen en een zand-slib model in te zetten. Vervolgens werden de resultaten zoals in onderstaande hoofdstukken beschreven, op 29 juni 2016 ter beoordeling voorgelegd aan een Vlaamse-Nederlandse commissie van experts op het vlak van hydrodynamica, sedimenttransport, morfologie en kustbescherming. Een samenvatting van het verslag van deze meeting is opgenomen in Bijlage A.

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de ingezette modellen en voor elk model het bijhorende type onderzoeksvragen waarvoor het model het meest geschikt geacht wordt. Deze modellen worden nader besproken in Hoofdstuk 3.

Tabel 1: Overzicht modellen

Model	Type onderzoeksvragen	Termijn	2D/3D
ZWeM Zand-slib	(5) Slibdynamiek, veranderingen bodemsamenstelling, aanslibbing geulen en vooroever.	1mnd	3D
N2V	(1) Stabiliteit van de ingrepen en (2) Grootschalige morfologische veranderingen op lange termijn. Minder resolutie dan ZWeM maar lange periode.	10jaar	2D
ZWeM – Zand	(1) stabiliteit van de eilanden en (2) grootschalige morfologisch ontwikkeling. Fijnmazig model waarmee de invloed van 3D effecten onderzocht kunnen worden.	3 jaar	3D/2D
XBeach knokke	(3) Detailmodel interessegebied met focus op de stranden van ZB tot Cadzand en eilanden.	3 jaar	2D
Escoffier Zwin	(4) Kwalitatieve inschatting van effecten op het Zwin.		Boxmodel (0D)

1.3 Beschrijving van de scenario's

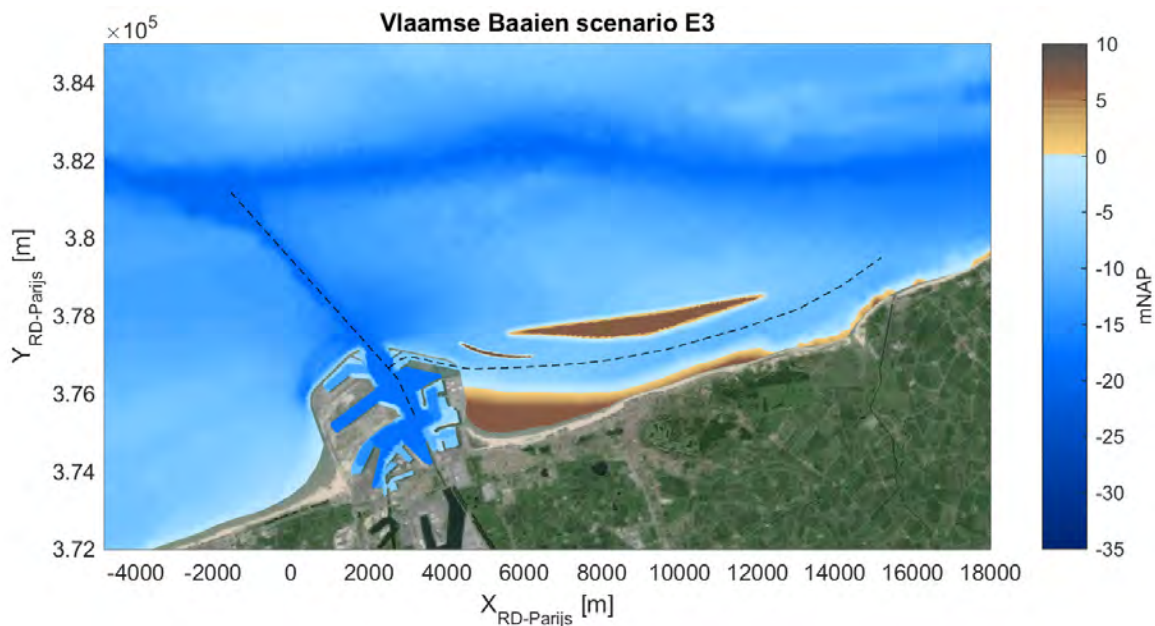
De totstandkoming van de scenario's word beschreven in De Maerschalck et al. (2016). Ze worden hieronder kort toegelicht. De nummering van de scenario's verwijzen naar eerdere rapporten die de hydrodynamica en de effecten op estuaire vaart bespreken (De Maerschalck et al. 2016, Van Zwijnsvoorde et al. 2016a, 2016b)

1.3.1 Scenario E3: Vlaamse Baaien Eilanden en strandverbreding

Deze configuratie bestaat uit een eiland in combinatie met een dam en een verbreding van het strand, zie Figuur 2. Het ontwerp van dit scenario wordt beschreven in Renders et al. (2016). De stranduitbreiding vermindert de komberging achter de eilanden om zo de stromingen door de geulen tussen de oostelijke dam van Zeebrugge en het eiland te beperken. In onderstaande figuur geven de streepjeslijnen de vaarpassen weer: Lichtenlijn Pas van het Zand: Noordwest – Zuidoost georiënteerd, en de nieuwe navigatieroute voor estuaire vaart: Oost-West georiënteerd. Estuaire vaart kan de haven van Zeebrugge bereiken via een doorgang en kanaal in de oostelijke havendam, zie Figuur 3.

In de simulaties wordt het smalle eiland tussen de oostelijke havendam en het eiland als een vaste dam beschouwd (niet-erodeerbaar). De aanleg van het eiland vergt 34,6 miljoen m³, de strandsuppletie 39,3 miljoen m³. De kruinhoogte van het eiland rijkt tot 6 m NAP. In Bijlage D is een aantal dwarsprofielen van zowel de bestaande toestand als de scenario's opgenomen.

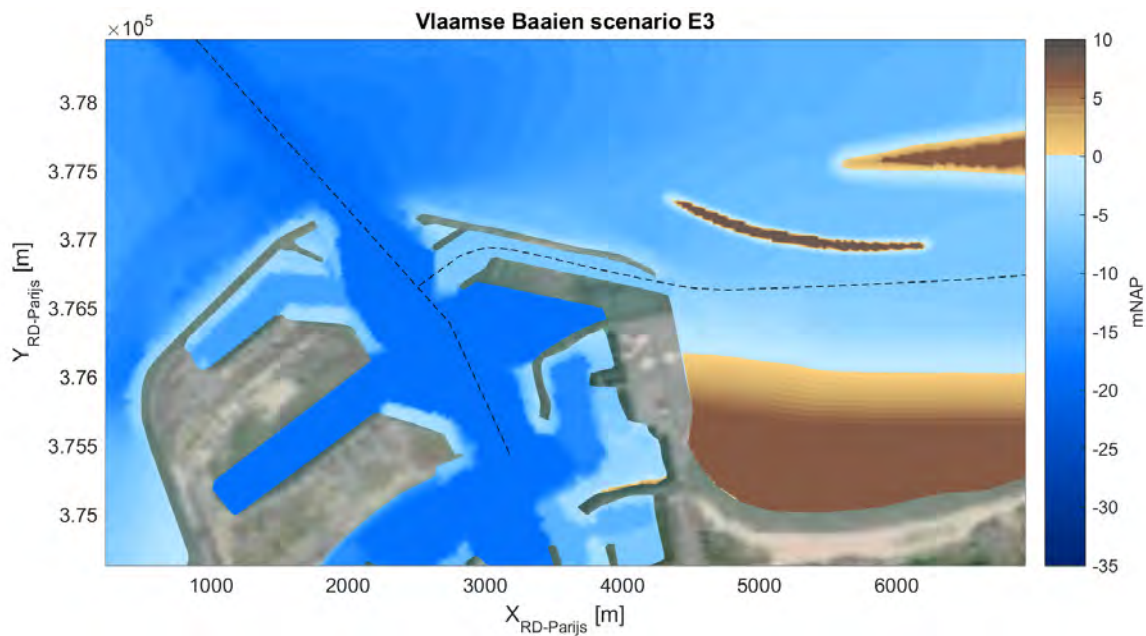
Figuur 2: Ontwerp Eilandenden Vlaamse Baaien (scenario E3).



Streepjeslijnen geven de vaarroutes weer:

Pas van Zand (Noorwestelijke richting) en navigatieroute voor estuaire vaart (Oost-west georiënteerd).

Figuur 3: Toegang Zeebrugge voor estuaire vaart, scenario E3.



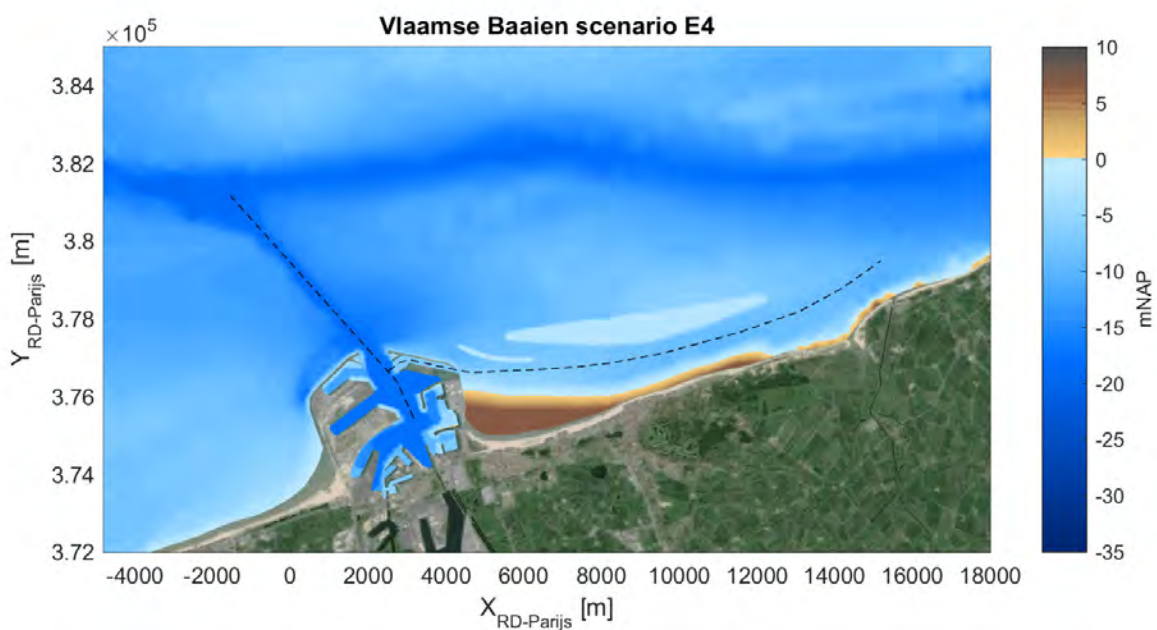
1.3.2 Scenario E4: Overstroombaar eiland

De dimensies van het eiland en de dam zijn in dit scenario vergelijkbaar met scenario E3, Figuur 4. Echter, de kruinhoogte van zowel het eiland als de dam zijn beperkt tot 0mLAT (-2,56m NAP). Het eiland ligt volledig onder water. Volume van het eiland bedraagt 26,4 miljoen m³.

Het effect van zandbanken op kustverdediging wordt onderzocht door de Katholieke Universiteit Leuven in opdracht van afdeling Kust (Broersbank project, Prof. J. Mombaliu). Op basis van golfberekeningen uitgevoerd door het Waterbouwkundig Laboratorium (Hassan et al., 2016) werd een analyse gedaan van de impact op de nautische toegankelijkheid voor estuaire vaart (Van Zwijnsvoorde en Vantorre, 2016b). Desondanks een overstroombaar eiland slechts een beperkte golfwerende werking heeft, zeker bij hoogwater, blijkt het effect van de golfreductie op de toegankelijkheid vergelijkbaar met het scenario E3. Door de reductie van het golfklimaat voor de Belgische kust, zullen net zoals in het scenario E4 de golfcondities langsheen het Nederlandse deel van het traject bepalend zijn voor de toegankelijkheid.

Het scenario is hier toegevoegd om de morfologische impact op de stranden alsook de stabiliteit van het eiland op zich te onderzoeken.

Figuur 4: Vlaamse Baaien scenario E4 - overstroombaar eiland (kruinhoogte 0mLAT).

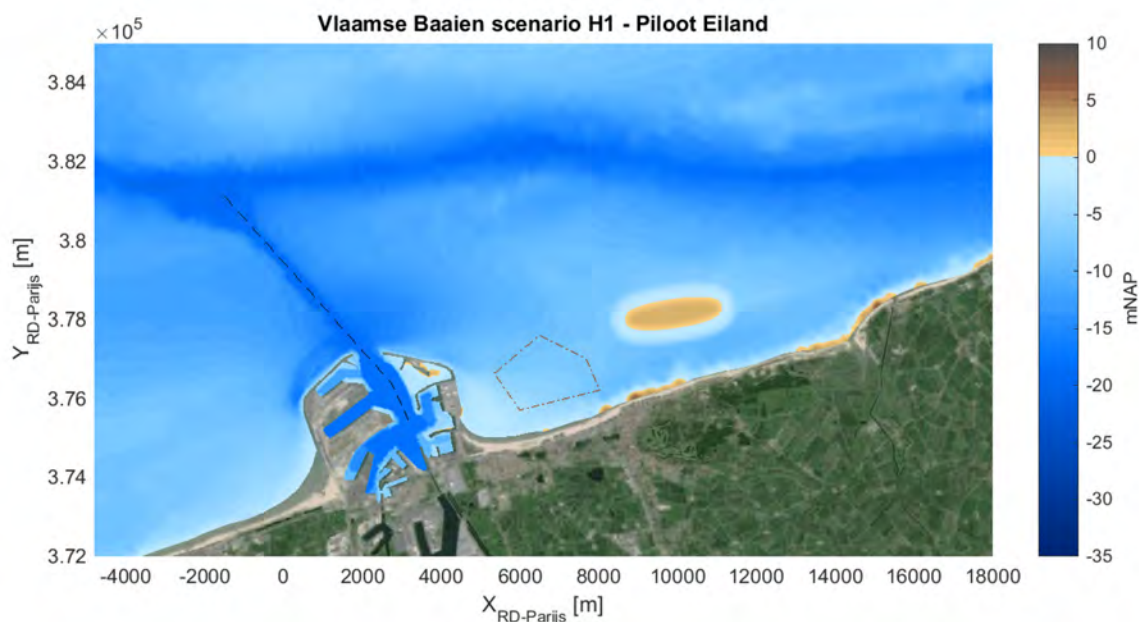


Streepjeslijnen geven de vaarroutes weer: Pas van Zand (Noorwestelijke richting) en navigatieroute voor estuaire vaart.

1.3.3 Scenario H1: Piloot eiland

Het is de wens om op korte termijn een piloot studie aan te vangen door de aanleg van een kleiner eiland als eerste fase van het uitvoeren van het Vlaamse Baaien ontwerp. Voor de aanleg van het eiland zou specie gebruikt kunnen worden uit de stortplaats S1, ongeveer 16 miljoen m³, om tevens de stortplaats S1 die bijna vol is open te houden. Het pilooteiland zou aangelegd worden op de Paardenmarkt, ten oosten van de munitiestortplaats, zie Figuur 5. De kruinhoogte van het eiland is 2,5 m NAP.

Figuur 5: Vlaamse Baaien Scenario H1 – Piloot eiland, kruinhoogte +2,5 m NAP.



De gemarkeerde vijfhoek is de munitiestortplaats zoals deze aangegeven staat op nautische kaarten.

1.4 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 geeft een korte beschrijving van het systeem in het interessegebied. De systeembeschrijving van het mondingsgebied, de kuststrook Zeebrugge – Cadzand en Zwin zijn integraal overgenomen uit De Maerschallck et al. (2015). Beschrijving van de Paardenmarkt, Paragraaf 2.5, is hieraan toegevoegd.

Hoofdstuk 3 beschrijft de modelresultaten per model en per scenario. De modellen worden kort beschreven. Voor meer gedetailleerde beschrijving van het model en model-kalibratie wordt verwezen naar de betreffende modelrapporten. Voor het Zwin wordt een Escoffier curve opgesteld in Paragraaf 3.5.

Hoofdstuk 4 bediscussieert de modellering volgend op de expert meeting.

In Hoofdstuk 5 worden de conclusies en aanbevelingen gepresenteerd.

De samenvatting van de expertmeeting is te lezen in Bijlage A.

2 Systeembeschrijving

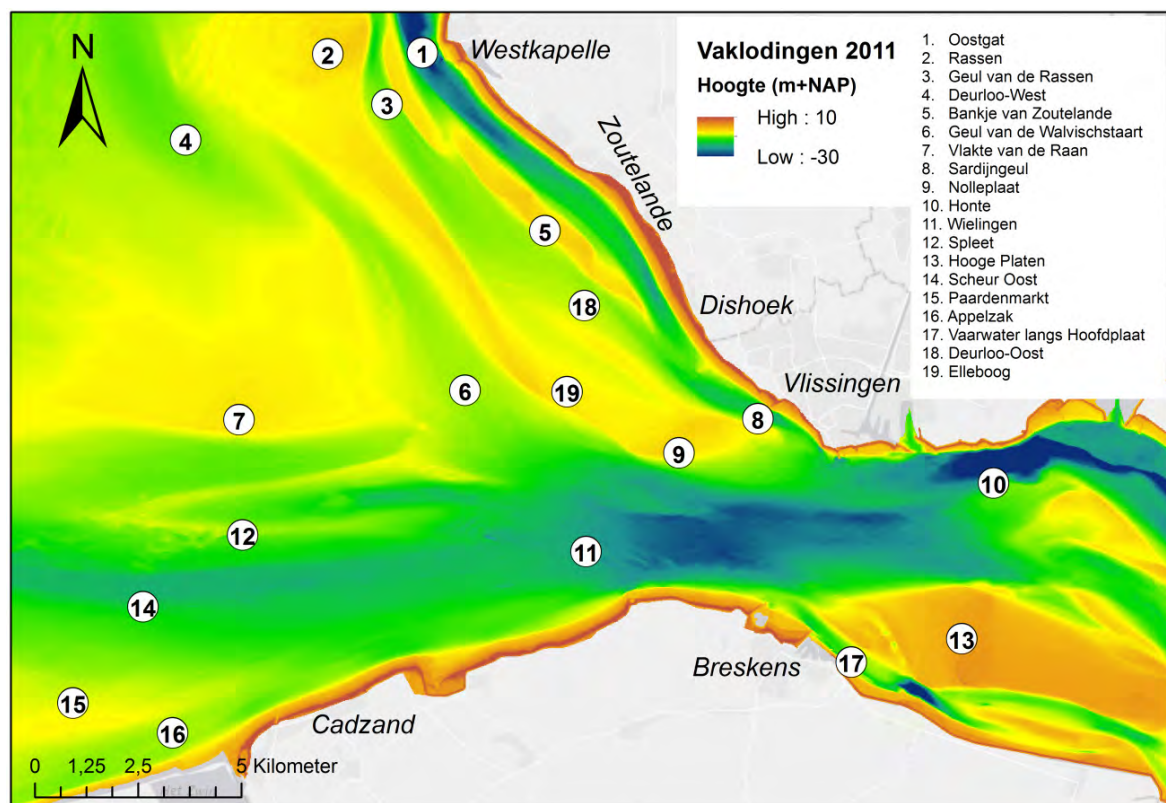
In De Maerschallck et al. (2015) wordt een bondige samenvatting gegeven van wat er op basis van de literatuur reeds bekend is over de systeemwerking van het mondingsgebied, Zwin, Appelgeul, kust van Cadzand tot Zeebrugge en Baai van Heist. Onderstaande paragrafen zijn overgenomen uit het rapport.

De Systeembeschrijving van de Paardenmarkt (paragraaf 2.5) is hieraan toegevoegd.

2.1 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 vlakke ten zuiden hiervan is bekend als de Vlake 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 deze twee 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.

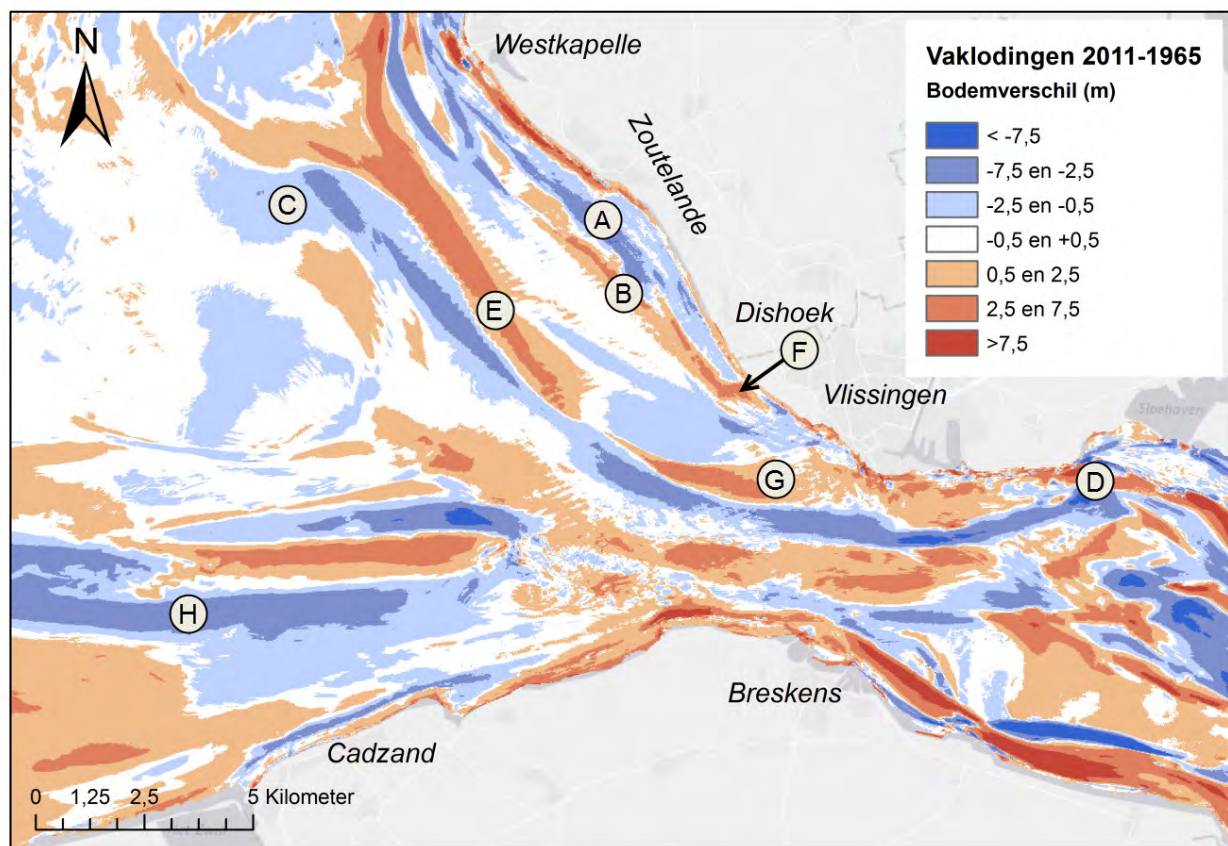


Figuur 7 toont de morfologische ontwikkeling van de monding van de Westerschelde gedurende de periode 1965 t/m 2011. De belangrijkste morfologische ontwikkelingen worden samengevat in onderstaande Tabel 2.

Tabel 2: Samenvatting morfologische veranderingen 1965 – 2011, zoals weergegeven in Figuur 7

A	Dieper worden van het Oostgat
B	Netto sedimentatie op het Bankje van Zoutelande
C - D	Aansluiting van de Geul van de Walvischstaart op Deurloo-West en Honte
E	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
F	Aanzanding van de drempel Oostgat/Sardijngeul (Galgeput)
G	Aanzanding in oostwaartse richting van de Nolleplaat
H	Verdieping van Scheur Oost en westelijk deel Wielingen door baggerwerkzaamheden

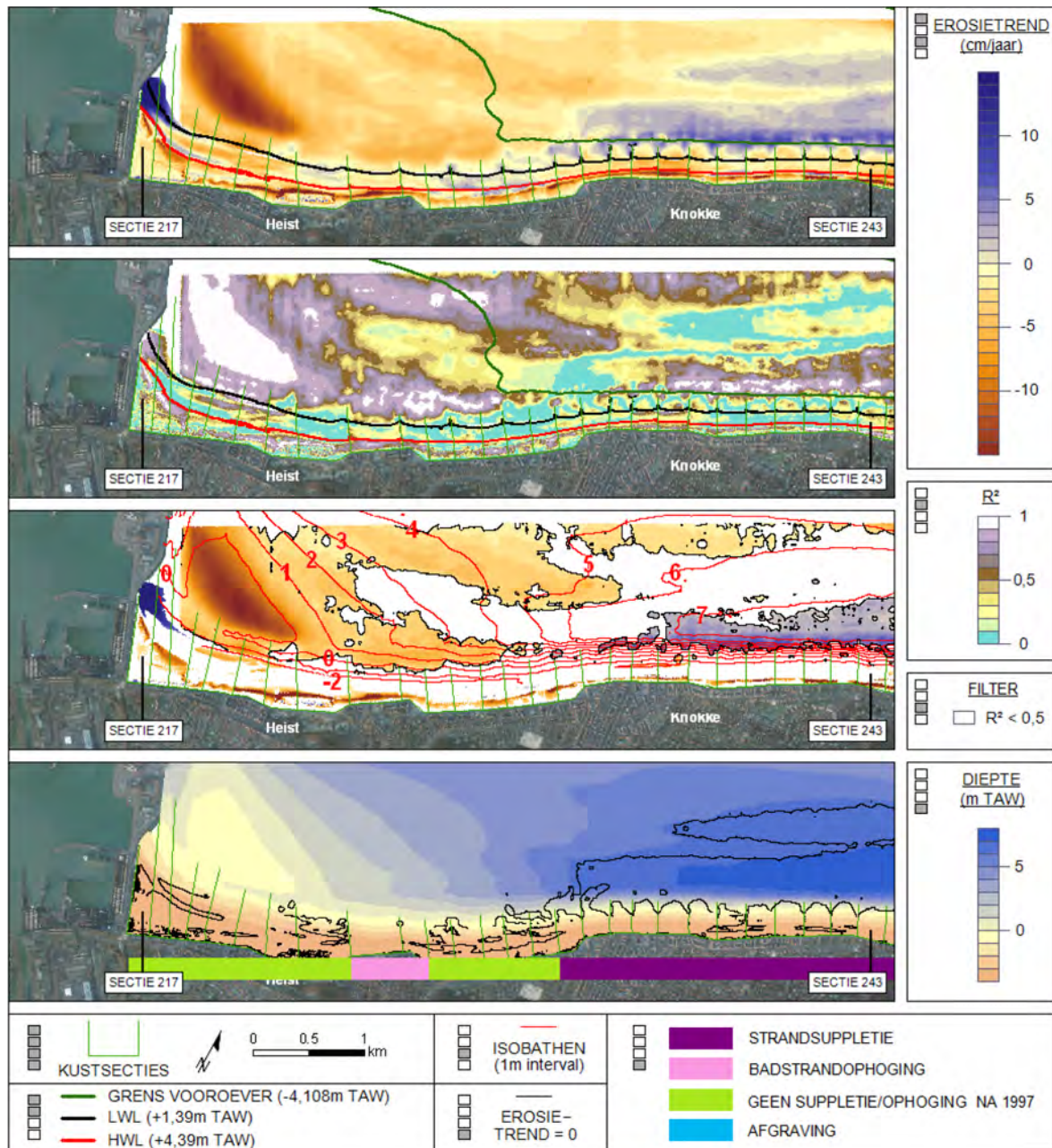
Figuur 7: Verschilkaart 1965 - 2011 met de belangrijkste morfologische veranderingen in deze periode.



2.2 Zeebrugge – Zwin

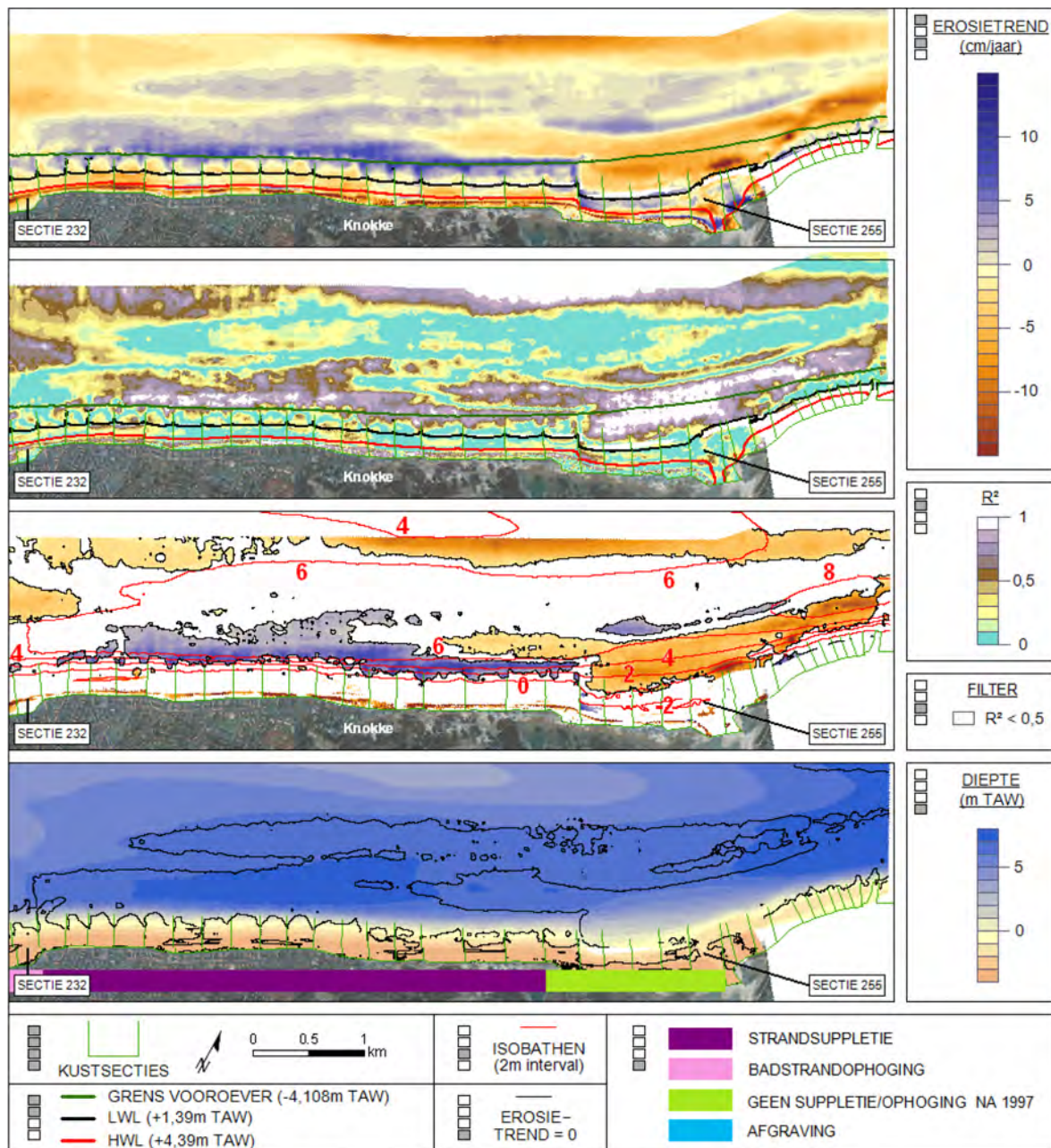
Trouw et al. (2015) beschrijft een literatuurstudie die als doel heeft om het algemene gedrag van het systeem tussen Zeebrugge en het Zwin in kaart te brengen. Ondanks de relatief rechte kustlijn is het gebied vrij complex, omwille van de haven van Zeebrugge en de nabijheid van de monding van de Westerschelde. 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)



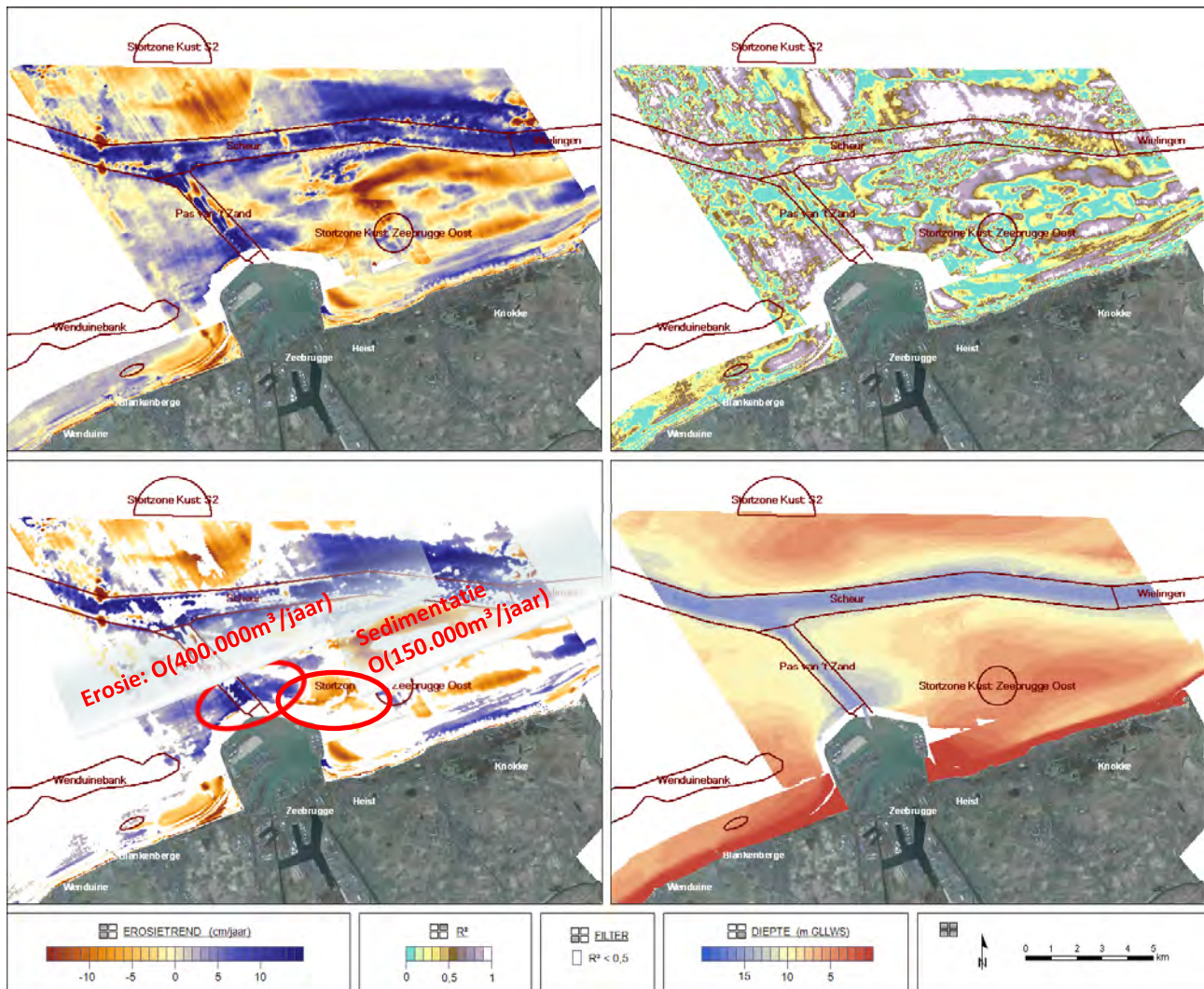
Bathymetrie: 2010, erosietrend 1997 – 2010. R^2 wordt bepaald op basis van de lineaire regressie van de bodem per pixel. Als $R^2 > 0,5$ wordt dit als een trend beschouwd.

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



Bathymetrie: 2010, erosietrend 1997 – 2010. R^2 wordt bepaalt op basis van de lineaire regressie van de bodem per pixel. Als $R^2 > 0,5$ wordt dit als een trend beschouwd.

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

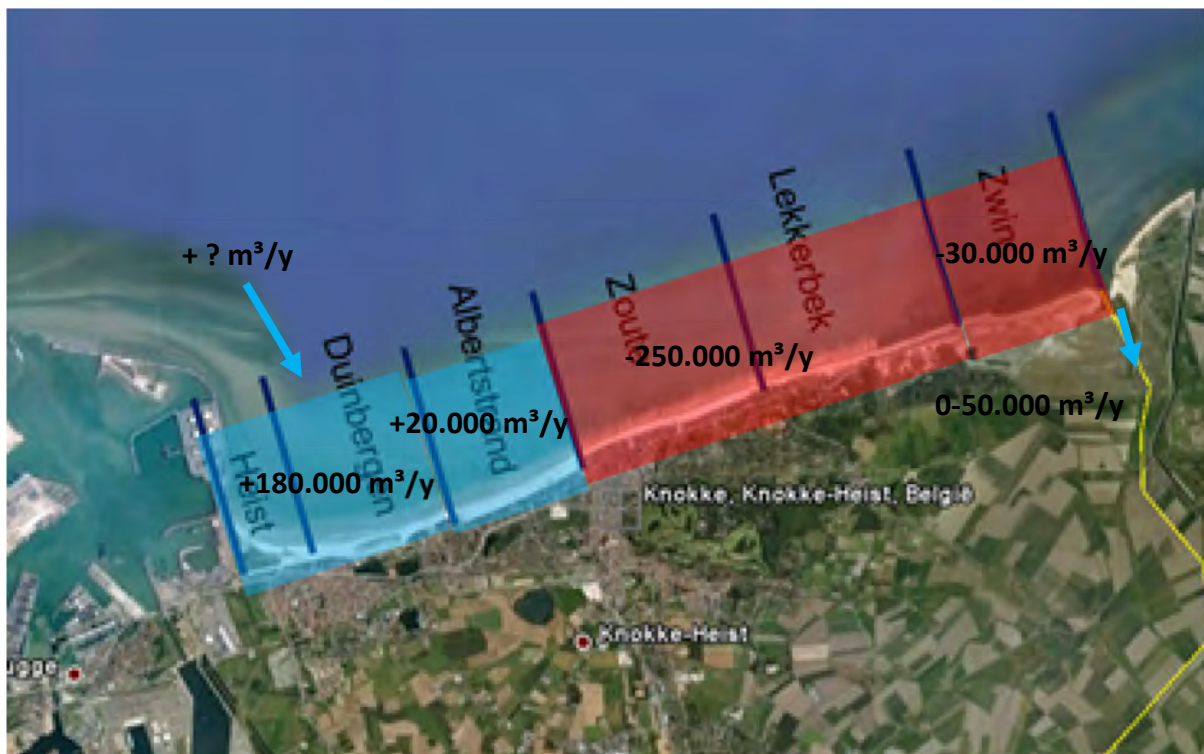


Bathymetrie: 2010, erosietrend 1997 – 2010. R^2 wordt bepaald op basis van de lineaire regressie van de bodem per pixel. Als $R^2 > 0,5$ wordt dit als een trend beschouwd.

2.2.1 Baai van Heist

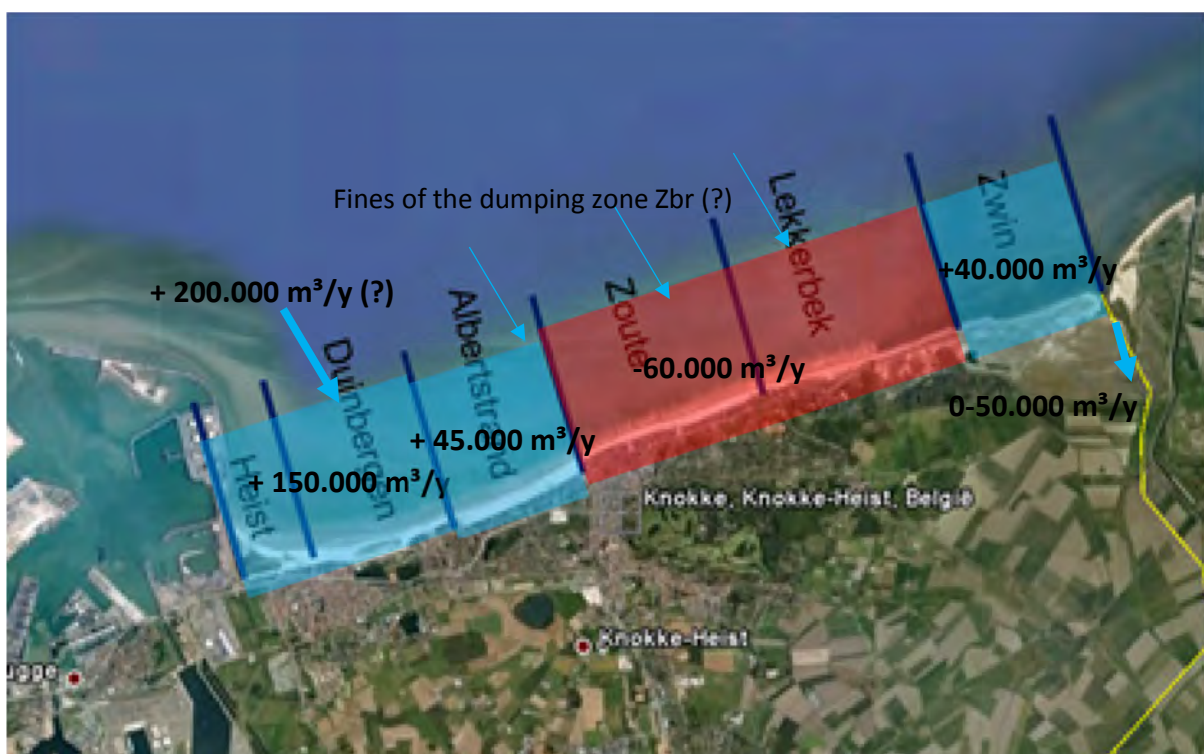
Ongeveer 200.000 m³ sediment zet zich jaarlijks af in de Baai van Heist sinds de uitbreiding van de haven van Zeebrugge in 1979-1985, zie Figuur 11. Het sediment is waarschijnlijk afkomstig van rond de haveningang. Deze aanvoer van voornamelijk fijn sediment heeft gedeeltelijk de erosie gecompenseerd, 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 μ m).

Figuur 11: Sedimentbalans op basis van waargenomen trends in de periode 1986 tot 1997 voor stranden en vooroever tot 1500m offshore.



Trends zijn gecorrigeerd voor strand en vooroeversuppleties (Trouw et al. 2015)

Figuur 12: Sedimentbalans op basis van waargenomen trends in de periode 1997 tot 2010 voor stranden en vooroever tot 1500 m offshore



Trends zijn gecorrigeerd voor strand en vooroeversuppleties (Trouw et al. 2015)

2.2.2 Knokke-Zoute en Appelzak

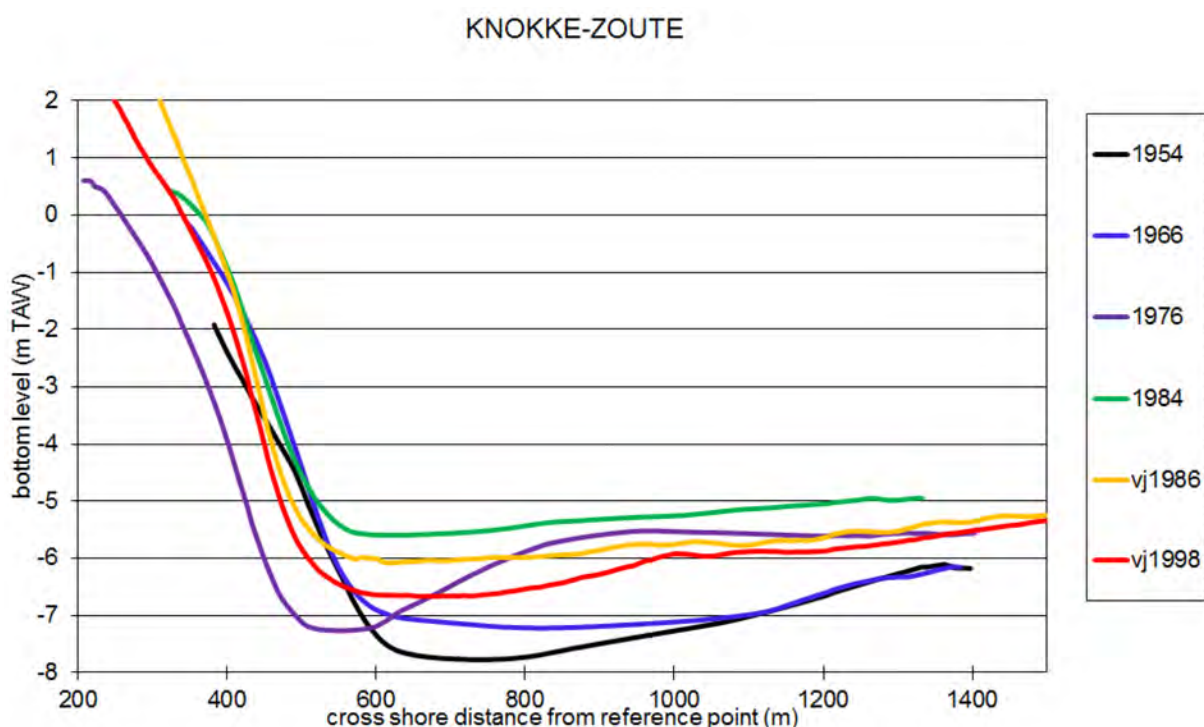
De Geul van de Appelzak is een getijdegeul tussen de kust van Knokke-Heist en de ondiepte van de Paardenmarkt. De stranden van Knokke-Heist eroderen door o.a. de aanwezigheid van de Appelzakgeul. De landwaartse talud van de geul onder de laagwaterlijn is dan ook zeer stijl: 1/25, zie Figuur 13 voor de evolutie van de gemiddelde dwarsprofielen van de geul ter hoogte van Knokke-Zoute. Figuur 14 toont de positie van de Appelzak (afstand offshore) in de tijd.

De geul toont een langdurige trend van landwaartse verplaatsing. In de periode 1955 – 1972 migreert de Appelzak langzaam landwaarts, en wordt ze minder diep, zie ook Figuur 15. Ook tussen 1900 en 1930 migreerde de geul reeds 700 m kustwaarts (Van Cauwenberge, 1966). In 1976, na een zware storm migreert de Appelzak 50 m kustwaarts (ten opzichte van de vorige peiling in 1974). In die periode heeft er ook sedimentatie plaatsgevonden ten noorden van de geul. Tussen 1977 en 1979 wordt er meer dan 8,5 miljoen m³ gesuppleerd over een afstand van 9 km. Deze suppletie verplaatst de Appelzak weer 100 m zeewaarts. De suppletie zorgde ook voor een verontdieping van de geul in de daarop volgende jaren. Na het finaliseren van de buitenhaven van Zeebrugge is de trend van gestaag verdiepen en kustwaartse migratie weer waarneembaar.

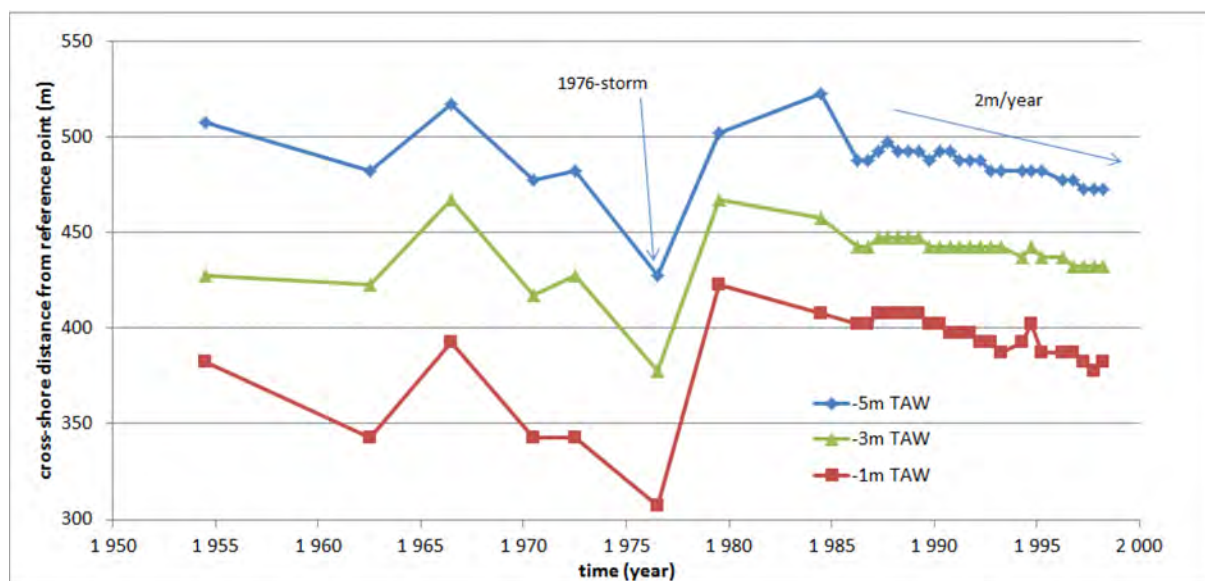
Deze evolutie lijkt in de laatste tien jaren langzamer te worden, en suggereert dat een soort van evenwicht bereikt wordt. Het laatste decennium lijkt de meest stabiele periode van de laatste eeuw voor de Appelzak te zijn (Trouw et al, 2015). De stabiliteit is mogelijks te wijten aan de minder hevige 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 dicht 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. Aangenomen wordt dat begin 20^{ste} eeuw deze geul vloed dominant was, maar nu is ze gekend als een eb-dominante geul. Let wel het gemiddelde litoraal transport is dan weer van west naar oost georiënteerd.

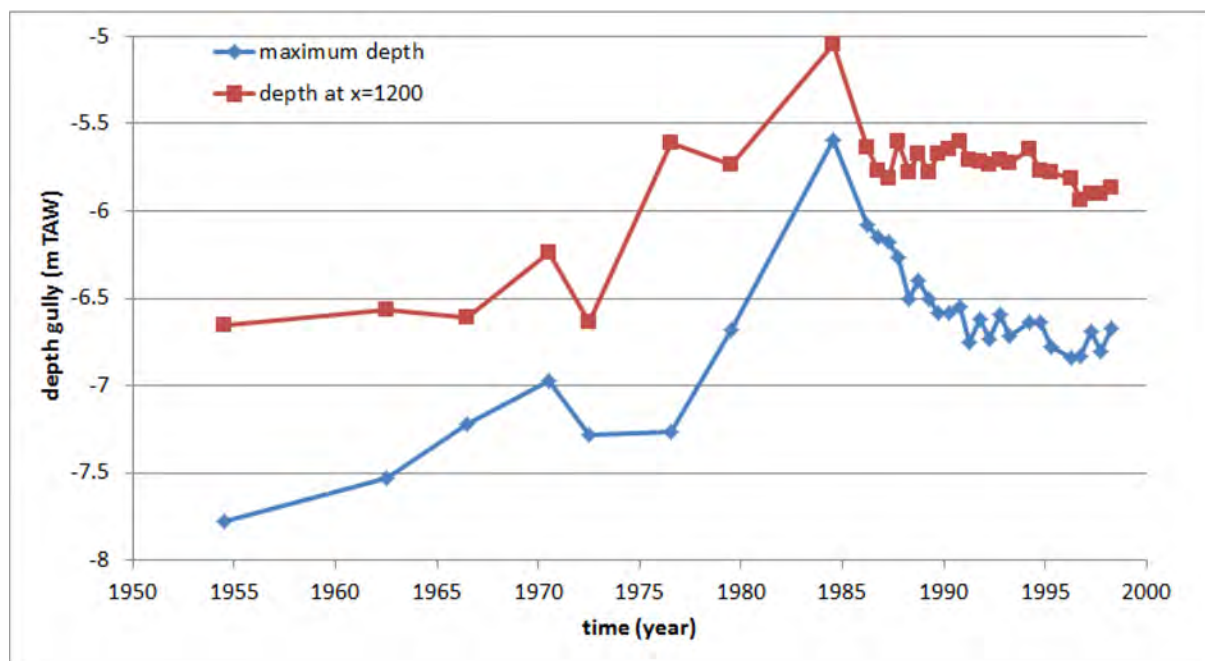
Figuur 13: Evolutie van de Appelzak: Selectie van gemiddelde dwarsprofielen voor Knokke-Zoute (Trouw et al., 2015)



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



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



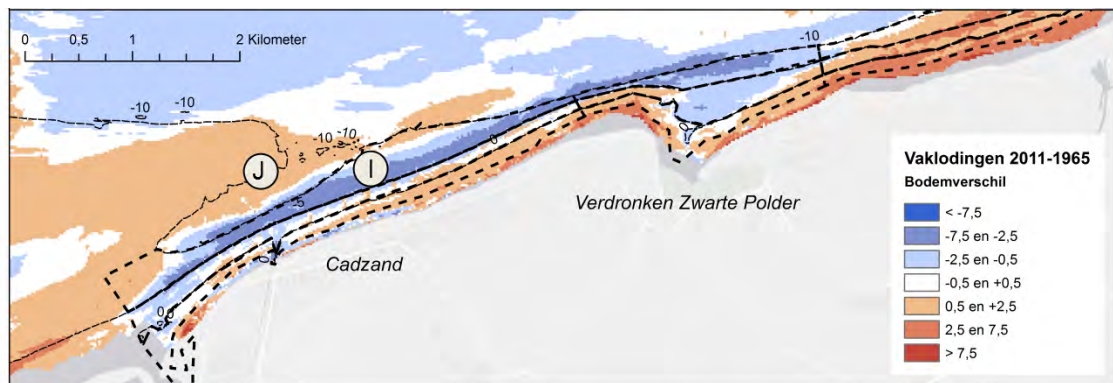
2.3 Zwin- Zwarte Polder

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 m³.

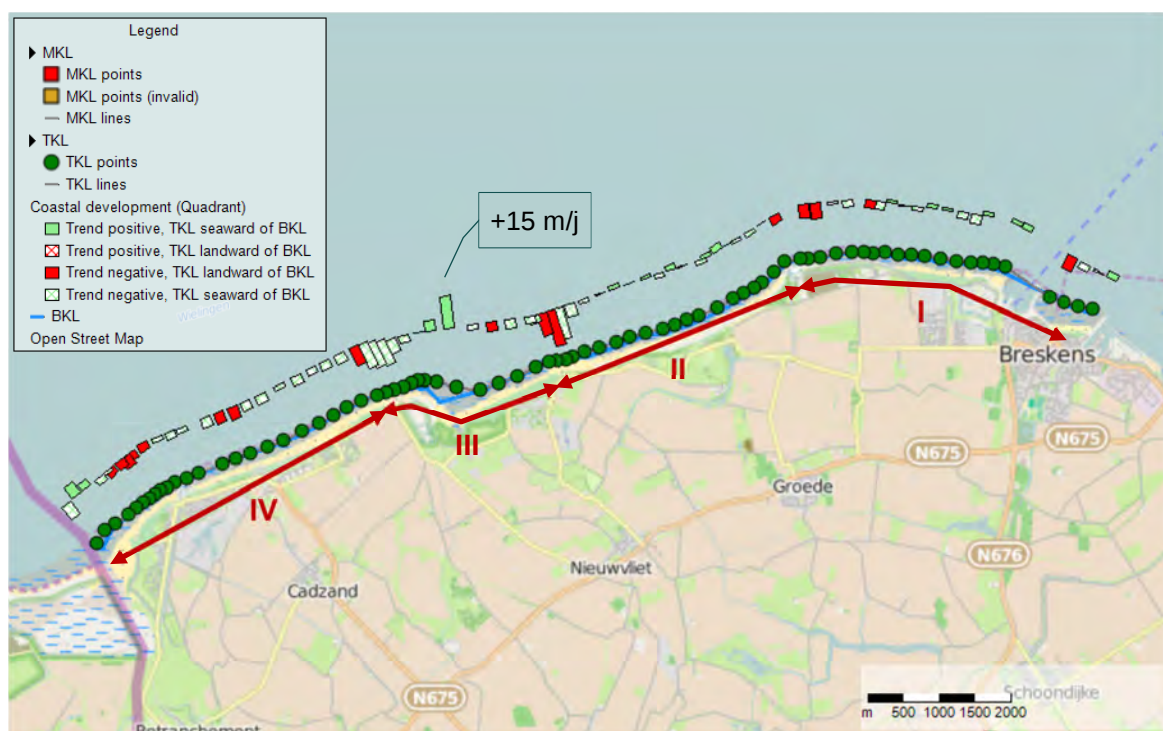
Figuur 16 geeft in meer detail de morfologische ontwikkelingen langs de kust van Zeeuws-Vlaanderen weer. Over vrijwel het gehele deel zijn strand en duinen hoger geworden terwijl erosie van de vooroever is opgetreden (I). Verder zeewaarts is sprake van sedimentatie (J).

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 de bodem van 2011.

Figuur 17: Jarkus-raaien langs de kust van Zeeuws-Vlaanderen met trends in kustlijnontwikkeling en onderverdeling in deeltrajecten.

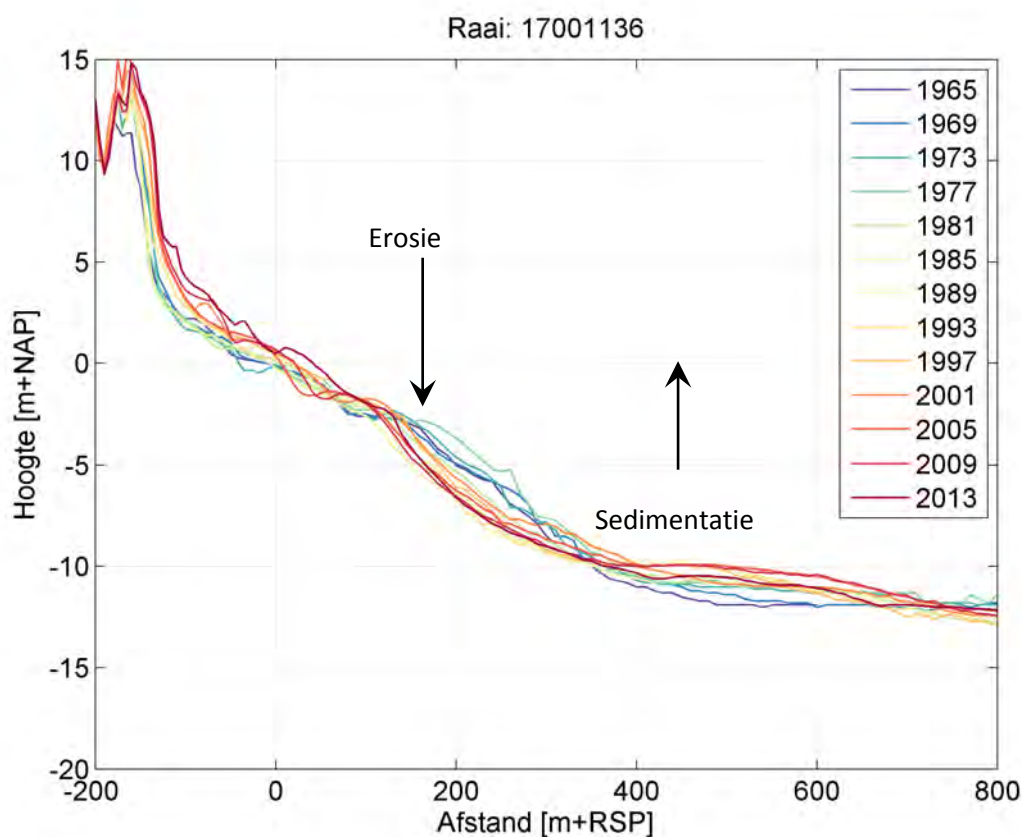


De basiskustlijn wordt weergegeven met de blauwe lijn. De MKL trends (de licht- en donkerrode en licht- en donkergroene balkjes) zijn bepaald over de periode 2011-2013. De Te Toetsen Kustlijn (TKL-punten) wordt getoond voor 2017

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 Verdronken Zwarte Polder en bij het Zwin. Bij de Verdronken 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 verbindingseul tussen de Verdronken Zwarte Polder en zee. Deze is in 2010 uitgediept om de instroming van zeewater naar het achtergelegen gebied te bevorderen maar nam in de opvolgende jaren snel in omvang af tot hij in 2013 vrijwel 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.



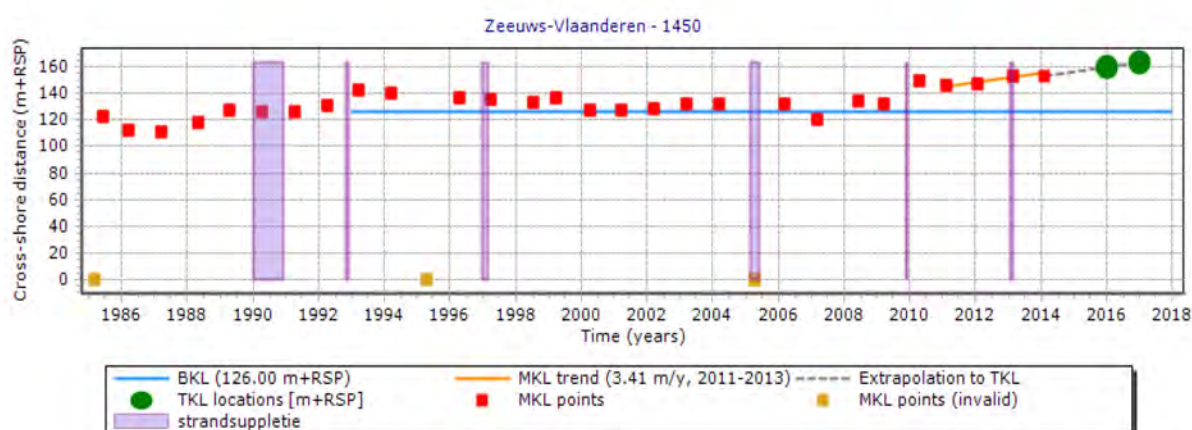
De ontwikkeling van zandvolumes in deeltraject IV is weergegeven in Tabel 3. Deze kwantificeren het beeld in Figuur 16: Strand en duinen hebben meer volume gekregen, vooroever en diepere gebieden zijn zand kwijt geraakt. Doordat de periodes van de metingen verschillen is het niet mogelijk op basis van deze gegevens een zandbalans te maken.

Tabel 3: Ontwikkeling zandvolumes op basis van vaklodingen (periode 1965-2011) en LiDAR-metingen (periode 1997-2011).

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

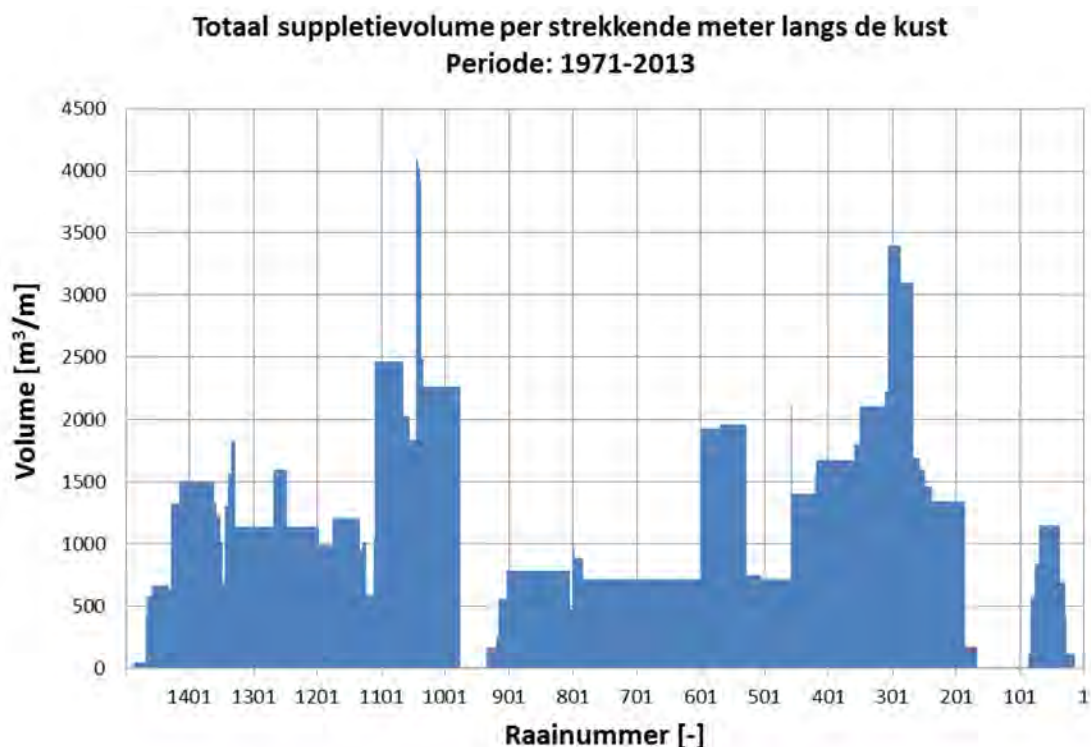
Waardes zijn in Mm^3 en niet gecorrigeerd voor suppleties. Strand: 0 tot +3 m NAP, Vooroever: -5 tot 0 m NAP, Lager gelegen: -10 tot -5m NAP.

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. 2015)

Figuur 20: Totaal suppletievolumen per strekkende meter langs de kust voor de periode 1971-2013 .



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 uitwateringssluys 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 uitwateringssluys beter te beschermen tegen golven dienden de strekdammen te worden verhoogd en verzwaid. 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 uitwateringssluys zijn vervangen door twee golfbrekers die hoger zijn en verder in zee steken (Figuur 13). Het is te verwachten dat de in 2016 aangelegde grotere golfbrekers een grotere barrière voor het kustlangs zandtransport zullen vormen.

Figuur 21: Aanleg van de strekdammen en de golfbrekers ten behoeve van de sluis en jachthaven nabij Cadzand.



Links: situatie medio 2015 (vanuit het zuidwesten). Het werkplatform ligt aangemeerd aan een tijdelijke dam. Rechts: situatie 2016 vanuit het noordwesten.

2.4 Het Zwin

2.4.1 Situering

Het Zwin is een oude verzande zeearm (Figuur 22) en sinds 1952 een belangrijk natuurreserveaat 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.

2.4.2 Morfologie

Kustmorfologisch gezien is het Zwin interessant omdat het om een volledig ontwikkelde slufte met getijgeul gaat, de enige in Vlaanderen. Het systeem is enigszins vergelijkbaar met de Slufte 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, zie Figuur 24. Ook is recent sediment uit het Zwin zelf verwijderd om voldoende intergetijdengebied en getijprisma te behouden. In de nabije toekomst (2016 – 2019) 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.

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

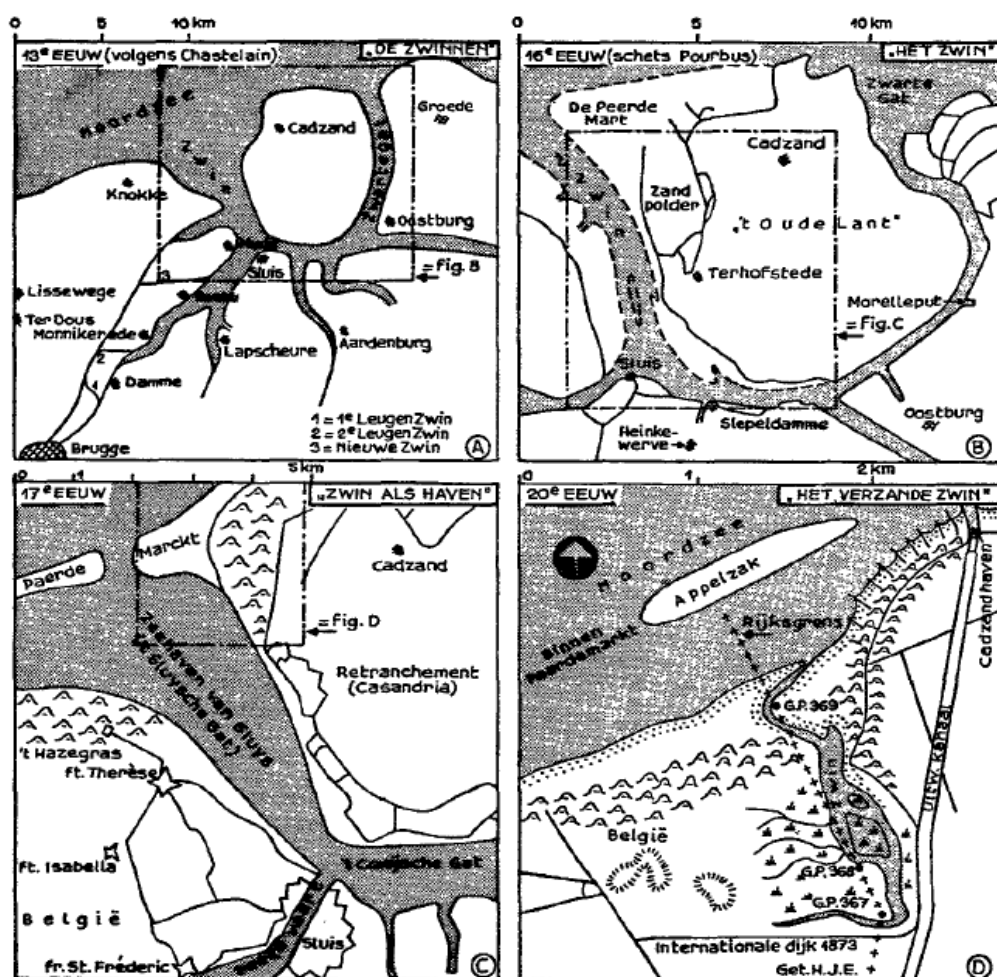


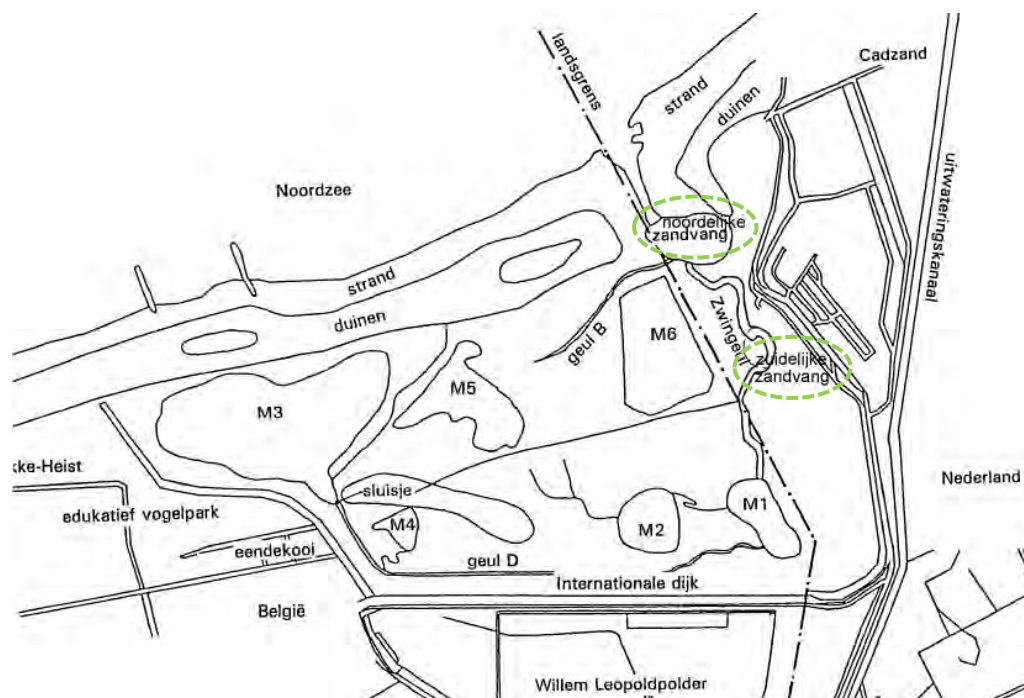
Fig. 20. Een viertal schetsen van het Zwin van de 13e tot de 20e eeuw. De schalen van de fragmenten A, B, C en D verhouden zich ongeveer als 10:5:3:1 en zijn aangegeven op de bovenranden der schetsen. Het grijs getinte gebied is buitenwater.

Figuur 23: Het huidige Zwin.



De gele lijn geeft de Nederlands-Belgische grens aan. Onderaan is in het midden van de foto de Internationale dijk zichtbaar die doorgebroken zal worden ten behoeve van de uitbreiding.

Figuur 24: Zwin, locatie van de noordelijke en zuidelijke zandvang.



NB: Zuidelijke zandvang is slechts eenmalig in 1990 uitgegraven (uit Houthuys et al., 2013)

Houthuys (2013) heeft de langdurige morfologische evolutie van het Zwin geanalyseerd op basis van 49 gedigitaliseerde hoogtelijnplannen of DTM's voor het strand (vooral 1979-2011) en 12 gedigitaliseerde vooroeverlodingen voor de bathymetrie (1986-2011), met het oog op het effect van suppleties. Zijn voornaamste conclusies zijn:

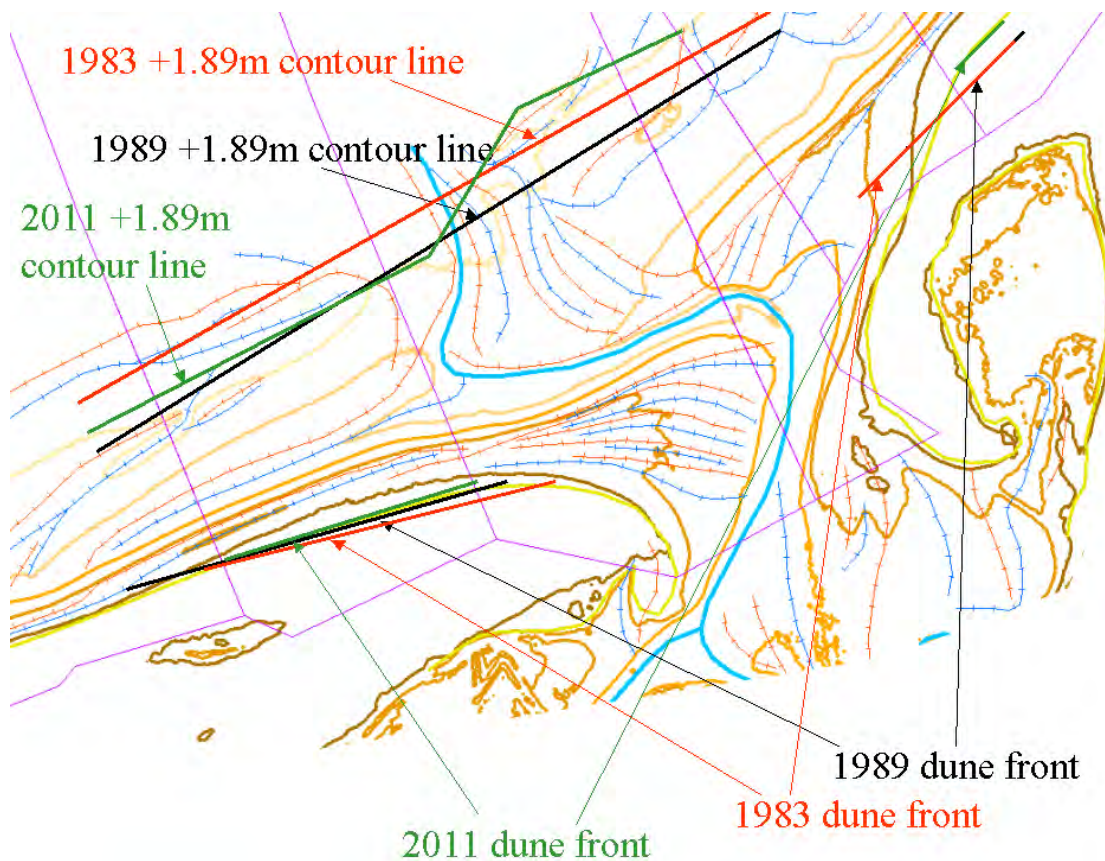
Zwinmonding :

- 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 25). Er trad tijdelijke duinafslag op 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 25 en Figuur 26.
- 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. Na de grote suppletie van 1977 tot 1979 werd er wel zonevreemd materiaal afkomstig van de suppletie (Eocene materiaal met haaien- en roggentanden) teruggevonden in het Zwin. Men dient hierbij wel te vermelden dat deze suppletie reikte tot op 1 km ten westen van de Zwingeel. In 1988 werd ook ter hoogte van de Zwinmonding de vorming van een strandrug ter hoogte van de hoogwaterlijn waargenomen. Deze strandrug had de neiging de geul oostwaarts te duwen.
- Er kan een duidelijk verband gelegd worden tussen suppleties aan de Nederlandse zijde (tot het Uitwateringskanaal van Cadzand) en sterker zandtransport richting het Zwin. Dit werd waargenomen in de vorm van de ontwikkeling van zandtongen, verbonden aan de gesuppleerde zones aan de Nederlandse zijde. Het zand voor deze suppleties is veelal afkomstig van werken aan de Zwingeel (verleggen van de geul) en de zandvang (Houthuys et al., 2013)
- 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 m³/jaar), vergeleken met het totale langstransport (typisch enkele 100 000m³/jaar).

Zwinschorre:

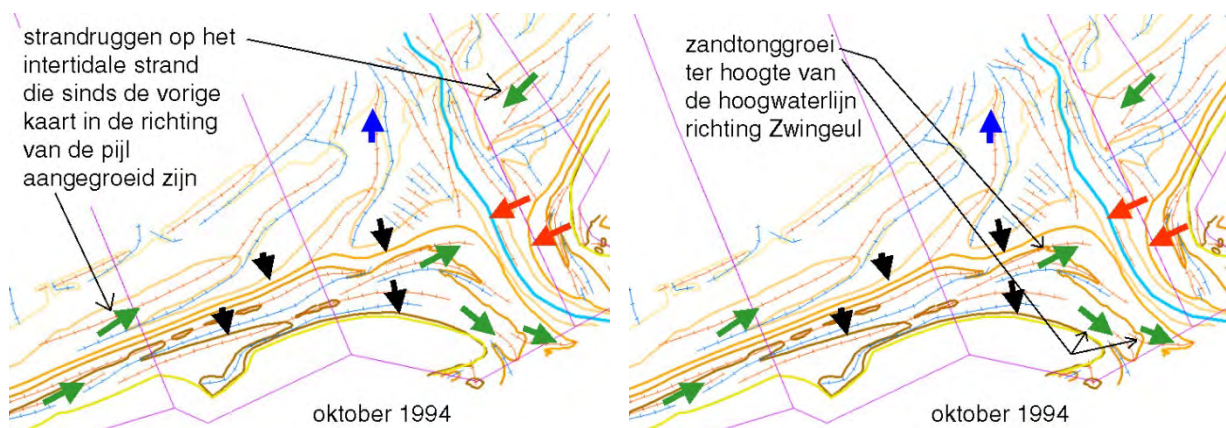
- De Zwinschorre, het schor binnen het Zwin, is zuidelijk van de zandvang niet aantoonbaar in hoogte toegenomen tussen 1987 en 2007. De netto invoer van sediment naar de schorre wordt, afgezien van de grote onzekerheid van de metingen, op maximaal 3000 m³/jaar ingeschat.
- De aanvoer naar de zandvang zelf wordt tijdens zijn gebruikperiode op 41 000 m³/jaar ingeschat. De zandvang fungeert echter mogelijk als zandaantrekker. Het zand gewonnen uit de zandvang werd hoofdzakelijk benut voor suppleties van het droogstrand en duinfront aan Nederlandse zijde van de Zwingeel.

Figuur 25: Vergelijking van de ligging van de kustlijn bij het Zwin in 1983, 1989 en 2011.



Morfologie van 2011 als achtergrond, Houthuys (2013)

Figuur 26: Voorbeeld van aangroei van strandruggen op het intertidale strand en zandtongen boven de hoogwaterlijn t.o.v. de vorige opname (juni en oktober 1994).



Houthuys (2013)

2.4.3 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 echter 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 Zwinmondig. Beide processen vergen echter nader onderzoek om tot een conclusie te kunnen komen.

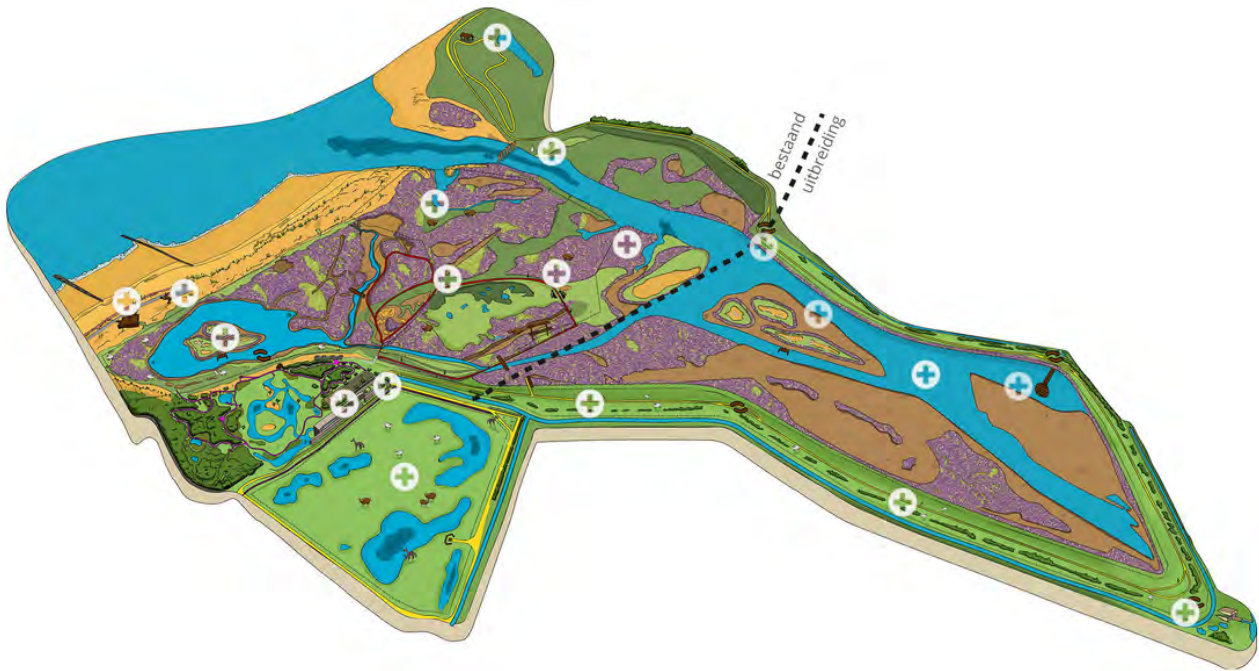
Durieux (2003) heeft met een Sobek (1D) model de stabiliteit van de Slufter op Texel onderzocht. Daar zorgt geulmigratie voor een langere geul en scherpere bochten met plaatopbouw in de binnenbocht. De Slufter is ebdominant (de stroomsnelheden in de geul zijn hoger tijdens eb dan tijdens vloed, wat resulteert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

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.

2.4.4 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 27) 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 27: Artist impression van de geplande uitbreiding van het Zwin.



2.5 Paardenmarkt

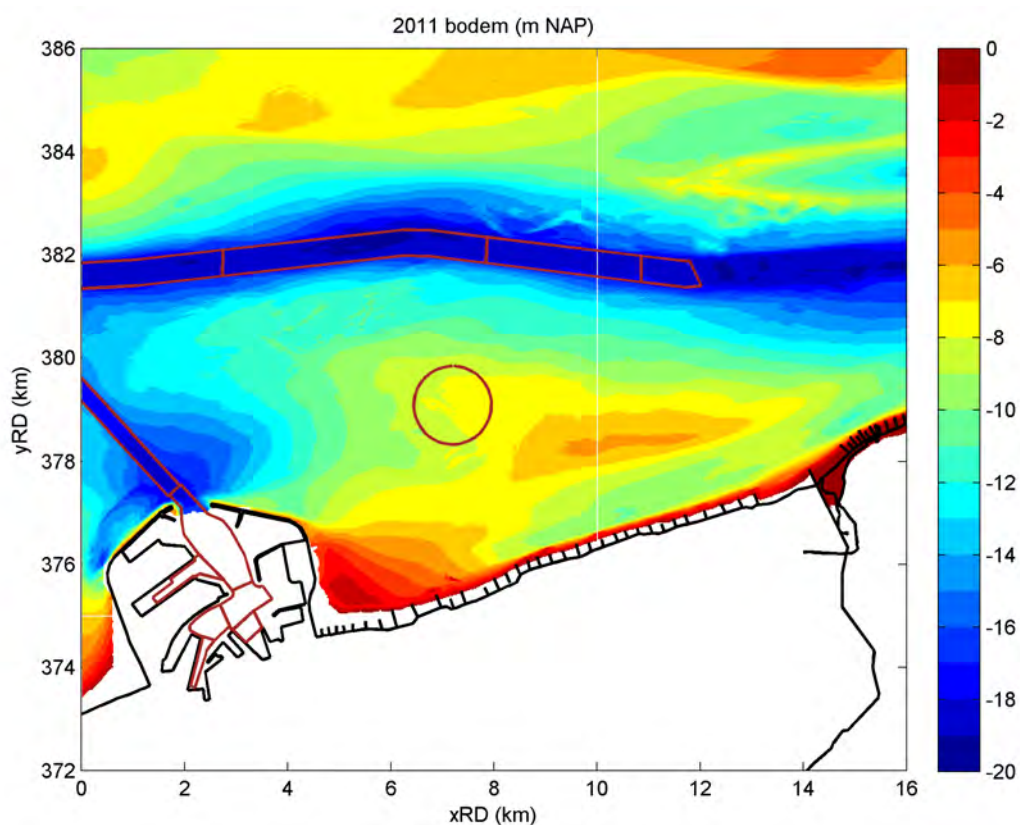
2.5.1 Situering

De Paardenmarkt is een ondiepte (-3 m LAT¹ volgens Trouw et al., 2015) tussen de haven van Zeebrugge en het Zwin, zie Figuur 28. Deze ligt ten noordoosten van de Baai van Heist in de luwte van de oostelijke havendam. Ten zuiden ervan ligt de getijgeul Appelszak die dicht voor de kust van Knokke-Heist ligt. De Paardenmarkt strekt zich uit tot ongeveer 5 km vanaf de kust.

Aan de noordwestelijke rand van de Paardenmarkt ligt het stortvak Zeebrugge-Oost (ZBo). Hier wordt voornamelijk sediment afkomstig uit de haven van Zeebrugge gestort (Figuur 29); 2,6 miljoen TDS/jaar in de periode 1984-2014 (Vroom & Schrijvershof, 2016). Dit is voornamelijk slib, orde 60-90% (Vroom & Schrijvershof, 2015). Met de door hen gehanteerde omrekenfactor $1 \text{ m}^3 = 0,94 \text{ TDS}$, oftewel een (droge) bulkdichtheid van 940 kg/m^3 , correspondeert dit met 2,8 miljoen m^3 /jaar. Figuur 29 laat zien dat de stortvolumes vrij gelijk verdeeld zijn over de tijd, met een lichte daling rond de millenniumwisseling.

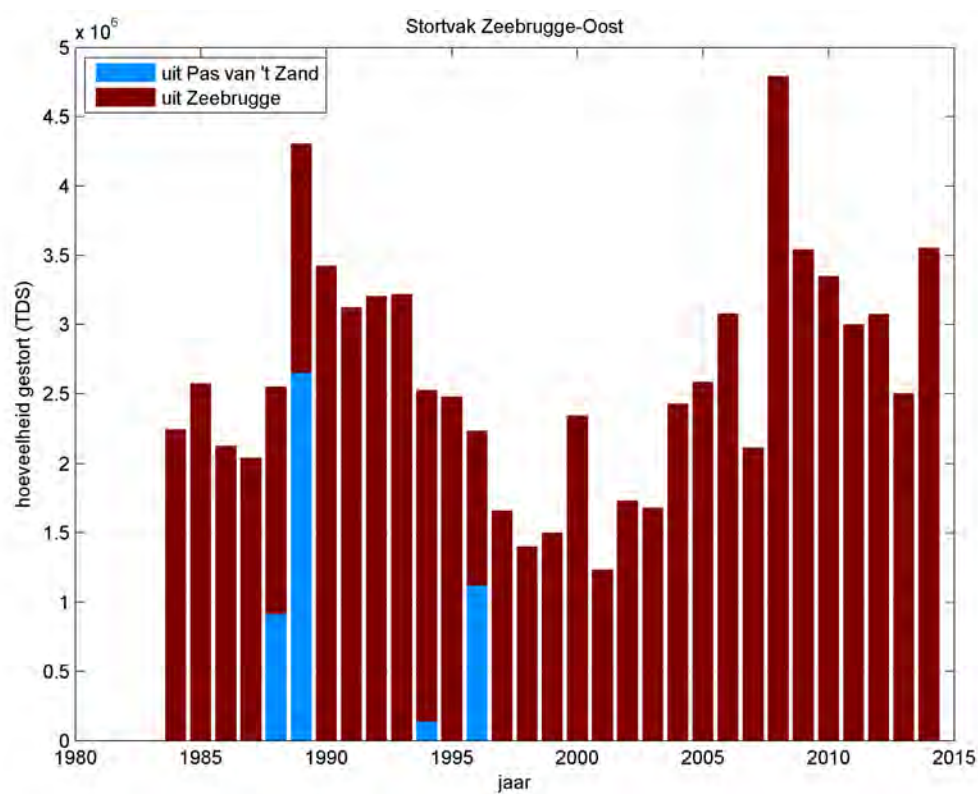
¹ LAT ligt bij Zeebrugge in 2015 2,56 m beneden NAP (Vroom & Schrijvershof, 2015)

Figuur 28: 2011 bodemligging in de nabijheid van de haven van Zeebrugge.



De polygonen geven de ligging van baggerzones en stortvak Zeebrugge-Oost ten noordwesten van de ondiepte Paardenmarkt.

Figuur 29: Stortvolumes stortvak Zeebrugge-Oost in de periode 1984-2014.

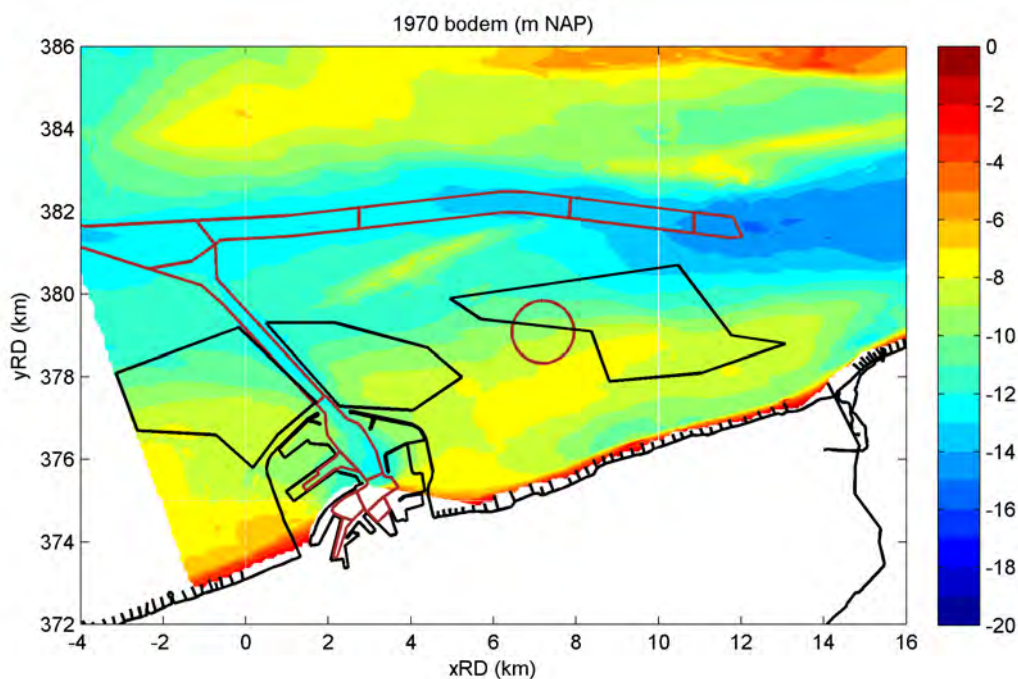


2.5.2 Morfologische ontwikkeling

De Appelzak getijgeul is zichtbaar op de nautische kaart uit 1825. Het langstransport werd nog niet geblokkeerd door de havendammen van Zeebrugge, waardoor de Appelzak vloeddominant was en feitelijk een vloedschaar. De Paardenmarkt lag ondiep en beschermde de kust, maar de hoogte begon af te nemen. In de nautische kaarten uit 1825 en 1900/1908 was de Paardenmarkt verbonden met de kust nabij Cadzand. In 1931/1938 was deze verbinding verdwenen en lag de Paardenmarkt lager. (Trouw et al., 2015)

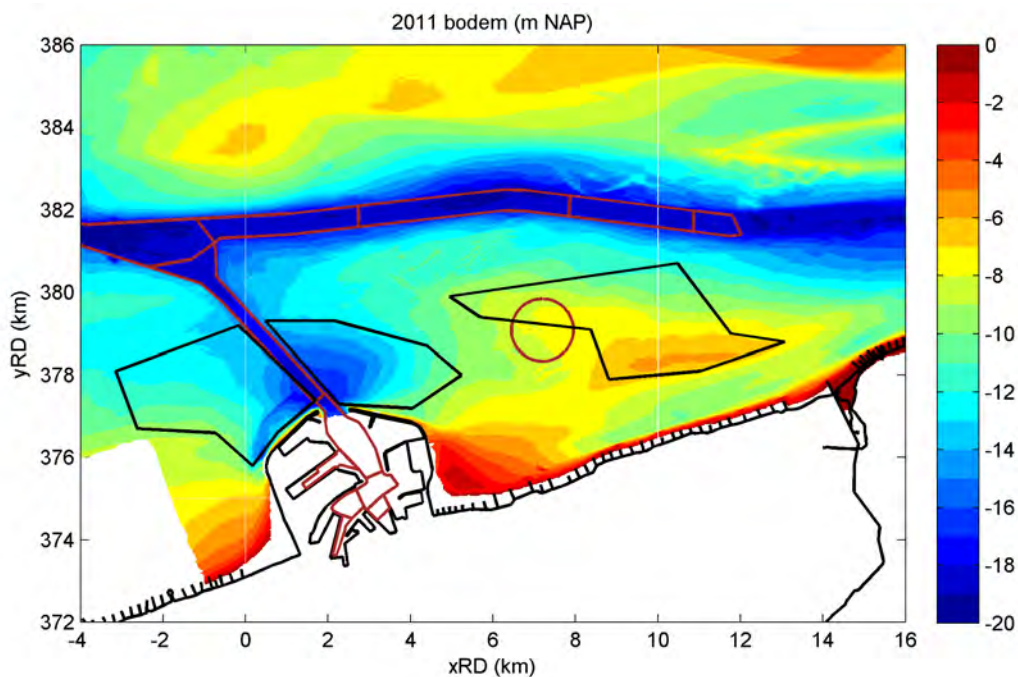
Uit de Vaklodingen dataset blijkt dat de Paardenmarkt tussen 1970 en 2011 sedimenteerde (Figuur 30 tot Figuur 32), lokaal meer dan 4 m. Deze aanzanding treedt voornamelijk op vanaf de begin jaren '80 (Figuur 33), en lijkt gekoppeld te zijn aan de erosiekuil die ontstaan is door de uitbreiding van de haven van Zeebrugge in de periode 1979-1986. De laatste jaren lijkt zowel de erosie als de aanzanding zich te stabiliseren. Het erosievolume is hoger dan het sedimentatievolume, omdat een deel waarschijnlijk elders bezinkt, b.v. in de Baai van Heist; de oksel direct ten oosten van Zeebrugge.

Figuur 30: Bodemligging Paardenmarkt en omgeving in 1970. Bruine polygoenen: vaarpassen en stortvak Zeebrugge-Oost.



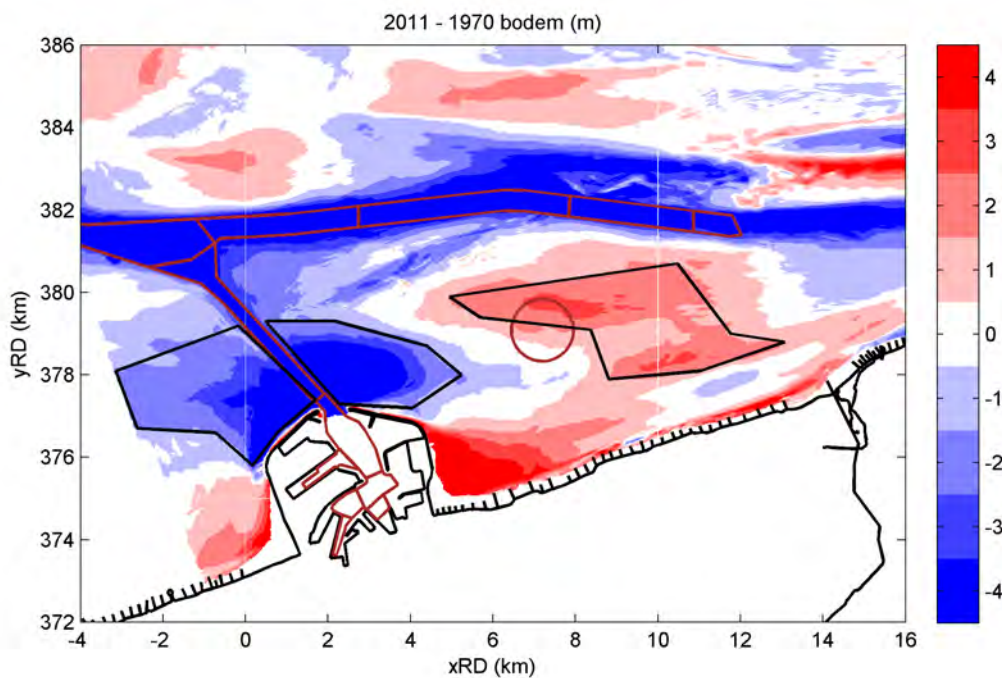
De zwarte polygoenen zijn gebruikt voor een sedimentbalans

Figuur 31: Bodemligging Paardenmarkt en omgeving in 2011.



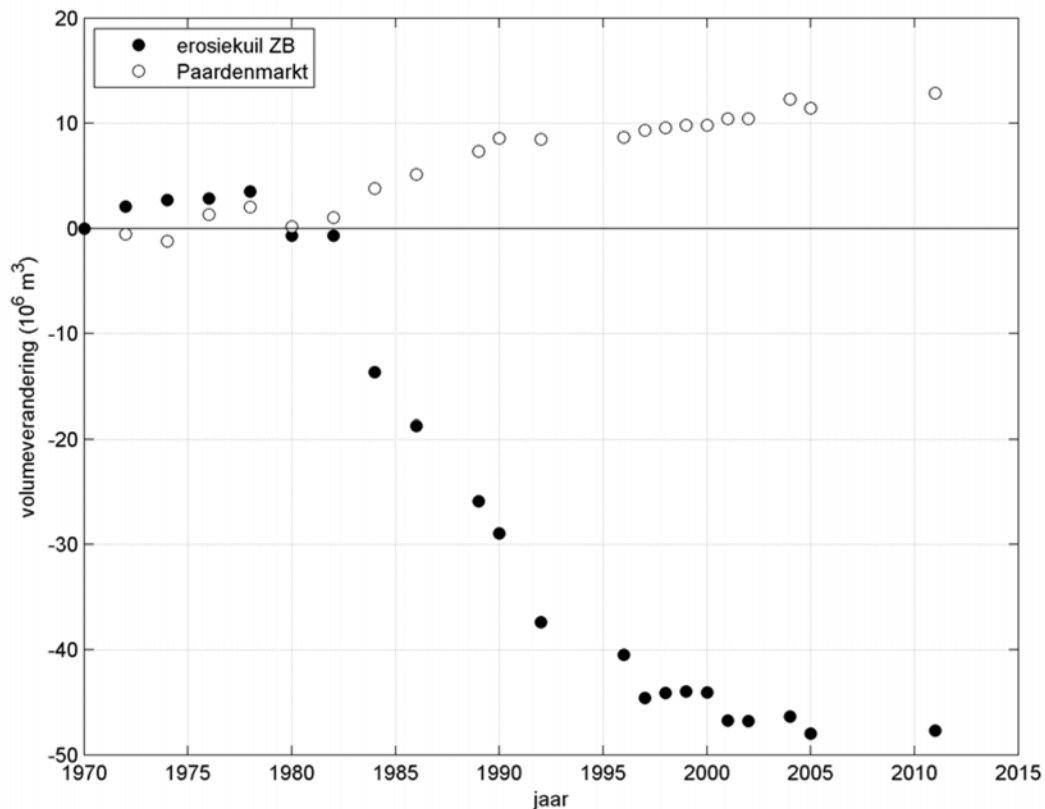
Bruine polygonen: vaarpassen en stortvak Zeebrugge-Oost. De zwarte polygonen zijn gebruikt voor een sedimentbalans.

Figuur 32: Verschilbodem Paardenmarkt en omgeving, 2011-1970.



Bruine polygonen: vaarpassen en stortvak Zeebrugge-Oost. De zwarte polygonen zijn gebruikt voor een sedimentbalans. Positieve waarden duiden op sedimentatie.

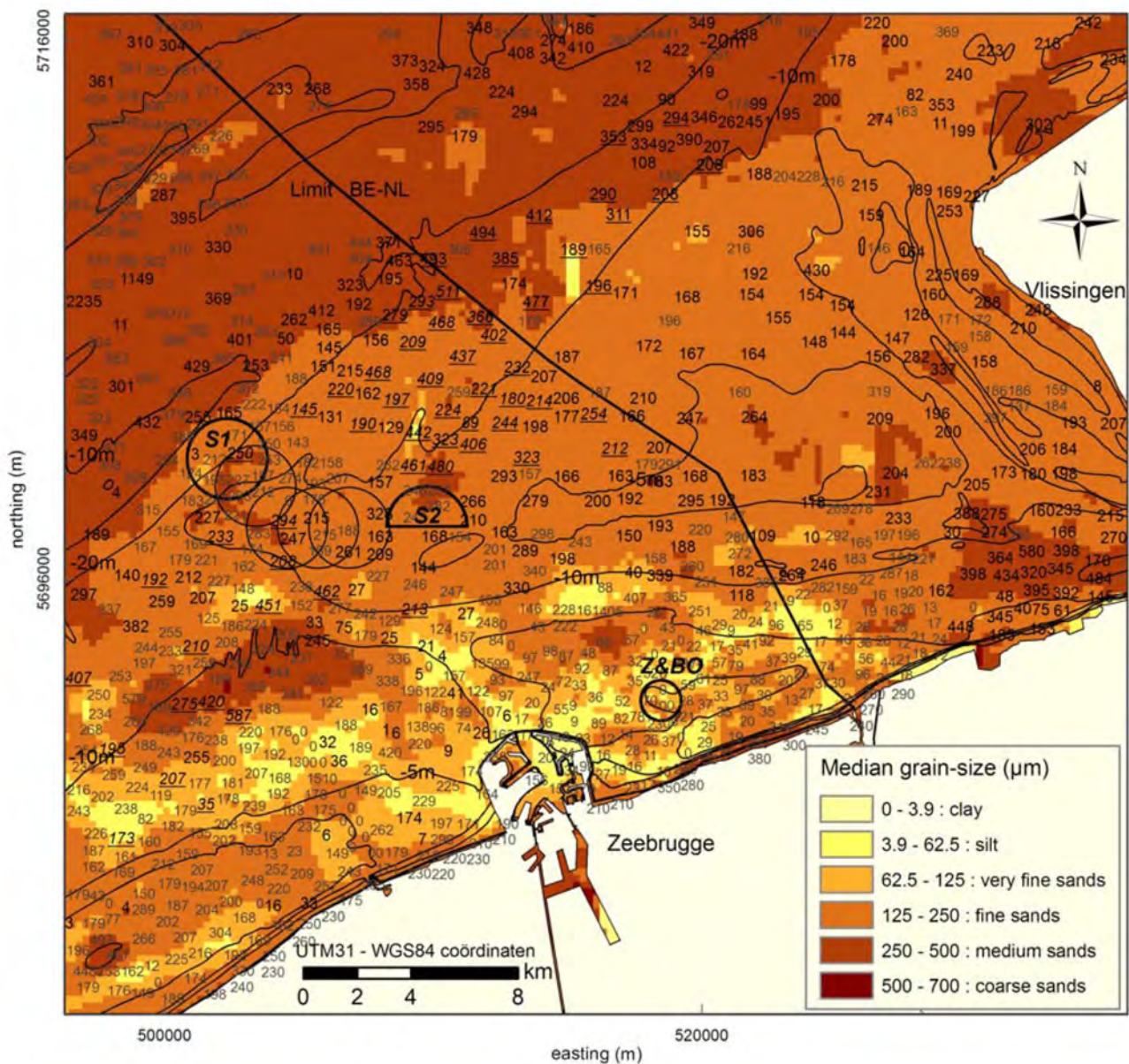
Figuur 33: Volumeverandering (relatief t.o.v. 1970) erosiekuil Zeebrugge en Paardenmarkt.



2.5.3 Sedimentsamenstelling

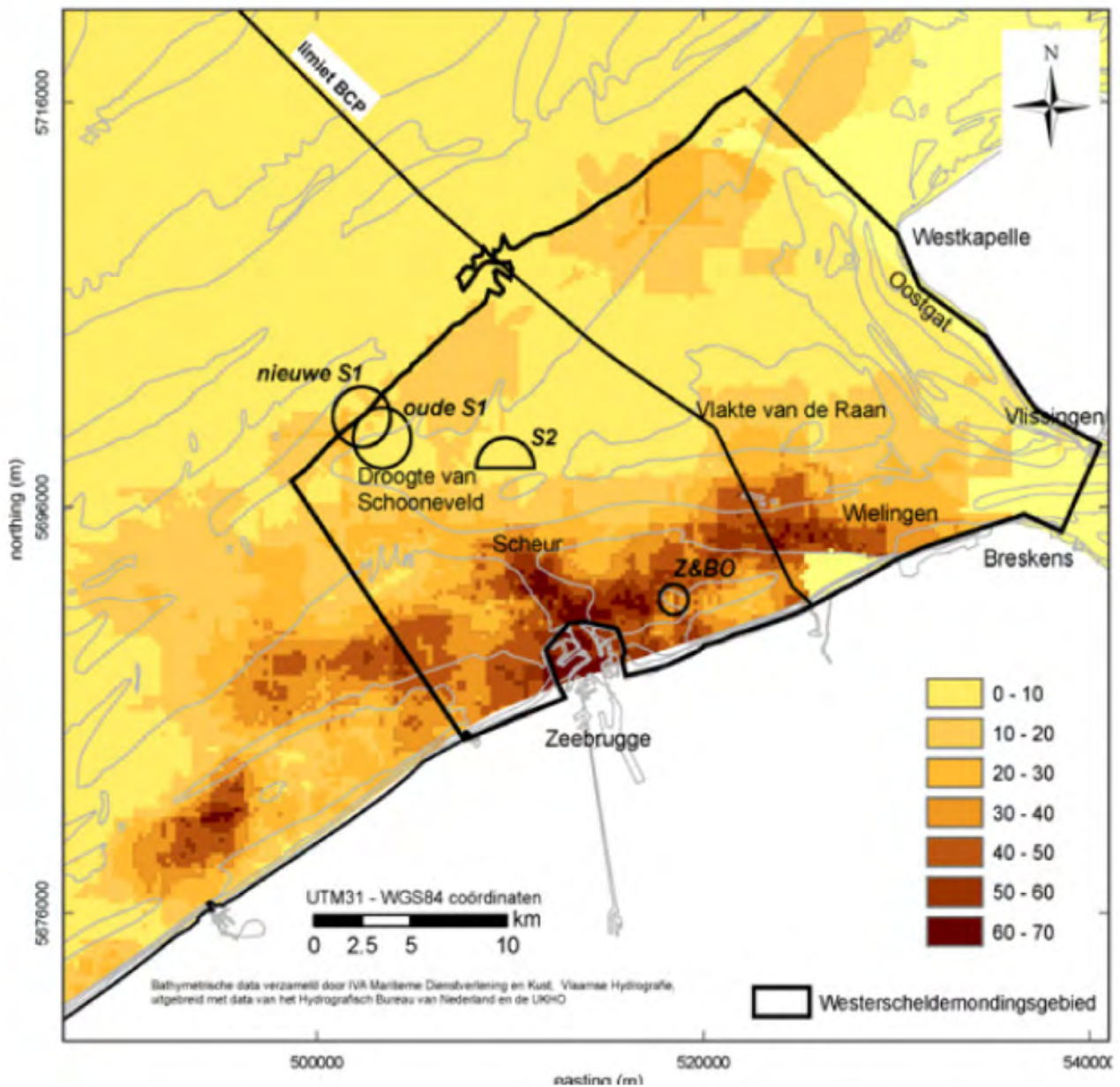
Het bodemsediment in het interessegebied is vrij heterogeen, zie Figuur 34 en Figuur 35. Het gebied rondom Zeebrugge is vrij slibrijk. Het is opmerkelijk dat de sterke erosie bij de koppen van de havendammen niet heeft geleid tot de aanwezigheid van grof sediment. Lokale bronnen van slib zijn de gestorte specie in de nabijgelegen stortvakken, en de aanwezigheid van Holocene slib (zie Figuur 36). Bij de Paardenmarkt is het zand fijn met een D50 van ca. 0,1 mm (zie Figuur 34).

Figuur 34: Kaart met D50 in interessegebied.



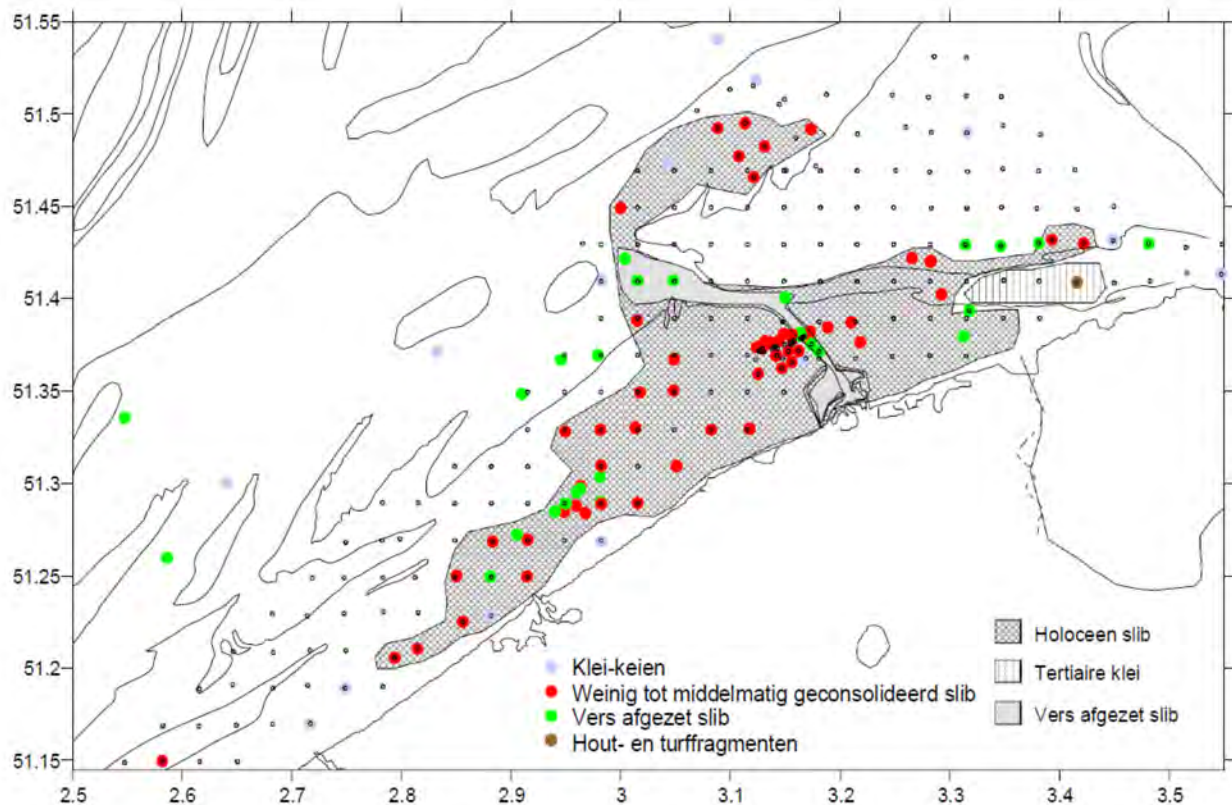
Van Lancker et al. (2012)

Figuur 35: Percentage slib interessegebied.



Van Lancker et al. (2012)

Figuur 36: Verdeling van cohesief sedimenten op het BCP.



In de zwarte punten werden stalen genomen. Zwarte punten zonder kleur geven zandig sediment aan. De hout- en turffragmenten (bruine stippen) zijn van Holocene ouderdom. De bulkdichtheid van het vers afgezette slib (groen) is ca. 1300 kg/m^3 en dat van het Holocene slib (weinig tot middelmatig geconsolideerd; rood) $1500\text{-}1800 \text{ kg/m}^3$. Uit Lauwaert et al. (2006).

2.5.4 Discussie

Er is een sterke correlatie tussen de erosiekuil door de havendammen van Zeebrugge en de sedimentatie van de Paardenmarkt in de periode 1984-2014. Beide namen sterk toe na het gereedkomen van de uitbreiding van de haven van Zeebrugge begin jaren '80. De laatste jaren (sinds ~2000-2005) stabiliseren de erosie en aanzanding. Het vrijgekomen sediment uit de erosiekuil is waarschijnlijk slibrijk.

Deze sedimentatie is waarschijnlijk versterkt door de stortingen in ZBO. De gestorte volumes in stortvlak Zeebrugge-Oost (ZBO), juist ten noordwesten van de Paardenmarkt, zijn vrij constant in de periode 1984-2014. Er wordt hier jaarlijks ~3 miljoen TDS gestort. Deze specie is voor het overgrote gedeelte afkomstig uit de haven van Zeebrugge, en dus erg slibrijk.

Het sediment bij de Paardenmarkt is fijn met een gemiddelde D50 rond de 0,1 mm. Het percentage slib ligt tussen de 20 en 40%.

Vroom et al. (2016) bespreken dat sediment ten oosten van Zeebrugge convergeert als gevolg van residuele stroming en getijasymmetrie.

3 Modellerings

3.1 ZWeM zand-slib

3.1.1 Modelbeschrijving

Het ZWeM zand-slib model (Vroom et al., 2016) is opgezet om het transport van slib (3 fracties, met valsnelheden van 0.5, 2 en 4 mm/s) en zand ($d_{50} = 200 \mu\text{m}$) in de omgeving van Zeebrugge en Westerscheldemonding te berekenen op een tijdschaal tot enkele jaren. Op deze tijdschaal is de bodemsamenstelling van het model in een dynamisch evenwicht. De beperking in simulatieduur van enkele jaren is het gevolg van rekentijd (fijne roosterresolutie en 3D) en de initiële sedimenthoeveelheid. Er wordt gerekend met een initiële zandlaag van 30 cm, wat voldoende is om slib te bufferen en om baggeren en storten van zandig materiaal in te schatten, maar niet om lange-termijn effecten van grootschalige morfologische veranderingen (geulverdieping, geulmigratie, erosie eilanden) te modelleren. Werken met een dikkere bodemlaag is niet praktisch omdat het erosiegedrag van de bodem wordt bepaald door de verhouding van de fracties wat de nodige inspeeltijd vergt; deze inspeeltijd neemt toe bij toenemende bodemdikte.

Het model is daarom vooral geschikt om initiële aanslibbing / erosie van zand en van slib en sedimentconcentraties in de waterkolom te berekenen. Het model is gekalibreerd op hydrodynamica (waterstanden, getijasymmetrie, residuele stroming, stroomsnelheden, saliniteit, golven), het grootschalig langtransport (20-30 miljoen ton/jaar) en sedimentconcentraties en bagger- en stortvolumes (beide binnen factor 2). De kalibratie wordt uitvoerig beschreven in (Vroom et al., 2016). In Bijlage B zijn de belangrijkste parameterinstellingen opgenomen.

Er bestaan onzekerheden over een aantal fysische processen die het slibtransport in de Belgische kustzone sturen, vooral gerelateerd aan de hoge sedimentconcentraties en de rol van een mogelijke lokale (Holocene) slibbron. Daarom zijn er twee modelvarianten opgezet, met verschillende parameterisaties:

- 1) Een variant met Holocene slibbron (met moeilijk erodeerbaar slib) ter grootte van ca. 3,5 miljoen ton/jaar. De ligging van deze bron is gebaseerd op literatuur, en ligt in het gebied waar de scenario's gepland zijn (Figuur 36). De exacte bodemsamenstelling, ligging en grootte van de bron is echter onbekend. Met deze modelaanpak worden echter de sedimentconcentraties nabij de bodem onderschat. (Alternatief 4 in Vroom et al., 2016)
- 2) Een variant waarbij geen Holocene slibbron wordt meegenomen, maar waarbij de depositieflux wordt verminderd. Hierdoor nemen de sedimentconcentraties in de waterkolom toe tot waardes overeenkomend met metingen. De hoeveelheid slib die in deze modelvariant wordt gebaggerd is echter aan de lage kant. (Alternatief 5 in Vroom et al., 2016)

Ten opzichte van het gekalibreerde ZWeM-model zijn enkele wijzigingen toegepast:

- Om de eilanden met voldoende resolutie in het model te kunnen opnemen, is een domeindecompositie (DD) toegepast, waarbij de roosterresolutie rond de haven van Zeebrugge tot 50-70 m is gereduceerd. De resultaten van dit DD model vertonen geen afwijkingen met het originele model en de lokale stroomsnelheden zijn vergelijkbaar met die in het gedetailleerde Telemac model dat is gebruikt voor het nautisch ontwerp van de ingrepen. Ook het golfmodel heeft ter plaatse van de ingrepen een fijnere resolutie.
- Vanwege de rekentijd en de lage seizoenale dynamiek in het ZWeM model (zie Vroom et al., 2016 voor verklaring), wordt er een maand doorgerekend. In Bijlage B wordt de keuze van de representatieve simulatieperiode (mei 2014) toegelicht.

- De stortlocatie ten oosten van Zeebrugge (ZBO) is vervangen door stortingen op de reeds bestaande locaties S1 en S2 (50/50), zodat er niet op/vlakbij de eilanden wordt gestort.
- De onttrekking in de haven van Zeebrugge, in het grove model noodzakelijk voor het juist berekenen van baggervolumes, is gestopt omdat de grootte hiervan samenhangt met de gridcelgrootte in de havenmonding.

Het DD-model is doorgestart vanaf het ingespeelde ZWeM-model (inspeeltijd 1 jaar, resulterend in condities voor 31 december), maar gedraaid voor de maand mei. De maand mei is gekozen vanwege de representatief geachte golfcondities: Deze maand bevat van alle maanden in de beschikbare randvoorwaarden van 2014 de meest veelzijdige condities (zie Bijlage B voor overzicht), representatief voor de lange termijn. Mei 2014 kent golven uit zowel het zuid- als het noordwesten en zowel rustige als wat dynamischer condities die ook van belang kunnen zijn voor aanslibbing; om het effect van stormen op aanslibbing te bepalen is een andere maand geschikter. Om het effect van de initiële condities te minimaliseren (vanwege het verschil in rooster resolutie en vanwege de initiële condities) is het DD-model nog eens met dezelfde maand ingespeeld. Op de expertenworkshop in juni 2016 zijn de resultaten zonder deze extra maand bediscussieerd. Het systeemgedrag zichtbaar in de resultaten van de extra maand is niet sterk verschillend: patronen zijn over het algemeen vergelijkbaar in ligging en orde van grootte, zij het minder extreem en gladder.

Een belangrijke kanttekening bij de modelopzet is dat de aanleg van de eilanden (naast luwtegebieden waar aanslibbing optreedt door verminderde golfgedreven schuifspanningen) gebieden met stromingscontractie en daardoor lokaal verhoogde schuifspanningen genereert, waar erosie zal plaatsvinden. De hoeveelheid erosie die plaatsvindt wordt waarschijnlijk vooral gelimiteerd door de initiële sedimenthoeveelheid, en deze is verschillend voor beide modelvarianten als gevolg van de ontwikkelingen in de inspeelfase. De variant met Holocene bron kent in de omgeving van Zeebrugge een grote hoeveelheid (Holocene) slib in de bodem, waardoor er veel erosie kan plaatsvinden en er ook veel materiaal beschikbaar is voor sedimentatie. Deze variant zal daardoor tot een hoge inschatting van slibgehalten komen. In de variant zonder Holocene bron wordt de depositieflux onderdrukt om vergelijkbare concentraties slib in de waterkolom te bereiken. Deze variant zal lagere slibgehalten in de bodem en flufflaag berekenen en een hogere concentratie in de onderste waterlaag. De modelvarianten geven daarom een bandbreedte van de te verwachten aanslibbing en erosie.

3.1.2 Residuele stroomsnelheden

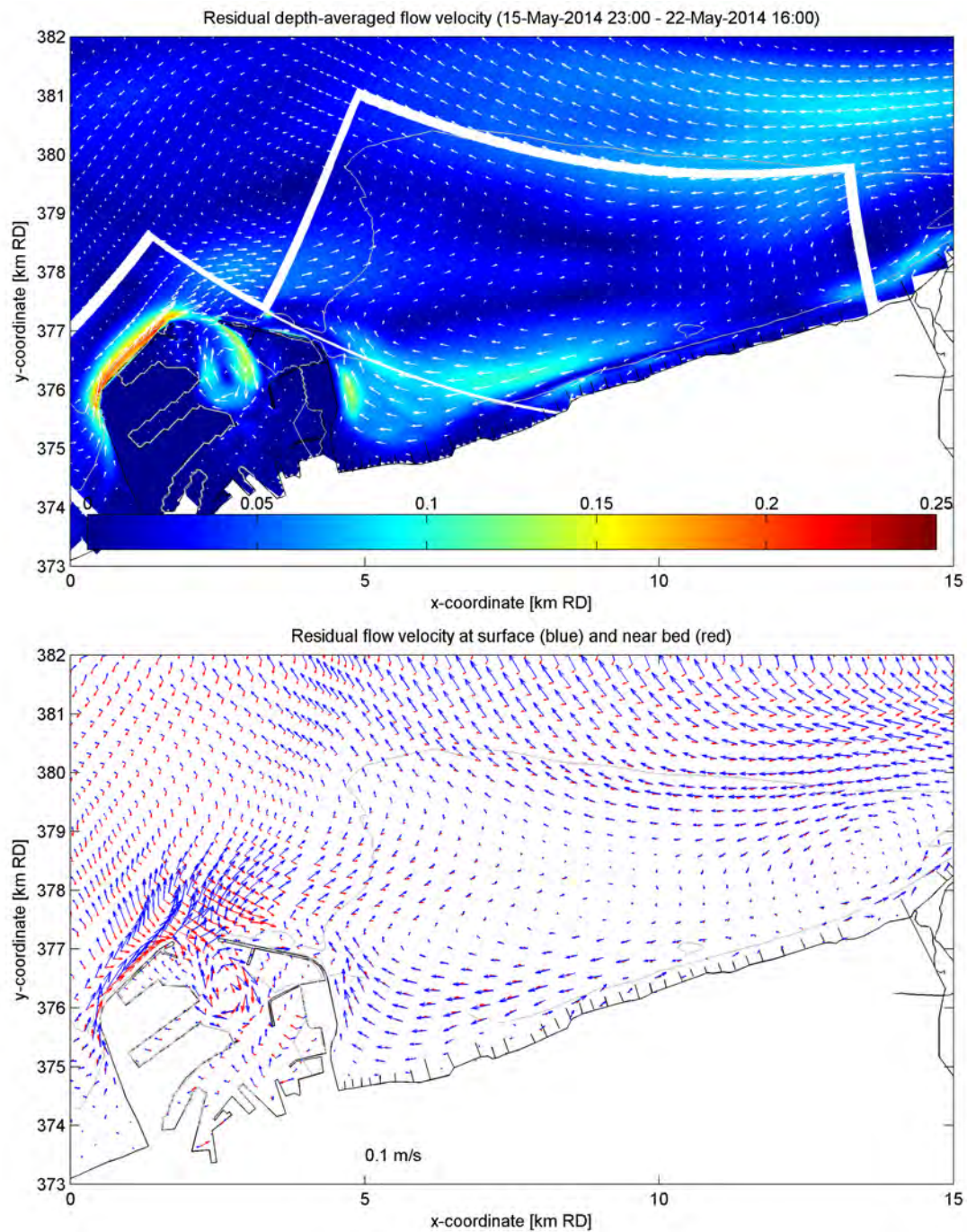
NB De instantane stroomsnelheden en golfhoogtes worden niet getoond omdat deze vergelijkbaar zijn met die van de andere gebruikte modellen.

Figuur 37 toont de residuele stroomsnelheden voor de variant met Holocene bron. Door de hogere ruwheid in de variant zonder Holocene bron zijn de stromingen daarin in het interessegebied net (tot ca 3 cm/s) lager, maar qua patroon sterk vergelijkbaar. De residuele stroomsnelheden laten een duidelijke neer zien in de haven van Zeebrugge, waar de stroming bij de bodem binnenkomt en aan het oppervlak netto zeewaarts gericht is. Het stromingspatroon in en ten noordwesten van de haven wordt niet wezenlijk beïnvloed door de onderzochte ingrepen (Figuur 38), wel levert de nieuwe opening aan de oostzijde een extra netto stroming de haven in.

Ter hoogte van de ondiepte Paardenmarkt ($x=8-12\text{km}$, $y=378\text{km}$; zie ook Figuur 27) zijn de residuele stroomsnelheden in de huidige situatie gering ($< 5\text{ cm/s}$). Voor het scenario E3 verandert dat weinig. Bij scenario E4 is er achter het eiland een duidelijke noordwestelijke reststroming, en het minder gestroomlijnde pilooteiland heeft een zeer sterk effect op de stroming.

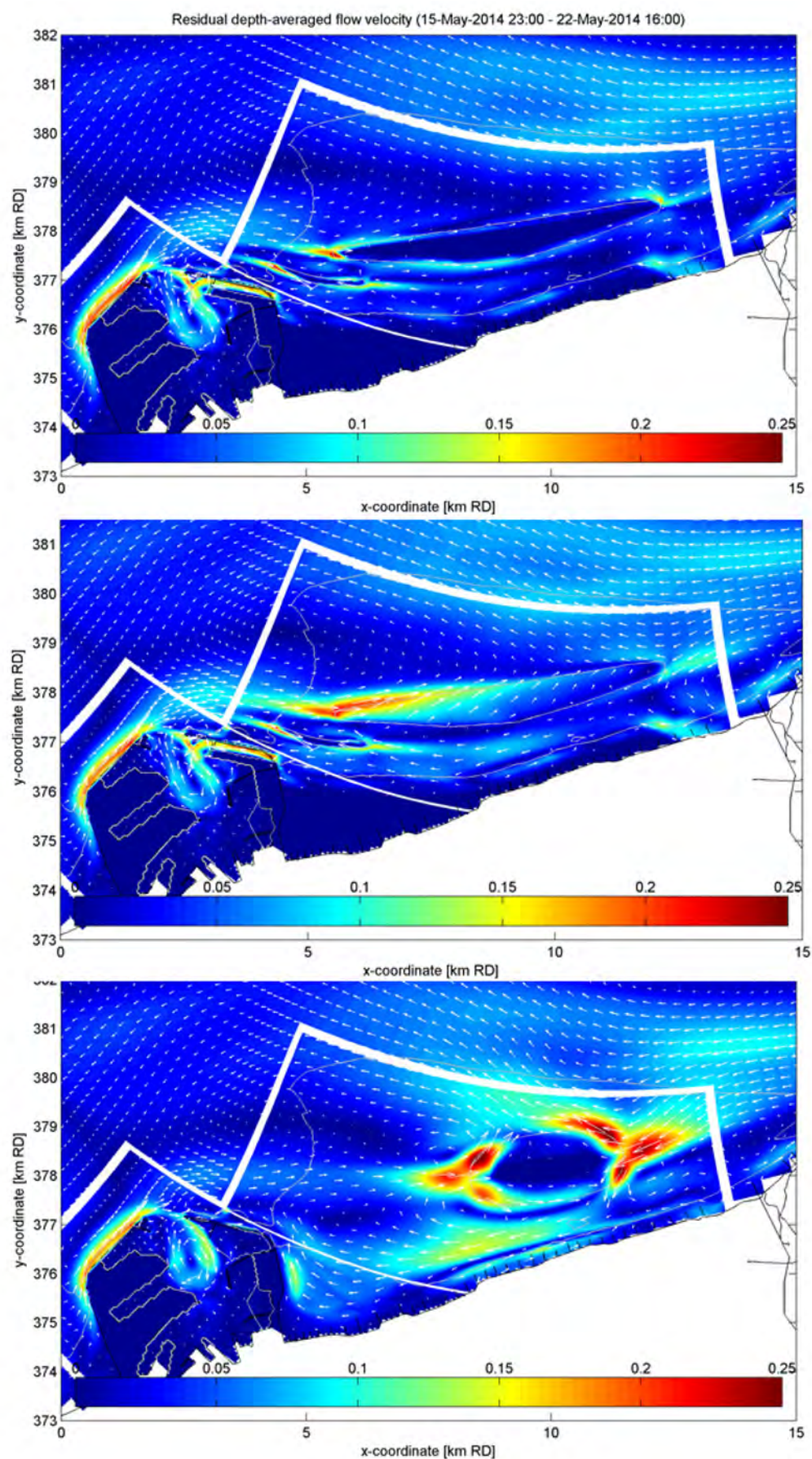
In de huidige situatie is er in de Baai van Heist een redelijk sterke (noord)westwaartse netto stroming. In de scenario's met strandverbreding (E3 en E4) wordt deze minder en ligt het patroon verder uit de huidige kust, maar de netto stroomrichting blijft westwaarts. Alle scenario's verminderen de oostwaartse stroming voor het Zwin.

Figuur 37: Residuele stroomsnelheden (m/s) in de huidige (referentie) situatie.



De witte lijnen geven de randen van de subdomeinen voor domeindecompositie weer. De stroomsnelheidsvectoren zijn een factor vijf uitgedund in de domeinen met een hoge horizontale resolutie.

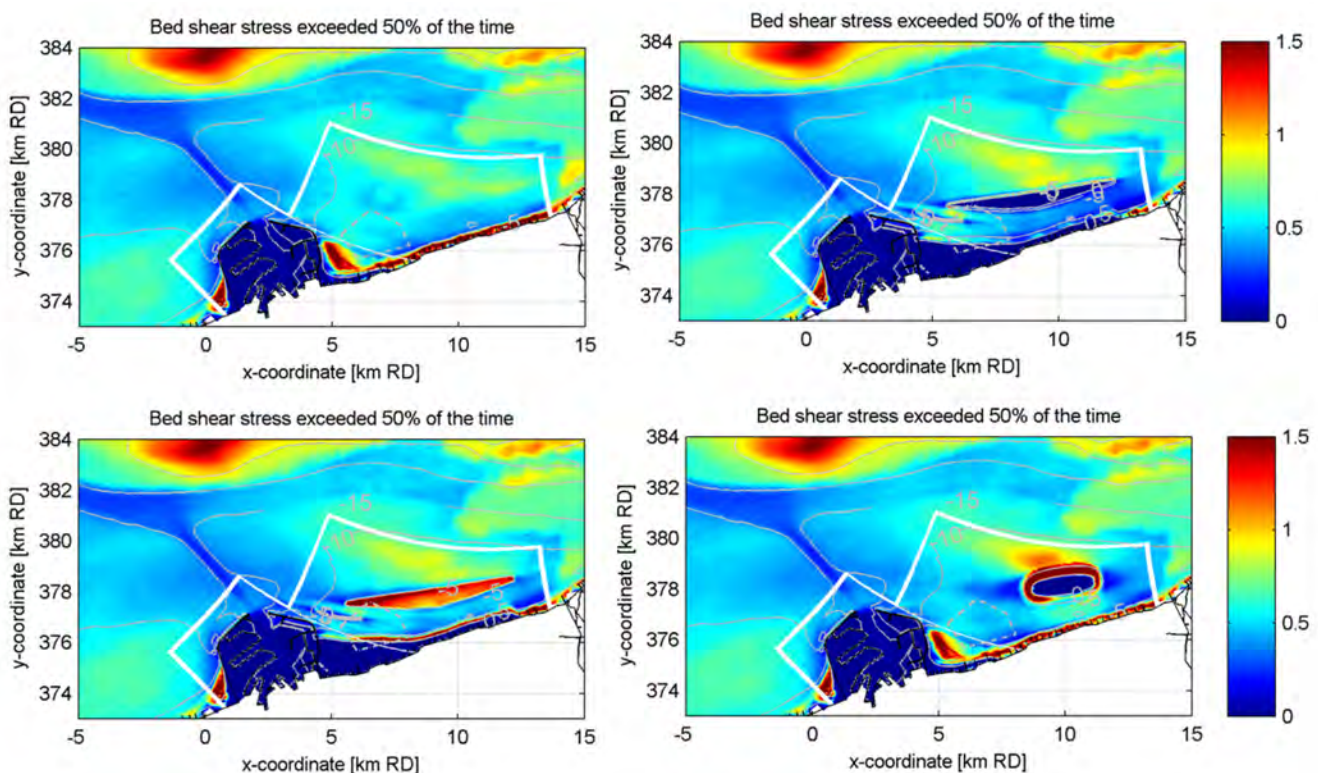
Figuur 38: Residuele dieptegemiddelde stroomsnelheden voor de onderzochte ingrepen. Van boven naar beneden: E3, E4, H1.



Bodemschuifspanningen

De ingrepen zorgen allen voor een matig (E3, E4) tot sterk (H1) verhoogde bodemschuifspanning aan de zeezijde van de ingreep, zie Figuur 39. Aan de landzijde van de eilanden verschilt het beeld. Het lange, hoge eiland E3 verlaagt de bodemschuifspanning over een groot gebied, het sterkst langs het strand en aan de oostelijke uitgang. Het overstroombaar eiland E4 handhaaft de bodemschuifspanning langs het strand grotendeels en kent maar een beperkte verlaging in de geul. De bodemschuifspanning op dit overstroombaar eiland zelf is verhoogd als gevolg van de sterke invloed van golven en de ondiepe ligging. Ingrep H1 zorgt, door de hoge stroomsnelheden, juist voor een hogere bodemschuifspanning aan de achterzijde van het eiland, maar heeft nauwelijks effect op de waarden langs het strand.

Figuur 39: Berekende bodemschuifspanning (Pa) voor variant met Holocene bron (en verlaagde ruwheid ter plaatse van bron) die gedurende de helft van de tijd overschreden wordt. Met de klok mee: referentie, scenario E3, H1 en E4.

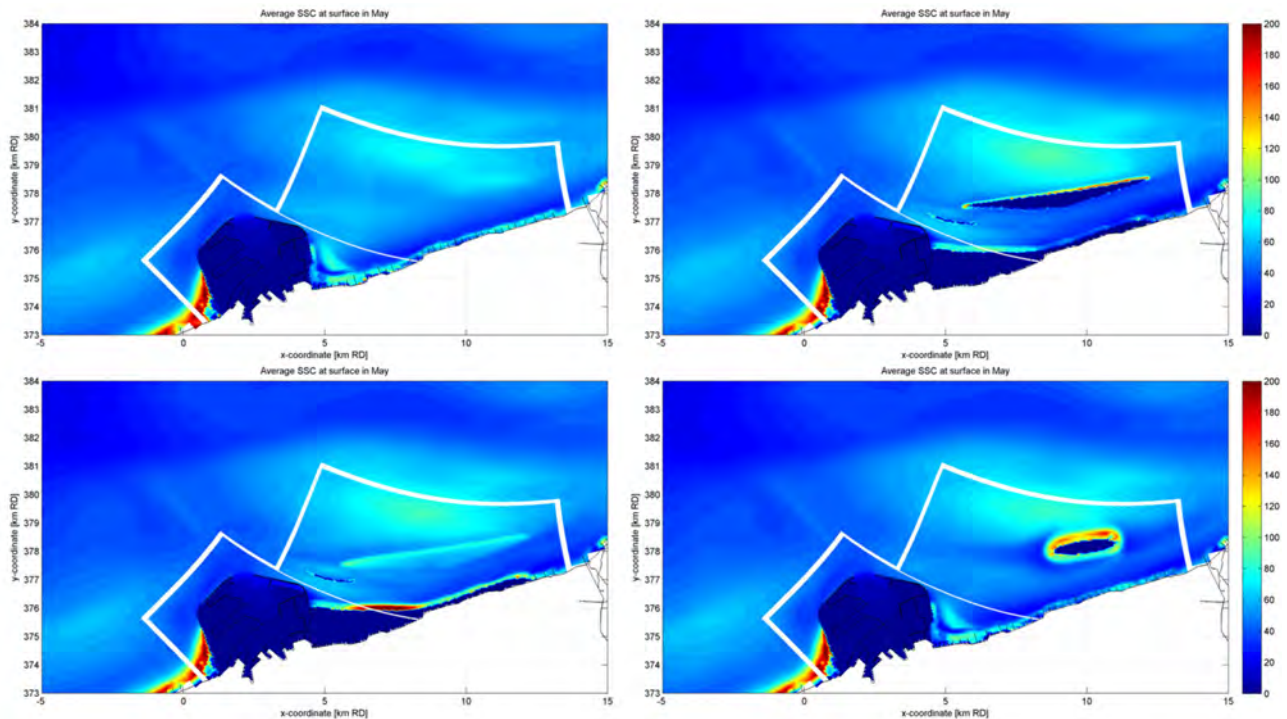


De gestippelde polygoon geeft de locatie van de munitiestort weer.

3.1.3 Slibconcentraties en transporten richting Westerschelde

De scenario's laten op enige afstand van de ingrepen nauwelijks verschillen zien in sedimentconcentratie ten opzichte van de referentie (Figuur 40), hoewel voor E4 de concentraties ten westen van de haven verhoogd zijn. Wel duidelijk zichtbaar zijn de verhoogde concentraties juist zeewaarts van de ingrepen en in de stroomgeulen langs de geleidedam in E3 en E4. In E3 zijn de concentraties achter het eiland en voor het daar gelegen strand iets lager dan in de huidige situatie, in E4 zijn ze juist iets hoger.

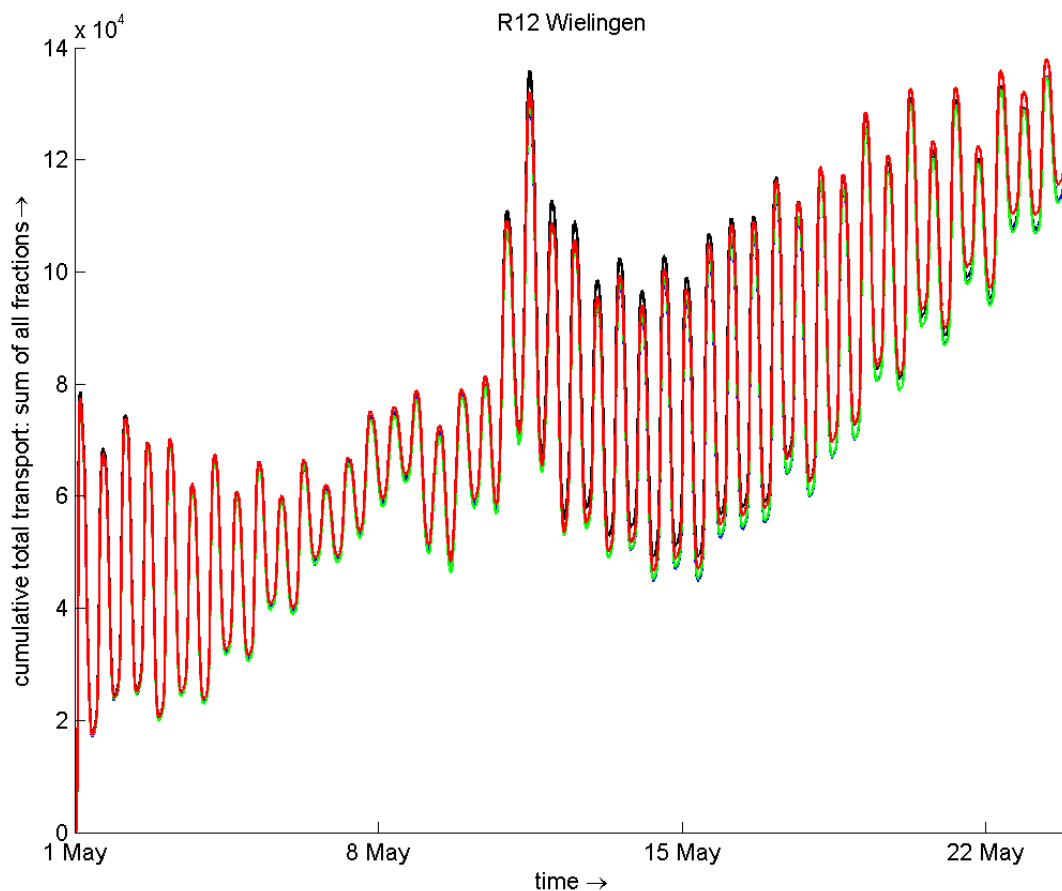
Figuur 40: Berekende gemiddelde concentratie van fijn sediment (mg/l) in de oppervlaktelaag (variant met Holocene bron).
Met de klok mee: referentie, scenario E3, H1 en E4.



NB De concentraties in de haven zijn laag omdat hier lokaal een veel grotere depositieflux wordt opgelegd. De hoge concentraties direct ten westen van de haven zijn een gevolg van de hoge bodemligging in combinatie met modelinstellingen: sediment wat hier tijdens hoog water terechtkomt sedimenteert niet maar wordt ook niet afgevoerd. Zonder Holocene bron zijn de patronen vergelijkbaar maar de concentraties lager.

Een vergelijking (Figuur 41) van de cumulatieve transporten richting Westerschelde over de maand mei over een dwarsdoorsnede over de Wielingen tot aan de Zeeuws-Vlaamse kust ter hoogte van Kruishoofd laat zeer beperkte verschillen tussen de referentiesituatie en de scenario's zien: altijd ruim kleiner dan de variatie in het transport over een getijslag. Ook zijn de verschillen veel kleiner dan de ontwikkeling in het cumulatieve transport over een maand en verandert de richting van het transport niet. In deze maand gaat circa 80 ton slib en 50 ton zand richting Westerschelde. Grootschalige hydrodynamische condities, zoals de springtij-doodtij (rond 8 mei) cyclus en de hogere windsnelheden rond 10-11 mei, hebben een veel sterkere invloed dan de ingrepen. Het pilooteiland H1 en ingreep E3 geven de kleinste verschillen met de huidige situatie. Voor het overstroombaar eiland E4 (rode lijn) geldt een marginaal groter transport richting estuarium.

Figuur 41: Cumulatieve sedimenttransporten (alle fracties) over de maand mei, voor een doorsnede Wielingen – kust.



Zwarte lijn = referentie, groen = E3, rood = E4, blauw = pilooteiland. Eenheid op verticale as: kg.

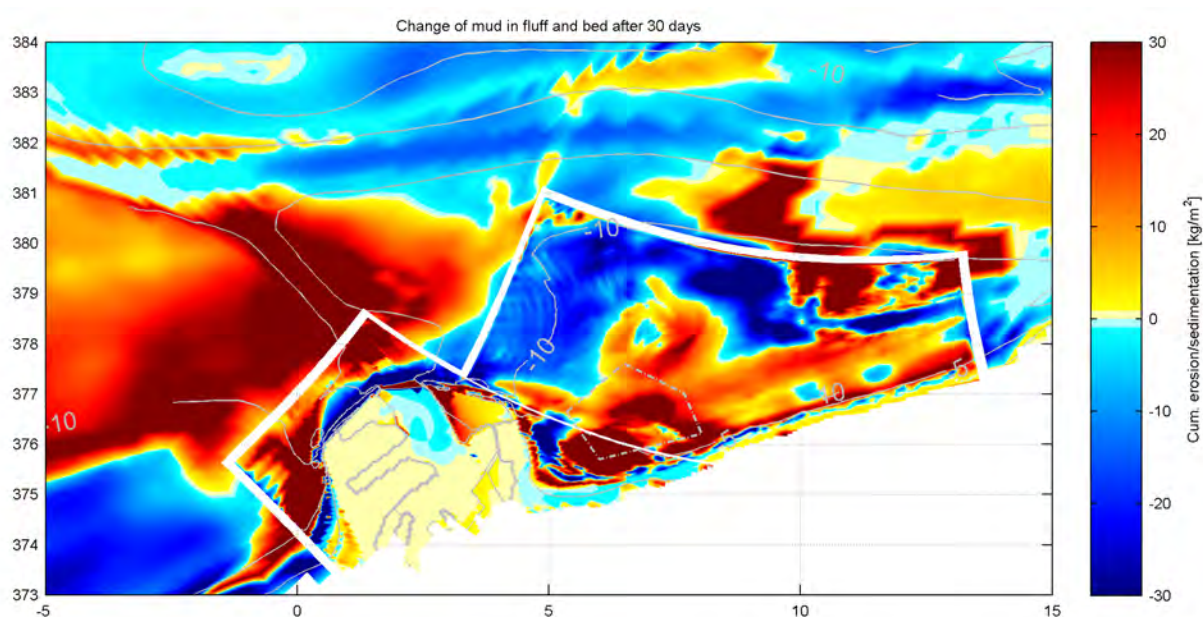
3.1.4 Verandering samenstelling bodem en flufflaag

Vanwege de korte simulatieperiode van het gebruikte ZWeM DD model moeten de sedimentatie-erosiepatronen beschouwd worden als initiële aanpassingen; ze geven geen informatie over lange-termijn ontwikkelingen. De plaatsen waar volgens het ZWEM-dd model erosie en sedimentatie optreedt, zijn over het algemeen goed vergelijkbaar met de andere modellen. Een wezenlijk verschil is dat het ZWeM DD model wel sedimentatie in de Baai van Heist laat zien, wat overeenkomt met de werkelijkheid. Dit wijst naar sedimentatie van fijn zand/slib in de Baai van Heist, mogelijk als gevolg van 3D effecten die in een vervolgstudie nader onderzocht worden. De berekeningen met het ZWeM model geven inzicht in hoe de samenstelling van de bodem en flufflaag (hier samen weergegeven) kunnen veranderen door de ingrepen.

Veranderingen met Holocene bron

In de variant met Holocene bron neemt de slibmassa in de huidige situatie op een aantal plaatsen toe (Figuur 42): in de Pas van het Zand en de gebieden direct ten westen en oosten ervan, het oostelijk deel van de Paardenmarkt en het gebied ten noorden daarvan tot aan Scheur Oost, boven de munitiestortplaats en in mindere mate boven stortplaats ZBO. Het Scheur, en het gebied ten noordoosten van de haven vertonen een afname van de slibmassa. Dit beeld komt overeen met de resultaten van een simulatie met het ZWeM-grof model voor dezelfde periode. Voor de kust bij Knokke en de Baai van Heist treedt overwegend sedimentatie van slib op. De twee lokale blauwe erosieplekken direct voor de kust ter hoogte van km 10 en 12 zijn waarschijnlijk het gevolg van de interpolatie van de initiële bodem vanaf de veel grovere ZWeM-grof resultaten (dit effect treedt in alle scenario's op).

Figuur 42: Toe- (rode kleuren) of afname (blauwe kleuren) van de massa slib (variant met Holocene bron), in het referentiescenario, na 30 dagen.

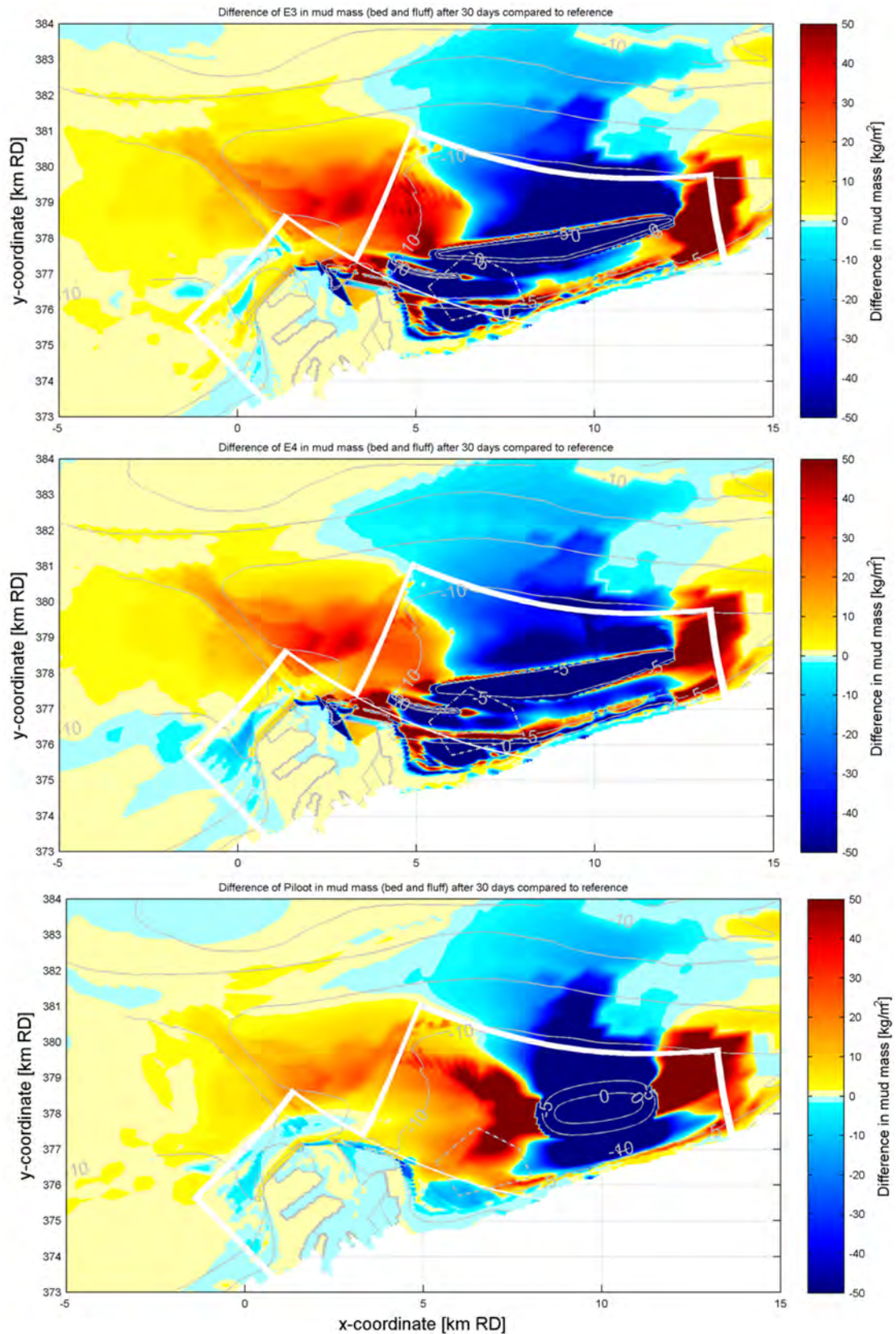


Ten opzichte van de referentie neemt in scenario's E3 en E4 de slibmassa direct ten oosten van de Pas van het Zand en ten noorden van de westelijke eilandtip af (tussen $x=0$ en $x=5$ km), en minder toe ten noorden van de Paardenmarkt (vergelijk Figuur 42 met Figuur 43). Wel wordt een grotere toename in slibmassa voorspeld bij de oostelijke uitgang (rond $x=13$ km). Een ander duidelijk verschil ten opzichte van de referentie is de afname in de hoeveelheid slib boven de munitiestortplaats. De slibmassa in de geul ten zuiden van het eiland neemt af terwijl het slibgehalte op het nabijgelegen strand toeneemt. De erosie is het gevolg van toegenomen stromings-geïnduceerde bodemschuifspanningen hier (zie Figuur 39), terwijl het eiland de golf-geïnduceerde bodemschuifspanning laat afnemen waardoor het strand slibrijker wordt. Het belangrijkste verschil tussen E3 en E4 is dat in E3 meer slib sedimenteert bij de oostelijke opening en vlak voor de stranden bij Knokke-Zoute (oostelijk van $x=10$ km), terwijl in E4 juist meer slib neerslaat ten westen van Knokke.

Voor het piloteiland H1 is een duidelijke toename direct ten oosten en ten westen van het eiland zichtbaar. Aan de westzijde loopt deze toename door tot boven de munitiestortplaats en het aangrenzend strand. De erosie in de geul tussen het eiland en het strand vindt plaats over een kortere afstand, maar is wel intenser (verklaarbaar met hogere bodemschuifspanningen, zie Figuur 39).

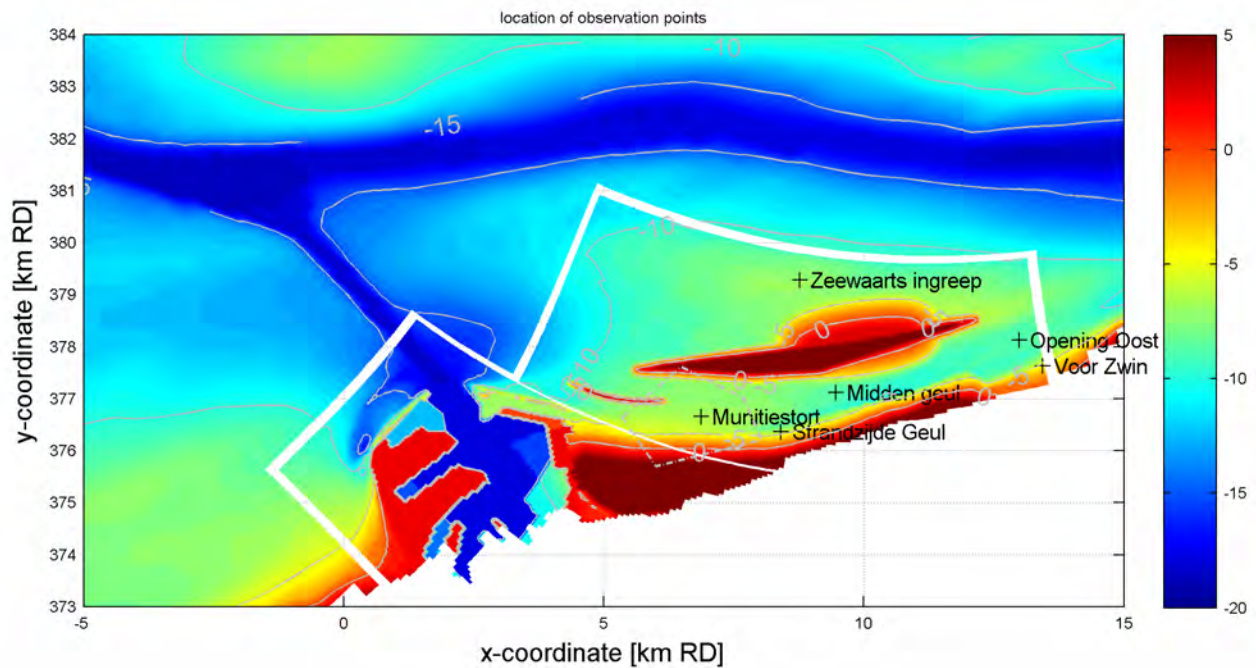
Omdat de massa van slib in de bodem sterk in tijd kan variëren onder invloed van golven en getij (springtij/doodtij) en de kaarten slechts een momentopname bieden is voor een aantal punten van interesse (Figuur 44) ook het verloop van de massa in de tijd weergegeven (Figuur 45).

Figuur 43: Toe- of afname van de massa slib na 30 dagen.
Van boven naar beneden: verandering in massa voor E3, E4, en H1.



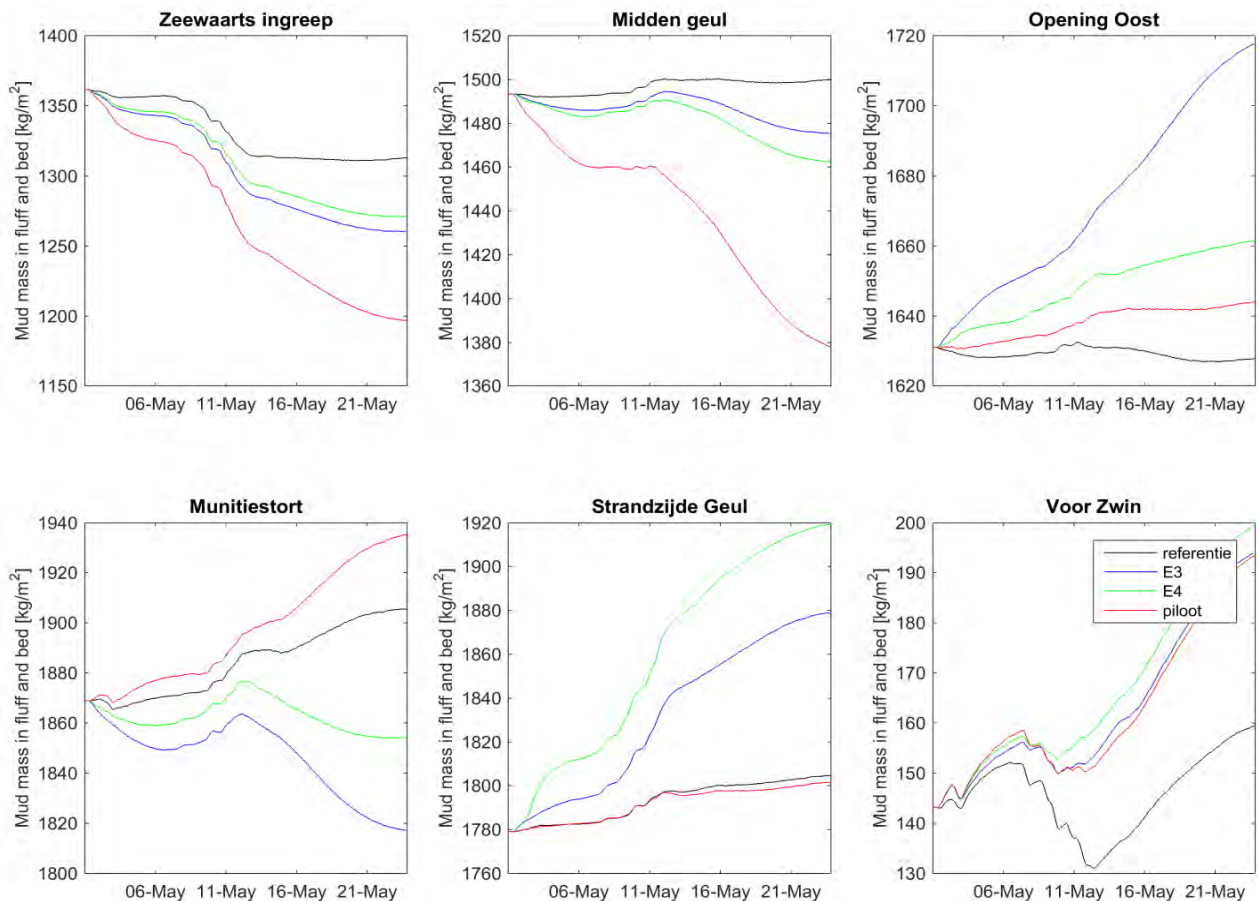
Variant met Holocene bron. Rood = toename massa t.o.v. de referentie simulatie. De eilanden zelf bevatten initieel geen slib.

Figuur 44: Locaties van de observatiepunten ten opzichte van de ingrepen.



Alle ingrepen zijn in combinatie met elkaar weergegeven

Figuur 45: Verandering in de massa slib (alle fracties) in de bodem (fluff + bodem) in de tijd.



Variant met Holocene bron. Voor ligging observatiepunten zie Figuur 43.

Hoe de hoeveelheid slib in de fluff- en bodemlaag varieert in de tijd verschilt sterk per locatie en per ingreep. Zeewaarts van de ingreep treedt voor alle scenario's erosie op die het snelst verloopt tijdens de dynamischer periode rond 10 mei. De hoeveelheid slib in het midden van de geul neemt in scenario's E3 en E4 licht af, terwijl het piloteiland H1 een sterke afname veroorzaakt. Hier blijft de hoeveelheid slib tijdens de dynamische periode vrijwel constant of neemt zeer licht toe. De oostelijke opening vertoont nauwelijks verandering in de referentiesituatie, een toename voor E4 en H1 en een zeer sterke toename van het slibgehalte voor E3. Bij de munitiestort zorgt E3 juist voor een afname, hoewel hier tijdens dynamischer condities ook slib neerslaat. Het piloteiland zorg hier voor extra slib ten opzichte van de eveneens sedimenterende referentie. De strandzijde van de geul is in alle gevallen sedimentierend, veel sterker in scenario's E3 en vooral E4 terwijl het piloteiland hier geen merkbaar verschil met de referentie laat zien. Voor het Zwin treedt niet alleen versnelde sedimentatie van slib op in de onderzochte scenario's, het opruimen van slib tijdens dynamischer condities is ook beperkt ten opzichte van de referentie.

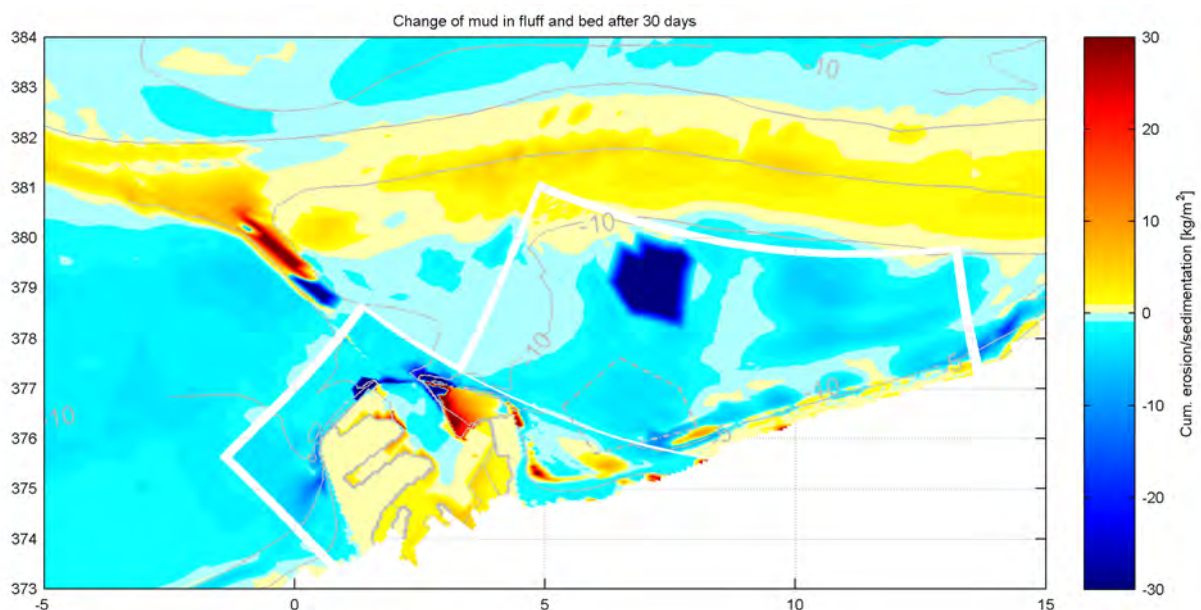
Veranderingen zonder Holocene bron

De veranderingen in slibmassa zijn lager (zowel in mate van aanslibbing / erosie, als in ruimtelijke variabiliteit) in de referentie simulatie zonder Holocene bron (Figuur 46) vergeleken met de eerder besproken simulatie met Holocene bron (Figuur 42). Het referentiescenario met bron laat zowel vlakken met toenemende als afnemende massa slib in de flufflaag en bodem in het interessegebied ten oosten van Zeebrugge zien, maar in de simulatie zonder bron vindt over een groot gebied een lichte afname plaats. Alleen in en rond de vaarpassen neemt de massa slib (licht) toe. Net als in de simulaties met Holocene bron vindt sterke sedimentatie plaats in het noordelijk deel van de Pas van het Zand, de reden voor de erosie in het middendeel van deze vaarpas is onduidelijk maar heeft waarschijnlijk met de initiële beschikbaarheid van sediment in de bodem te maken. De stroomsnelheden en bodemschuifspanningen zijn nagenoeg gelijk aan die in de simulaties met Holocene bron. De sterke erosie van de stortplaats valt op. Dit is het gevolg van de hoge beschikbaarheid van slib in de bodem terwijl de hoekige vorm het gevolg is van de interpolatie vanaf het grove ZWeM grid. De lichte erosie juist aan de binnenzijde van de haven is ook een gevolg van de gridverfijning die hier voor hogere stroomsnelheden zorgt dan in het grove model dat gebruikt werd om de initiële bodem in te laten spelen.

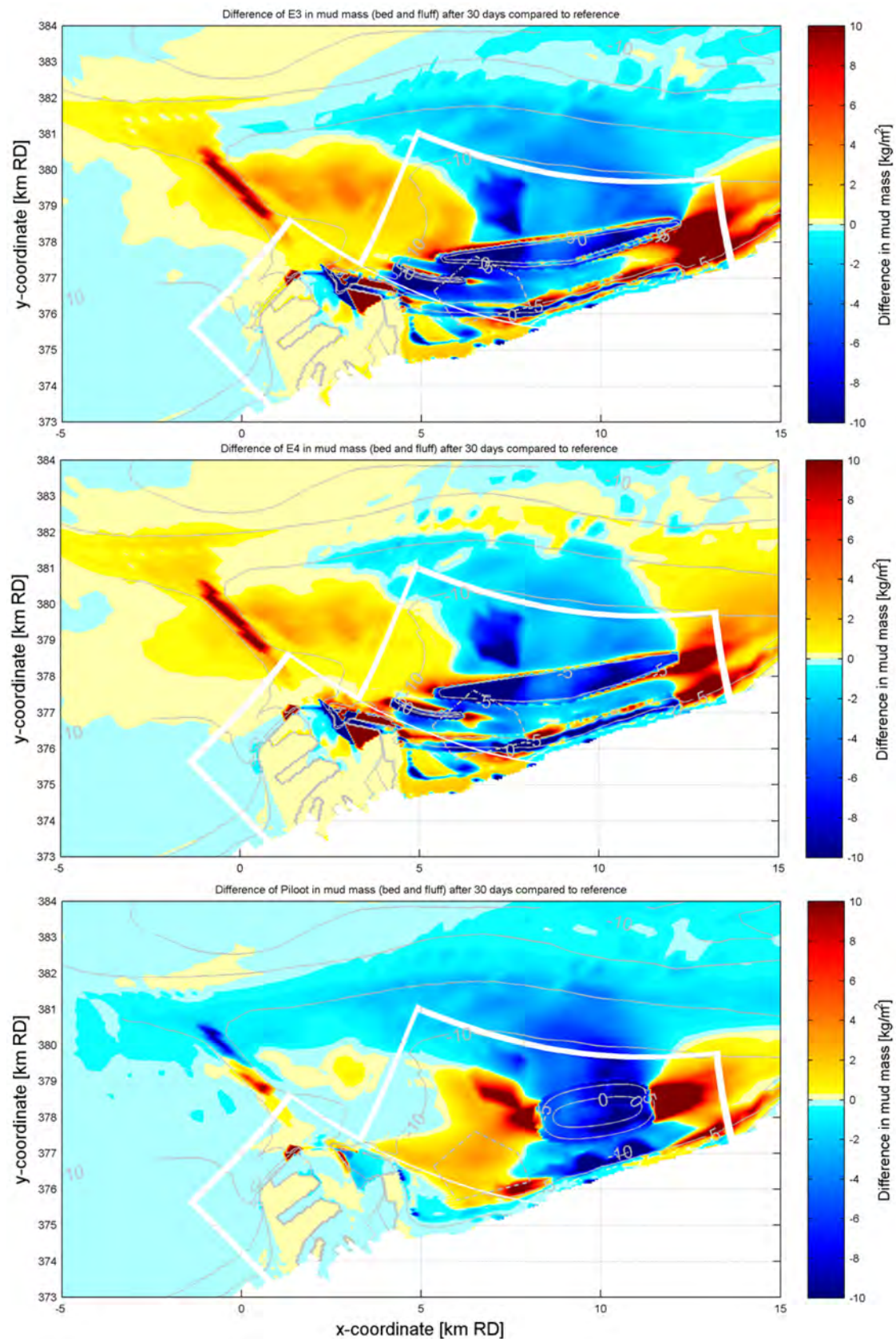
In de eilandsscenario's E3 en E4 (Figuur 47) neemt sedimentatie van slib toe (ten opzichte van de referentie) in en ten oosten van de Pas van het Zand en noordwest van de eilanden, bij de oostelijke opening van de haven van Zeebrugge, en bij de oostelijke opening juist voor het Zwin. Ook het strand in de luwte van het eiland wordt slibrijker; in E3 vooral ten oosten van Knokke, in E4 vooral voor de Baai van Heist. Een afname in slibgehalte wordt voorspeld ten noorden van het eiland, in de geul tussen het eiland en het strand, en op de Paardenmarkt. Door de simulatietijd van 30 dagen is het niet te zeggen of deze sedimentatie een voornamelijk initieel karakter heeft of dat dit patroon meer structureel is.

In het pilootscenario (Figuur 47) neemt de slibmassa sterk toe aan de oost- en westzijde van het eiland en in beperkte mate langs het strand erachter. In de geul achter het eiland en ervoor neemt het slibgehalte af. De lichte toename in slibgehalte langs de zuidzijde van Scheur-Wielingen die zichtbaar is de referentie treedt in dit scenario niet op.

Figuur 46: Toe- of afname van de massa slib (variant zonder Holocene bron), in het referentiescenario, na 30 dagen.

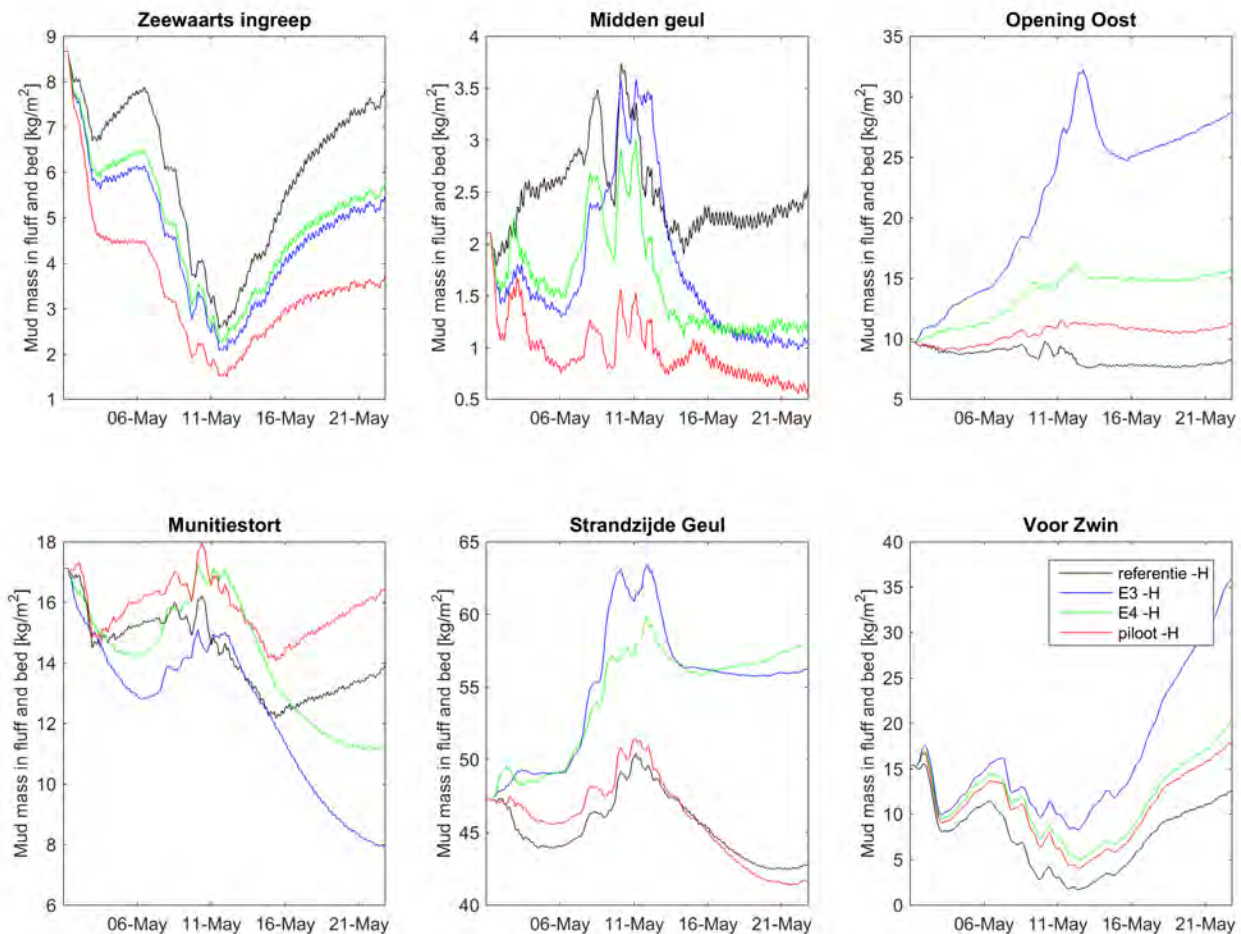


Figuur 47: Toe- of afname van de massa slib na 30 dagen. Van boven naar beneden: verandering in massa voor E3, E4, en H1 (.)



Variant zonder Holocene bron. Rood = toename massa t.o.v. de referentie simulatie. De eilanden zelf bevatten initieel geen slib. andere kleurschaal dan Figuur 42!

Figuur 48: Verandering in de massa slib (alle fracties) in de bodem (flufflaag = bodem) in de tijd.



Variant zonder Holocene bron. Andere schaal dan Figuur 45! Voor ligging observatiepunten zie Figuur 44

De hoeveelheid slib in de bodem en flufflaag is op alle observatiepunten veel kleiner (Figuur 48) dan in de variant met Holocene bron (Figuur 45). Het effect van de ingrepen, d.w.z. de trend in een scenario en de verhoudingen tussen de scenario's, praktisch hetzelfde als in de modelvariant met bron. Zeewaarts van de ingreep vindt erosie van slib plaats in het eerste week en tijdens de dynamische periode, waarna in de referentie vrijwel dezelfde hoeveelheid slib weer sedimenteert. De afname is het sterkst voor E4, net als met bron. Dit laatste geldt ook voor het midden van de geul, waar de veranderingen beperkt zijn en sedimentatie optreedt vlak na de dynamische periode. Voor de oostelijke opening zorgt scenario E3 voor verreweg de meeste sedimentatie; een deel van het materiaal dat hier direct na de dynamische periode terechtkomt wordt ook weer verwijderd. Op de munitiestort treedt voor E3 juist de meeste erosie van slib op. Net als in het midden van de geul sedimenteert hier slib tijdens en na de dynamische periode. Ook aan de strandzijde van de geul wordt dan slib afgezet en deels weer opgeruimd, terwijl er voor de eilandscenario's de rest van de tijd weinig gebeurt. In de referentie en het pilooteilandscenario vermindert de hoeveelheid slib aan de strandzijde, hoewel deze ook een kleine toename door dynamische condities laten zien. Voor het Zwin is het vooral scenario E3 wat een versnelde sedimentatie van slib laat zien. De afname van het slibgehalte in bodem en flufflaag tijdens dynamische condities is in deze modelvariant wel vergelijkbaar (door het lagere slibgehalt reageert de bodem sneller), wat in de variant met bron niet zo is.

Vergelijking simulaties met en zonder Holocene bron

De ruimtelijke variatie in aanslibbing met en zonder Holocene bron laten verschillen en overeenkomsten zien voor de referentiescenario's. Beide modelvarianten voorspellen een toename in het slibgehalte ten oosten van Zeebrugge (inclusief de paardenmarkt) – de toename is echter sterker voor de simulatie met Holocene bron. Dit is het gevolg van een grotere beschikbaarheid van slib. Ook laten beide modellen een afname in het slibgehalte zien op de baggerstortlocatie. Dit is omdat in beide modelsimulaties geen sediment meer wordt gestort, terwijl een doorstart wordt gemaakt van een model met storting.

De effecten van de berekende modelscenario's zijn minder afhankelijk van de modelaanpak dan de referentiesimulatie. Simulaties met en zonder Holocene bron hebben de volgende overeenkomende effecten:

- Voor alle eilanden vindt depositie plaats ten oosten en ten westen van het eiland als gevolg van lagere langsstroomsnelheden.
- Het slibgehalte ten noorden en ten zuiden van de aan te leggen eilanden neemt af vanwege een toename in stroomsnelheden.
- Het slibgehalte op het strand neemt toe als gevolg van gereduceerde golfhoogtes.
- Scenario's E3 en E4 leiden tot sedimentatie rond de Oostelijke uitgang van de haven van Zeebrugge. Scenario H1 leidt juist tot erosie.
- In de Pas van 't Zand vindt als gevolg van de ingrepen meer sedimentatie van slib plaats, vooral in scenario's E3 en E4. In H1 is dit minder.

Beide modelaanpakken verschillen aanzienlijk in sedimentaanbod en onderliggende depositiemechanismen, en het is daarom bemoedigend voor de voorspelkracht van de modellen dat het berekende effect van de scenario's op hoofdlijnen (kwalitatief) hetzelfde is. De redenen voor deze overeenkomsten is de sterke verandering in bodemschuifspanningen (afname in stroomsnelheid ten oosten en westen van de eilanden en golfhoogte landwaarts van de eilanden; toename in stroomsnelheid ten noorden en zuiden van de eilanden). De modelaanpak heeft echter wel substantiële verschillen in hoeveelheid sedimentatie en erosie tot gevolg die gezien kunnen worden als een kwantitatieve bandbreedte voor de mogelijke ontwikkelingen

3.2 ZWeM zand model

3.2.1 Modelbeschrijving

Met het hierboven beschreven ZWeM model is ook de meer lange-termijn morfologische ontwikkeling berekend met enkel de zandige fractie. Hiermee kan het belang van 3D effecten op de morfologische ontwikkeling worden onderzocht, en een vergelijking worden gemaakt met de in paragrafen 3.3 en 3.4 beschreven XBeach en Delft3D N2V berekeningen.

De bodem in het ZWeM zand model wordt erodeerbaar verondersteld, met uitzondering van de geleidedam (scenario's E3 en E4). Verder zijn alle instellingen van het ZWeM zand-slib model overgenomen, zie paragraaf 3.1. Uitzondering hierop is de ThetSD parameter die de erosie van de "droge" cellen bepaalt. In ZWeM zand-slib staat deze op 0 (geen erosie droge cellen). In het ZWeM zand model is deze standaard op 1 gezet, om erosie van droge cellen mogelijk te maken. Het effect van deze parameter op de morfologische ontwikkeling zal later onderzocht worden.

Het model is niet expliciet ontwikkeld voor zandtransporten en langjarige morfologische ontwikkeling (zie paragraaf 3.1.1). Naar verwachting zijn de belangrijkste verschillen met het XBeach en N2V model:

- ZWeM zand model neemt baggeren en storten mee
- ZWeM model rekent met tijdseries van golven en getij (incl. springtij-doodtij variatie)
- ZWeM model rekent 3D

In vergelijking met het Delft3D N2V model zijn ook enkele belangrijke instellingen van het transportmodel anders. Tabel 4 geeft hiervan een overzicht.

Tabel 4: Overzicht belangrijke instellingen transport model ZWeM en N2V model.

Modelinstelling	ZWeM model	N2V model
Transportformule	Van Rijn (2007a,b)	Van Rijn (1993)
<i>F_{sus}</i> , factor referentie concentratie	0,5	1,0
<i>F_{bed}</i> , factor bodemtransport	0,5	1,0
<i>F_{susw}</i> , factor golfgerelateerd suspensief transport	0,5	0,0
<i>F_{bedw}</i> , factor golfgerelateerd bodemtransport	0,5	0,0
<i>Alfa_{Bs}</i> , factor effect langshelling op bodemtransport	1,0	1,0
<i>Alfa_{Bn}</i> , factor effect dwarsshelling op bodemtransport	1,5	1,5

3.2.2 Uitgevoerde simulaties

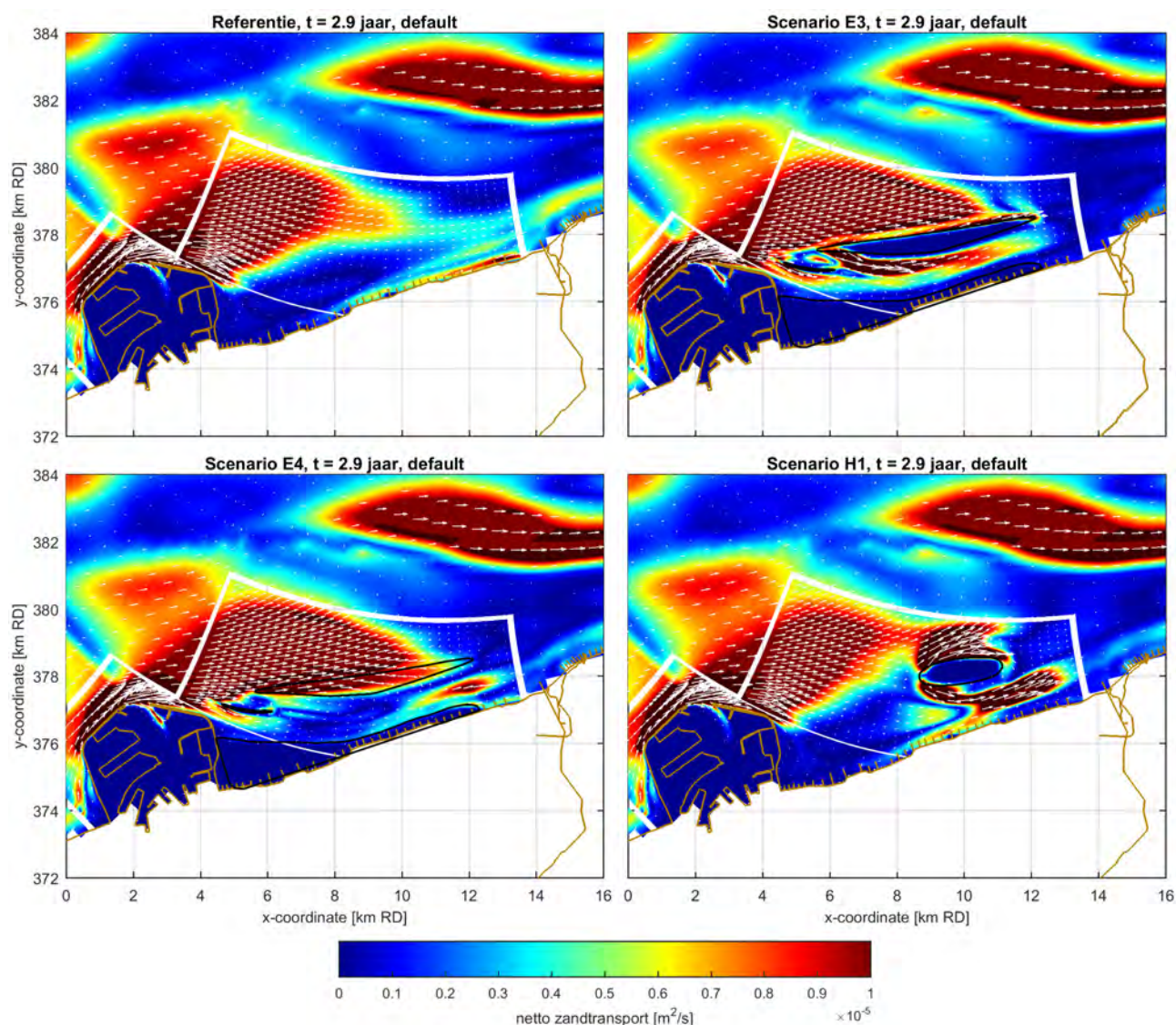
De simulaties lopen van 1 tot 31 mei 2014 (30 dagen). De berekening van de morfologische verandering start na 12 uur en de morfologische versnellingsfactor 36. De simulatie correspondeert dan met een morfologische periode van $29,5 \times 36 = 1062$ dagen, oftewel ongeveer 3 jaar. De referentiesituatie en de scenario's zijn doorgerekend met het 2DH en 3D model. In onderstaande paragrafen worden eerst de zandtransporten en morfologische ontwikkeling berekend met het 2DH model en default instellingen gepresenteerd, waarna wordt ingedaan op het effect van de modelinstellingen.

3.2.3 Zandtransporten

De effecten van de scenario's op de netto zandtransporten volgens de 2D berekeningen worden getoond in Figuur 49. De witte randen duiden de DD randen aan. Hier zijn de modelwaarden niet nul, zoals de figuren suggereren; dit is een gevolg van de manier van plotten. Deze figuur laat het volgende zien:

- Er ontstaat een brandingszone langs het eiland, Scenario E3, waar de transporten oostwaarts gericht zijn. Deze zandtransporten zijn kleiner dan die als gevolg van de havendammen van Zeebrugge. Dit scenario zorgt ook voor sterke oostwaartse transporten door de openingen tussen het eiland, de geleidedam en Zeebrugge haven. Direct achter het eiland zijn de transporten ook sterk. In vergelijking met de referentiesituatie is het brandingstransport bij de kust sterk gereduceerd door de afschermende werking van het eiland. De plek met relatief grote zandtransporten ten noordoosten van het Zwin is verdwenen in het E3 scenario.
- In vergelijking met Scenario E3, zorgt het overstroombaar eiland (E4) voor grote zandtransporten over bijna het gehele "eiland" en een reductie van zandtransporten direct landwaarts van het eiland, met uitzondering van het meeste oostelijke gedeelte van de geul tussen het eiland en de strandverbreding.
- Scenario H1 beïnvloedt de zandtransporten met name rondom het eiland en ten oosten hiervan. Transporten nemen sterk toe direct ten noorden en zuiden van het eiland, als gevolg van stromingscontractie. Het brandingstransport achter het eiland neemt af doordat het eiland dit gebied afschermt tegen golfwerking. Ook verder ten oosten, voorbij het Zwin, nemen de transporten af.

Figuur 49: Gemiddelde zandtransporten in de referentiesituatie en Scenario's E3, E4 en H1 volgens 2D berekeningen.



3.2.4 Morfologie

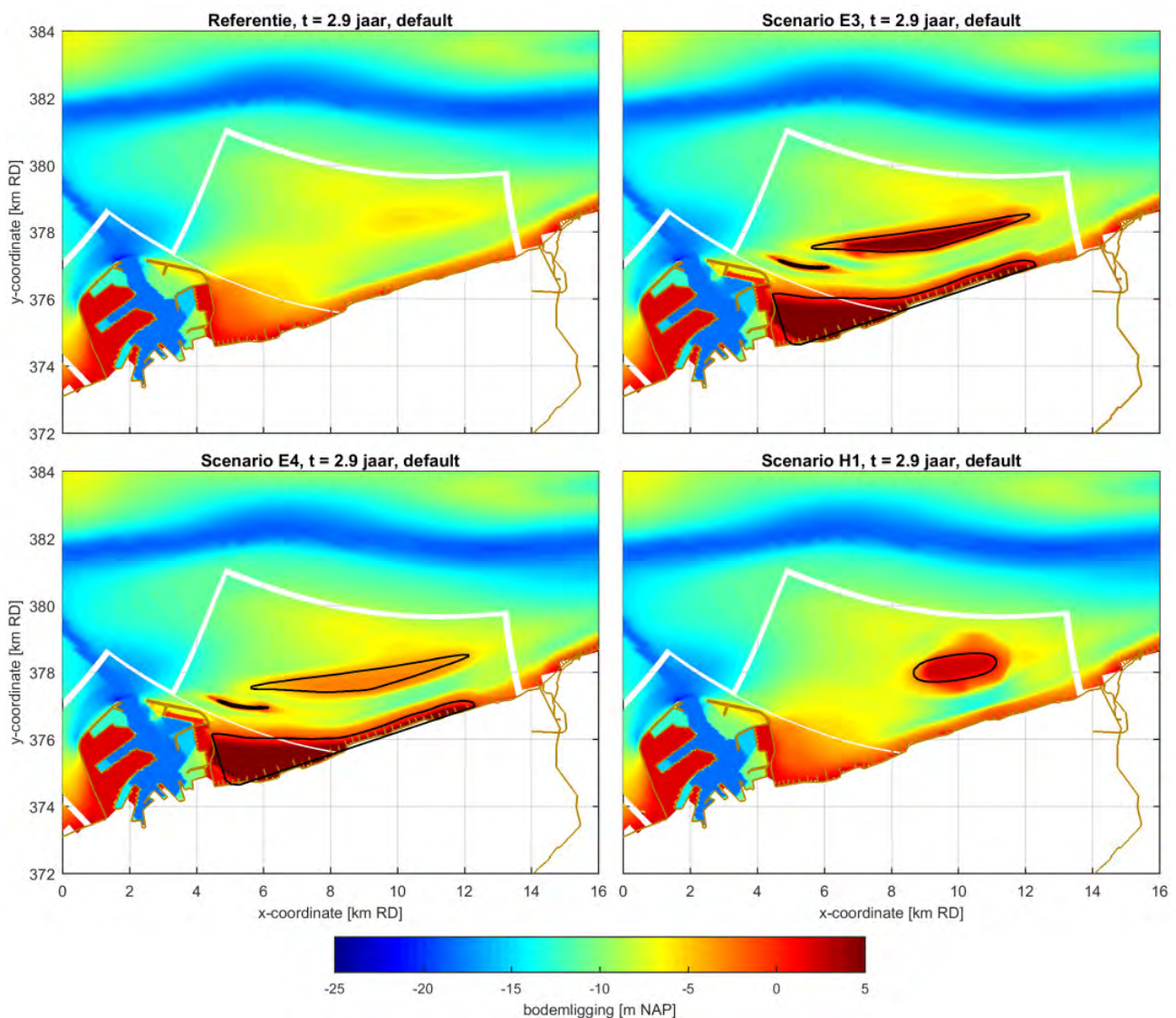
Figuur 50 en Figuur 51 tonen de berekende morfologische ontwikkelingen:

- In de referentiesituatie erodeert het gebied direct ten noorden van Zeebrugge door een versnelling van de stroming als gevolg van contractie van stroomlijnen. Dit sediment komt voor een deel ten goede aan het gebied direct ten zuidoosten hiervan, dat sedimenteert. De kustlijn ten oosten van Zeebrugge erodeert; het kustprofiel lijkt te verflauwen: Het strand en vooroever worden minder stijl en de waterlijn migreert richting dijk. Verder berekent het model lichte erosie van de Wielingen; de Paardenmarkt en omgeving sedimenteert licht.
- De oost- en met name de westpunt van het eiland, E3, eroderen. Dit sediment lijkt voor een deel in langsricting verplaatst te zijn. De zeewaartse zijde van het eiland erodeert eveneens, terwijl de landwaartse zijde vrij stabiel ligt. De geulen tussen het eiland, de geleidedam en de haven eroderen aan de oostelijke zijde, terwijl de westelijke openingen sedimenteren.
- Het overstroombaar eiland, E4, lijkt zich in de richting van de kust te willen verplaatsen. De zeewaartse zijde erodeert, en dit zand komt voornamelijk direct zeewaarts hiervan terecht. De westpunt van het eiland erodeert, en tussen het eiland en de kust vindt eveneens erosie plaats. Ten westen en oosten van het eiland slaat sediment neer. De erosie bij de havendammen van

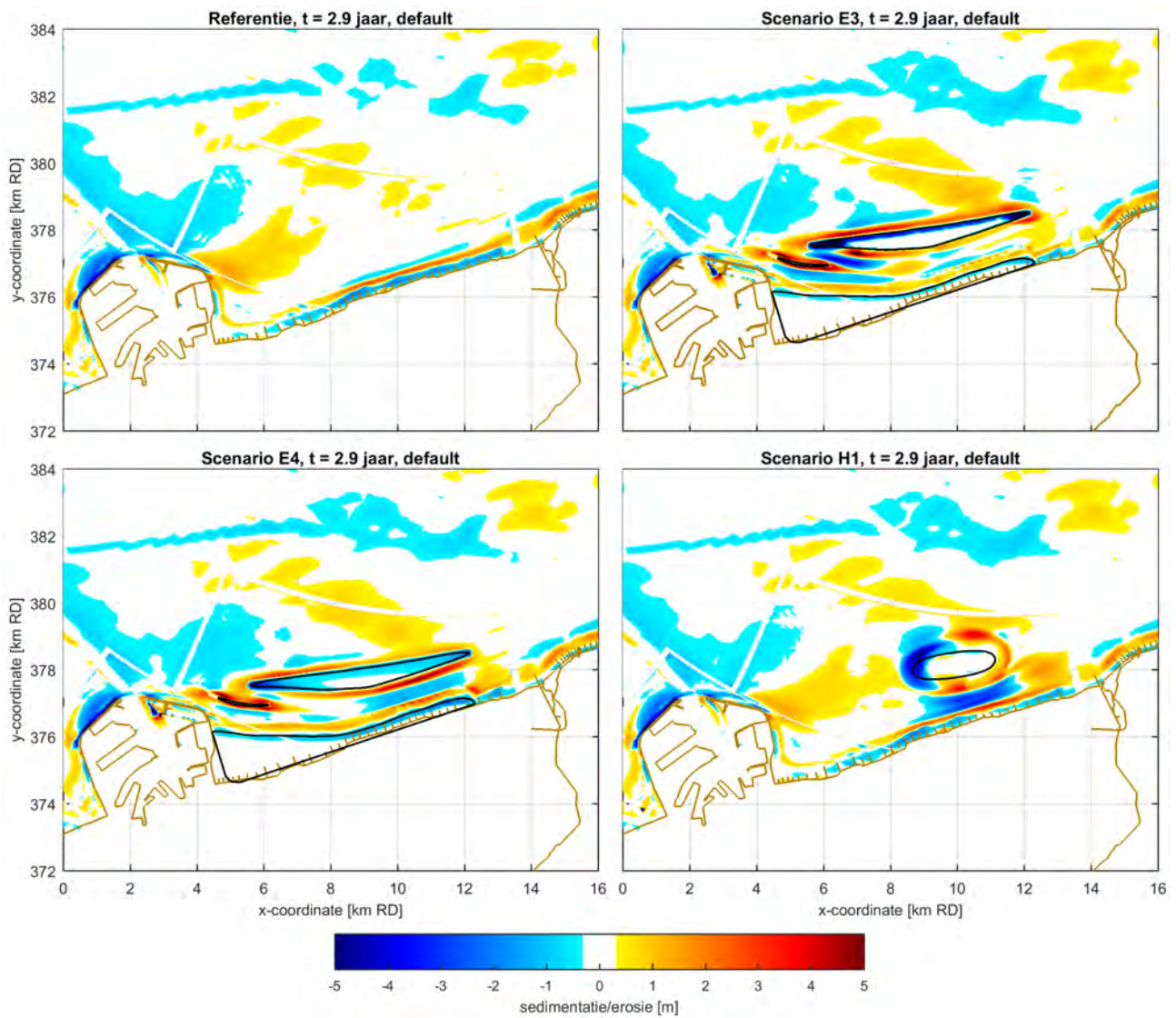
Zeebrugge is onveranderd door deze ingreep. De aanzanding van de Paardenmarkt, juist ten noorden van het eiland, wordt door de aanleg hiervan versterkt.

- De invloed van scenario H1, het pilooteiland, is vrij lokaal. Het westelijke gedeelte erodeert en het oostelijke gedeelte sedimenteert; het eiland lijkt zich in oostelijke richting te verplaatsen. Direct achter het eiland, in de richting van de kust, vindt erosie plaats doordat de getijstrooming hier lokaal versnelt. Dit effect is blijkbaar sterker dan de afgenomen golfwerking door de afschermende werking van het eiland. Ten zuidoosten van het eiland, direct naast het Zwin, neem de aanzanding toe.

Figuur 50: Berekende morfologische ontwikkeling na 3 jaar voor de referentie, scenario E3 (eiland), E4 (overstroombaar eiland) en H1 (piloott).



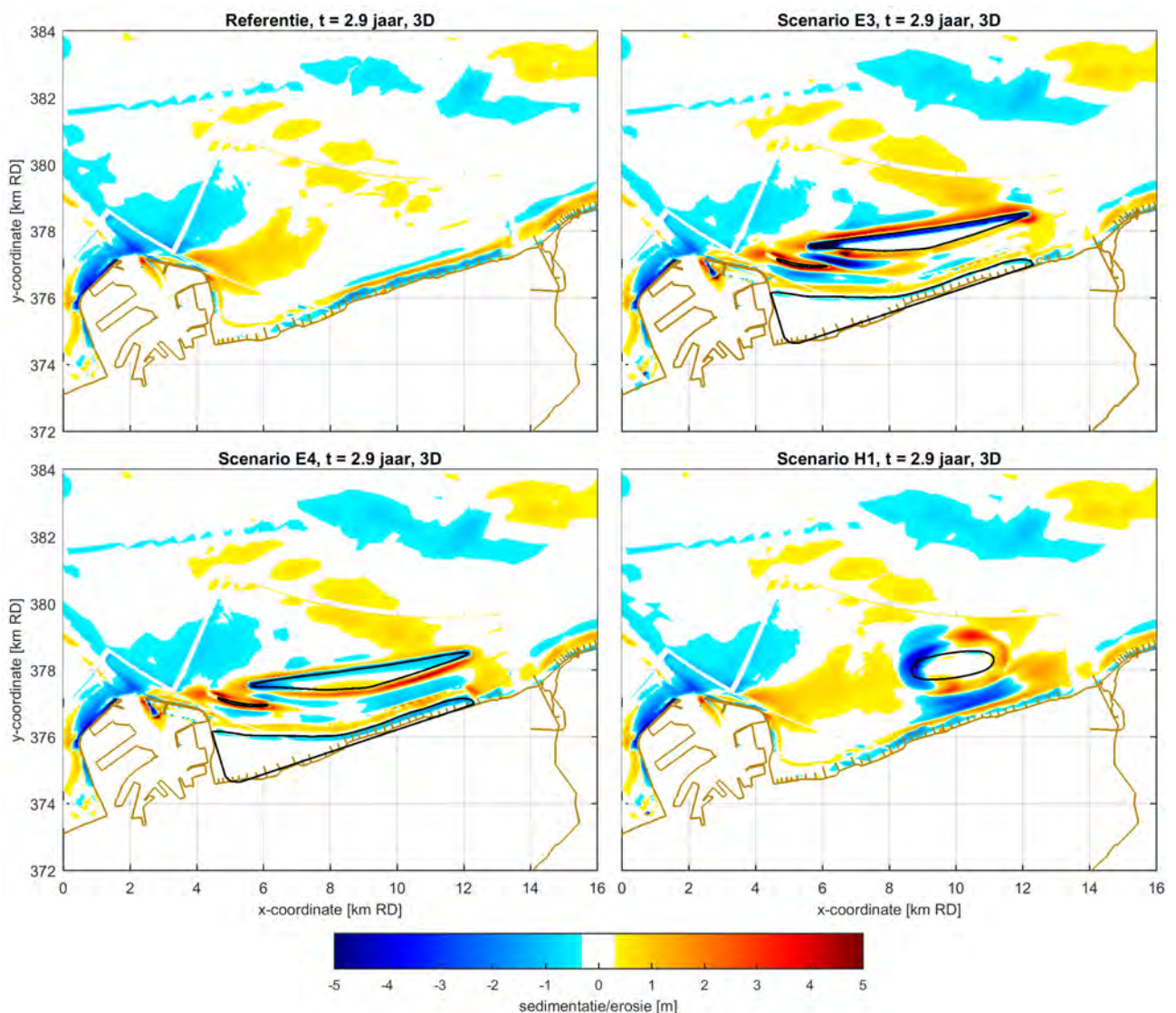
Figuur 51: Berekende sedimentatie/erosie na 3 jaar voor de referentie, scenario E3 (eiland), E4 (overstroombaar eiland) en H1 (piloot).



3.2.5 Belang 3D effecten

Het 3D effect op de berekende morfologische ontwikkeling is over het algemeen beperkt (vergelijk Figuur 52 en Figuur 51). In vergelijking met het 2D model berekent het 3D model i) meer erosie direct voor de ingang van Zeebrugge haven, ii) minder erosie rondom de vaarpassen, iii) minder sterke morfologische verandering van de eilanden en de kust. Het 3D model houdt de kustprofielen meer in stand, omdat de kustdwarse stroming en zandtransportprocessen, die een sterk 3D karakter hebben in de brandingszone, beter worden gesimuleerd. Het grootste verschil tussen het 2D en 3D model is te zien bij Scenario E4, het overstroombaar eiland, waar de westkant veel minder snel erodeert volgens het 3D model.

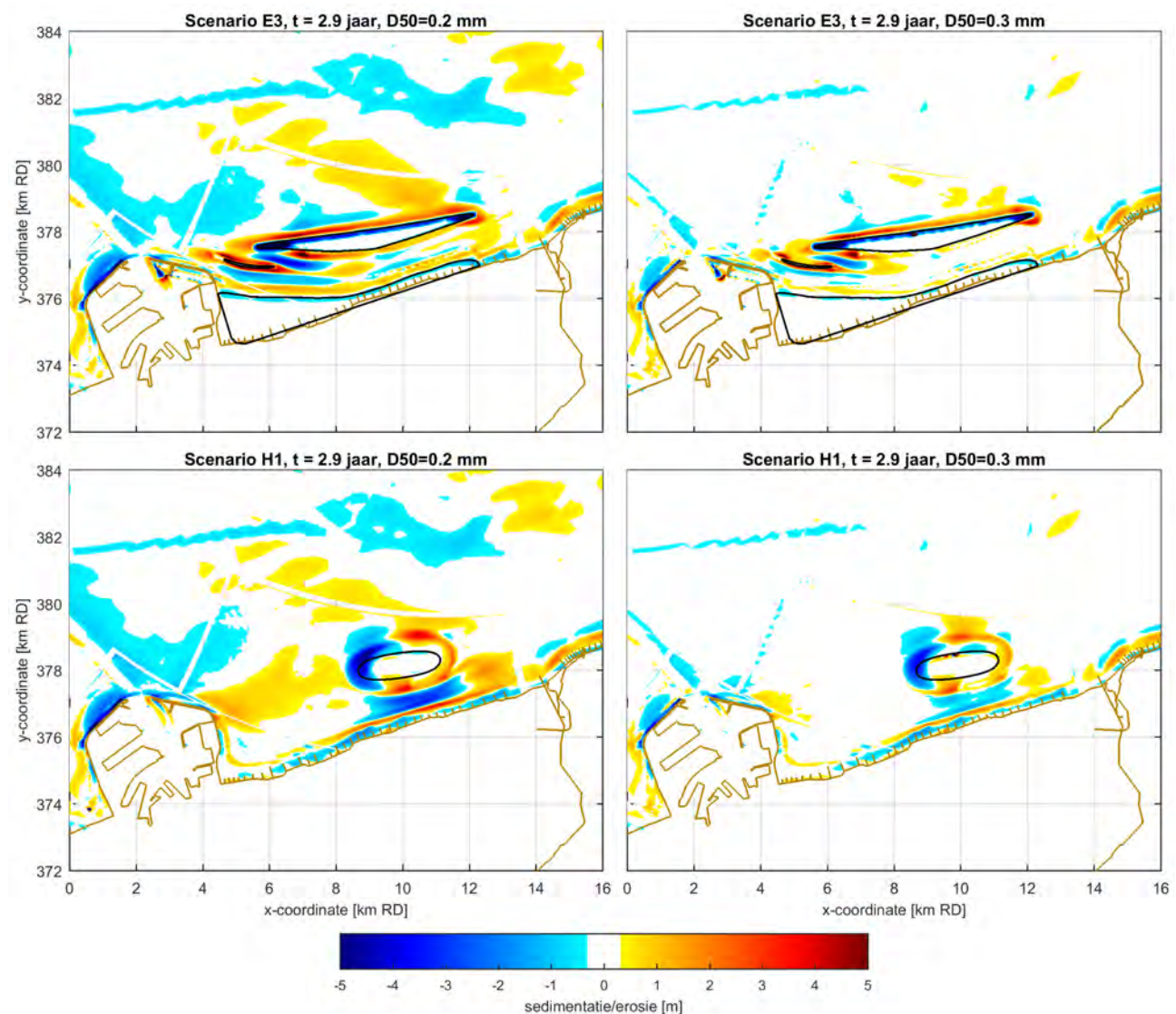
Figuur 52: Berekende sedimentatie/erosie na 3 jaar voor de referentie, scenario E3 (eiland), E4 (overstroombaar eiland) en H1 (piloot) met het 3D model.



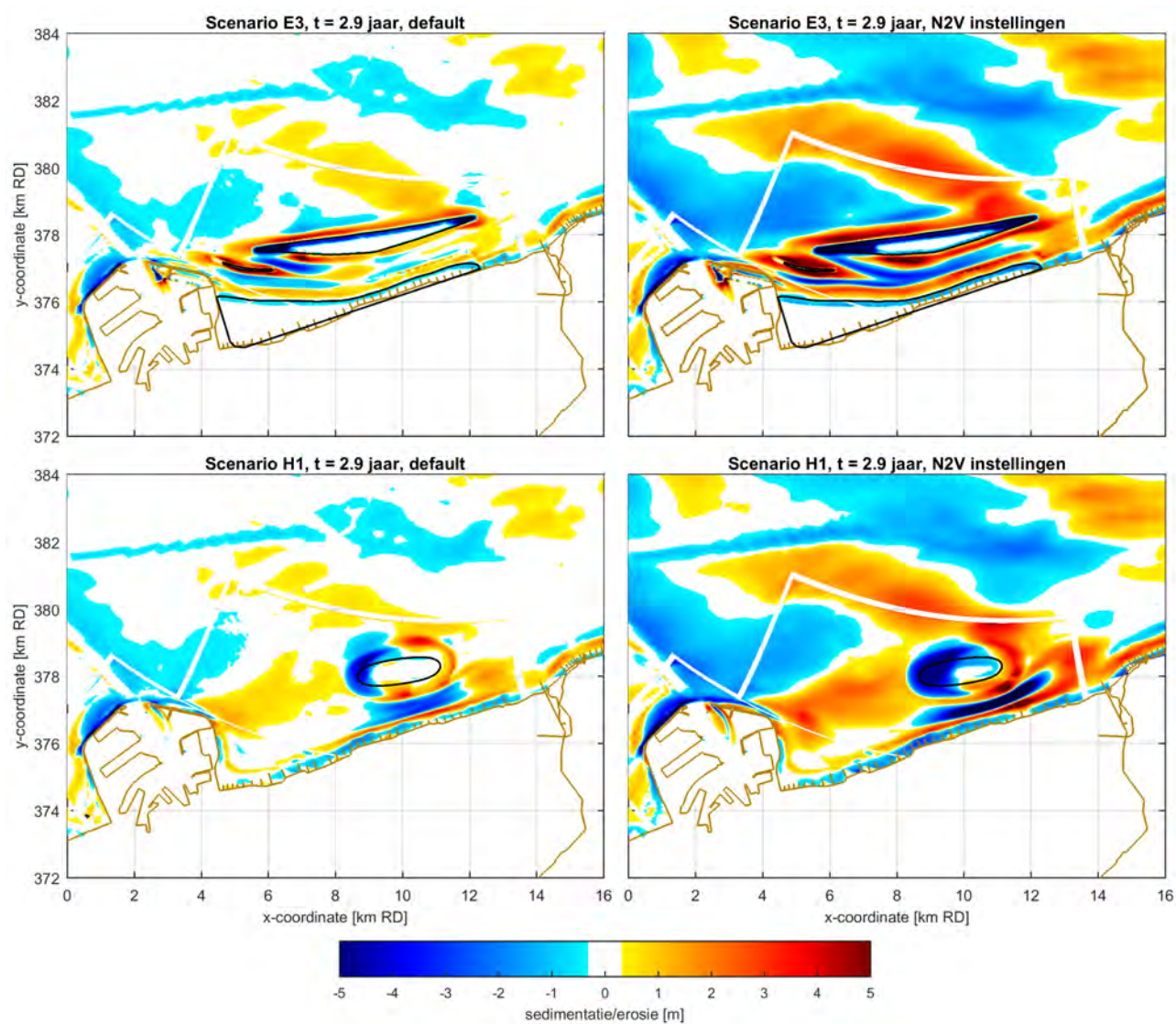
3.2.6 Effect korrelgrootte en instellingen transportmodel

Een korrelgrootte van 0,3 mm (zoals het XBeach Knokke model) in plaats van 0,2 mm leidt tot vergelijkbare, zij het minder sterke sedimentatie- en erosiepatronen (Figuur 53). Het hanteren van de N2V transportmodelinstellingen in plaats van de default waarden (zie Tabel 4) heeft een grote invloed op de berekende morfologische ontwikkeling (Figuur 54). De sedimentatie- en erosiepatronen zijn kwalitatief behoorlijk vergelijkbaar, maar de berekende morfologische veranderingen met de N2V modelinstellingen zijn veel sterker, wat met name komt door de hogere transportfactoren F_{sus} en F_{bed} (beide 1,0 in plaats van 0,5). Dit toont de gevoeligheid van de modelresultaten voor de instellingen van het transportmodel.

Figuur 53: Berekende sedimentatie/erosie na 3 jaar voor scenario E3 (eiland) en H1 (piloot) met het 2D ZWeM model met een D50 van 0,2 mm (linker figuren) en 0,3 mm (rechter figuren).



Figuur 54: Berekende sedimentatie/erosie na 3 jaar voor scenario E3 (eiland) en H1 (piloot) met het 2D ZWeM model default (linker figuren) en N2V transportmodelinstellingen (rechter figuren).



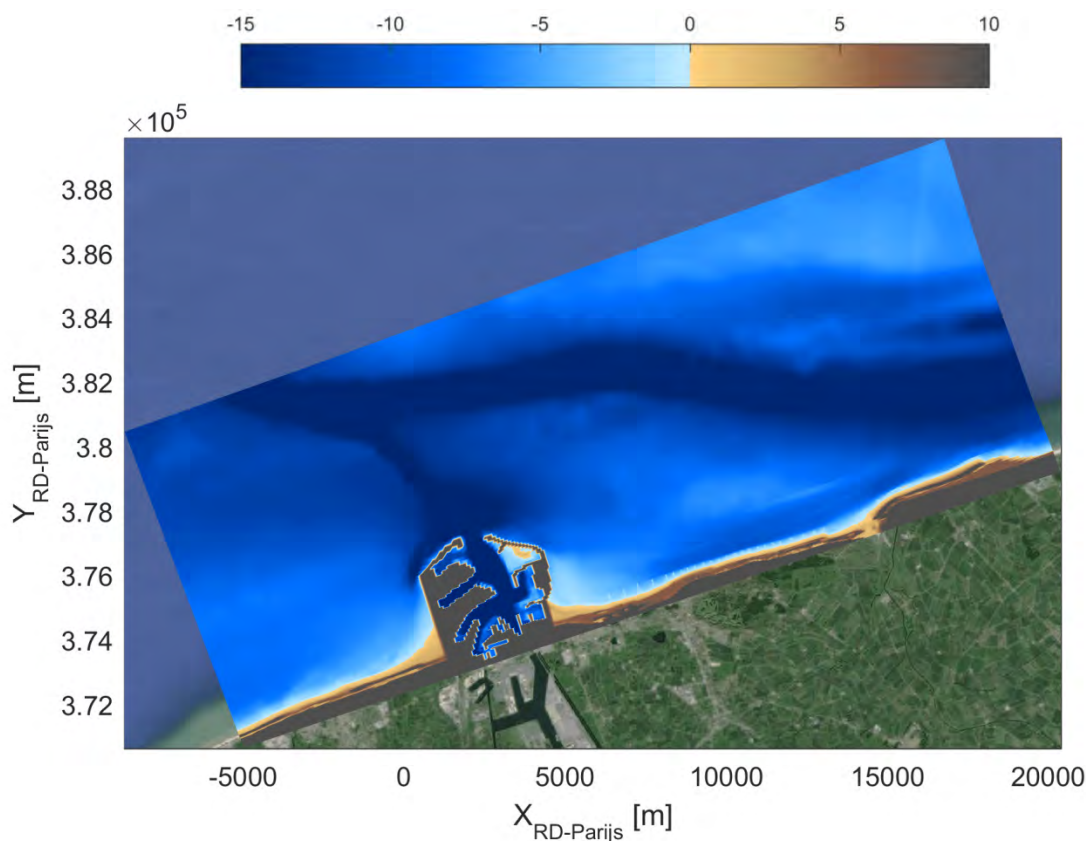
3.3 XBeach Knokke model

3.3.1 Modelbeschrijving

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. 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.

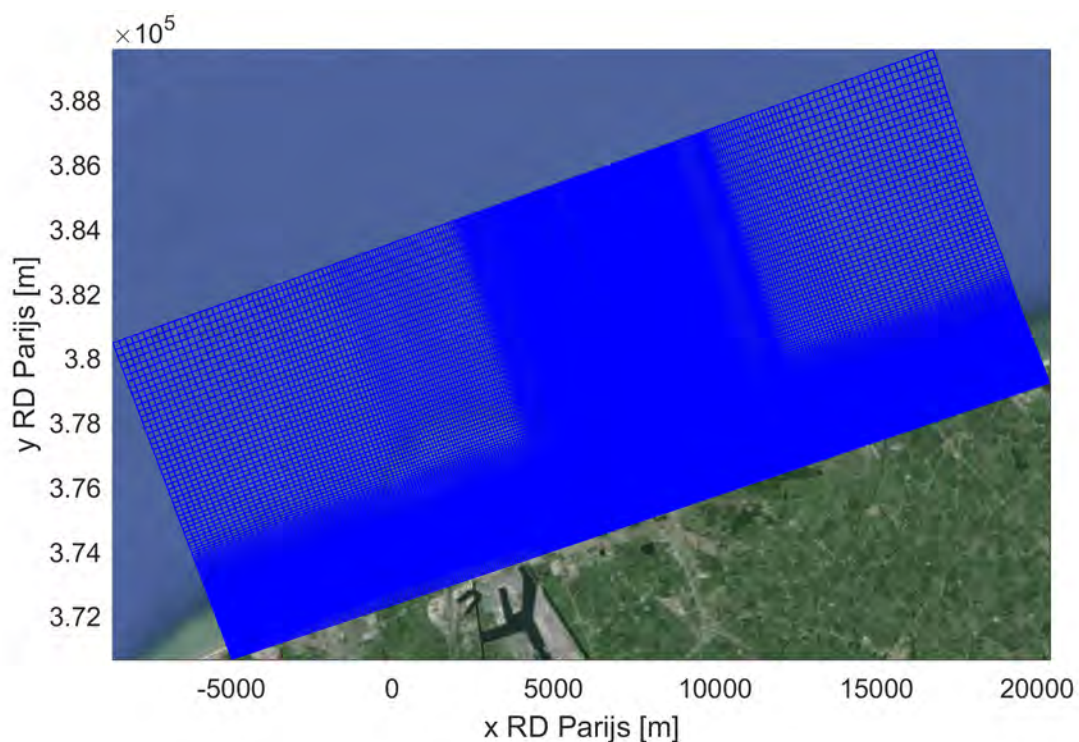
Voor deze studie werd het modeldomein van het bestaande Knokke model uitgebreid in oostelijke richting, zie Figuur 56. Het model heeft een rooster van 150 bij 363 gridcellen (was 121 bij 313 in het originele model). De resolutie varieert en is het kleinst voor de brandingszone en strand van Knokke: 23m (kustdwars) bij 25m (langsrichting). Buiten het interessegebied heeft het grid een maximale resolutie van 240 bij 210m. Ook de bathymetrie van het strand en vooroever worden voor deze studie geüpdatet met vooroeverlodingen en lidar data 2015. De initiële bathymetrie van het model is weergegeven in Figuur 55.

Figuur 55: Initiële bathymetrie van het numeriek model. Niveau is in m NAP.



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.* (2013) (opgelegde randvoorwaarden: waterstand, Neumann voor sediment transport). Een 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. Hetzelfde gereduceerde golfklimaat als in het Nieuwpoort-Vlissingen model wordt gebruikt, Tabel 5. Er wordt geen gebruik gemaakt van mormerge, daarom worden de verschillende golfcondities omgezet naar een tijdserie, Figuur 57. Een morfologische acceleratie (morfacc) van 35.3 werd gebruikt, zodat de 30 getijcycli overeenkomen met 3 jaar. Per (morfologisch) jaar worden dus 10 getijcycli gebruikt.

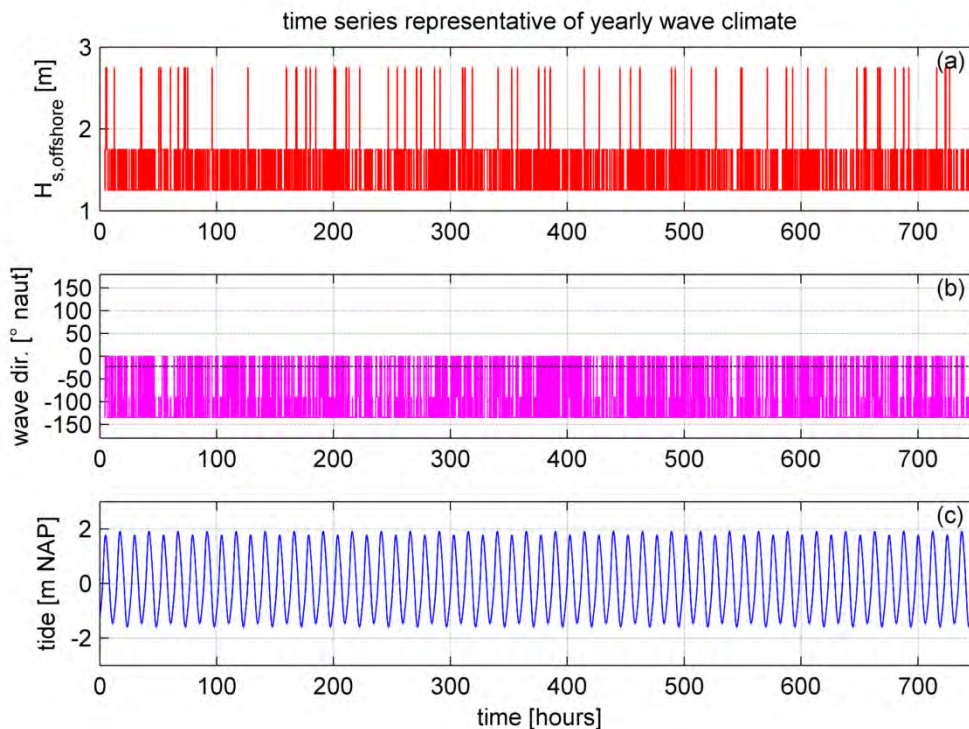
Figuur 56: XBeach detailmodel Knokke



Tabel 5: Golf- en windklimaat N2V model voor lange-termijn morfologische berekeningen (Wang et al., 2015).

Conditie	Hs (m)	Tp (s)	Θ_{golf} (°N)	V_{wind} (m/s)	Θ_{wind} (°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

Figuur 57: 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 ruwheidsparemeter 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 langstransport voor de kust. Een overzicht van de belangrijkste kalibratieparameters is weergegeven in Tabel 6. 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 $200\mu\text{m}$, op de ondiepte van de Paardemarkt vind men zelfs fracties tussen de 100 en $150\mu\text{m}$, zie ook §2.5.3. 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. De eigenschappen van het sediment dat gebruikt kan worden voor de aanleg van de eilanden is nog niet bekend. Bovendien blijkt uit eerder onderzoek dat XBeach slechts in beperkte mate gevoelig is voor de korreldiameter.

Het model werd gekalibreerd op de uit de literatuur bekende erosie/sedimentatie-trends van de verschillende kuststroken. Een vergelijking van de gemodelleerde en waargenomen sedimentatie en erosietrends is opgenomen in Bijlage C.

Tabel 6: Overzicht van de belangrijkste kalibratieparameters van het XBeach model.

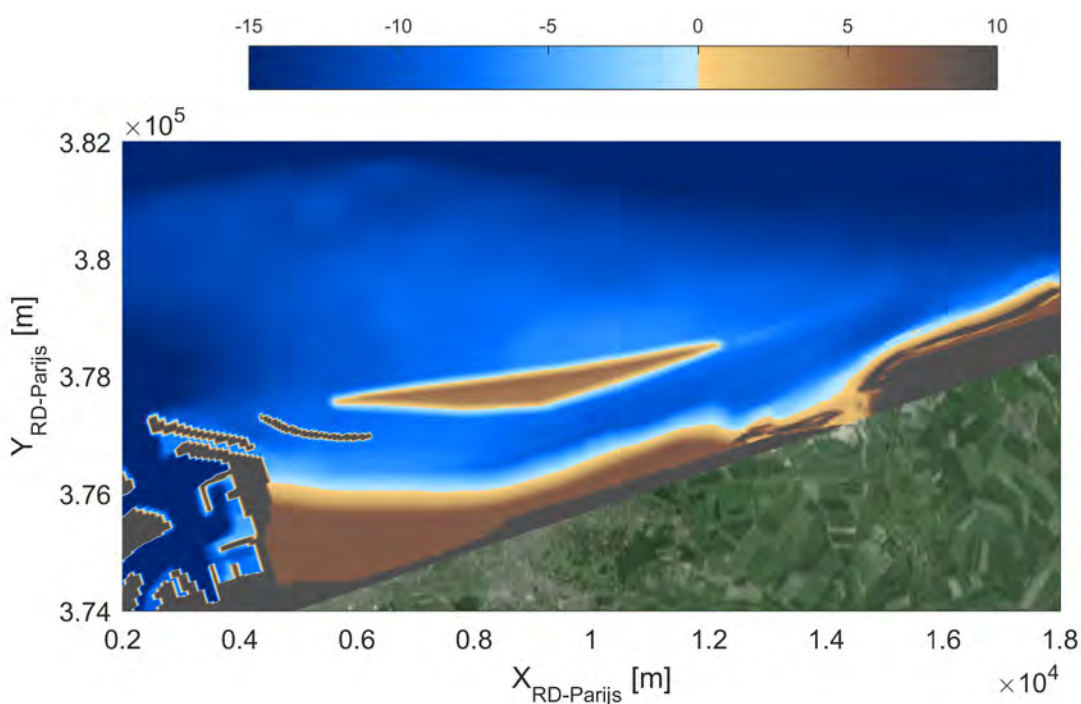
parameter	Beschrijving	Kalibratie-waarde
fw	Wrijvingsfactor voor korte golven	0.000
C	Chézy-ruwheid	$50 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$
gammax	Maximale verhouding golfhoogte-waterdiepte	2.364
beta	Maximale helling van brekende golf in het roller-model	0.138
wetslp	Maximale helling van het strandprofiel onder 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

3.3.2 Scenario E3 – Eiland en dam

Bathymetrie

Scenario E3 foresees nourishment of the Knokke-Heist beach and construction of two islands, one small close to the eastern breakwater of Zeebrugge and one big next to it, which are aligned with the nourished beach from Knokke-Heist to Lekkerber (Figuur 58). In the Xbeach simulations the small island was considered as non-erodible. E3 scenario foresees also the creation of an opening at the east breakwater, which will allow access of the inland vessels navigating from the western Scheldt.

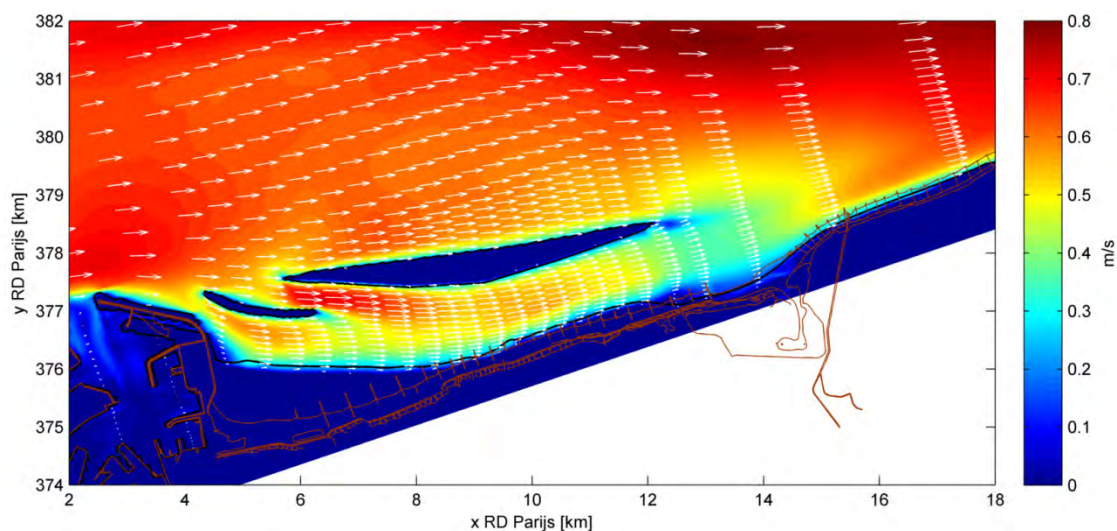
Figuur 58: Initiële bathymetrie van het numeriek model voor scenario E3. Niveau is in m NAP.



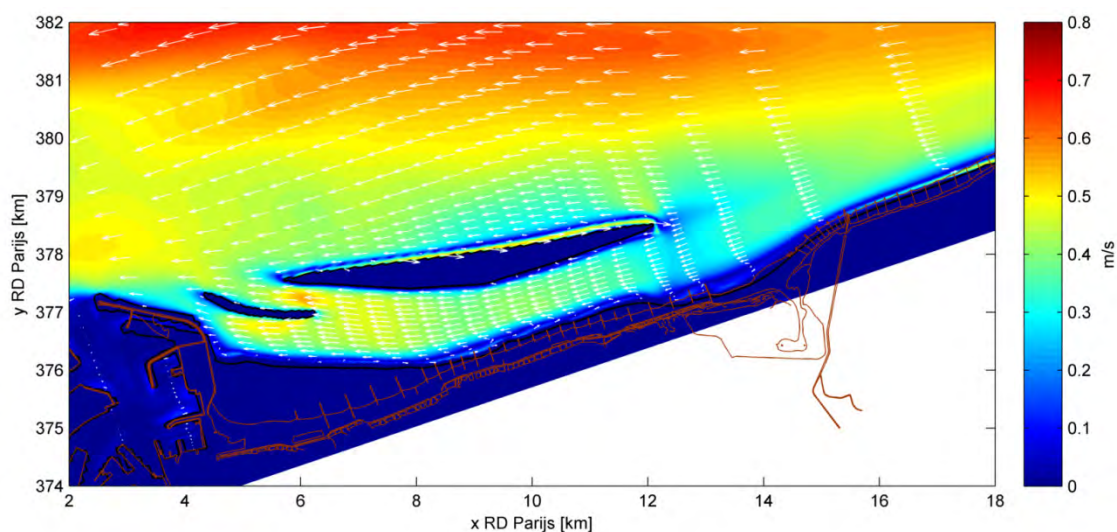
Stroomsnelheden

Figuur 59 and Figuur 60 show the instantaneous velocity fields developed by the tidal flow (flood and ebb phase, respectively) for the case of scenario E3 at the end of the simulation period (3 years). During the flood stage, increased velocities are observed in the channel between the two islands and also at the south side of the small non-erodible island. On the other hand, the presence of the big island seems to affect the velocity field at the east side of it (at the height of Zwin), which seems to be attenuated. Similar behavior of the flow at the narrow channels between the islands and the east breakwater of Zeebrugge, is found during the ebb stage. However, the magnitude of the tidal current is lower than the one in flood stage. During ebb, flow reversal occurs at a limited zone along the north and the south side of the island.

Figuur 59: Snelheden bij vloedstroom, scenario E3; zwarte lijn: 0m NAP na 3 jaar simulatie.



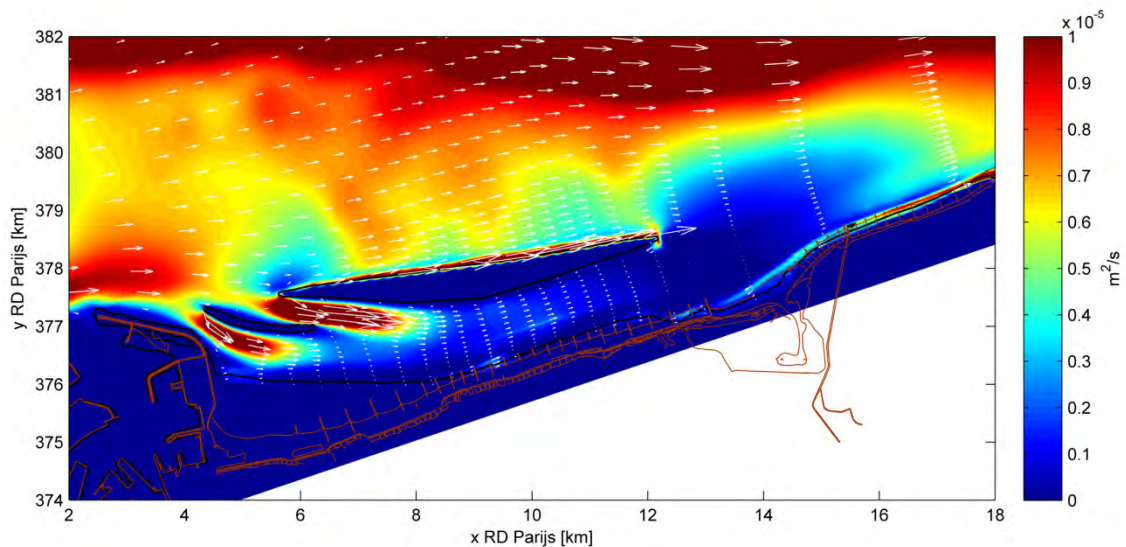
Figuur 60: Snelheden bij ebstroom, scenario E3. zwarte lijn: 0m NAP na 3 jaar simulatie.



Netto zandtransport en bodemverandering

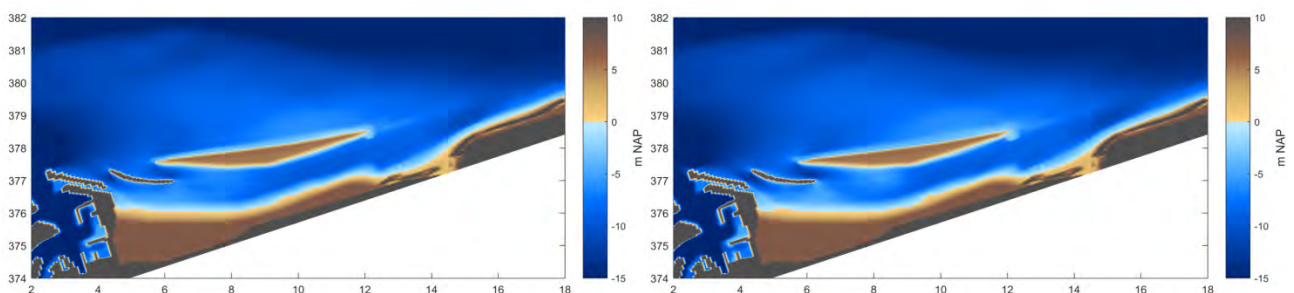
The sediment transport rate averaged over the simulation period (3 years) for the case of the island of scenario E3, is shown in Figuur 61. Increased transport rates are observed not only in the channel between the two islands and at the channel between the small island and the breakwater of Zeebrugge, but also along the weather side of the big island. On the other hand, sediment flux seems to be substantially smaller very close to the beach due to the reduced wave climate resulting from the presence of the islands. The presence of the groynes may still contribute in the reduction of the longshore transport.

Figuur 61: Gemodelleerd gemiddeld zandtransport (m^2/s) scenario E3 (volumes inclusief poriën); zwarte lijn: initiële 0m NAP lijn.

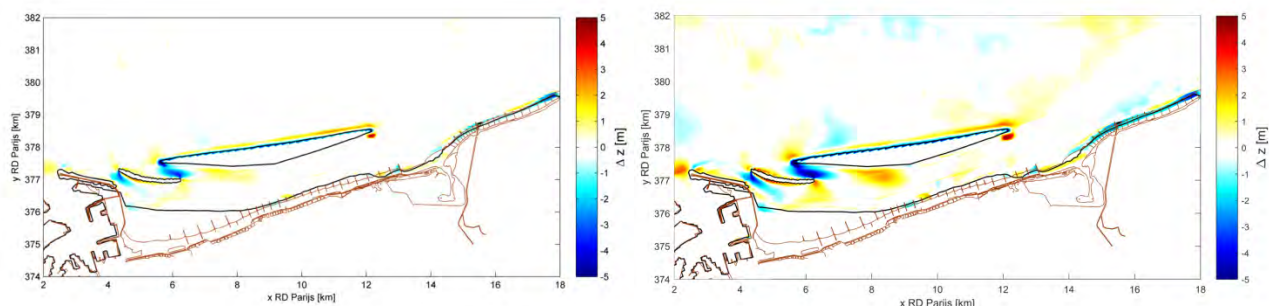


Figuur 63 shows the resulting sedimentation and erosion patterns due to the presence of the two islands at the end of the simulation period. Strong erosion occurs at the west side of the big island (at the tip and at the channel between the big and the small island), and the eroded material is deposited mainly to the southwest, while part of it may have been transferred to the northeast deeper area. It is indicated that the eroded sand along the weather side of the big island is transferred to the offshore direction, while the eroded material of the east tip moves towards the beach. Erosion occurs at the channel between the small island and the east breakwater of Zeebrugge. Very slight sedimentation-erosion patterns can be observed in front of the beach (at the area of interest).

Figuur 62: Gemodelleerde bathymetrie na 3 (links) en 9 jaar (rechts)



Figuur 63: Gemodelleerde sedimentatie- en erosiepatronen voor scenario E3 na 3 jaar simulatie (links) en na 9 jaar (rechts).

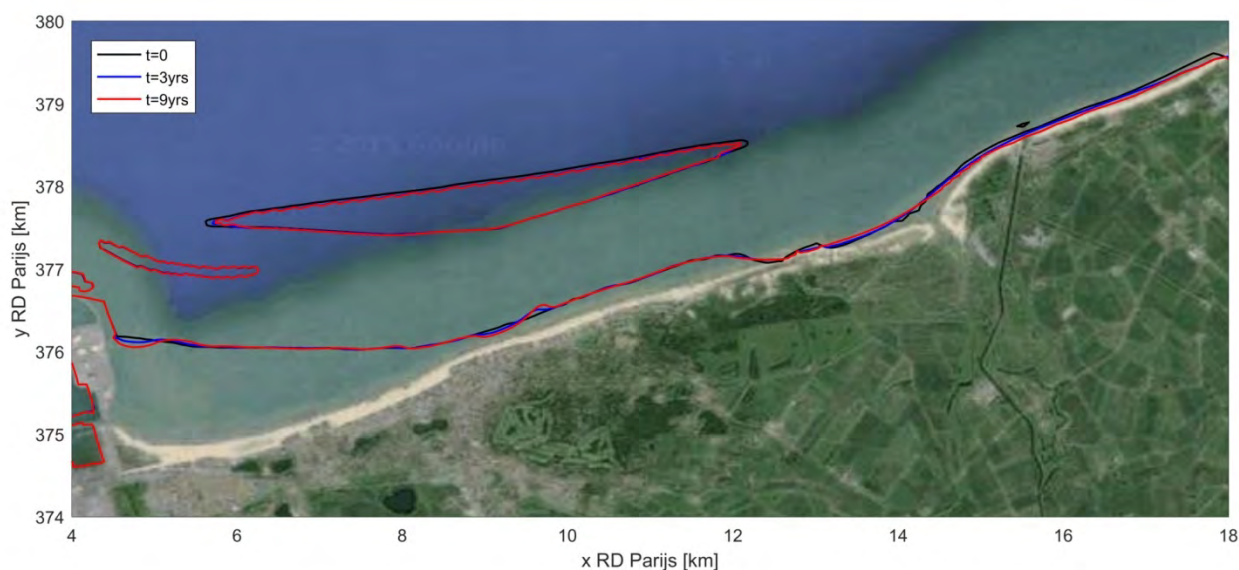


Zwarte lijn: initiële 0m NAP lijn.

Evolutie van de waterlijn

In Figuur 64, the evolution of the coast waterline (0m NAP line) and the waterline of the big island after at the end of the simulation period (3 years) is compared to the initial ones. As for the coastline that extends from Zeebrugge to Zwin, it is indicated that only small local changes appear, which seem to be connected to the presence of the openings between the islands and the harbor. The waterline along the exposed to the wind side of the big island, as well as the east and the west tip of the island, seem to be affected but not substantially. The retreat of the coastline at the east lateral boundary is probably overestimated due to the coarse grid close to the lateral boundaries and due to the fact that the groynes east of Cadzand are not taken into account in this model.

Figuur 64: Evolutie van de waterlijn (0m NAP) scenario E3.



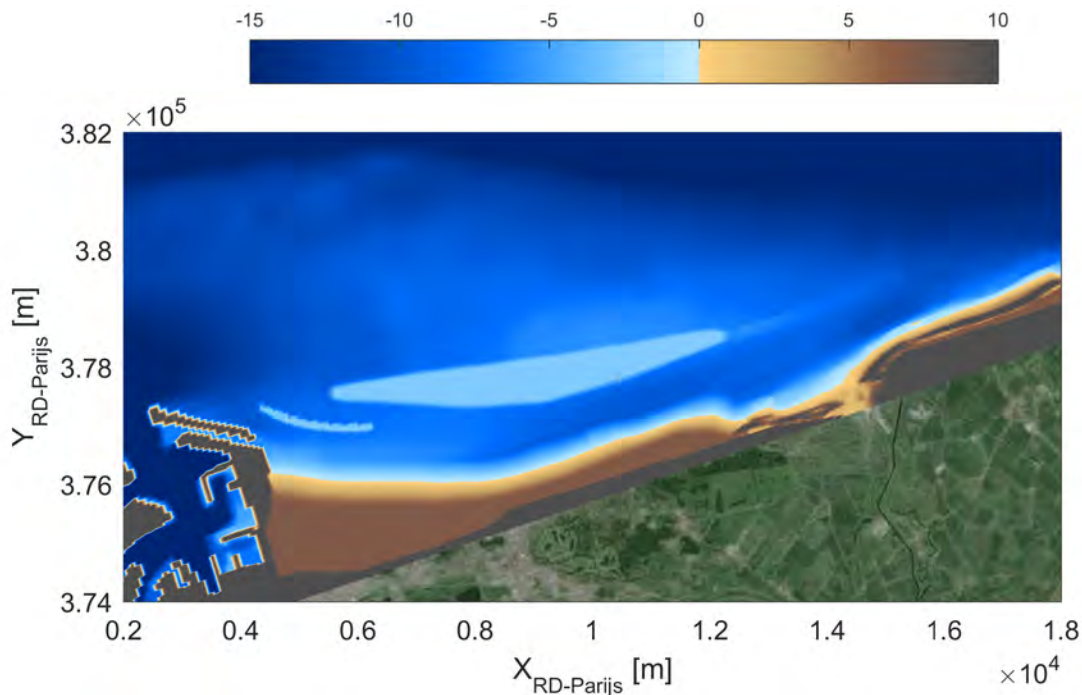
Zwarte lijn: initiële waterlijn, blauw: positie waterlijn na 3 jaar, rood: na 9 jaar simulatie.

3.3.3 Scenario E4 – Onderwatereiland

Bathymetrie

The bathymetry of Scenario E4 (Figuur 65) is similar to the one of scenario E3, differing only in the crest level of the two islands, which are now considered to be submerged. The crest level of both is considered equal to -2.56m NAP, which is the lower astronomical tide level of the area.

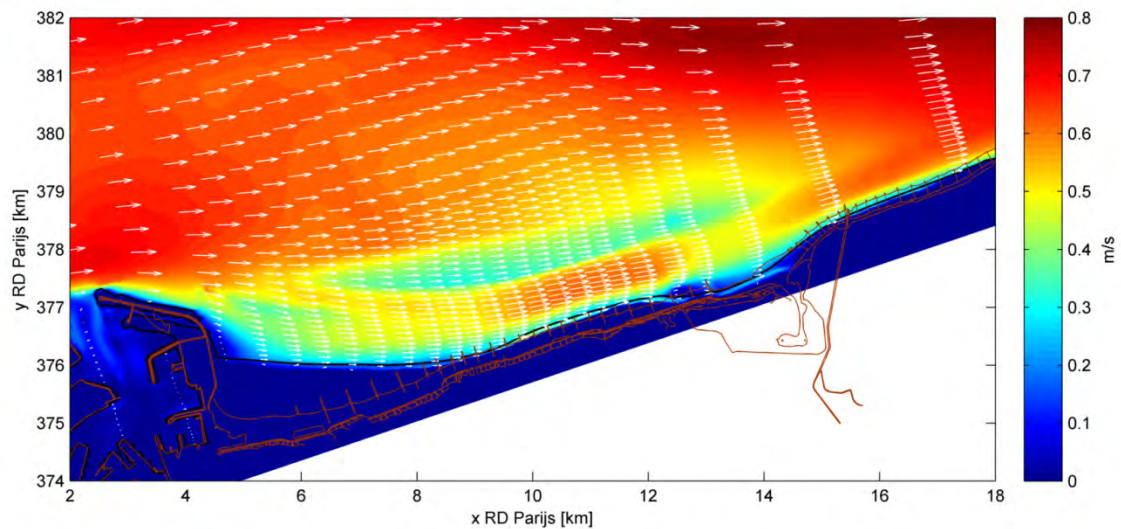
Figuur 65: Initiële bathymetrie van het numeriek model voor scenario E4. Niveau is in m NAP.



Stroomsnelheden

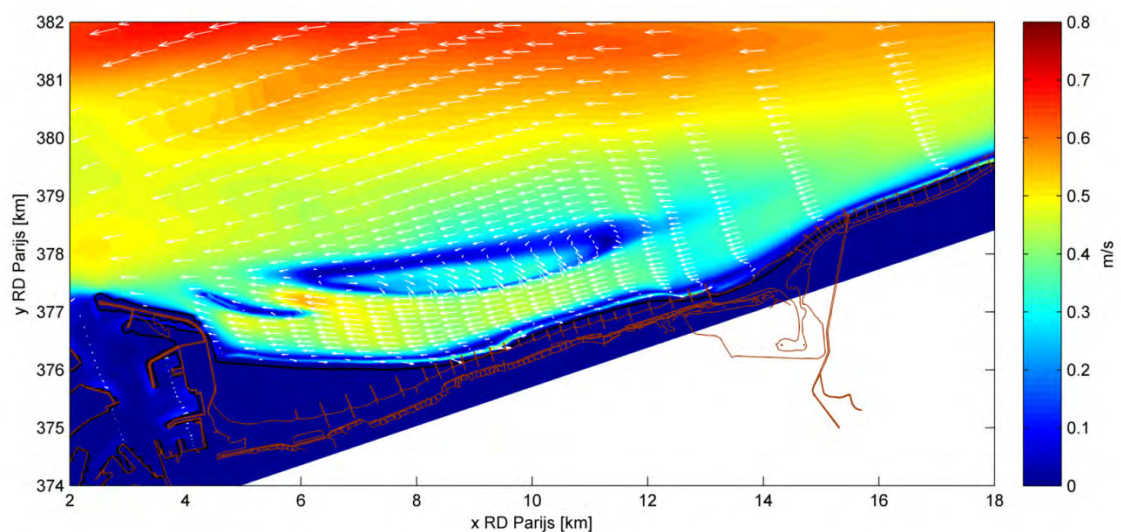
Figuur 66 and Figuur 67 show the instantaneous velocity field developed by the tidal flow (flood and ebb phase, respectively) for the case of scenario E4 at the end of the simulation period (3 years). During the flood stage, it is clearly indicated that the flow slows down above the submerged islands, while the increased velocities observed in the case of the emerged islands (at the channel between them) are not observed now. However, there is an area of enhanced flow velocities, between the big submerged island and the beach (at the height of Lekkerbek, west of Zwin). The behavior of the flow above the big submerged island is totally different during the ebb stage, presenting a tendency to develop a big eddy along the island. At the narrow channels between the islands and the east breakwater of Zeebrugge, enhanced velocity field is found.

Figuur 66: Snelheden bij vloedstroom, scenario E4.



Zwarte lijn: 0m NAP na 3 jaar simulatie

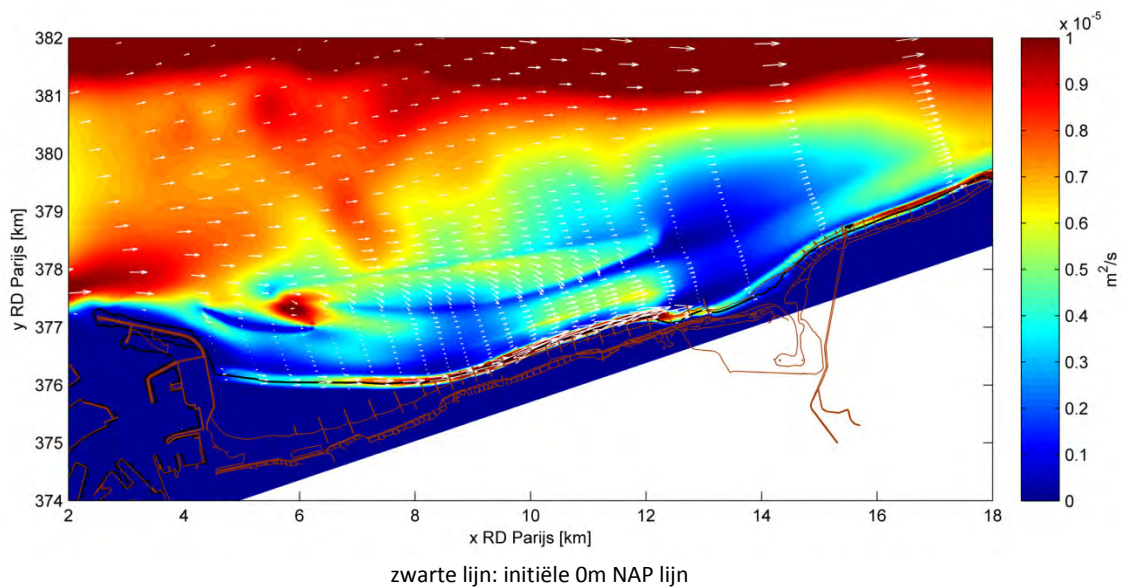
Figuur 67: Snelheden bij ebstroom, scenario E4. zwarte lijn: 0m NAP na 3 jaar simulatie.



Zwarte lijn: 0m NAP na 3 jaar simulatie

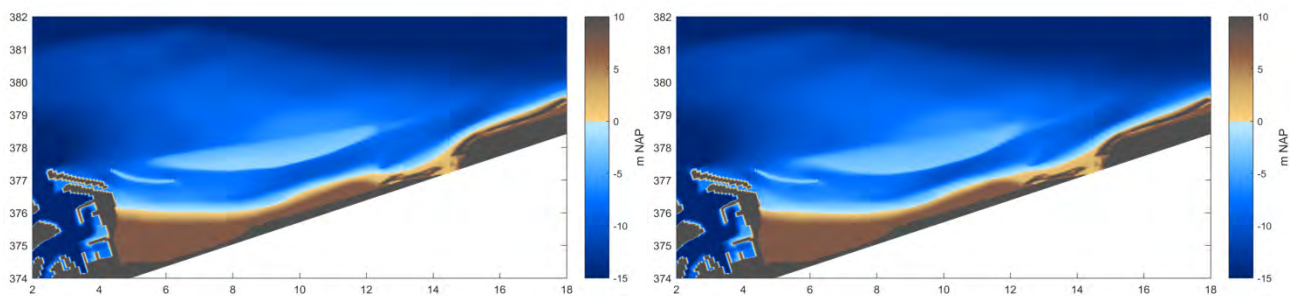
Netto zandtransport en bodemverandering

The sediment transport rate averaged over the simulation period (3 years) for the case of the submerged island, is shown in Figuur 68. Increased transport rates are observed just in front of and along the groyne area, indicating that the efficiency of the big submerged island in protecting the beach, is rather limited. Apparently, the function of the groynes is now limited due to the fact that they are covered by the nourished sand. Increased sediment flux is observed also at the area between the beach and the east part of the big island. The transport rate in the channel between the two islands is clearly decreased compared to the case of the emerged islands (scenario E3).

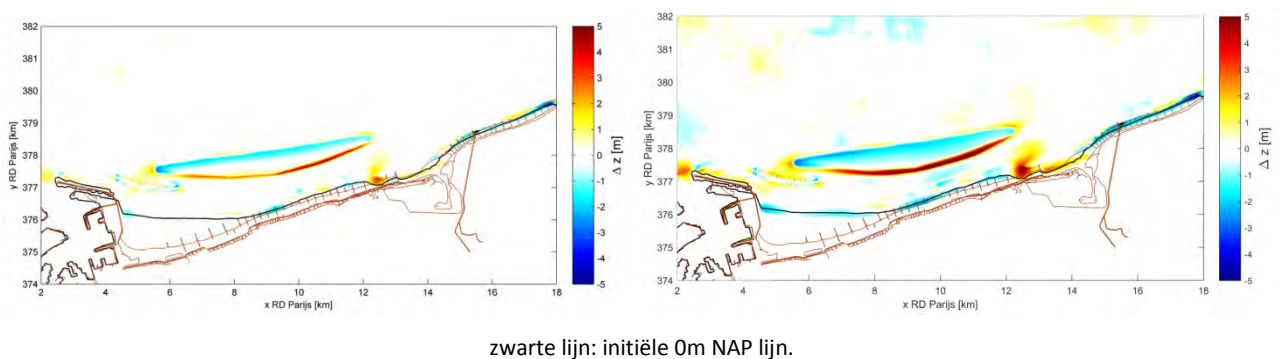
Figuur 68: Gemodelleerd gemiddeld zandtransport (m^2/s) scenario E4 (volumes inclusief poriën).

Figuur 70 shows the resulting sedimentation and erosion patterns due to the presence of the two submerged islands at the end of the simulation period. Erosion occurs along the weather side of the big island, and the eroded material is deposited along the lee side (protected) of it. In the channel between the two islands, accretion of sediment is observed next to the eroded west tip of the big island, while erosion occurs at the east tip of the small island. Alternating erosion and sedimentation patterns are observed at the beach behind the big island, while substantial amount of sediment is accumulated at the west side of Zwin.

Figuur 69: Gemodelleerde bathymetrie na 3 (links) en 9 jaar (rechts)



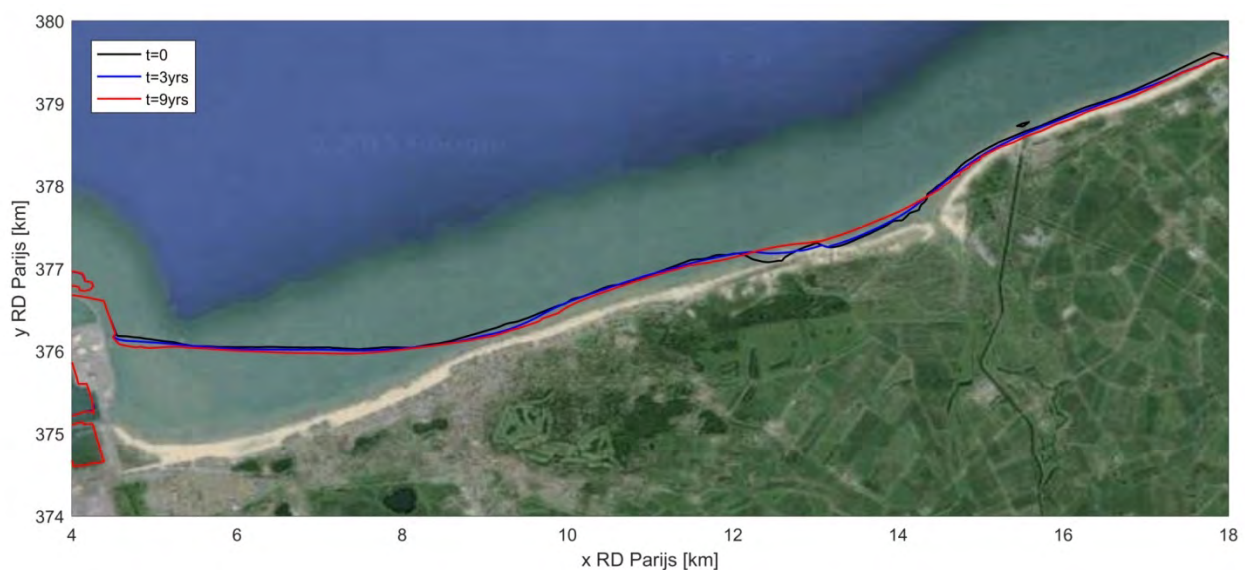
Figuur 70: Gemodelleerde sedimentatie- en erosiepatronen voor scenario E4 na 3 jaar (links) en 9 jaar (rechts) simulatie.



Evolutie van de waterlijn

In Figuur 71, the evolution of the coast waterline (0m NAP line) at the end of the simulation period (3 years) is compared to the initial one. As for the coastline that extends from Zeebrugge to Zwin, it is indicated that only local retreat of the waterline appears very close to the harbor and at the height of Zoute. On the contrary, the coastline presents substantial extending trend at the west of Zwin. It is also seaward extended at the mouth of Zwin, but retreats at the east side of Zwin. The retreat of the coastline at the east lateral boundary is probably overestimated due to the coarse grid close to the lateral boundaries and due to the fact that the groynes east of Cadzand are not taken into account in this model.

Figuur 71: Evolutie van de waterlijn (0m NAP) scenario E4.



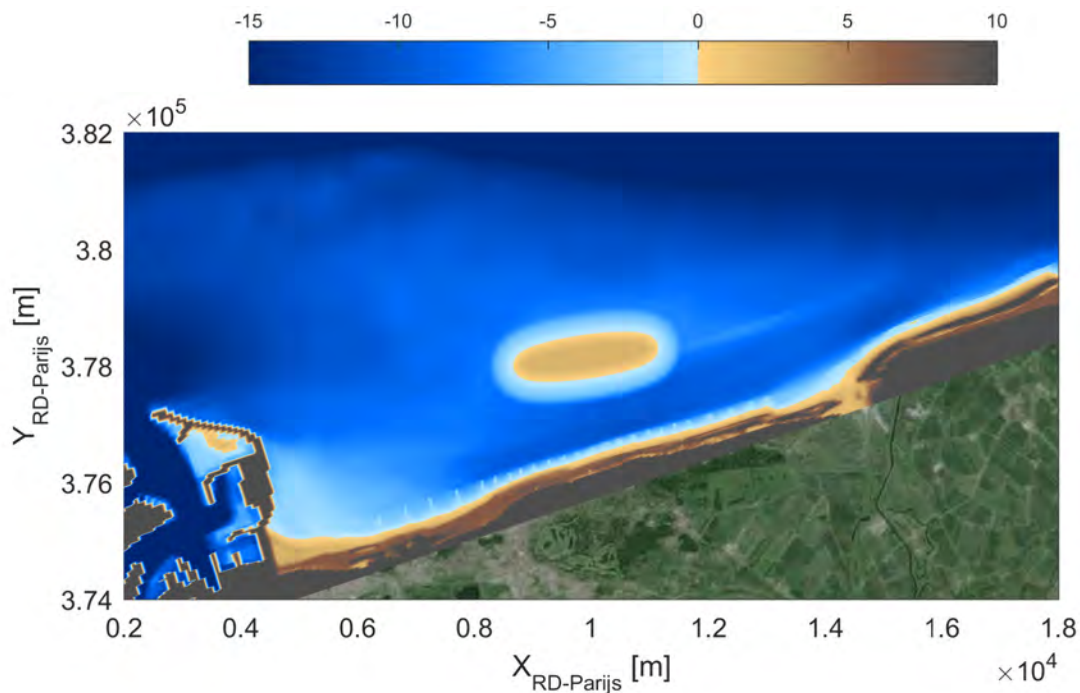
Zwarte lijn: initiële waterlijn, blauw: positie waterlijn na 3 jaar, rood: na 9 jaar simulatie.

3.3.4 Scenario H1 – Piloot eiland

Bathymetrie

Scenario H1 foresees the construction of one pilot island of elliptic shape, at the height of the area between Zoute and Lekkerbek (Figuur 72).

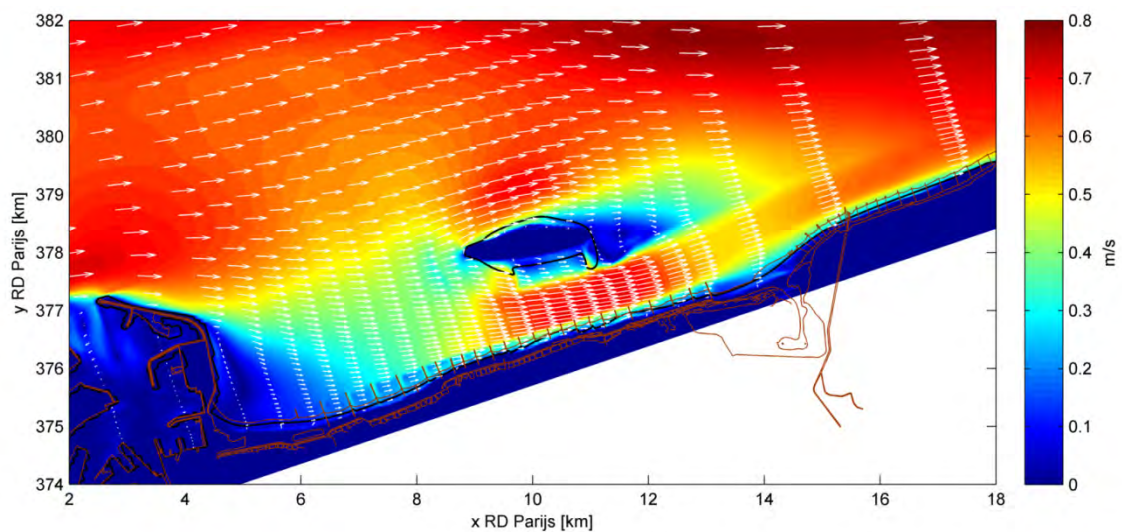
Figuur 72: Initiële bathymetrie van het numeriek model voor scenario H1. Niveau is in m NAP.



Stroomsnelheden

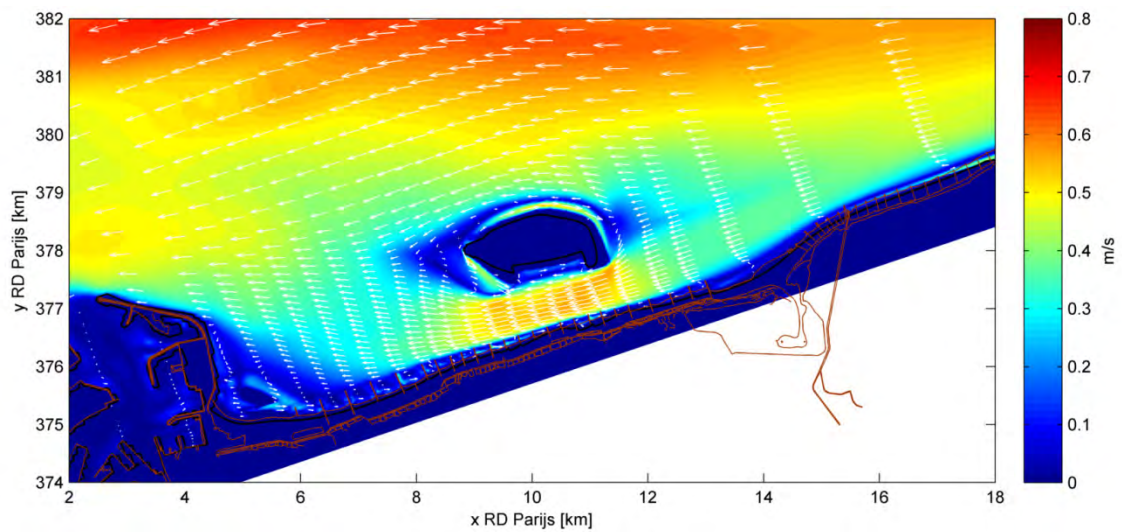
Figuur 73 and Figuur 74 show the instantaneous velocity field developed by the tidal flow (flood and ebb phase, respectively) for the case of pilot island (H1) at the end of the simulation period (3 years). During the flood stage, increased velocities are observed in the area between the pilot island and the groynes (west of Zwin). In addition, a recirculation zone appears at the east side of the island. Similar behavior of the flow is found during the ebb stage, i.e. flow is enhanced between the island and the beach, however, the magnitude of the tidal current is lower than the one in flood stage. During ebb, flow reversal occurs at two sides of the island, i.e. at the west and at the south side.

Figuur 73: Snelheden bij vloedstroom, scenario H1.



Zwarte lijn: 0m NAP na 3 jaar simulatie

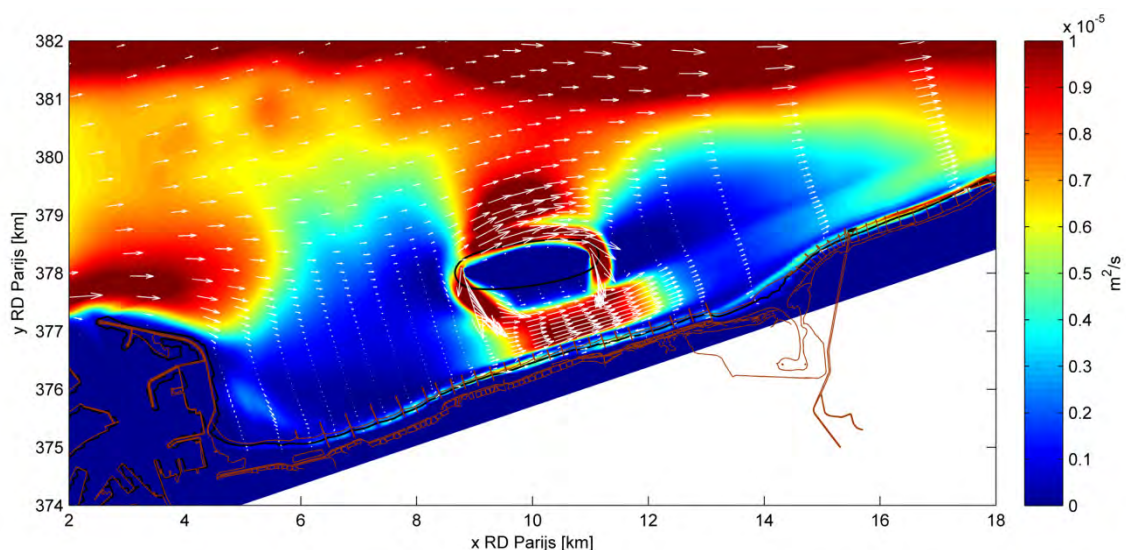
Figuur 74: Snelheden bij ebstroom, scenario H1. zwarte lijn: 0m NAP na 3 jaar simulatie.



Zwarte lijn: 0m NAP na 3 jaar simulatie

Netto zandtransport en bodemverandering

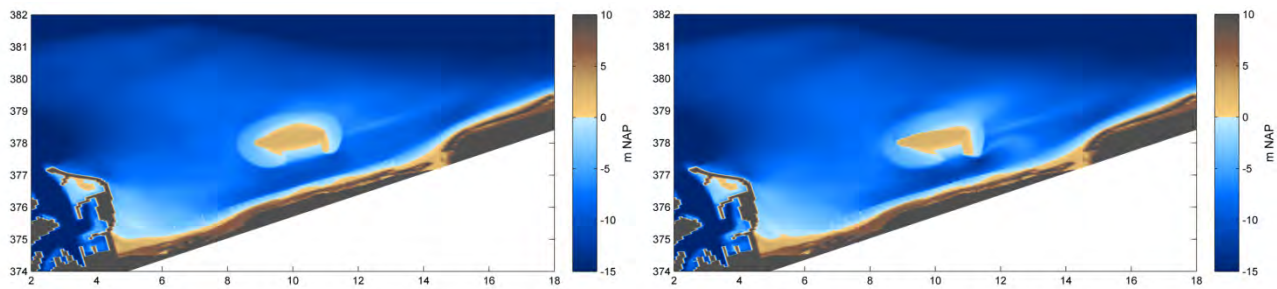
The sediment transport rate averaged over the simulation period (3 years) for the case of the pilot island, is shown in Figuur 75. Increased transport rates are observed not only in the area between the pilot island and the groynes, but also all around the island and especially at its west and east sides. On the other hand, sediment flux seems to be relatively smaller very close to the beach due to the presence of the groynes.

Figuur 75: Gemodelleerd gemiddeld zandtransport (m^2/s) scenario H1.

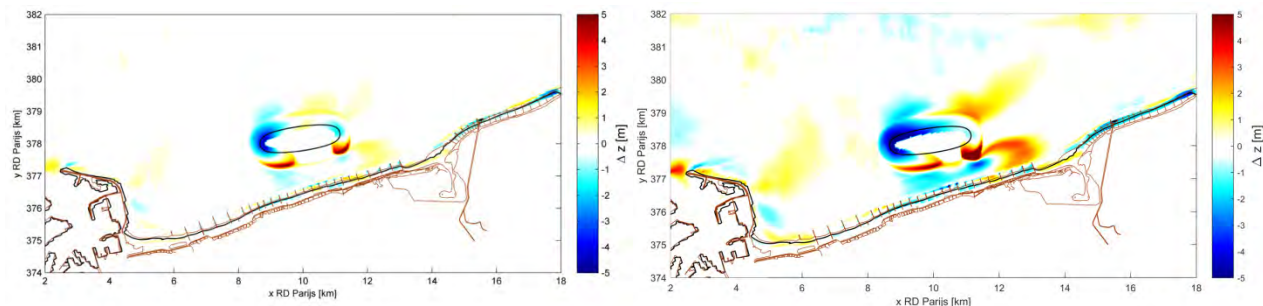
Volumes inclusief poriën. Zwarte lijn: initiële 0m NAP lijn.

Figuur 77 mainly shows the resulting sedimentation and erosion patterns from the construction of the pilot island at the end of the simulation period. Strong erosion occurs at the west side of the island, and the eroded material is deposited mainly to the south, while part of it may have been transferred to the northeast deeper area. The erosion pattern at the east side of the island seems to be relatively less pronounced, but strong accretion of sediment is observed at the southeast side of the island. Very slight sedimentation-erosion patterns can be observed at the narrow flow channel between the island and the beach.

Figuur 76: Gemodelleerde bathymetrie na 3 (links) en 9 jaar (rechts)



Figuur 77: Gemodelleerde sedimentatie- en erosiepatronen voor scenario H1 na 3 jaar (links) en 9 jaar (rechts) simulatie.

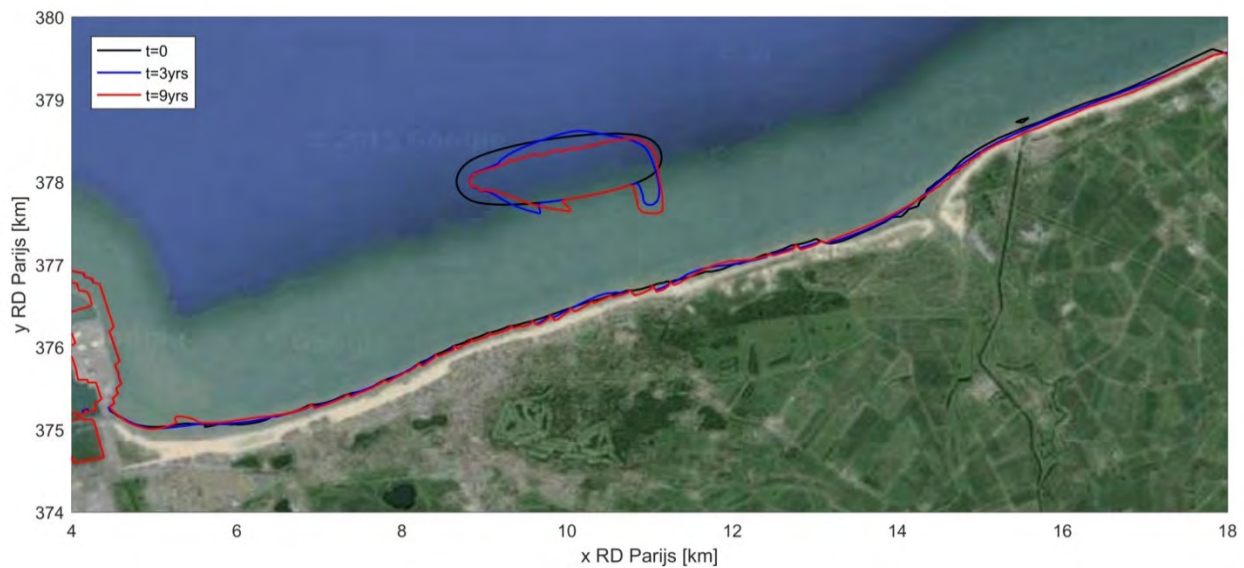


Zwarte lijn: initiële 0m NAP lijn

Evolutie van de waterlijn

In Figuur 78, the evolution of the coast waterline (0m NAP line) and the waterline of the pilot island after at the end of the simulation period (3 years) is compared to the initial ones. As for the coastline, the function of the groynes is clearly indicated by the blue line almost along the whole Knokke-Heist. Successive extension and retreat of the coastline is observed at the height of the east side of the pilot island (Lekkerbek). The waterline of the island is substantially changed at the end of the simulation period, showing that it tends to become shorter (in the longshore direction), while its lateral boundaries move towards the beach.

Figuur 78: Evolutie van de waterlijn (0m NAP) scenario H1;.



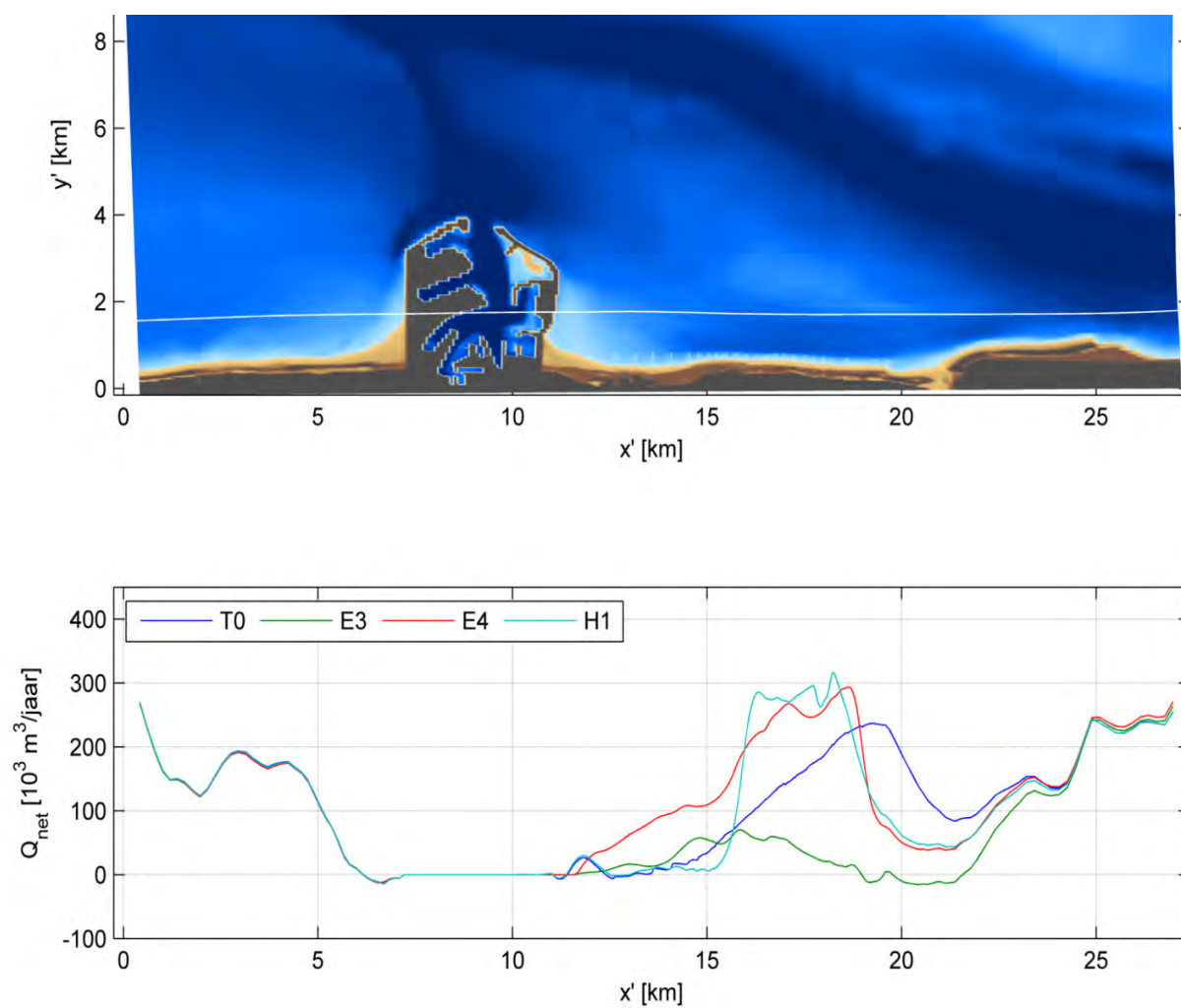
Zwarte lijn: initiële waterlijn, blauw: positie waterlijn na 3 jaar, rood na 9 jaar simulatie.

3.3.5 Comparison between scenarios and present situation

Langstransport

In Figuur 79, the yearly averaged longshore transport along the coast for the reference scenario T0 and the all the scenarios of Vlaamse Baaien (E3, E4, H1) for the whole simulation period, is presented. Note that longshore transport is integrated at the zone restricted (landwards) by the white line located ca. 1500m from the dike, covering (more or less) the area located between the coast and the foreseen islands. Positive values of Q_{net} correspond to eastward transport. It is found that the scenario E3 has the strongest effect on the longshore transport, presenting a Q_{net} peak of about 70000 m³/jaar (in the area of interest: 12km < x' < 22km), which is about 3.5 times smaller than the corresponding one of the reference scenario T0, while the peak is transferred from the west Zwin to the area of Zoute. Scenario E4 results into strong longshore transport (~300000 m³/jaar), due to the relatively low efficiency of the submerged islands and the elimination of functionality of the beach groynes. The amplitude of Q_{net} for scenario E4 is greater than that of T0 due to the amount of the nourished sand. Finally, scenario H1 (pilot island) results into similar longshore transport magnitude as scenario E4, in a restricted zone, 16km < x' < 18km, which is located at the height of the east part of the pilot island. Compared to scenario T0, scenario H1 predicts accumulation of the eroded sand to the area at the west of Zwin and not in the mouth of Zwin.

Figuur 79: Jaarlijks gemiddelde netto langtransport berekend in de zone afgebakend door de witte lijn in de bovenste plot.

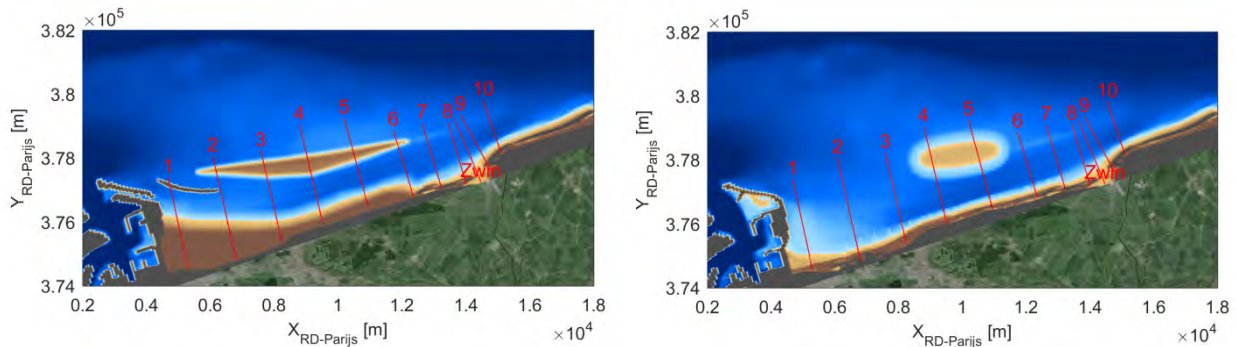


De volumes zijn incl. poriën.

Evolutie strandprofiel

The evolution of selected bed profiles at the end of the simulation period (after 3 years) for all the investigated scenarios (T0, E3, E4, H1), is presented in this section. In Figuur 80, the location of the considered transects on the bathymetries of scenarios E3 (left) and H1 (right), is shown. In this section, results for the evolution of Profiles 2, 4, 6 and profile 'Zwin', are included, while the evolution of the rest profiles is included in Appendix C.

Figuur 80: Locatie van de profielen voor scenario's E3 (links) en H1 (rechts).



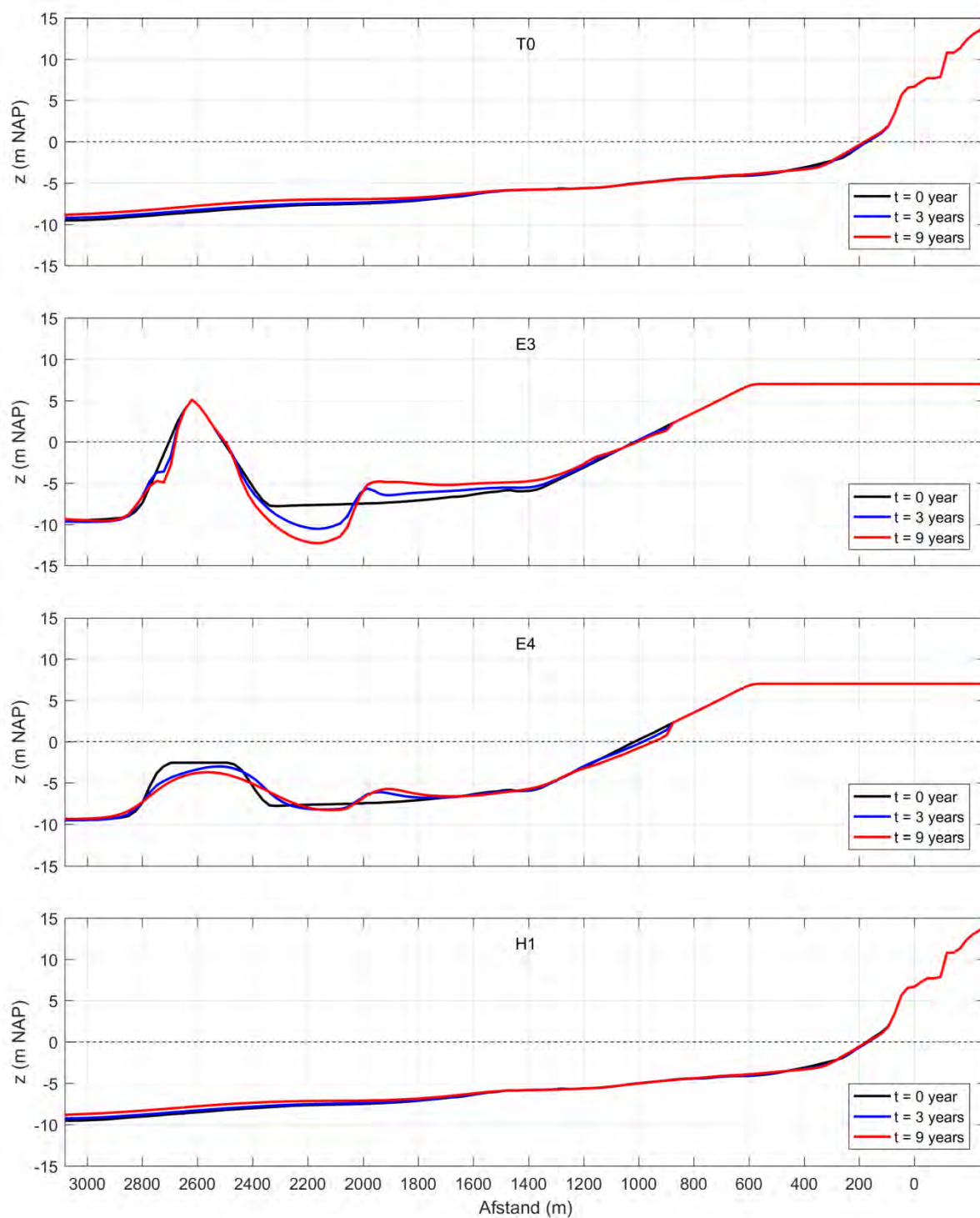
Figuur 81 shows the evolution of Profile 2, where it can be seen that the beach and the foreshore are quite stable after 3 years for scenarios T0 and H1. For scenarios E3 and E4 the main impact is observed at the area of the island (cross-section is at the west tip of the big island).

Figuur 82 shows the evolution of Profile 4, where it can be seen that the beach face is eroded for all scenarios except scenario E4, in which sediment accumulates just below 0m NAP level. As for the cross-section of the islands, it is found the west tip of the pilot island (scenario H1) presents substantial alteration, while the impact is less extended for the mid cross-sections of the big island of scenarios E3 and E4.

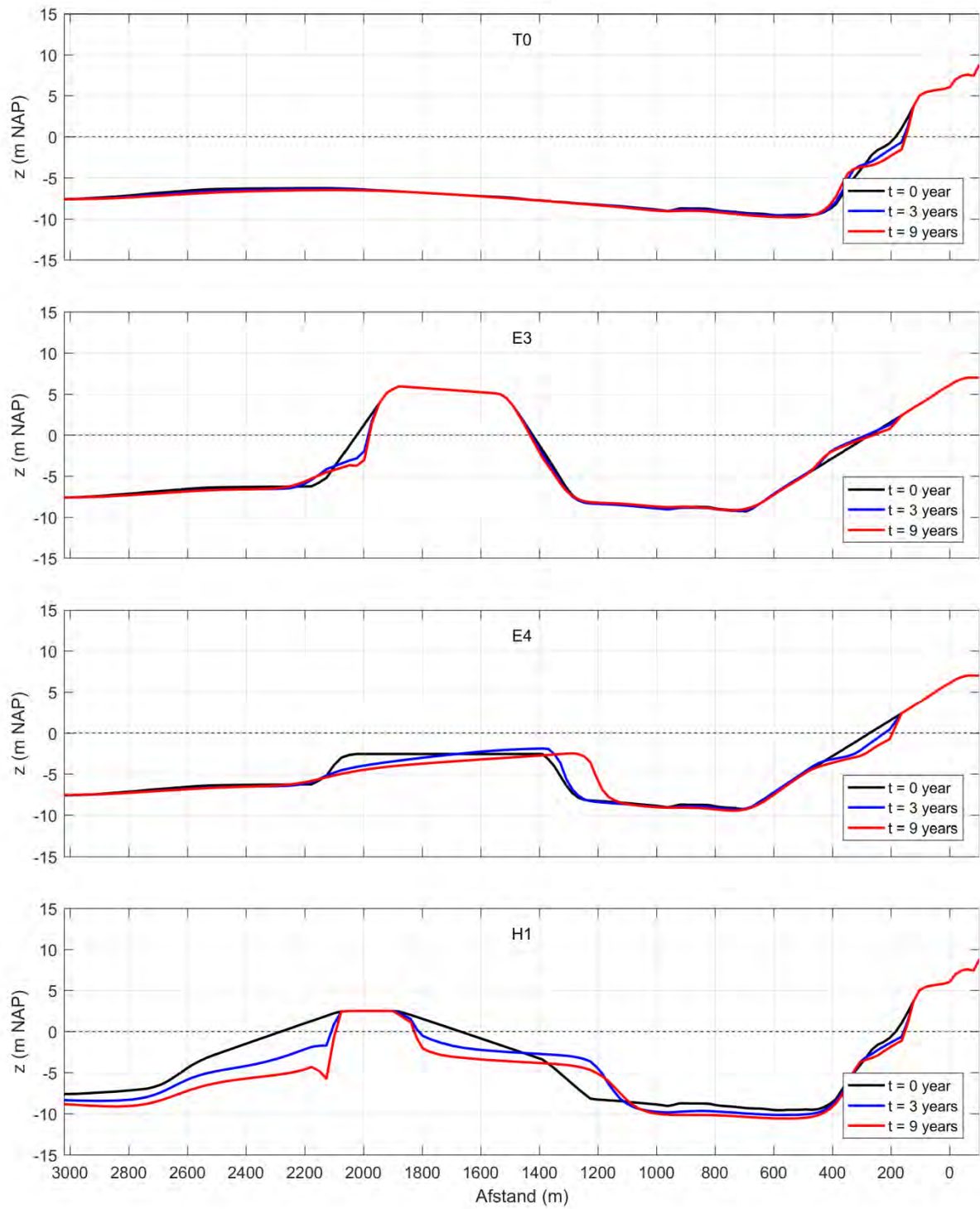
Figuur 83 shows the evolution of Profile 6, where it can be seen that the dune erosion occurs for the reference scenario. Scenarios E4 and H1 don't seem to be efficient in preventing from this beach/dune erosion, on contrast to what is observed for scenario E3. However, the east tip of the big island of scenario E3 presents substantial erosion in its upper part. Milder impact due sediment transport is observed for the case of the submerged island (E4).

Finally, in Figuur 84 it is shown that the evolution of profile 'Zwin' is similar for all the investigated scenarios.

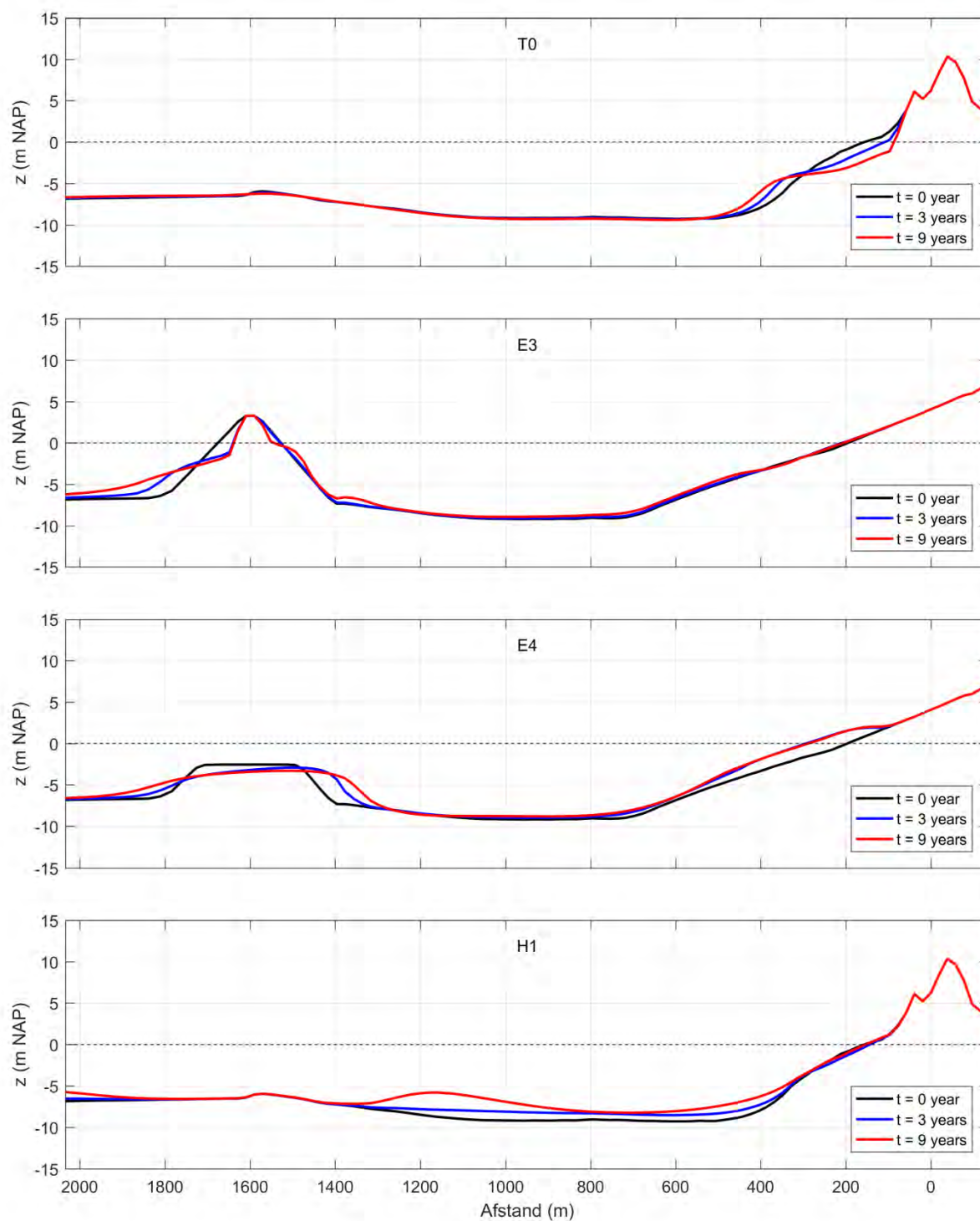
Figuur 81: Evolutie Profiel 2 na drie en negen jaar (XBeach model), scenario's E3, E4 en H1. T0 is de huidige situatie.



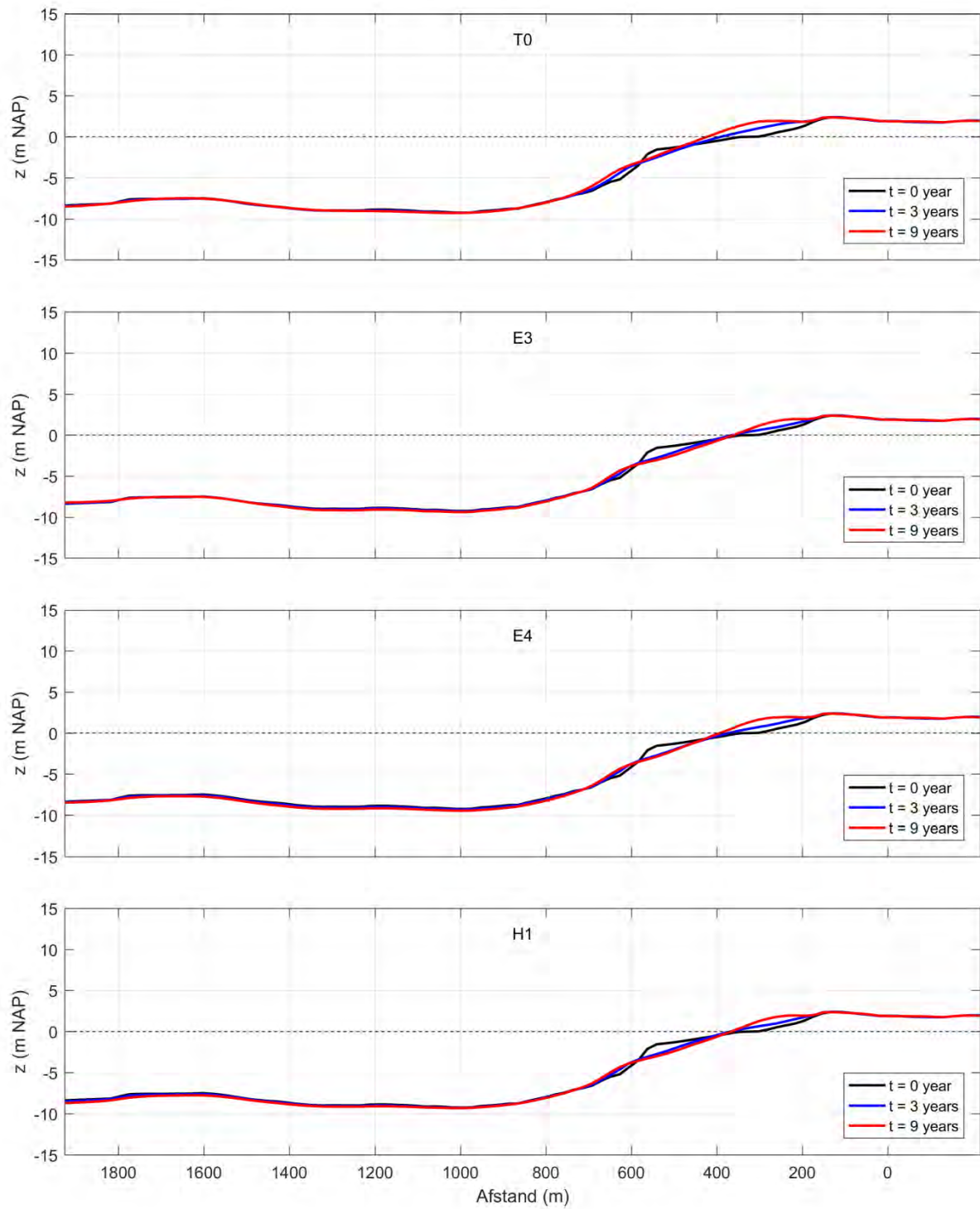
Figuur 82: Evolutie Profiel 4 na drie en negen jaar (XBeach model), scenario's E3, E4 en H1. T0 is de huidige situatie.



Figuur 83: Evolutie Profiel 6 na drie en negen jaar (XBeach model), scenario's E3, E4 en H1. T0 is de huidige situatie.



Figuur 84: Evolutie Profiel 'Zwin' na drie en negen jaar (XBeach model), scenario's E3, E4 en H1. T0 is de huidige situatie.



Evolutie van de waterlijn

In Figuur 85 up to Figuur 88, the evolution of the waterline retreat, i.e. the distance between the waterline (0m NAP) and the dike at transects 2, 4, 6 and 'Zwin' (see Figuur 80), during the simulation period, is presented for all the investigated scenarios.

For Profile 2, comparison of the two nourishment scenarios (E3, E4) shows that coastline is fully protected for E3 case, while for E4 case presents a slight but constant over the simulation period retreat. Scenarios T0 and H1 predict stability of the waterline over the simulation period.

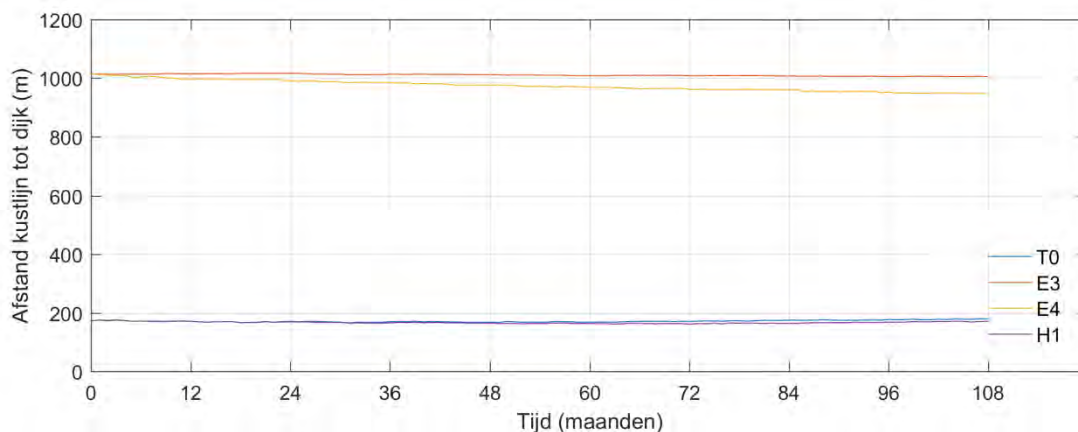
For Profile 4, the waterline remains stable for scenario E3, while there is a constant rate of beach retreat for scenario E4. Once again scenario T0 and H1 exhibit the same behavior, i.e. abrupt retreat for the first 9 months and smoother rate of retreat for the rest of the simulation period.

For Profile 6, the width of the beach remains more or less stable for scenarios E3 and H1 (even slightly increased for scenario E3). Scenario E4 predicts continuous extension of the beach during the simulation period, which in total reaches a value of 100m. On the contrary, according to the reference scenario (T0), it is foreseen that beach will present a constant retreat till the end of the simulation period.

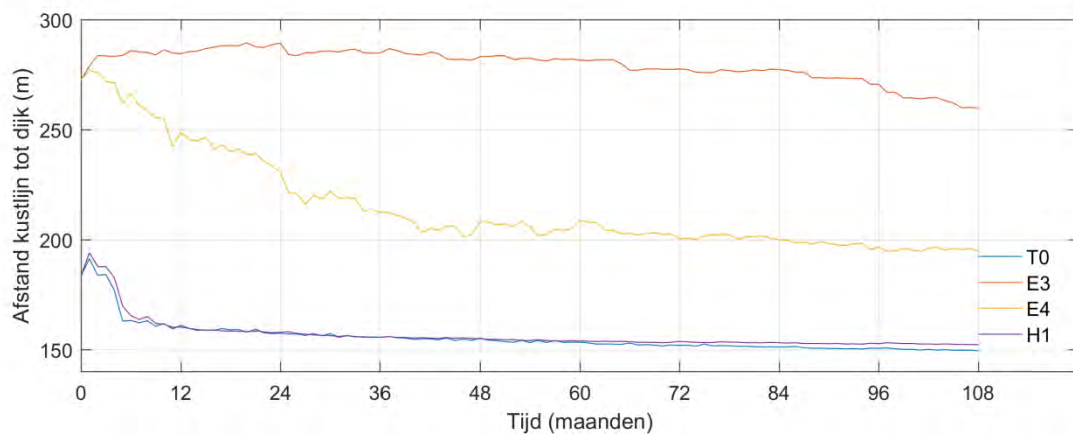
For Profile 'Zwin', the beach width in all scenarios increases presenting the trend to stabilize after a period of 18 months.

In Tabel 7, the evolution of beach width (position 0m NAP) in meters per year, averaged during the first and the last years of the simulation period, is shown.

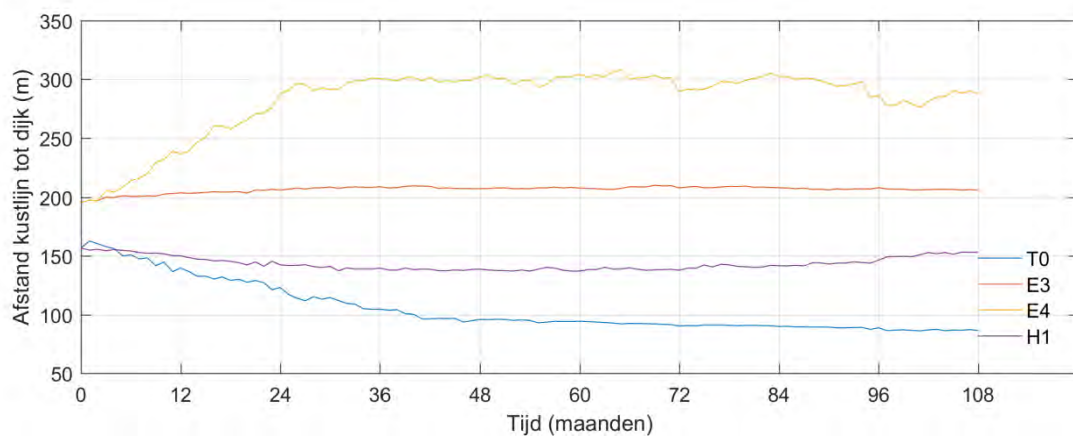
Figuur 85: Evolutie van de waterlijn voor profiel 2.



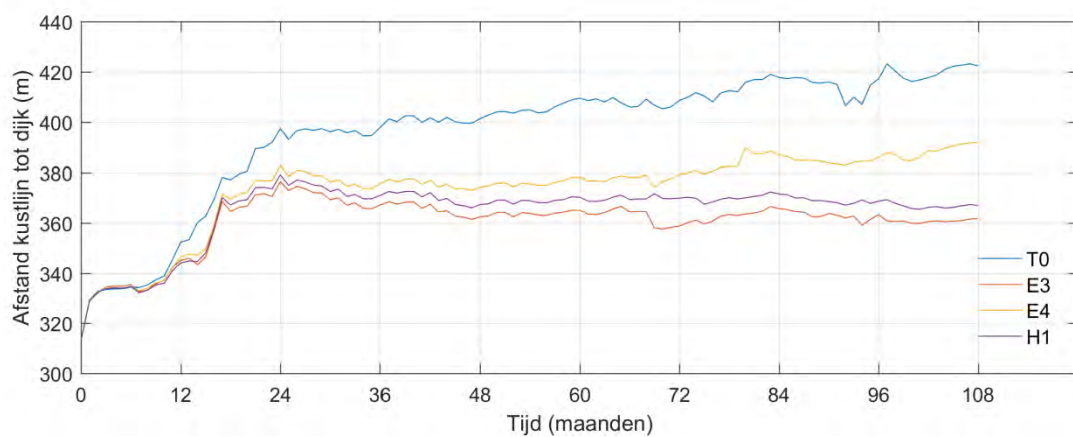
Figuur 86: Evolutie van de waterlijn voor profiel 4.



Figuur 87: Evolutie van de waterlijn voor profiel 6.



Figuur 88: Evolutie van de waterlijn voor profiel 'Zwin'.



Tabel 7: Evolutie strandbreedte (positie 0m NAP) in m/jaar gedurende het eerste en laatste jaar van de simulatie

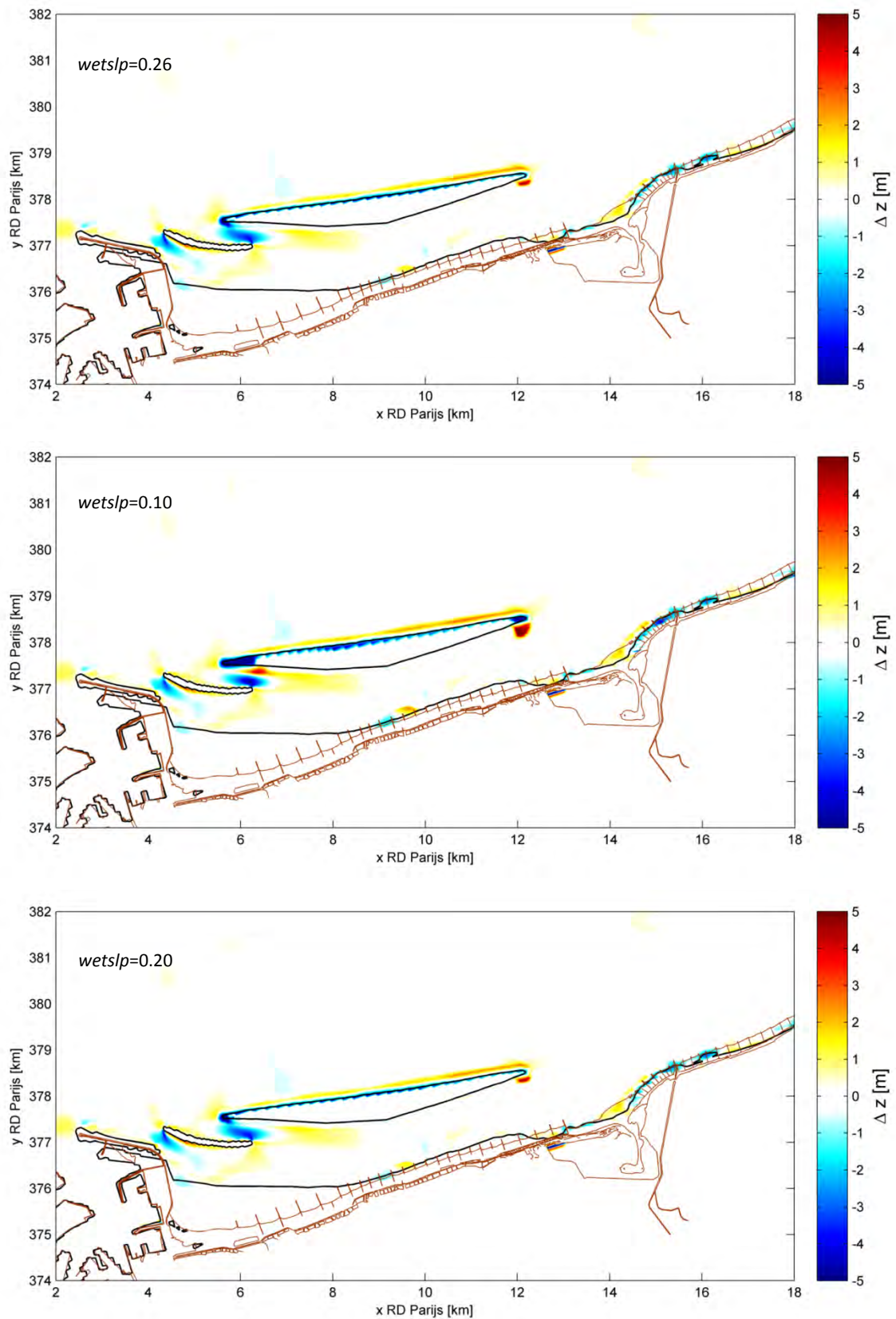
Jaar:	Profiel 2		Profiel 4		Profiel 6		profiel "Zwin"	
	1	9	1	9	1	9	1	9
T0	-1.99	2.2	-22.6	-1.2	-17.0	-2.2	39.2	5.2
E3	1.0	-0.5	12.1	10.9	8.2	-2.0	31.9	-1.6
E4	-17.3	-6.1	-23.9	-1.7	41.2	1.1	33.3	5.9
H1	-1.4	3.0	-23.4	-0.4	-6.5	6.7	30.9	-1.7

Negatief = landwaartse evolutie. T0: huidig strand; E3, E4, H1: Vlaamse Baaien scenario's.

3.3.6 Discussion about avalanche effect on erosion of islands

In XBeach model *wets/p* parameter defines the critical bed slope (dz/dx) at wet areas for the initiation of avalanching. Apparently, a lower value of *wets/p* activates the avalanche mechanism for smaller bed slopes (erosion of an inclined bed is increased). In Figuur 89, the resulting sedimentation and erosion patterns of scenario E3 are illustrated for three different values of *wets/p* parameter, i.e. 0.26 (WTI settings), 0.10 (minimum) and 0.20. It is clearly shown that the specific parameter affects substantially the sedimentation-erosion patterns in the area surrounding the big island and especially the west (mainly) and the east tips of it, predicting increased erosion compared to the two other *wets/p* values. The patterns coming from *wets/p*=0.10 seem to be in to reasonable agreement with the results of N2V model, however the considered value is rather low, considering its physical meaning (the angle of repose of submerged sand is essentially higher $\sim 20^\circ$ or a slope of 1/2,75). On the other hand, results coming from the two higher values (0.20 and 0.26) of *wets/p* seem to be very close to each other. Further investigation on the effect of avalanche on the results is recommended.

Figuur 89: Gemodelleerde sedimentatie- en erosiepatronen voor scenario E3 na 3 jaar simulatie voor verschillende instellingen voor de *wet slope* parameter (*wetslp*)



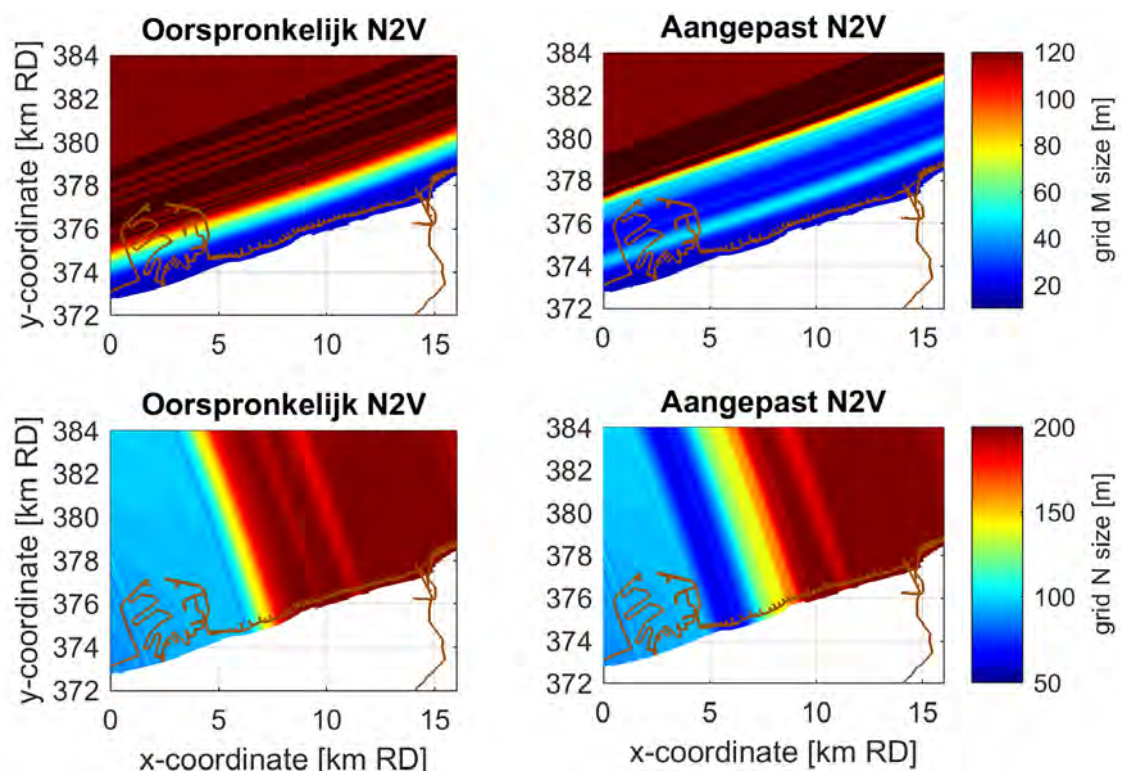
3.4 Nieuwpoort-Vlissingen model

3.4.1 Modelbeschrijving

Nieuwpoort-Vlissingen (N2V) model 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. De randvoorwaarden zijn afkomstig uit het NeVla model; waterstanden op de zeerand, Neumann-randvoorwaarden op de laterale randen en stroming op de Schelde ter hoogte van Vlissingen. 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. Er wordt gebruik gemaakt van de MorMerge cq. parallel-online methode aanpak (Roelvink, 2006). Verder wordt er een uniforme Manning ruwheid van $0.022 \text{ s/m}^{1/3}$, een uniforme zandfractie van 0.2 mm en de Van Rijn (1993) transportformule gehanteerd.

Het N2V model en bijbehorende instellingen zijn overgenomen zoals beschreven in (De Maerschalck et al., 2015). Het rekenrooster is verdicht in kustlans en –dwarse richting ter hoogte van de eilanden van scenario's E3 en E4, Figuur 90. De resolutie ter hoogte van de haven van Zeebrugge is $\sim 100 \times 1200 \text{ m}$ op diep water en $\sim 100 \times 15 \text{ m}$ in de brandingszone in Zeeuws-Vlaanderen. De bodem in het model is erodeerbaar, met uitzondering van de geleidedam in scenario's E3 en E4.

Figuur 90: Resolutie rekenrooster oorspronkelijk en aangepast N2V 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, wat betekent dat de simulatieduur correspondeert met 10 jaar morfologische verandering.

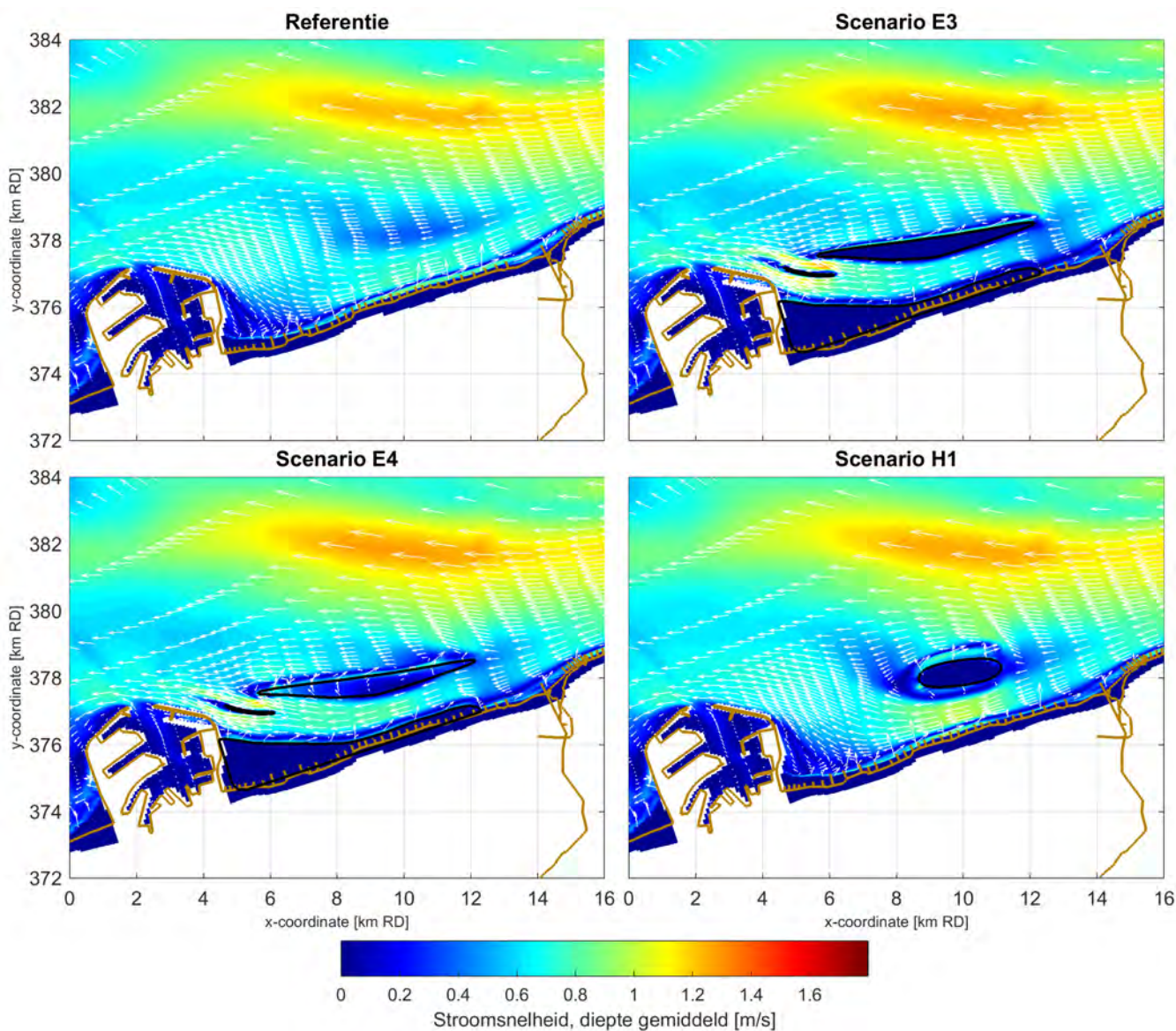
3.4.2 Stroomsnelheden

Figuur 91 en Figuur 92 tonen het initiële effect van de ingrepen op de maximale eb- en vloedstroomsnelheden. Tijdens eb veroorzaken de eilanden in scenario's E3, E4 en H1 een afname van de snelheden ten oosten van het eiland. Vervolgens neemt de snelheid toe tussen het piloot eiland (H1) en de kust, en rondom de geleidedam in scenario's E3 en E4. De toename in snelheid rondom de geleidedam is sterker voor het eiland in scenario E3 dan voor het overstroombaar eiland in scenario E4.

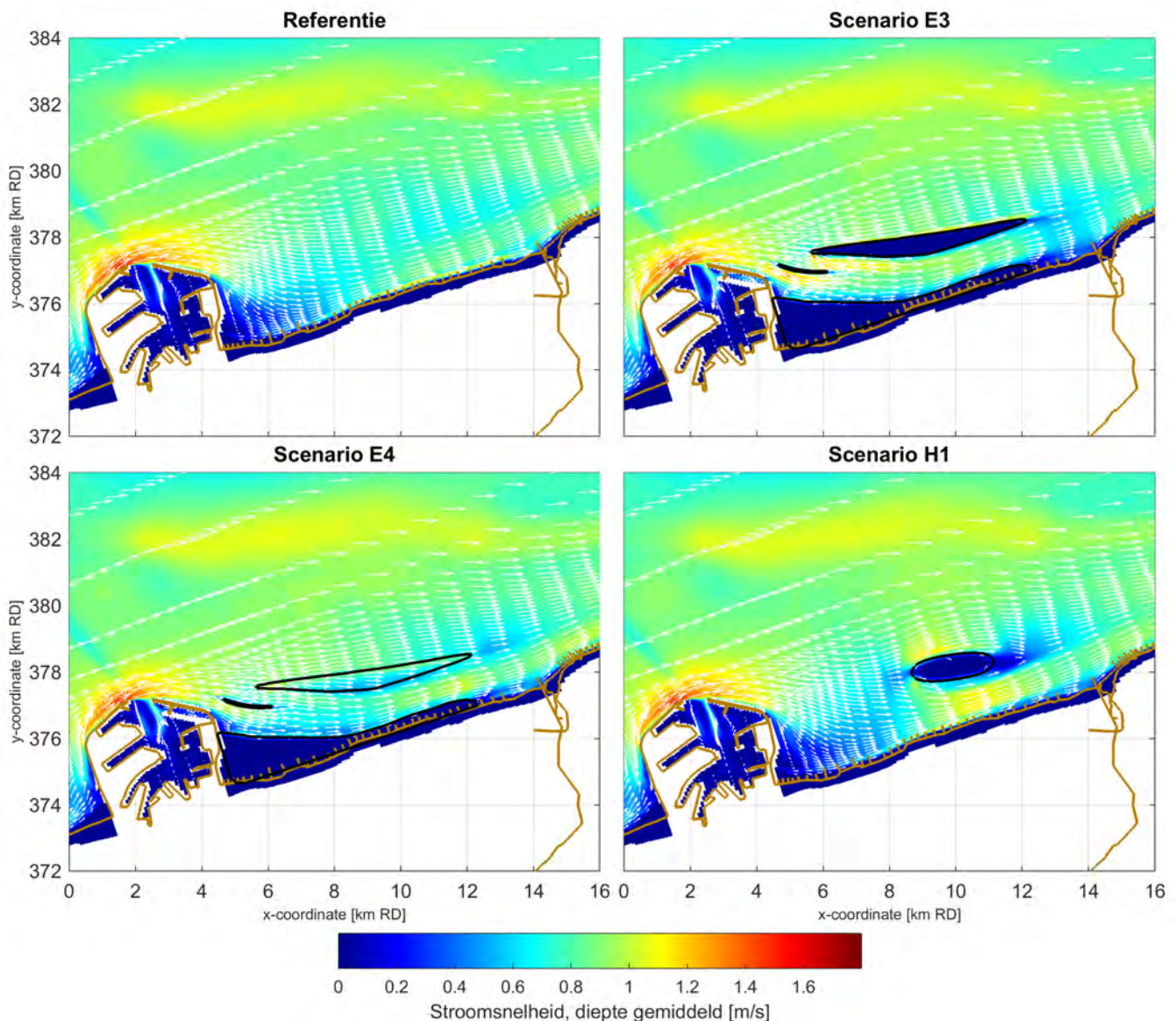
Tijdens vloed is er ook een toename van de snelheid rondom de geleidedam, wederom sterker voor het eiland in scenario E3 dan voor het overstroombaar eiland in scenario E4. De snelheden over het overstroombaar eiland in scenario E4 zijn tijdens vloed sterker dan tijdens eb. Tussen de eilanden in scenario's E3, E4 en H1 en de kust is er een toename van de vloedstroomsnelheden.

Deze snelheden zijn over het algemeen groter dan die berekend met het XBeach model, mogelijk door een relatief simpele getijforcering in het laatste model (zie Hoofdstuk 3.3). Een ander belangrijk verschil zijn de hogere ebsnelheden die het N2V model berekent in de getijgeul Scheur ($y_{RD} \approx 382$ km).

Figuur 91: Berekende stroomsnelheden tijdens eb voor de referentie, scenario E3 (eiland), E4 (overstroombaar eiland) en H1 (piloot).



Figuur 92: Berekende stroomsnelheden tijdens vloed voor de referentie, scenario E3 (eiland), E4 (overstroombaar eiland) en H1 (piloot).



3.4.3 Zandtransporten

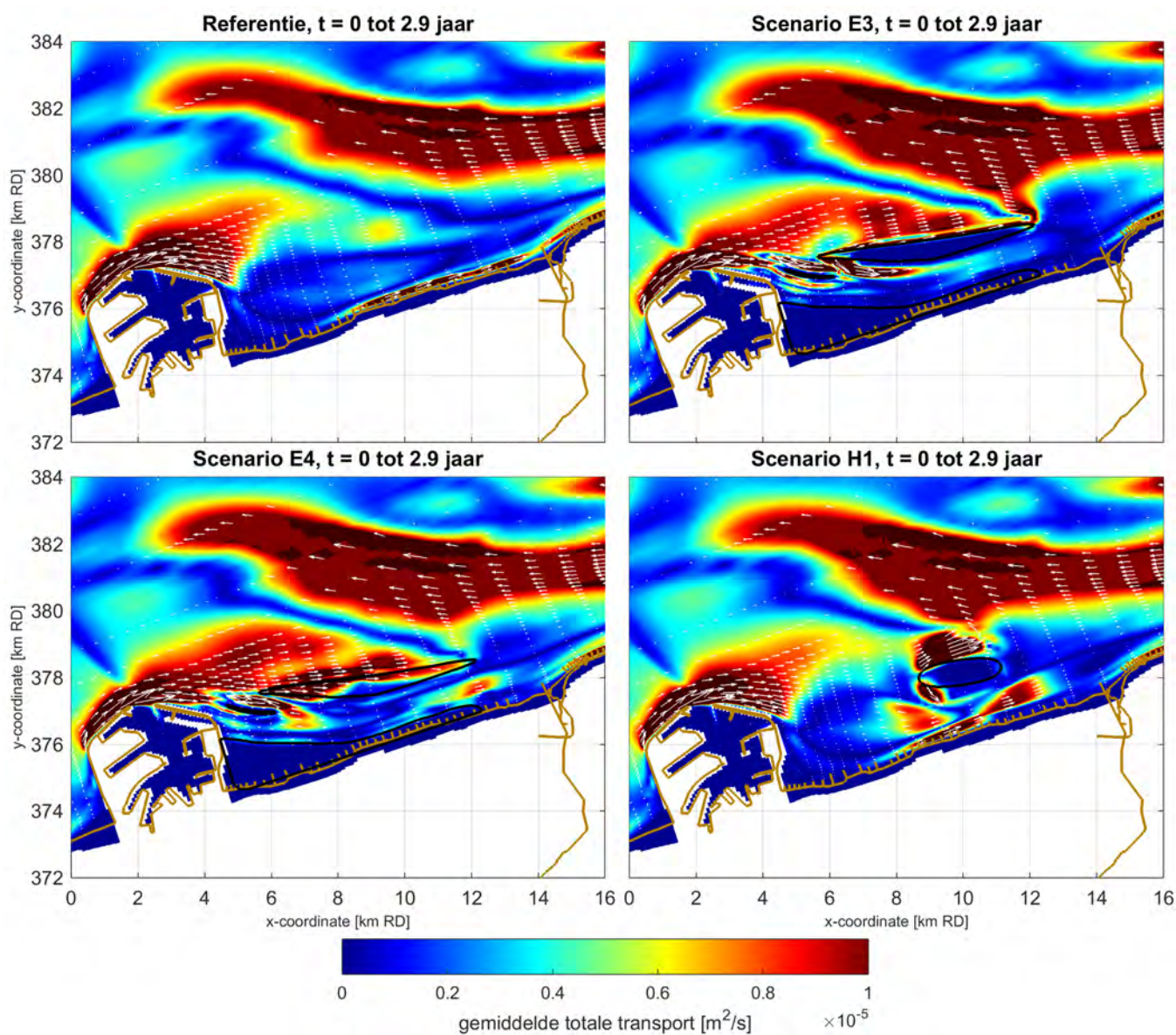
In Figuur 93 is het netto zandtransport, gemiddeld over 3 jaar, te zien voor alle scenario's. In alle scenario's is een convergentie van zandtransporten te zien ten noordoosten van de haven, waarbij de zandtransporten vanaf de haven naar het oosten gericht zijn en in Scheur naar het westen gericht zijn. Het naar het oosten gerichte zandtransport ten noorden van de eilanden in scenario's E3, E4 en H1 neemt sterk toe ten gevolg van de ingrepen. De toename in snelheden rondom de geleidedam in scenario E3 en E4 resulteert lokaal in een toename van de zandtransporten.

Het brandingstransport langs de Vlaamse kust neemt sterk af in scenario's E3 en E4, waarschijnlijk door het schaduw effect van het (overstroombaar) eiland. In scenario H1 resulteert het piloot eiland ook in een afname van het brandingstransport, maar is dit effect minder vergeleken met de andere scenario's.

Het effect van de scenario's op de netto zandtransporten is vergelijkbaar met het ZWeM-zand model (paragraaf 3.2.3). De belangrijkste verschillen tussen beide Delf3D modellen zijn zichtbaar in de

referentiesituatie. Het effect van de havendammen op de zandtransporten is volgens het ZWeM model sterker, in de Scheur zijn de transporten veel lager en ten noorden hiervan oostwaarts in plaats van westwaarts, en het oostwaarts brandingstransport is een stuk kleiner. Dit laatste komt waarschijnlijk deels door het ontbreken van strandhoofden in het N2V model. De netto zandtransporten met het XBeach model (zie vorige paragraaf) lijken kleiner te zijn dan berekent met het N2V model, mogelijk door de grotere korrelgrootte (0,3 ipv 0,2 mm) en de lagere, berekende stroomsnelheden. Ook het XBeach model geeft netto oostwaarts transport in Scheur. Met name voor Scenario's E4 en H1 geeft het XBeach model andere resultaten dan het N2V model; het brandingstransport bij het overstroombaar eiland (E4) is b.v. een stuk hoger en in scenario H1 wordt voor een groter gebied achter het eiland een zandtransporttoename berekend. Deze verschillen in netto zandtransporten zullen zich ook uiten in verschillen in de berekende morfologische veranderingen die in de volgende paragraaf besproken worden.

Figuur 93: Berekende gemiddelde totale zandtransporten over de eerste 3 jaar voor de referentie, scenario E3 (eiland), E4 (overstroombaar eiland) en H1 (piloot).



De zwarte lijn geeft de suppletiecontour weer.

3.4.4 Morfologische ontwikkeling

Figuur 94 en Figuur 95 tonen de morfologische ontwikkeling na respectievelijk 3 en 10 jaar voor alle scenario's. Figuur 96 en Figuur 97 laten de berekende sedimentatie- en erosiepatronen zien voor alle scenario's, na respectievelijk 3 en 10 jaar.

De convergentie van zandtransport zeewaarts van de eilanden resulteert in een duidelijk sedimentatiepatroon, en wordt door de ingrepen versterkt in alle scenario's. De afname in stroomsnelheden aan de oostelijke zijde van de eilanden in scenario's E3, E4 en H1 resulteert in lokale sedimentatie (Figuur 95).

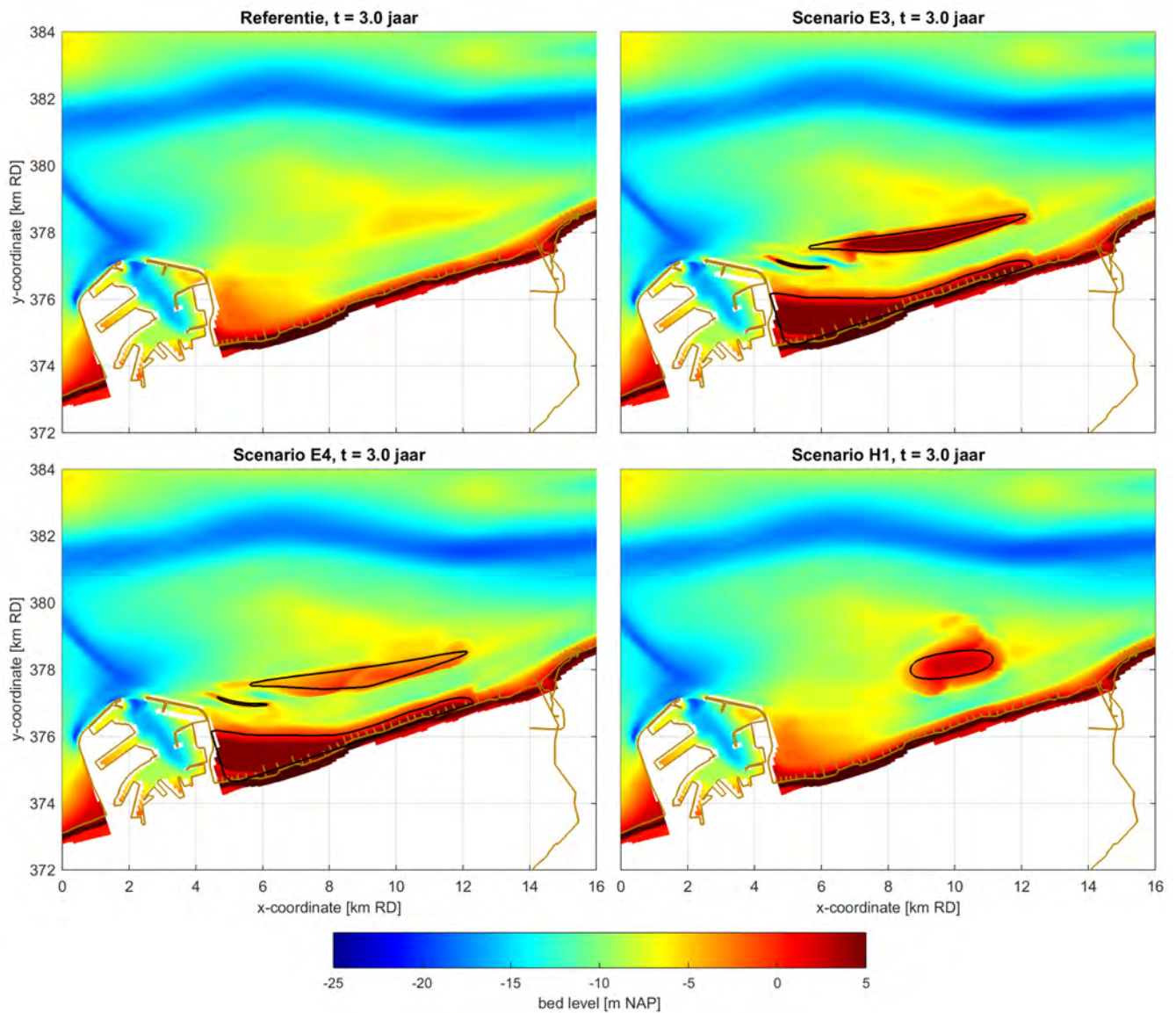
In scenario E3 erodeert de westelijke punt van het eiland sterk. Door deze erosie verandert de oriëntatie van de geul tussen het eiland en de geleidedam (zie Figuur 97). Ook is er ten westen van het eiland sterke sedimentatie te zien, op dezelfde locatie als in het Referentie scenario (Figuur 95). Ten zuiden van de geleidedam lijkt de geul afgesloten te worden door de sedimentatie (Figuur 96 en Figuur 97).

In scenario E4 zijn de sedimentatie- en erosiepatronen rondom de geleidedam vergelijkbaar met het E3 scenario. Het overstroombaar eiland erodeert aan de zeewaartse zijde, en sedimenteert aan de landwaartse zijde (Figuur 95). Na 10 jaar is het duidelijk dat het overstroombaar eiland zich richting de kust verplaatst (Figuur 97).

Het pilooteiland in scenario H1 heeft een sterk effect op de bodemligging tussen de kust en het eiland. Door de hoge stroomsnelheden ontstaat er een toename in erosie (Figuur 95), welke resulteert in een geul tussen de kust en het eiland (maximaal -18m NAP), zie Figuur 95. Het pilooteiland zelf lijkt zich te willen verplaatsen richting het noordoosten (Figuur 97).

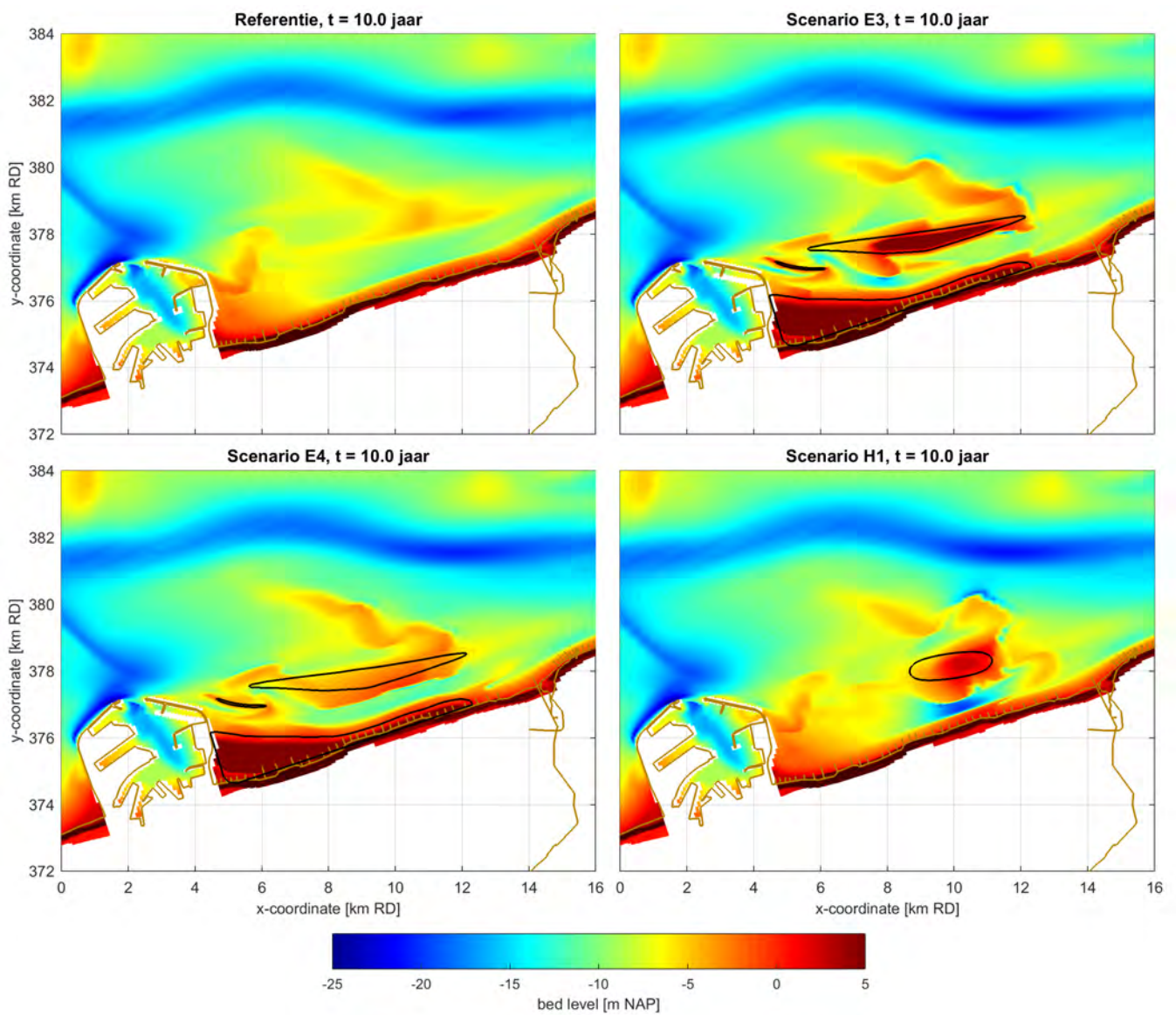
De berekende sedimentatie en erosie na 10 jaar in het N2V model laten voornamelijk een verdere ontwikkeling van de patronen na 3 jaar rekenen. Na 10 jaar rekenen in scenario E3 is een verandering te zien in de oriëntatie van de geul tussen het eiland en de geleidedam ten opzichte van 3 jaar. In scenario E4 lijkt na 3 jaar het zand op het eiland vooral te zijn verplaatst op het overstroombaar eiland. Na 10 jaar is een duidelijke migratie van het eiland richting de kust te zien, hetzelfde geldt voor het piloot eiland in scenario H1. Globaal zijn de eilanden in alle scenario's na 10 jaar rekenen significant veranderd in vorm, in tegenstelling tot het resultaat na 3 jaar rekenen.

Figuur 94: Berekende morfologische ontwikkeling na 3 jaar voor de referentie, scenario E3 (eiland), E4 (overstroombaar eiland) en H1 (piloot).



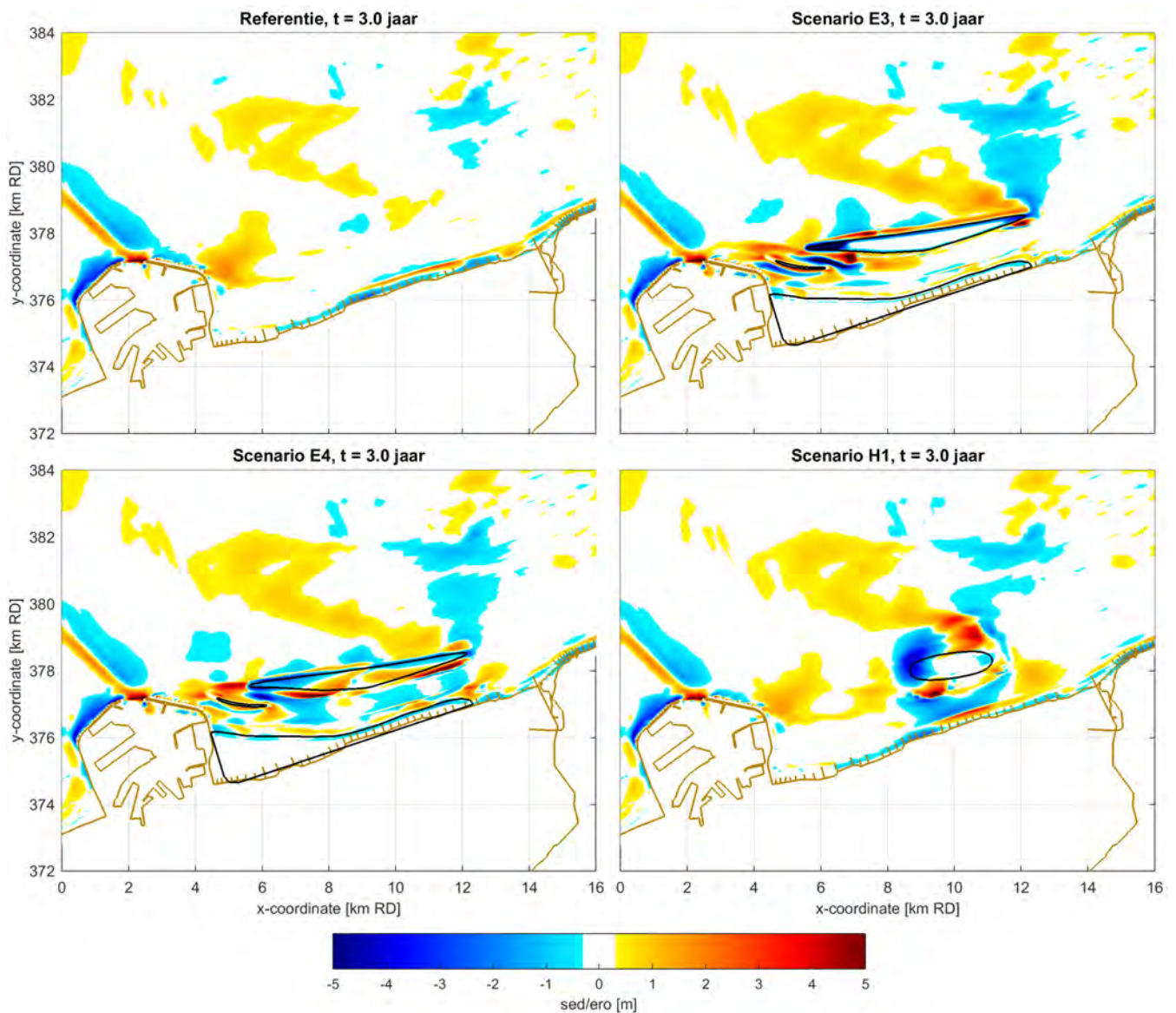
De zwarte lijn geeft de suppletiecontour weer.

Figuur 95: Berekende morfologische ontwikkeling na 10 jaar voor de referentie, scenario E3 (eiland), E4 (overstroombaar eiland) en H1 (piloot).



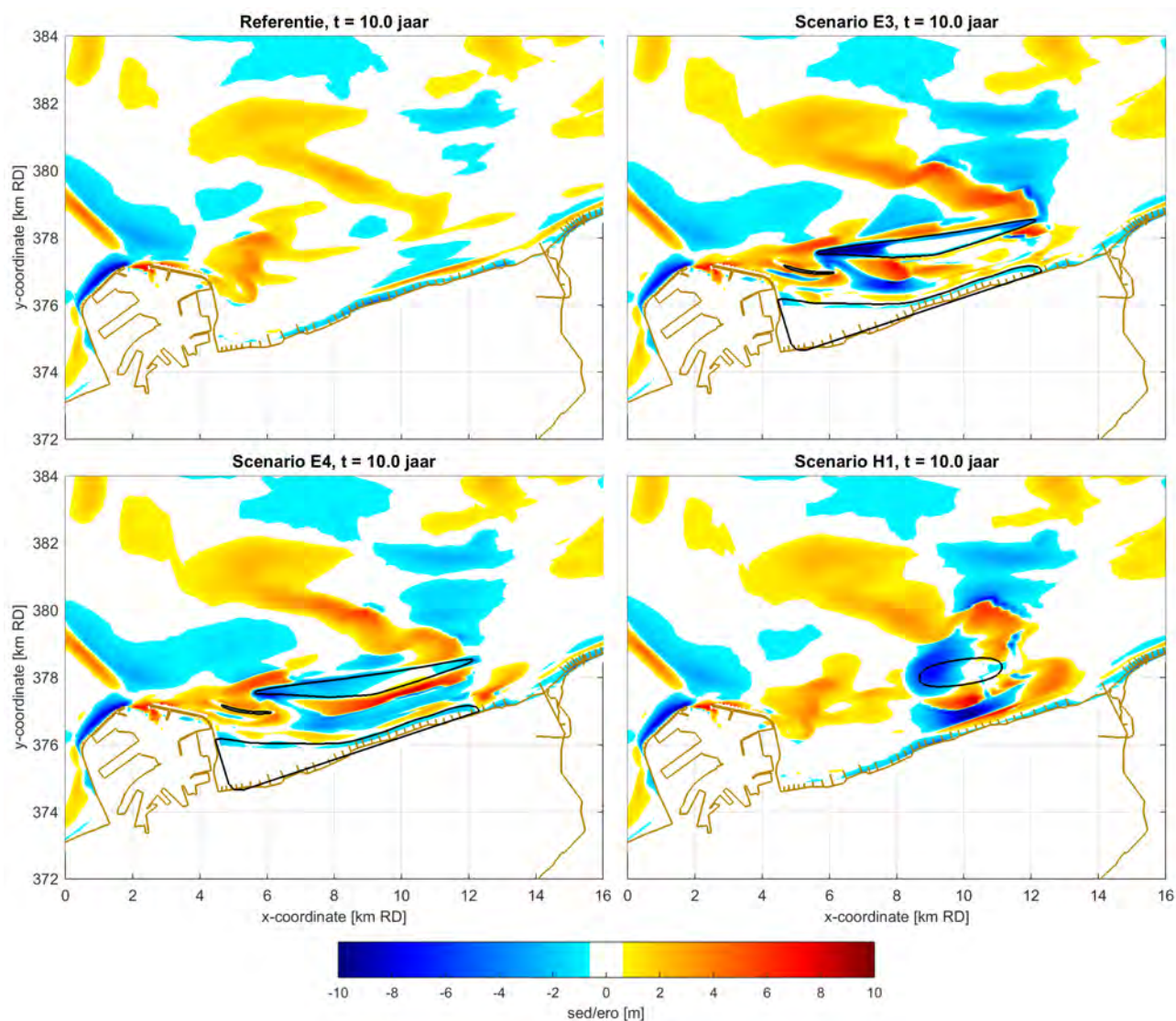
De zwarte lijn geeft de suppletiecontour weer.

Figuur 96: Berekende sedimentatie (rood) en erosie (blauw) na 3 jaar voor de referentie, scenario E3 (eiland), E4 (overstroombaar eiland) en H1 (piloot).



De zwarte lijn geeft de suppletiecontour weer.

Figuur 97: Berekende sedimentatie (rood) en erosie (blauw) na 10 jaar voor de referentie, scenario E3 (eiland), E4 (overstroombaar eiland) en H1 (piloot).

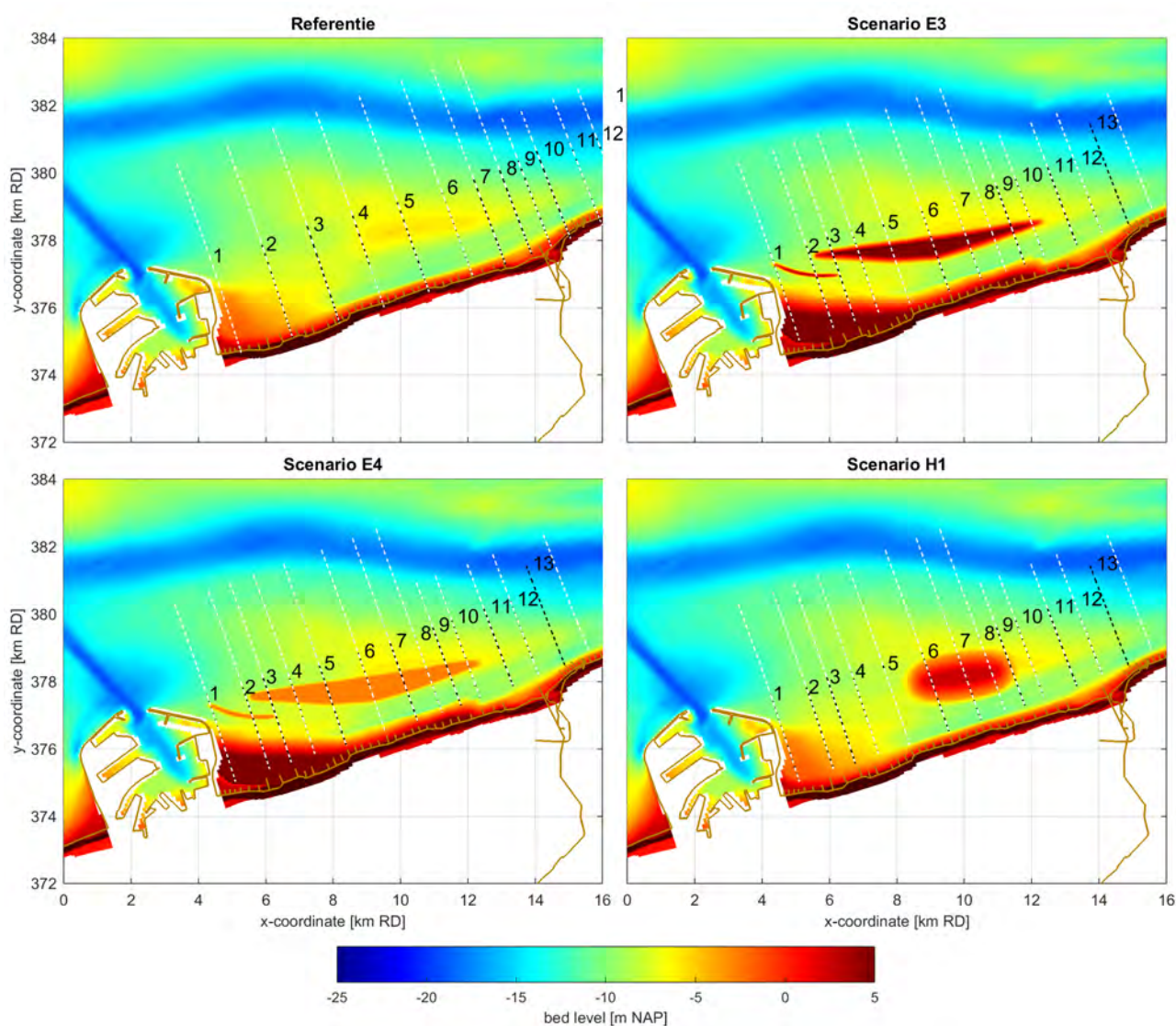


De zwarte lijn geeft de suppletiecontour weer.

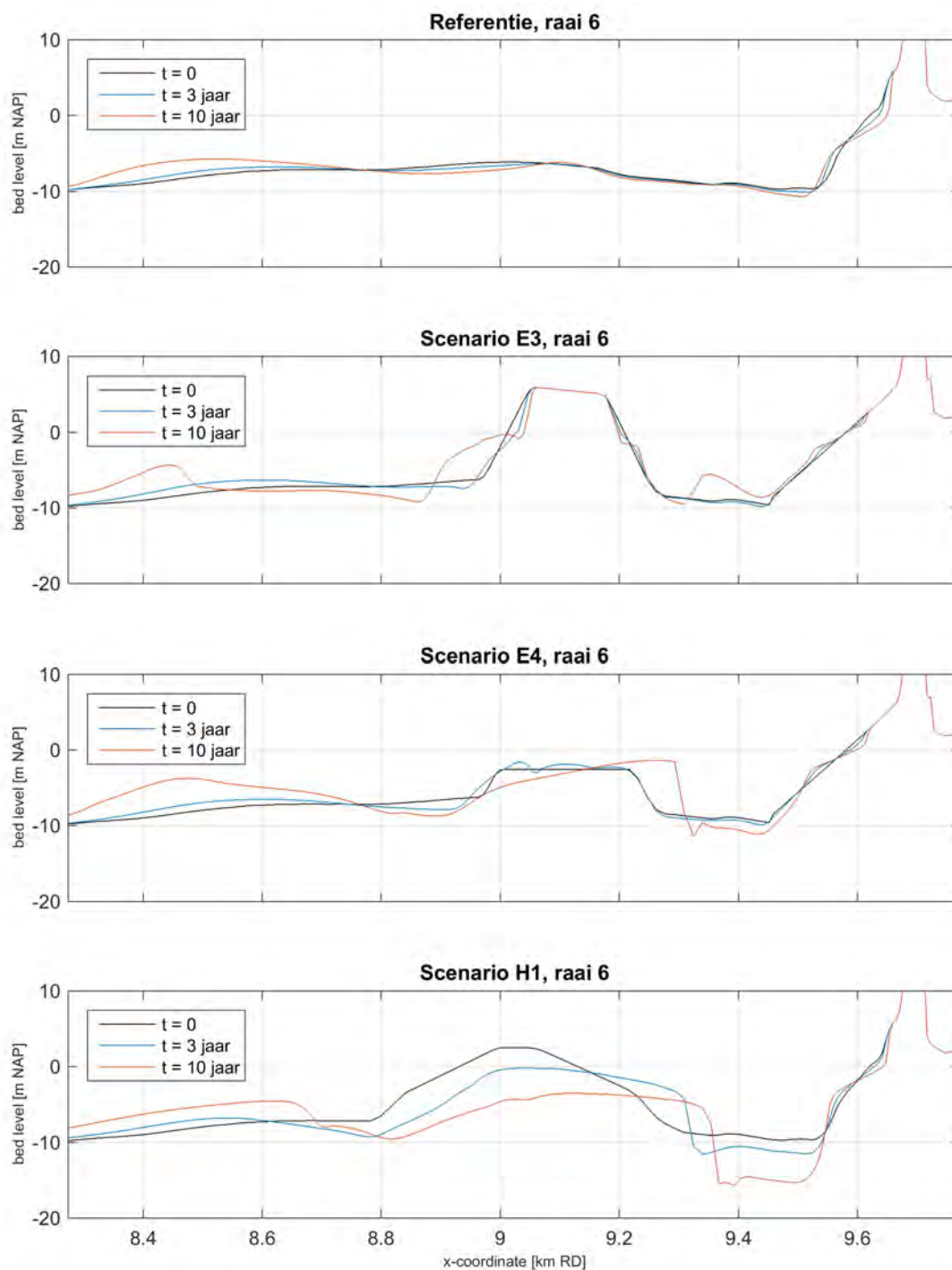
3.4.5 Dwarsprofielen

De morfologische ontwikkeling is ook bestudeerd voor een aantal dwarsraaien (Figuur 98). Raai 6 laat de sedimentatie van de Paardenmarkt zien die sterker is voor de scenario's, alsook de verflauwing van het kustprofiel (Figuur 99). De eilanden eroderen aan zeewaartse zijde, en sedimenteren aan de landwaartse zijde. Langs deze raai ligt Scenario E3 vrij stabiel, het overstroombaar eiland (E4) is mobieler, maar behoudt wel min of meer de aanleghoogte en het pilooteiland (H1) erodeert het sterkste. Dit is de westelijke rand van het eiland; een raai oostelijker ligt het H1 eiland veel stabiel (Figuur 100). In beide raaien ontstaat een diepe geul tussen het pilooteiland en de kust. De overige dwarsraaien zijn terug te vinden in Bijlage E.

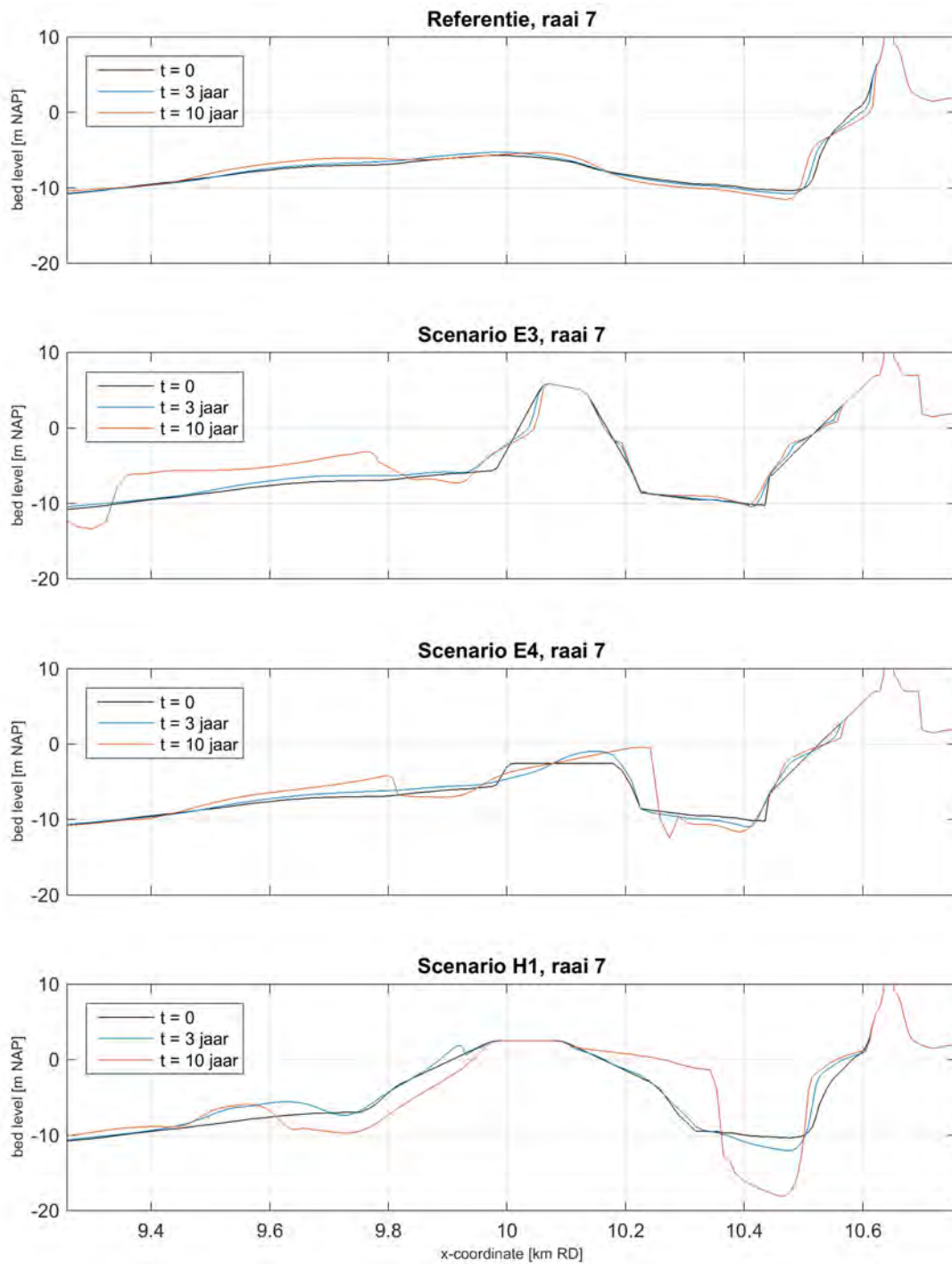
Figuur 98: Ligging dwarsraaien en de initiële bodemligging.



Figuur 99: Morfologische ontwikkeling dwarsraai 6.



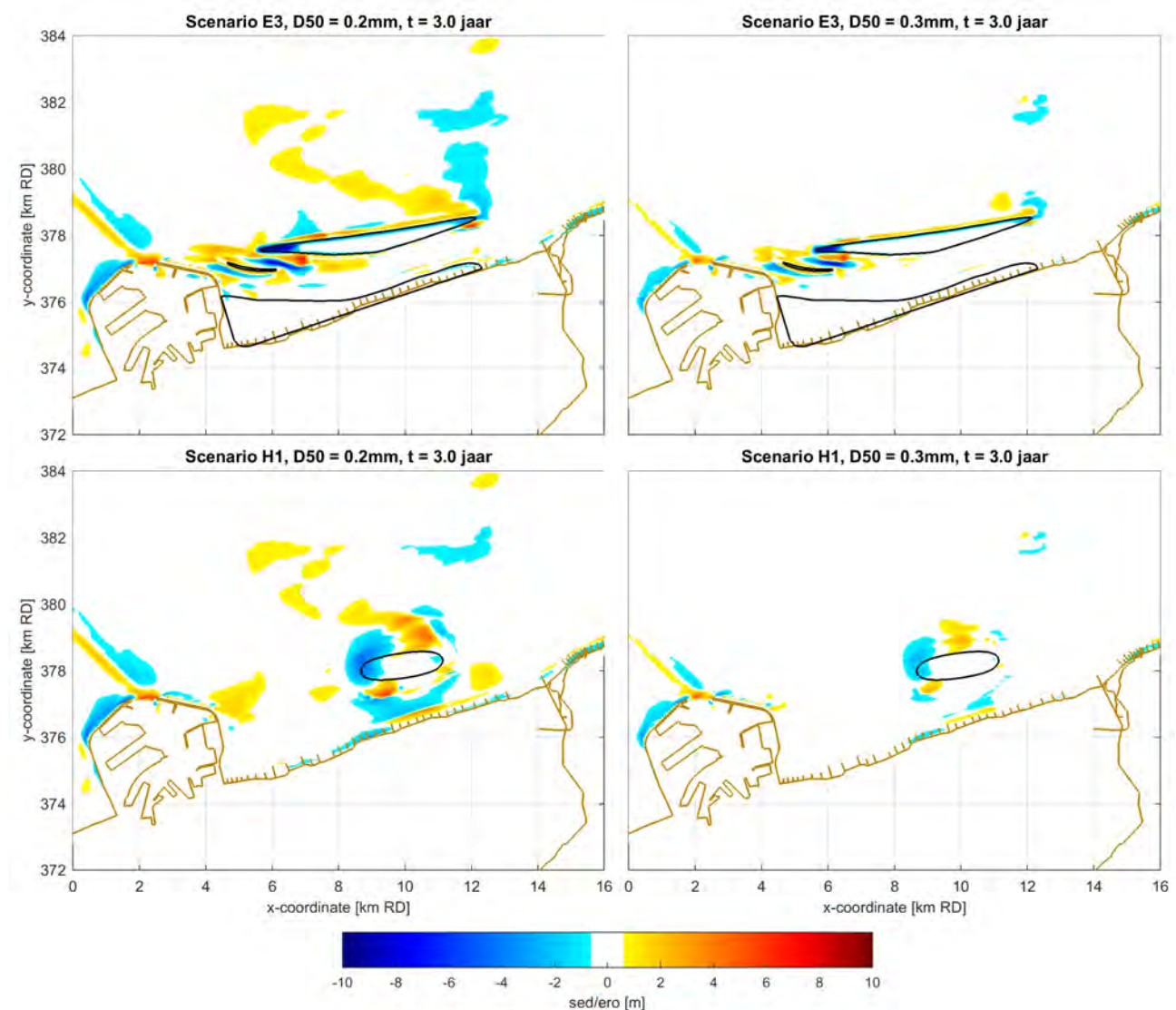
Figuur 100: Morfologische ontwikkeling dwarsraai 7.



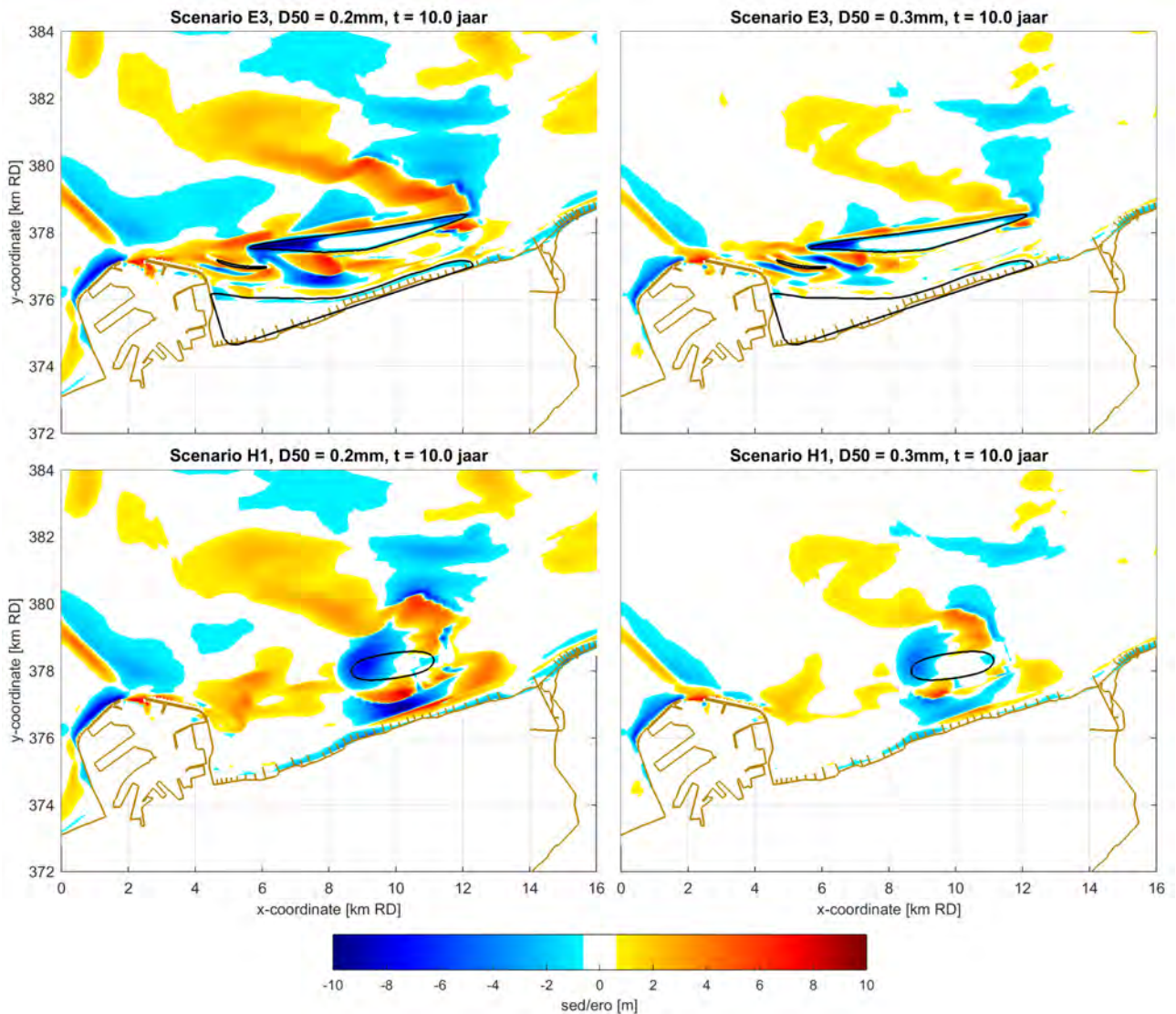
3.4.6 Gevoeligheid D50

Omdat het XBeach model rekt met een D50 van 0,3 mm, laten onderstaande figuren zien wat het effect van de korrelgrootte is op de morfologische ontwikkelingen in het N2V model. Een grotere korrelgrootte heeft een sterk effect op de grootte van de morfologische veranderingen. De sedimentatie- en erosiepatronen zijn ruimtelijk vergelijkbaar. Na 10 jaar is het duidelijk dat een D50 van 0,3 mm voor significant minder erosie aan de westelijke punt van het eiland veroorzaakt. Hierdoor ontstaan er, ten opzichte van de lagere D50, verschillen in de sedimentatie- en erosiepatronen ten zuiden van het eiland.

Figuur 101: Berekende sedimentatie (rood) en erosie (blauw) na 3 jaar voor scenario's E3 en H1 met een D50 van 0.2 mm (links) en een D50 van 0.3 mm (rechts).



Figuur 102: Berekende sedimentatie (rood) en erosie (blauw) na 10 jaar voor scenario's E3 en H1 met een D50 van 0.2 mm (links) en een D50 van 0.3 mm (rechts).

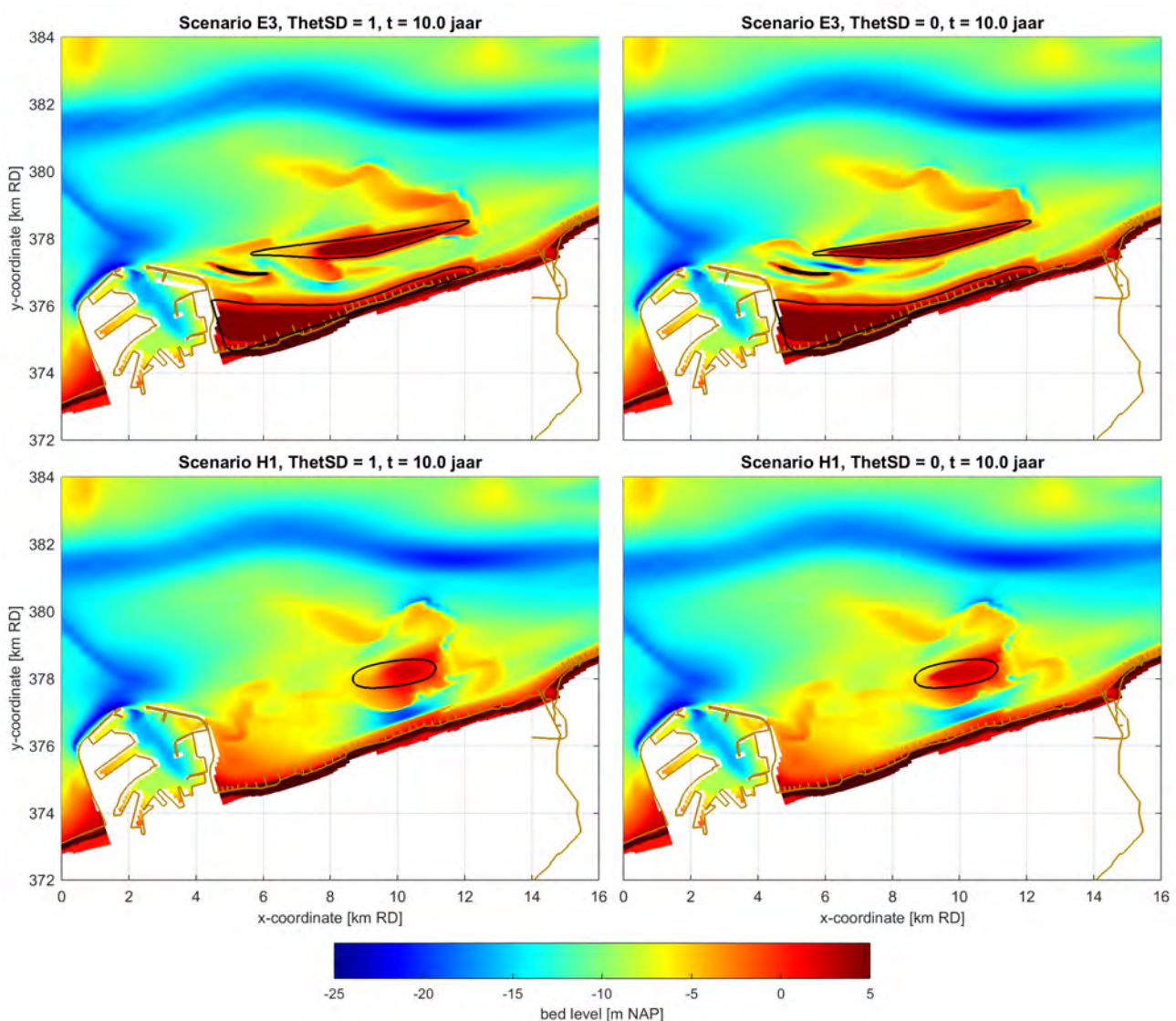


3.4.7 Gevoeligheid droge cel erosie

De westelijke punt van het eiland in scenario E3 erodeert sterker in het N2V model vergeleken met het XBeach model met de standaard instellingen. Om de gevoeligheid van het model te testen voor het eroderen van droge cellen (het eiland), is er een simulatie uitgevoerd waarin de ThetSD parameter wordt aangepast. De ThetSD parameter bepaalt hoeveel erosie van de laatste natte cel wordt verdeeld over de aanliggende droge cel, waarbij 1 = 100% en 0 = 0%. In het N2V model staat deze standaard op 1, en er is een test simulatie uitgevoerd met ThetSD = 0 (geen droge cel erosie). Figuur 103 en Figuur 104 laat de resultaten in de morfologische ontwikkeling na 10 jaar zien.

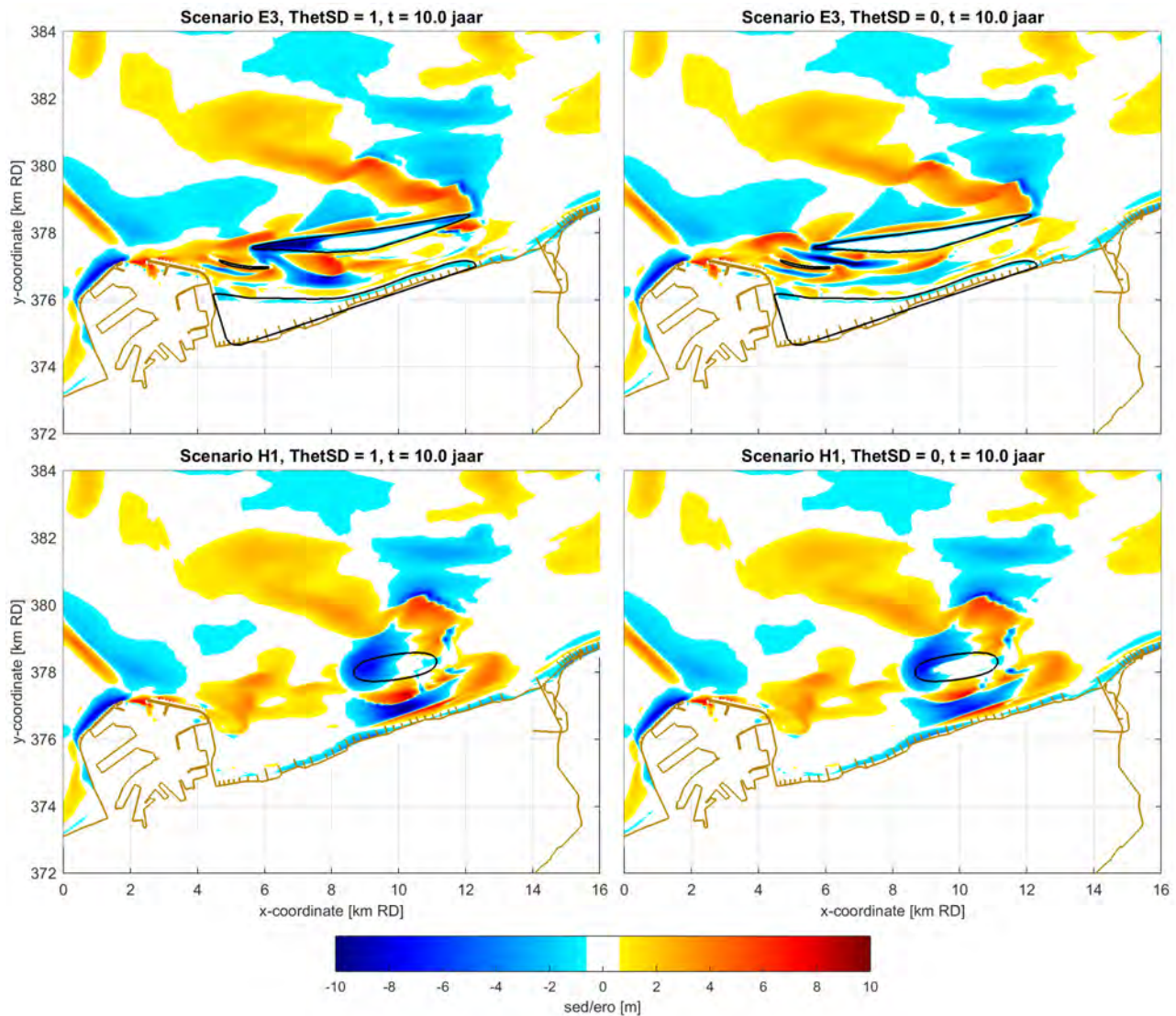
Het variëren van de ThetSD parameter in het model heeft sterk invloed op de erosie van het eiland in scenario E3. De westelijke punt van het eiland erodeert significant minder wanneer droge cel erosie wordt "uitgezet". Doordat er minder sediment van het eiland erodeert, is het sedimentatie-/erosiepatroon tussen het eiland en de kust ook verschillend voor beide simulaties. Het effect van ThetSD in Delft3D is vergelijkbaar met het effect van de wetslp in het XBeach model (zie §3.3.6), hoewel zij refereren naar verschillende fysische processen. Voor scenario H1 is het effect beperkter.

Figuur 103: Berekende morfologische ontwikkeling na 10 voor scenario's E3 en H1 met een ThetSD van 1 (links) en een ThetSD van 0 (rechts).



De zwarte lijn geeft de suppletiecontour weer.

Figuur 104: Berekende sedimentatie (rood) en erosie (blauw) na 10 jaar voor scenario's E3 en H1 met een ThetSD van 1 (links) en een ThetSD van 0 (rechts).



De zwarte lijn geeft de suppletiecontour weer.

3.4.8 Vergelijking met ZWeM zand en XBeach model

Als we de morfologische berekeningen met het N2V model (Figuur 96) vergelijken met het ZWeM zand model (Figuur 51 en Figuur 54) vallen de volgende zaken op:

- In grote lijnen is het effect van de scenario's op de morfologische ontwikkeling vergelijkbaar.
- In het N2V model sedimenteert Pas van 't Zand, omdat deze niet op diepte wordt gehouden.
- Het ZWeM-zand model berekent een sterkere erosie en sedimentatie door de havendammen.
- Het N2V model berekent een sterkere sedimentatie ten noordoosten van de havendammen; bij de Paardenmarkt.
- Het ZWeM-zand model geeft een sedimentatie van de stranden in de Baai van Heist, waarschijnlijk doordat de golfforcering meer divers is en ook noord-/noordoostelijke golven bevat.
- De ZWeM-zand berekeningen resulteren in een "gladdere" morfologische ontwikkeling, gekoppeld aan de grotere variatie in getij-, wind-, en golfcondities.
- Een belangrijk verschil tussen beide modellen is de sterkere sedimentatie van de zeewaartse zijde van de eilanden E3 en E4 volgens het ZWeM model.
- Wanneer dezelfde transportmodelinstellingen worden gebruikt, komen beide modellen niet per se beter overeen. Dit komt door verschillen in de modelopzet; zo wordt b.v. in het ZWeM-zand model de verticaal opgelost (3D) en in het N2V model niet.

Uit een vergelijking van de morfologische berekeningen met het N2V model (Figuur 94) en het XBeach model (Sectie 3.3) blijkt het volgende:

- De morfologische ontwikkeling volgens het XBeach model verloopt een stuk langzamer, wat deels komt door de hogere D50 (0,3 in plaats van 0,2 mm) en lagere snelheden, maar ook door hoe de modellen omgaan met droge cel erosie (instelling *ThetSD*) in Delft3D. De effecten zijn vergelijkbaar met de gevoeligheid voor de instellingen voor klifvorming in XBeach (wetslp).
- Het grootste verschil tussen beide modellen is de erosie van de westelijke randen van de eilanden E3 en E4 die veel sterker is volgens het N2V model.
- De berekende morfologische ontwikkeling volgens het XBeach model is gladder. Het XBeach model berekent geen significante aanzanding van het gebied bij de Paardenmarkt.

In de discussieparagraaf (Hoofdstuk 4) wordt verder stilgestaan bij de verschillen tussen deze morfologische modellen, en wat dit betekent voor de inschatting van de morfologische impact van de scenario's.

3.5 Modellering effecten Zwin: Escoffier curve

De eilanden die afgetoetst worden binnen het Vlaamse Baaien project liggen erg nabij het natuurgebied *het Zwin* (zie Figuur 105), en kunnen daardoor ook een impact hebben op de morphodynamiek van het slikken- en schorregebied. In deze paragraaf wordt de mogelijke invloed van de verschillende scenario's af te schatten, aan de hand van een eerste korte vingeroefening.

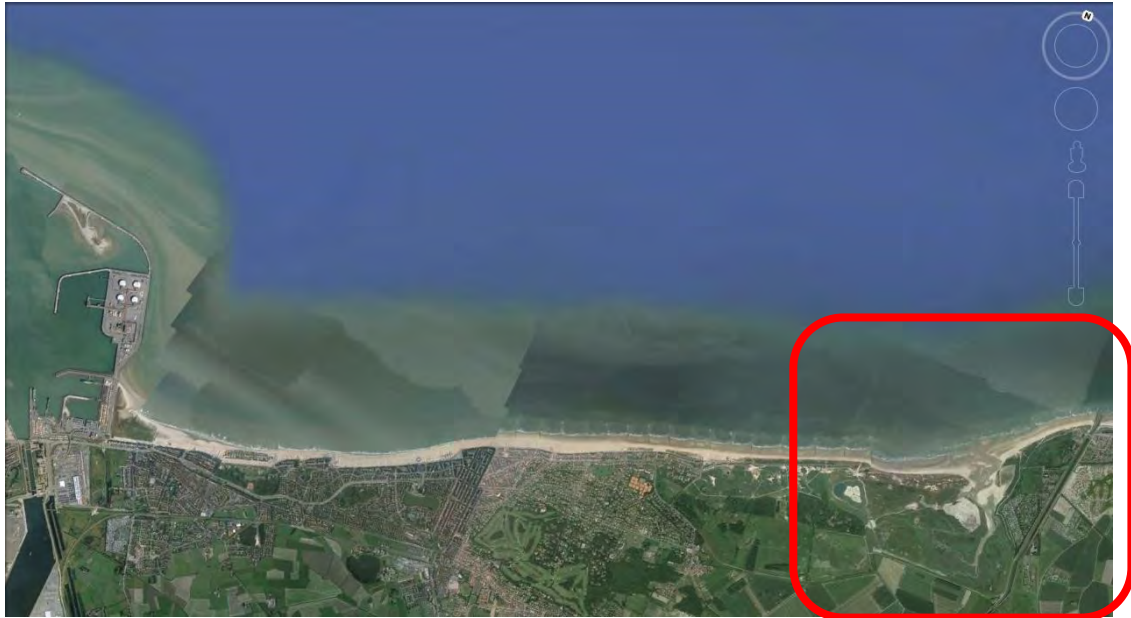
Hiertoe maken we gebruik van het analytische model geïntroduceerd door Escoffier (1940). Hierbij wordt de werkelijkheid schematisch voorgesteld, zoals geïllustreerd in Figuur 106. Specifiek, beschouwen we dat door stroming van het getij en golven per jaar een bepaald volume zand M in het Zwin wordt getransporteerd, en gedeponeerd wordt in het zeegat (met een lengte L en dwarsdoorsnede A). De evolutie van de dwarsdoorsnede van het zeegat wordt dan gecontroleerd door het verschil tussen het gedeponeerd sediment M en het sediment die naar de zee wordt getransporteerd S :

$$L \frac{dA}{dt} = S - M. \quad (1)$$

Dit wil zeggen dat wanneer de depositie M groter is dan S (het volume sediment dat geërodeerd wordt per jaar) de toegangsgeul naar het Zwin aanzandt, terwijl omgekeerd de oppervlakte van het zeegat vergroot. Een speciale toestand treedt op wanneer S precies gelijk is aan M . Er treedt dan namelijk een evenwicht op

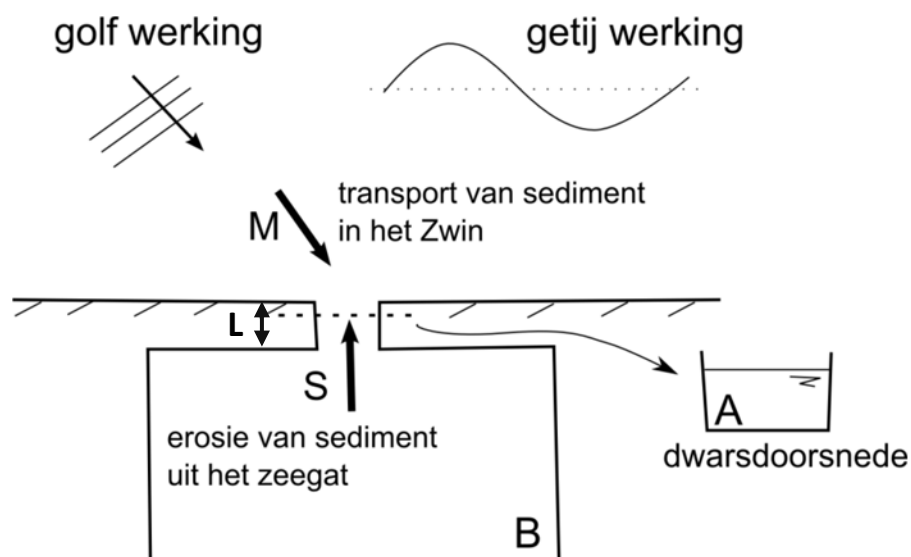
tussen de aanvoer van sediment in het Zwin en erosie eruit, waardoor de dwarsdoorsnede van het zeegat *stationair* is (dA/dt is gelijk aan nul).

Figuur 105: overzicht van de kustlijn ten oosten van Zeebrugge.



Het Zwin natuurgebied bevindt zich in het rood omcirkelde gebied

Figuur 106: Schetsmatige weergave van processen die de evolutie van de morfologie bij het Zwin beïnvloeden.



Enerzijds wordt er door golfwerking en getijden sediment getransporteerd in het Zwin (M), terwijl de stroming tijdens de eb fase van het getij, voor erosie (S) zorgt. Voor een bepaald uitstroom snelheid U_e is S gelijk aan M , en treedt er een morfologisch evenwicht op.

De hoeveelheid sediment die geërodeerd wordt uit het zeegat in zee wordt voornamelijk bepaald door de stroomsnelheden U_s die voorkomen tijdens de eb fase. Hoe sneller (trager) de ebstroming is, hoe meer (minder) zand naar buiten wordt getransporteerd. Meer bepaald, kan S beschreven worden aan de hand van de volgende relatie:

$$S = \mu U^q, \quad (2)$$

met U de amplitude van de ebb-getij stroming. De variabelen μ en q zijn constanten die uit fysische experimenten bepaald zijn. De inlaat tot het Zwin is dus stationair in tijd wanneer M gelijk is aan het sediment transport S uit de inlaat. Een stationaire inlaat treedt dus op wanneer de stroomsnelheid U_e gelijk is aan $\sqrt[q]{M/\mu}$.

Op basis van observaties in het veld kan het jaarlijkse netto sedimenttransport langs de kust op 10 000 m³/jaar worden geschat (Houthuys et al., 2013). Dit betekent dat de inlaat van het Zwin stationair is wanneer $U_e \sim 0.5$ m/s.

De stroomsnelheid uit de inlaat hangt op zijn beurt weer af van verschillende factoren zoals de (sterkte) amplitude Z van het getij, en het oppervlakte van het getijde bekken B die bij vloed onder water komt te staan, maar ook de oppervlakte van de dwarsdoorsnede van het zeegat. Meer bepaald, kan worden aangetoond (op basis van behoud van massa en momentum) dat bij benadering de amplitude van de stroomsnelheid uit de inlaat als volgt wordt beschreven (Esoffier, 1940):

$$U = \frac{Z}{\sqrt{\left(\frac{LF}{g}\right)^2 \left(\frac{1}{\sqrt{A}}\right)^2 + \left(\frac{A}{B\omega}\right)^2}}. \quad (3)$$

Hier is g de gravitaire versnellingsconstante, ω de getij-frequentie en F een wrijvings-gerelateerde parameter:

$$F = \frac{gU_0}{3\pi C^2 \gamma} \quad (4)$$

Tabel 8: overzicht van de waarden van de input parameters.

	L [m]	C [m ^{1/2} /s]	B [m ²]	H [m]	Z [m]	M [m ³ /jaar]
Huidige Dimensies	250	25	22618	2	1.9	10 000
Na de werken	250	25	62824	2	1.9	10 000

Figuur 107 illustreert de variatie van U als functie van het oppervlakte van de dwarsdoorsnede van de inlaat A , samen met de waarde van U_e . De figuur laat zien dat er twee snijpunten zijn tussen U en U_e (d.w.z. er zijn twee stationaire oplossingen). Eén bij erg kleine waarden van A (en moeilijk te zien op de figuur) en één bij grotere waarden.

Het eerste stationaire punt is echter niet stabiel. Meer bepaald, zal een kleine afwijking van het stationair punt leiden tot een grotere afwijking, waardoor het onwaarschijnlijk is dat deze toestand zich voordoet in de natuur. Dit kan als volgt worden begrepen: een kleine vergroting van de oppervlakte van de dwarsdoorsnede, leidt dan tot een grotere stroomsnelheid; die meer sediment erodeert uit de inlaat dan er wordt afgezet. Het gevolg is een grotere dwarsdoorsnede wat op zijn beurt weer leidt tot een grotere waarde voor U , enz. Anderzijds, als de dwarsdoorsnede iets kleiner wordt, wordt U kleiner waardoor er meer sediment wordt afgezet dan weg geërodeerd; en dus de dwarsdoorsnede nog kleiner wordt.

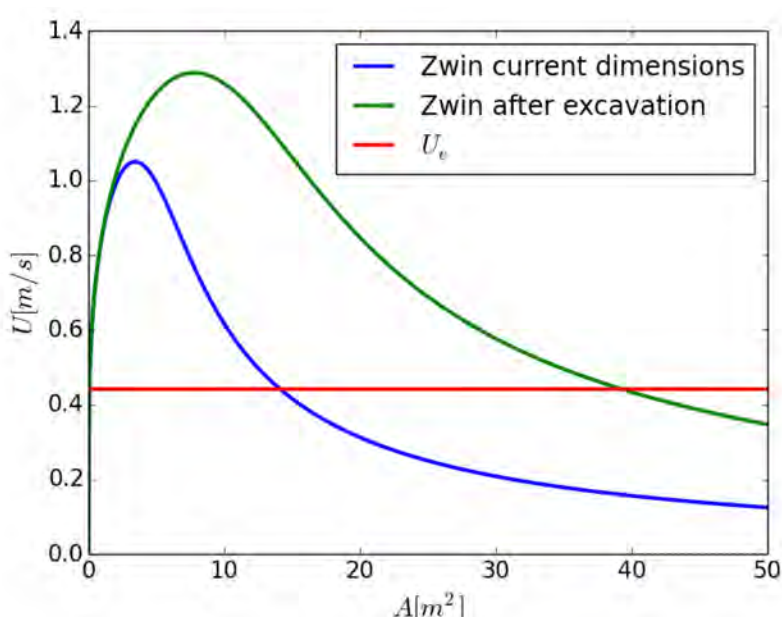
Het stationair punt met een grotere waarde van A is wel stabiel voor eventuele verstoringen uit het evenwicht. Meer bepaald leidt een verkleining van A in dit geval tot grotere uitstroomsnelheden met als

gevolg dat de oppervlakte weer vergroot; terwijl een vergroting van A , U verkleint waardoor er meer sediment wordt afgezet dan getransporteerd naar zee, en de dwarsdoorsnede teruggaat naar zijn eerdere toestand. Het gevonden evenwicht is dus ook stabiel ten opzichte van kleine verstoringen in de oppervlakte van de dwarsdoorsnede.

In Figuur 107 worden twee profielen van $U(A)$ gegeven. In blauw wordt de variatie van U geïllustreerd voor parameter waardes die corresponderen met de dimensies van het huidige Zwin, en in groen de amplitude van de uitstroomsnelheid rekening houdend met de dimensies na de geplande graafwerken. In Tabel 8 worden van de input waardes aangenomen voor beide berekeningen samengevat.

Het stabiel evenwichtspunt na de geplande graafwerken treedt dus op bij een grotere waarde van A , wat betekent dat de inlaat, algemeen gesproken, stabiel wordt door de werken.

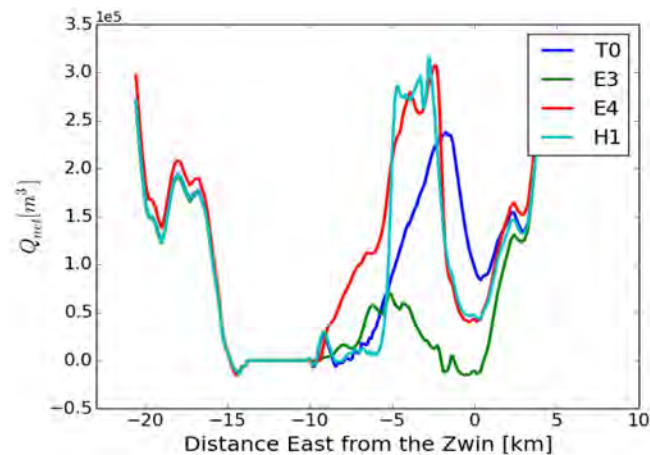
Figuur 107: variatie van U als functie van de dwarsdoorsnede A , samen met de waarde van U_e .



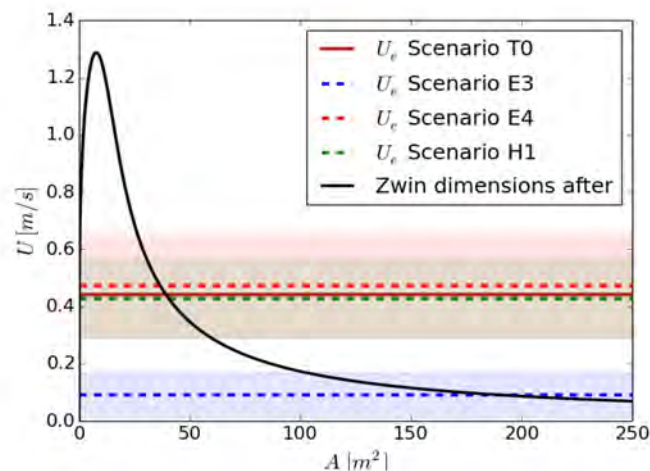
Om de invloed van de mogelijke grootschalige werken af te schatten beschouwen we de variaties in de input parameters voor ieder scenario. Ten opzichte van de input parameters die we voorgaand hebben aangenomen varieert enkel de sedimentinput in het zeegat significant bij het aanleggen van de verschillende scenario's, zie Figuur 108. Om een waarde voor M uit deze gegevens af te leiden, middelen we de door XBeach numeriek berekende waardes van Q_{net} over een bepaalde afstand rond de locatie van het Zwin (Q_{net}^{aver}) en berekenen we U_e door de ratio te maken met U_e gevonden op basis van Q_{net}^{aver} voor de T0 situatie. Dit doen we voor N verschillende afstanden en beschouwen dan de gemiddelde waarde en standaard deviatie van U_e uit de N verschillende middelingsafstanden.

In Figuur 109 wordt het profiel van U uitgezet t.o.v. A samen met de gevonden gemiddelde U_e voor de verschillende scenario's (stippellijn). De standard deviatie van een scenario wordt aangegeven door de gearceerde band rond de stippellijnen. Figuur 109 laat zien dat voor scenario E3, een lagere waarde voor U_e wordt gevonden dan in de T0 situatie, terwijl de andere scenario's leiden tot een gelijkaardige waarde voor U_e . Dit betekent dat voor E3 scenario, een morfodynamisch evenwicht voorkomt bij een grotere dwarsdoorsnede van het zeegat waardoor de inlaat van het intergetijden gebied stabiel kan beschouwd worden t.o.v. de T0 situatie. Voor de andere scenario's is de invloed van de ingreep op de stabiliteit van de inlaat, rekening houdend met de gegeven onzekerheidsband, minder duidelijk.

Figuur 108: netto sediment transport (m^3 /jaar) in de kust-langse richting voor de verschillende scenario's, berekend met behulp van XBeach.



Figuur 109: Variatie van U t.o.v. de dwarsdoorsnede A samen met U_e voor verschillende scenario's.



De gestippelde lijnen tonen de gemiddelde waarde van U_e voor een bepaald scenario terwijl het gearceerde oppervlak rond de stippen de standard deviatie beschrijven.

Op basis van de uitgevoerde analyse kunnen we dus concluderen dat het scenario met een eiland boven de zeespiegel een verbetering van de stabiliteit van de inlaat ten opzichte van de T0 situatie inhoudt. Terwijl de invloed van de andere ingrepen op de stabiliteit van het zeegat minder duidelijk is.

Hier dienen we wel de volgende zaken op te merken:

de uitgevoerde analyse houdt enkel rekening met het transport van zand. Mogelijks heeft dit een sterke impact op de conclusies van deze analyse;

bij deze analyse wordt de sedimentinvoer in het zeegat (M) geëvalueerd aan de hand van het netto langstransport. Anderzijds laten de verschillende modellen zien dat voor het zeegat van het Zwin een sterke convergentie van het sedimenttransport optreedt. Dit betekent dat er ter hoogte van het Zwin depositie van sediment plaatsvindt. Mogelijks is het meer betekenisvol om de variatie in U_e te bepalen a.d.h.v. de verschillen in de divergentie van $Q_{net,i}$

De uitgevoerde analyse voorziet voornamelijk een kwalitatieve afschatting van de invloed van de verschillende ingrepen op de stabiliteit van het zeegat, geen kwantitatieve informatie.

Alles samen is onze aanbeveling dan ook dat er verdere studie werk nodig is (o.a. a.d.h.v. een gedetailleerd model waarbij ook het Zwin wordt meegenomen) om een kwantitatieve afschatting te kunnen maken van de invloed van de voorziene maatregelen.

4 Discussie

4.1 Slibdynamiek

Het ZweM zand-slib model laat zien dat de hoeveelheid beschikbaar slib in de omgeving sterk bepalend is voor de hoeveelheid slib die zal sedimenteren. De varianten met en zonder Holocene bron geven hierin een bandbreedte aan, waarbij de variant met Holocene bron een indicatie van de bovengrens aan sedimentatie geeft.

De locaties waar slib sedimenteert in de directe omgeving van de ingrepen zijn grotendeels vergelijkbaar tussen de varianten met en zonder Holocene bron: De gebieden aan de oostelijke (zeewaarts van het Zwin)- en westelijke (ten noordoosten van de havendammen van Zeebrugge) zijden van de ingrepen vertonen sedimentatie als gevolg van lagere stroomsnelheden. De Paardenmarkt direct zeewaarts van de ingrepen en de geul direct landwaarts van de ingrepen verliezen slib door een toename van de stroomsnelheid. De strandzijde van deze geul vertoont aanslibbing door een verminderde bodemschuifspanning als gevolg van gereduceerde golven. In de Pas van het Zand leiden alle varianten tot extra sedimentatie van slib, het geringst in variant H1.

Door de lange rekentijden is het moeilijk om het ZWeM zand-slib model volledig te laten inspelen. Het model is dan ook enkel inzetbaar voor korte termijn analyses van initiële patronen die in de eerste maanden na aanleg op zullen treden, daar waar de andere modellen laten zien dat in het begin van de simulaties lokale bodemveranderingen snel kunnen gaan. De initiële bodemsamenstelling is door de doorstart van het zand-slib model mede het resultaat van de condities in de voorgaande maanden, maar de beperkte verschillen tussen de eerste serie simulaties voor de representatieve maand mei en de serie simulaties gebaseerd op de doorstart van deze maand duiden erop dat de waargenomen sedimentatie- en erosiepatronen in eerste instantie het gevolg zijn van forcering en ingreep en minder van de initiële bodemsamenstelling, welke in tweede instantie de hoeveelheid verandering bepaalt. Bovendien is de initiële bodemsamenstelling voor alle scenario's gelijk, zodat de scenario's onderling vergelijkbaar zijn.

4.2 Lange-termijn ontwikkeling eilanden en geul

Uit berekeningen met het ZWeM-zand model wordt afgeleid dat de 3D effecten geen wezenlijke bijdrage hebben tot de algemene evolutie van de bathymetrie voor de verschillende scenario's. De Delft3D modellen N2V en ZWeM-zand berekenen globaal een vergelijkbare morfologische ontwikkeling van de scenario's na 3 jaar. De modellen zijn gevoeliger voor de parameterinstellingen, dan voor het 2D versus 3D modelleren. Belangrijke verschillen zijn

1. de "gladdere" morfologie volgens het ZWeM-zand model door de grotere variaties in getij- en windcondities,
2. onderhoud vaargeulen en hieraan gekoppelde morfologische ontwikkeling,
3. sterkere sedimentatie in de omgeving van de Paardenmarkt volgens het N2V model.
4. Aanzanding kust Baai van Heist volgens het ZWeM-zand model.

Geen van de zand-modellen is echter in staat de sedimentatie ter hoogte van de Baai van Heist volledig goed te voorspellen. Sedimentatie treedt op net ten Oosten van Zeebrugge.

De berekende sedimentatie en erosie na 10 jaar in het Nieuwpoort-Vlissingen model zijn voornamelijk een verdere ontwikkeling van de patronen die al na 3 jaar rekenen zichtbaar zijn. Globaal zijn de eilanden in alle scenario's na 10 jaar rekenen, ten opzichte van 3 jaar, significant veranderd in vorm en verplaatsen de eilanden in scenario's E4 en H1 zich richting de kust.

De morfologische veranderingen voorspeld door het XBeach zijn in het algemeen kleiner dan in de Delft3D modellen, wat deels kan worden verklaard door de hogere korrelgrootte (0,3 in plaats van 0,2 mm, al blijkt over het algemeen XBeach minder gevoelig voor de korrel grootte) en lagere snelheden in XBeach, maar ook door de manier hoe de modellen omgaan met de erosie van droge cellen en klif-erosie (instelling *ThetSD* in Delft3D en *wetssp* in XBeach). Hierbij dient men de bedenking te maken dat het XBeach model niet het volledige mondingsgebied bevat. Verondersteld wordt dat de effecten van de Scheldemonding op de getijgedreven morfologische veranderingen in het XBeach model minder goed gerepresenteerd zullen worden. Dit is vooral zichtbaar ten Noorden van de eilanden waar het XBeach model minder morfologische activiteit weergeeft dan het Nieuwpoort-Vlissingen model. In mindere mate is dit verschil ook zichtbaar in de Geul van de Appelzak.

De evolutie van het pilooteiland (scenario H1) is vergelijkbaar voor de verschillende modellen. Het Nieuwpoort-Vlissingenmodel en het ZWeM-zand model voorspellen wel een sterkere erosie van de Appelzak tussen het pilooteiland en de kust gevolgd door een sterkere sedimentatie in de convergentiezone in de Appelzak ten oosten van het eiland dan XBeach. Ook hier kan het effect van het meenemen van het mondingsgebied meespelen.

De verschillende modellen voorspellen een sterke erosie van de westelijke tip van het eiland in scenario E3. De snelheid van de erosie is echter afhankelijk van de verschillende modellen. De keuze van de korrelgrootte heeft hier een effect op, vooral in het Nieuwpoort-Vlissingen model. XBeach is over het algemeen minder gevoelig voor korrelgrootte.

Ook het al dan niet meenemen van de erosie van droge cellen (*ThetSD*) blijkt in het Nieuwpoort-Vlissingen model een sterk effect te hebben op de erosiesnelheid van de tip. Wanneer de droge cel erosie uitgeschakeld wordt is de erosie fors minder en benadert de evolutie van de tip van het eiland deze zoals voorspeld in het XBeach model. Wanneer langs de andere kant in het XBeach model de *wetslope* parameter laag gezet wordt (*wetssp*=0.1)², wordt de erosie in het model versneld, vergelijkbaar met het Nieuwpoort-Vlissingen model. Door deze parameter laag te zetten neemt de erosie toe

² Deze parameter bepaalt de maximale helling waaronder het strand stabiel voordat er afschuiving (avelanching) optreedt. *wetssp*=0.1 is wel extreem laag, in het model werd een waarde van 0.26 gebruikt. Default waarde in XBeach is 0.2.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Paardenmarkt

De sedimentatie van de Paardenmarkt is ingezet in de jaren '80 en lijkt de laatste jaren af te vlakken. Deze vertoont een sterke correlatie met de erosiekuil als gevolg van de uitbreiding van de haven van Zeebrugge, en wordt mogelijk versterkt door stortingen van onderhoudsspecie in het nabijgelegen stortvak Zeebrugge-Oost.

5.2 Scenario's Vlaamse Baaien

De verschillende modellen geven erosie aan van de westelijke tip van het eiland in scenario E3 (langgerekt eiland voor de kust van Knokke-Heist in combinatie met een geleidedam en stranduitbreiding). De erosiesnelheid verschilt van model tot model. De modellen tonen ook een duidelijke erosie in de openingen tussen de oostelijke dam van Zeebrugge en het eiland. De noordelijke zijde van het eiland is onderhevig aan de golfwerking met een verandering van het profiel tot gevolg en litoraal transport in oostelijke richting. Door de verlaging van de stroomsnelheid treedt aan de buitenkant van de oostelijke en westelijke uitgangen vrij sterke aanslibbing op. In dit scenario is dat sterker dan in E4 en H1 en ook groter direct voor het Zwin. Door de afscherpende werking van het eiland neemt het litoraal transport langsheen de stranden van Knokke-Heist tot Cadzand sterk af. De stranden zijn op die manier minder gevoelig voor erosie maar de zuidzijde van de geul is wel gevoeliger voor aanslibbing. De bodemschuifspanning in de geul direct achter de ingrepen blijft voldoende hoog om grootschalige aanslibbing in deze geul te voorkomen. Op basis van de opgestelde Escoffier curve, op basis van het door XBeach gemodelleerde langstransport, heeft scenario E3 een positief effect op de stabiliteit van het Zwin.

De modellen, zowel Nieuwpoort-Vlissingen en XBeach als het ZWeM-model, geven een transportconvergentie-zone aan ten oosten en van de eilanden. In de verschillende modellen is sedimentatie waarneembaar ten oosten en zuidoosten (in Geul van de Appelzak) van de eilanden, zowel in scenario E3 en E4 als voor het Pilooteiland.

Het overstroombaar eiland (scenario E4) kent vooral een afvlakking van het strand aan noordelijke zijde. Omdat er ook transport over de kruin van het eiland heen kan plaatsvinden, treedt er sedimentatie op langs zuidelijke (lij)zijde. Het eiland migreert op die manier richting kust. De aanslibbing aan de buitenkant van de oostelijke en westelijke uitgangen is ook vrij sterk maar minder dan in scenario E3. De afscherpende werking van het onderwatereiland voor de kustlijn tussen Zeebrugge in Cadzand lijkt onvoldoende om de huidige erosietrend tegen te gaan. Het XBeach model voorspelt nog steeds langstransport in de brandingszone. Het langstransport lijkt zelfs ten opzichte van de huidige situatie toe te nemen. Dit komt enerzijds omdat het getijgedreven langstransport tussen het eiland en de kustlijn eveneens toeneemt, maar vooral omdat door de stranduitbreiding de bestaande strandhoofden bedekt worden en ten opzicht van de huidige situatie dus hun beschermende werking verliezen. Net als in E3 is de zuidzijde van de geul (juist buiten de brandingszone) wel gevoelig voor aanslibbing. Het grootste verschil tussen scenario's E3 en E4 is de minder sterke erosie tussen het eiland en de kust in geval van het overstroombaar eiland.

Het pilooteiland (scenario H1) is onderhevig aan erosie. Het pilooteiland migreert in oost, noordoostelijke richting. Het gebied tussen het eiland en het strand erodeert. Dit sediment komt grotendeels direct ten oosten hiervan terecht. Het ZWeM zand-slib model geeft naast aanslibbing ten oosten van het eiland en vóór het Zwin ook een duidelijke sedimentatietrend ter hoogte van de munitiestortplaats. Door de toegenomen getijstrooming tussen het eiland en de huidige kust neemt het langstransport lokaal sterk toe. Het effect op de kustlijn is zeer lokaal met afwisselend zones van erosie en sedimentatie. Ter hoogte van het Zwin is het langstransport lager dan in de huidige situatie. De verschillende modellen tonen echter wel

een sterke convergentiezone in het gebied ten Noorden van het Zwin. In deze zone treedt sedimentatie op. Deze sedimentatie wordt niet meegenomen in de methode van Escoffier. Op basis van de huidige modellen is het niet te voorspellen of deze sedimentatie effect heeft op het Zwin, hiervoor is een 2D/3D detailmodel van het Zwin meer aangewezen.

Het ZWeM-model geeft een duidelijke sedimentatietrend ter hoogte van de munitiestortplaats in het scenario H1 (pilooteiland). In alle scenario's is er eveneens sedimentatie waarneembaar ten Oosten van de eilanden. Omwille van de rekentijden was het niet mogelijk het model in te zetten voor lange termijn evolutie van de slibdynamiek.

Onderstaande Tabel 9 op pagina 104 geeft een samengevat overzicht van de effecten van de scenario's in relatie tot de onderzoeksvragen geformuleerd in Hoofdstuk 1.1

5.3 Aanbevelingen

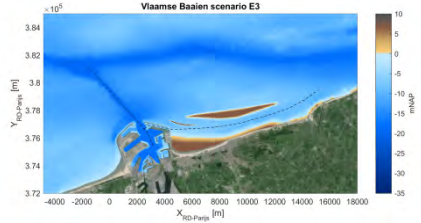
In het huidige onderzoek wordt het effect van zeespiegelstijging niet meegenomen. Dit is een aandachtspunt voor verder onderzoek. Ook het effect van een individueel extreem event is nog niet nader onderzocht.

Het ontwerp van het pilooteiland is nog voor verbetering vatbaar. Onder het huidige ontwerp gedraagt het pilooteiland zich morfologisch anders dan de overige scenario's.

Voor substantiële uitbreidingen van het droogstrand zal ook het eolisch transport een dominante rol gaan spelen. De kennis hieromtrent en de beschikbare modellen zijn tot op heden eerder beperkt. In Vlaanderen wordt hier binnen het CREST project, onder andere door het Waterbouwkundig Laboratorium, onderzoek naar gedaan.

Tenslotte wordt aanbevolen om naast de modellen gebuikt voor deze studie in te zetten op geïdealiseerde morfologische modellen. Deze modellen beperken zich tot de meest dominante processen in een vereenvoudigde representatie van de werkelijkheid. De modellen laten toe om evenwichtssituaties en langetermijn evoluties te analyseren. Ze zijn complementair aan de complexe proces-gebaseerde modellen die gebruikt zijn in deze studie. Momenteel wordt deze aanpak reeds toegepast voor het Schelde mondingsgebied en wordt er onderzocht wat de toepasbaarheid is voor de kustzone in het kader van Vlaamse Baaien.

Tabel 9: Samenvatting impact van de ingrepen.

Onderzoeksvraag	Scenario E3: Eiland en dam 	Scenario E4: Overstroombaar eiland 	Scenario H1: Pilooteiland 
1) Stabiliteit van de ingrepen	Vooral erosie van de westelijke tip van het eiland. De erosiesnelheid verschilt van model tot model en is erg gevoelig de modelinstellingen. Noordelijke zijde is onderhevig aan golfwerking: verandering van het profiel en litoraal transport in oostelijke richting.	Afvlakking van het strand aan de noordzijde. Migratie van het eiland richting kust.	Sterk onderhevig aan erosie.
2) Impact op de omgeving	Erosie tussen het eiland en de oostelijke havendam van Zeebrugge. Sedimentatie ten oosten en ten noordwesten van het eiland. Lokaal sterke erosie tussen eiland en kust.	Erosie en sedimentatiepatronen zijn minder sterk dan in scenario E3.	Sedimentatie ten westen en vooral ten zuidoosten van het eiland.
3) Impact op de stranden	Door de golfwerende werking neemt het litoraal transport af. Stranden worden minder gevoelig voor erosie.	Door de beperkte afschermende werking van het eiland weinig effect op de erosietrend van de stranden.	Door de beperkte omvang, weinig effect op de stranden.

4) Impact op toegangsgeul het Zwin (sedimentatie in 't Zwin niet onderzocht)	Door de afname van het litoraal transport in de brandingszone is een beperkt positief effect op de zwingel waarneembaar. Echter wordt wel sedimentatie offshore voor het Zwin waargenomen. Het is onduidelijk in welke mate deze aanzanding invloed zal hebben op het Zwin zelf.	Beperkte impact op het langstransport en dus beperkte impact op het Zwin te verwachten. Wel sedimentatie offshore voor het Zwin.	Beperkte impact op het langstransport en dus beperkte impact op het Zwin te verwachten. Door toename van de getijstroming tussen het eiland en de kust is hier wel meer getijgedreven langstransport. Het is onzeker of dit effect heeft op de stabiliteit.
5) Slibhuishouding	Pas van het Zand en omgeving slibrijker. Nauwelijks effect op slibgehalte in Scheur en haven. Sterke erosie van slib aan zeezijde eiland. Erosie van slib in geul direct achter eiland, sterkst in omgeving geleidedam. Kans op depositie van slib op strand/vooroever achter eiland tussen Knokke en Lekkerbek. Forse depositie slib in de Appelpak ter hoogte van Zwin.	Pas van het Zand en omgeving slibrijker. Nauwelijks effect op slibgehalte in Scheur en haven. Erosie van slib aan zeezijde eiland. Erosie van slib in geul direct achter eiland, sterkst in omgeving geleidedam. Kans op depositie van slib op strand/vooroever achter eiland tussen haven en Knokke. Iets minder depositie slib in de Appelpak ter hoogte van Zwin.	Minder effect op Pas van het zand en omgeving. Nauwelijks effect op slibgehalte in Scheur en haven. Sterke erosie van slib aan zeezijde eiland. Forse erosie van slib direct achter eiland. Erosie van slib op vooroever achter eiland, deposities voor Albertstrand.

Referenties

- Boutmy** (1998). Morphological impact of IJmuiden harbour; Validation of Delft3D/Delft3D-RAM 1968-1996; MSc thesis TU Delft.
- Deltares** (2011). Delft3D-FLOW User manual, pp.674. <https://oss.deltares.nl/web/delft3d/manuals>
- Deltares** (2015). XBeach User manual, pp.135. <https://oss.deltares.nl/web/xbeach/documentation>
- De Maerschalck, B.; van der Werf, J.; Dijkstra, J.; Kolokythas, G.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2015). Strandverbreding Zeebrugge tot Cadzand: Morfologische effecten. Versie 4.0. WL Rapporten, 15_102. Waterbouwkundig Laboratorium & Deltares: Antwerpen, België.
- De Maerschalck, B.; Renders, D.; Vanlede, J.; Gourgue, O.; Willems, M.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2016). Modellerings Vlaamse Baaien: Deelrapport 1 – Hydrodynamische Modellerings. Versie 1.0. WL Rapporten, 15_068. Waterbouwkundig Laboratorium & afdeling Maritieme Toegang: Antwerpen, België.
- Galappatti, R., Vreugdenhil, C.B.** (1985). A depth integrated model for suspended transport. J. Hydraul. Res. 23 (4), 359–377.
- Hallermeier, R.J.** (1981). Terminal settling velocity of commonly occurring sand grains. Sedimentology, 28, 859–865.
- Houthuys, R.; Trouw, K.; De Maerschalck, B.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2013). Inschatting van de morfologische impact van strandsuppleties te Knokke op het Zwin en de Baai van Heist. Versie 4.0. WL Rapporten, 12_107. Waterbouwkundig Laboratorium & IMDC: Antwerpen, België.
- Kuijper, K., Nederhoff, K. Vergouwen, S.** (2015). Beheerbibliotheek Zeeuws-Vlaanderen. Deltares rapport 1220040-002.
- 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 - modellerings. Versie 4.0. WL Rapporten, 12_107. Waterbouwkundig Laboratorium & IMDC: Antwerpen, België.
- Lauwaert, B., Bekaert, K., De Brauwer, D., Fettweiss, M., Hillewaert, H., Hoffman, S., Hostens, K., Mergaert, K., Moulaert, I., Parmentier, K., and Verstraeten, J.,** (2006). Syntheserapport over de effecten op het mariene milieu van baggerspeciestorings (vergunningsperiode 2004-'06).
- Lesser, G.J.** (2009). An approach to medium-term coastal morphological modelling. PhD thesis, Delft University of Technology, Delft.
- Hassan, W.; Suzuki, T.; De Maerschalck, B.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2016). Modellerings Belgische Kustzone en Scheldemonding: Rekennota - Berekeningen golfklimaat Vlaamse Baaien scenario's E4 en F1. Versie 3.0. WL Rapporten, 15_068_4. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.
- Trouw, K.; Zimmermann, N.; Wang, Li.; De Maerschalck, B.; Delgado, R.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2015). Scientific support regarding hydrodynamics and sand transport in the coastal zone: Literature and data review coastal zone Zeebrugge - Zwin. Version 4_0. WL Rapporten, 12_107. Flanders Hydraulics Research. Antwerp, Belgium.
- Trouw, K., Zimmermann, N., Mathys, M., Delgado, R., Roelvink, D.** (2012). Numerical modelling of hydrodynamics and sediment transport in the surf zone : a sensitivity study with different types of numerical models, Proc. 33^d Int. Conf. Coastal Eng. (ICCE 2012), Santander, Spain.

- Van Cauwenberge** (1966). Hydrografische analyse van de Scheldemonding ten Oosten van de meridiaan 3°05' tot Vlissingen, Het Ingenieursblad.
- Van Lancker, V.R.M.** (2007). Morfologische en sedimentologische context van de Baai van Heist, in: (2007). "De zandbank te Heist, een boeiend fenomeen", Seminarie Scharpoord Knokke-Heist, 19 oktober 2007: abstracts en powerpoint presentations. pp. 1-10
- Van Lancker, V.R.M. et al.** (2012). Quantification of erosion/sedimentation to trace naturally- from anthropogenically-induced sediment dynamics "QUEST4D" SD/NS/06B, Final Report, Begium.
- Van Geer, P.; den Bieman, J.; Hoonhout, B.; Boers, M.** (2015). XBeach 1D – Probabilistic model: ADIS, settings, model uncertainty and graphical user interface. Delft.
- Van Rijn, L.C.** (1993). Principles of sediment transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. Aqua Publications, Amsterdam.
- Van Rijn, L.C.** (2007). Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves: part I and II. J. Hydraulic Eng., 133(6), 649–667.
- Van Rijn, L.C.** (2001). Approximation formulae for sand transport by currents and waves and implementation in DELFT-MOR. WL|Delft Hydraulics Report Vol. Z3054.20. Delft Hydraulics, The Netherlands (unpublished report for Rijkswaterstaat/RIKZ).
- Van Thiel de Vries, J.S.M.** (2009). Dune erosion during storm surges. PhD thesis, Delft University of Technology, Delft.
- Van Rooijen, A.A.** (2011). Modelling sediment transport in the swash zone. MSc thesis, Delft University of Technology, Delft.
- Van Zwijnsvoorde, T.; Vantorre, M.** (2016a). Zeewaartse binnenvaartverbinding voor Zeebrugge, Berekening van de scheepsreponsies voor scenario T0, E1 en F1: Vaarroute doorheen opening in de oostelijke dam en aanleg golfwerende constructies. Universiteit Gent, Civiele Techniek afdeling Maritieme Toegang.
- Van Zwijnsvoorde, T.; Vantorre, M.** (2016b). Zeewaartse binnenvaartverbinding voor Zeebrugge, Berekening van de scheepsreponsies voor scenario E4 : constructie eilanden met kruinhoogte 0 m LAT op het Belgisch deel van het vaartraject. Universiteit Gent, Civiele Techniek afdeling Maritieme Toegang.
- Vroom, J., Schrijvershof, R.** (2016). Overzicht van menselijke ingrepen in de Westerschelde en haar mondingsgebied in de periode 1985-2014. Memo 1210301-001-ZKS-005, Deltares, Nederland.
- Vroom, J., van Maren, B., van der Werf, J., van Rooijen, A.** (2016). Zand-slib modellering voor het mondingsgebied van het Schelde-estuarium. Deltares rapport 1210301-002-ZKS-002, Delft, Nederland.
- 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 (WL Rapporten) (Vol. 12_107). Antwerp: Flanders Hydraulics Research.
- Zimmermann, N., Wang, L., Mathys, M., Trouw, K., Delgado, R., Schramkowski, G., Mostaert, F.** (2013). Scientific support regarding hydrodynamics and sand transport in the coastal zone: Calibration of the Oostende-Knokke hydrodynamic and sediment transport model (OKNO) (WL Rapporten) (Vol. 00_072). Antwerp: Flanders Hydraulics Research.

Bijlage A: Expertmeeting 29/6/2016

Op 29 juni 2016 werden de resultaten voorgelegd aan een Vlaams-Nederlandse commissie van experts.

Aanwezigen: Erik Toorman, Jean Berlamont, Frank Mostaert, Dano Roelvink, Maarten van der Vegt, Zheng Bing Wang, Joris Vanlede, Han Winterwerp, Marcel Taal, Wael Hassan, Jebbe van der Werf, Tomas Van Oyen, Julia Vroom, Ellen Quataert, Tom De Mulder, Jaak Monbaliu, Youri Meersschaut, Dries Van Den Eynde, Marc Vantorre, Abdel Nnafie, Eline Damman, Bart De Maerschalck, Elias Van Quickelborn.

Algemeen worden de gebruikte modellen als state of the art modellen erkend. Het instrumentarium laat toe verkennende studies uit te voeren. Voor de finale ontwerpstudie is nog een aantal verbeteringen mogelijk. Een verfijnd model voor het Zwin wordt door de experts geadviseerd (Jean Berlamont, wordt ook ondersteund door Peter Herman). Het effect van het slib op het zandtransport en in het bijzonder de lange-termijn morfologische ontwikkeling is nog een open vraag (Han Winterwerp).

Om meer vertrouwen in de modellen te scheppen wordt een hindcast geadviseerd (Maarten van de Vegt). Voor N2V is dit in het verleden wel al gebeurd (kalibratierapport, kwalitatief). Focus lag toen vooral op de langstransporten, idem Xbeach Knokke. Een goede oefening zou kunnen zijn om de modelresultaten te vergelijken met de ontwikkelingen van de Paardenmarkt zoals beschreven in de memo.

Het effect van stormen is eveneens een aandachtspunt. Ook achter het eiland kunnen bij voldoende strijklengte (>5km) nog golven met verrassende effecten opgewekt worden, Lange golven hebben een sterke invloed op strand en duinerosie tijdens stormen. In XBeach (surf beat mode) worden deze expliciet gemodelleerd. Deze zitten niet in Delft3D? (Dano Roelvink)

Er wordt opgemerkt dat het ontwerp van het pilooteiland nog voor verbetering vatbaar is. Onder het huidige ontwerp gedraagt het pilooteiland zich morfologisch anders dan de overige scenario's.

Han Winterwerp maakt de opmerking dat in geval van een zeer breed strand, eolisch transport ook zeker een rol kan spelen. Han verwijst hierbij naar de Zandmotor, die vooral kort na de aanleg, op windere dagen onaangenaam was om te betreden wegens stuifzand.

Dano Roelvink merkt op dat het vooruitschuiven van de eerstelijns kustverdedigingslinie effecten kan hebben op het onderhoud (wanneer de locatie ongunstiger is dan de huidige). Hoe het onderhoud zich zal verhouden tot het huidige onderhoud is nog een open vraag. Er wordt opgemerkt dat het mogelijk is de eilanden lokaal te versterken met harde constructies om ze in stand te houden.

Elias Van Quickelborne geeft aan dat voor de evaluatie van het kustveiligheidsplan belangrijk is te weten hoe de ingrepen de hydraulische randvoorwaarden beïnvloeden.

Tom De Mulder merkt op dat SWAN beperkingen kent in het goed modelleren van golven achter zandbanken. Dit is een onderwerp van lopend onderzoek bij KU Leuven in opdracht van Afdeling Kust. (Broersbank, Jaak Monbaliu)

Marc Vantorre merkt op dat het effect van stromingen in de haven en langsheen het voorgestelde vaartraject voor estuaire vaart een aandachtspunt is. Momenteel focust het onderzoek zich op de golfcondities langsheen het traject voor estuaire vaart. Een rapport met de te verwachte stromingen langsheen het vaartraject en binnen het CDNB is in voorbereiding door WL (De Maerschalck et al., 2016). Het is aangewezen om op basis van de stromingen nautische toegankelijkheid verder te onderzoeken.

Jaak Monbaliu merkt op dat er geen enkel scenario is doorgerekend met zeespiegelstijging, wat een discrepantie is met het breder kader van klimaatadaptatie

Bijlage B: Beschrijving ZWeM-DD inclusief representatieve golven en wind ZWeM-DD.

Beschrijving ZWeM-DD

Het ZWeM-DD model is een domeindecompositie-versie van het ZWeM model (Vroom et al., 2016), waarbij de gridcelgrootte in het interessegebied rondom Zeebrugge een factor vijf is verfijnd om voldoende resolutie te hebben om de te onderzoeken ingrepen realistisch te kunnen simuleren. Het originele ZWeM model (Figuur 107) is hiervoor te grof. De randvoorwaarden, processen en sedimentparameters zijn gelijk aan ZWeM. De belangrijkste eigenschappen zijn:

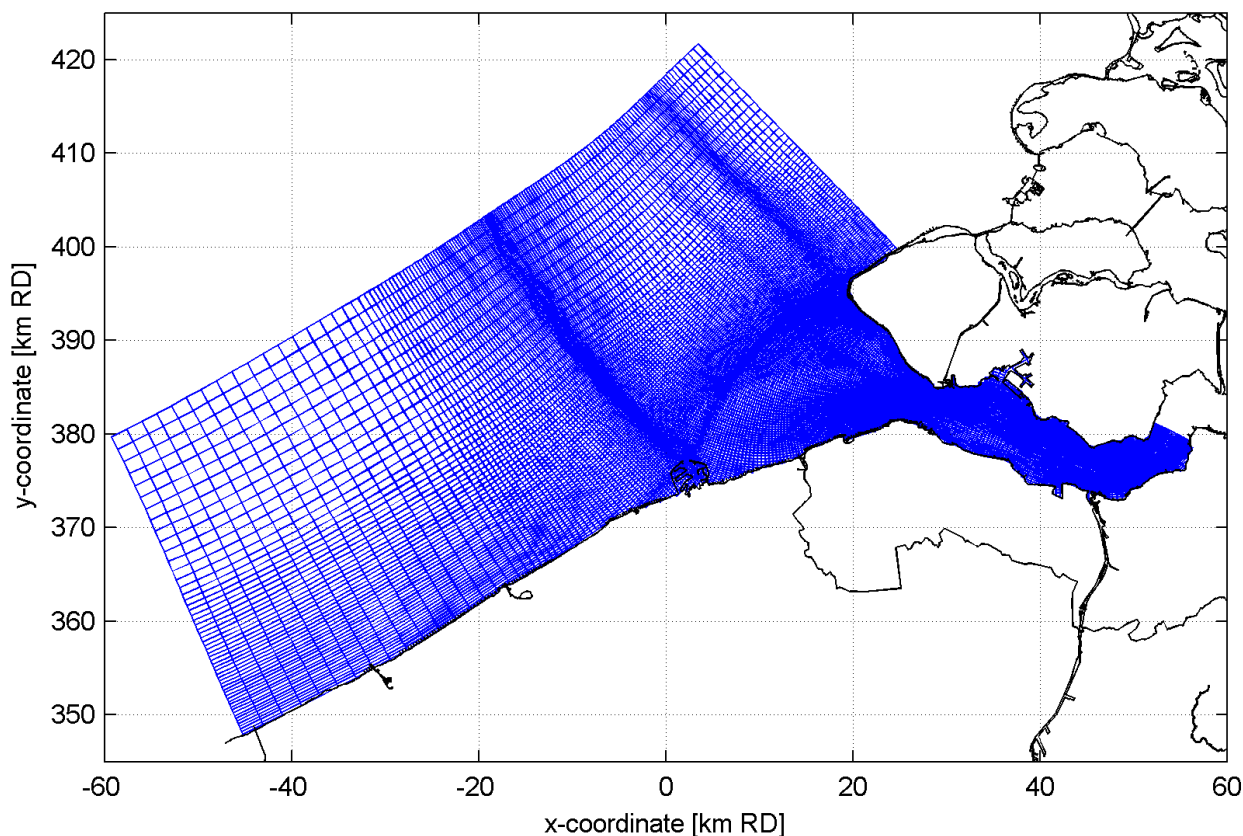
- 3D (10 logaritmische lagen), incl. dichtheidseffecten zout en sediment
- Twee bodemlagen: fluff en geconsolideerd
- Zand en slib voor buffering slib in zand
- Randvoorwaarden: SSC op basis van satellietbeelden, wind station Vlissingen, getij uit ZUNO
- Ruwheid: Manning $n=0.022 \text{ s/m}^{1/3}$ met $n=0.016 \text{ s/m}^{1/3}$ bij holocene bron
- Baggeren en storten
- Valsnelheid slib: 0.5, 2 en 4 mm/s op basis van SSC metingen (sterke variatie over getij $\rightarrow$ hoge w_s), analyse Rouse profiel (2-3 mm/s), metingen Andy Manning (2-4 mm/s)
- D_{50} zand: 200 μm
- Kritische schuifspanning voor erosie: Fluff: $\tau_{cr} = 0.2 \text{ Pa}$, onderlaag: $\tau_{cr} = 1 \text{ Pa}$
- Erosieparameter: variabel per fractie en voor langstransport/bron

Representatieve wind- en golfcondities

Net als ZWeM gebruikt ZWeM-DD tijdseries van golven en wind als randvoorwaarden en geen zogenaamde morfologische forcering of synthetisch golfklimaat. Het afleiden van een dergelijk klimaat is arbeidsintensief en daarom is in de huidige studie gekozen voor een maand die min of meer representatief is voor de gedurende een jaar optredende condities. Een dergelijke afleiding kan zich lonen voor vervolgstudies. Het simuleren van een volledig jaar is niet mogelijk in verband met de doorlooptijd van de studie en de vereiste rekentijd (1 maand simulatie is in ZWeM-DD ongeveer 1 week rekentijd).

Voor golven is onderzocht in welke maand de observaties van de A2 boei (Figuur 107; dicht bij het interessegebied) overeenkomen met de condities gedurende een jaar. Hiervoor is niet alleen de jaargemiddelde golfhoogte van belang maar ook de afwisseling tussen dynamische en rustige condities, in Tabel 9 beoordeeld middels de standaarddeviatie. Hetzelfde gaat op voor de golfrichting. Op basis van deze analyse blijken de maanden januari, mei, oktober en december het meest geschikt.

Figuur 110: ZWeM rekengrid.



Tabel 10: Vergelijking maandelijks golfklimaat met jaarklimaat.

		jaar	jan	feb	mar	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
H _s (m)	Gem	1.04	1.32	1.41	0.84	0.76	0.95	0.74	0.86	1.02	0.83	1.11	0.97	1.59
	Std	0.63	0.53	0.70	0.44	0.43	0.69	0.40	0.59	0.51	0.43	0.72	0.42	0.72
Dir (°)	Gem	189	208	207	180	173	167	153	193	235	141	215	180	220
	Std	102	60	44	107	119	112	128	127	72	130	68	76	92

Groene cijfers geven een goede overeenkomst (verschil tot 0.2 m of 20° voor het gemiddelde in combinatie met een verschil tot 0.1 m of 10° voor de standaarddeviatie), oranje een redelijke (verschil van gemiddelde *of* standaarddeviatie groter) en rode een slechte (verschil van gemiddelde *en* standaarddeviatie groter) overeenkomst.

Voor wind is een zelfde analyse uitgevoerd waarbij –net als in ZWeM- is uitgegaan van de windcondities gemeten te Vlissingen (Tabel 10, windroos in Figuur 108)). Hier komen januari, februari, maart, mei, oktober en december als mogelijk geschikte maanden uit.

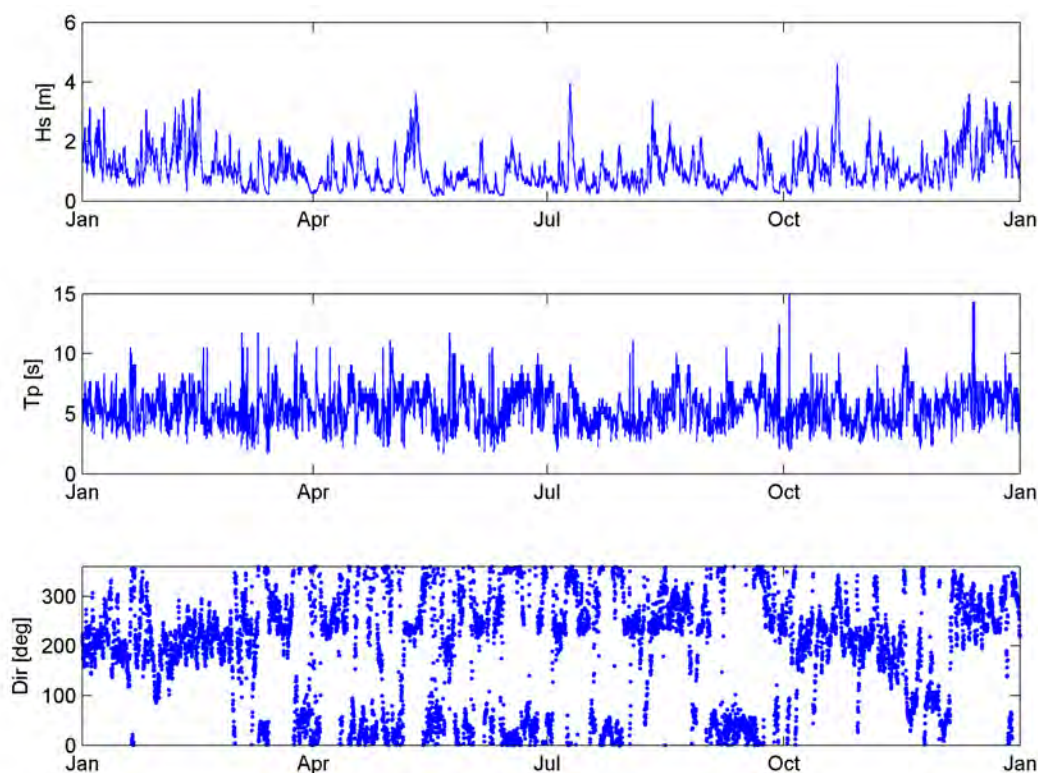
Voor wind en golven samen zijn dus enkel januari, mei, oktober en december geschikt. Januari is echter een zeer dynamische maand en wordt bovendien sterk gedomineerd door puur zuidelijke condities (zie windrozen in Figuur 109) die mogelijk te rustige omstandigheden in het interessegebied juist ten noordoosten van Zeebrugge tot gevolg zouden hebben. Dit laatste geldt ook voor de maand oktober. De maand december kent meer verschillende condities maar is gemiddeld ook zeer dynamisch (gemiddelde H_s 1.5 maal zo groot als jaargemiddelde) wat extrapolatie van resultaten tot jaarbasis bemoeilijkt. De maand mei is hierdoor het meest geschikt bevonden.

Tabel 11: Vergelijking maandelijks windklimaat met jaarklimaat.

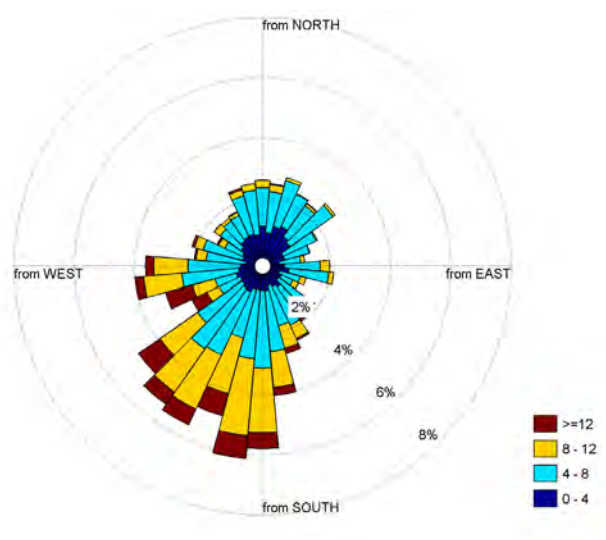
		jaar	jan	feb	mar	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
V (m/s)	Gem	6.18	8.37	9.07	5.51	5.00	5.97	4.29	4.83	6.31	4.17	6.70	6.07	7.83
	Std	3.27	3.07	3.38	2.67	2.42	3.86	2.18	2.28	2.73	2.32	2.76	2.67	3.88
Dir (°)	Gem	191	193	190	173	195	170	216	215	214	173	194	157	203
	Std	93	54	37	94	108	105	127	115	69	125	60	58	83

Groene cijfers geven een goede overeenkomst (verschil tot 1 m/s en 20° voor het gemiddelde in combinatie met 0.5 m/s of 10° voor de standaarddeviatie), oranje een redelijke (verschil van gemiddelde *of* standaarddeviatie groter) en rode een slechte (verschil van gemiddelde *en* standaarddeviatie groter) overeenkomst.

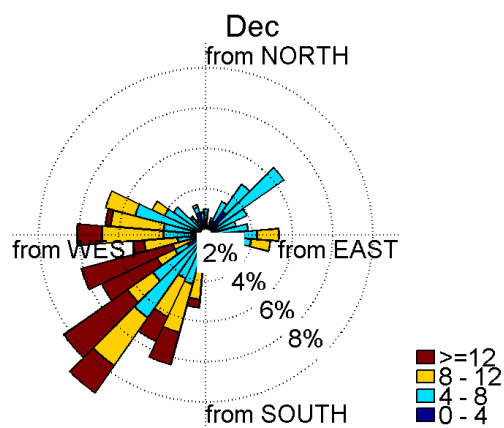
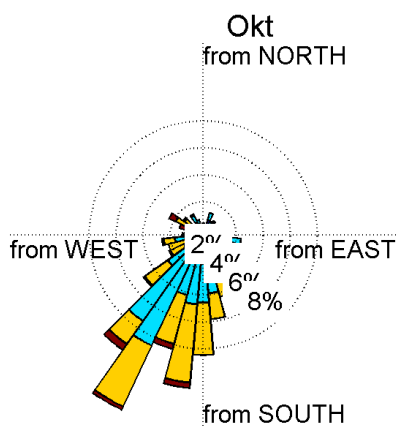
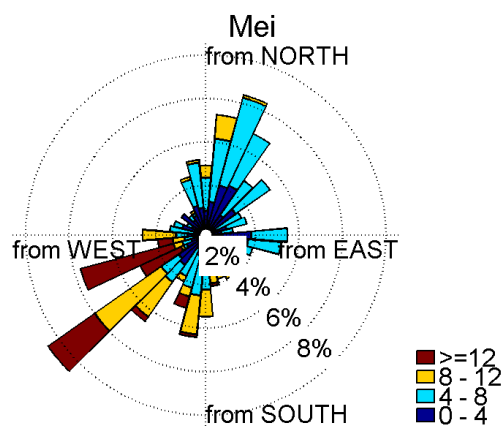
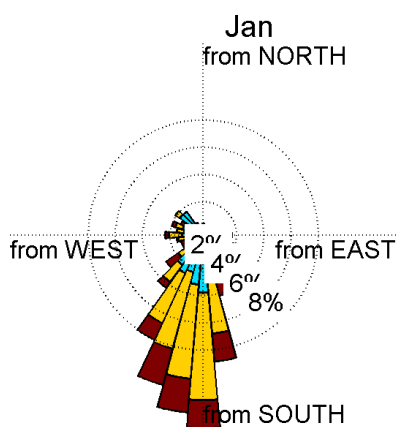
Figuur 111: Golfcondities voor het jaar 2014.



Figuur 112: Windroos 2014 (Vlissingen).



Figuur 113: Windrozen voor de meest representatieve maanden van 2014.



Bijlage C: Vergelijking gemodelleerde en waargenomen erosie en sedimentatietrends XBeach model

Tabel 12 geeft een overzicht van de waargenomen en berekende jaarlijkse sedimentatie- en erosievolumes in zes secties (Trouw et al., 2015) en voor verschillende delen van het strand. 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 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 het laatste strandhoofd ten Westen van het Zwin bijzonder efficiënt. Dit blijkt ook uit de satellietfoto in Figuur 114.

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. Dit is een probleem dat eveneens wordt vastgesteld in het Nieuwpoort-Vlissingen model (Wang et al. 2015), 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 12: XBeach Knokke model: Gemeten en gemodelleerde sedimentatietrends (1000 m³/jaar per sectie),

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

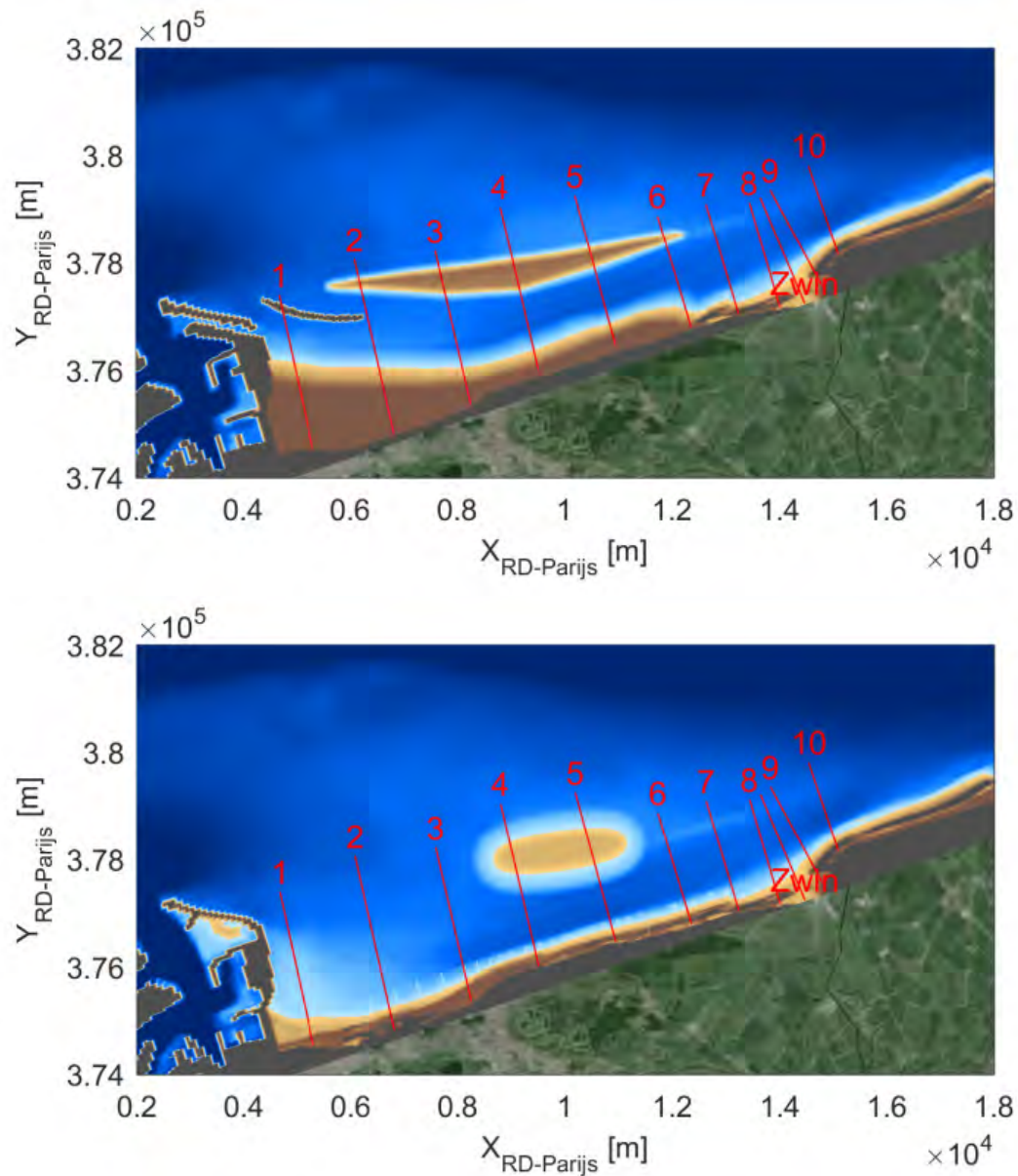
rood gearceerd=erosieve zone, blauw=sedimentatiezone (waarden in rood geven aan waar model een significant andere trend voorspeld), zie Figuur 12 op p.12 voor de definitie van de cellen.

Figuur 114: Satellietfoto van het laatste strandhoofd tussen strand Lekkerbek en Zwin.

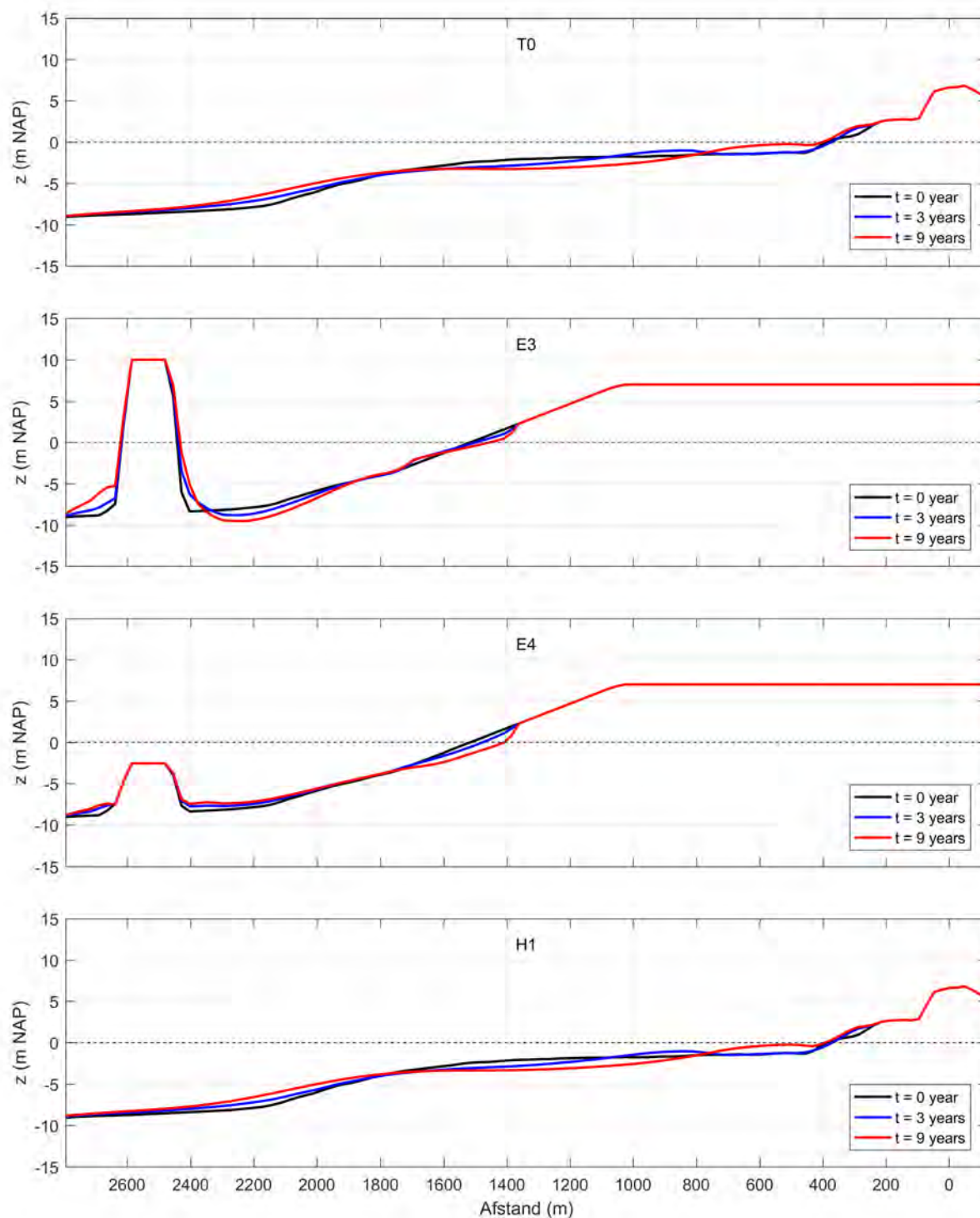


Bijlage D: Dwarsprofielen XBeach

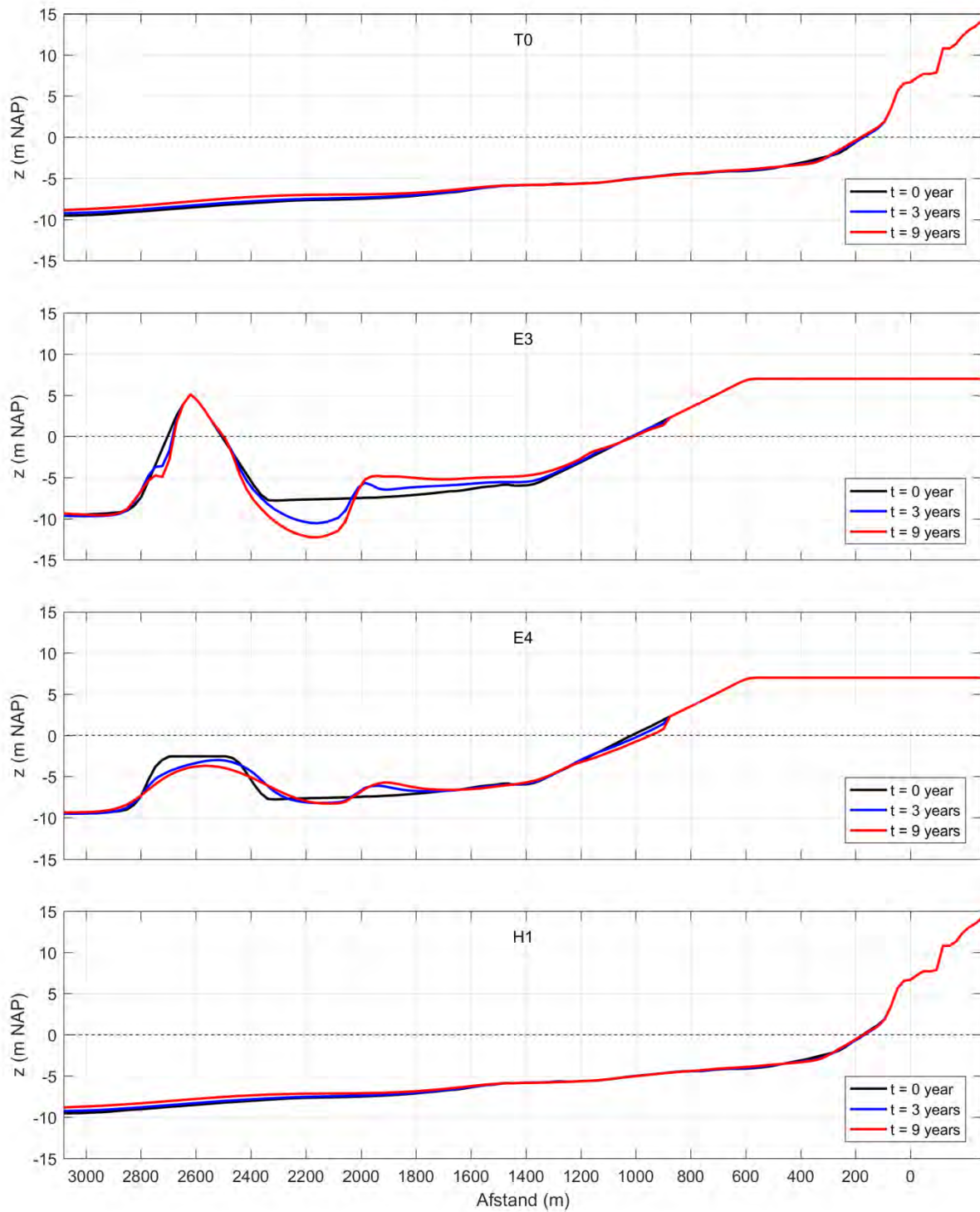
Figuur 115: Locatie van de profielen voor scenario's E3 (boven) en H1 (onder).



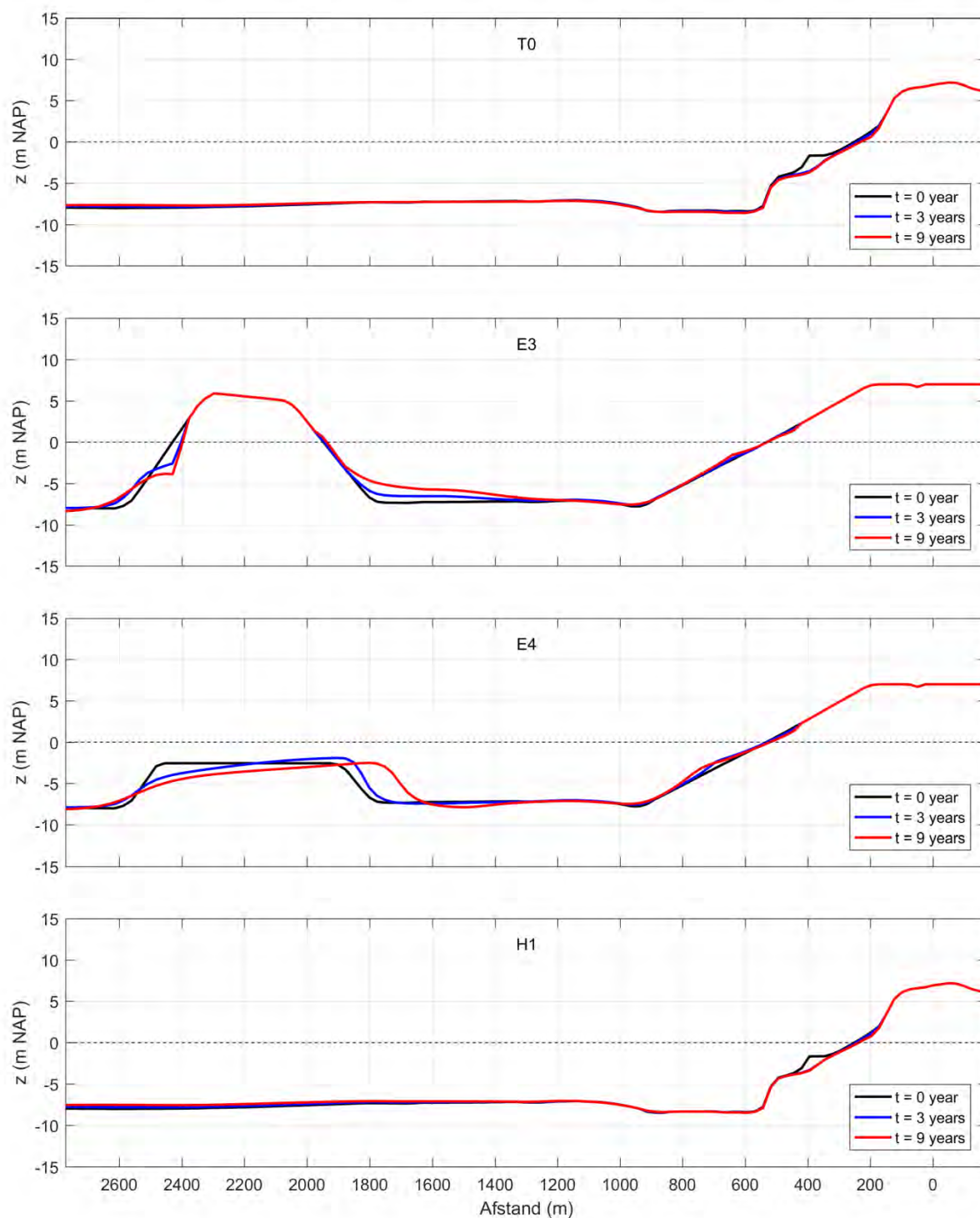
Figuur 116: Evolutie Profiel 1 na drie en negen jaar (XBeach model), scenario's E3, E4 en H1. T0 is de huidige situatie.



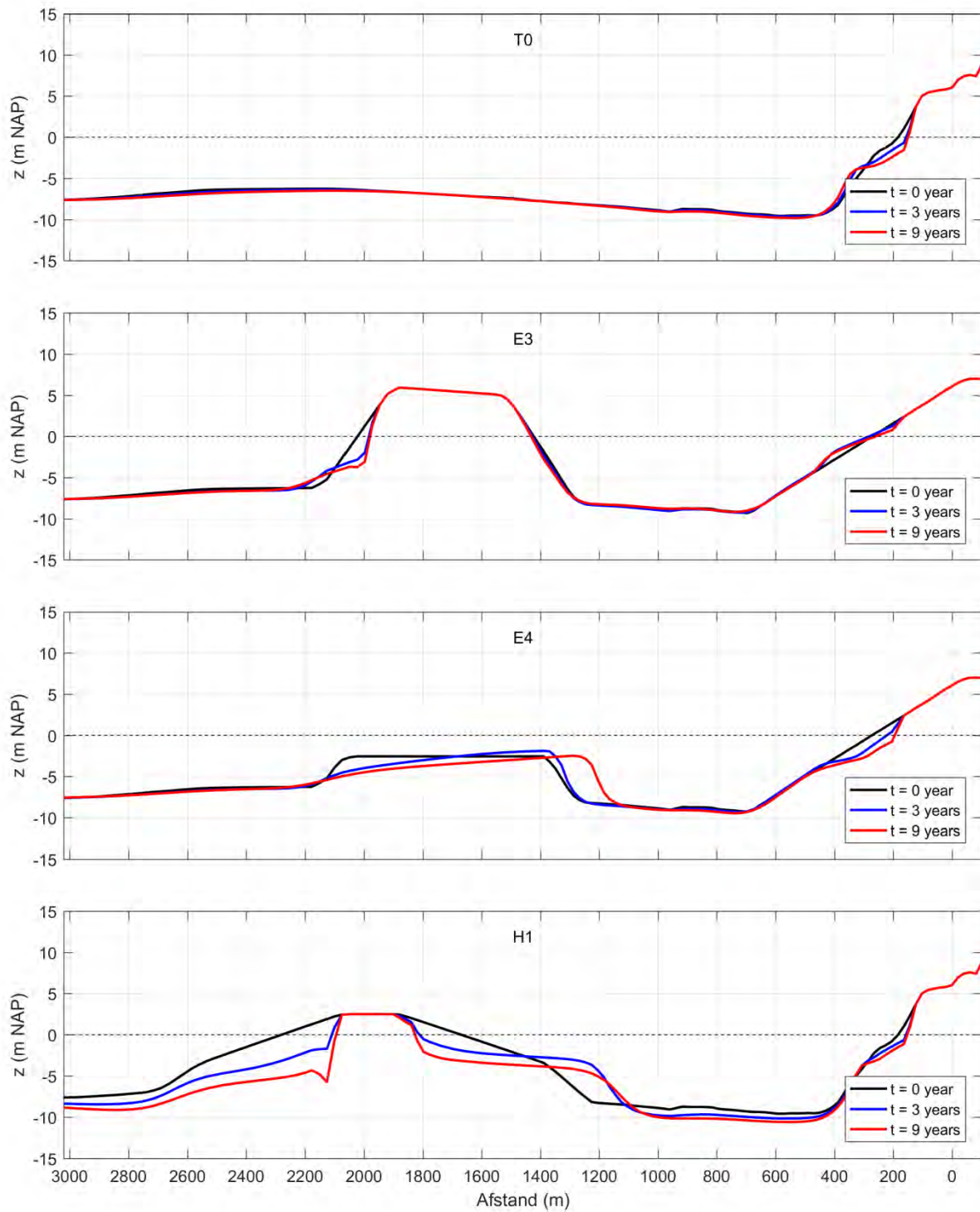
Figuur 117: Evolutie Profiel 2 na drie en negen jaar (XBeach model), scenario's E3, E4 en H1. T0 is de huidige situatie.



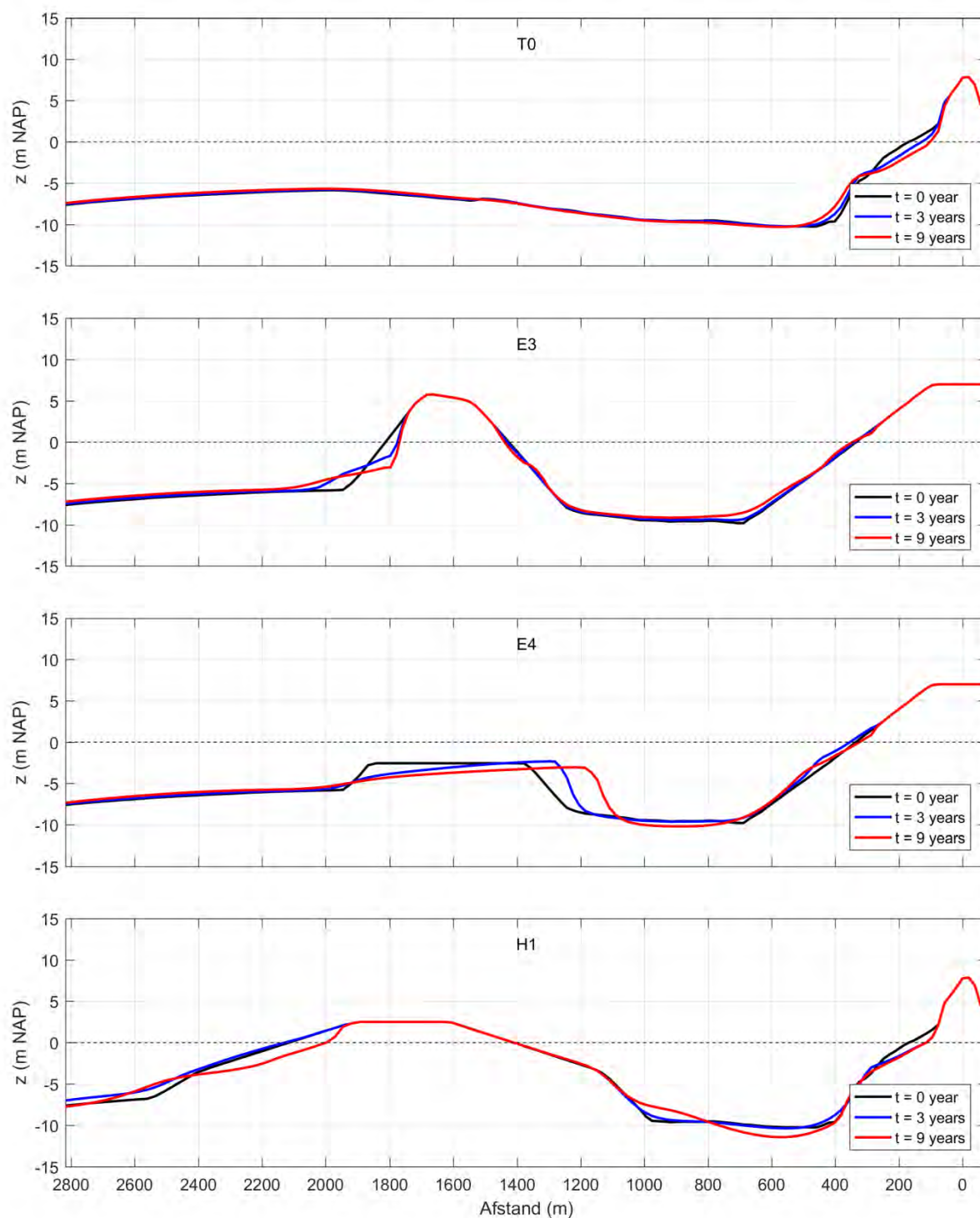
Figuur 118: Evolutie Profiel 3 na drie en negen jaar (XBeach model), scenario's E3, E4 en H1. T0 is de huidige situatie.



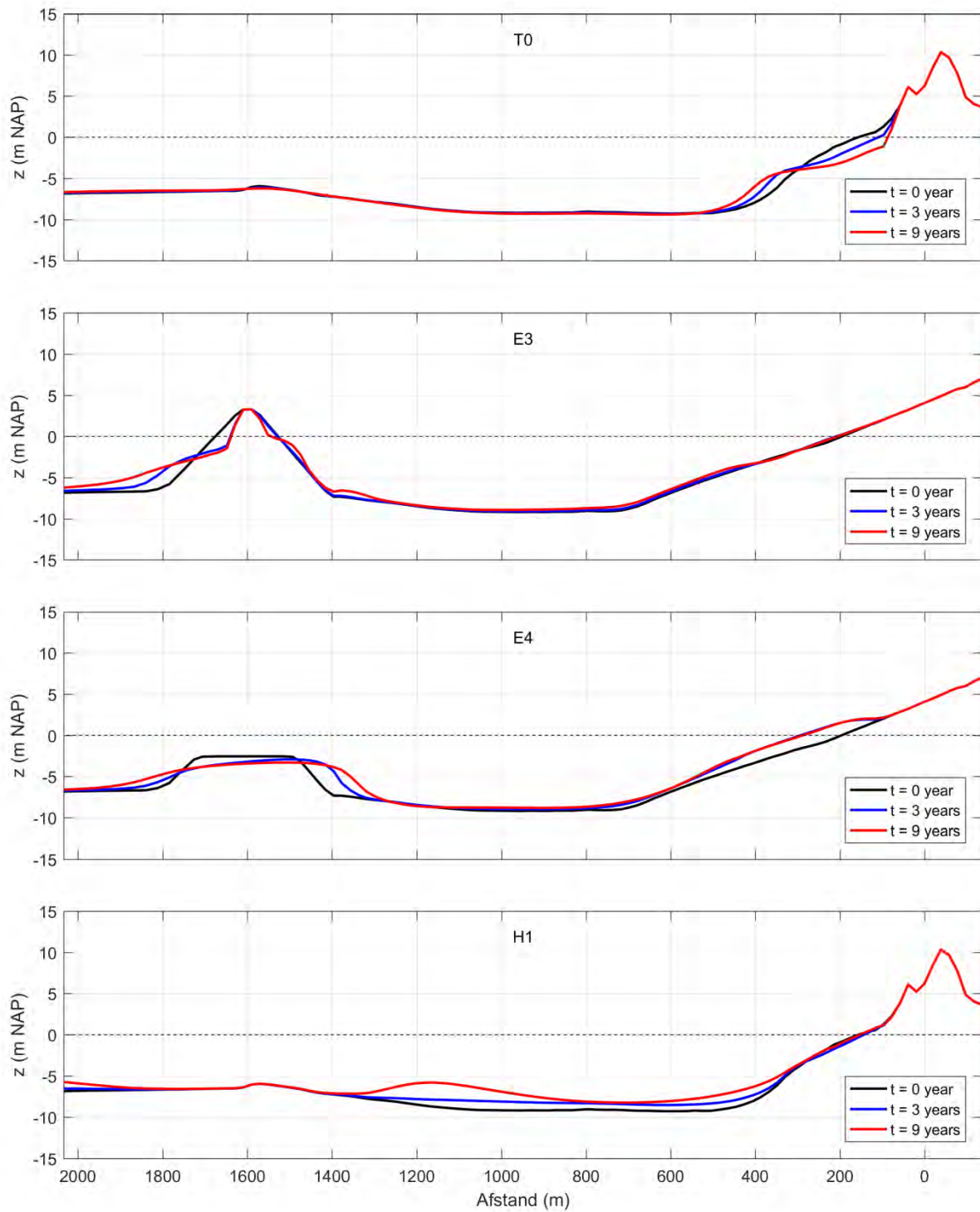
Figuur 119: Evolutie Profiel 4 na drie en negen jaar (XBeach model), scenario's E3, E4 en H1. T0 is de huidige situatie.



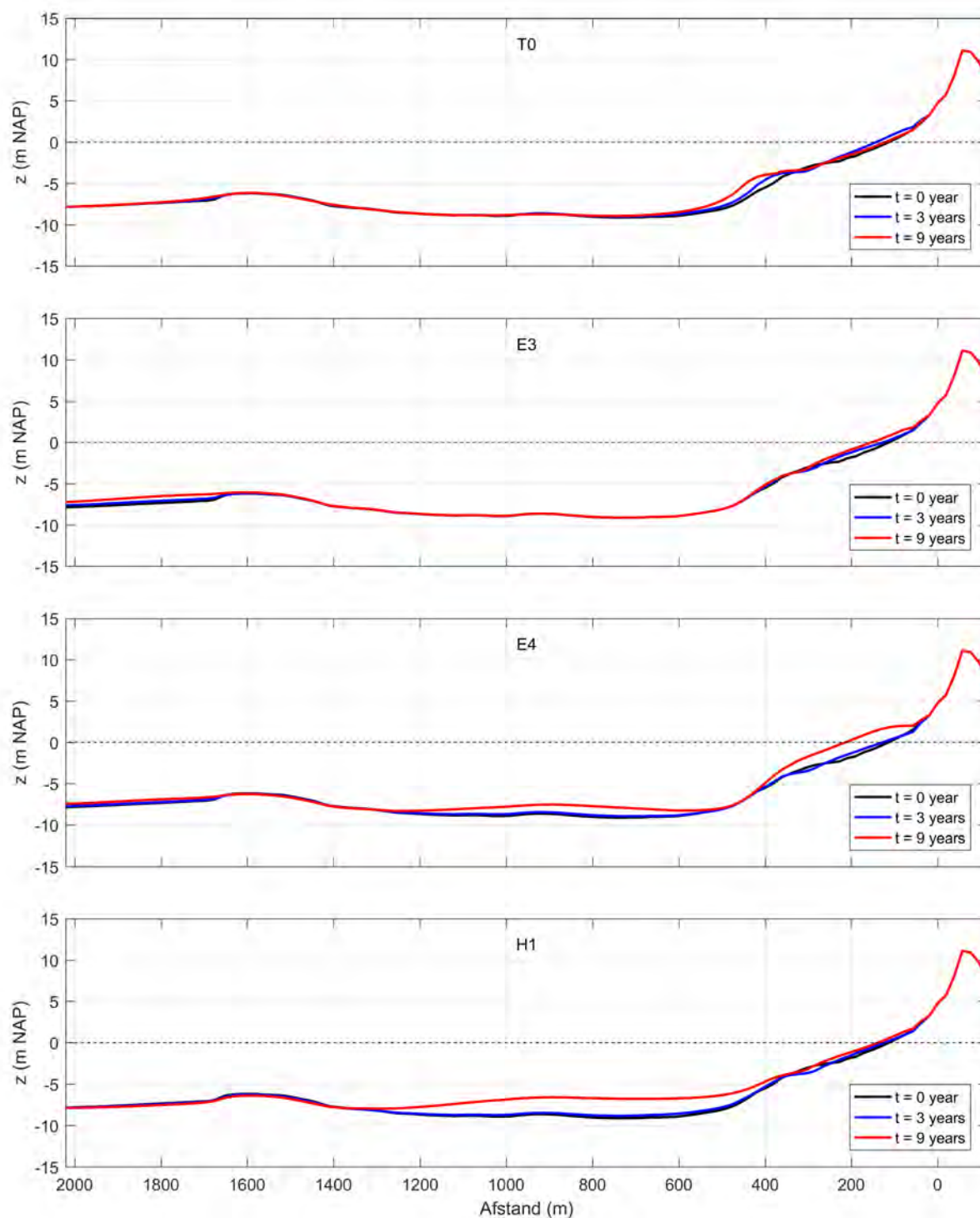
Figuur 120: Evolutie Profiel 5 na drie en negen jaar (XBeach model), scenario's E3, E4 en H1. T0 is de huidige situatie.



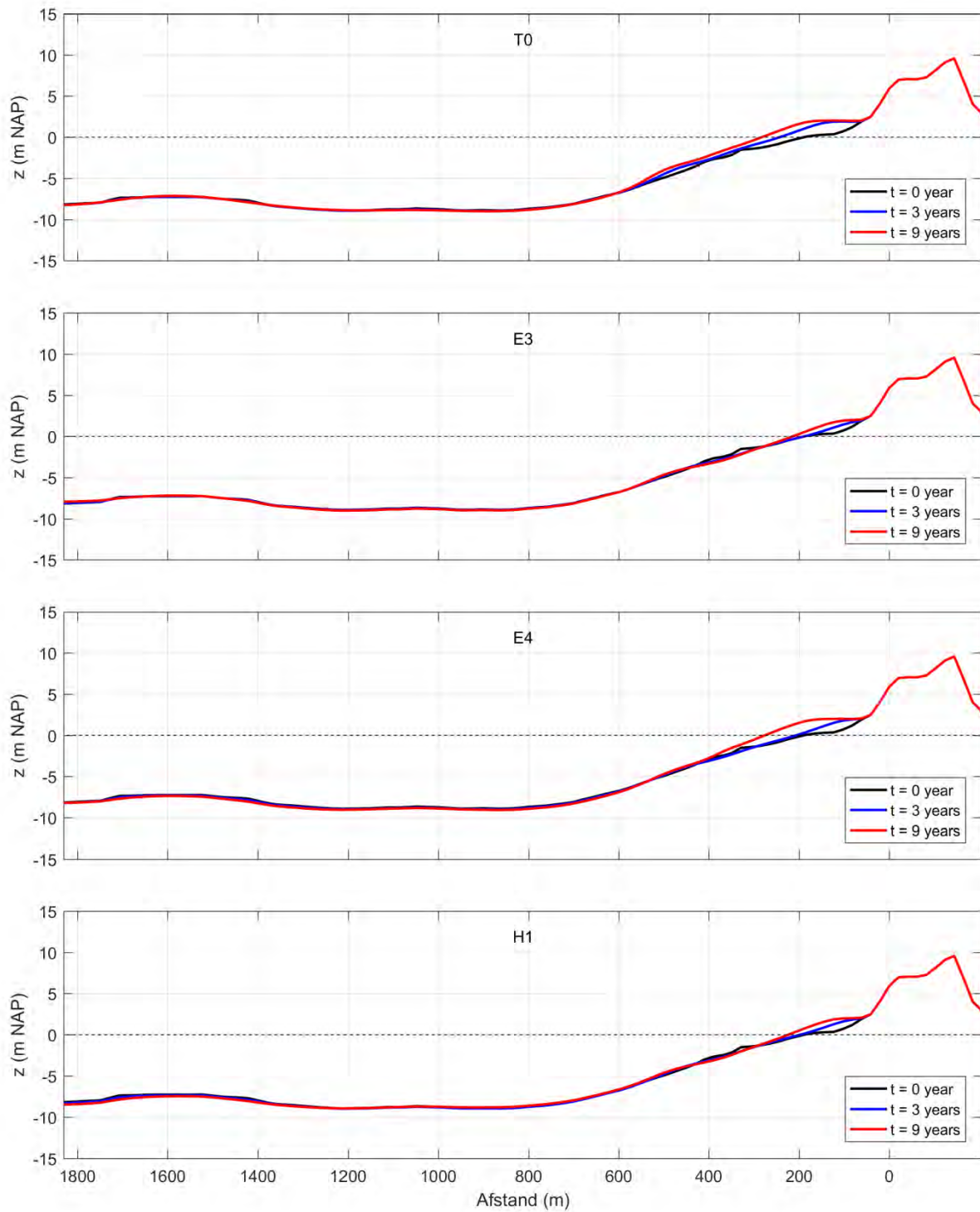
Figuur 121: Evolutie Profiel 6 na drie en negen jaar (XBeach model), scenario's E3, E4 en H1. T0 is de huidige situatie.



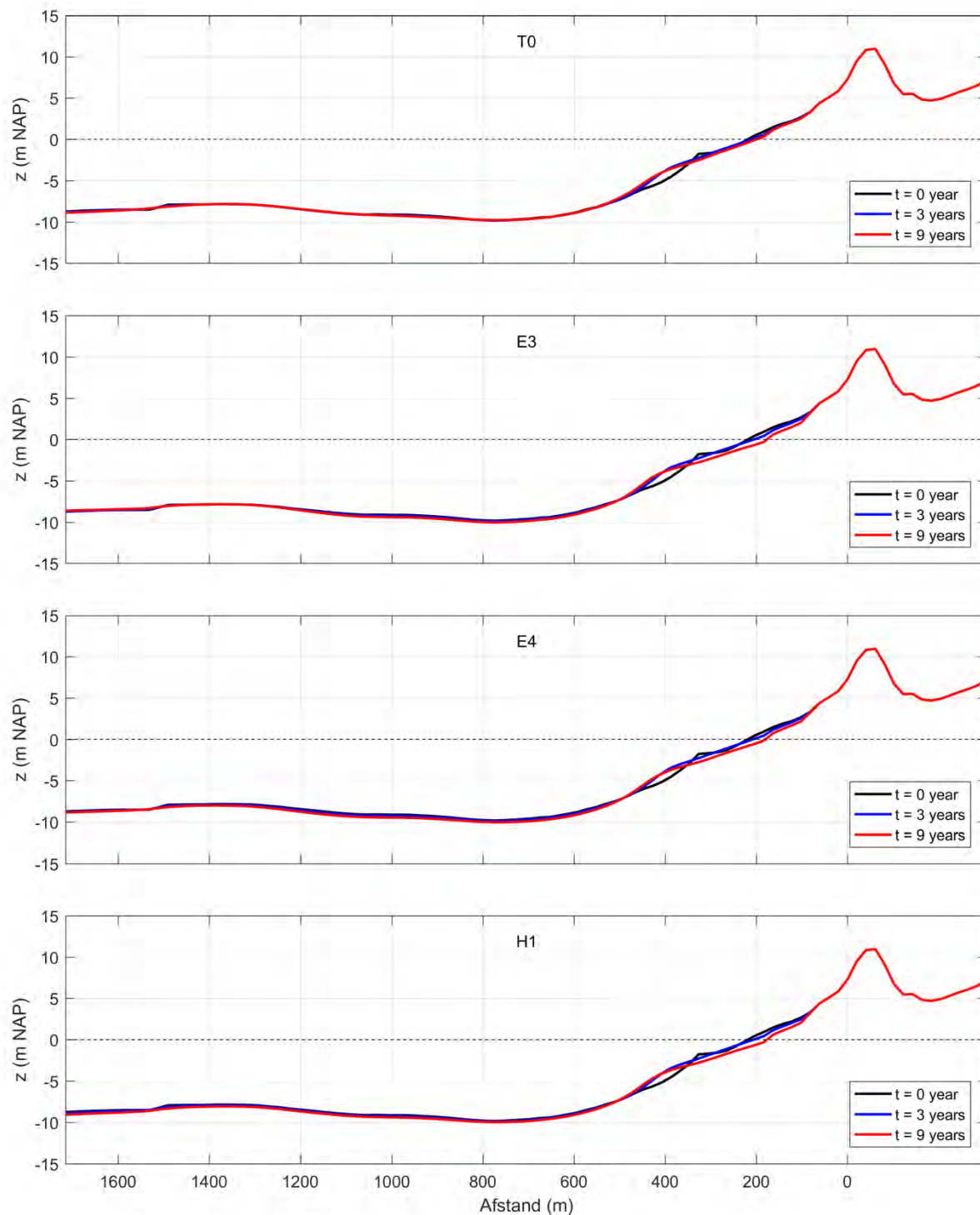
Figuur 122: Evolutie Profiel 7 na drie en negen jaar (XBeach model), scenario's E3, E4 en H1. T0 is de huidige situatie.



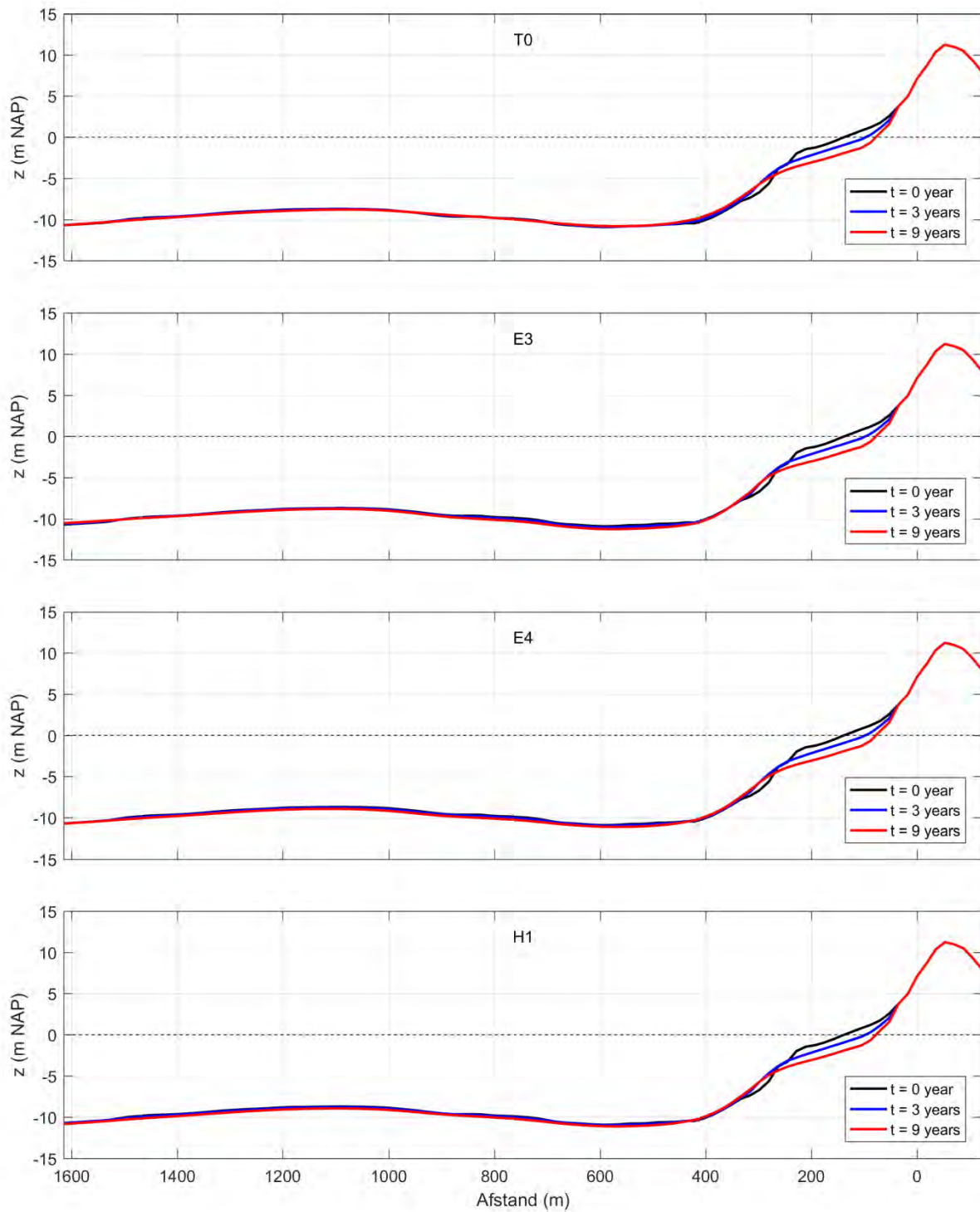
Figuur 123: Evolutie Profiel 8 na drie en negen jaar (XBeach model), scenario's E3, E4 en H1. T0 is de huidige situatie.



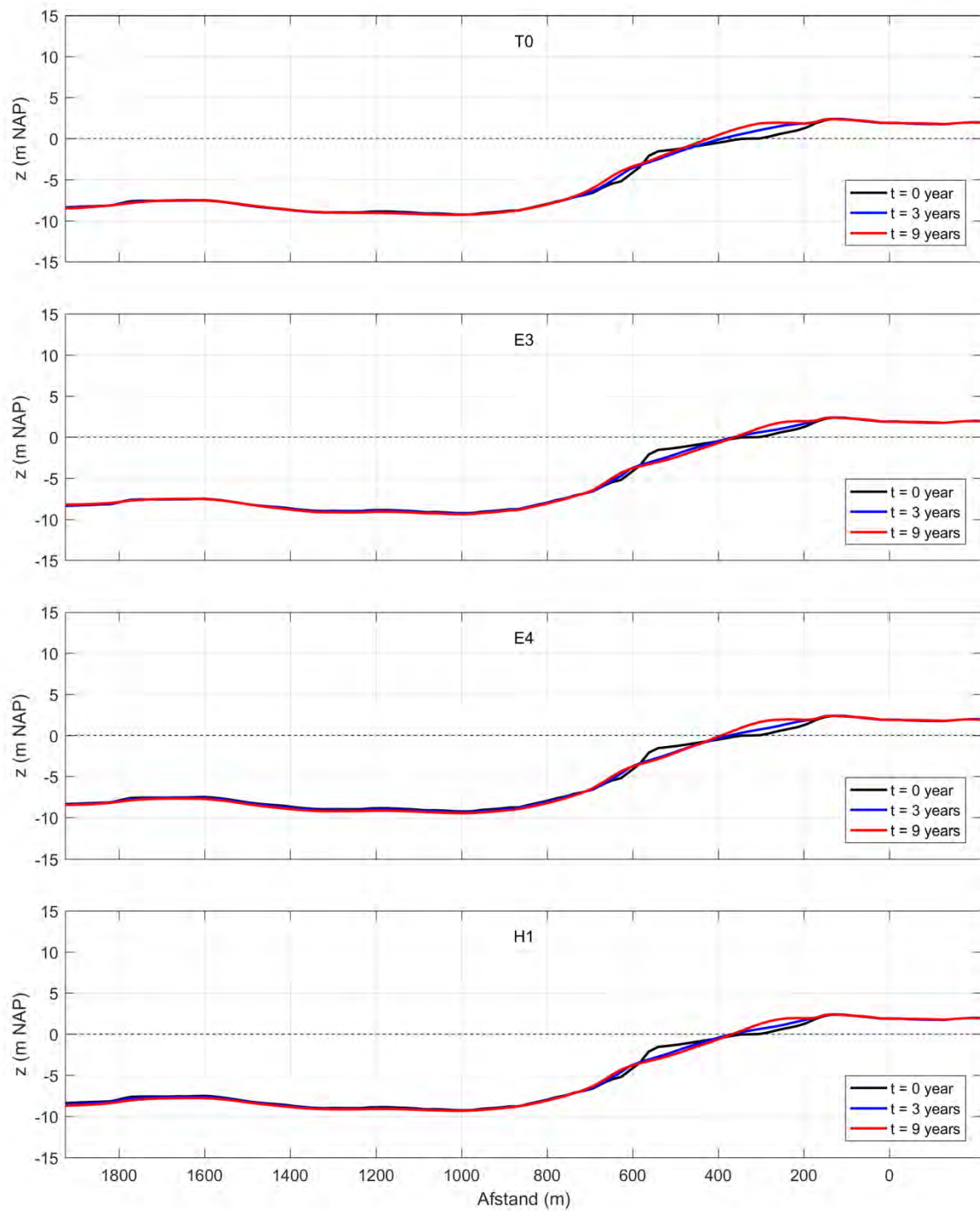
Figuur 124: Evolutie Profiel 9 na drie en negen jaar (XBeach model), scenario's E3, E4 en H1. T0 is de huidige situatie.



Figuur 125: Evolutie Profiel 10 na drie en negen jaar (XBeach model), scenario's E3, E4 en H1. T0 is de huidige situatie.

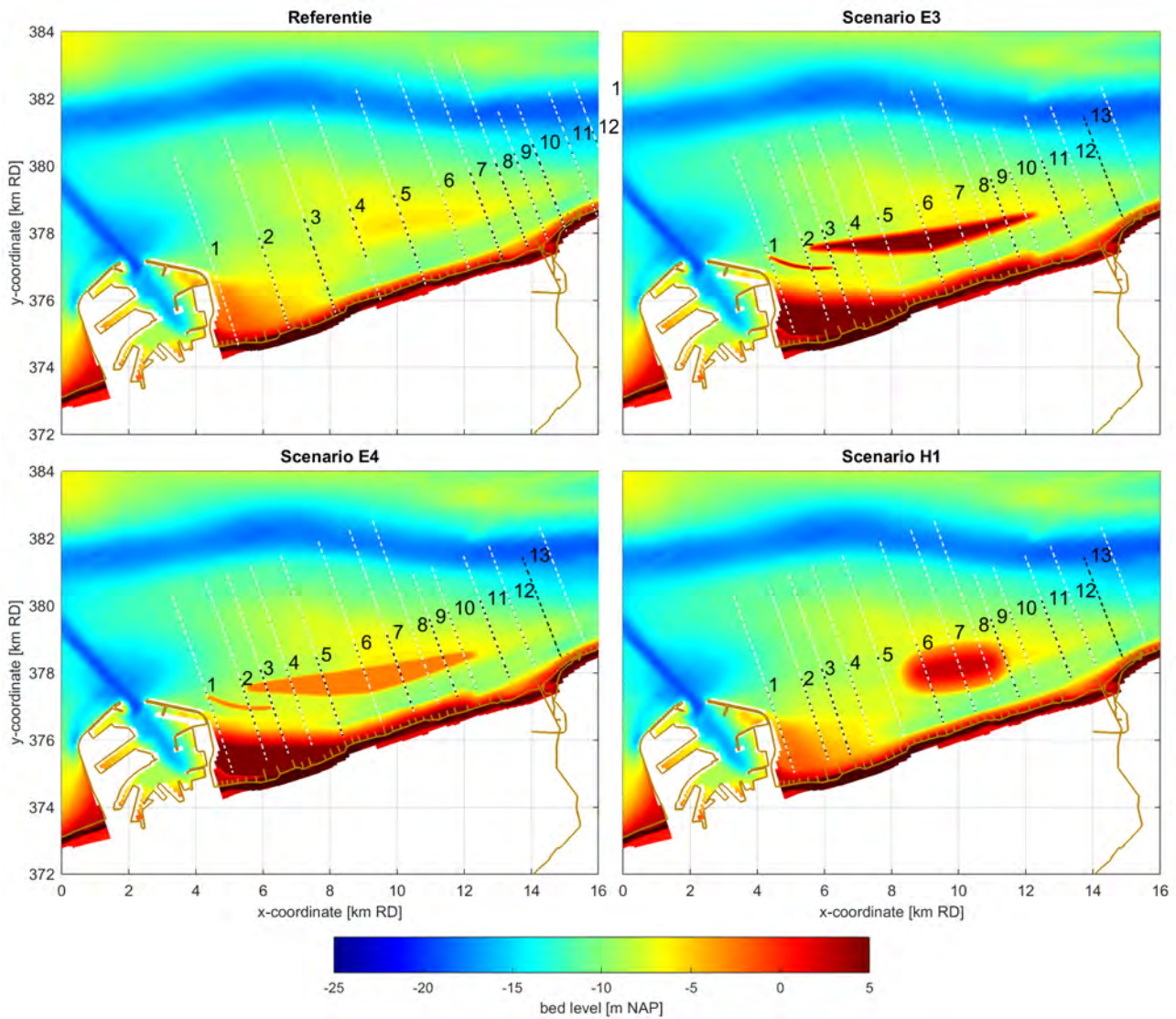


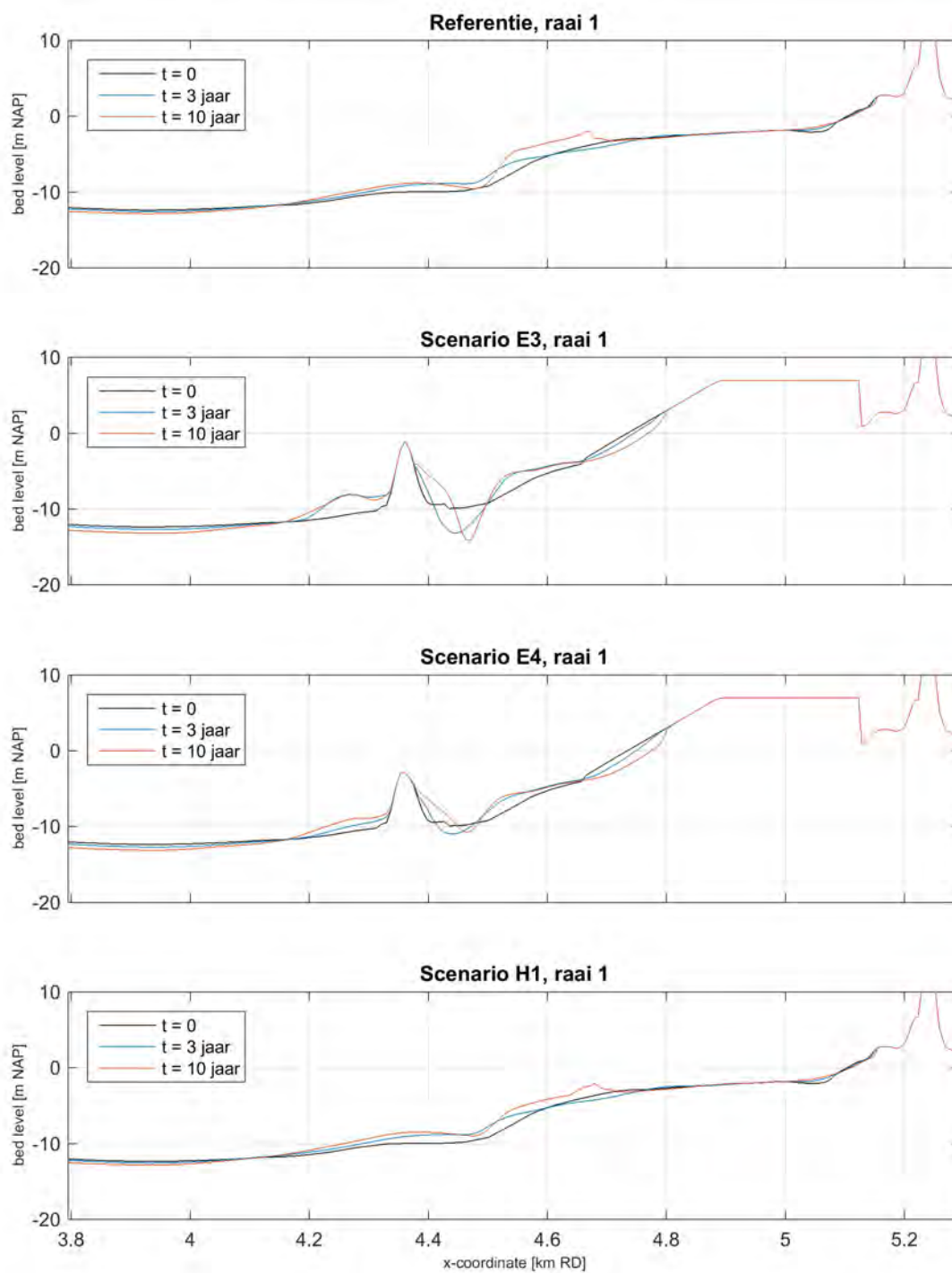
Figuur 126: Evolutie Profiel Zwin na drie en negen jaar (XBeach model), scenario's E3, E4 en H1. T0 is de huidige situatie.

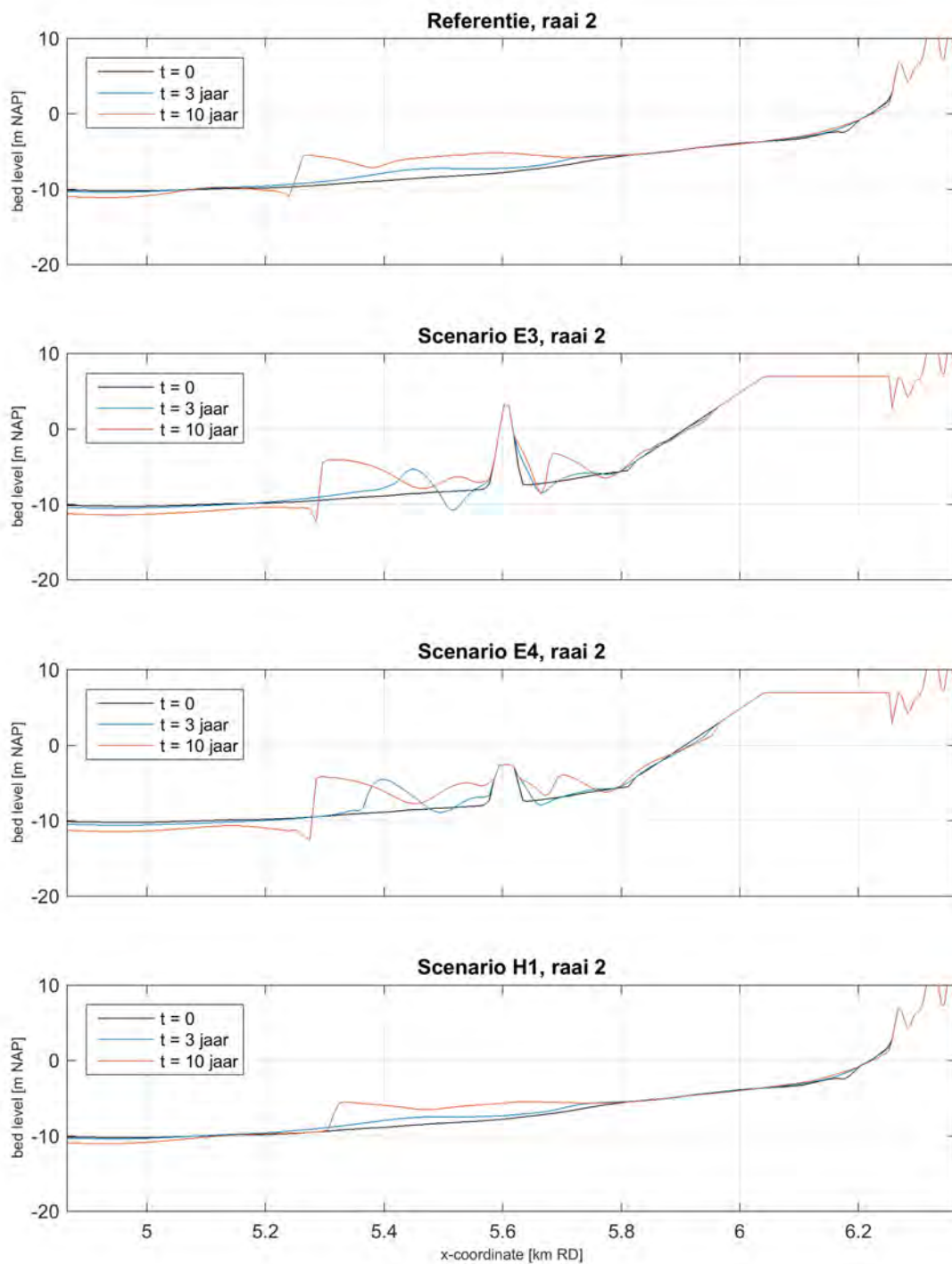


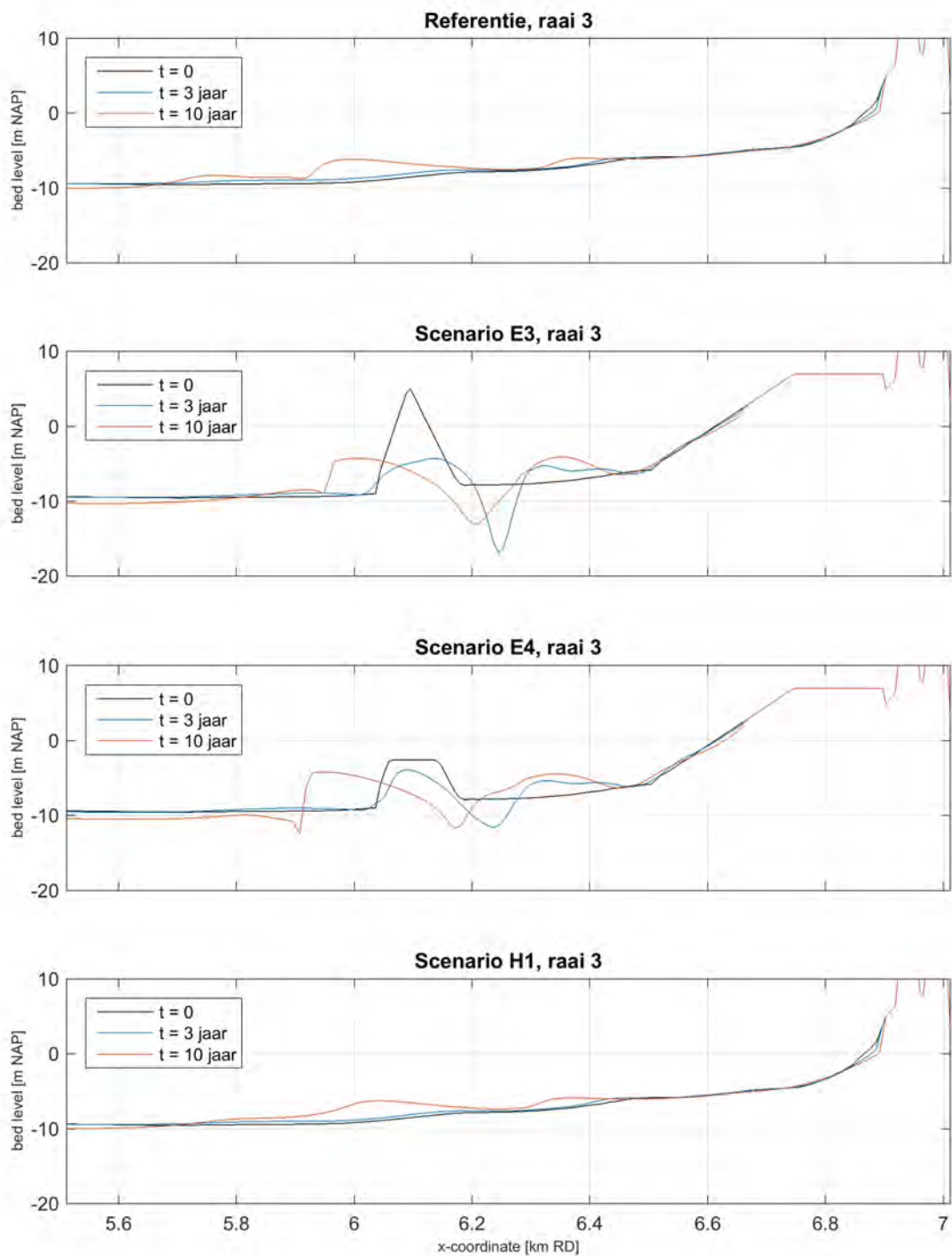
Bijlage E: Dwarsprofielen N2V model

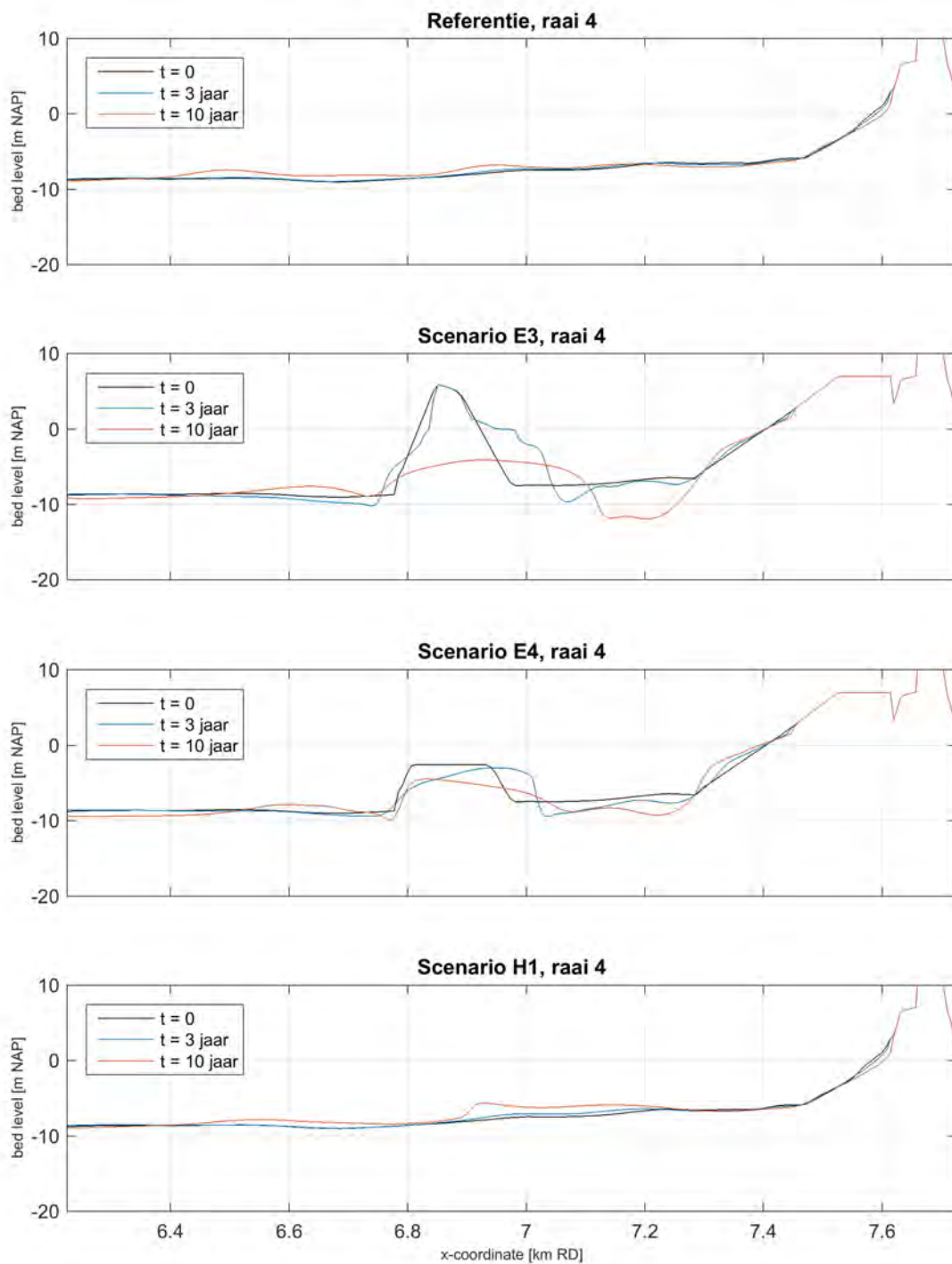
Figuur 127: Ligging dwarsraaien en de initiële bodemligging.

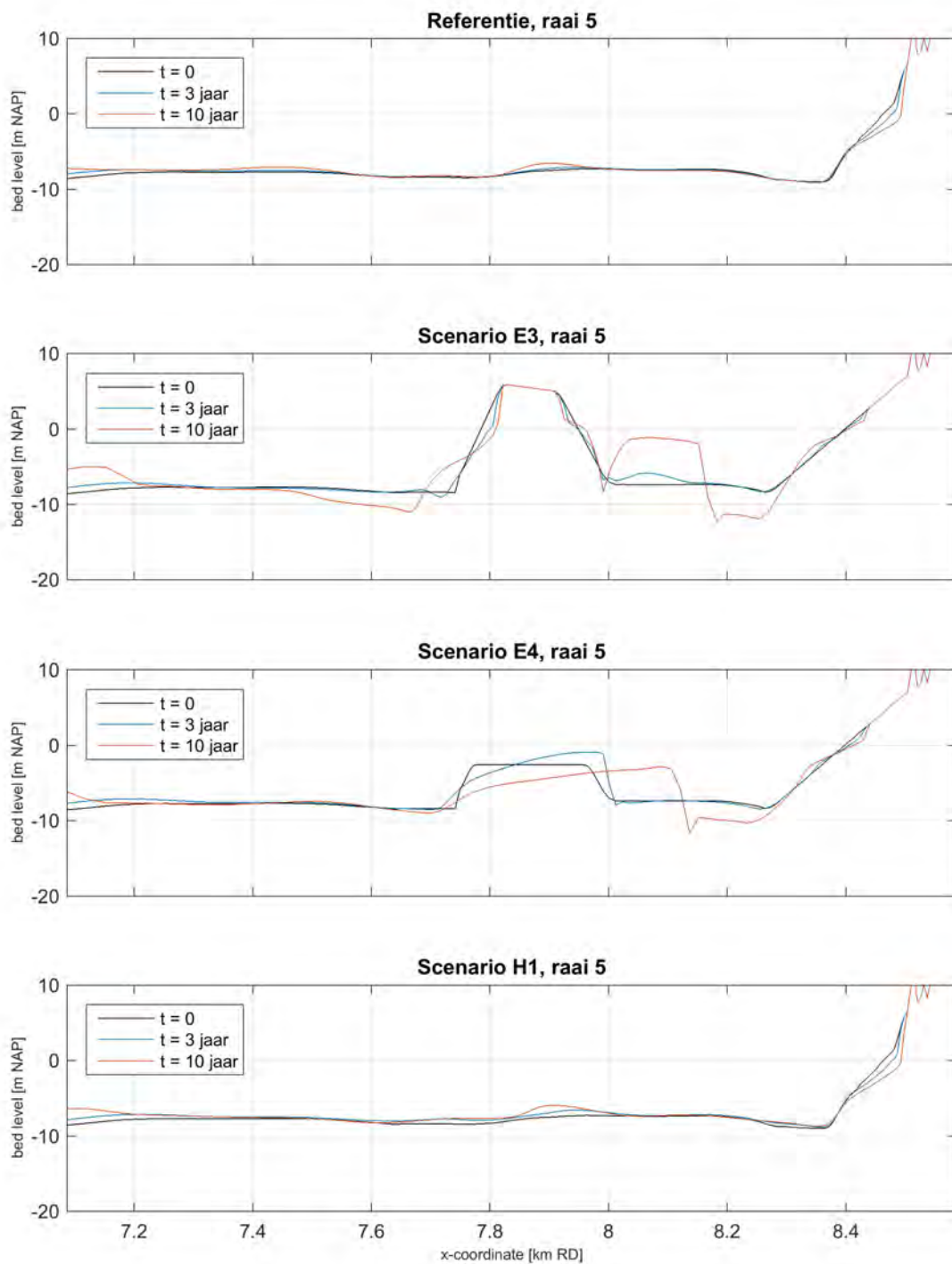


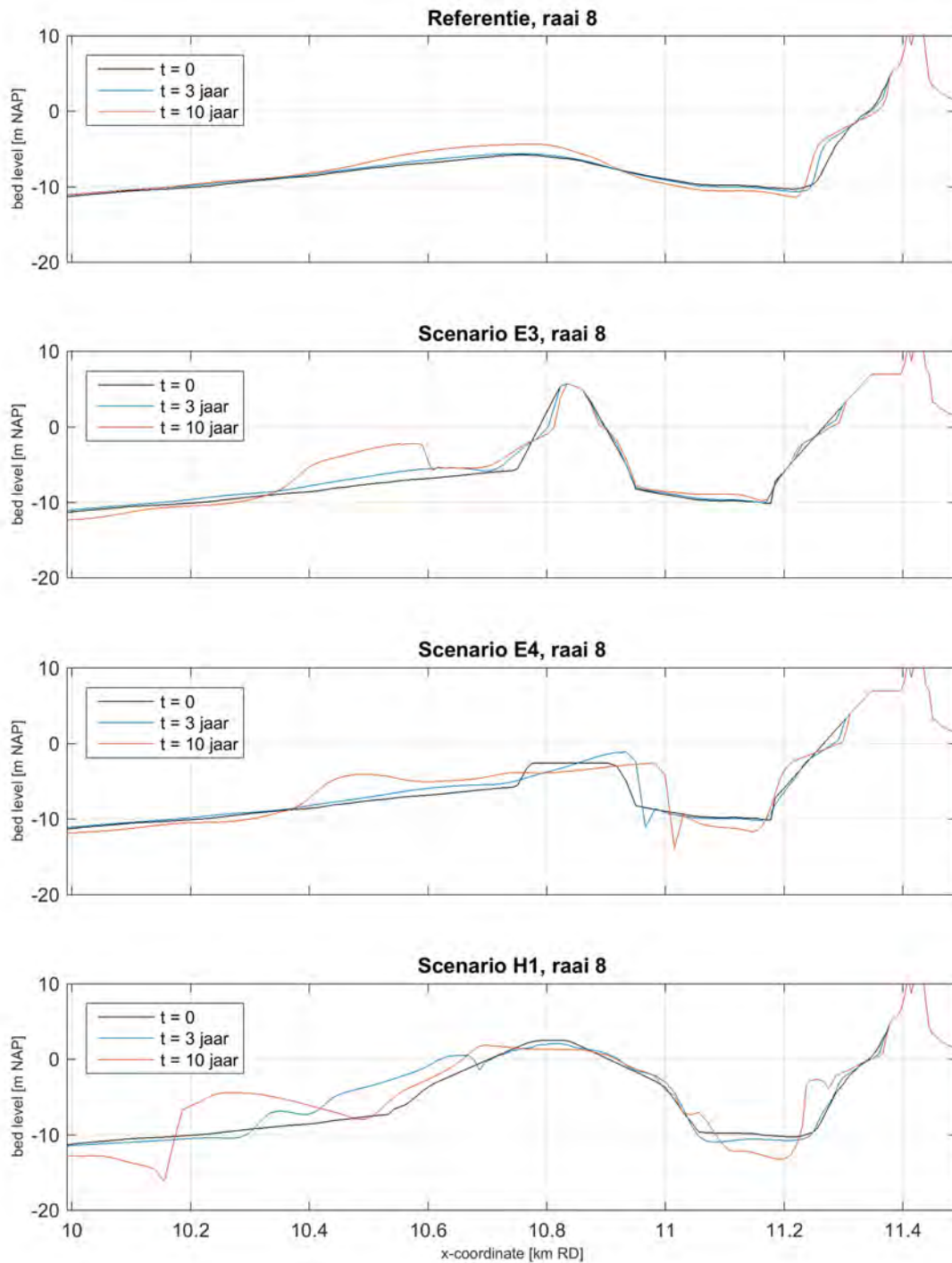


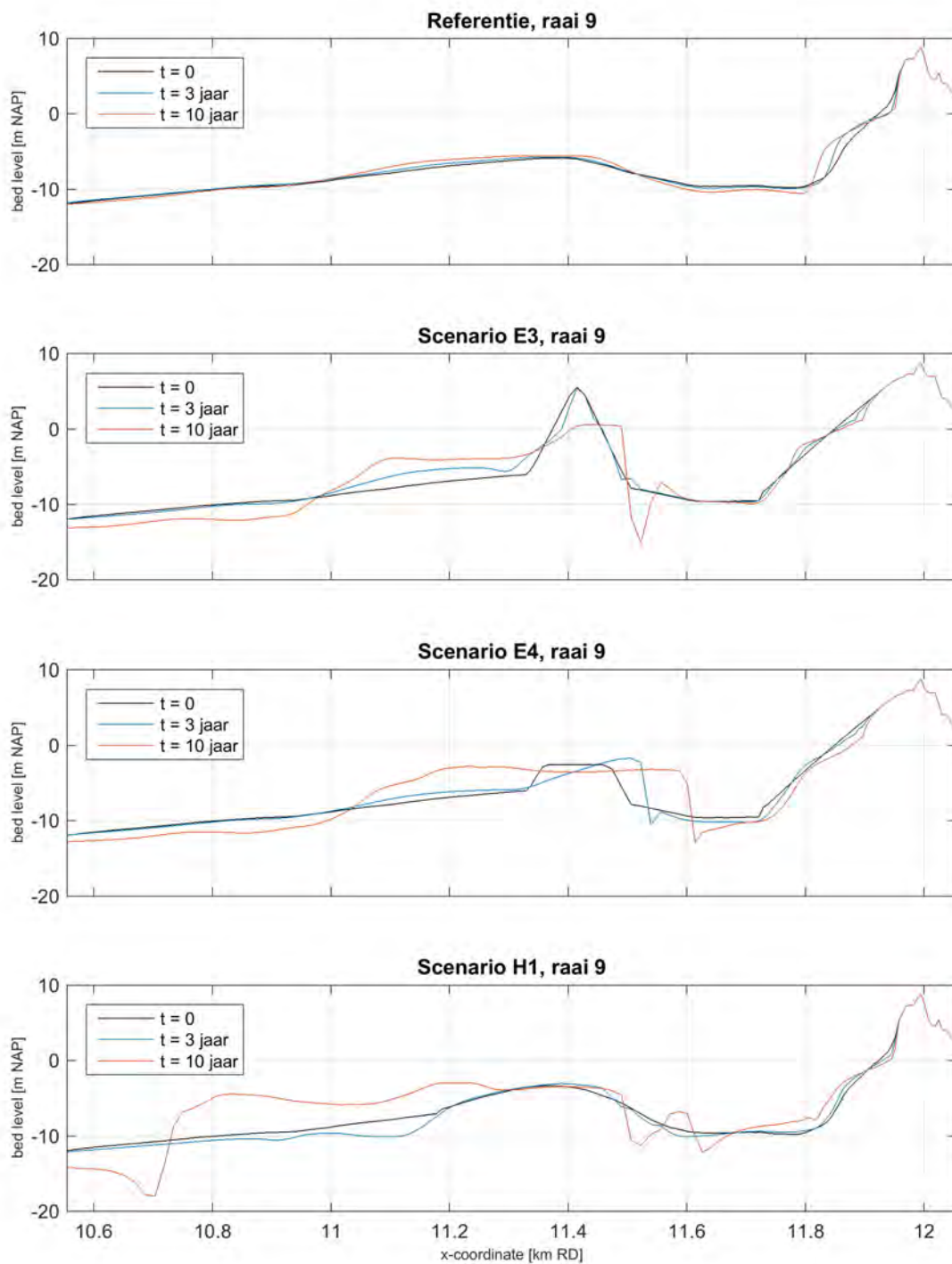


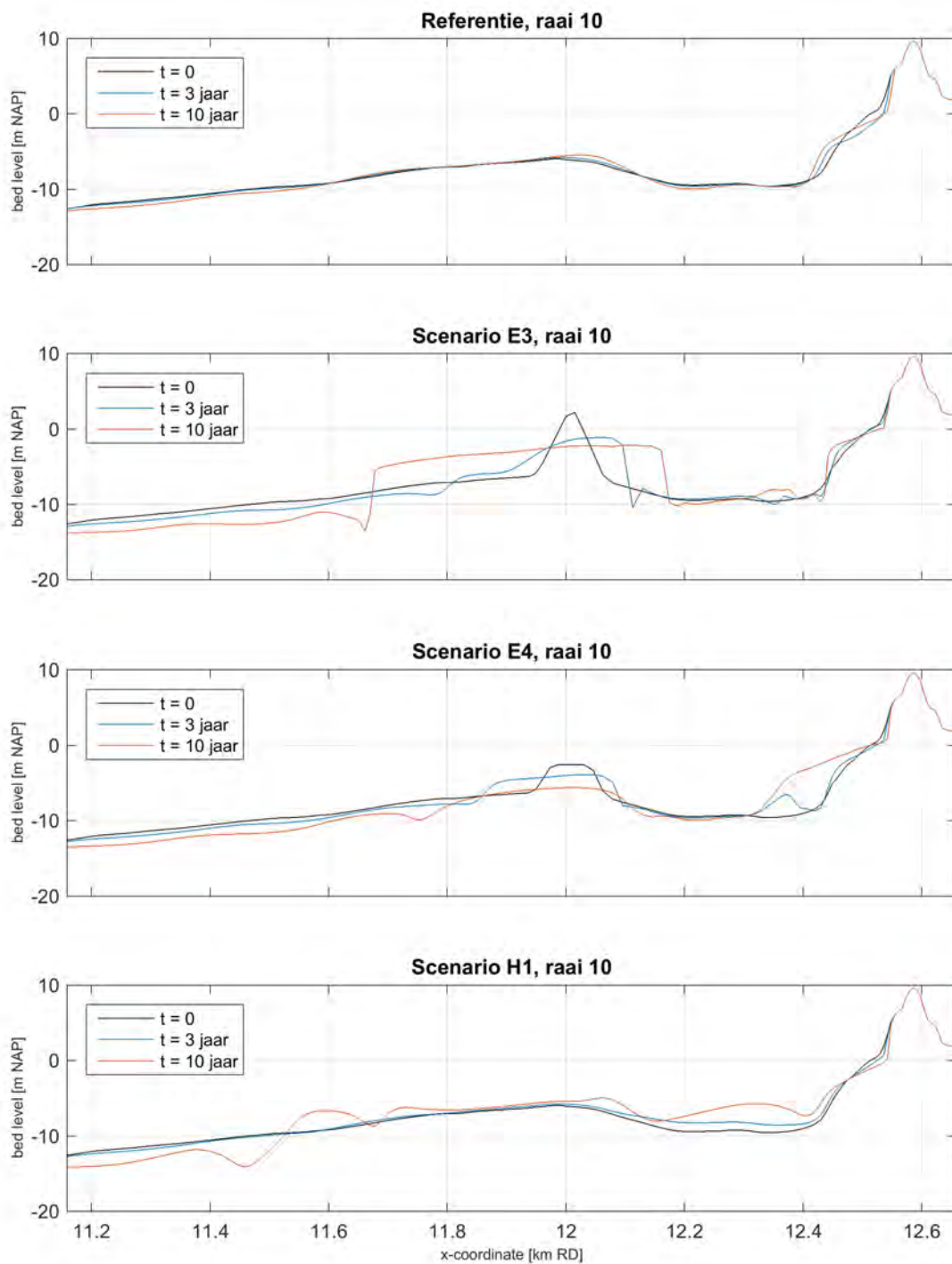


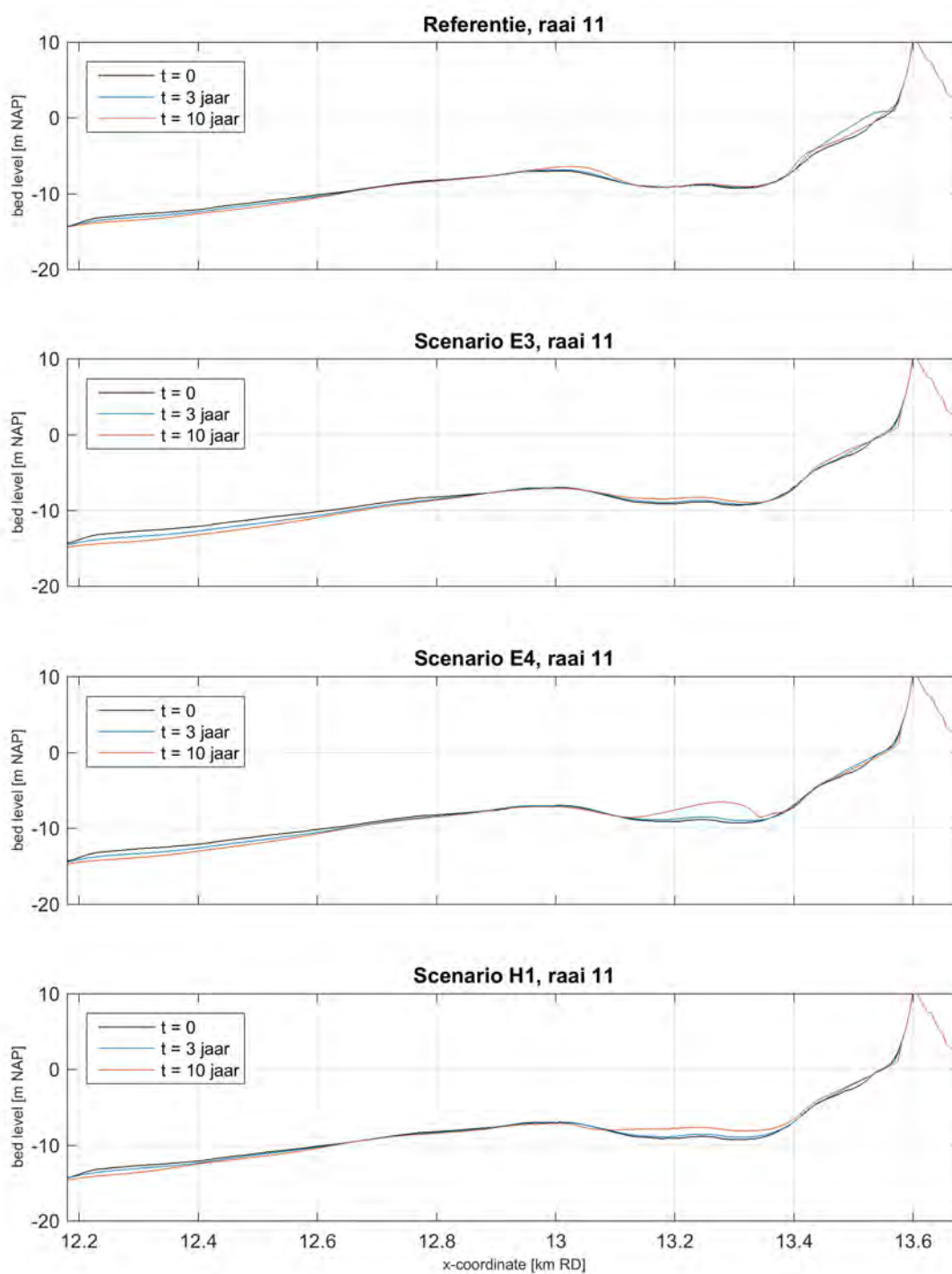


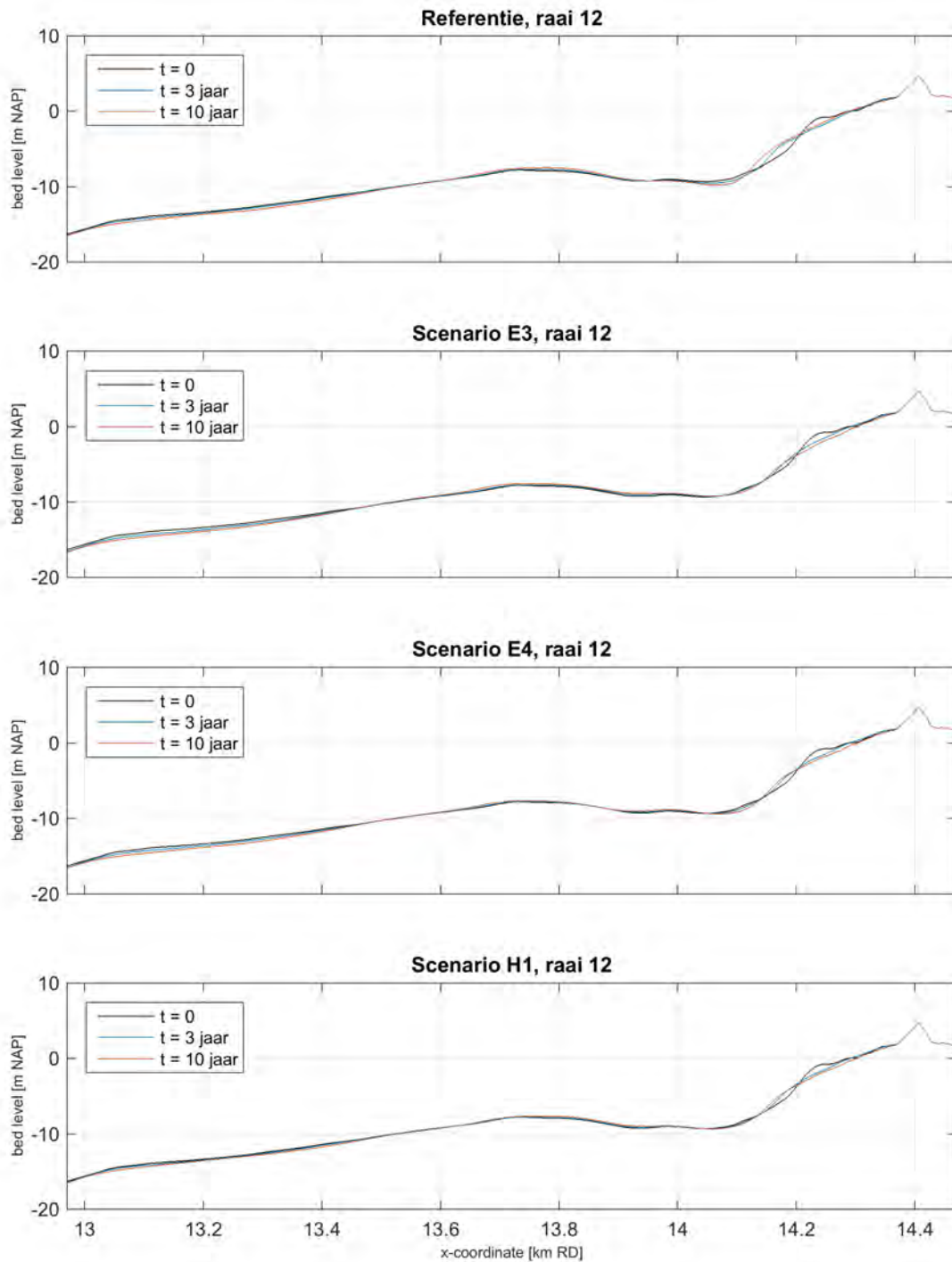


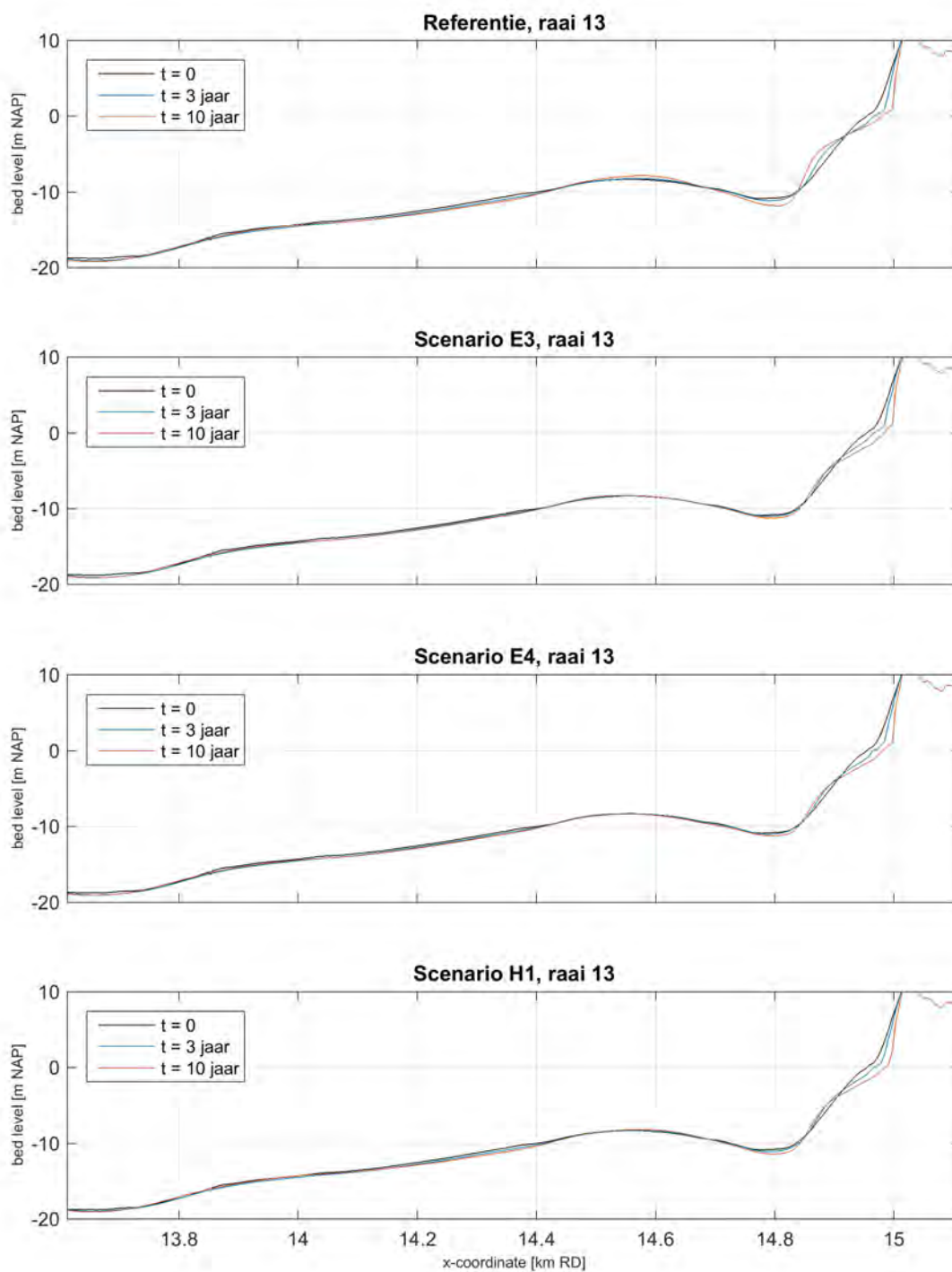












Bijlage F: Sediment transport formulering XBeach en Delft3D

This memo presents the sediment transport formulation utilized in XBeach and Delft3D morphodynamic models focusing on the identification of the differences between them. The motivation was to answer to the corresponding question that was put during the expert meeting for the presentation of the results of the project 15_068 'Vlaamse Baaien Modelling Kustzone' (Verslag 29/06/2016).

XBeach

Advection-diffusion equation

Sediment concentrations in the water column are modeled using a depth-averaged advection-diffusion scheme (Galappatti and Vreugdenhil, 1985) with a source-sink term based on equilibrium sediment concentrations, which is given by the following expression

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial hCu^E}{\partial x} + \frac{\partial hCv^E}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[D_h h \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_h h \frac{\partial C}{\partial y} \right] = \frac{hC_{eq} - hC}{T_s} \quad (1)$$

where C represents the depth-averaged sediment concentration, u^E , v^E are the Eulerian velocities, D_h is sediment diffusion coefficient (controlled by parameter *facDc* with default value equal to 1) and T_s is the adaptation time which represents the entrainment of sediment and it is a function of the settling velocity w_s (a small value of T_s corresponds to nearly instantaneous sediment response). The settling velocity calculation is based on the relationship suggested by Hallermaier (1981). For the calculation of the total equilibrium sediment concentration, C_{eq} , the default *Van Thiel–Van Rijn* formulation (van Rijn, 2007; van Thiel de Vries, 2009) was considered in the simulations performed within project 15_068. C_{eq} consists of two components, $C_{eq,b}$ and $C_{eq,s}$, which stand for the bed load and the suspended load transport, respectively

$$C_{eq,b} = \frac{A_{sb}}{h} \left(\sqrt{v_{mg}^2 + 0.64u_{rms,2}^2} - U_{cr} \right)^{1.5} \quad (2)$$

$$C_{eq,s} = \frac{A_{ss}}{h} \left(\sqrt{v_{mg}^2 + 0.64u_{rms,2}^2} - U_{cr} \right)^{2.4} \quad (3)$$

where h is the total water depth, A_{sb} and A_{ss} are bed load and suspended load coefficients (functions of the sediment grain size), v_{mg} is the magnitude of the Eulerian velocity, u_{rms} is the adjusted near bed short-wave orbital velocity and U_{cr} is the critical velocity for the initiation of sediment motion. Apparently, C_{eq} depends on the grain characteristics and the flow conditions and has to be always less than one half of the maximum allowed sediment concentration C_{max} , i.e. $\frac{1}{2} C_{max}$ (default value of C_{max} is 0.1). The concept of the advection-diffusion equation is that sediment will be picked up from the bottom when the local concentration is lower than the equilibrium concentration, and sediment will be deposited when the local concentration is higher than the equilibrium concentration (van Rooijen, 2011).

Effects of wave nonlinearity & bed slope

Effects of wave nonlinearity are taken in to account in Eq. (1) replacing u^E and v^E with $u^E - u_a \sin \vartheta_m$ and $v^E - u_a \cos \vartheta_m$, respectively, where $u_a = (f_{Sk} S_k - f_{As} A_s) u_{rms}$. S_k and A_s are the wave skewness and wave asymmetry parameters, respectively, and f_{Sk} and f_A are two calibration factors.

Bed slope effect affects the sediment transport, so sediment transport rates in x and y directions properly modified to account for this, are given by the following expressions

$$q_{x,slope} = q_x - ahC \sqrt{(u^L)^2 + (v^L)^2} \frac{\partial z_b}{\partial x} \quad \text{and} \quad q_{y,slope} = q_y - ahC \sqrt{(u^L)^2 + (v^L)^2} \frac{\partial z_b}{\partial y} \quad (4)$$

where u_L and v_L are the GLM (Langrangian) velocities, z_b is the bed level and q_x and q_y are the sediment transport rates in x and y direction,

$$q_x = \frac{\partial h C u^E}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[D_h h \frac{\partial C}{\partial x} \right] \quad \text{and} \quad q_y = \frac{\partial h C v^E}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_h h \frac{\partial C}{\partial y} \right] \quad (5)$$

respectively.

Once the sediment transport is calculated the bed is updated according to the Exner equation:

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = - \frac{1}{1-\varepsilon} \nabla \cdot \vec{q} \quad (6)$$

with ε the porosity of the sand, default value 40%.

Avalanching

In XBeach model avalanching is introduced via the use of a critical bed slope for both the dry and wet area (keyword: *wetslp* and *dryslp*). It is considered that inundated areas are much more prone to slumping and therefore two separate critical slopes for dry and wet points are used. When this critical slope is exceeded, material is exchanged between the adjacent cells to the amount needed to bring the slope back to the critical slope (Deltares, 2015).

Boundary conditions

The boundary conditions for sediment transport are Neumann boundaries everywhere, implying that the cross-boundary gradients in the advection-diffusion equation are set to zero, as well as the gradients of the bed load transports in that direction. Cross-shore profile changes due to cross-shore transport gradients are possible, allowing the boundary to smoothly follow the rest of the model. Still, it is good modeling practice to have the boundaries away from the area of interest (Deltares, 2015).

The reader can refer to the Xbeach manual (Deltares, 2015) for detailed information about the sediment transport formulation.

Delft3D

Introduction

The sediment transport and morphology module of Delft3D supports both bed-load and suspended load transport of non-cohesive sediments (sand) and suspended load of cohesive sediments (mud). For schematization, sediments are classified in three fractions: “mud”, “sand” and “bed-load”. The only difference between “bed-load” and “sand” fractions lies in the fact that the suspended load advection-diffusion equation is not solved for the “bed-load” fraction. If the suspended load is known to be negligible, the “bed-load” approach is more efficient (Deltares, 2011). In this memo the case of transport of cohesive sediments (mud) is not considered.

Suspended sediment transport

The depth-averaged transport of suspended sediment is calculated by solving the advection-diffusion equation expressed similarly to eq. (1) (Lesser, 2009):

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial UC}{\partial x} + \frac{\partial VC}{\partial y} = h \left(\frac{\partial}{\partial x} \left[D_h \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_h \frac{\partial C}{\partial y} \right] \right) + h \left(\frac{C_{eq} - C}{T_s} \right) \quad (7)$$

where U and V are the GLM (Langrangian) velocities. The horizontal diffusivity, D_h is a superposition of the molecular viscosity (constant value), the “3D turbulence” and the “2D turbulence”. The latter is a measure of the sub-grid (unresolved) horizontal mixing turbulence and its values may either be specified by the user as a constant or space-varying parameter, or can be computed using a sub-grid model for horizontal large eddy simulation (HLES). Note that the default value of $10 \text{ m}^2/\text{s}$ for background diffusion D_h is too large for small scale applications. According to table 9.3 (Deltares, 2011; p.205), “3D turbulence” part is considered in a 2DH simulation only when HLES model is on. The depth-averaged equilibrium concentration (C_{eq}) is derived from

$$C_{eq} = \frac{S_{sus,eq}}{|U|h} \quad (8)$$

where $S_{sus,eq}$ is the depth-integrated suspended sediment transport under equilibrium conditions, and may be calculated by several provided formulas (the default one is the formulation of van Rijn (1993)). When van Rijn formulation for the near-bed reference concentration is utilized, the procedure includes a vertical (one-dimensional) integration using 20 virtual layers (considering logarithmic variation of velocity) as described in Lesser (2009; p. 20). The settling velocity used in the aforementioned procedure and for the calculation of the adaptation time T_s , is calculated following the method of van Rijn (1993) based on the nominal sediment diameter and the relative density of the sediment particles.

Initial and Boundary conditions

In the case of a cold start where the hydrodynamic model also takes some time to stabilize, a uniform zero concentration for the non-cohesive sediment fractions is usually adequate.

At the open inflow boundaries, the flow should enter carrying all “sand” sediment fractions at their “equilibrium” concentration. This feature has been implemented as a Neumann boundary condition, that is, zero concentration gradient at the boundary (Deltares, 2011). At the open outflow boundaries, no boundary condition is prescribed.

Bed load sediment transport

For simulations including waves, the magnitude and direction of the bed-load transport on a horizontal bed are calculated using an approximation method developed by van Rijn (2001), which is the default option. Other transport formulas included in Delft3D, are shown in table 11.1 of the software manual (Deltares, 2011). The method of van Rijn includes an estimate of the effects of wave orbital velocity asymmetry on bed-load sediment transport. The method computes the magnitude of the bed-load transport as

$$|S_b| = \eta 0.006 \rho_s w_s M^{0.5} M_e^{0.7} \quad (9)$$

where $|S_b|$ is the magnitude of bed load transport, η is the relative availability of the sediment fraction in the mixing layer, ρ_s is the sediment density, M is the sediment mobility number due to waves and currents, and M_e is the excess sediment mobility number:

$$M = \frac{u_{eff}^2}{(s-1)gd_{50}} \quad \text{and} \quad M_e = \frac{(u_{eff}-u_{cr})^2}{(s-1)gd_{50}} \quad (10)$$

where $u_{eff} = (u_R^2 + U_{on}^2)^{1/2}$, s is the relative sediment density, u_{cr} is the critical depth-averaged velocity for initiation of motion, u_R is the magnitude of an equivalent depth-averaged velocity computed from the (Eulerian) velocity in the bottom computational layer, assuming a logarithmic velocity profile, and U_{on} is the near-bed peak orbital velocity in onshore direction based on the significant wave height.

The direction of the bed-load transport vector is determined by assuming that it is composed of two parts: 1) a part due to the current ($S_{b,c}$) which acts in the direction of the (Eulerian) near-bed current, and 2) a part due to the waves ($S_{b,w}$) which acts in the direction of wave propagation. Also included in the “bed-load” transport vector is an estimation of the suspended sediment transport due to wave asymmetry effects, $S_{s,w}$ (Lesser, 2009).

Bed slope effects

A longitudinal slope in the direction of the bed-load transport modifies the magnitude of the bed-load vector which has to be multiplied by the following factor:

$$a_s = 1 + f_{ALF} \left[\frac{\tan \varphi}{\cos(\tan^{-1}(\partial z / \partial s))(\tan \varphi - \partial z / \partial s)} - 1 \right] \quad (11)$$

in which f_{ALF} is a user-specified tuning parameter, $\partial z / \partial s$ is the bed slope in the direction of the bed-load transport, φ is the internal angle of friction of bed material (assumed to be 30°).

A transverse bed slope also modifies the direction of the bed-load transport vector (see p. 24 in Lesser, 2009).

Discussion

The main aspects of the sediment transport formulation utilized by XBeach and Delft3D (2DH) models were presented in the previous sections. Suspended sediment transport is calculated by use of the Gallapatti's depth-averaged advection-diffusion equation for both models. The main differences between the two models (with regard to the advection-diffusion equation) are found in the determination of

- the equilibrium sediment concentration, C_{eq} . In XBeach, C_{eq} stands for the total equilibrium concentration, i.e. it consists of the bed load and the suspended load, while in Delft3D, C_{eq} corresponds to the suspended load. This means that XBeach calculates bed load transport indirectly through advection-diffusion equation therefore no other formulation is used for this reason. Moreover, different approaches are used for the calculation of C_{eq} (see eqs. 3 and 8).
- the horizontal diffusion coefficient, D_h . In XBeach this coefficient is controlled by a parameter ($facDc$) which ranges between 0 and 1. In Delft3D, D_h can either take a constant value (default = $10 \text{ m}^2/\text{s}$ – very high) or be computed using a sub-grid model.
- the settling velocity, w_s . In XBeach, w_s calculation is based on the relationship suggested by Hallermaier (1981) In Delft3D, w_s is calculated following the method of van Rijn (1993) based on the nominal sediment diameter and the relative density of the sediment particles.

Other main differences:

- Xbeach takes into account wave non-linearity and bed slope effects, while Delft3D (2DH) accounts only for bed slope effects. Different approaches are used for the bed slope effect estimation between the two models.
- avalanching mechanism is introduced only in the XBeach model.
- Bed load transport is calculated separately only in Delft3D model.

A relevant comparison between the sediment transport modules of XBeach and Delft3d (2DH) models, which focuses on the related physical processes during cross-shore transport, is presented in Trouw et al. (2012). The differences in the modelling of several processes between Xbeach and Delft3D are shown in table 1 of Trouw et al. (2012). The major additional information from this work is:

- XBeach simulates better cross-shore transport processes than Delft3D (2DH), as it takes into account erosion due to long waves and offshore transport induced by the return flow.
- the default values of wave-related bed load and suspended load factors are too high and lead to unrealistic steepening of the coastal profile. Values from 0 to 0.1 instead of 1 are suggested.

DEPARTEMENT **MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN**
Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115, 2140 Antwerpen

T +32 (0)3 224 60 35

F +32 (0)3 224 60 36

waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be

www.waterbouwkundiglaboratorium.be