

Verwachte bodemontwikkelingen Hedwigepolder en omgeving ten gevolge van ontpolderen

Concept

1722/U13237/D/SPo

12 september 2013

SAMENVATTING

Het kabinet heeft op 22 december 2012 besloten tot ontpoldering van de Hedwigepolder. In het kader van de zienswijzen die in de komende procedure kunnen worden ingediend, is in dit rapport een modelstudie uitgevoerd naar de morfologische ontwikkeling van de Hedwigepolder. De modelberekeningen zijn uitgevoerd met het numerieke stromingsmodel FINEL2D, waarbij zowel de zand- als slibfractie is meegenomen. Het model is recentelijk gecalibreerd en gevalideerd op meerjarige morfologische ontwikkelingen van de Westerschelde.

De resultaten van de modelberekening tonen dat de Hedwige- en de Prosperpolder onderhevig zijn aan sedimentatie. De slibfractie levert verreweg de grootste bijdrage. De snelheid waarmee de polders sedimenteren is volgens het model dusdanig dat na 20 jaar ongeveer de helft van de polders een hoogte gelijk aan of hoger dan de gemiddelde hoogwaterstand bereikt heeft.

Aan het begin van de berekening bestaan de polders vrijwel volledig uit intergetijdengebied. Dit houdt in dat de hoogte van het gebied tussen gemiddeld hoog- en laagwater in zit. Aan het eind van de berekening bestaat ongeveer 50% van de polders uit intergetijdengebied. De rest van het gebied is doorgroeid naar een hoogte boven gemiddeld hoogwater. De ontwikkeling gaat in de eerste jaren na de herinrichting aanzienlijk sneller, maar is ook aan het einde van de berekening nog steeds gaande, zodat de afname van het intergetijdengebied ook na 20 jaar door zal zetten. Geconcludeerd kan worden dat de zowel de Hedwige- als de Prosperpolder eenzijdig verlanden. In de Prosperpolder wordt de snelheid van verlanding enigszins hoger als gevolg van de ontpoldering van de Hedwigepolder.

Of de polders wel of niet zullen verlanden is geen vraag. De modeluitkomsten laten wel een variatie zien in de snelheid waarmee dit gebeurt. De sedimentatiesnelheid is onder andere afhankelijk van de achtergrondconcentratie van slib in het water. In het MER wordt gesproken over aanslibbingsnelheden van gemiddeld 1 cm per jaar. Op basis van expert judgement wordt gesteld dat men wel hogere waarden kan verwachten, toch zeker als vegetatie tot ontwikkeling komt, maar de gevolgen daarvan worden in het MER niet verder uitgewerkt. In de voorliggende studie is de berekende sedimentatiesnelheid (gemiddeld over 20 jaar) in de orde van 5 à 10 cm per jaar, waarbij nog geen rekening gehouden is met verhoogde invang van sediment als gevolg van vegetatie.

Gezien de doorgaande verlanding is het beeld dat na 20 jaar berekend is geen eindbeeld. Ook het beeld dat in het MER geschetst wordt heeft geen betrekking op het eindbeeld, maar betreft slechts een ontwikkelingsfase. In het eindbeeld zijn beide polders naar verwachting volledig opgeslibd tot boven hoogwater, en ligt de schorrand weer ongeveer op de plaats waar deze nu ook ligt.

In het Natura 2000 gebied Sieperdaschor treden als gevolg van de ontpoldering van de Hedwigepolder weinig veranderingen in de morfologische ontwikkelingen op volgens het model. De veranderingen bestaan voornamelijk uit sedimentatie van de volgens het Inrichtingsplan aangebrachte geul en een verdere opslibbing van de hogere delen van het Sieperdaschor. De verschillende modelberekeningen geven aan dat in het Natura 2000 gebied "Schor van Ouden Doel" afgezien van de daarin gegraven geulen en hun directe omgeving geen significante morfologische effecten te verwachten zijn als gevolg van het ontpolderen van de Hedwigepolder.

De voorliggende studie beperkt zich tot de bepaling van de te verwachten ontwikkelingen in getij en bodemligging na ontpoldering van de Hertogin Hedwigepolder. De verlanding zal naar verwachting significant sneller verlopen dan in het MER is aangegeven en stopt pas als beide polders over het totale oppervlak een hoogteligging boven hoogwater hebben bereikt. De gevolgen hiervan voor aspecten als natuur en ecologie vormen geen onderdeel van de voorliggende studie.

Ten aanzien van de waterstanden wordt verwacht dat de ontpoldering in de nabijheid van de polders een initiële verlaging van de getijslag (verschil tussen hoog- en laagwater) van enkele centimeters tot gevolg heeft. Deze initiële verlaging wordt teniet gedaan door de doorgaande sedimentatie in de polders. Hierbij geldt dat hoe meer sedimentatie, hoe kleiner het verlagende effect op de getijslag.

INHOUDSOPGAVE

		Pag.
1	INTRODUCTIE	6
1.1	Achtergrond	6
1.2	Methodologie	6
1.3	Getij en bodemligging	7
1.4	Leeswijzer	8
2	FINEL2D WESTERSCHELDE MODEL	10
2.1	Algemene beschrijving FINEL2D	10
2.2	Rekenrooster	10
2.3	Bodemligging	11
2.4	Strek- en Leidammen	13
2.5	Randvoorwaarden	15
2.6	Zand-slibsinstellingen	15
2.6.1	Achtergrondconcentratie slib	17
2.6.2	Dichtheid slib	20
2.6.3	Korrelgrootte en valsnelheid zandfractie	20
2.7	Niet-erodeerbare lagen en initieel slibpercentage in de bodem	20
2.8	Baggeren, storten en zandwinning	20
2.9	Morfologisch modelleren	21
2.10	Scenariodefinitie	21
3	MORFOLOGISCHE SCENARIO BEREKENINGEN	22
3.1	Bodemligging	22
3.1.1	Scenario's T0a en T0b	22
3.1.2	Scenario's T1a en T1b	27
3.1.3	Verschillen tussen de scenario's	33
3.1.4	Conclusies	36
3.2	Sediment transporten	37
3.2.1	Scenario's T0a en T0b	37
3.2.2	Scenario's T1a en T1b	43
3.2.3	Verschillen tussen de scenario's	48
3.2.4	Conclusies	49
3.3	Hypsometrische curves	49
3.3.1	Scenario's T0a en T0b	50
3.3.2	Scenario's T1a en T1b	52
3.3.3	Verschillen tussen de scenario's	55
3.3.4	Conclusies	56
3.4	Waterstanden	56

4	ONZEKERHEDEN	58
5	CONCLUSIES	62
	LITERATUUR	64
BIJLAGE A	ONDERLIGGENDE VERGELIJKINGEN FINEL2D	

1 INTRODUCTIE

1.1 Achtergrond

Het kabinet heeft op 22 december 2012 besloten tot ontpoldering van de Hertogin Hedwigepolder. Het inrichtingsplan voor de polder is op 25 juni 2013 door de Provincie Zeeland gepresenteerd. Het inrichtingsplan is weergegeven in Figuur 1.1.

Vanaf 20 augustus 2013 zijn de stukken gedurende 6 weken in te zien, en tot 30 september 2013 kan een zienswijze worden ingediend. In het kader van de komende procedure en het indienen van een zienswijze heeft Mieras Juridisch Advies aan Svašek Hydraulics gevraagd een studie uit te voeren naar de morfologische veranderingen van de Hedwigepolder en de Belgische Prosperpolder. Het doel van de studie is een antwoord te geven op de volgende vragen¹:

- Welke morfologische ontwikkelingen treden er op ten gevolge van de ontpoldering van de Hedwigepolder en met welke snelheid vinden deze ontwikkelingen plaats?
- Welk effect heeft de ontpoldering van de Hedwigepolder op het intergetijdereaal?
- Wat zijn de effecten van de ontpoldering van de Hedwigepolder op het naastgelegen Natura 2000 gebied en dan met name het Sieperdaschor en het Schor van Ouden Doel?

1.2 Methodologie

Voor deze studie is uitgegaan van het reeds bestaande morfodynamisch model FINEL2D van de Westerschelde. Dit model is in het recente verleden veelvuldig succesvol ingezet, zie bijvoorbeeld Consortium Deltares, IMDC, Svasek, Arcadis (2013b), Svašek Hydraulics (2006), Svašek Hydraulics (2008), en Nolte (2012). In het kader van het project LTV Veiligheid en Toegankelijkheid is het model in 2012/2013 geactualiseerd, zie Consortium Deltares, IMDC, Svasek, Arcadis (2013a). Een uitgebreide beschrijving van het model en de kalibratie van de waterbeweging wordt eveneens gegeven in Consortium Deltares, IMDC, Svasek, Arcadis (2013a).

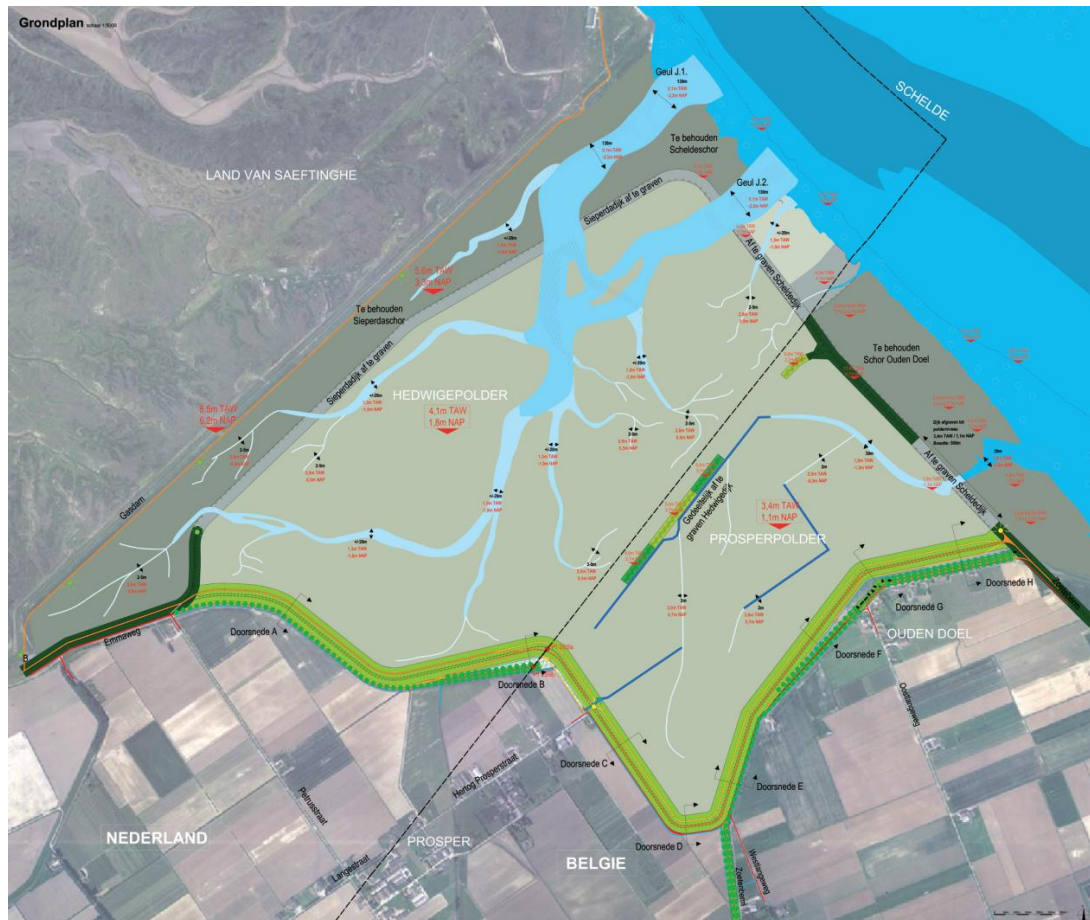
Om het model geschikt te maken voor de voorliggende studie, is het rekenrooster uitgebreid met de Hedwig- en Prosperpolder. Ook is in het interessegebied een verfijning toegepast ten behoeve van nauwkeurige doorrekening van de stromingen en bodemveranderingen in de polders. Basis voor de modelbodem is de opgemeten bodem van de Westerschelde van 2012, afkomstig van Rijkswaterstaat. In de modelbodem is het inrichtingsplan geïmplementeerd (Figuur 1.1).

Met het model wordt een periode van 20 jaar vooruit vanaf het moment van ontpolderen van de Hedwigepolder morfologisch doorgerekend. Hierbij is de zand/slibmodule van het model toegepast. Dit houdt in dat zowel de bodemveranderingen ten gevolge van zandtransport als de bodemveranderingen ten gevolge van slibtransport en de interactie tussen de zand- en slibfractie van de bodem worden meegenomen. Een uitgebreide beschrijving van de zand/slibmodule en een praktische toepassing in de Westerschelde is te vinden in Dam & Blik (2013).

In de analyse van de resultaten zijn niet alleen de absolute bodemontwikkelingen beschouwd maar ook de ontwikkelingen ten opzichte van de autonome situatie. Hiermee wordt het effect van de ingreep geïsoleerd en zijn de resultaten minder gevoelig voor onnauwkeurigheden in de voorspellingsmethodiek. In de autonome situatie is er vanuit gegaan dat de Prosperpolder reeds ontpolderd is.

¹ In de voorliggende studie worden enkel de effecten op morfologisch gebied beschouwd, niet op ecologisch gebied.

Om onzekerheden in de invoer te beschouwen zijn gevoeligheidsberekeningen uitgevoerd met verschillende achtergrondconcentraties van het slib.



Figuur 1.1: Inrichtingsplan voor de Hedwigepolder als gepresenteerd door de Provincie Zeeland op 25 juni 2013.

1.3 Getij en bodemligging

In de Schelde is sprake van getijdenwerking. Dit getij zorgt elke 12,5 uur voor een vulling en lediging van het Schelde bekken. Dit is de belangrijkste forcering van het gebied die sediment met zich meebrengt. Voor het vervolg van het rapport is de volgende definitie van waterstandspeilen overgenomen uit de MER:

Tabel 1.1: Definitie hoog-en laagwaters bij Properpolder o.b.v. waarnemingen 1991-2000 (Oranjewoud/AnteaGroup, 2013).

	Peil
Gemiddeld Hoogwater tijdens Springtij	3.21 m NAP
Gemiddeld Hoogwater	2.82 m NAP
Gemiddeld Hoogwater tijdens doottij	2.32 m NAP
Gemiddeld Laagwater tijdens doottij	-1.89 m NAP
Gemiddeld Laagwater	-2.22 m NAP
Gemiddeld Laagwater tijdens Springtij	-2.41 m NAP

Als de bodem van een gebied ligt tussen gemiddeld laagwater en gemiddeld hoogwater spreekt men van het intertidaal gebied, of intergetijdengebied. Als de bodem hoger ligt als het gemiddeld hoogwater (en dus alleen bij springtij en stormen onderloopt) spreekt men van het supralitoraal. Wanneer de bodem onder gemiddeld laagwater ligt wordt gesproken van het sublitoraal.

1.4 Leeswijzer

In voorliggende studie is gebruik gemaakt van het bestaande morfodynamischemodel FINEL2D van de Westerschelde. Een beschrijving van het model en de modelopzet komen in Hoofdstuk 2 aan bod. Ook worden verscheidene parameterinstellingen van het model besproken. In Hoofdstuk 3 wordt ingegaan op de resultaten van de berekeningen. Hier zal een antwoord gegeven worden op de vragen uit paragraaf 1.1. Een discussie met betrekking tot de modelresultaten is te vinden in Hoofdstuk 4. De conclusies worden in Hoofdstuk 5 behandeld.

2 FINEL2D WESTERSCHELDE MODEL

In dit hoofdstuk is een beschrijving gegeven van het FINEL2D modelinstrumentarium waarmee de hydromorfologische berekeningen in dit rapport zijn uitgevoerd. Er wordt een algemene beschrijving van het model gegeven en de modelopzet en enkele parameterinstellingen die in deze studie zijn toegepast worden besproken.

2.1 Algemene beschrijving FINEL2D

Deze paragraaf bevat een algemene beschrijving van FINEL2D; een gedetailleerde beschrijving van de onderliggende wiskundige vergelijkingen is opgenomen in Bijlage A.

FINEL2D is een door Svašek Hydraulics ontwikkeld hydro- en morfodynamisch modelpakket waarmee de stromingen en de daaraan gekoppelde sediment fluxen en bodemveranderingen in open wateren als zeeën, rivieren, estuaria en havens berekend kunnen worden. De onderliggende vergelijkingen zijn de diepte- en golfgemiddelde Navier-Stokes-vergelijkingen, bestaande uit twee impulsbalansvergelijkingen en de continuïteitsvergelijking.

Deze vergelijkingen zijn gediscretiseerd middels de zogenaamde eindige elementen methode, of wel Finite Elements Method. Hierbij wordt het modelgebied in driehoekige elementen verdeeld waardoor deze methode zeer geschikt is om lokale verfijningen in het rekenrooster aan te brengen en om begrenzingen als oevers, kusten, kades, strekdammen e.d. nauwkeurig te volgen.

In FINEL2D kunnen externe forceringen als Coriolis, bodemwrijving, wind, luchtdruk en golven worden opgelegd.

Aan de hydrodynamische module kunnen diverse sedimenttransportmodules worden gekoppeld, zoals een module voor zandtransport, voor slibtransport of voor zand-slibtransport. Gradiënten in het sedimenttransport resulteren in bodemveranderingen die in de bodemmodule worden uitgerekend. In de bodemmodule wordt tevens de porositeit in rekening gebracht.

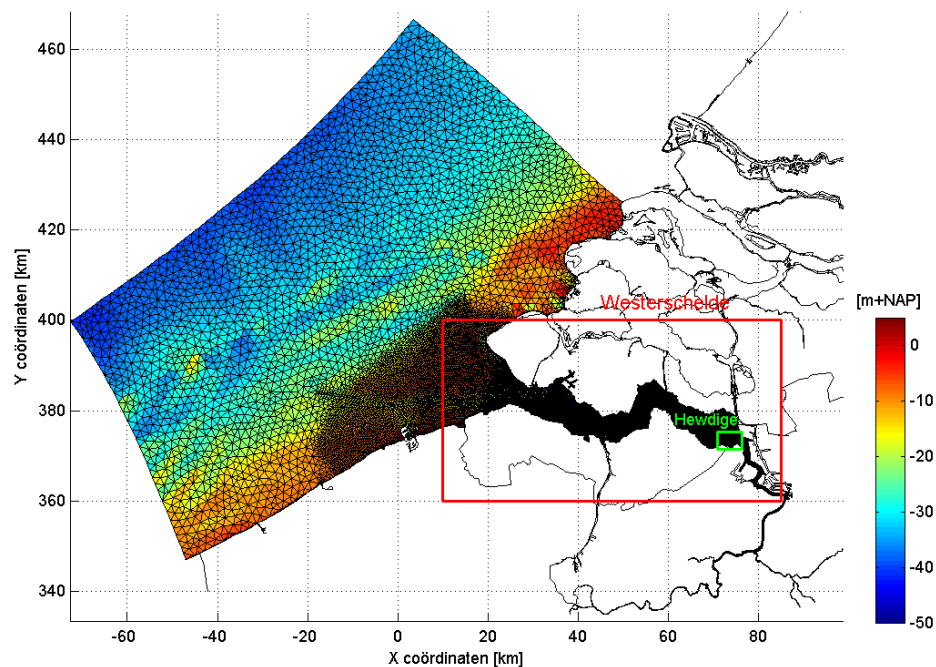
Het toepassen van de zand-slib module heeft enkele voordelen ten opzichte van het gebruik van de losse zand- en slibmodules. Allereerst dragen zowel zand als slib bij aan de morfologische ontwikkeling. Daarnaast wordt de wisselwerking tussen zand en slib in de bodem in beschouwing genomen. Een belangrijk onderscheid dat in het zand-slibtransport wordt gemaakt is of het sediment op de bodem cohesief dan wel niet-cohesief is. Wanneer het sediment op de bodem cohesief is, zal de bodem moeilijker erodeerbaar zijn. Dit is het geval wanneer het slibgehalte in de bodem groter is dan een bepaalde kritische waarde, zie paragraaf 2.6. In het geval van cohesief gedrag eroderen de zand- en slibfracties niet meer onafhankelijk van elkaar. In de bodemmodule behorende bij de zand-slibmodule dient de samenstelling van de bodem daartoe bij te worden gehouden. Voor een uitgebreide beschrijving van de zand-slibmodule wordt verwezen naar Dam & Blik (2013).

2.2 Rekenrooster

De basis van elk numeriek stromingsmodel is het rekenrooster. Voor deze studie is het rekenrooster uit Consortium Deltares, IMDC, Svasek, Arcadis (2013a) als basisrooster gebruikt. Aan dit rooster zijn de Hedwige- en de Prosperpolder toegevoegd. Ter plaatse van beide polders is het rooster verfijnd om in meer detail de morfologische veranderingen te kunnen berekenen. Het rooster is weergegeven in Figuur 2.1 tot 2.3. In elke driehoek wordt een waterstand, bodemhoogte en slibgehalte berekend. Indien plaatselijk meer detail gewenst is dienen er meer driehoeken gedefinieerd te worden ter plekke van het interessegebied, vandaar dat het rooster "fijner" is ter plekke van de Hedwige- en Prosperpolder. Het gedeelte van het rooster in de rode rechthoek uit

Figuur 2.1 is weergegeven in Figuur 2.2. De groene rechthoek in Figuur 2.2 geeft de locatie van de Hedwige- en Prosperpolder aan. Dit deel van het rooster is weergegeven in Figuur 2.3.

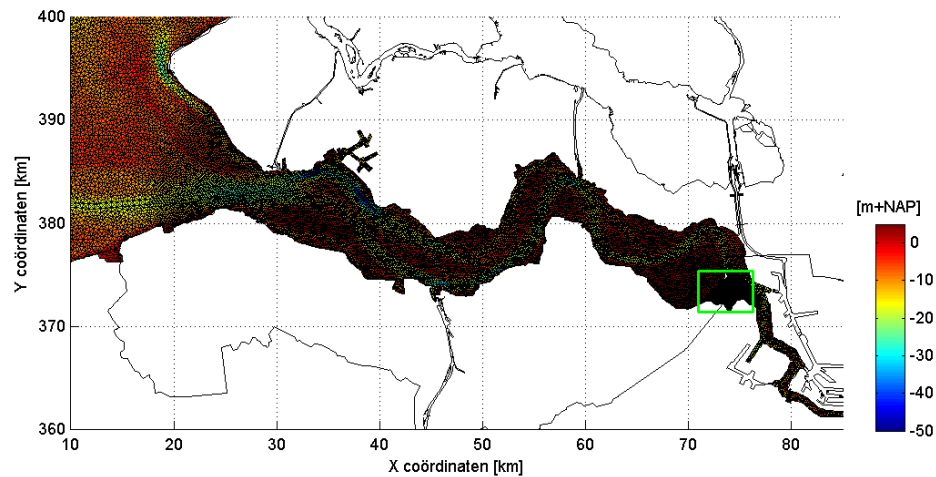
Het rooster is zoveel mogelijk geoptimaliseerd qua rekentijd. In de projectgebieden bedraagt de lengte van de driehoekzides ongeveer 20 m. Het aantal driehoeken bedraagt 72.608.



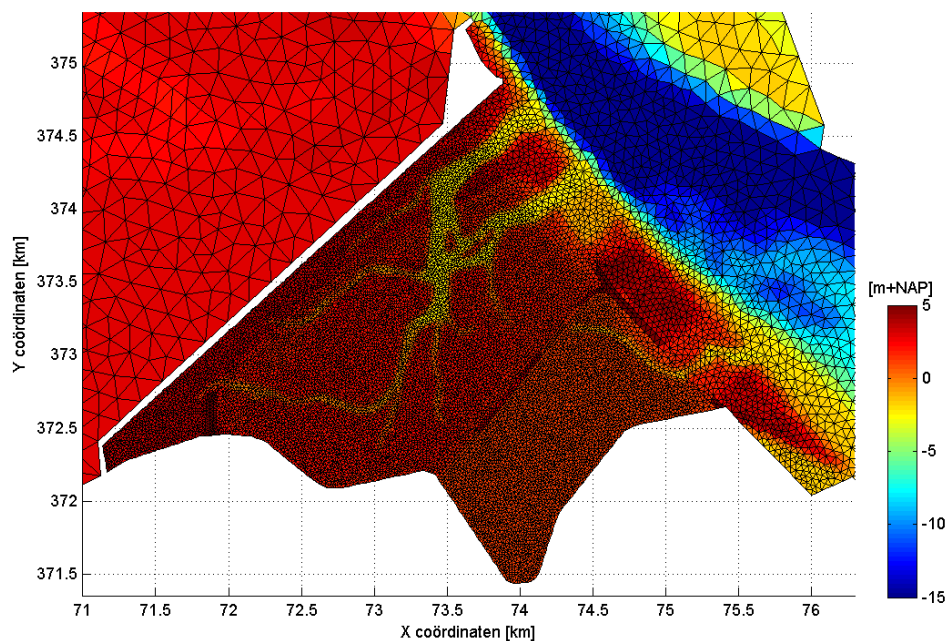
Figuur 2.1: Rekenrooster van FINEL2D Westerschelde model. In Figuur 2.2 wordt het deel van het rekenrooster in het rode kader weergegeven; in Figuur 2.3 het deel in het groene kader.

2.3 Bodemligging

De modelbodem is samengesteld uit verschillende datasets. De bodemligging in de Westerschelde zelf is gebaseerd op de peiling van 2012 (Rijkswaterstaat). In de monding van de Westerschelde is gebruik gemaakt van een bodembestand uit 2011 en in de Zeeschelde van een bodembestand uit 2010. Voor het Sieperdaschor en de Hedwigepolder is gebruikt gemaakt van AHN1 data van het gebied (de huidige bodemligging van het gebied). Ook het Schor van Ouden Doel is in deze dataset opgenomen. Voor de hoogte van de Prosperpolder is gebruik gemaakt van het polderpeil dat in het inrichtingsplan is weergegeven, zie Figuur 1.1. De rest van het gebied is aangevuld met de NEVLA bodem uit 2006, zie Maximova et al. (2009). Bovenstaande data is geïnterpoleerd naar het FINEL2D rooster om de modelbodem te verkrijgen.

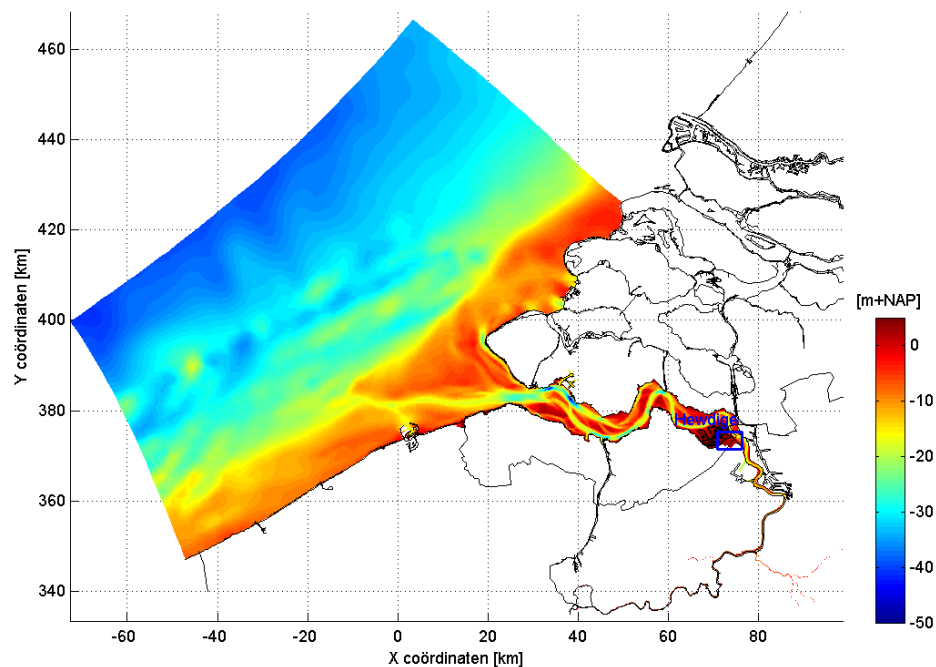


Figuur 2.2: Rekenrooster van FINEL2D Westerschelde model, ingezoomd op de Westerschelde. In Figuur 2.3 wordt het deel van het rekenrooster in het groene kader weergegeven



Figuur 2.3: Rekenrooster van het FINEL2D Westerschelde model ter plaatse van de Hedwig- en Prosperpolder.

De modelbodem zoals die uit de verschillende bronnen is samengesteld kan worden gezien als de modelbodem in de referentie situatie (T0). In deze situatie is de Prosperpolder ontpolderd, maar blijft de Hedwigepolder als polder bestaan. Om de situatie waarin de Hedwigepolder ontpolderd is (T1) door te kunnen rekenen, is het inrichtingsplan uit Figuur 1.1 in de modelbodem geïmplementeerd. Figuur 2.4 toont de modelbodem in het gehele model. In Figuur 2.5 en Figuur 2.6 is ingezoomd op de Hedwig- en Prosperpolder, waarbij Figuur 2.5 de referentiesituatie (T0) presenteert en Figuur 2.6 de situatie waarbij het inrichtingsplan is toegepast (T1).



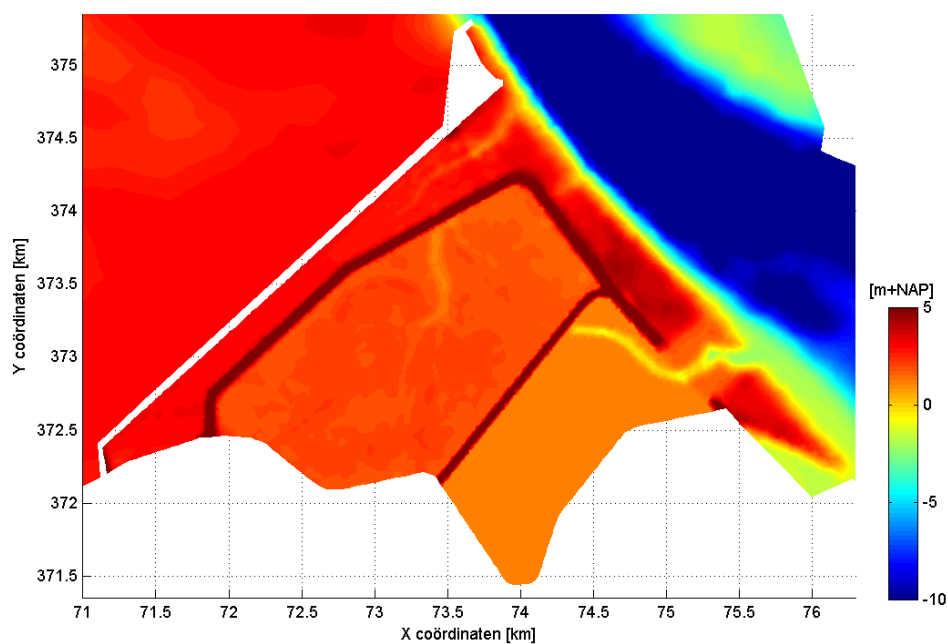
Figuur 2.4: Modelbodem van FINEL2D Westerschelde model. Het deel van de modelbodem in het blauwe kader is weergegeven in Figuur 2.5 voor scenario T0 en in Figuur 2.6 voor scenario T1.

2.4 Strek- en Leidammen

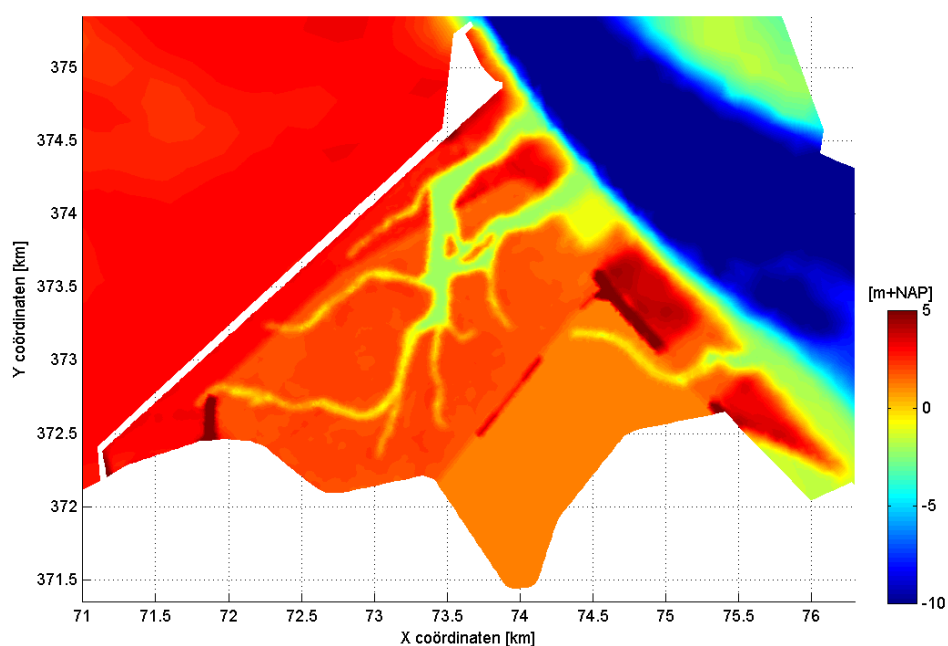
In de Westerschelde liggen diverse strek- en leidammen. De dammen hebben een remmende of blokkerende werking op de stroming en dienen derhalve nauwkeurig in het model opgenomen te worden. Doordat het FINEL2D rooster bestaat uit driehoekige elementen kunnen constructies als dammen zeer nauwkeurig worden gevolgd.

De strek- en leidammen zijn geschematiseerd met behulp van een overlaatformulering. De hoogte, of het hoogteverloop, en de ligging van deze dammen zijn gebaseerd op het Actueel Hoogtebestand Nederland (www.ahn.nl) en het bovengenoemde NEVLA model.

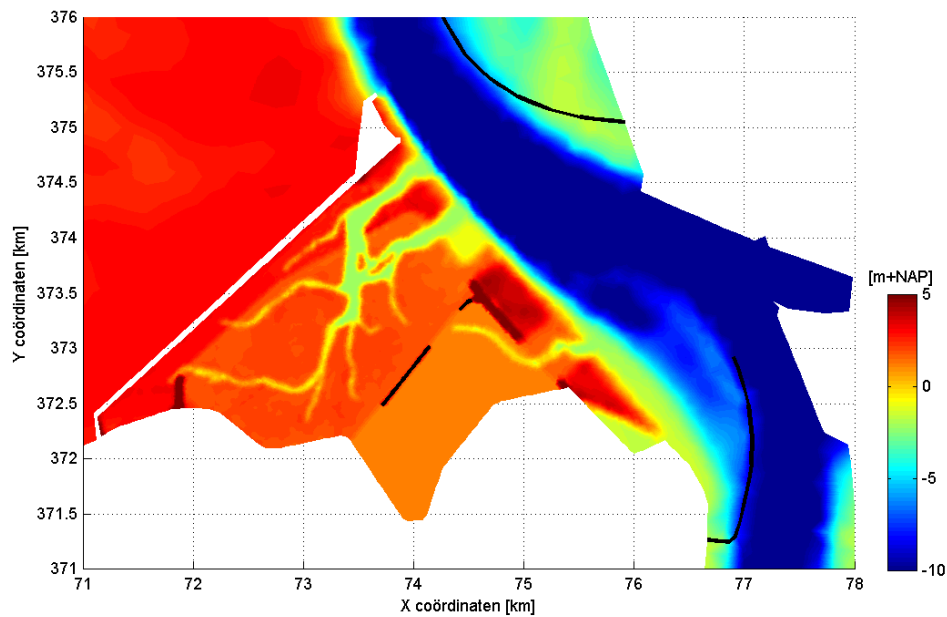
In het interessegebied zijn de leidam bij Appelzak en de leidam bij Schaar van Ouden Doel aanwezig. In de polders zelf zijn de dijkdelen van de (resterende) Hedwigedijk die kunnen overstromen eveneens als overlaat opgenomen. De locatie van deze strek- en leidammen is in Figuur 2.7 weergegeven.



Figuur 2.5: Initiële modelbodem ter plaatse van de Hedwige- en Prosperpolder in de T0 situatie.



Figuur 2.6: Initiële modelbodem ter plaatse van de Hedwige- en Prosperpolder in de T1 situatie.



Figuur 2.7: Initiële modelbodem ter plaatse van de Hedwigepolder en Prosperpolder in de T1 situatie. De zwarte lijnen tonen de locatie van de leidammen en de delen van de Hedwigedijk die als overlaat in de berekening zijn meegenomen.

2.5 Randvoorwaarden

De waterbeweging in het model wordt aangedreven door diverse randvoorwaarden. Op de zeeranden zijn harmonische waterstanden opgelegd gebaseerd op 94 getijcomponenten. De Belgische rivieren de Schelde, de Nete, de Zenne en de Dijle zijn als constante debietranden geschematiseerd.

2.6 Zand-slibsinstellingen

In deze studie wordt de morfologie (d.w.z. de bodemveranderingen) van de Hedwigepolder en Prosperpolder bekeken na ontpolderen. Naar verwachting spelen zowel zand als slib een grote rol in deze gebieden. Daarom wordt in deze studie gebruik gemaakt van de zand-slibmodule van FINEL2D.

Het verschil tussen zand en slib betreft het gedrag van de deeltjes tijdens erosie, het transport en het bezinken. De fijne slibdeeltjes 'plakken aan elkaar', oftewel vertonen cohesief gedrag, waardoor het eroderen lastig gaat. Als de slibdeeltjes eenmaal in de waterkolom zweven, dan blijven ze relatief makkelijk en lang zweven, omdat ze een lage valsnelheid hebben. De slibdeeltjes zijn over het algemeen niet alleen kleiner dan zandkorrels, maar hebben ook een onregelmatiger vorm en tezamen levert dit een lagere valsnelheid. Als er heel veel slibdeeltjes in het water aanwezig zijn dan gaan de deeltjes elkaar in de weg zitten en treden verschillende processen op, waardoor het transport en de sedimentatie lastiger te voorspellen wordt. Als de slibdeeltjes eenmaal op de bodem liggen, dan is dat in eerste instantie in een ongeconsolideerde laag met veel water. Pas na verloop van tijd wordt deze laag steviger en wordt het eroderen lastiger en spreekt men van een cohesieve bodem. Bij zandkorrels speelt dit allemaal niet.

Doordat het gedrag van slib tijdens erosie, transport en sedimentatie anders is dan het gedrag van zand, komt het slib op andere plekken (en andere momenten) tot afzetting in het estuarium. Er vindt een ruimtelijke differentiatie plaats.

Hoewel het verschil in gedrag niet alleen wordt veroorzaakt door het verschil in de korrelgrootte van de deeltjes, is dit wel de factor waarop zand en slib worden onderscheiden. De korrels groter dan 63 μm worden beschouwd als zand en de korrels kleiner dan 63 μm worden beschouwd als slib.

In Tabel 2.1 zijn de zand-slibinstellingen samengevat die in deze studie zijn gehanteerd. Deze instellingen zijn afgeleid in Dam & Blik (2013) in het kader van de kalibratie van een FINEL2D zand-slibmodel van de Slikken van Waarde. Met deze instellingen bleek het goed mogelijk te zijn om de opgetreden (snelle) sedimentatie op de Slikken van Waarde na de aanleg van de strekdammen in 2002 te reproduceren in het model. De omstandigheden ter plaatse van de Hedwige- en Prosperpolder komen goed overeen met de omstandigheden tussen de strekdammen op de Slikken van Waarde, zodat het voor de hand ligt om in deze studie dezelfde modelinstellingen te hanteren.

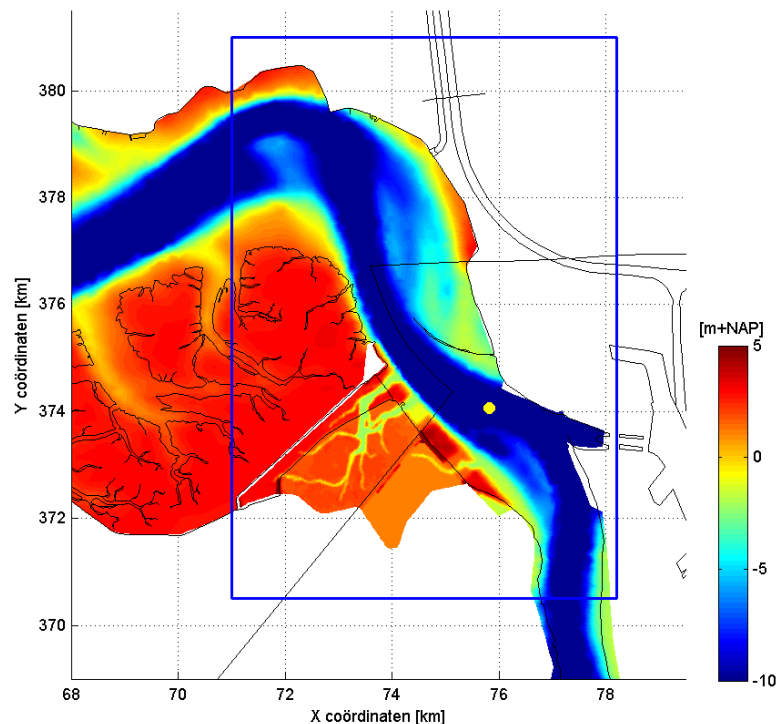
In paragraaf 2.6.3 wordt apart ingegaan op de eigenschappen van de zandfractie. Een belangrijke parameterinstelling in de zand-slibberekening is de achtergrondconcentratie van de slibfractie. Hier wordt in paragraaf 2.6.1 uitgebreid op ingegaan. Een uitleg van de parameters die in Tabel 2.1 zijn opgenomen is te vinden in Bijlage A.

Tabel 2.1: Parameterinstellingen van de zand-slibmodule.

Parameter	Symbool	Eenheid	Waarde
Aantal bodemlagen	N	-	5
Dikte per bodemlaag	δ	m	0,25m
Slibgehalte in bodemlagen	$\rho_{m,init}$	-	2%
Slibgehalte in niet-actieve sublaag	$\rho_{m,s}$	-	0%
Bodem mixing coëfficiënt	k	m^2/s	$2,5 \times 10^{-6}$
Kritisch slibgehalte voor cohesief/niet-cohesief gedrag	$\rho_{m,cr}$	-	30%
Valsnelheid van slib	w_s	m/s	$1,5 \times 10^{-3}$
Kritische schuifspanning niet-cohesieve erosie	$\tau_{e,nc}$	N/m^2	0,20
Kritische schuifspanning cohesieve erosie	$\tau_{e,c}$	N/m^2	0,75
Kritische schuifspanning depositie	τ_d	N/m^2	0,50
Erosieparameter niet-cohesief slib	M_{nc}	$\text{kg m}^2/\text{s}$	1×10^{-3}
Erosieparameter cohesief sediment	M_c	$\text{kg m}^2/\text{s}$	1×10^{-4}

In de zand-slibberekeningen die zijn uitgevoerd is gerekend met een beperkt morfologisch actief gebied. Dit gebied is met een blauw kader weergegeven in Figuur 2.8. Op de randen van dit morfologisch actieve gebied wordt een achtergrondconcentratie voor slib opgelegd. Voordeel van deze aanpak is dat het aanbod van slib in het gebied van interesse onafhankelijk is van een langdurige inspeelberekening met onzekere uitkomst, namelijk het slibgehalte in de bodem. Immers, als na de inspeelberekening het slibgehalte in de bodem niet in voldoende mate overeen zou komen met de werkelijkheid, dan zou een verkeerde hoeveelheid slib ‘aangeboden’ worden in het gebied van interesse. Door het aanbod van slib op te leggen middels een concentratie op de rand nabij het gebied van interesse, wordt het juiste “aanbod” van slib wel gegarandeerd. Deze aanpak is identiek aan de kalibratie op de Slikken van Waarde, zie Dam & Blik (2013). Op de bepaling van de achtergrondconcentratie wordt in paragraaf 2.6.1 uitgebreid ingegaan.

Aangezien de polders beschut liggen voor de dominante windrichting (zuidwest) is het de verwachting dat golven nauwelijks een rol spelen bij de morfologische ontwikkelingen in de gebieden. In de modellering zal daarom alleen met de getijforcering gerekend worden.



Figuur 2.8: Modelbodem ter plaatse van de Hedwig- en Prosperpolder in de T1 situatie. Het blauwe kader toont het morfologisch actieve gebied. De gele punt geeft de slibmeetlocatie bij Schaar van Ouden Doel aan.

2.6.1 Achtergrondconcentratie slib

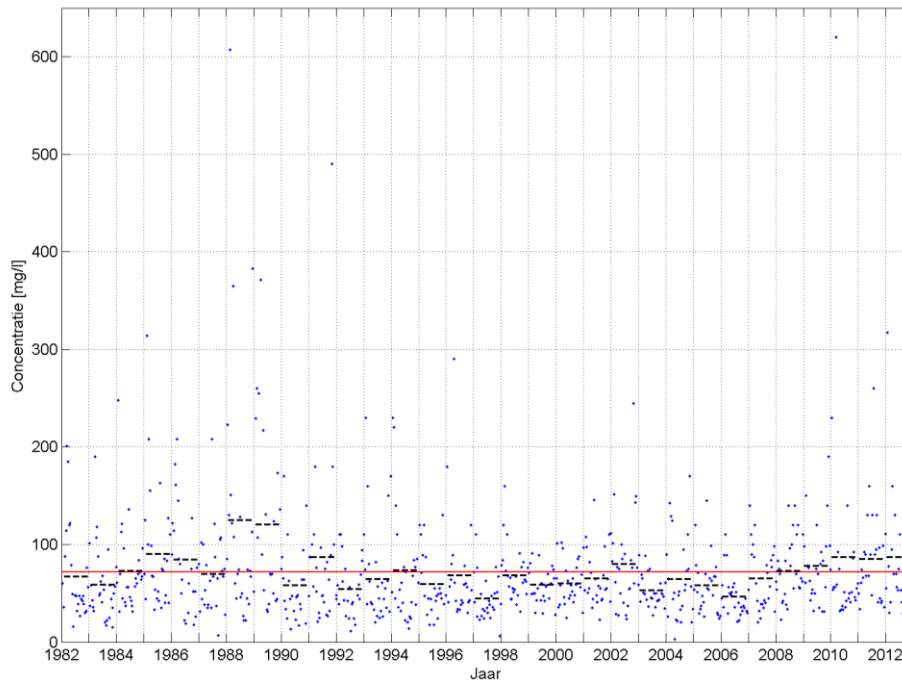
Om de gevoeligheid van de modeluitkomsten voor de achtergrondconcentratie van slib te onderzoeken, worden in de berekeningen twee verschillende achtergrondconcentraties van slib toegepast, waarbij de ene concentratie dient als ondergrens en de andere als realistische waarde. Om de achtergrondconcentratie van slib te bepalen zijn slibmetingen bij de Schaar van Ouden Doel (Rijkswaterstaat) geanalyseerd. De dataset omvat slibmetingen van 1982 tot en met 2012, waarbij eens in de paar weken een meting is verricht. De monsters zijn een meter onder de waterspiegel genomen. Vrijwel alle metingen zijn rond laagwater genomen. De metingen zijn ongeveer even vaak tijdens springtij als tijdens doortij verricht. De meetlocatie wordt in Figuur 2.8 met een gele stip weergegeven.

De meetdata wordt in Figuur 2.9 gepresenteerd. De blauwe punten zijn de individuele meetwaarden. De rode lijn geeft de gemiddelde concentratie over de gehele meetperiode weer. De zwart gestreepte lijnen presenteren de gemiddelde concentratie in elk afzonderlijk jaar. Opvallend is de stijging van de jaargemiddelde concentratie die vanaf 2009 is ingezet. De gemiddelde concentratie over de gehele meetperiode bedraagt 72 mg/l. De gemiddelde concentratie van 2009 tot en met 2012 bedraagt 84 mg/l.

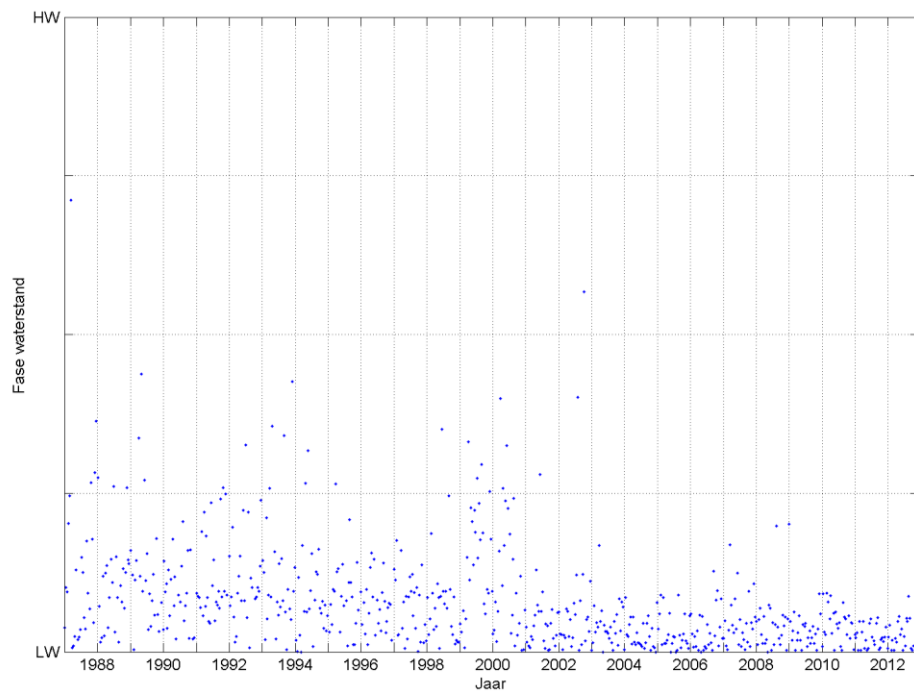
Figuur 2.10 toont het moment in de getijcyclus waarop de slibmonsters vanaf 1987 genomen zijn. Er wordt weergegeven hoe dicht het monsternametijdstip bij het dichtstbijzijnde hoogwater- en laagwatertijdstip ligt. Hiervoor zijn de momenten waarop de monsters genomen zijn naast de gemeten waterstand gelegd. Uit de figuur blijkt dat vrijwel alle monsters rond laagwater zijn genomen. De hierboven genoemde gemiddelde concentraties kunnen daarom gezien worden als de gemiddelde concentraties bij laagwater.

Ter plaatse van Bath treedt de maximale ebsnelheid enkele uren voor laagwater op. Dit betekent dat de slibmonsters relatief dicht bij het kenteringstijdstip zijn genomen, en dat de stroomsnelheden tijdens de monsternamen laag zijn geweest. Wanneer de stroomsnelheden laag zijn, kan het slib bezinken. In het bovenste deel van de waterkolom, waar de monsters genomen zijn, is dan minder slib aanwezig dan gemiddeld over een getijcyclus.

De genoemde gemiddelde concentratie van 84 mg/l, kan daardoor gezien worden als een representatieve ondergrens van de optredende sedimentconcentraties.



Figuur 2.9: Slibconcentratie bij Schaar van Ouden Doel (Rijkswaterstaat). De metingen zijn vrijwel allemaal rond laagwater genomen. De rode lijn geeft de gemiddelde concentratie over de gehele periode. De zwart gestreepte lijnen geven de gemiddelde concentratie in elk afzonderlijk jaar.



Figuur 2.10: Moment van monsternamen van de slibmonsters bij Schaar van Ouden Doel ten opzichte van waterstand bij Bath. Weergegeven wordt hoe dicht het monsternamemoment bij het dichtstbijzijnde hoogwater- en laagwatertijdstip ligt. Het faseverschil tussen Bath en Schaar van Ouden Doel bedraagt enkele minuten.

In Fettweis et al. (1998) is de slibconcentratie ruim een jaar intensief gemeten met behulp van turbiditeitsmeters. De meetlocatie bevindt zich zo'n 4 km bovenstrooms van Schaar van Ouden Doel. Er is zowel 0,5 m vanaf de bodem als 1,5 m vanaf de bodem gemeten. Het meetinterval is 10 minuten, waardoor seizoen- en getijgebonden variaties in de sedimentconcentraties geanalyseerd kunnen worden. De jaarrond condities volgens Fettweis et al. (1998) voor een gemiddeld getij worden in Tabel 2.2 samengevat. Op 0,5 m van de bodem zijn de concentraties met vloed gemiddeld 18% hoger dan met eb. Op 1,5 m van de bodem is de concentratie met vloed 44% hoger.

Tabel 2.2: Gemiddelde sedimentconcentraties [mg/l] en standaarddeviatie ongeveer 4 km bovenstrooms van Schaar van Ouden Doel voor een gemiddeld getij (Fettweis et al., 1998).

	0,5 m vanaf bodem	1,5 m vanaf bodem
Eb	68 ± 33	49 ± 27
Vloed	80 ± 42	71 ± 39
Gehele cyclus	73 ± 35	58 ± 31

Voor de aanslibbing van de Hewige- en Prosperpolder is de slibconcentratie van belang tijdens de instroming (vloed). Deze concentratie bepaalt voor een groot deel de aanslibbing in de polders. De ebconcentratie is minder of niet van belang. Om een realistische inschatting te verkrijgen tijdens de vloed (waarbij de polders gevuld worden met slibhoudend water) wordt de slibconcentratie bij de Schaar van Ouden Doel verhoogd met 30%. Dit is grofweg het gemiddelde van het verschil tussen eb en vloed in Fettweis et al. (1998). Dit resulteert in een concentratie van 109 mg/l. Opgemerkt wordt dat dit een realistische schatting van de slibconcentratie betreft, dus geen bovengrens, zie ook Hoofdstuk 4.

2.6.2 Dichtheid slib

Om de hoeveelheid gesedimenteerd of geërodeerd slib om te zetten in een bodemverandering wordt in het model de dichtheid van slib opgegeven. Er is een verschil in dichtheid van slib dat net bezonken is, en slib dat al langere tijd bezonken is. Hoe langer de periode na het bezinken, hoe meer het slib zal consolideren, en hoe groter de dichtheid van het slib zal worden.

In het model wordt de consolidatiegraad van het bezonken slib niet meegenomen. De droge dichtheid die wordt opgelegd is constant en bedraagt 750 kg/m^3 . Deze dichtheid kan gezien worden als de dichtheid die pas over langere tijd na bezinking bereikt wordt en is representatief voor slik- en schorgebieden. Dit betekent dat de modelberekening te kleine bodemveranderingen oplevert voor net bezonken slib en dus ingesteld staat op bodemveranderingen op langere tijdschalen (jaren).

De droge dichtheid van zand is gedefinieerd op 1650 kg/m^3 . Deze dichtheid verandert niet over de tijd. Er is in het model geen rekening gehouden met menging van slibdeeltjes tussen het zandskelet.

2.6.3 Korrelgrootte en valsnelheid zandfractie

Het in het kader van het LTV geactualiseerde FINEL2D model van de Westerschelde, zie Consortium Deltares, IMDC, Svasek, Arcadis (2013a), gaat uit van een ruimtelijk variërende mediane korrelgrootte d_{50} van de zandige fractie. In de monding van de Westerschelde is een d_{50} van $300 \mu\text{m}$ toegepast die lineair (met de x-coördinaat) afneemt naar $150 \mu\text{m}$ bij de Belgische grens. In Vlaanderen is een uniforme d_{50} van $150 \mu\text{m}$ gehanteerd. De valsnelheid van de zandfractie bedraagt $0,015 \text{ m/s}$. Deze waarden worden ook in de voorliggende studie gehanteerd.

2.7 Niet-erodeerbare lagen en initieel slibpercentage in de bodem

In de Westerschelde komen klei- en veenlagen voor die veel meer weerstand tegen erosie bieden dan een zandige bodem. In de morfologische simulaties worden deze lagen als niet-erodeerbaar verondersteld. Het sedimentpakket tussen de bovenkant van de niet-erodeerbare laag en de bodemligging is de hoeveelheid sediment die beschikbaar is voor erosie.

Consortium Deltares, IMDC, Svasek, Arcadis (2013c) heeft een update van het niet-erodeerbare lagen bestand samengesteld op basis van een kartering uitgevoerd door TNO (TNO, 2003) en een aanpassing door het toenmalige RIKZ. De aanpassing bestaat hierin dat daar waar de bodemligging ooit lager is geweest dan de ligging van de harde laag, de ligging van de harde laag is gelijk is gesteld aan de laagste waargenomen bodemligging.

Daar waar geen informatie over de ligging van een eventuele harde laag beschikbaar is, is een zeer diepe ligging verondersteld. In de praktijk betekent dit dat de harde laag daar nooit blootgelegd zal worden. Er wordt in de berekening uitgegaan van een zandige bodem in het morfologisch actieve gebied met een slibgehalte van 2%.

2.8 Baggeren, storten en zandwinning

In de Westerschelde vinden continu onderhoudsbaggerwerkzaamheden plaats om de vaargeul op diepte te houden. In FINEL2D is geprogrammeerd dat de vaargeul binnen de betonningslijnen op de opgegeven diepte blijft door sediment dat hier afgezet wordt te verwijderen. De baggerspecie wordt elders gestort volgens een op historische gegevens gebaseerde verdeelsleutel. Deze stortgebieden vallen grotendeels buiten het morfologisch actieve gebied van de voorliggende studie.

De zandwinning bij Schaar van Ouden Doel is min of meer gelijk aan de hoeveelheid sediment die op deze locatie gestort wordt. Omdat dit sediment afkomstig is van buiten het morfologisch actieve

gebied, vindt dit storten in de berekening niet plaats en is ook de zandwinning ter plaatse gelijk aan nul.

2.9 Morfologisch modelleren

In de morfologische berekeningen worden het sediment transport en de bodemveranderingen online uitgerekend. Dat betekent dat op elk tijdstip waarop een stromingsberekening wordt uitgevoerd ook het sediment transport en een bodemverandering wordt uitgerekend.

Vanwege de lange rekentijd van de berekeningen die uitgevoerd gaan worden, is het niet haalbaar om 10 tot 20 jaar ‘van minuut tot minuut’ door te rekenen. Daarom is in de morfologische berekeningen een versnellingsfactor toegepast. De bodemverandering die op elk stromingstijdstip wordt uitgerekend wordt met deze factor vermenigvuldigd.

In deze studie is een versnellingsfactor van 24,75 toegepast zodat in één doortij-springtijcyclus (14,75 dagen) één jaar morfologische ontwikkeling wordt berekend. Met 20 doortij-springtijcycli worden zodoende 20 jaren doorgerekend. Uit eerder onderzoek (Svasek Hydraulics, 2006) is gebleken dat deze versnellingsfactor in de Westerschelde een aanvaardbaar, verlies aan nauwkeurigheid geeft.

2.10 Scenariodefinitie

Om het effect van de ontpoldering van de Hedwigepolder in kaart te brengen zijn vier scenario's doorgerekend. Twee van de scenario's betreffen de referentiesituatie (T0a en T0b). In deze situatie blijft de Hedwigepolder als polder bestaan, maar wordt het Belgische deel van de Prosperpolder wel ontpolderd. De startbodem wordt weergegeven in Figuur 2.5. Aan de herinrichting en ontpoldering van de Prosperpolder wordt reeds gewerkt. Er worden twee verschillende slibconcentraties toegepast, zie ook paragraaf 2.6.1. In scenario T0a wordt een achtergrondconcentratie van 84 mg/l (ondergrens) toegepast; in scenario T0b een achtergrondconcentratie van 109 mg/l (realistisch).

In de andere twee scenario's (T1a en T1b) wordt de Hedwigepolder ook ontpolderd, en heringericht volgens het inrichtingsplan volgens Figuur 1.1. De startbodem wordt weergegeven in Figuur 2.6. Ook voor de T1 scenario's wordt zowel een concentratie van 84 mg/l als een concentratie van 109 mg/l toegepast.

Een overzicht van de scenario's wordt gegeven in Tabel 2.3.

Tabel 2.3: Overzicht van de verschillende scenario's.

Naam scenario	Ontpolderd	Achtergrond concentratie slib
T0a	Prosperpolder	84 mg/l
T0b	Prosperpolder	109 mg/l
T1a	Hedwige- en Prosperpolder	84 mg/l
T1b	Hedwige- en Prosperpolder	109 mg/l

3 MORFOLOGISCHE SCENARIO BEREKENINGEN

Dit hoofdstuk behandelt de uitkomsten van de modelberekeningen. In dit hoofdstuk worden onder andere de morfologische ontwikkeling en de daaraan gekoppelde areaalontwikkeling besproken. Ook het effect op de waterstand wordt behandeld.

3.1 Bodemligging

Deze paragraaf gaat in op de ontwikkeling van de bodemligging in het interessegebied gedurende de simulatieperiode van 20 jaar. De ontwikkeling die het gebied morfologisch gezien heeft doorgemaakt wordt besproken evenals de verschillen tussen de scenario's. Daarbij ligt de nadruk op de verschillen tussen de scenario's over de periode van 20 jaar als geheel, maar ook de verschillen tussen de beginjaren en de latere jaren van de diverse scenario's krijgen aandacht.

3.1.1 Scenario's T0a en T0b

In de referentiesituatie wordt de Prosperpolder ontpolderd. Om inzicht in de morfologische ontwikkeling van de polder en de omgeving te verkrijgen wordt in de modelberekeningen 20 jaar morfologie doorgerekend. In het eerste jaar van de berekeningen spelen de modelbodem en de modelinstellingen op elkaar in, waardoor de berekening resulteert in 19 bruikbare jaren. De bodemligging aan het eind van de berekening wordt voor scenario T0a (84 mg/l) getoond in Figuur 3.1 en voor scenario T0b (109 mg/l) in Figuur 3.2.

De gemiddelde bodemhoogte van de afzonderlijke polders wordt voor elke twee jaar getoond in Figuur 3.6 voor T0a en in Figuur 3.7 voor T0b. De gemiddelde bodemhoogte betreft de gehele polder, inclusief de aanwezige geulen. De dijken zijn buiten beschouwing gelaten. Omdat de Hedwigepolder omdijkt is en niet inundeert in de referentieberekeningen, blijft de hoogte in de Hedwigepolder gedurende de T0 berekening constant. In de figuren is de gemiddelde hoogwaterstand bij gemiddeld tij, bij springtij en bij doottij opgenomen volgens paragraaf 1.3.

Zowel bij de een slibconcentratie van 84 mg/l (Figuur 3.1) als een slibconcentratie van 109 mg/l (Figuur 3.2) ontstaan er in de Prosperpolder grofweg 3 (kleine) geulen, die bij de dijkopening samenkomen. Via kleinere en ondiepere vertakkingen van deze drie geulen wordt in de vulling en ontwatering van de polder voorzien. De noordelijkste van de drie geulen volgt grofweg de geul die initieel in de Prosperpolder gegraven is, zie ook Figuur 2.5.

De bodemontwikkeling, d.w.z. het verschil tussen de eindbodem en de bodem na het inspelen, wordt voor T0a in Figuur 3.3 voor T0b in Figuur 3.4 weergegeven. Hierbij wordt met rood aangegeven waar sedimentatie optreedt en met blauw waar erosie optreedt. De onderlinge verschillen tussen beide referentiesommen zijn klein, zie ook Figuur 3.5.

De Prosperpolder sedimenteert in 19 jaar gemiddeld met ongeveer 1,5 meter, waarvan ongeveer 0,55 meter (84 mg/l) tot 0,65 meter (109 mg/l) in de eerste 5 jaar, zie Figuur 3.6 en Figuur 3.7. Omdat de geulen in de gemiddelde bodemhoogte in de polder (in Figuur 3.6 en Figuur 3.7) ook zijn meegenomen, is de hoogte van het hoger gelegen intergetijdengebied (de niet-geulen) hoger dan in de figuren wordt getoond. Zo volgt uit Figuur 3.1 en Figuur 3.2 dat grote delen van het zuiden van de Prosperpolder een hoogte van 3 m+NAP hebben. De hoger gelegen delen van de polder hebben daarmee in het model het gemiddeld hoogwater niveau bereikt, waardoor de polder aan het eind van de rekenperiode alleen nog bij springtij inundeert.

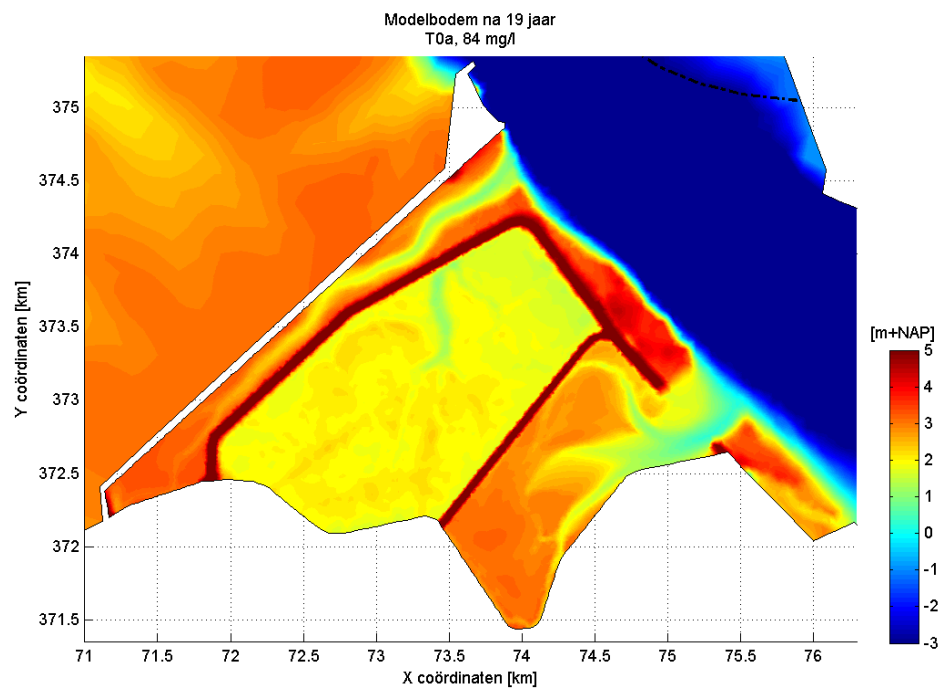
De Sieperdageul (de geul die door de Sieperdapolder loopt) is in beide eindsituaties duidelijk zichtbaar. Het hoger gelegen deel van de polder (het deel wat niet geul is) zelf ligt na 20 jaar boven de gemiddelde hoogwaterstand. In het Sieperdaschor neemt de grootte van de geul enigszins toe.

Het effect daarvan is zichtbaar in de gemiddelde hoogte van het Sieperdaschor, zie Figuur 3.6 en Figuur 3.7. De figuren tonen dat de geulgrootte na ongeveer 8 jaar stabiel is. In werkelijkheid wordt geen verdieping van de Sieperdageul verwacht. Het verschil tussen model en werkelijkheid wordt veroorzaakt door de aannames die in het model gedaan zijn t.a.v. erodeerbaarheid van de opgeslibde bodem. In het model is overal, dus ook in het Sieperdaschor, een initieel slibgehalte in de bodem van 2% aangenomen. In werkelijkheid is dit schor al jarenlang onderhevig aan aanslibbing, met een bijbehorend hoger slibgehalte. Dit leidt tot cohesief gedrag van de bodem met een remmende werking op de erodeerbaarheid. Op de hoger gelegen delen kan vegetatie ook erosieremmend werken, en leiden tot meer slibinvang.

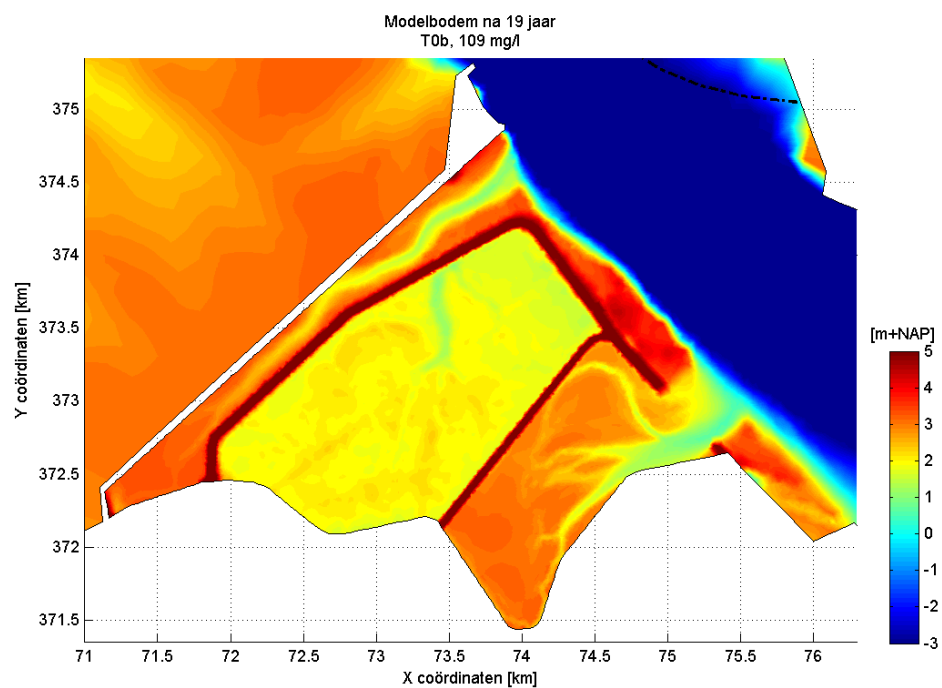
Het verschil in morfologische ontwikkeling tussen beide referentieberekeningen is getoond in Figuur 3.5. Wanneer er in scenario T0b meer sedimentatie plaatsvindt dan in scenario T0a, levert dit een positief verschil. Maar ook wanneer in scenario T0b minder erosie plaatsvindt dan in scenario T0a levert dit een positief verschil op. Omdat de eindbodem in scenario T0b hoger ligt dan in scenario T0a, treedt er in relatieve zin sedimentatie op. In de figuur worden de gebieden waar meer sedimentatie/minder erosie optreedt met rood gemarkeerd. De gebieden waar minder sedimentatie of meer erosie optreedt worden met blauw gemarkeerd.

Uit Figuur 3.5 blijkt dat de onderlinge verschillen ten gevolge van een andere sedimentconcentratie betrekkelijk klein zijn. In scenario T0b strekt het hoge supralitorale gebied zich verder uit richting de Schelde dan in scenario T0a het geval is. Ook zijn de geulen smaller, ondieper en korter in het geval van een hogere slibconcentratie. Dit wordt veroorzaakt doordat de geulen elk getij relatief minder water hoeven te vervoeren naar de hogere intergetijdengebieden. Hierdoor volstaan kleinere geulen (minder breed en ondieper). Een hogere slibconcentratie leidt dus tot een snellere aanslibbing van de polder en het geulsysteem. Dit is zichtbaar wanneer Figuur 3.6 en Figuur 3.7 vergeleken worden. De gemiddelde hoogte in de polder is aan het eind van de berekening ongeveer 20 cm hoger bij een concentratie van 109 mg/l dan bij een concentratie van 84 mg/l. Na 5 jaar is het verschil 10 cm.

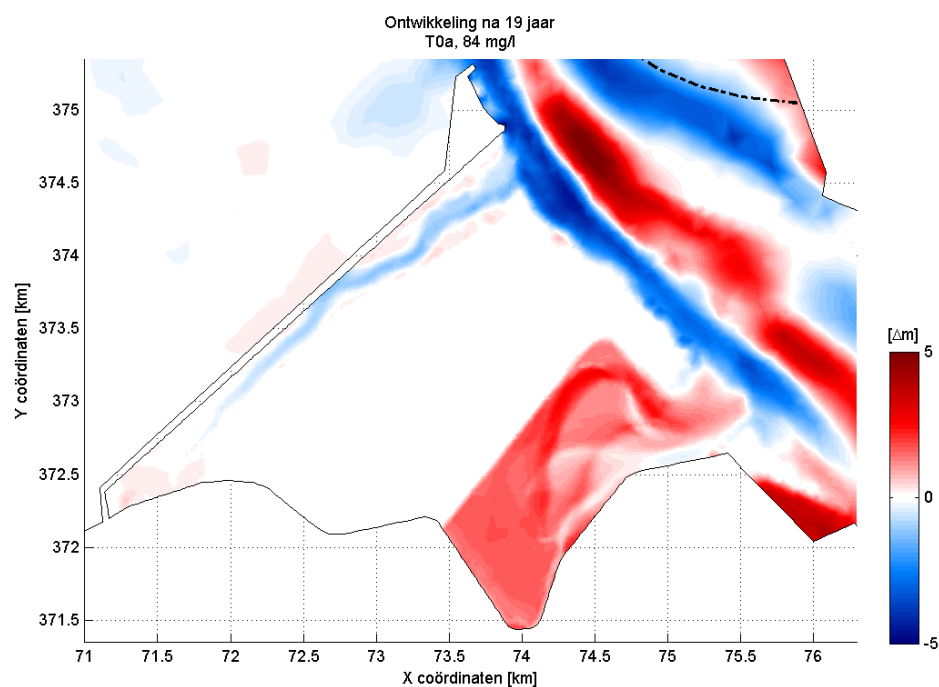
Daarnaast is aan de oever van de Westerschelde bij de overgang naar de diepe geul een verschil zichtbaar. Omdat hier in zowel scenario T0a als scenario T0b erosie optreedt, betekent de rode kleur in Figuur 3.5 op deze locatie dat er in T0b (109 mg/l) minder erosie optreedt dan in T0a (84 mg/l). Kennelijk werkt een groter aanbod van slib enigszins remmend op de berekende erosie ter plaatse. Dit effect is echter in vergelijking met de absolute erosie in Figuur 3.3 en Figuur 3.4 verwaarloosbaar.



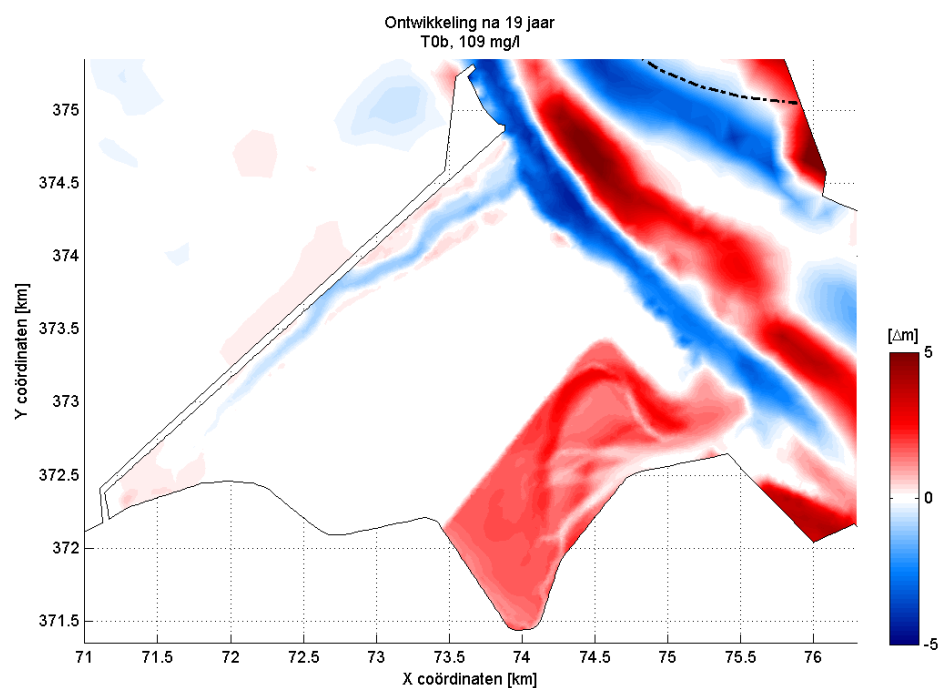
Figuur 3.1: Bodem aan het eind van de berekening voor scenario T0a.



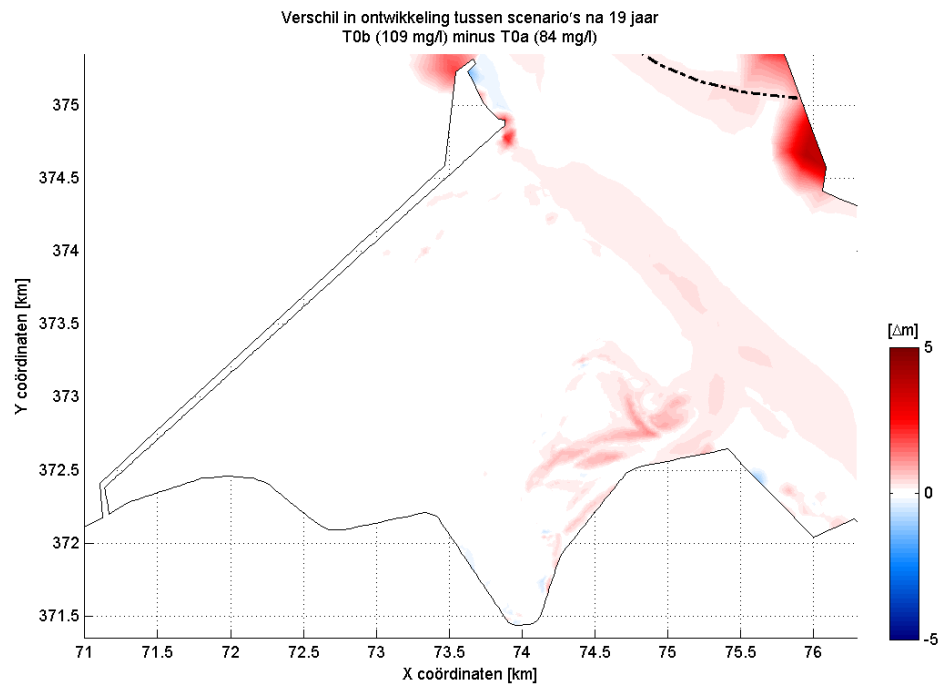
Figuur 3.2: Bodem aan het eind van de berekening voor scenario T0b.



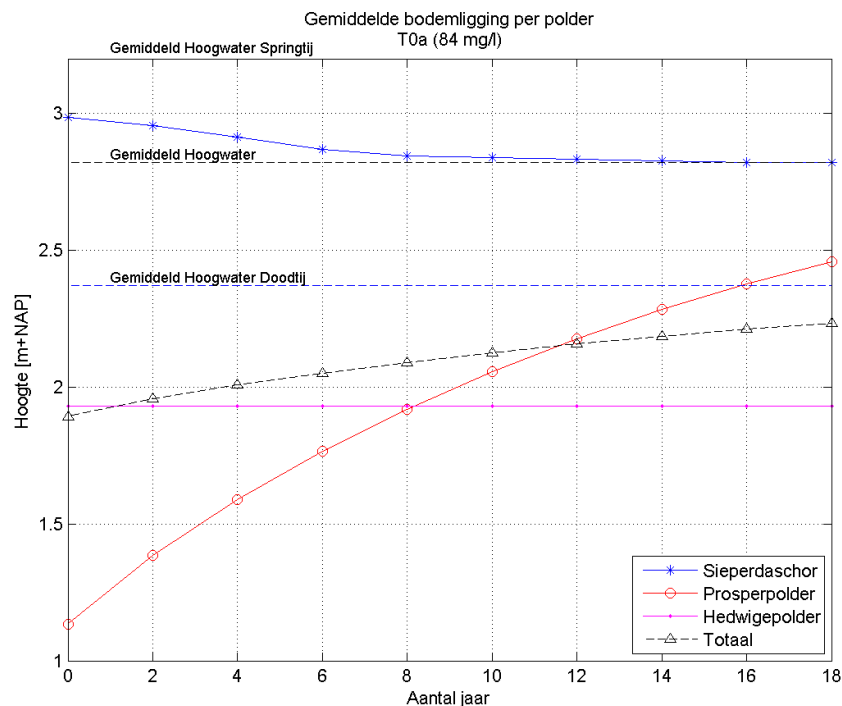
Figuur 3.3: Bodemontwikkeling na 19 jaar voor scenario T0a. In de rode gebieden treedt sedimentatie op; in de blauwe erosie.



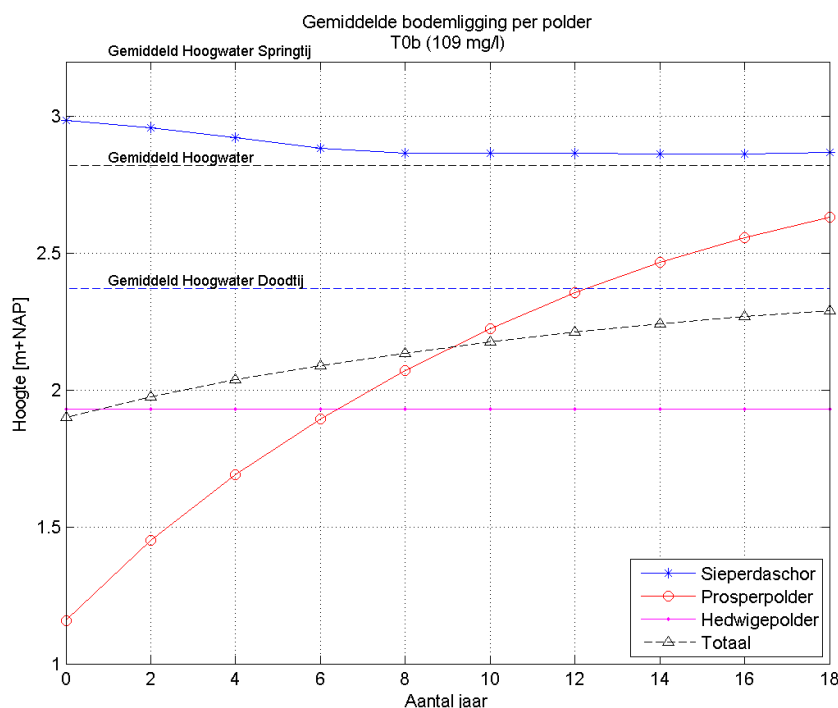
Figuur 3.4: Bodemontwikkeling na 19 jaar voor scenario T0b. In de rode gebieden treedt sedimentatie op; in de blauwe erosie.



Figuur 3.5: Vershil in bodemontwikkeling tussen beide referentiescenario's na 19 jaar. In de rode gebieden treedt in T0b meer sedimentatie/minder erosie op dan in T0a; in de blauwe gebieden treedt minder sedimentatie/meer erosie op in T0b dan in T0a.



Figuur 3.6: Gemiddelde hoogte in de afzonderlijke polders voor scenario T0a. Geulen zijn in het gemiddelde meegenomen, dijken niet. De gemiddelde hoogwaterstand bij gemiddeld tij, springtij en doottij zijn eveneens gepresenteerd.



Figuur 3.7: Gemiddelde hoogte in de afzonderlijke polders voor scenario T0b. Geulen zijn in het gemiddelde meegenomen, dijken niet. De gemiddelde hoogwaterstand bij gemiddeld tij, springtij en doortij zijn eveneens gepresenteerd.

3.1.2 Scenario's T1a en T1b

De bodemligging aan het eind van de modelberekening wordt voor scenario T1a (84 mg/l) weergegeven in Figuur 3.9 en voor scenario T1b (109 mg/l) in Figuur 3.10. In deze scenario's wordt nu naast de Prosperpolder ook de Hedwigepolder ontpolderd. Hiermee ontstaat een geheel ander beeld dan wanneer alleen de Prosperpolder wordt ontpolderd. Er worden nu drie geulen door het voorliggende schor aangelegd die in verbinding met de Westerschelde staan. De meeste noordelijke geul komt ter plaatse van de Sieperdasgeul, de middelste ter hoogte van de Hedwigepolder en de meest zuidelijke ter hoogte van de Prosperpolder.

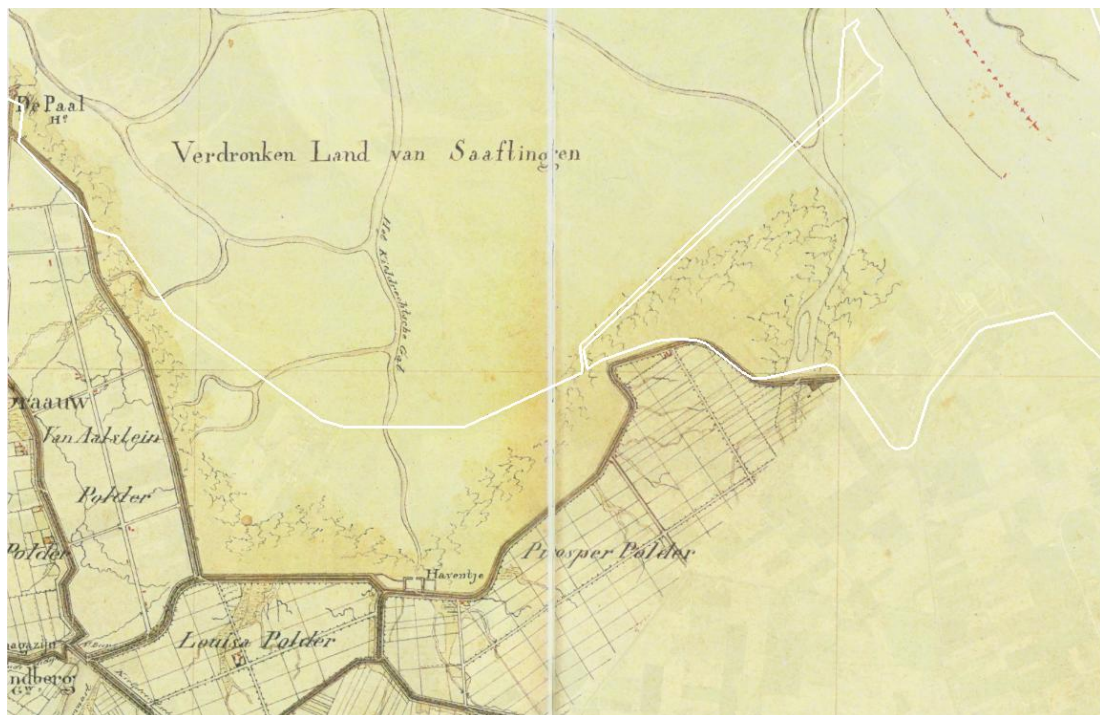
De ontwikkeling van de gemiddelde bodemligging van de polders over de jaren wordt getoond in Figuur 3.14 en Figuur 3.15. De gemiddelde bodemligging is inclusief de aanwezige geulen, maar exclusief de dijken in het gebied. De hoogte van de hoger gelegen gebieden is hoger dan in Figuur 3.14 en Figuur 3.15 wordt weergegeven. De hoogte van deze delen van beide polders is ongeveer gelijk aan de gemiddelde hoogwaterstand, waarbij nog een deel van het intergetijdengebied is doorgegroeid naar supralitoraal gebied.

De meest noordelijke geul is de grootste van de drie en ontwikkelt volgens het model twee grote zijtakken, uiteenlopend in meerdere kleinere en ondiepere vertakkingen. Deze geul met bijbehorende vertakkingen is verantwoordelijk voor de ontwatering van het Sieperdaschor en het grootste deel van de Hedwigepolder. Een deel van de vertakking strekt zich zelfs uit tot in de Prosperpolder. De ligging van de geul komt na 20 jaar grofweg nog steeds overeen met de geul die initieel in de Hedwigepolder gegraven is, zie Figuur 2.6, en met de ligging van de geul die aanwezig was voordat de Hedwigepolder in 1907 ingepolderd werd. De ligging van de oorspronkelijke geul is te zien in een historische kaart van 1856 (Grote Historische Provincieatlas Zeeland 1856-1858, 1992), zie Figuur 3.8, maar is ook in de huidige bodem nog zichtbaar, zie Figuur 3.1 of Figuur 3.2.

Het overeenkomen van de ligging van de meest noordelijke geul met de historische ligging kan verklaard worden aan de hand van de karakteristieken van het getij. Geulen zijn geneigd zich te richten op de dominante stroming. In het interessegebied is de vloedstroming dominant, en de meest noordelijke geul is dan ook op de vloedstroming gericht.

De middelste hoofdgeul bestaat uit twee takken. De noordelijke tak is slechts kort en is gelegen op de locatie waar de geul initieel gegraven is, zie Figuur 2.6. De zuidelijke tak is ten opzichte van de beginsituatie volledig nieuw ontstaan en loopt tot ver in de Prosperpolder. Deze geul met bijbehorende vertakkingen is verantwoordelijk voor het grootste deel van de ontwatering van de Prosperpolder. Ook deze geul is gericht op de dominante vloedstroming.

De derde hoofdgeul, een relatief korte geul, verzorgt het restant van de ontwatering van de Prosperpolder. Deze geul in de Prosperpolder heeft in de T1 scenario's (Figuur 3.9, Figuur 3.10) totaal andere dimensies dan in de T0 scenario's (Figuur 3.1, Figuur 3.2). Dit komt doordat de ontwatering van de Prosperpolder in de T1 scenario's voor het grootste deel door de geul vanuit de Hedwigepolder wordt overgenomen, waardoor de initiële geul in de Prosperpolder voor een groot deel zijn functie verliest.



Figuur 3.8: Kaart van het interessegebied in 1856 (Grote Historische Provincie Atlas, 1992). De modeloutline is met wit in de kaart getekend.

De bodemontwikkeling, het verschil tussen de eindbodem en de ingespeelde bodem na 1 jaar, wordt voor scenario T1a in Figuur 3.11 en voor scenario T1b in Figuur 3.12 weergegeven. Hierbij wordt met rood aangegeven waar sedimentatie optreedt en met blauw waar erosie optreedt. De onderlinge verschillen tussen Figuur 3.11 en Figuur 3.12 zijn relatief klein in vergelijking met de totale ontwikkeling, zie ook Figuur 3.13.

Het initieel aangelegde geulensysteem laat vrijwel overal een sedimentatie zien van een meter of meer na 19 jaar. In de directe nabijheid van het initieel aangelegde geulprofiel zijn ook plekken met erosie zichtbaar. Deze erosie wordt veroorzaakt door migratie van het geulensysteem (uitbochten).

In Figuur 3.14 en Figuur 3.15 zijn de geulen meegenomen in de bepaling van de gemiddelde hoogte van de polder. De hoogte van de bodem buiten de geulen is daardoor hoger dan in Figuur 3.14 en Figuur 3.15 wordt weergegeven, zie ook Figuur 3.9 en Figuur 3.10. Uit Figuur 3.9 en Figuur 3.10 blijkt dat de bodem buiten de geulen van de Hedwigepolder en de Prosperpolder het gemiddelde hoogwaterniveau bereiken, waardoor de polders aan het eind van de berekening veel minder inunderen dan in de beginfase. Omdat het polderniveau in de Hedwigepolder initieel hoger is dan dat van de Prosperpolder, is de totale sedimentatie in de Hedwigepolder lager dan in de Prosperpolder. De gemiddelde bodem van beide polders ligt na 19 jaar ongeveer op gemiddeld hoogwater, waardoor de sedimentatie in de diepere Prosperpolder hoger is. De sedimentatie in de Hedwigepolder bedraagt gemiddeld over de gehele polder 85 cm tot 105 cm in 19 jaar tijd (4,5 - 5,5 cm/jaar). In de Prosperpolder bedraagt de sedimentatie 135 cm tot 150 cm (7 - 8 cm/jaar). In de eerste 5 jaar bedraagt de sedimentatie in de Hedwigepolder 35 cm tot 45 cm (7 - 9 cm/jaar) en in de Prosperpolder 55 cm tot 65 cm (11 - 13 cm/jaar). De sedimentatiesnelheid is aan het begin van de berekening hoger dan aan het eind van de berekening.

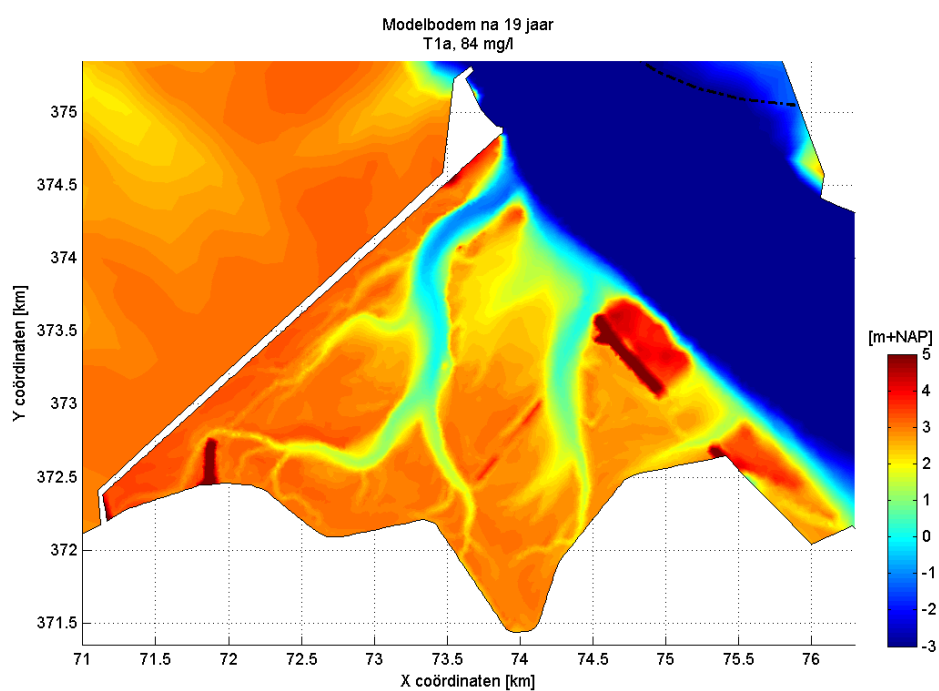
Het verschil in morfologische ontwikkeling tussen scenario T1a en T1b wordt getoond in Figuur 3.13. Wanneer er in scenario T0b meer sedimentatie plaatsvindt dan in scenario T0a, levert dit een positief verschil. Maar ook wanneer in scenario T0b minder erosie plaatsvindt dan in scenario T0a, levert dit een positief verschil op. Omdat de eindbodem in scenario T0b hoger ligt dan in scenario T0a, treedt er in relatieve zin sedimentatie op. In de figuur worden de gebieden waar meer sedimentatie/minder erosie optreedt met rood gemarkeerd. De gebieden waar minder sedimentatie of meer erosie optreedt worden met blauw gemarkeerd. Uit de figuur blijkt dat de onderlinge verschillen ten gevolge van een andere sedimentconcentratie relatief klein zijn, maar groter dan in het geval van de referentiesituatie, zie Figuur 3.5.

De hoogte van de hogere delen van de polder, dus van de delen die niet als geul worden geclassificeerd, is voor beide sedimentconcentraties gelijk. Omdat deze hoogte voor beide polders in beide scenario's ongeveer gelijk is aan het gemiddeld hoogwaterniveau, loopt een deel van de polders alleen nog onder tijdens springtij of stormen.

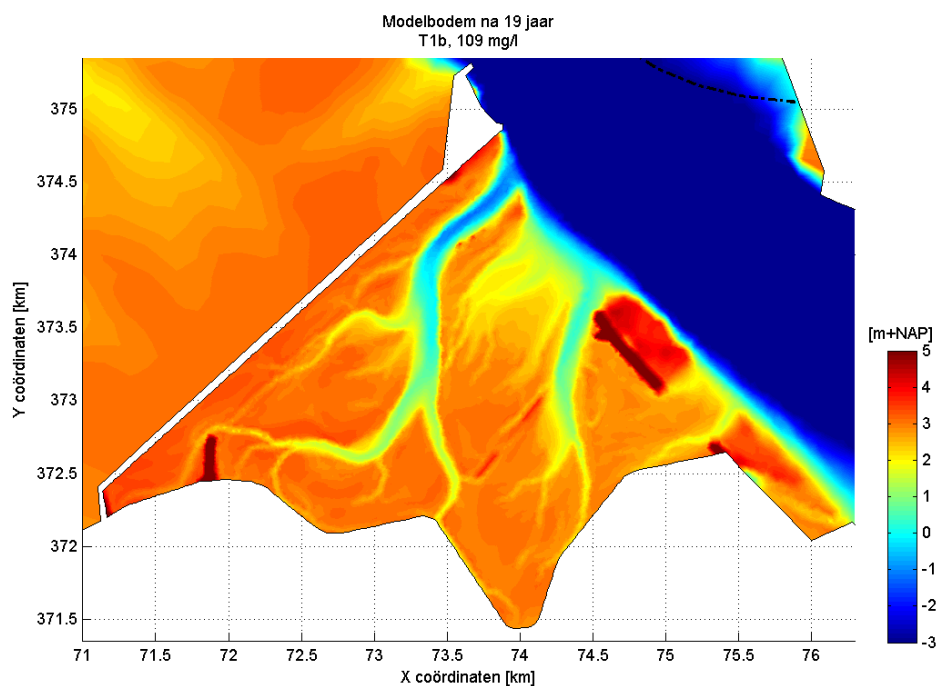
In scenario T1b strekt het hoog gelegen gebied zich iets verder uit richting de Schelde dan in scenario T1a het geval is. Het hoog gelegen gebied ontstaat aan de landzijde en breidt zich langzaam uit richting de rivier. Ook zijn de meeste geulen smaller, ondieper en korter in scenario T1b, zie Figuur 3.9, Figuur 3.10 en Figuur 3.13. Dit wordt veroorzaakt doordat de geulen in scenario T1b elk getij relatief minder water hoeven te vervoeren naar de hogere intergetijdengebieden dan in scenario T1a, omdat het gebied al meer gesedimenteerd is. Hierdoor volstaan kleinere geulen (minder breed en ondieper). Dit is vooral zichtbaar bij de middelste en zuidelijke geul, die de Prosperpolder vullen en ontwateren. In het meest noordelijke geulsysteem zijn de geulen onder invloed van een verschillende achtergrondconcentratie wat anders gemigreerd. Naast kleine verschillen in de ligging van de geul, geldt ook hier dat de geulen smaller, ondieper en korter zijn, en dat het geulsysteem bij een hogere slibconcentratie verder is teruggetrokken.

Het effect van het verschil in grootte van het geulenstelsel is ook zichtbaar wanneer Figuur 3.14 en Figuur 3.15 vergeleken worden. De gemiddelde hoogte in de polder is aan het eind van de berekening ongeveer 20 cm hoger bij een concentratie van 109 mg/l dan bij een concentratie van 84 mg/l.

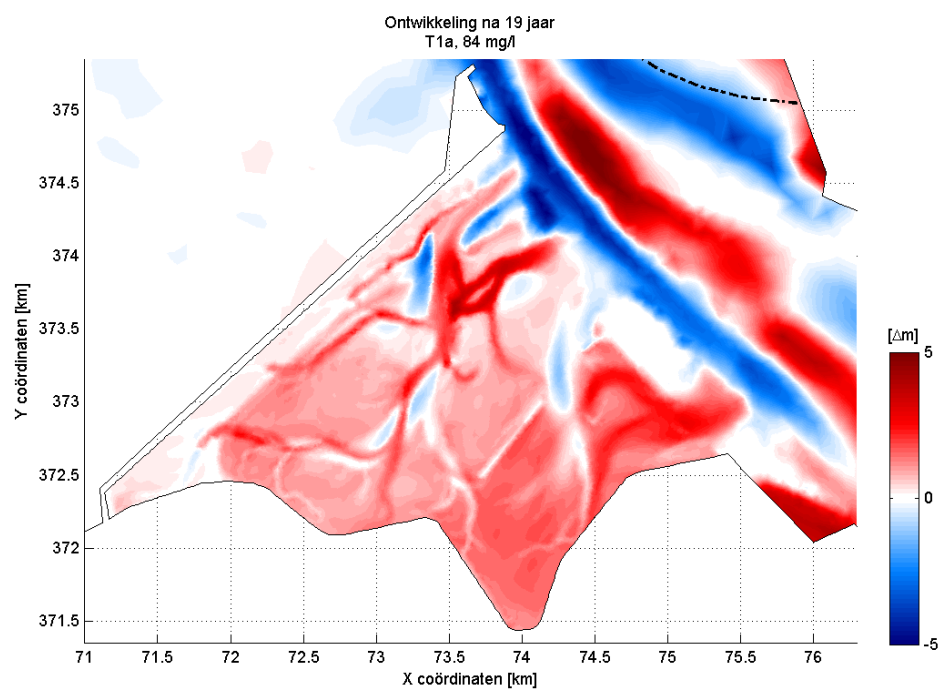
Het Sieperdaschor sedimenteert 20 cm tot 40 cm in 19 jaar tijd, zie ook Figuur 3.14 en Figuur 3.15. In het deel van het Sieperdaschor waar een hoge sedimentatie zichtbaar is, betreft het de volgens het inrichtingsplan een ter plaatse aangelegde geul. Deze geul sedimenteert beduidend sneller dan het omringende gebied.



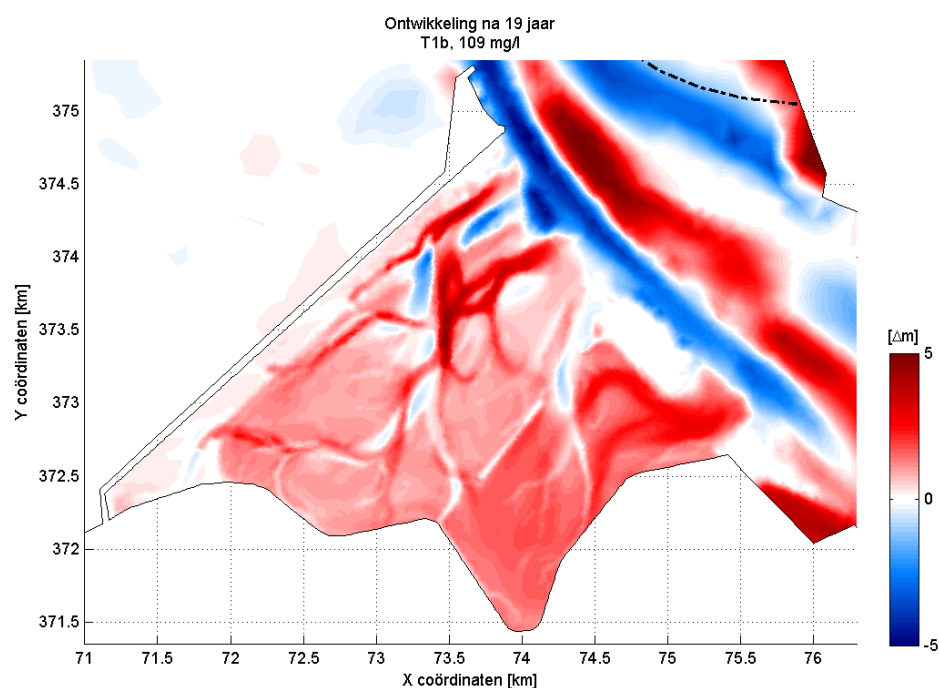
Figuur 3.9: Bodem aan het eind van de berekening voor scenario T1a.



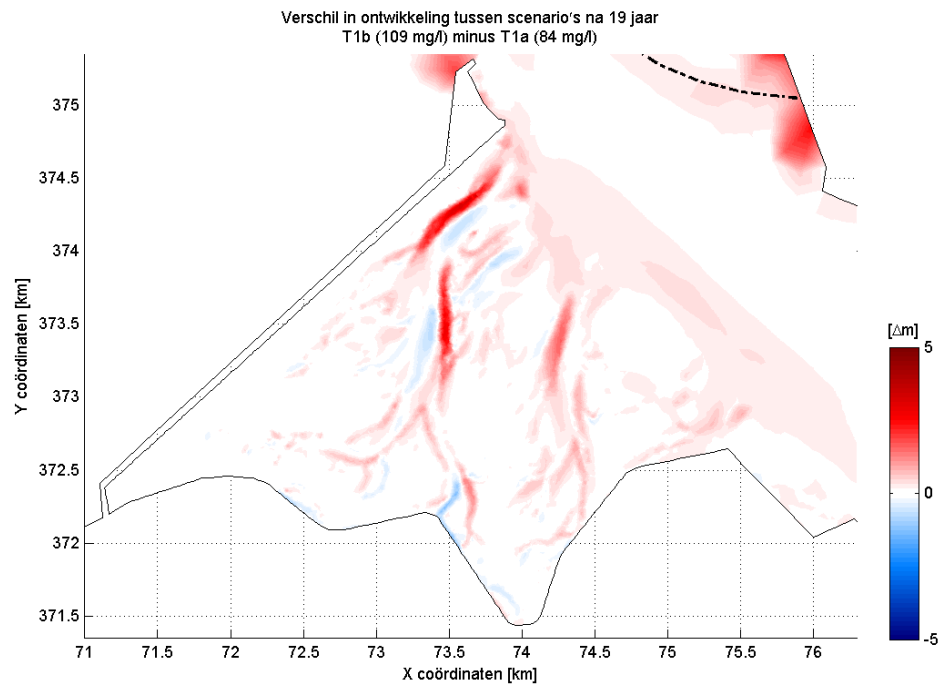
Figuur 3.10: Bodem aan het eind van de berekening voor scenario T1b.



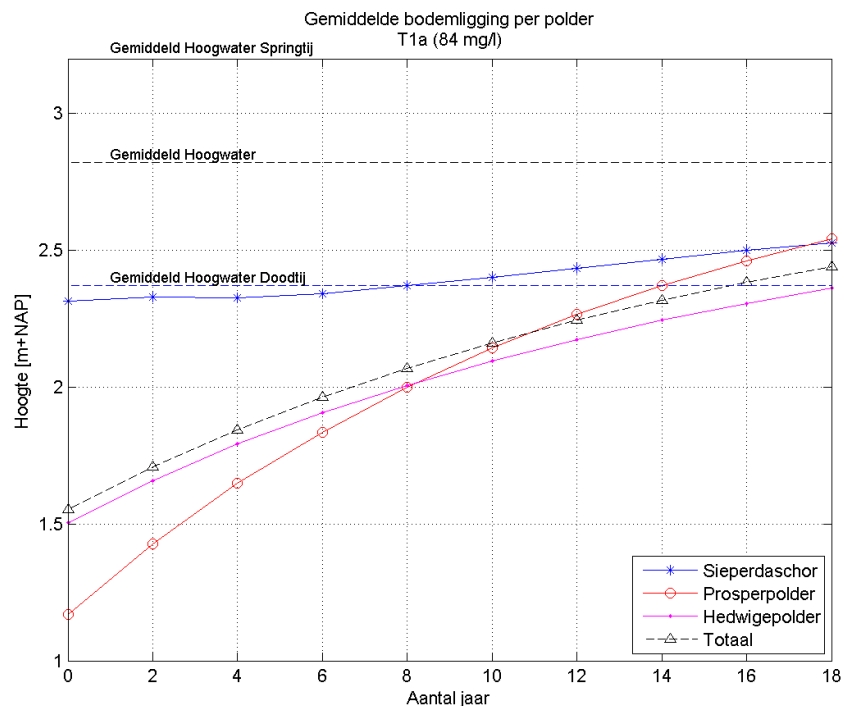
Figuur 3.11: Bodemontwikkeling na 19 jaar voor scenario T1a. In de rode gebieden treedt sedimentatie op; in de blauwe erosie.



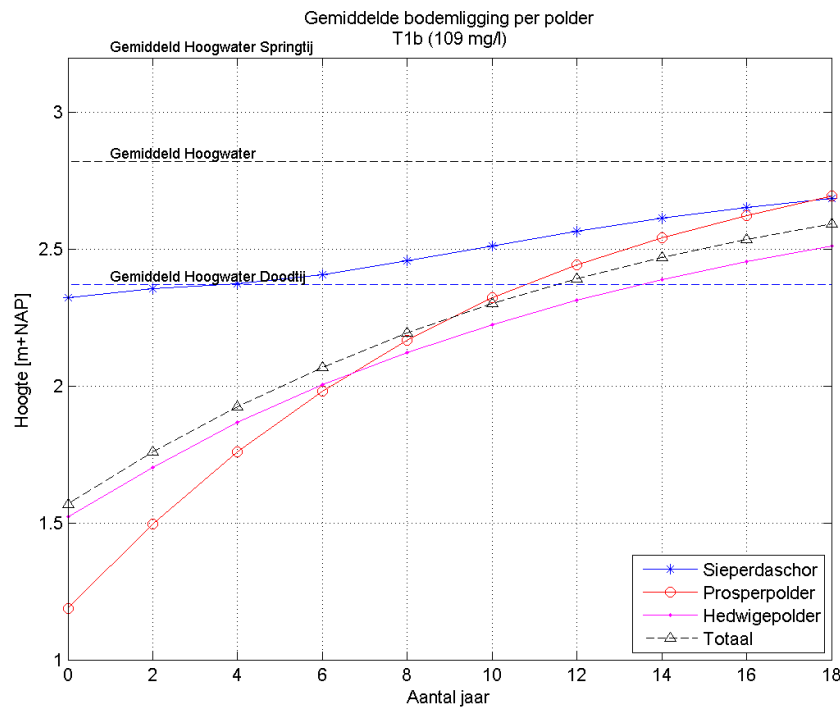
Figuur 3.12: Bodemontwikkeling na 19 jaar voor scenario T1b. In de rode gebieden treedt sedimentatie op; in de blauwe erosie.



Figuur 3.13: Verschil in bodemontwikkeling tussen beide ontpolderingsscenario's na 19 jaar. In de rode gebieden treedt in T1b meer sedimentatie/minder erosie op dan in T1a; in de blauwe gebieden treedt minder sedimentatie/meer erosie op in T1b dan in T1a.



Figuur 3.14: Gemiddelde hoogte in de afzonderlijke polders voor scenario T1a. Geulen zijn in het gemiddelde meegenomen, dijken niet. De gemiddelde hoogwaterstand bij gemiddeld tij, springtij en doottij zijn eveneens gepresenteerd.



Figuur 3.15: Gemiddelde hoogte in de afzonderlijke polders voor scenario T1b. Geulen zijn in het gemiddelde meegenomen, dijken niet. De gemiddelde hoogwaterstand bij gemiddeld tij, springtij en doottij zijn eveneens gepresenteerd.

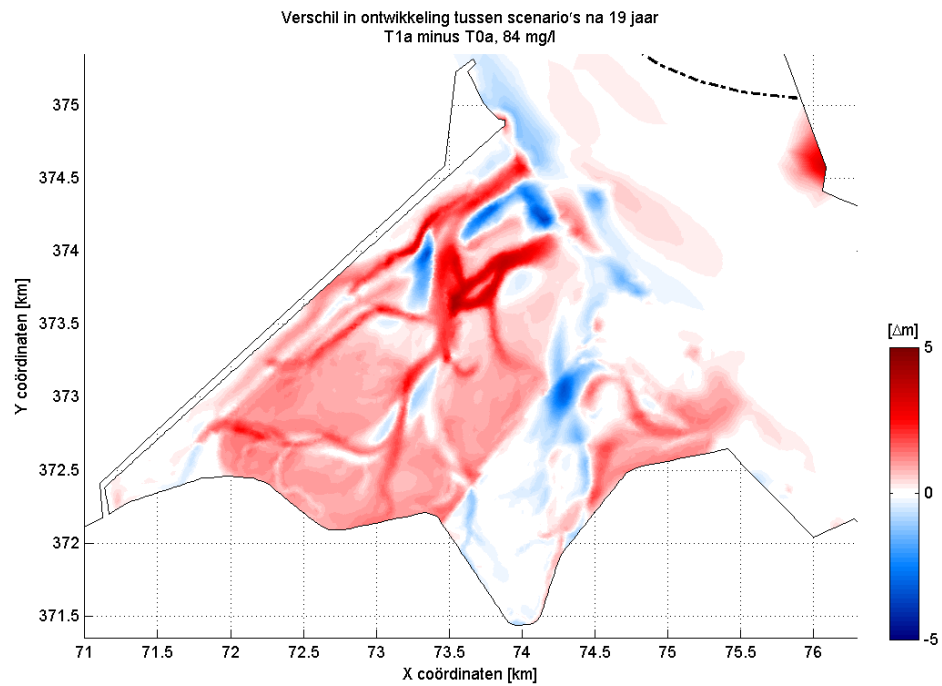
3.1.3 Verschillen tussen de scenario's

Om de verschillen in bodemontwikkeling van de verschillende scenario's ten opzichte van elkaar te kunnen kwantificeren, is het verschil in bodemontwikkeling tussen T0a en T1a getoond in Figuur 3.16. Figuur 3.17 geeft het verschil tussen T0b en T1b. Ook hier geven de rode gebieden aan dat er in het ene scenario (T1a, T1b) meer sedimentatie of minder erosie is opgetreden dan in het andere (T0a, T0b). In de blauwe gebieden treedt minder sedimentatie of meer erosie op. Daarnaast is de gemiddelde bodemligging voor de Hedwigepolder (Figuur 3.18) en de Prosperpolder (Figuur 3.19) voor de vier verschillende scenario's gepresenteerd.

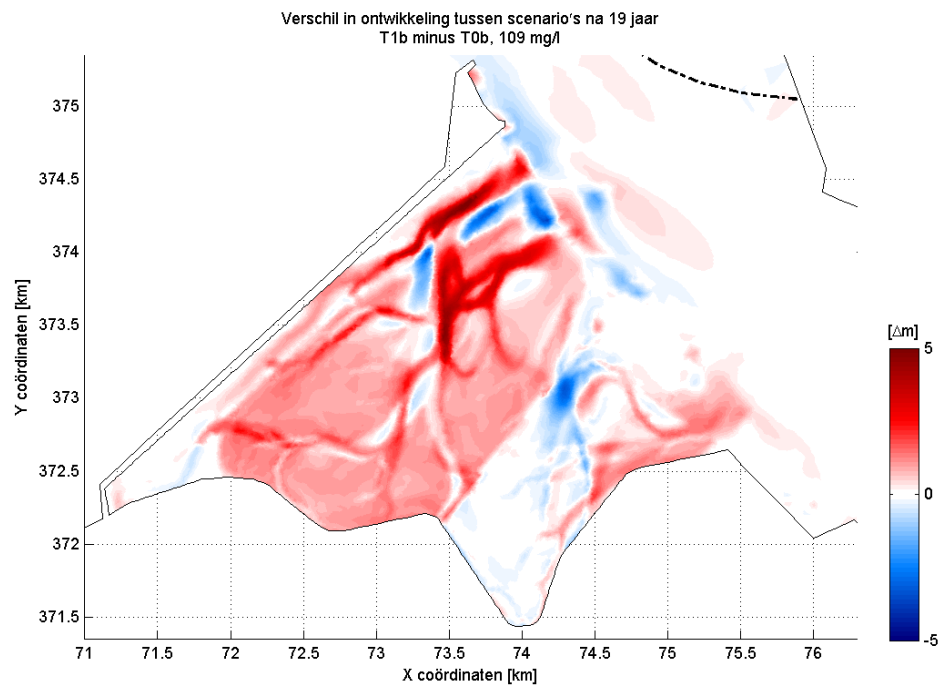
In de Westerschelde is het erosie-/sedimentatiepatroon voor de vier scenario's weinig onderscheidend. Ter plaatse van de Hedwigepolder treedt aan de Westerschelde oever voor T1a en T1b meer erosie op dan in T0a en T0b, zie Figuur 3.16 en Figuur 3.17.

In de Hedwigepolder is de morfologische ontwikkeling in T0a en T0b uiteraard gelijk aan nul, zie Figuur 3.3, Figuur 3.4 en Figuur 3.18. Het verschil in morfologische ontwikkeling tussen T0 en T1 is daartoe exact gelijk aan de morfologische ontwikkeling in T1a (Figuur 3.11) en T1b (Figuur 3.12).

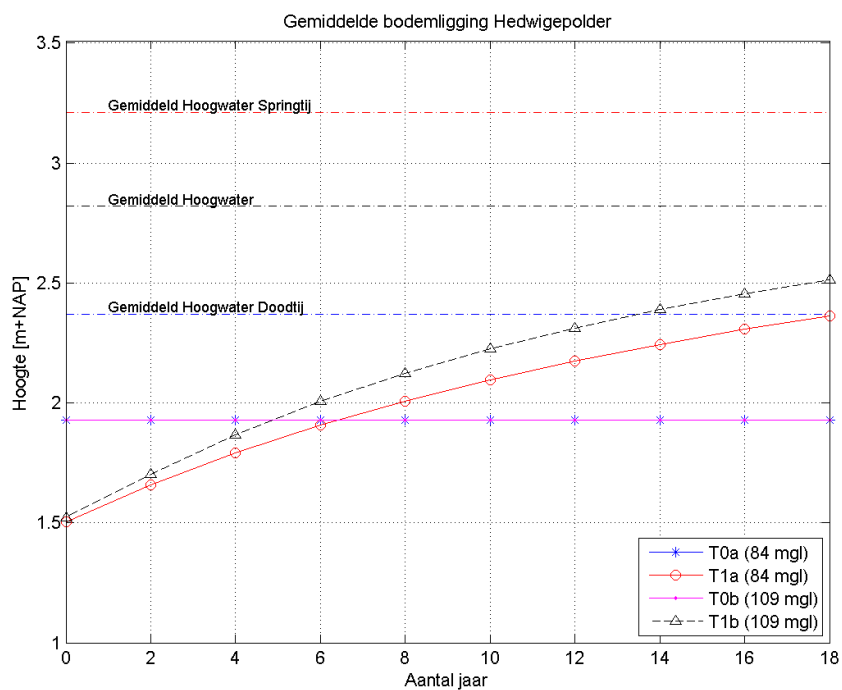
De verschillen in morfologische ontwikkeling in de westelijke helft van de Prosperpolder zijn klein tussen scenario's T0a en T1a (Figuur 3.16) en scenario's T0b en T1b (Figuur 3.17). De zichtbare verschillen kunnen gerelateerd worden aan een andere ligging van de geulen, die ontstaan doordat de Prosperpolder in T1a en T1b, in tegenstelling tot T0a en T0b, grotendeels ontwaterd wordt via de Hedwigepolder. In de oostelijke helft van de Prosperpolder zijn de verschillen groter, eveneens door een andere ligging van de geulen. De sedimentatie van de polder als geheel is zowel in T0a als in T1a vrijwel gelijk (verschil 10 cm over 20 jaar), zie ook Figuur 3.19.



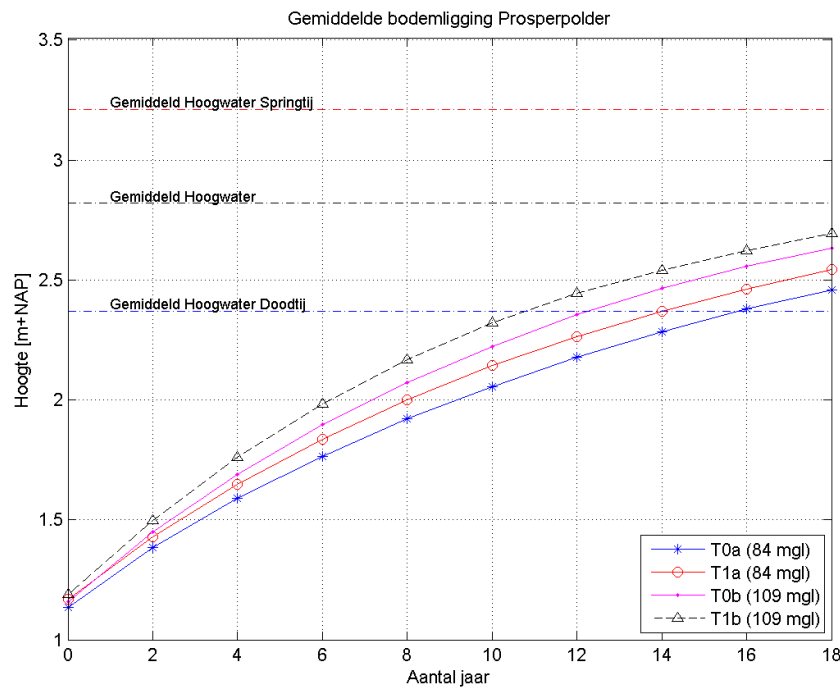
Figuur 3.16: Vershil in bodemontwikkeling tussen scenario T1a en T0a. In de rode gebieden treedt in T1a meer sedimentatie/minder erosie op dan in T0a; in de blauwe gebieden treedt in T1a minder sedimentatie/meer erosie op dan in T0a.



Figuur 3.17: Vershil in bodemontwikkeling tussen scenario T1b en T0b. In de rode gebieden treedt in T1a meer sedimentatie/minder erosie op dan in T0b; in de blauwe gebieden treedt in T1a minder sedimentatie/meer erosie op dan in T0b.



Figuur 3.18: Gemiddelde hoogte in de Hedwigepolder voor alle scenario's. Geulen zijn in het gemiddelde meegenomen, dijken niet. De gemiddelde hoogwaterstand bij gemiddeld tij, springtij en doottij zijn eveneens gepresenteerd.



Figuur 3.19: Gemiddelde hoogte in de Prosperpolder voor alle scenario's. Geulen zijn in het gemiddelde meegenomen, dijken niet. De gemiddelde hoogwaterstand bij gemiddeld tij, springtij en doottij zijn eveneens gepresenteerd.

3.1.4 Conclusies

Aan het eind van de 20 jaar durende morfologische simulatie hebben de hoger gelegen delen van de polders in alle vier de scenario's het gemiddeld hoogwaterpeil bereikt. De polders zijn aan stevige sedimentatie onderhevig, en zijn bezig te verlanden. De scenario's zijn hierin weinig onderscheidend. Kleine verschillen zijn aanwezig in de mate waarin de hooggelegen delen van de polders aangroeien richting de Schelde.

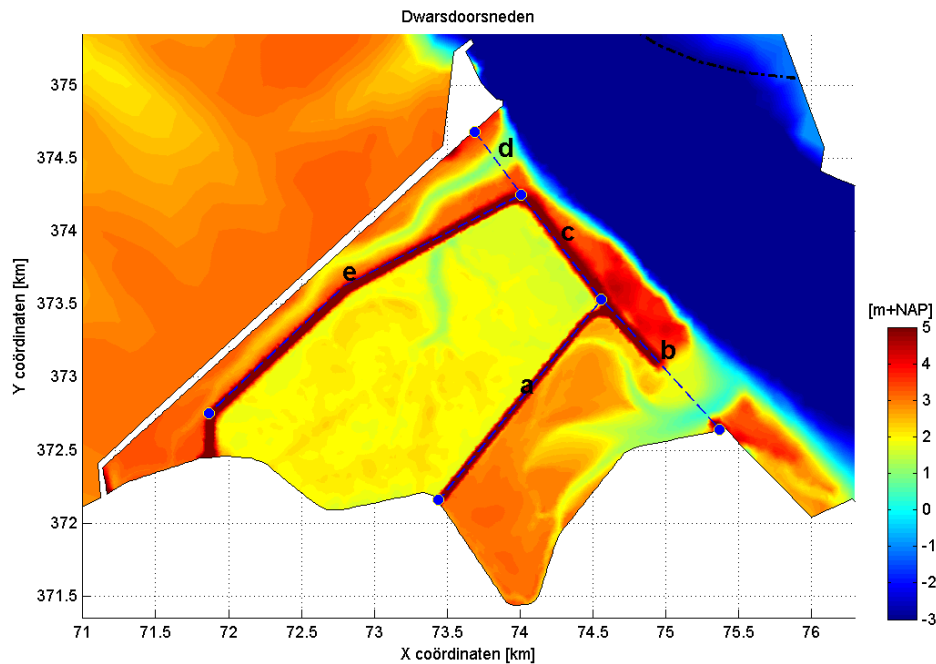
In de initieel aangelegde geulen heeft eveneens sedimentatie plaatsgevonden. Deze geulen zijn na 20 jaar beduidend smaller en ondieper geworden dan in de initiële situatie. Dit komt doordat het gebied sterk gesedimenteerd is, met een evenredige afname van de komberging, waardoor de geulen grotendeels hun functie verloren hebben over de tijd. Het wel of niet ontpolderen van de Hedwigepolder levert een totaal verschillende ligging van de geulen op in de Prosperpolder.

Doordat de hoogte van hogere delen in de polders aan het eind van de berekening gelijk is aan het gemiddelde hoogwaterniveau, inunderen delen van de polders aan het eind van de berekening alleen nog tijdens springtij en stormen. De aanvoer van sediment naar deze hoger gelegen delen van de polder kan daardoor alleen nog plaatsvinden tijdens springtij en storm condities. De scenario's tonen dat de sedimentatie van de polders sneller optreedt bij een hogere achtergrondconcentratie van het slib.

Ook is de sedimentatiesnelheid aan het begin van de berekening (eerste 5 jaar) hoger dan aan het eind van de berekening. De sedimentatie in de Hedwigepolder bedraagt gemiddeld 85 cm tot 105 cm in 19 jaar tijd (4,5 à 5,5 cm/jaar). In de Prosperpolder bedraagt de sedimentatie 135 cm tot 150 cm (7 à 8 cm/jaar). In de eerste 5 jaar bedraagt de sedimentatie in de Hedwigepolder 35 cm tot 45 cm (7 à 9 cm/jaar) en in de Prosperpolder 55 cm tot 65 cm (11 à 13 cm/jaar). Dit zijn gemiddelden over de hele polder, inclusief de geulen.

3.2 Sediment transporten

In deze paragraaf worden de zand- en slibtransporten door verschillende dwarsdoorsneden besproken. Ook komt de totale volumeverandering van de afzonderlijke polders aan bod. Hierbij wordt zowel de situatie na 5 jaar als na 19 jaar behandeld. De locaties van de gebruikte dwarsdoorsneden worden in Figuur 3.20 weergegeven.



Figuur 3.20: Dwarsdoorsneden gebruikt voor de bepaling van sedimenttransporten in de verschillende polders.

3.2.1 Scenario's T0a en T0b

Het cumulatieve zandtransport na 19 jaar door de verschillende doorsneden uit Figuur 3.20 wordt voor scenario T0a grafisch weergegeven in Figuur 3.21 en voor scenario T0b in Figuur 3.22. De figuur toont dat er alleen zandtransport ter plaatse van de Prosperpolder (doorsnede b) en het Sieperdaschor (doorsnede d) optreedt. Bij de Prosperpolder is sprake van import van zand. Door de dijken om de Hedwigepolder vindt er logischerwijs geen zandtransport de Hedwigepolder in of uit plaats.

Het slibtransport door de verschillende doorsneden wordt gegeven in Figuur 3.23 en Figuur 3.24. Ook in deze figuren is er alleen transport door doorsnede b en d, omdat de Hedwigepolder omdijkt is. Zowel bij doorsnede b als d is sprake van import van slib. In de Prosperpolder is de bijdrage van slib aan de totale import van sediment beduidend hoger dan de bijdrage van zand. Een verschil in de slibimport tussen T0a en T0b in de Prosperpolder is in de figuren duidelijk zichtbaar. In T0b, waar de achtergrondconcentratie van slib hoger is dan in T0a, is ook het slibtransport de Prosperpolder in hoger. De invangpercentages bedragen in beide scenario's voor zowel zand als slib 50 à 60%. Het zandaandeel in de sedimentatie is ongeveer 15 - 20%.

Het totale sedimenttransport is grafisch weergegeven in Figuur 3.25 en Figuur 3.26. In de Prosperpolder treedt import van sediment op, waarbij vooral de slibfractie van belang is.

Het totale cumulatieve sedimenttransport na 19 jaar en de invloed van het transport op de gemiddelde bodemligging is weergegeven in Tabel 3.1. In deze tabel wordt ook het cumulatieve

sedimenttransport na 5 jaar weergegeven. Opvallend is dat ruim 40% van het totale transport in de eerste 5 jaar plaatsvindt.

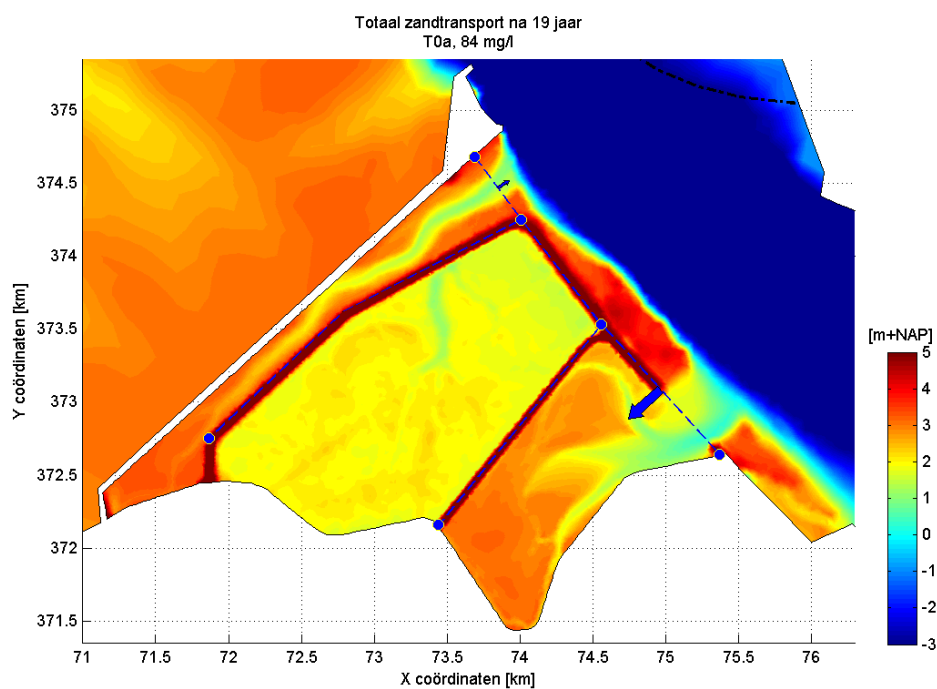
Het percentage slib in de toplaag van de bodem aan het eind van de berekening is voor scenario T0a weergegeven in Figuur 3.27 en voor scenario T0b in Figuur 3.28. Aan het begin van de berekening was het slibpercentage in het gehele morfologisch actieve gebied gelijk aan 2%, zie ook paragraaf 2.6.

De figuren tonen dat het slibpercentage in de geulen relatief laag is. Op deze plekken is weinig tot geen slib bezonken. In de Prosperpolder komen buiten de geulen hoge slibpercentages in de bodem voor. Dit zijn de plekken waar veel sedimentatie (aanslibbing) is opgetreden. Waar deze percentages boven de 50% uitkomen, is de slibfractie sterk dominant in de sedimentatie. De geulen blijven door hogere stroomsnelheden zandiger.

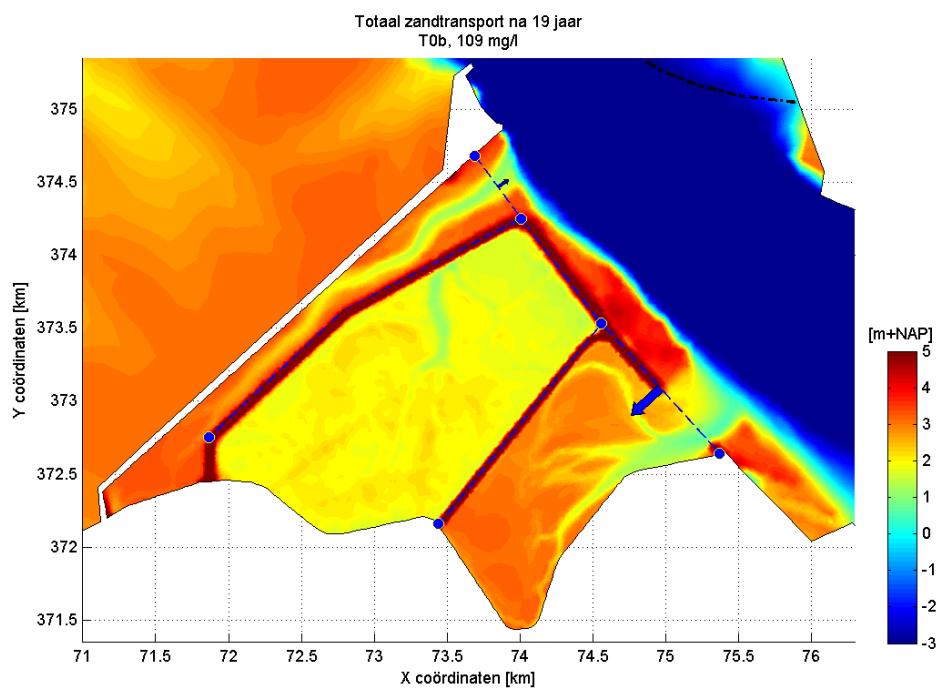
Tabel 3.1: Netto volumeverandering van de polders in het interessegebied voor T0a en T0b. De bodemverandering waar deze volumeverandering toe leidt is eveneens weergegeven.

		Hedwigepolder		Prosperpolder	
	Oppervlakte [ha]	317		162	
		Sedimentatie [10 ⁶ m ³]	Gem. Bodem verandering [m]	Sedimentatie [10 ⁶ m ³]	Gem. Bodem verandering [m]
T0a	Na 5 jaar	0	0	0,87	0,54
	Na 19 jaar	0	0	2,11	1,30
T0b	Na 5 jaar	0	0	1,02	0,63
	Na 19 jaar	0	0	2,34	1,44

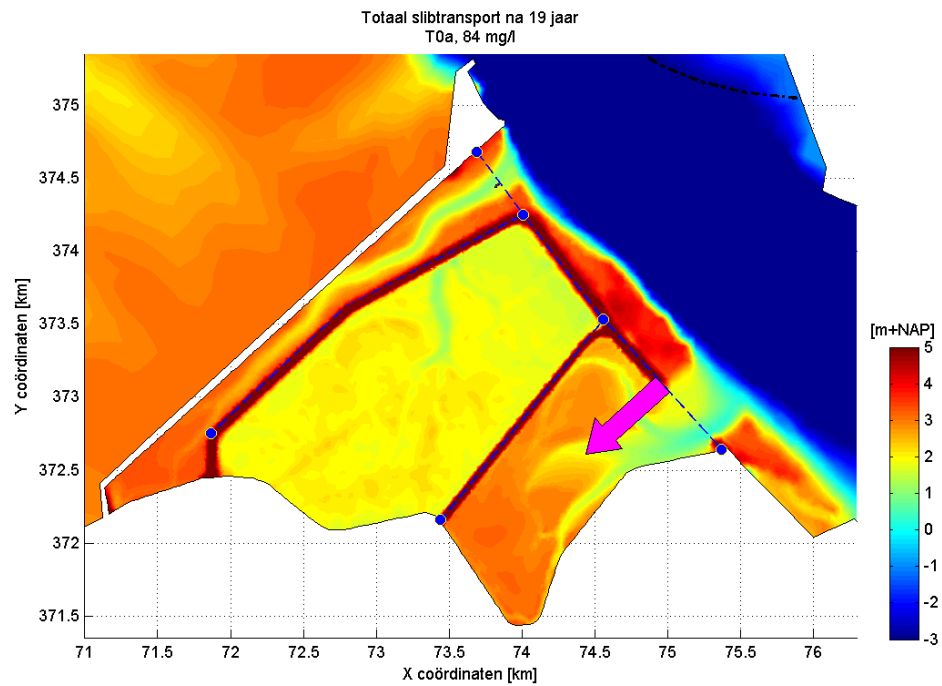
In Figuur 3.28 (scenario T0b, 109 mg/l) zijn de slibpercentages hoger dan in Figuur 3.27 (scenario T0a, 84 mg/l). Een hogere slibconcentratie leidt tot een hogere aanslibbing, en zorgt ervoor dat de dominantie van de slibfractie ten opzichte van de zandfractie sterker wordt.



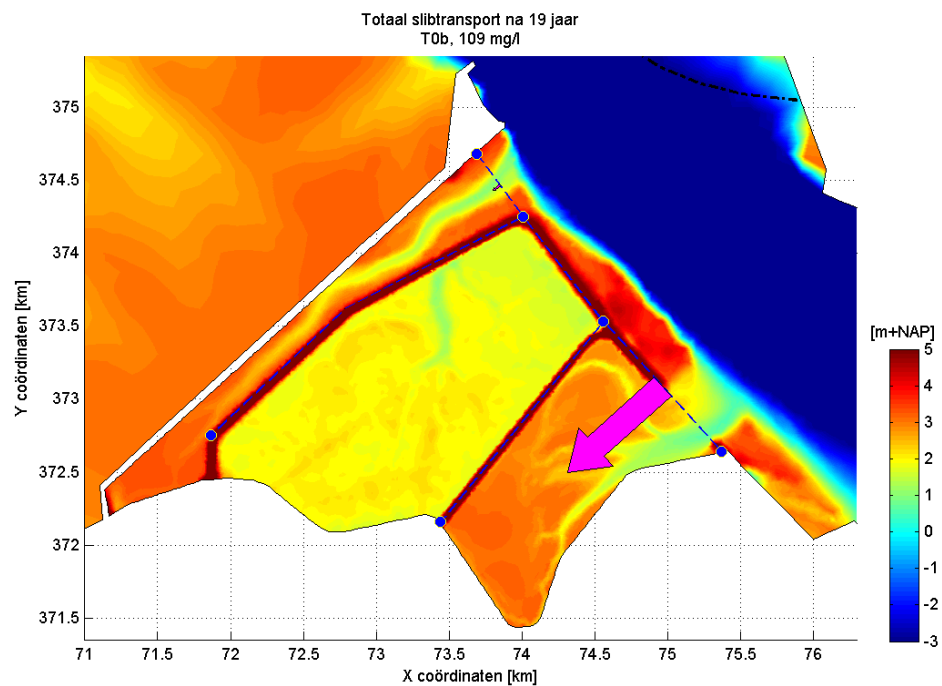
Figuur 3.21: Cumulatief zandtransport door enkele dwarsdoorsneden in de Hedwige- en Prosperpolder aan het eind van de modelberekening voor scenario T0a.



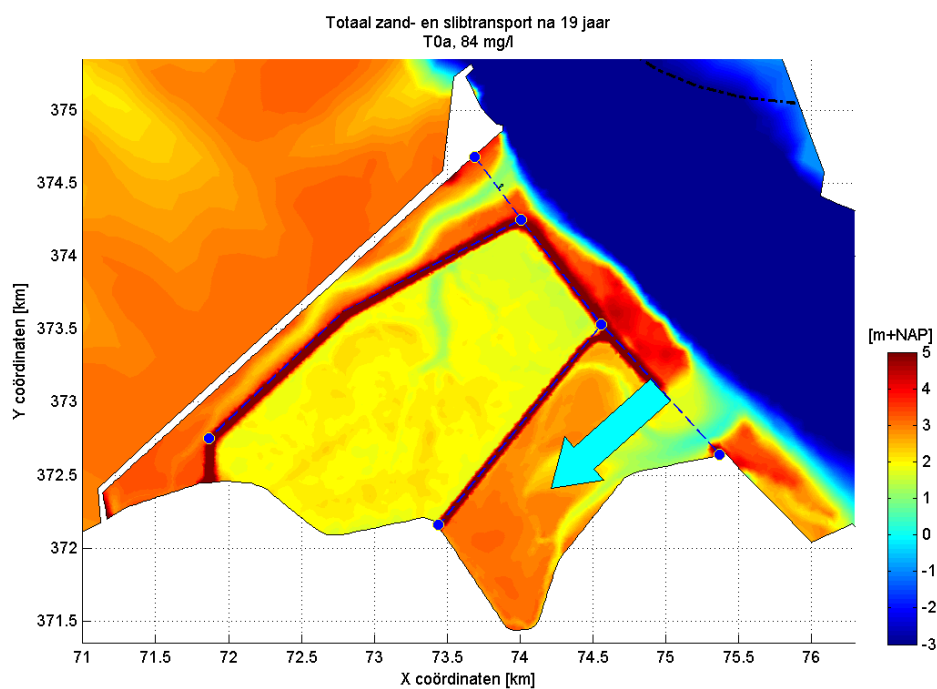
Figuur 3.22: Cumulatief zandtransport door enkele dwarsdoorsneden in de Hedwige- en Prosperpolder aan het eind van de modelberekening voor scenario T0b.



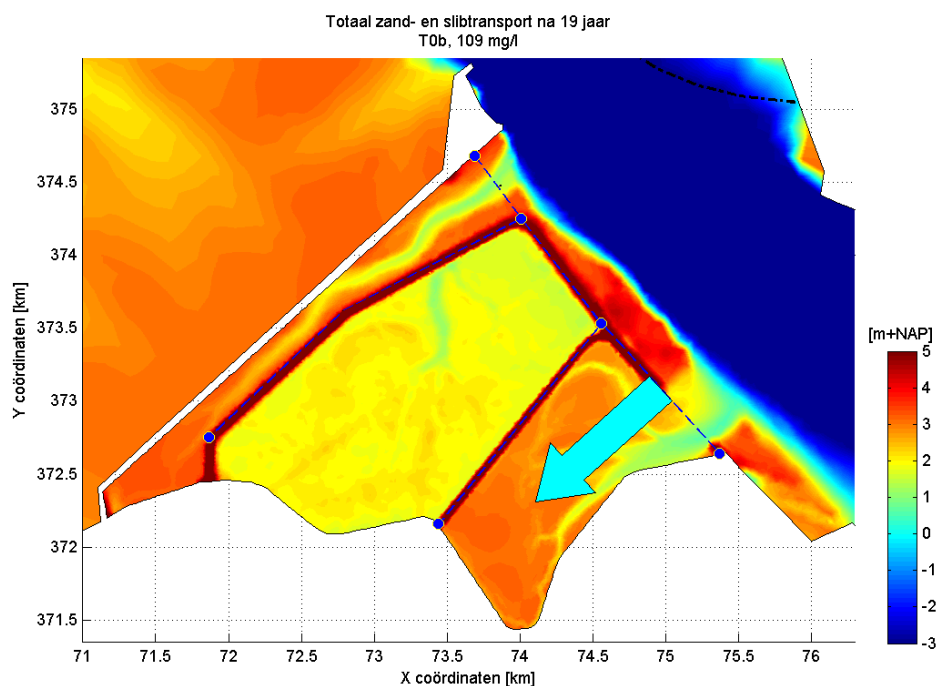
Figuur 3.23: Cumulatief slijbtransport door enkele dwarsdoorsneden in de Hedwig- en Prosperpolder aan het eind van de modelberekening voor scenario T0a.



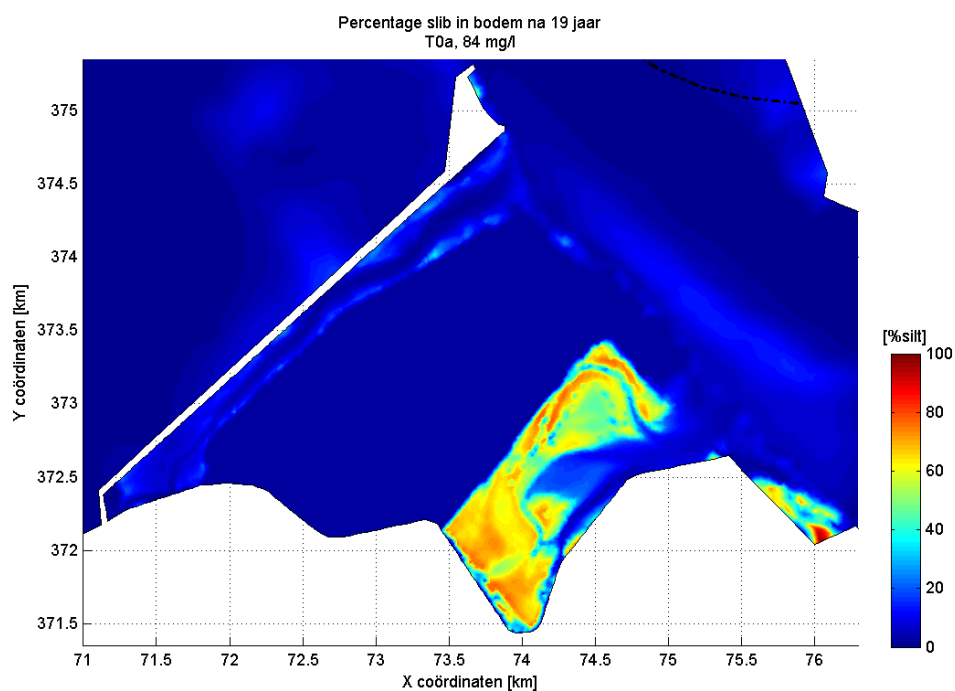
Figuur 3.24: Cumulatief slijbtransport door enkele dwarsdoorsneden in de Hedwig- en Prosperpolder aan het eind van de modelberekening voor scenario T0b.



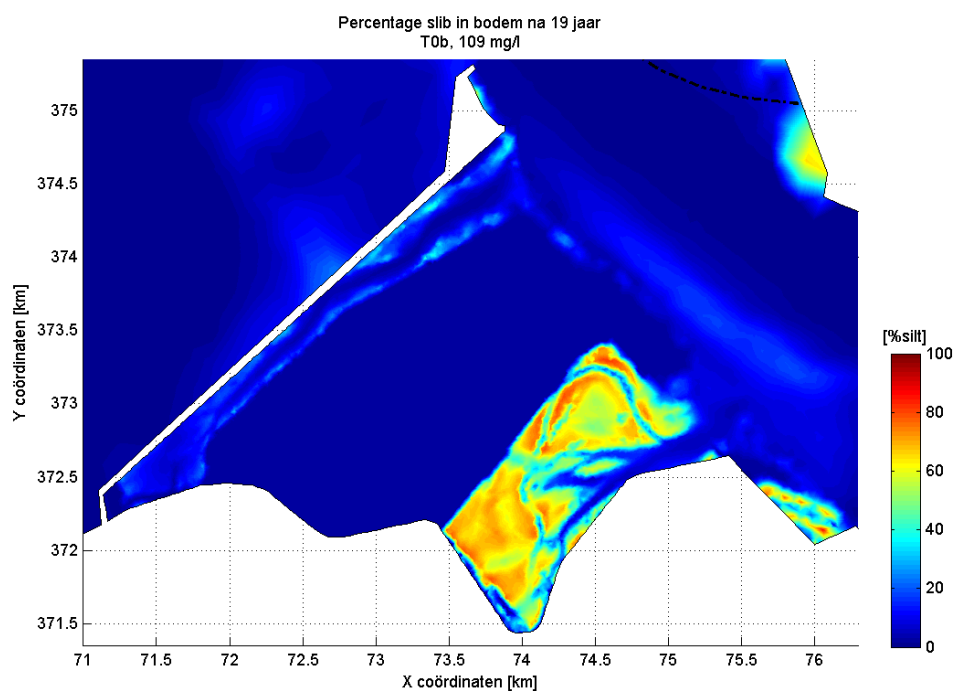
Figuur 3.25: Cumulatief zand- en slibtransport door enkele dwarsdoorsneden in de Hedwig- en Prosperpolder aan het eind van de modelberekening voor scenario T0a.



Figuur 3.26: Cumulatief zand- en slibtransport door enkele dwarsdoorsneden in de Hedwig- en Prosperpolder aan het eind van de modelberekening voor scenario T0b.



Figuur 3.27: Percentage silt in de toplaag van de bodem aan het eind van de modelberekening voor scenario T0a.



Figuur 3.28: Percentage silt in de toplaag van de bodem aan het eind van de modelberekening voor scenario T0b.

3.2.2 Scenario's T1a en T1b

Voor de scenario's T1a en T1b zijn de cumulatieve zandtransporten na 19 jaar door de verschillende doorsneden weergegeven in Figuur 3.29 en Figuur 3.30. In beide scenario's treedt import van zand door zowel doorsnede b, c als d op. Door doorsnede a en e treedt zuidwaarts zandtransport op. In zowel de Hedwigepolder als de Prosperpolder treedt netto import van zand op.

Het slibtransport door de verschillende dwarsdoorsneden wordt gepresenteerd in Figuur 3.31 en Figuur 3.32. De transportrichtingen van het slib zijn gelijk aan die van zand: door doorsnede b, c en d treedt import van slib op, en door doorsnede a en e treedt zuidwaarts transport van het slib op. Een hogere achtergrondconcentratie van slib leidt tot beduidend hogere slibtransporten, vergelijk Figuur 3.31 en Figuur 3.32.

Het totale sedimenttransport wordt getoond in Figuur 3.33 en Figuur 3.34. In beide polders treedt import van sediment op. De bijdrage van de slibfractie is hierbij maatgevend (80 à 85%). Het totale sedimenttransport en de invloed van het transport op de gemiddelde bodemligging is weergegeven in Tabel 3.2. In deze tabel wordt ook het cumulatieve sedimenttransport na 5 jaar weergegeven. In de Hedwigepolder vindt ongeveer 40% van het totale transport in de eerste 5 jaar plaats. In de Hedwigepolder vindt volgens het model een sedimentatie plaats van 2,8 miljoen m³ voor scenario T1a en 3,2 miljoen m³ voor scenario T1b na 19 jaar. In de Prosperpolder zijn deze getallen 2,3 en 2,5 miljoen m³. In vergelijking met de T0 scenario's is de sedimentatie in de Prosperpolder iets hoger in de T1 scenario's, vergelijk Tabel 3.1.

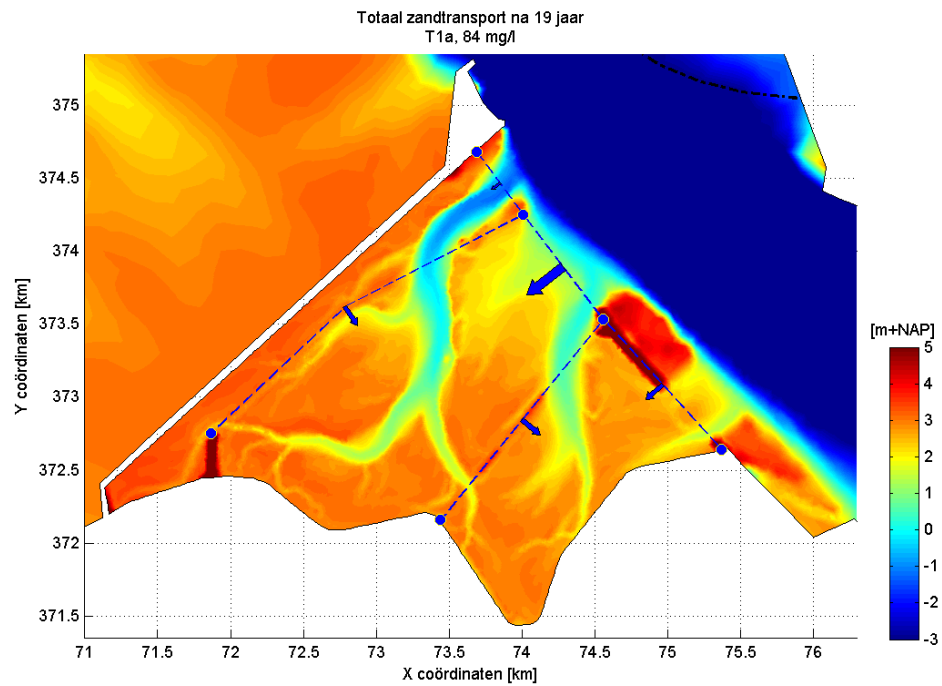
Tabel 3.2: Netto volumeverandering van de polders in het interessegebied voor T1a en T1b. De bodemverandering waar deze volumeverandering toe leidt is eveneens weergegeven.

		Hedwigepolder		Prosperpolder	
	Opper-vlakte [ha]	317		162	
		Sedimentatie [10 ⁶ m ³]	Gem. bodem verandering [m]	Sedimentatie [10 ⁶ m ³]	Gem. bodem verandering [m]
T1a	Na 5 jaar	1,13	0,35	0,94	0,58
	Na 19 jaar	2,79	0,88	2,25	1,38
T1b	Na 5 jaar	1,35	0,42	1,11	0,69
	Na 19 jaar	3,21	1,01	2,45	1,51

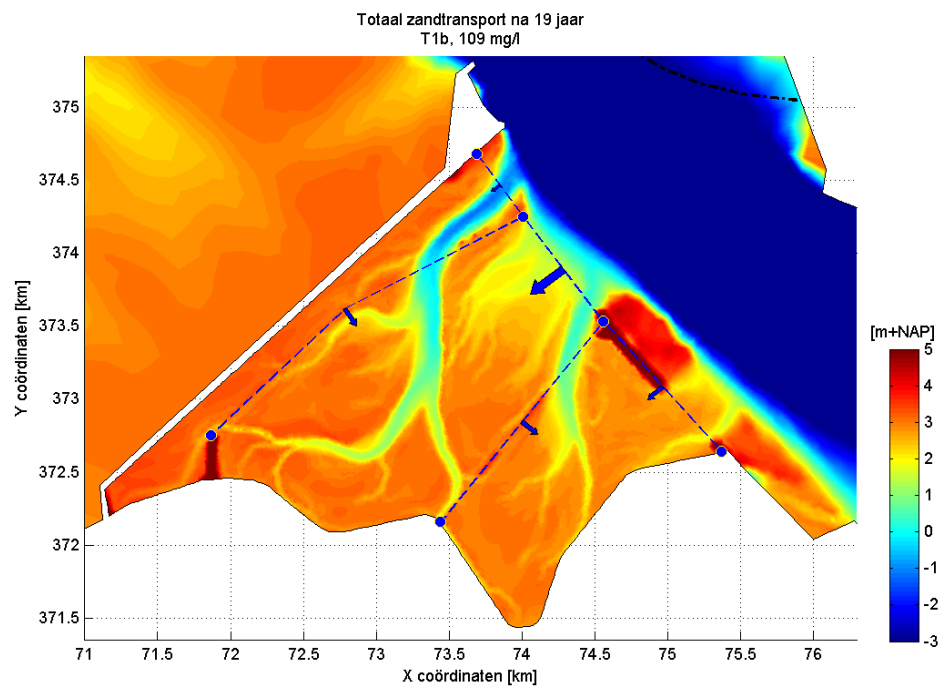
Het percentage slib in de toplaag van de bodem na 19 jaar is voor scenario T1a weergegeven in Figuur 3.35 en voor scenario T1b in Figuur 3.36. Aan het begin van de berekening was het slibpercentage in het gehele morfologisch actieve gebied gelijk aan 2%, zie ook paragraaf 2.6.

Ook hier tonen de figuren een laag slibpercentage in de geulen, en een hoog slibpercentage in de omringende gebieden. In de omringende gebieden treedt veel sedimentatie op. De geulen blijven zandiger door de hogere stroomsnelheden die in de geulen voorkomen. Ook gezien de hoge slibpercentages in de hoger gelegen delen kan worden geconcludeerd dat de aanslibbing dominant is over de aanzanding (80 - 85% slib).

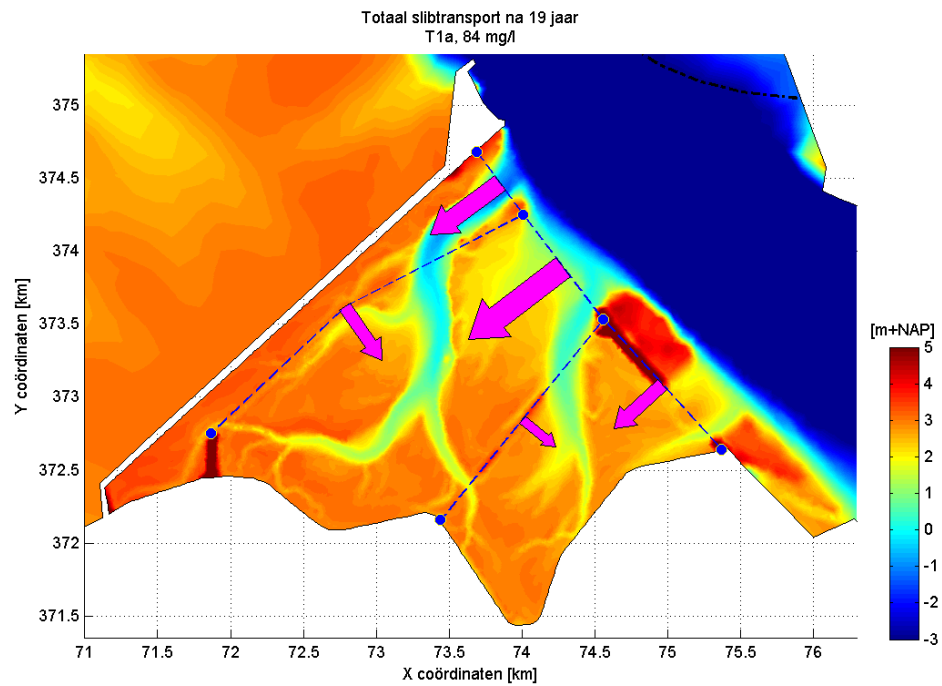
In Figuur 3.35 (scenario T1b, 109 mg/l) zijn de slibpercentages hoger dan in Figuur 3.36 (scenario T1a, 84 mg/l). Een hogere slibconcentratie leidt tot een hogere aanslibbing, en zorgt ervoor dat de dominantie van de slibfractie ten opzichte van de zandfractie sterker wordt met enkele procenten.



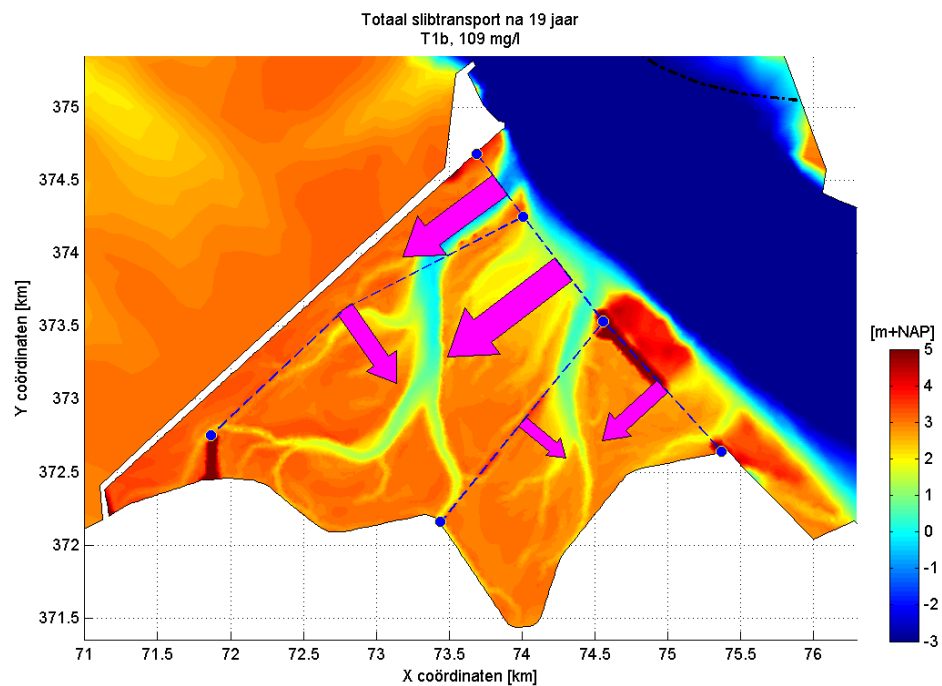
Figuur 3.29: Cumulatief zandtransport door enkele dwarsdoorsneden in de Hedwig- en Prosperpolder aan het eind van de modelberekening voor scenario T1a.



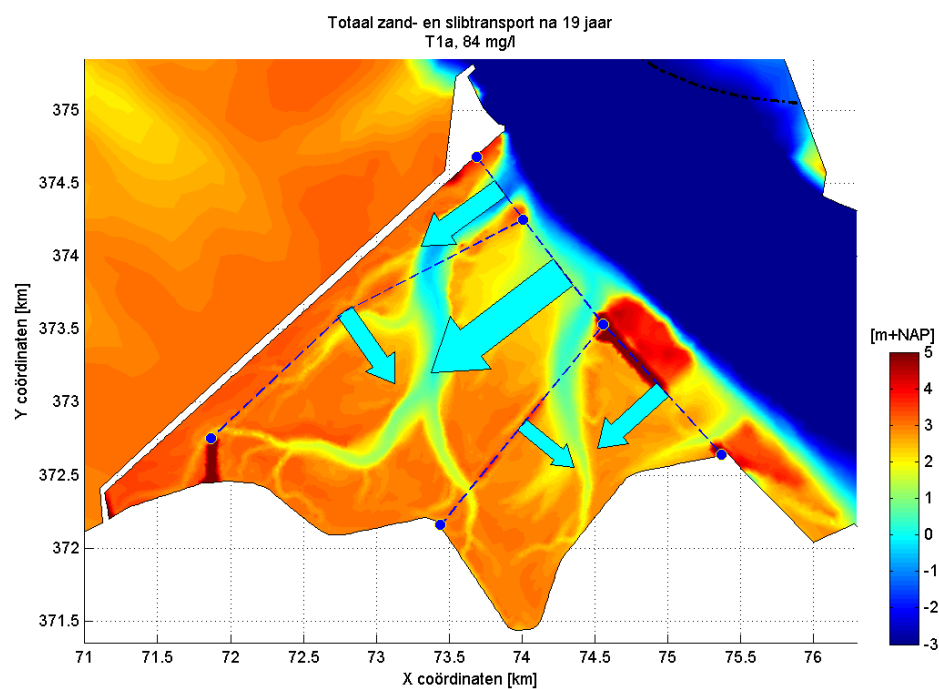
Figuur 3.30: Cumulatief zandtransport door enkele dwarsdoorsneden in de Hedwig- en Prosperpolder aan het eind van de modelberekening voor scenario T1b.



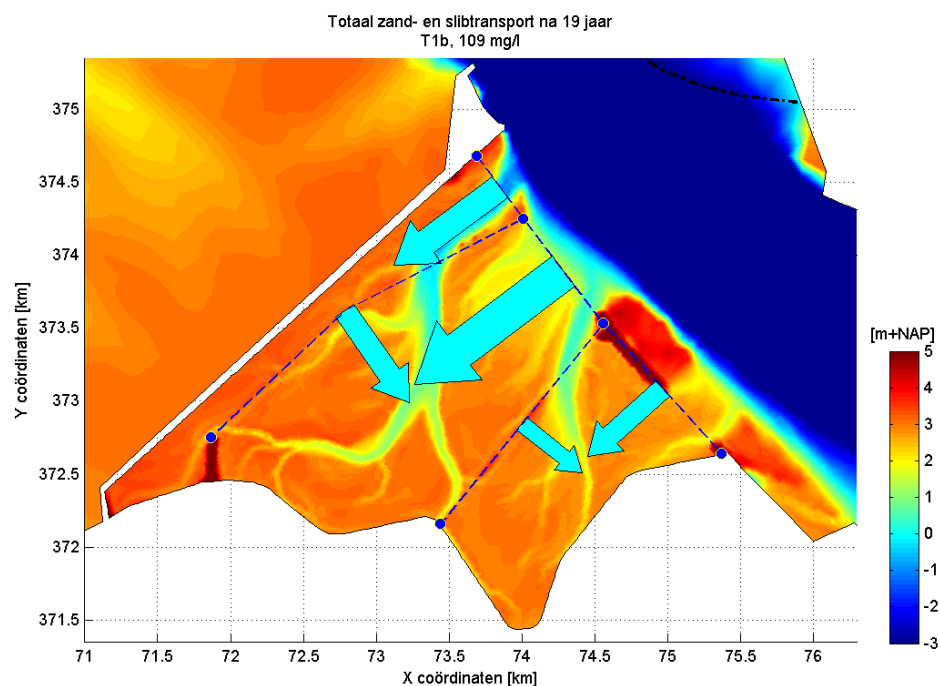
Figuur 3.31: Cumulatief slijbtransport door enkele dwarsdoorsneden in de Hedwig- en Prosperpolder aan het eind van de modelberekening voor scenario T1a.



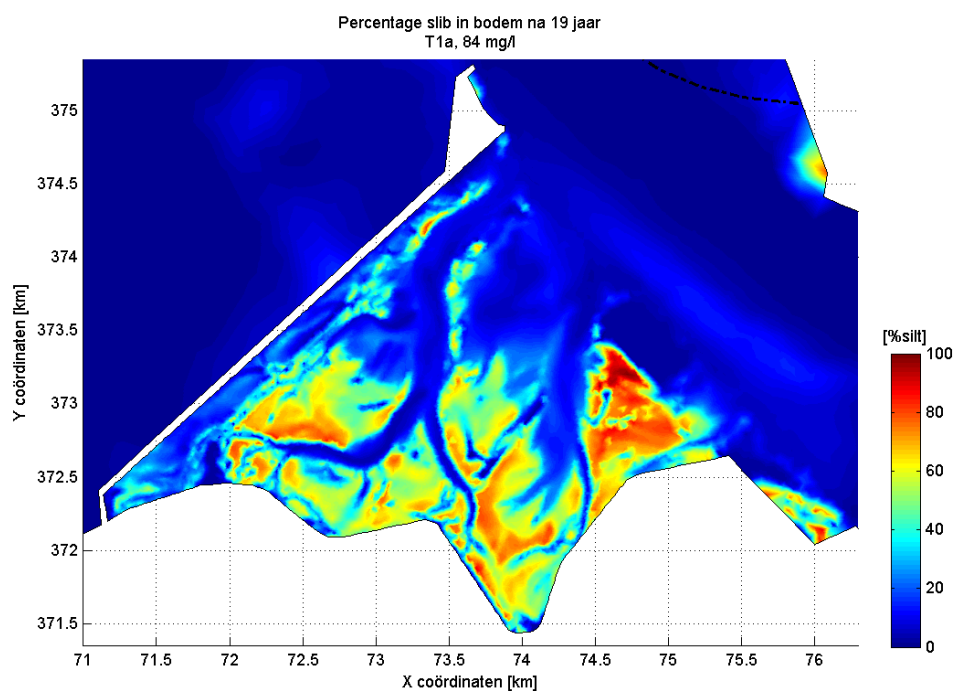
Figuur 3.32: Cumulatief slijbtransport door enkele dwarsdoorsneden in de Hedwig- en Prosperpolder aan het eind van de modelberekening voor scenario T1b.



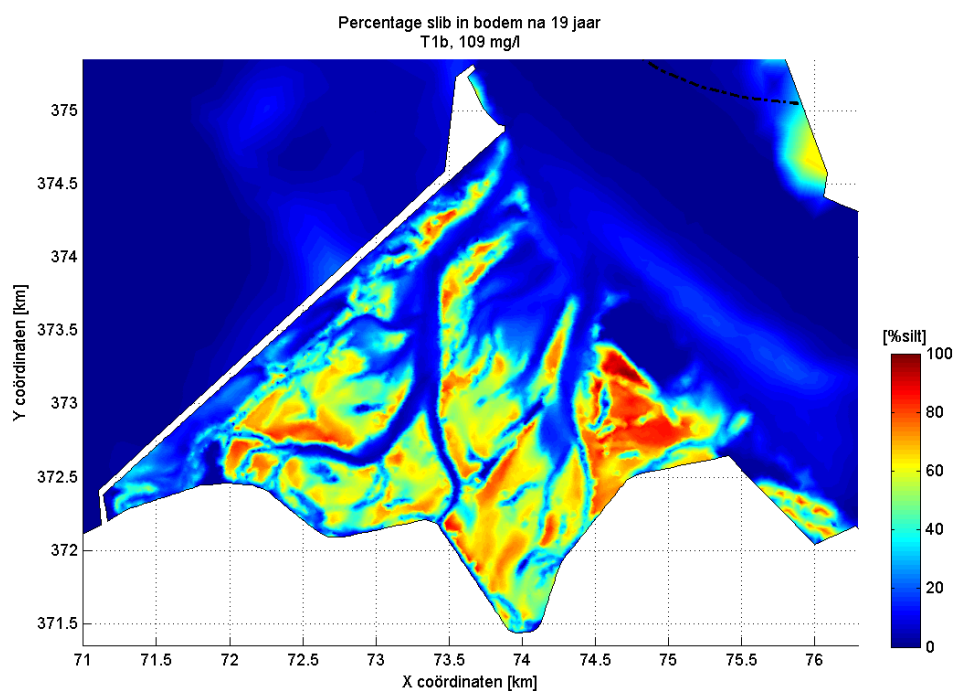
Figuur 3.33: Cumulatief zand- en slibtransport door enkele dwarsdoorsneden in de Hedwig- en Prosperpolder aan het eind van de modelberekening voor scenario T1a.



Figuur 3.34: Cumulatief zand- en slibtransport door enkele dwarsdoorsneden in de Hedwig- en Prosperpolder aan het eind van de modelberekening voor scenario T1b.



Figuur 3.35: Percentage slib in de toplaag van de bodem aan het eind van de modelberekening voor scenario T1a.



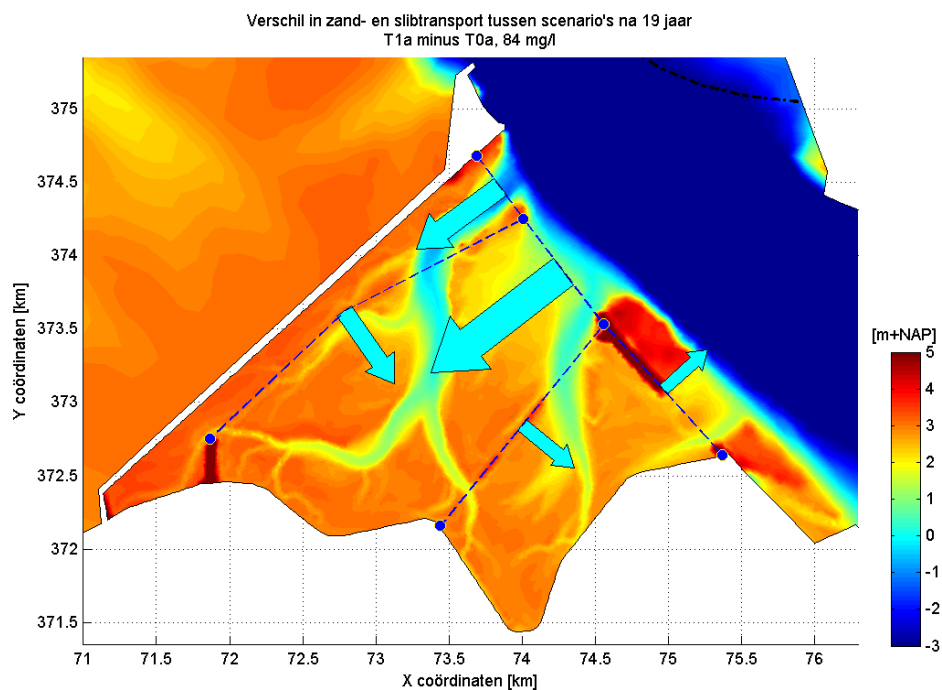
Figuur 3.36: Percentage slib in de toplaag van de bodem aan het eind van de modelberekening voor scenario T1b.

3.2.3 Verschillen tussen de scenario's

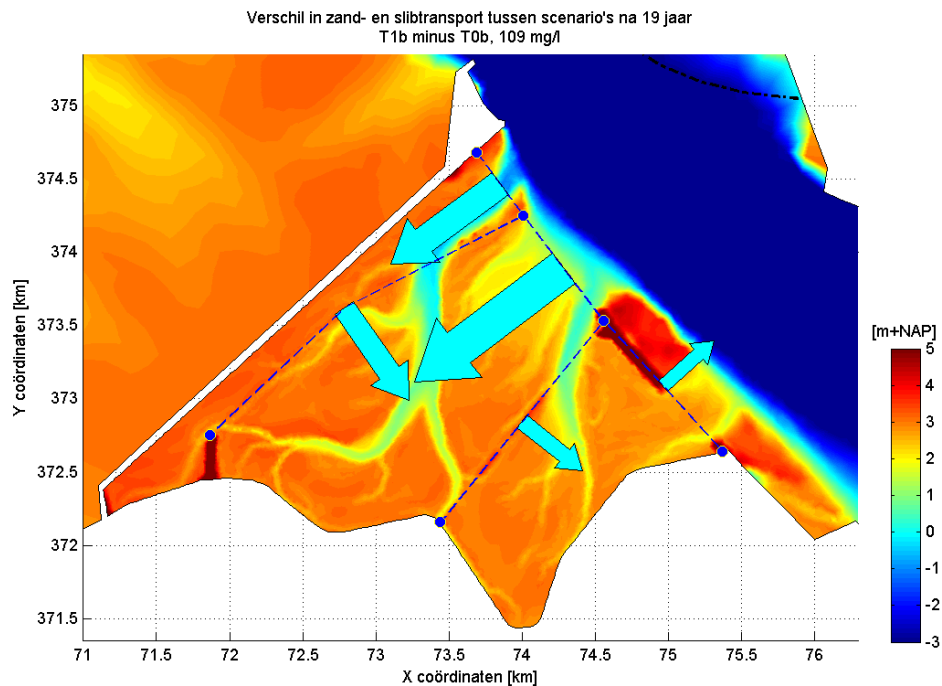
Het verschil in het totale sedimenttransport tussen scenario T1a en scenario T0a wordt weergegeven in Figuur 3.37. Figuur 3.38 geeft het verschil in sedimenttransport tussen scenario T1b en scenario T0b. In scenario T0 is de Hedwigepolder omdijkt. De transporten door doorsnede a, c en e zijn in scenario T0 gelijk aan nul. De verschillen in totaal sedimenttransport in Figuur 3.37 en Figuur 3.38 door doorsnede a, c en e zijn daardoor exact gelijk aan het sedimenttransport in scenario T1.

Opvallend is dat de import van sediment door doorsnede b in scenario T1 afneemt ten opzichte van scenario T0. Daar staat tegenover dat de import van sediment in de Prosperpolder door doorsnede a toeneemt in scenario T1. Deze toename door doorsnede a is groter dan de afname door doorsnede b, waardoor de import van sediment in de Prosperpolder in scenario T1 iets groter is dan in scenario T0.

Zowel uit onderstaande figuren als voorgaande paragrafen kan worden opgemaakt dat de transporten (import) van sediment groter worden bij een hogere slibconcentratie. Dit verschil wordt veroorzaakt door de slibfractie.



Figuur 3.37: Verschil in cumulatief zand- en slibtransport tussen scenario T1a en T0a door enkele dwarsdoorsneden in de Hedwige- en Prosperpolder aan het eind van de modelberekening.



Figuur 3.38: Verschil in cumulatief zand- en slibtransport tussen scenario T1b en T0b door enkele dwarsdoorsneden in de Hedwige- en Prosperpolder aan het eind van de modelberekening.

3.2.4 Conclusies

In de Hedwigepolder sedimenteert gedurende de modelberekening over 19 jaar ongeveer 3 Mm^3 sediment. Ongeveer 40% daarvan sedimenteert gedurende de eerste 5 jaar van de berekening. In de Prosperpolder gaat het om ruim 2 Mm^3 sediment, waarvan eveneens 40% in de eerste 5 jaar. Het volume van de import van sediment in de Prosperpolder is in scenario T1 enigszins hoger dan in scenario T0. In scenario T1 verloopt een deel van de import van sediment in de Prosperpolder via de Hedwigepolder. In scenario T0 is dit vanwege de dijken rond de Hedwigepolder niet mogelijk.

In de Hedwige- en Prosperpolder leveren zowel de zand- als de slibfractie een bijdrage aan de sedimentatie van de polders. De slibfractie levert hierbij verreweg het grootste aandeel aan de sedimentatie (80 à 85%). Zowel in de Hedwigepolder als in de Prosperpolder neemt de import van slib toe wanneer de achtergrondconcentratie van slib hoger is. Een 30% hogere slibconcentratie (84 mg/l versus 109 mg/l) leidt tot 10% tot 15% meer sedimentatie.

3.3 Hypsometrische curves

In deze paragraaf wordt ingegaan op de areaalontwikkeling van de Hedwigepolder en de Prosperpolder afzonderlijk, en het gebied als geheel. Dit wordt gedaan aan de hand van een zogenaamde hypsometrische curve, waarin de diepte uitgezet wordt tegen het cumulatieve oppervlakte van het betreffende gebied. Op deze manier is gemakkelijk af te lezen welk deel van het totale gebied een bepaalde diepte heeft, en bijvoorbeeld welk deel van het gebied geclassificeerd kan worden als intergetijdengebied. In de voorliggende studie wordt het intergetijdengebied gedefinieerd als het gebied waarvan de diepte tussen de gemiddelde laagwaterstand en de gemiddelde hoogwaterstand in ligt, zie ook paragraaf 1.3.

3.3.1 Scenario's T0a en T0b

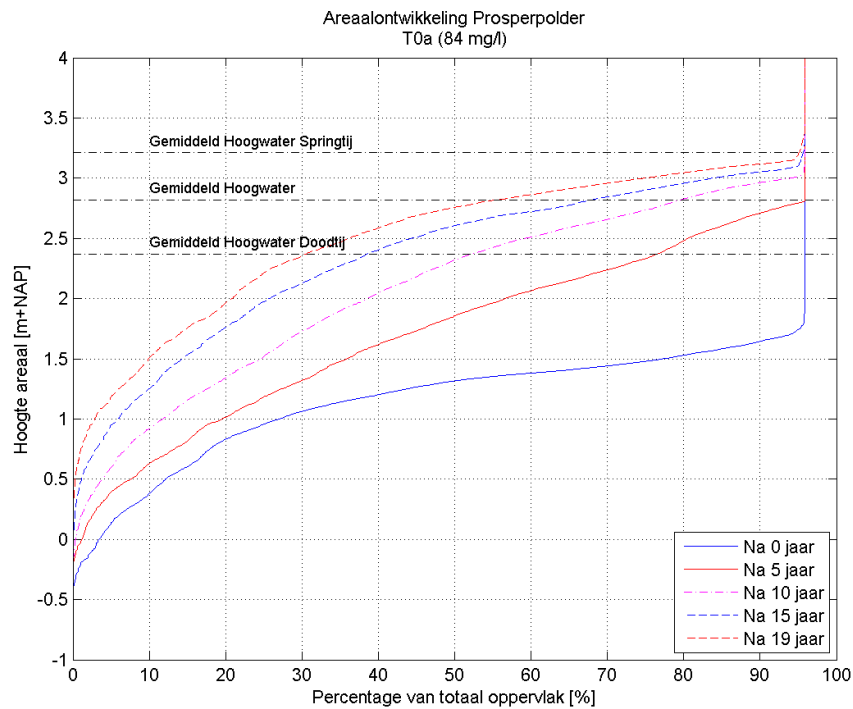
De hypsometrische curve van de Prosperpolder is om de 5 jaar in scenario T0a weergegeven in Figuur 3.39, en in scenario T0b in Figuur 3.40. De hypsometrische curve van de Hedwigepolder is niet gegeven. Omdat de Hedwigepolder in scenario T0 omdijkt is, treden er geen verandering in de curve op.

In de figuren worden de hoog- en laagwaterstanden eveneens gegeven. De figuren tonen dat het volledige areaal van de Prosperpolder boven het laagwaterpeil ligt. Dit betekent dat de gebieden of altijd droog zijn, of afwisselend droog en nat zijn. Aan de start van de berekening ligt slecht een klein deel van het areaal (4%) van de Prosperpolder boven het gemiddeld hoogwaterniveau. Dat wil niet zeggen dat deze gebieden altijd droog zijn. Een deel van de gebieden zal bijvoorbeeld tijdens springtij, of tijdens storm inunderen.

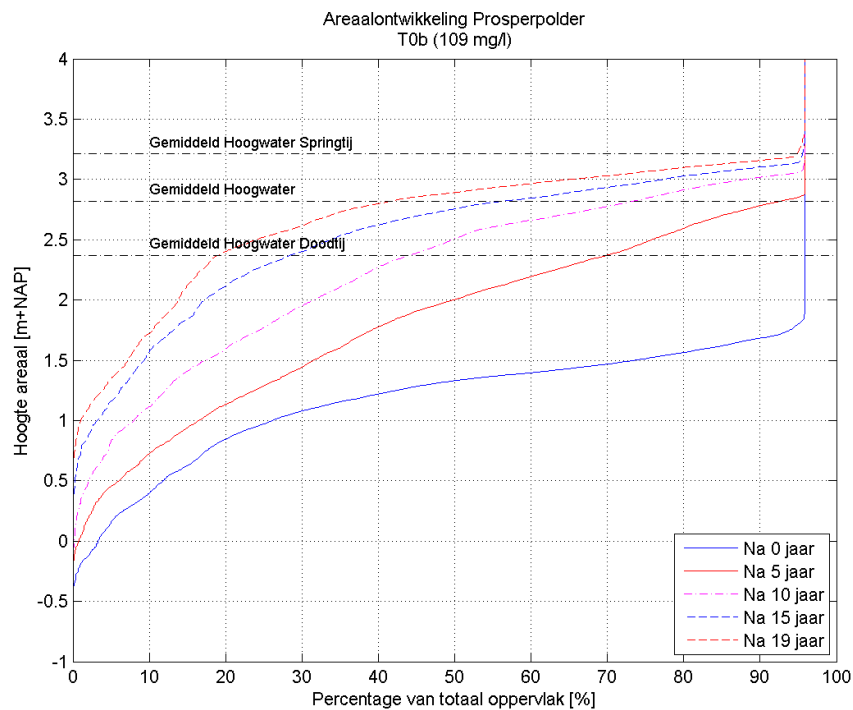
In de Prosperpolder is de bodemligging elke 5 jaar verder gegroeid, zie Figuur 3.39 en Figuur 3.40. De snelheid waarmee de bodem groeit neemt af in de tijd: tussen de eerste vijf jaar is het verschil beduidend groter dan tussen de laatste 5 jaar van de berekening. De verhoging van het areaal boven hoogwater heeft gevolgen voor het intergetijdenareaal in de polder. Aan het begin van de berekening bestaat 96% uit intergetijdengebied; aan het eind van de berekening is dit nog 55% (T0a, 84 mg/l) respectievelijk 42% (T0b, 109 mg/l), ofwel 13% minder. Het areaal met een hoogte boven gemiddeld hoogwater is supralitoraal gebied, en zal alleen nog tijdens springtij of storm inunderen.

In de laatste vijf jaar van de berekening is de afname van het intergetijdengebied nog niet gestagneerd, ondanks dat de verhoging van de bodem langzamer gaat. De laatste 5 jaar is 12% (T0a) en 16% (T0b) van de totale Prosperpolder supralitoraal gebied geworden. De verwachting is daarom dat deze trend zich voortzet, en dat de figuren niet de eindsituatie weergeven.

Figuur 3.40 toont de hypsometrische curve voor de Prosperpolder voor scenario T0b. Ook hier is zichtbaar dat een hogere slibconcentratie leidt tot een sneller sedimentatie van het interessegebied. Omdat de figuren tonen dat de omzetting van intergetijdengebied in supralitoraal gebied aan het eind van de berekening nog steeds aan de gang is, is de verwachting dat het intergetijdenareaal nog verder af zal nemen. In zowel scenario T0a als T0b is de Prosperpolder aan het verlanden; de achtergrondconcentratie van slib beïnvloedt het tempo.



Figuur 3.39: Hypsometrische curve van de Prosperpolder voor verschillende momenten in scenario T0a. De gemiddelde hoog- en laagwaterstand bij gemiddeld tij, springtij en doottij zijn eveneens gepresenteerd.



Figuur 3.40: Hypsometrische curve van de Prosperpolder voor verschillende momenten in scenario T0b. De gemiddelde hoog- en laagwaterstand bij gemiddeld tij, springtij en doottij zijn eveneens gepresenteerd.

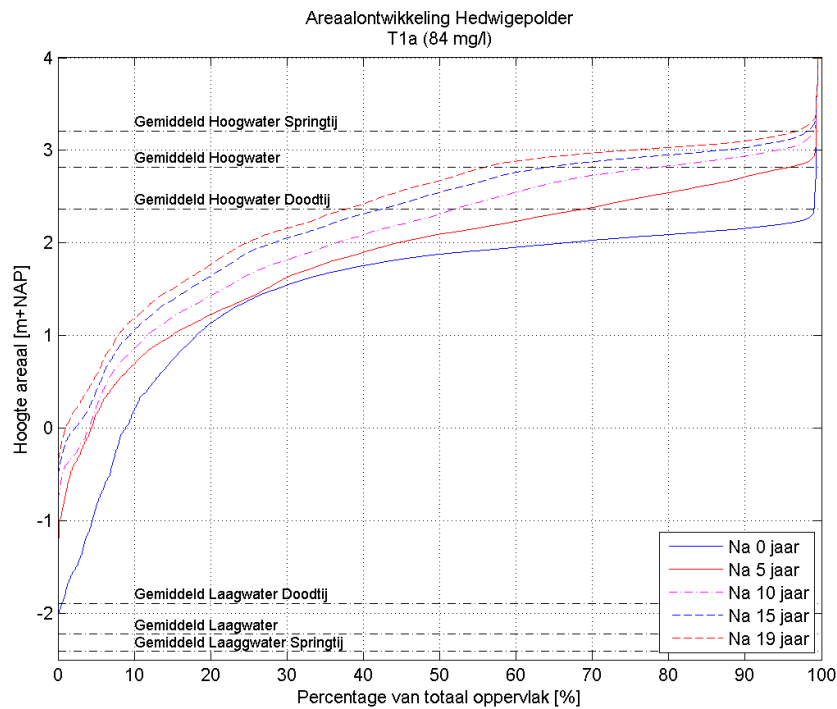
3.3.2 Scenario's T1a en T1b

In Figuur 3.41 tot en met Figuur 3.44 wordt om de 5 jaar de hypsometrische curve getoond van de Hedwigepolder (T1a: Figuur 3.41, T1b: Figuur 3.43) en de Prosperpolder (T1a: Figuur 3.42, T1b: Figuur 3.44). In de figuren worden de gemiddelde hoog- en laagwaterstanden eveneens gegeven, zie ook paragraaf 1.3. Het volledige areaal van de Hedwige- en de Prosperpolder ligt boven gemiddeld laagwater. Een klein deel van het areaal van de Hedwige- en Prosperpolder ligt aan het begin van de berekening boven gemiddeld hoogwater.

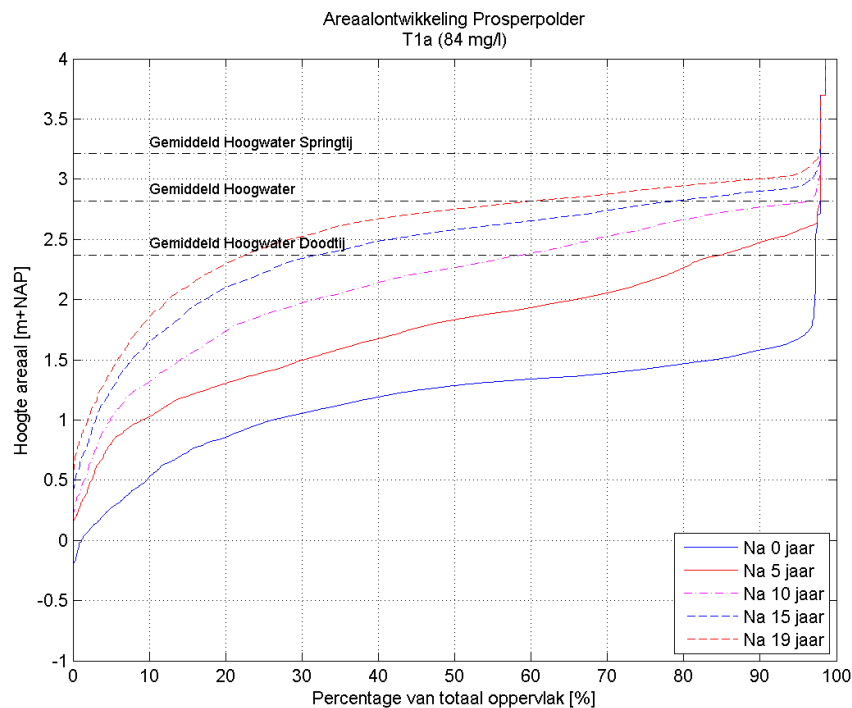
Ook in scenario T1 verhoogt de bodem in de Prosperpolder elke 5 jaar steeds verder, zie Figuur 3.42 en Figuur 3.44. Hetzelfde geldt voor de Hedwigepolder, zie Figuur 3.41 en Figuur 3.43. De snelheid waarmee het areaal verhoogt neemt af in de tijd: tussen de eerste vijf jaar is het verschil beduidend groter dan tussen de laatste vijf jaar van de berekening.

In de Hedwige- en Prosperpolder neemt het intergetijdenareaal gedurende de 20 jaar af. In het begin bedraagt het aandeel intergetijdengebied bijna 100%. Aan het eind van de berekening is in scenario T1a 56% van het areaal van de Hedwigepolder en 62% van het areaal van de Prosperpolder intergetijdengebied. In berekening T1b is aan het eind van de berekening 47% van het areaal van de Hedwigepolder en 42% van het areaal van de Prosperpolder intergetijdengebied. Het areaal met een hoogte boven gemiddeld hoogwater is supralitoraal gebied, en zal alleen nog tijdens springtij of storm inunderen. In de laatste vijf jaar van de berekening is de afname van het intergetijdengebied nog niet gestagneerd, ondanks dat de verhoging van de bodem langzamer gaat. De verwachting is daarom dat deze trend zich voortzet, en de eindsituatie in de Hedwige- en Prosperpolder nog niet bereikt is.

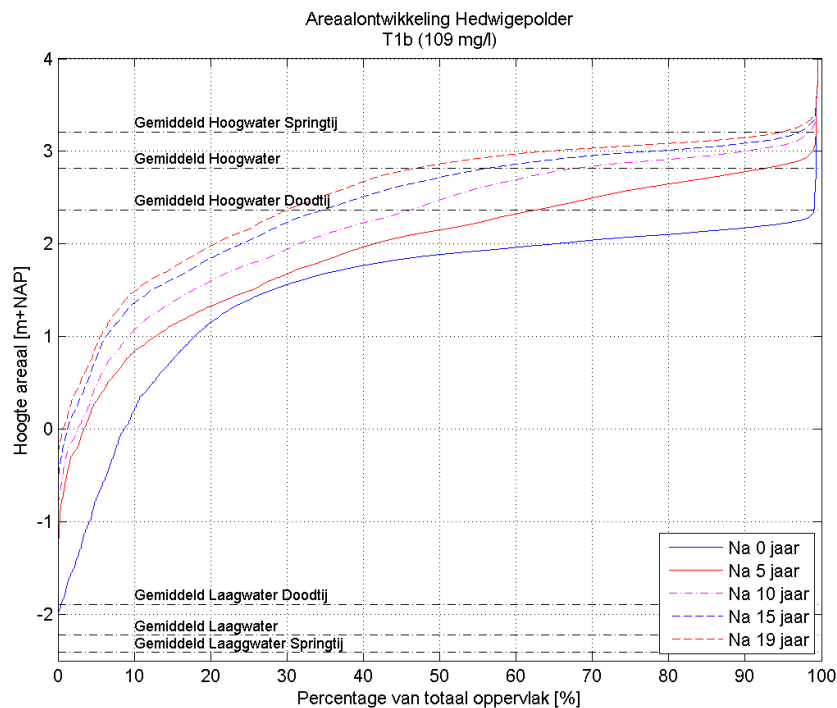
Ook in scenario T1 leidt een hogere slibconcentratie tot een snellere sedimentatie van het interessegebied. Omdat de omzetting van intergetijdengebied in supralitoraal gebied in de Hedwigepolder en Prosperpolder aan het eind van de berekening nog steeds aan de gang is, is de verwachting dat het intergetijdenareaal nog verder af zal nemen. In zowel scenario T1a als T1b is de Prosperpolder aan het verlanden; de achtergrondconcentratie van slib beïnvloedt het tempo.



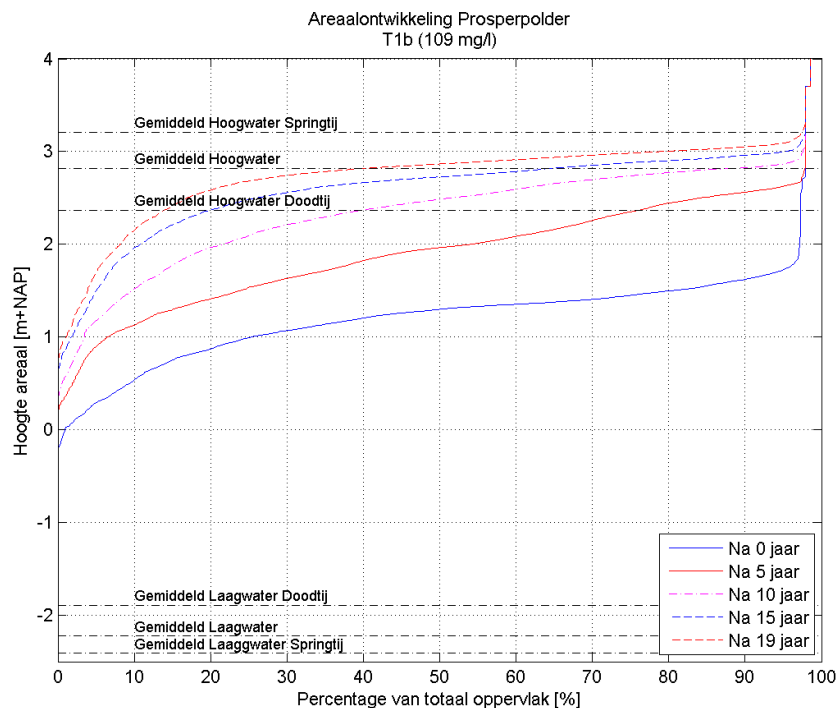
Figuur 3.41: Hypsometrische curve van de Hedwigepolder voor verschillende momenten in scenario T1a. De gemiddelde hoog- en laagwaterstand bij gemiddeld tij, springtij en doottij zijn eveneens gepresenteerd .



Figuur 3.42: Hypsometrische curve van de Prosperpolder voor verschillende momenten in scenario T1a. De gemiddelde hoog- en laagwaterstand bij gemiddeld tij, springtij en doottij zijn eveneens gepresenteerd .



Figuur 3.43: Hypsometrische curve van de Hedwigepolder voor verschillende momenten in scenario T1b. De gemiddelde hoog- en laagwaterstand bij gemiddeld tij, springtij en doottij zijn eveneens gepresenteerd.

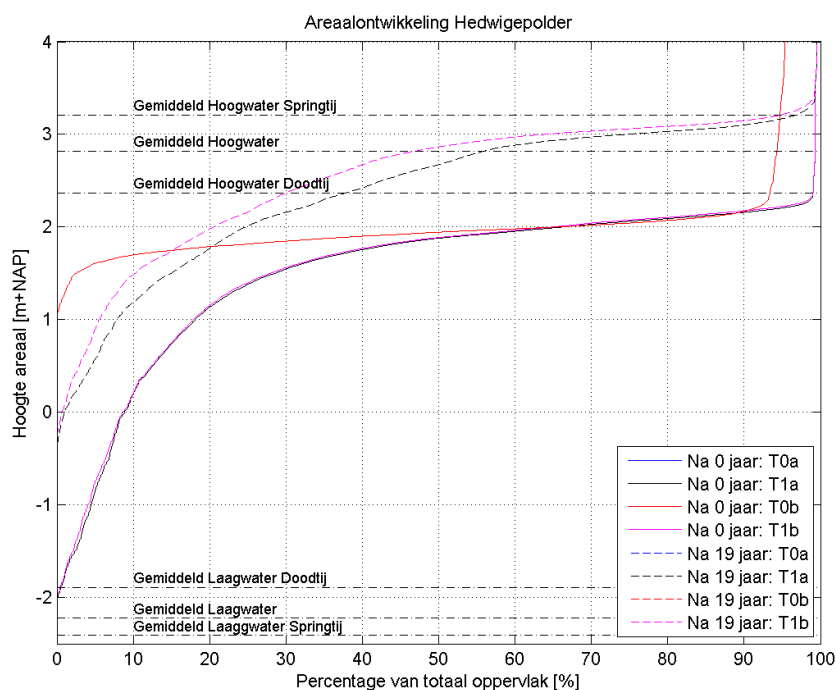


Figuur 3.44: Hypsometrische curve van de Prosperpolder voor verschillende momenten in scenario T1b. De gemiddelde hoog- en laagwaterstand bij gemiddeld tij, springtij en doottij zijn eveneens gepresenteerd.

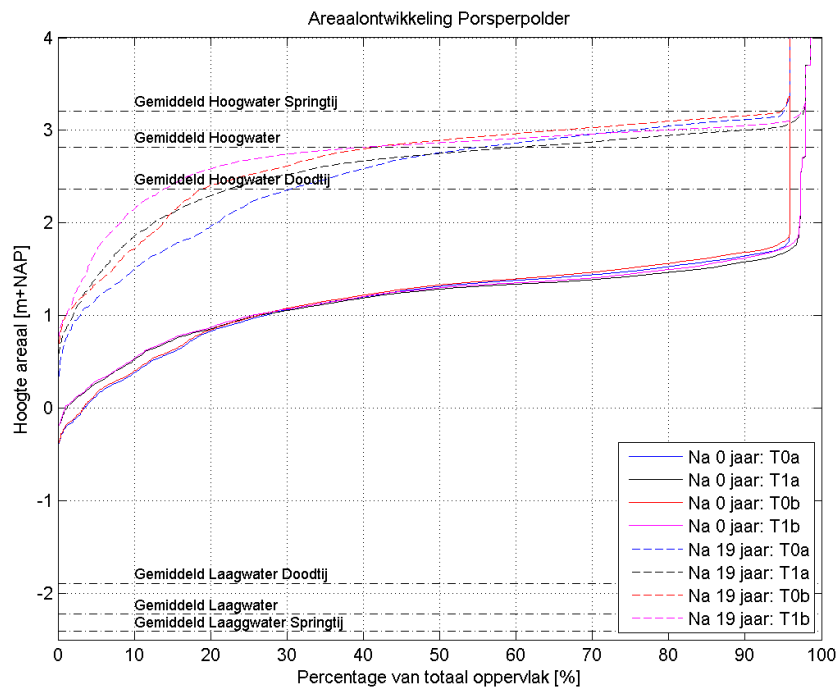
3.3.3 Verschillen tussen de scenario's

De areaalontwikkeling van de Hedwigepolder wordt voor de verschillende scenario's weergegeven in Figuur 3.45. Omdat in scenario T0 de Hedwigepolder omdijkt is, is de eindsituatie voor scenario T0 gelijk aan de beginsituatie. In scenario T1 is wel duidelijk verschil tussen de begin- en eindsituatie zichtbaar. Scenario T1b (109 mg/l) levert volgens het model 9% meer afname van intergetijdengebied dan scenario T1a (84 mg/l) na 19 jaar.

In Figuur 3.46 wordt de areaalontwikkeling van de Prosperpolder voor zowel scenario T0 als scenario T1 getoond. De startsituatie in scenario T0 en T1 zijn vergelijkbaar. In de eindsituatie is zowel het effect van de ontpoldering van de Hedwigepolder als het effect van de slibconcentratie zichtbaar. Wanneer de Hedwigepolder ook ontpolderd wordt, verloopt de hypsometrische curve flauwer dan wanneer de polder omdijkt blijft. De delen onder het gemiddeld hoogwaterpeil zijn in scenario T1 hoger dan in scenario T0; de delen boven het gemiddeld hoogwater zijn in scenario T1 juist lager dan in scenario T0. Het toepassen van een hogere slibconcentratie (T0b, T1b) levert in de gehele polder een hoger areaal boven gemiddeld hoogwater dan bij een lagere slibconcentratie (T0a, T1a).



Figuur 3.45: Hypsometrische curve van de Hedwigepolder aan het begin en eind van de berekening van de verschillende scenario's. De gemiddelde hoog- en laagwaterstand bij gemiddeld tij, springtij en doodtij zijn eveneens gepresenteerd.



Figuur 3.46: Hypsometrische curve van de Prosperpolder aan het begin en eind van de berekening van de verschillende scenario's. De gemiddelde hoog- en laagwaterstand bij gemiddeld tij, springtij en doottij zijn eveneens gepresenteerd.

3.3.4 Conclusies

Volgens de modelberekeningen neemt de hoogte van de Hedwige- en de Prosperpolder ten opzichte van de beginsituatie steeds verder toe. De snelheid waarmee de bodem toeneemt neemt af in de tijd: tussen de eerste vijf jaar is het verschil beduidend groter dan in de laatste 5 jaar van de berekening. Aan het begin van de berekening vindt de sedimentatie in beide polders dus met een hogere snelheid plaats dan aan het eind van de berekeningen.

Na 20 jaar is van een deel van het areaal (42% - 62%) de hoogte hoger geworden dan het gemiddeld hoogwaterpeil. Deze hoger gelegen (supralitorale) delen van de polders inunderen alleen nog tijdens springtij en storm.

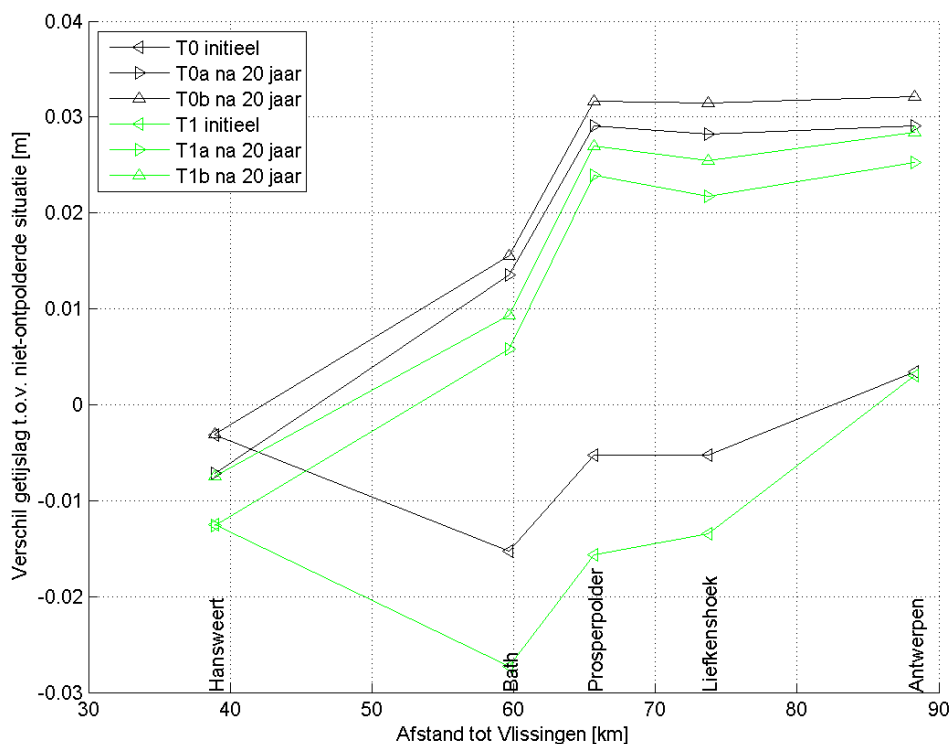
Aan het eind van de berekeningen neemt het areaal intergetijdengebied nog steeds met enkele procenten per jaar af ten gunste van het supralitoraal gebied. De verwachting is daarom dat de verlanding van de polder nog verder door zal zetten. De achtergrondconcentratie van slib beïnvloedt het tempo waarin dit plaatsvindt. Een 30% hogere achtergrondconcentratie (84 mg/l versus 109 mg/l) leidt tot 10 à 15% meer sedimentatie van de polders (zie eerdere paragrafen) en een afname van het intergetijdengebied van 9 (T1) à 13% (T0) na 20 jaar volgens het model.

3.4 Waterstanden

De effecten op de waterstanden zijn bekeken door de gemiddelde getijslag te bepalen. De getijslag is het verschil tussen hoog- en laagwater. In Figuur 3.47 zijn de verschillen in getijslag bepaald ten opzichte van de huidige situatie (zonder ontpolderde Prosper en Hedwige). Door de Prosperpolder te ontpolderen daalt initieel de getijslag in de Schelde met ongeveer 1,5 cm bij Bath. Door de Hedwige

ook te ontpolderen daalt de getijslag nog meer naar bijna 3 cm bij Bath. Na 20 jaar zijn voor alle scenario's de getijslagen toegenomen ten opzichte van de huidige situatie. Dit effect kan niet toegeschreven worden aan ontpolderen, maar is waarschijnlijk een autonoom effect van de Schelde zelf. Wel is duidelijk dat het verlagende effect van het ontpolderen van de Hedwige alleen, dat initieel zichtbaar is tussen scenario's T0 en T1, na 20 jaar kleiner geworden is (vergelijk het verschil T0 initieel met T1 initieel voor het Initiële effect van de Hedwige versus T0a en T1a of T0b en T1b voor het effect over 20 jaar). Ook is zichtbaar dat als de polders meer sedimenteren over 20 jaar (T0a versus T0b of T1a versus T1b) de getijslag relatief gezien toeneemt. Dit betekent dat een initieel verlagend effect op de getijslag verminderd wordt doordat er sedimentatie plaatsvindt in de polders.

Het effect op de waterstand is een tijdelijk effect en dus niet blijvend. Doordat de polders sedimenteren over de loop der tijd wordt langzaam de oude toestand waarbij de polders ingedijkt zijn verkregen voor de waterstanden.



Figuur 3.47: Verschil in getijslag ten opzichte van de huidige situatie zonder ontpolderen voor de scenario's na 0 (initieel) en 20 jaar.

Een model is altijd een schematisatie van de werkelijkheid. Een perfect model bestaat niet. Daarom moeten de resultaten van een model altijd door experts beoordeeld worden. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de aannames die aan het gebruikte FINEL2D model ten grondslag liggen en welke consequenties die hebben voor de modeluitkomsten. Verder wordt ingegaan hoe de uitkomsten geïnterpreteerd moeten worden en wordt een vergelijk gemaakt met de morfologische prognose van de MER rapportage.

Bij het uitvoeren van de FINEL2D berekeningen zijn enkele aannames gedaan die hieronder besproken worden:

- Er is bij de morfologische berekeningen uitgegaan van een zandige beginbodem met slechts 2% slib, terwijl er in werkelijkheid vermoedelijk ook meer kleiige gebieden aanwezig zijn. Een kleiige ondergrond is moeilijker erodeerbaar dan een zandige ondergrond. Op de plaatsen waar in de polders sprake is van geulmigratie of geulvorming treedt erosie op. Een andere (of niet-uniforme) bodemsamenstelling kan daardoor effect hebben op de ligging van de geulen. Dit betreft voornamelijk de middelste hoofdgeul in de T1 scenario's, waar een nieuwe geul zich vanuit de Westerschelde door de Hedwigepolder heen naar de Prosperpolder vormt. Omdat in de modelstudie vrijwel alleen maar sedimentatie optreedt, zijn de effecten van de ondergrond op de uiteindelijke opslibbing van de Hedwige- en Prosperpolder gering.
- Ook is in de modelstudie uitgegaan van een constante dichtheid van het slib, terwijl de dichtheid in werkelijk afhangt van de mate van consolidatie van het bezonken slib. In het model is uitgegaan van een dichtheid die hoort bij een aantal jaren van consolidatie. Aan het begin van de simulatie heeft het slib weinig tijd gehad om te consolideren en is de toegepaste constante dichtheid te hoog. In de beginjaren gaat de aanslibbing naar verwachting dus sneller dan berekend. Aan het eind van de berekening is de consolidatie beduidend verder gevorderd en is de toegepaste dichtheid meer realistisch.
- Er is geen rekening gehouden met menging van slibdeeltjes tussen het zand. Slibdeeltjes kunnen zich tussen zandkorrels nestelen, waardoor er geen volumebijdrage van het slib is. Gezien het feit dat de sedimentatie in de polders voor het grootste deel uit slib bestaat is dit effect beperkt.
- Vegetatie is niet meegenomen in het model. Het is bekend van het verleden dat de opslibbing van gebieden aanzienlijk versneld werd door de introductie van Slijkgras (*Spartina*), waardoor gebieden rond de Westerschelde sneller ingepolderd konden worden. Het is te verwachten dat wanneer vegetatie zich gaat ontwikkelen er meer slib ingevangen wordt in de polders ten opzichte van de sedimentatie die de berekeningen nu aangeven. Dit effect wordt ook in het MER genoemd als oorzaak van hogere sedimentatiesnelheden dan berekend (Oranjewoud/AnteaGroup, 2013).
- In de modellering is als forcering een doottij-springtij getij cyclus opgegeven. Effecten van stormen en extreme rivierafvoeren zijn niet expliciet meegenomen. Stormen veroorzaken golven die voor afslag kunnen zorgen in ondiepe gebieden. Het is de verwachting dat deze effecten hier nauwelijks een rol spelen gezien de beschutte ligging van het gebied, waardoor golven zich nauwelijks kunnen ontwikkelen. Verder veroorzaken stormen een sterke verhoging van de achtergrondconcentratie van het slib en een waterstandsverhoging, waardoor er juist extra slib afgezet kan worden op ondiepe gebieden. Extreem hoge rivierafvoeren zorgen voor een stroomafwaartse verschuiving van het estuarien turbiditeitsmaximum (een plek waar een hogere achtergrondconcentratie van slib heerst) dat normaal gesproken rond Antwerpen ligt. Dit betekent dat de achtergrondconcentratie van slib tijdens extreme rivierafvoer ook sterk toeneemt ter plekke van de Hedwige- en Prosperpolder (Fettweiss et al, 1998). In het model zijn deze "events" niet expliciet meegenomen. Bij de bepaling van de gemiddelde achtergrondconcentratie

voor het model is gebruik gemaakt van metingen die eens in de paar weken uitgevoerd zijn. Het is waarschijnlijk dat extreme omstandigheden ondervertegenwoordigd zijn in de metingen, omdat deze omstandigheden niet altijd bemeten worden bij een meetfrequentie van enkele weken. Het is daarom niet uitgesloten dat de toegepaste gemiddelde achtergrondconcentratie te laag is.

- Menselijke ingrepen hebben invloed op de achtergrondconcentratie van slib. Ten behoeve van de haven van Antwerpen wordt veel slib gebaggerd in de vaargeul, havendokken en sluisoegangen. In de omgeving van de Hedwige- en Prosperpolder ligt een aantal stortplaatsen waar het slib terug in de Schelde gestort wordt. Hierdoor wordt de achtergrondconcentratie van slib (lokaal) beïnvloed. Het is niet in te schatten hoe de stortingen in de toekomst zullen veranderen en of de achtergrondconcentratie verandert als gevolg van een ander stortbeleid. De laatste jaren blijkt een toename van de slibconcentratie op te treden (zie paragraaf 2.6.1). Onduidelijk is waarom dit precies optreedt. Deze toename is niet meegenomen in de gebruikte achtergrondconcentratie van slib in het model, waardoor de kans reëel is dat de aanslibbing van de polders in werkelijkheid hoger zal blijken te zijn dan in het model.
- Verder is aangenomen dat de slibberging in de polders geen invloed heeft op de opgelegde achtergrondconcentratie. Dit lijkt allerzins reëel gezien de hoeveelheden slib die jaarlijks sedimenteren in de diverse havens, dokken en sluisingen rond Antwerpen. Er is dus voldoende slib aanwezig in het systeem.

Op basis van het voorgaande kan gesteld worden dat op essentiële punten in het model voorzichtige realistische aannames gedaan zijn. De scenario's "a" en "b" die doorgerekend zijn (met respectievelijk een laag en een hoger slibgehalte) worden daarom aangemerkt als een "ondergrens" (Scenario T0a en T1a) en een "realistische waarde" (Scenario's T0b en T1b). Een "bovengrens" is zonder een uitgebreide gevoeligheidsanalyse moeilijk aan te geven, maar duidelijk is wel dat een aanzienlijk snellere sedimentatie dan berekend niet uitgesloten kan worden. Als voorbeeld kunnen de Slikken van Waarde in de Westerschelde genoemd worden. Hier zijn in 2002 twee strekdammen aangelegd. Het gebied tussen de dammen is de eerste jaren na aanleg met ongeveer 30 cm/jaar opgeslibd. De sedimentatie rond deze dammen heeft als basis gediend voor de afregeling van het FINEL2D zand/slib model dat in deze studie is toegepast, zie ook Dam & Blik (2013).

De ingreep van ontpolderen is overigens zo dominant, dat er ongeacht verdere parameter instellingen altijd een sedimentatie berekend zal worden in de polders.

Over de interpretatie van de uitkomsten van het model kan het volgende gezegd worden. Sedimentatie van de polders staat bij geen enkele expert ter discussie. In het MER wordt een beeld geschetst van geulen, kreken, oeverwallen, schorren en slikken. Dit beeld komt ook naar voren in het model. Het feit dat de grote geulen in de polders zich richten op de dominante vloed richting en min of meer dezelfde orientatie heeft als de oude geulen geeft bovendien vertrouwen in de modeluitkomsten.

Kwantitatief is de berekende sedimentatie van de polders echter van een geheel andere orde. In het MER, zie Oranjewoud/AnteaGroup (2013), wordt gesproken over aanslibbingsnelheden van gemiddeld 1 cm per jaar. Op basis van expert judgement wordt in het MER gesteld dat men hogere waarden kan verwachten dan 1 cm/jaar, toch zeker als vegetatie tot ontwikkeling komt, maar de gevolgen daarvan worden niet verder uitgewerkt. In voorliggende studie is de berekende sedimentatiesnelheid 5 – 10 cm/s, en is ongeveer de helft van het initiële intergetijdenareaal na 20 jaar doorgegroei naar supralitoraal gebied (met een bodemligging boven gemiddeld hoogwater). De verschillen kunnen deels worden toegeschreven aan het verschil in toegepaste slibconcentratie. In Oranjewoud/AnteaGroup (2013) bedraagt deze concentratie 30 mg/l à 40 mg/l, waarin voorliggende studie slibgehaltenes van 84 mg/l en 109 mg/l zijn toegepast. Daarnaast is niet duidelijk of in Oranjewoud/AnteaGroup (2013) de zandfractie in beschouwing genomen wordt.

Gezien de doorgaande verlanding is het beeld dat na 20 jaar berekend is geen eindbeeld. Ook het beeld dat in het MER geschetst wordt heeft geen betrekking op het eindbeeld, maar betreft slechts een ontwikkelingsfase van het gebied. In het eindbeeld zijn beide polders naar verwachting volledig opgeslibd tot boven hoogwater, en ligt de schorrand weer ongeveer op de plaats waar deze nu ook ligt.

CONCLUSIES

In de voorliggende studie is met behulp van het modelinstrumentarium FINEL2D de morfologische ontwikkeling in de Hedwigepolder en de Prosperpolder berekend over een periode van 20 jaar. Er wordt uitgegaan van twee situaties. In de T0 situatie wordt de huidige toestand beschreven, waarbij de Prosperpolder is ontpolderd. Op moment van schrijven zijn de werkzaamheden in de Prosperpolder namelijk reeds begonnen. In de T1 situatie wordt de Hedwigepolder eveneens ontpolderd, en ingericht volgens het Inrichtingsplan zoals gepresenteerd door de Provincie Zeeland, zie Figuur 1.1. Er wordt gerekend met twee verschillende slibconcentraties, om de gevoeligheid van de modeluitkomsten te onderzoeken voor de grootte van de achtergrondconcentratie van slib. In totaal zijn er dus vier berekeningen uitgevoerd.

Met behulp van de uitkomsten van de modelberekeningen kunnen de vragen die in paragraaf 1.1 worden gesteld beantwoord worden. De vragen en de antwoorden op deze vragen worden in onderstaande alinea's gepresenteerd.

Welke morfologische ontwikkelingen treden er op ten gevolge van de ontpoldering van de Hedwigepolder en met welke snelheid vinden deze ontwikkelingen plaats?

Aan de hand van de modeluitkomsten kan worden geconcludeerd dat in alle gevallen sedimentatie van de Hedwigepolder en Prosperpolder optreedt. Het gemiddeld polderniveau van de Prosperpolder stijgt in de eerste 5 jaar met 0,55 m à 0,65 m (11 à 13 cm/jaar) en gedurende de totale 20 jaar simulatie met 1,35 m à 1,5 m (7 à 9 cm/jaar). De verschillende scenario's zijn met betrekking tot het eindbeeld van de sedimentatie van de Prosperpolder weinig onderscheidend. De sedimentatie in de Prosperpolder verloopt ietwat sneller als ook de Hedwigepolder wordt ontpolderd.

Het polderniveau in de Hedwigepolder stijgt afhankelijk van de toegepaste slibconcentratie in de eerste 5 jaar na ontpolderen met 0,35 m à 0,45 m (7 à 9 cm/jaar) en met 0,85 m à 1,05 m in 20 jaar tijd (4,5 à 5,5 cm/jaar). De snelheid waarmee de beide polders sedimenteren is aan het begin van de berekening hoger dan aan het eind van de modelberekening.

De lage getallen in bovenstaande range van sedimentatiesnelheden kunnen worden aangemerkt als een ondergrens, de hoge getallen als een realistische schatting. Een bovengrens is zonder uitgebreid gevoeligheidsonderzoek moeilijk aan te geven, maar duidelijk is wel dat een aanzienlijk snellere sedimentatie dan berekend niet uitgesloten kan worden.

Zowel de zand- als de slibfractie speelt een rol in de sedimentatie van de Hedwigepolder en de Prosperpolder. In de verschillende scenario's treedt zowel import van zand als slib op de Hedwigepolder en Prosperpolder. Slib levert hierbij verreweg de grootste bijdrage aan de sedimentatie (orde 80 tot 85%). De slibfractie wordt hoofdzakelijk afgezet op de hogere delen. De geulen blijven zandiger door de hogere stroomsnelheden.

In het MER (Oranjewoud/AnteaGroup, 2013) wordt gesproken over aanslibbingsnelheden van gemiddeld 1 cm per jaar. Op basis van expert judgement wordt in het MER gesteld dat men hogere waarden kan verwachten dan 1 cm/jaar, toch zeker als vegetatie tot ontwikkeling komt, maar de gevolgen daarvan worden verder uitgewerkt. In voorliggende studie is de berekende sedimentatiesnelheid 5 à 10 cm/jaar, en is ongeveer de helft van het initiële intergetijdenareaal na 20 jaar doorgroeid naar supralitoraal gebied (met een bodemligging boven gemiddeld hoogwater). Gezien de doorgaande verlanding is het beeld dat na 20 jaar berekend is geen eindbeeld. Ook het beeld dat in het MER geschetst wordt heeft geen betrekking op het eindbeeld, maar betreft slechts een ontwikkelingsfase. In het eindbeeld zijn beide polders naar verwachting volledig opgeslibd tot boven hoogwater, en ligt de schorrand weer ongeveer op de plaats waar deze nu ook ligt.

Welk effect heeft de ontpoldering van de Hedwigepolder op het intergetijdeareaal?

De mate van sedimentatie is in alle scenario's dusdanig dat een deel van de polders binnen 20 jaar een bodemhoogte gelijk aan of hoger dan de gemiddelde hoogwaterstand bereikt. Bij de start van de simulaties bestaan vrijwel de gehele polders uit intergetijdegebied. Aan het eind van de berekening bestaat afhankelijk van de toegepaste achtergrondconcentratie 42% tot 62% van de polders uit intergetijdegebied. Deze ontwikkeling is aan het einde van de berekening nog steeds gaande, waardoor de afname van het intergetijdegebied ook na de eerste 20 jaar door zal zetten. Geconcludeerd kan worden dat de zowel de Hedwige- als de Prosperpolder eenzijdig verlanden. In de Prosperpolder wordt de snelheid van verlanding enigszins hoger als gevolg van de ontpoldering van de Hedwigepolder.

In de berekeningen zijn twee achtergrondconcentraties van slib toegepast: 84 mg/l en 109 mg/l. Uit de resultaten blijkt dat een verhoging van de slibconcentratie met 30% (verschil 84 en 109 mg/l), leidt tot een snellere afname van het intergetijdegebied in de Hedwige- en Prosperpolder. Na 20 jaar resulteert een 30% hogere slibconcentratie in 9% tot 13% meer afname van het intergetijdeareaal, en daarmee 9 tot 13% meer toename van het supralitoraal gebied volgens het model. Een hogere slibconcentratie leidt daarmee tot een snellere verlanding van de polders.

Wat zijn de effecten van de ontpoldering van de Hedwigepolder op het naastgelegen Natura 2000 gebied en dan met name het Sieperdaschor en het Schor van Ouden Doel?

In het Sieperdaschor treedt in beide scenario's import van slib op, dus voortgaande verlanding. Wanneer de Hedwigepolder ontpolderd wordt, treedt naast de doorgaande verlanding van de hogere delen sedimentatie op van de volgens het Inrichtingsplan aangebrachte geul. In de hogere delen van het Sieperdaschor treden geen veranderingen op ten opzichte van de situatie zonder ontpoldering.

In alle scenario's treedt voor het Schor van Ouden Doel erosie op. De scenario's zijn hierin niet onderscheidend. Geconcludeerd kan worden dat het ontpolderen van de Hedwigepolder geen grote invloed heeft op de morfologie van het Schor van Ouden Doel afgezien van de daarin gegraven geulen en hun directe omgeving. Deze geulen migreren licht en nemen in de loop van de tijd in omvang af.

Ten aanzien van de waterstanden wordt verwacht dat de ontpoldering in de nabijheid van de polders een initiële verlaging van de getijslag (verschil tussen hoog- en laagwater) van enkele centimeters tot gevolg heeft. Deze initiële verlaging wordt weer teniet gedaan door de sedimentatie in de polders. Hierbij geldt dat hoe meer sedimentatie, hoe minder het verlagende effect op de getijslag. Het verlagende effect op de getijslag is dus niet blijvend door de doorgaande sedimentatie van de polders.

LITERATUUR

- Consortium Deltares, IMDC, Svasek, Arcadis (2013a). Actualisatie van het FINEL2d model van de Westerschelde. Rapport, 13 augustus, referentie: A26; 1630/U11274/G/GD.
- Consortium Deltares, IMDC, Svasek, Arcadis (2013b). Morfologische lange termijn simulaties. Rapport, 31 maart, referentie: G11; 1630/U13054/C/SPo.
- Consortium Deltares, IMDC, Svasek, Arcadis (2013c). Harde lagen Westerschelde. Rapport, 31 maart, referentie: A28; 1630/U12072/GD.
- Consortium Deltares, IMDC, Svasek, Arcadis (2013d). Aanvullend onderzoek historische ontwikkeling getij. Rapport, 31 maart, referentie: G08; 1207720.
- Dam, G. en A.J. Blik (2013). Using a sand–mud model to hindcast the morphology near Waarde. *Maritime Engineering* 166: 63-75. <http://dx.doi.org/10.1680/maen.2011.43>
- Fettweis, M., M. Sas en J. Monbaliu (1998). Seasonal, Neap-spring and Tidal Variation of Cohesive Sediment Concentration in the Scheldt Estuary, Belgium. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 47:21-36.
- Grote Historische Provincieatlas Zeeland 1856-1858 (1992). Wolters-Noordhoff, Groningen.
- Maximova, T., S. Ides, T. de Mulder en F. Mostaert (2009). LTV O&M thema veiligheid: deelproject 1. Verbetering hydrodynamisch NEVLA model ten behoeve van scenario-analyse. Rapport, referentie: 756_05 (Deltares/Waterbouwkundig Laboratorium).
- Nolte, A.J., (2012). Vervolgonderzoek drie buitendijkse maatregelen voor natuurherstel in de Westerschelde. 1204087-000-ZKS-0154. November 2012.
- Oranjewoud/AnteaGroup (2013). Ontwikkeling van een intergetijdengebied in Hedwige- en Prosperpolder. Definitief MER, 19 juni, referentie: Soresma/1294103000 - Oranjewoud/225938.
- Svašek Hydraulics (2006). Morfodynamische berekeningen van de Westerschelde met behulp van FINEL2D. Rapport, 17 november, referentie: GD/06119/1339.
- Svašek Hydraulics (2008). Buitendijks natuurherstel in de Westerschelde; verkenning naar mogelijke gebieden en maatregelen. Referentie: GD/08187/1480/C.
- TNO (2003). Kartering moeilijk erodeerbare lagen in het Schelde estuarium. Rapport, referentie: 03-213-B1208.

A ONDERLIGGENDE VERGELIJKINGEN FINEL2D

In deze bijlage worden de onderliggende vergelijkingen van het FINEL2D modelpakket beschreven.

A.1 Inleiding

FINEL2D is een door Svašek Hydraulics ontwikkeld hydro- en morfodynamisch modelpakket waarmee stromingen en de daaraan gekoppelde sedimentfluxen en bodemveranderingen in open wateren als zeeën, rivieren, estuaria en havens berekend kunnen worden. De onderliggende vergelijkingen zijn de diepte- en golfgemiddelde Navier-Stokes-vergelijkingen, bestaande uit twee impulsbalansvergelijkingen en de continuïteitsvergelijking.

Deze vergelijkingen zijn gediscretiseerd middels de zogenaamde eindige elementen methode, of wel FEM (Finite Elements Method). Hierbij wordt het modelgebied in driehoekige elementen verdeeld waardoor deze methode zeer geschikt is om lokale verfijningen van het rekenrooster aan te brengen en om begrenzingen als oevers, kusten, kades, strekdammen e.d. nauwkeurig te volgen.

In de gebruikte versie van FINEL2D is het numerieke oplossingschema een expliciet schema wat betekent dat de tijdstap voldoende klein moet zijn om de berekening stabiel te houden. De tijdstap wordt door FINEL2D zelf bepaald op basis van een maximum Courant getal van 0.67.

A.2 Hydrodynamische module

De continuïteitsvergelijking is

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uD}{\partial x} + \frac{\partial vD}{\partial y} = 0,$$

en de impulsbalansvergelijkingen in respectievelijk x- en y-richting zijn gedefinieerd door respectievelijk

$$\frac{\partial Du}{\partial t} + \frac{\partial Du^2}{\partial x} + \frac{\partial Duv}{\partial y} + f_c Dv + gD \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \tau_{x,b} + \frac{1}{\rho} \tau_{x,w} + \frac{1}{\rho} \tau_{x,r} = 0,$$

en

$$\frac{\partial Dv}{\partial t} + \frac{\partial Duv}{\partial x} + \frac{\partial Dv^2}{\partial y} - f_c Du + gD \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \tau_{y,b} + \frac{1}{\rho} \tau_{y,w} + \frac{1}{\rho} \tau_{y,r} = 0.$$

Naast advectie en de bijdrage van drukgradiënten kunnen externe forceringen als Coriolis, bodemwrijving, wind, luchtdruk en golven worden opgelegd. Merk op dat de horizontale mixing termen niet in de vergelijking voorkomen. De toepassing van deze versie van FINEL2D is dan ook 'beperkt' tot advectie-gedomineerde situaties.

Golven kunnen een effect hebben op zowel de hydrodynamica als de morfologie. De uit een golfberekening resulterende golfkrachten – die een waterstandsopzet en/of een golfgedreven stroming in gang zetten – en de bijdrage van de golven aan de bodemschuifspanning – die voor extra opwoeling van sediment zorgen – kunnen als velden worden opgelegd in de FINEL2D berekening.

In de morfologische berekeningen van kan het effect van golven meegenomen door middel van online golfberekeningen. Met online wordt bedoeld dat de golfberekening door FINEL2D wordt opgestart en dat na afloop van de golfberekening de FINEL2D berekening verder gaat waar deze

gebleven was met medeneming van de golfvelden uit de laatste golfberekening. De online golfberekeningen worden uitgevoerd met het modelpakket SWAN (Simulating WAVes Nearshore), zie Booij et al. (1999) en Ris et al. (1999).

In een online berekening vindt telkens uitwisseling van gegevens tussen FINEL2D en SWAN plaats. Zo levert FINEL2D de bodem, de waterstanden en de stroomsnelheden aan de SWAN berekening en geeft SWAN de golfkrachten en bodemschuifspanning door aan de FINEL2D berekening. De frequentie van uitwisseling wordt door de gebruiker bepaald.

Aan de hydrodynamische module kunnen diverse transport modules worden gekoppeld. In de volgende twee paragrafen worden de transportmodule besproken die in deze studie is toegepast, namelijk de module voor zand-slibtransport (paragraaf A.3).

A.3 Morfologische module: zand-slibtransport

Het modelleren van zand-slibtransport en –interactie in FINEL2D gebeurt volgens de methode van Van Ledden (2003). De vergelijking voor de bodemverandering in deze methode luidt:

$$\frac{(1-p)}{f_{\text{morf}}} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} - D_z + E_z - D_m + E_m = 0$$

De subscripten z en m verwijzen hier naar respectievelijk zand en slib (mud). De formuleringen voor de erosiefluxen E en depositiefluxen D hangen af van het al dan niet cohesief zijn van de bodem. Of een bodem cohesief dan wel niet-cohesief is, wordt bepaald door het slibpercentage in de bodem. Voor estuaria in Nederland wordt veelal een kritisch slibgehalte van 30% gehanteerd.

Bodems met een slibgehalte kleiner dan 30% zijn niet-cohesief. De zand- en slibfracties beïnvloeden elkaar niet en worden onafhankelijk van elkaar uitgerekend. Erosie en depositie van de zandfractie worden uitgerekend als beschreven in de vorige paragraaf. Erosie en sedimentatie van de slibfractie wordt gemodelleerd met de formuleringen van Krone en Parteniades, zie bijvoorbeeld Van Rijn (1993):

$$E_m = p_m M_{nc} \left(\frac{\tau_b}{\tau_{e,nc}} - 1 \right)$$

met p_m het slibpercentage in de bodem, M_{nc} de erosieconstante voor niet-cohesieve bodems, τ_b de bodemschuifspanning en $\tau_{e,nc}$ de kritische bodemschuifspanning voor erosie van niet-cohesieve bodems. Erosie treedt alleen op als de bodemschuifspanning τ_b groter is dan de kritische bodemschuifspanning $\tau_{e,nc}$ ($\tau_b > \tau_{e,nc}$).

In deze methode treedt depositie op als de bodemschuifspanning τ_b kleiner is dan de kritische bodemschuifspanning τ_d voor depositie:

$$D_m = w_s c \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_d} \right)$$

Het hanteren van een kritische bodemschuifspanning voor sedimentatie is controversieel, zie de discussie in Van Ledden (2003), maar wordt desalniettemin veelvuldig toegepast. Ook in deze studie wordt deze benadering gehanteerd.

Bodems met een slibgehalte groter dan 30% zijn cohesief. De erosieflux van zand E_z en die van slib E_m zijn dan aan elkaar gekoppeld:

$$E_z = (1 - p_m) M_c \left(\frac{\tau_b}{\tau_{e,c}} - 1 \right)$$

$$E_m = p_m M_c \left(\frac{\tau_b}{\tau_{e,c}} - 1 \right)$$

met p_m het slibpercentage in de bodem, M_c de erosieconstante voor cohesieve bodems, τ_b de bodemschuifspanning en $\tau_{e,c}$ de kritische bodemschuifspanning voor erosie van cohesieve bodems. Erosie treedt alleen op als de bodemschuifspanning τ_b groter is dan de kritische bodemschuifspanning $\tau_{e,c}$ voor erosie van cohesieve ($\tau_b > \tau_{e,c}$). Depositie van zand en slib wordt niet beïnvloed door het cohesief zijn van het bed en daarvoor gelden dezelfde vergelijkingen als voor het niet-cohesieve regime.

In de bodemmodule van de zand-slibtransportmodule dient de bodemsamenstelling bij gehouden te worden. Hiertoe wordt een aantal bodemlagen van een bepaalde dikte gedefinieerd. In deze studie zijn vijf lagen van elk 0,25 m hoog gedefinieerd. Onder deze vijf actieve lagen is een niet-actieve sublaag met een vast slibpercentage aanwezig. Een mixing coefficient is gedefinieerd die zand en slib door de verticale kolommen kan mixen. In werkelijkheid staat dit voor bioturbatie (de omwoeling van sediment door biota) en omwoeling van het sediment door stroming en golven.

Voor meer informatie met betrekking tot de zand-slibtransportmodule wordt verwezen naar Dam & Blik (2013).

A.4 Referenties

- Booij, N., R.C. Ris en L.H. Holthuijsen, 1999. A third-generation wave model for coastal regions, 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, 104 (C4), p. 7649-7666.
- Dam, G., Blik, A.J. (2013). Using a sand–mud model to hindcast the morphology near Waarde. *Maritime Engineering* 166: 63-75.
- Ris, R.C., N. Booij en L.H. Holthuijsen, 1999. A third-generation wave model for coastal regions, 2. Verification. *Journal of Geophysical Research*, 104 (C4), p. 7667-7681.
- Van Ledden, M. (2003). Sand-mud segregation in estuaries and tidal basins. Ph.D. thesis. Delft University of Technology.
- Van Rijn, L.C., 1993. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal sea. Aqua Publisher, Amsterdam.



COASTAL, HARBOUR AND RIVER CONSULTANTS