

Morfologie en hydrodynamica in de Beneden-Zeeschelde

Ontwikkelingen van 1960 tot 2010

Definitief

TVD/14311/1111

24 juni 2014

SWAS

HYDRAULICS

COASTAL, HARBOUR AND RIVER CONSULTANTS

Schiehaven 13G

3024 EC Rotterdam

Nederland

T +31 - 10 - 467 13 61

F +31 - 10 - 467 45 59

E info@svasek.com

I www.svasek.com

Document titel Morfologie en hydrodynamica in de Beneden-Zeeschelde

Ontwikkelingen van 1960 tot 2010

Verkorte Titel Morfologie in de Beneden-Zeeschelde

Status Definitief

Datum 24 juni 2014

Project naam BSC's Thesis Tim van Dam

Project nummer 1111

Opdrachtgever -

Referentie TVD/14311/1111

Auteur Tim van Dam

Gecontroleerd door Gerard Dam

SAMENVATTING

De Beneden-Zeeschelde is een getijdenrivier in Belgisch Vlaanderen, welke deel uitmaakt van het Schelde estuarium. De rivier vindt zijn oorsprong in Frankrijk en mondt uit in de Noordzee en heeft een totale lengte van ca. 350 km. In het Schelde estuarium is sprake van een wisselwerking tussen het getij en de morfologie. Wanneer de morfologie van het estuarium verandert, heeft dit invloed op het getij waardoor de verandering van het getij op zijn beurt weer invloed heeft op de morfologie.

De invloed van het getij is met de jaren steeds verder landinwaarts merkbaar geworden. In het begin van de 20^e eeuw treedt de maximale getijslag (het verschil tussen hoog en laag water) op bij Liefkenshoek, ca. 80 km bovenstrooms van de mond, en bedraagt ca. 4.5 meter. Tegen het eind van de 20^e eeuw treedt de maximale getijslag binnen het estuarium op ter hoogte van Tielrode, ca. 120 km bovenstrooms van de mond, en bedraagt daar ca. 5.5 meter. Het getij dringt door tot en met Gent, 180 km van de mond, waar de gemiddelde getijslag over de laatste 10 jaar ca. 2.6 meter is, terwijl dit 100 jaar eerder ca. 1.7 meter was.

Ten behoeve van het waarborgen van de toegankelijkheid van de haven van Antwerpen is in de Westerschelde en in de Beneden-Zeeschelde stroomafwaarts van Antwerpen veel gebaggerd. In dit gedeelte van de Beneden-Zeeschelde zijn lokale verdiepingen van 10 meter opgetreden sinds 1960. Stroomopwaarts van Antwerpen, waar niet is gebaggerd, is lokaal tot 7 meter erosie opgetreden. De hypothese is dat de opgetreden erosie in dit gedeelte van de Beneden-Zeeschelde het gevolg is van de baggerwerkzaamheden die zijn verricht in de Westerschelde en de Beneden-Zeeschelde benedenstrooms van Antwerpen, en dat dit heeft bijgedragen aan de toename van de getijslag.

Deze morfologische en hydrodynamische ontwikkelingen hebben onder andere nadelige gevolgen met betrekking tot de veiligheid tegen overstromen. Bij deze studie is onderzocht wat de oorzaak is van de toename van de getijslag en de opgetreden erosie in de Beneden-Zeeschelde van 1960 tot 2010, waarbij de focus met betrekking tot de erosie ligt in het gedeelte bovenstrooms van Antwerpen.

Bij deze studie wordt gebruik gemaakt van het numerieke tweedimensionaal dieptegemiddeld (2DH) model "FINEL2D", wat door Svašek Hydraulics is ontwikkeld. In de studie van Dam (2006) is een FINEL2D model van de Westerschelde gekalibreerd voor de periode 1964 tot 2002. In deze studie is het model van Dam (2006) gebruikt en gekalibreerd voor de Beneden-Zeeschelde voor de periode 1960 tot 2010, waarbij is gekeken naar de ontwikkeling van de waterstanden en de erosie- en sedimentatiepatronen. Het model behaalt in de definitieve hindcast een Brier Skill Score van 0.58 na 50 jaar (een score ter indicatie van de kwaliteit van het model) hetgeen betekent dat het model in staat is om de opgetreden bodemveranderingen van 1960 tot 2010 met een goede reproductienauwkeurigheid te voorspellen. De toename van de getijslag en het met de tijd verder doordringen van het getij weet het model goed te reproduceren. Daarnaast wordt het erosievolume dat is opgetreden in het interessegebied goed door het model gereproduceerd. Ook de gebaggerde volumes in de Beneden-Zeeschelde benedenstrooms van Antwerpen weet het model goed te reproduceren.

Om inzicht te krijgen in de invloed van bepaalde parameters zijn vier scenario's doorgerekend voor de periode 1960 tot 2010. Het T0 scenario is de definitieve hindcast, waarin de werkelijkheid wordt gesimuleerd. Daarnaast is er een T1 scenario doorgerekend, waarbij er geen baggerwerkzaamheden worden uitgevoerd. In een T2 scenario wordt er gebaggerd zoals in het T0 scenario, maar vindt er geen terugstorting van het gebaggerde zand plaats, waardoor er als het ware een extreem zandwin scenario wordt gesimuleerd. Tot slot is er een T3 scenario doorgerekend waarin er geen verdiepingen worden uitgevoerd, waarbij de te onderhouden vaargeuldiepte van 1960 gehanteerd blijft. De verschillende scenario's zijn toegepast voor het gehele Schelde estuarium en betreffen hiermee de menselijke ingrepen in zowel de Westerschelde als de Beneden-Zeeschelde.

Uit het analyseren van de uitkomsten van de verschillende scenario's blijkt dat de ontwikkeling van de getijslag gestuurd wordt door de baggerwerkzaamheden. Hierbij is de diepte van de vaargeul en de zandinhoud van belang: Hoe dieper de vaargeul of hoe meer zand er netto wordt onttrokken uit het systeem, des te groter is de toename van de getijslag. Zo neemt de getijslag ten opzichte van het T0 scenario meer toe wanneer er geen terugstorting heeft plaatsgevonden (T2 scenario) en neemt de getijslag af wanneer er geen menselijk ingrepen worden uitgevoerd (T1 scenario). De ontwikkeling van de getijslag in het T3 scenario ligt tussen het T1 en het T0 scenario in.

Voor het interessegebied, de Beneden-Zeeschelde tussen Antwerpen en Schelle, geldt dat de menselijke ingrepen die van 1960 tot 2010 zijn uitgevoerd grote invloed hebben en zelfs sturend zijn voor het sedimenttransport ter hoogte van Antwerpen. Hoe meer zand er netto wordt onttrokken uit het gedeelte benedenstrooms van Antwerpen, des te meer het zandtransport in deze richting wordt getrokken. De invloed van de baggerwerkzaamheden op het zandtransport zet echter door tot Schelle, met als gevolg dat de netto erosie in het interessegebied nauwelijks beïnvloed wordt. Voor alle vier de scenario's geldt dat er netto tussen de 7.7 en 10.9 miljoen m³ erodeert uit het interessegebied. De erosie in het interessegebied treedt ook op in het T1 scenario en uit dit onderzoek blijkt dat deze erosie niet direct te relateren is aan de baggerwerkzaamheden.

Wellicht is de erosie in dit gebied een autonoom verschijnsel en moet de oorzaak worden gezocht bij de vorm van het estuarium. Mogelijk plant de getijgolf zich op een specifieke manier voort als gevolg van de trechterachtige vorm van het systeem. Een andere mogelijke oorzaak is de aanleg van de stuw bij Gent. Ook is het model bovenstrooms van Dendermonde en verder bovenstrooms in de Rupel sterk geschematiseerd, waarbij er slechts met één element over de breedte wordt gerekend. Mogelijk heeft dit invloed gehad op de verkregen modeluitkomsten.

SUMMARY

The Lower Sea Scheldt is a tidal river in the North of Belgium which is part of the Scheldt estuary. The Lower Sea Scheldt has its origin in France and approximately 350 kilometer downstream it flows into the North Sea. In the Scheldt estuary there is an interaction between the morphology and the tide. Morphological changes in the estuary affect the tide and the change of the tide affects the morphology again.

In the beginning of the 20th century, the maximum tidal range (the difference between high and low tide) within the Scheldt estuary occurs near Liefkenshoek, approximately 80 km upstream from the mouth. The mean tidal range near Liefkenshoek is about 4.5 meter. In the end of the 20th century the maximum tidal range has increased up to almost 5.5 meters and occurs approximately 120 km upstream from the mouth, near Tielrode. The tide penetrates up to Gent, 180 km upstream from the mouth, where the tidal range reaches an average of 1.7 meter in the beginning of the 20th century and increases up to 2.6 meters 100 years later.

In order to maintain the accessibility of the port of Antwerp, dredging works have been carried out in the Western Scheldt and the Lower Sea Scheldt downstream of Antwerp. In this part of the Lower Sea Scheldt, local deepening of 10 meters has occurred since 1960. Upstream of Antwerp, where no dredging has been carried out, erosion up to 7 meters occurred in the past 5 decades. The hypothesis is that the erosion that has occurred in this part of the Lower Sea Scheldt is caused by the dredging works that have been carried out in the Western Scheldt and the Lower Sea Scheldt downstream of Antwerp, and that this has affected the evolution of the tidal range.

These morphological and hydrodynamic changes have, amongst others, unfavorable effects on the safety against flooding along the estuary. In this study, the cause of the evolution of the tidal range and the erosion in the Lower Sea Scheldt from 1960 to 2010 is investigated, where the focus is on the part of the Lower Sea Scheldt upstream of Antwerp.

In this study, the numerical two-dimensional depth-average (2DH) model "FINEL2D" is used, which is developed by Svašek Hydraulics. In the study of Dam (2006) a FINEL2D model of the Western Scheldt was calibrated for the period 1964 to 2002. In this study, the model of Dam (2006) is used and calibrated for the Lower Sea Scheldt for the period 1960 to 2010. The model is calibrated by comparing the simulated hydrodynamic evolutions and erosion- and sedimentation patterns with the observed evolution and erosion- and sedimentation patterns. In the final hindcast, the model obtains a Brier Skill Score of 0.58 after 50 years (a score that indicates the quality and reliability of the model) and is therefore able to predict the bottom changes with a good accuracy. Also the increase of the tidal range and the penetration further upstream of the tide is predicted well by the FINEL2D model. The erosion volume that has occurred can be simulated with a good accuracy. Also dredging volumes in the Lower Sea Scheldt downstream of Antwerp can be predicted well by the model.

To gain insight in the influence of certain parameters, four different scenarios have been simulated for the period 1960 to 2010. The T0 scenario is the final calibration of the model, and simulates reality. A T1 scenario is simulated, where no human impacts have occurred. In a T2 scenario dredging works are performed as the T0 scenario, except that no dumping of the dredged sand takes place. In this scenario a situation of extreme sand extraction is simulated. Finally, a T3 scenario is simulated where no deepening of the navigational channels have been carried out. In this scenario the maintenance depth of the navigational channel in 1960 is utilized. All four scenarios are applied to the entire Scheldt estuary and therefore concern the human impacts in both the Western Scheldt and the Lower Sea Scheldt.

By analyzing the results of the different scenarios, it is clear that the evolution of the tidal range is dominated by the human impacts. The deeper the navigational channel or the more sand is extracted from the system, the more the tidal range increases. Compared to the T0 scenario, the tidal range increases more when no dumping of dredged sand takes place (T2 scenario) and the tidal range decreases when no human impacts take place (T1 scenario). The evolution of the tidal range in the T3 scenario lies between the T0 en the T1 scenario.

In the area of interest, the part of the Lower Sea Scheldt between Antwerp en Schelle, it appears that the human impacts that have been performed from 1960 until 2010 have had a sufficient influence on and are even dominating the sand transport. The more sand is extracted from the part of the Lower Sea Scheldt downstream of Antwerp, the more the sand transport is pulled towards this area. The human impacts however, have the same influence on the sand transport near Schelle, which causes the net erosion in the area of interest to be hardly affected by the human impacts. In all four scenarios a net erosion of 7.7 to 10.9 million m³ sand occurs in this part of the Lower Sea Scheldt. Also when no human impacts are performed, as in the T1 scenario, there occurs erosion. Therefore, this study shows that the erosion in the area of interest is not directly related to the human impacts.

It is possible that the erosion in the Lower Sea Scheldt upstream of Antwerp is a natural phenomenon and that it is caused by the shape of the estuary. The convergent shape of the estuary possibly causes a specific propagation of the tidal wave. Another possible cause is the construction of the weir near Gent. Furthermore, the accuracy of the FINEL2D model is strongly reduced upstream of Dendermonde and further upstream in the Rupel, where it consists of only one element over the width. It is not ruled out that this affected the results of the scenarios.

INHOUDSOPGAVE

	Pag.
SAMENVATTING	I
SUMMARY	III
1 INTRODUCTIE	1
1.1 Achtergrond	1
1.2 Probleemstelling	2
1.3 Aanpak	2
1.4 Leeswijzer	3
2 ANALYSE	4
2.1 Menselijk ingrijpen	4
2.1.1 Baggerwerkzaamheden	4
2.1.2 Verdiepingen	4
2.2 Bodemontwikkelingen	5
2.2.1 Erosie- Sedimentatiepatronen	5
2.2.2 Bodemligging	6
2.2.3 Volumeontwikkelingen	7
2.3 Hydrodynamische ontwikkelingen	8
3 MORFOLOGISCH FINEL2D MODEL	9
3.1 Stroming	9
3.2 Morfologie	10
3.3 Morfologische versnellingsfactor	10
3.4 Spiraalstroming	10
4 OPZET VAN HET MODEL	11
4.1 Rooster	11
4.2 Startbodem	12
4.3 Tijden	12
4.4 Bodemruwheid	13
4.5 Harde lagen	14
4.6 Menselijk ingrijpen	14
4.7 Histories	15
5 KALIBRATIE FINEL2D MODEL	16
5.1 Menselijk ingrijpen	16
5.2 Erosie- en sedimentatiepatronen	18
5.2.1 Brier Skill Score	19
5.3 Hydrodynamische ontwikkelingen	20
5.4 Gemiddelde bodemligging	21
5.5 Volumeontwikkelingen	23
5.6 Samenvatting kalibratieproces	25
5.6.1 Testruns	25
5.6.2 Kalibratieruns	25

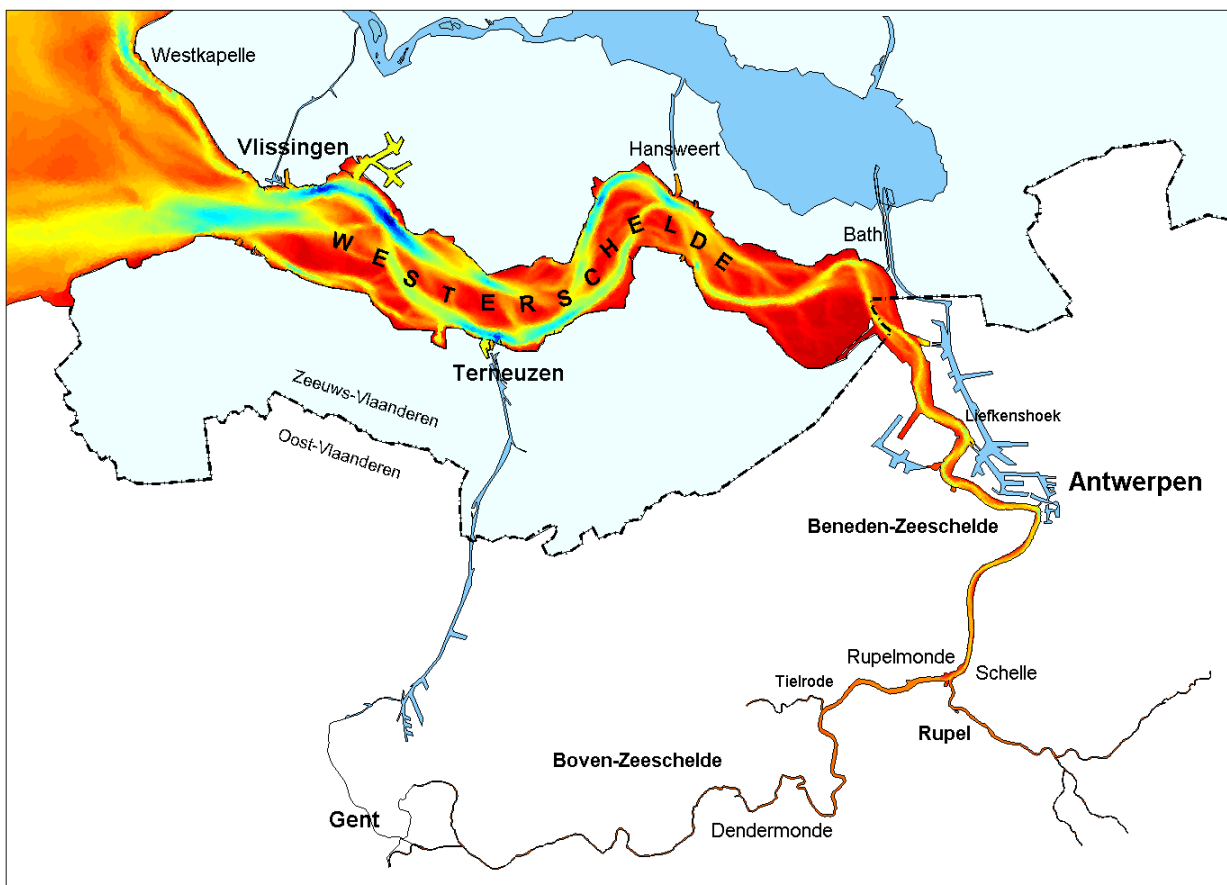
6	SCENARIO'S	26
6.1	T1 Scenario	27
6.1.1	Erosie- en Sedimentatiepatronen	27
6.1.2	Hydrodynamische ontwikkelingen	28
6.1.3	Gemiddelde bodemligging	29
6.1.4	Volumeontwikkelingen.	30
6.2	T2 Scenario	31
6.2.1	Erosie- sedimentatiepatronen	31
6.2.2	Hydrodynamische ontwikkelingen	32
6.2.3	Gemiddelde bodemligging	33
6.2.4	Volumeontwikkelingen	34
6.3	T3 scenario	35
6.3.1	Erosie- sedimentatiepatronen	35
6.3.2	Hydrodynamische ontwikkelingen	36
6.3.3	Gemiddelde bodemligging	37
6.3.4	Volumeontwikkelingen	38
6.4	Analyse van de uitkomsten	39
7	CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN	42
7.1	Calibratie en bruikbaarheid van het model	42
7.2	Scenario's	42
7.3	Toename getijslag	42
7.4	Opgetreden erosie	42
7.5	Antwoord op de deelvragen	43
7.6	Aanbevelingen	43
	BIBLIOGRAPHY	44
BIJLAGEN		
A	ANALYSERAPPORT	1
B	GEOMORFOLOGISCHE KAART	38
C	KAART BENEDEN-ZEESCHELDE	40
D	DWARSDOORSNEDEN RAAIEN	42
E	SCRIPT GETIJSLAG	50
F	CUMULATIEF ZANDTRANSPORT	57

1 INTRODUCTIE

In dit hoofdstuk wordt een korte introductie gegeven over het Schelde estuarium in paragraaf 1.1. In paragraaf 1.2 wordt het probleem toegelicht en wordt de onderzoeksvraag genoemd die bij deze studie is opgesteld. In paragraaf 1.3 wordt de aanpak van het onderzoek beschreven.

1.1 Achtergrond

Het Schelde estuarium, zie Figuur 1-1, is een estuarium dat op morfologisch gebied actief is. Het is gelegen in Zuidwest Nederland en Vlaanderen en staat in verbinding met de rivier de Schelde, welke zijn oorsprong vindt in het Noordwesten van Frankrijk. De Schelde is een rivier van ca. 350 km lang, het getij dringt door tot en met Gent, ca. 180 km bovenstrooms van de mond (Van Rijn, 2010). De Westerschelde, het Nederlandse deel van het estuarium, loopt van de mond tot aan de Belgische-Nederlandse grens en is ca. 60 km lang. De Beneden-Zeeschelde is het Vlaamse deel dat ligt tussen de Belgische-Nederlandse grens en Rupelmonde. Bovenstrooms van Rupelmonde tot aan Gent bevindt zich de Boven-Zeeschelde.



Figuur 1-1: Het Schelde estuarium.

Er is in het estuarium sprake van een wisselwerking tussen het getij en de morfologie. Wanneer de morfologie in het estuarium verandert, heeft dit invloed op het getij waardoor de verandering van het getij op zijn beurt weer invloed heeft op de morfologie (Wang et al., 2002). De getijslag (het verschil tussen hoog en laag water) ter hoogte van Vlissingen was in 2011 gemiddeld ca. 3.8 meter. Ter hoogte van Antwerpen, 75 km verderop, bedroeg de gemiddelde getijslag in dit zelfde jaar ca. 5.3 meter. Bij Gent is deze getijslag nog steeds merkbaar en bedraagt daar in de periode 2001 - 2010 gemiddeld ca. 2.5 meter Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis (2013a).

1.2 Probleemstelling

Uit meetgegevens blijkt dat de Beneden-Zeeschelde sterk is geërodeerd. Deze verandering van de bodemligging leidt tot een verandering van zowel verticaal getij (de waterstanden) als horizontaal getij (de debieten en stroomsnelheden). Deze veranderingen in verticaal en horizontaal getij zijn bovenstrooms merkbaar tot ver voorbij Antwerpen (Plancke et al., 2012). Dit brengt (potentiële) problemen die betrekking hebben op de ecologie en de veiligheid tegen overstromen met zich mee.

De hypothese is dat de opgetreden erosie en de daarmee gepaarde toename van de getijslag in de Beneden-Zeeschelde het gevolg is van de vele baggerwerkzaamheden die in de Westerschelde en de Beneden-Zeeschelde benedenstrooms van Antwerpen zijn verricht. Tot op heden is er echter nog geen sluitende verklaring gevonden voor het optreden van de erosie en wat het effect van de erosie op de ontwikkeling van de waterstanden is.

Het is van belang om inzicht te krijgen in de oorzaak van de opgetreden erosie in de Beneden-Zeeschelde en de ontwikkelingen met betrekking tot de waterstanden. Van hieruit kunnen oplossingen bedacht om verdere erosie en verdere toename van de getijslag tegen te gaan. Het inzicht krijgen in de oorzaak van deze opgetreden ontwikkelingen is dan ook het doel van dit afstudeeronderzoek, waarbij de focus ligt in het gedeelte bovenstrooms van Antwerpen. De onderzoeksvraag bij deze studie luidt:

“Wat is de oorzaak van de opgetreden morfologische en hydrodynamische ontwikkelingen van 1960 tot 2010 in de Beneden-Zeeschelde?”

Deelvragen die bij dit onderzoek zijn opgesteld zijn:

- 1) Wat is het effect geweest van de uitgevoerde baggerwerkzaamheden in het Schelde estuarium op de opgetreden erosie en toename van de getijslag in de Beneden-Zeeschelde?
- 2) Wat is de invloed geweest van de natuurlijke ontwikkelingen op de toename van de getijslag en de opgetreden erosie in de Beneden-Zeeschelde?
- 3) In hoeverre is de opgetreden erosie in de Beneden-Zeeschelde van invloed geweest op de ontwikkelingen van de waterstanden?

1.3 Aanpak

Om een uitspraak te kunnen doen over de oorzaak van de ontwikkelingen die zijn opgetreden, zal een numeriek model, FINEL2D genaamd, worden gebruikt. FINEL2D is een numeriek tweedimensionaal dieptegemiddeld (2DH) model gebaseerd op de Eindige Elementen Methode. Hiermee wordt een hindcast uitgevoerd voor de periode 1960 tot 2010, waarbij het model wordt gekalibreerd op erosie- en sedimentatiepatronen, ontwikkeling van de waterstanden en volumeontwikkelingen. Wanneer het model in staat blijkt om de ontwikkelingen te reproduceren, kan worden gespeeld met de verschillende mogelijke factoren die deze ontwikkelingen beïnvloeden. Op deze manier kan inzicht worden verkregen in de invloed die bepaalde factoren hebben (gehad) op de opgetreden ontwikkelingen.

Voorafgaand aan de kalibratie van het morfologische FINEL2D model is een analyse uitgevoerd. In deze analyse is gekeken naar de bodemsamenstelling, het menselijk ingrijpen en de ontwikkelingen die hebben plaatsgevonden. Van deze analyse is een rapport opgesteld, waarnaar in dit rapport meerdere malen wordt verwezen. Het analyserapport is opgenomen in Bijlage A.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 zullen kort en bondig de resultaten van de analyse die is uitgevoerd worden besproken. De analyse is uitgevoerd om inzicht te krijgen in de veranderingen die het estuarium als geheel, en de Beneden-Zeeschelde als onderdeel van dit geheel hebben doorgemaakt. Tevens zijn de gegevens nodig om het model op te zetten en te kalibreren. Vervolgens zal in het derde hoofdstuk een korte omschrijving worden gegeven van het numerieke modelleringsprogramma FINEL2D en in hoofdstuk 4 wordt uitgelegd hoe het model is opgebouwd. De resultaten van de berekeningen die zijn gedaan om het model te kalibreren zijn terug te vinden in hoofdstuk 5. De definitieve berekeningen waarin verschillende scenario's zijn doorgerekend worden in hoofdstuk 6 uitgebreid besproken en vergeleken. Tot slot worden in hoofdstuk 7 conclusies gevormd, worden de deelvragen beantwoord en worden aanbevelingen gedaan.

2 ANALYSE

In dit hoofdstuk wordt in het kort de uitgevoerde analyse besproken, waarbij enkel wordt gekeken naar de uitgevoerde menselijke ingrepen en de opgetreden ontwikkelingen. In 2.1 wordt ingegaan op de menselijke ingrepen, paragraaf 2.2 behandelt de ontwikkelingen in de bodemligging en in paragraaf 2.3 wordt gekeken naar de hydrodynamische ontwikkelingen. Het complete analyserapport is opgenomen in Bijlage A.

2.1 Menselijk ingrijpen

Reeds eeuwen geleden is de mens begonnen met ingrepen op (de morfologie van) het Schelde estuarium. Zo zijn er door de jaren heen gebieden ingepolderd en harde begrenzingen aangebracht. Ook wordt er in het gehele estuarium al decennia lang onderhoudsmatig gebaggerd en gestort, wordt er zand gewonnen en zijn er verdiepingen uitgevoerd. In deze paragraaf wordt enkel ingegaan op de baggerwerkzaamheden die in de afgelopen decennia in de Beneden-Zeeschelde zijn uitgevoerd. Voor een overzicht van al deze menselijke ingrepen wordt verwezen naar hoofdstuk 3 van Bijlage A.

2.1.1 Baggerwerkzaamheden

De eerste baggerwerkzaamheden in het Schelde estuarium zijn uitgevoerd in 1885 en sinds 1896 geldt er voor verschillende drempels in de Beneden-Zeeschelde een minimum diepte die onderhouden wordt. Tot ca. 1900 hebben de werkzaamheden zich beperkt tot de Beneden-Zeeschelde, maar door de jaren heen heeft dit gebied zich steeds verder stroomafwaarts uitgebreid. Wanneer er geen baggerwerkzaamheden uitgevoerd zullen worden zal de diepte van de bodem naar zijn natuurlijke hoogte van 5 tot 9 meter GLLWS terug keren (Belmans, 1988).

De afgelopen decennia is er jaarlijks ca. 2 miljoen m³ zand onderhoudsmatig uit de Beneden-Zeeschelde gebaggerd, wat grotendeels elders wordt terug gestort. Wanneer gebaggerd zand niet wordt terug gestort, maar voor bijvoorbeeld infrastructurele doeleinden wordt onttrokken uit het systeem, spreekt men van zandextractie. Naast zandextractie vindt er sinds 1990 ook zandwinning plaats in de Beneden-Zeeschelde, wat niet valt onder de reguliere baggerwerkzaamheden. Voor een uitgebreid overzicht van al deze baggerwerkzaamheden wordt verwezen naar paragraaf 3.1 en 3.2 van Bijlage A.

2.1.2 Verdiepingen

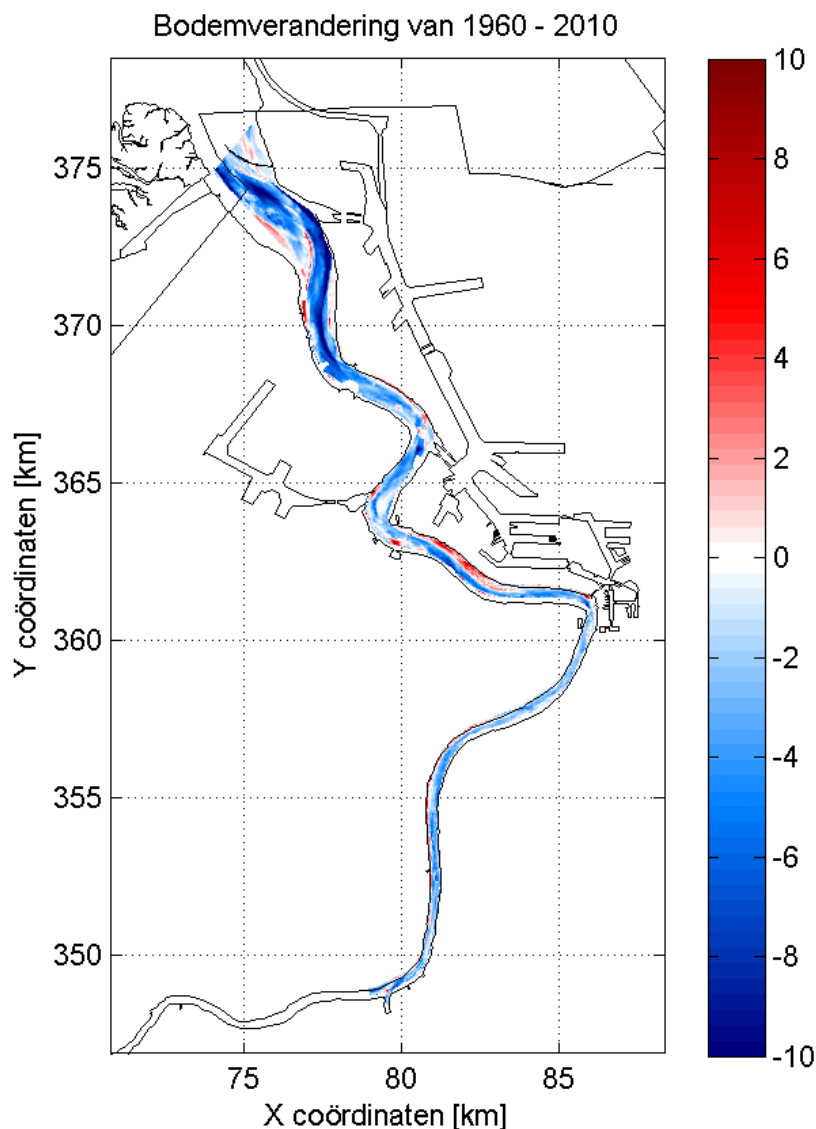
Het Schelde estuarium is voor de scheepvaart vanuit de Noordzee de enige toegang tot de haven van Antwerpen. Door de jaren heen, en in het bijzonder in de laatste vijf decennia, zijn afmetingen van de schepen (en hiermee de benodigde vaargeuldiepte) aanzienlijk toegenomen. Ook heeft het havengebied zich verder uitgebreid. Om de groter wordende scheepvaart toegang tot het havengebied te kunnen blijven bieden zijn er naast de onderhoudsmatige baggerwerkzaamheden een drietal verdiepingen uitgevoerd sinds 1970. De eerste verdieping heeft plaatsgevonden omstreeks 1970 t/m 1975 waarbij de vaargeul met ca. 1.5 tot 2 meter verdiept. De tweede verdieping heeft plaatsgevonden van juli 1997 tot juli 1998, waarbij er wederom verdiept is met 1.5 à 2 meter (Kornman et al., 2002). Tussen 2008 en 2010 is een derde verdieping uitgevoerd, waarbij de vaargeul plaatselijk is verbreed en verdiept tot -14.7 m GLLWS (Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, 2013b). Zie ook paragraaf 3.3 van Bijlage A.

2.2 Bodemontwikkelingen

In de afgelopen 50 jaar is de bodemligging van de Beneden-Zeeschelde sterk veranderd. In dit hoofdstuk wordt gekeken naar de erosie- en sedimentatiepatronen die door de jaren heen zijn ontstaan. Ook wordt er ingegaan op de variatie in de gemiddelde diepte van de bodem en wordt er gekeken naar de netto volumeontwikkelingen in de Beneden-Zeeschelde.

2.2.1 Erosie- Sedimentatiepatronen

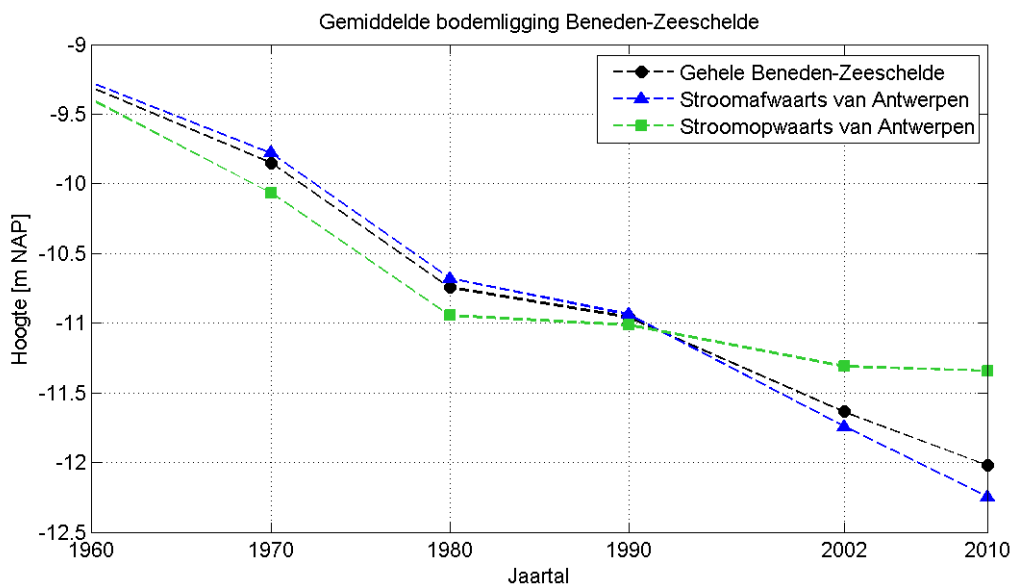
Voor de jaren 1960, 1970, 1980, 1990, 2002 en 2010 zijn door het aMT (afdeling Maritieme Toegang) bodems van de Beneden-Zeeschelde beschikbaar gesteld. Deze bodems zijn gemaakt in het UMT coördinatenstelsel en de hoogten zijn in meter t.o.v. TAW. Deze bodems zijn naar het RD coördinatenstelsel geïnterpoleerd en de hoogten zijn omgezet naar meter t.o.v. NAP. De bodem van 2010 bleek verschoven te zijn na de interpolatie en is opnieuw geïnterpoleerd. In Figuur 2-1 is het verschil te zien tussen de bodem van 1960 en de bodem van 2010.



Figuur 2-1: Bodemverschil van 1960 - 2010. Blauw duidt op verdieping e en rood op verondieping.

2.2.2 Bodemligging

Met behulp van de beschikbaar gestelde bodems is de gemiddelde bodemligging te bepalen. Omdat alle bodems elkaar niet volledig dekken, was het nodig om een polygoon te definiëren waar elke bodem binnen viel, omdat de vergelijking tussen de bodems anders niet 'eerlijk' zou zijn. Dit heeft echter wel als gevolg dat de hoeveelheden mogelijk lager uitvallen dan in werkelijkheid het geval is geweest, omdat er hierdoor gedeelten niet worden meegenomen. In Figuur 2-2 is de gemiddelde bodemligging te zien van de Beneden-Zeeschelde bovenstrooms van Antwerpen, benedenstrooms van Antwerpen en de gehele Beneden-Zeeschelde voor de beschikbare bodems. Uit de figuur blijkt dat er een dominante trend van verdieping is in de tijd, voornamelijk in het tweede decennium waarin er veel is gebaggerd. Tussen 1980 en 1990 treedt er in mindere mate verdieping op en vanaf 1990 neemt dit weer toe.



Figuur 2-2: Variatie in gemiddelde bodemligging in m NAP van de gehele Beneden-Zeeschelde.

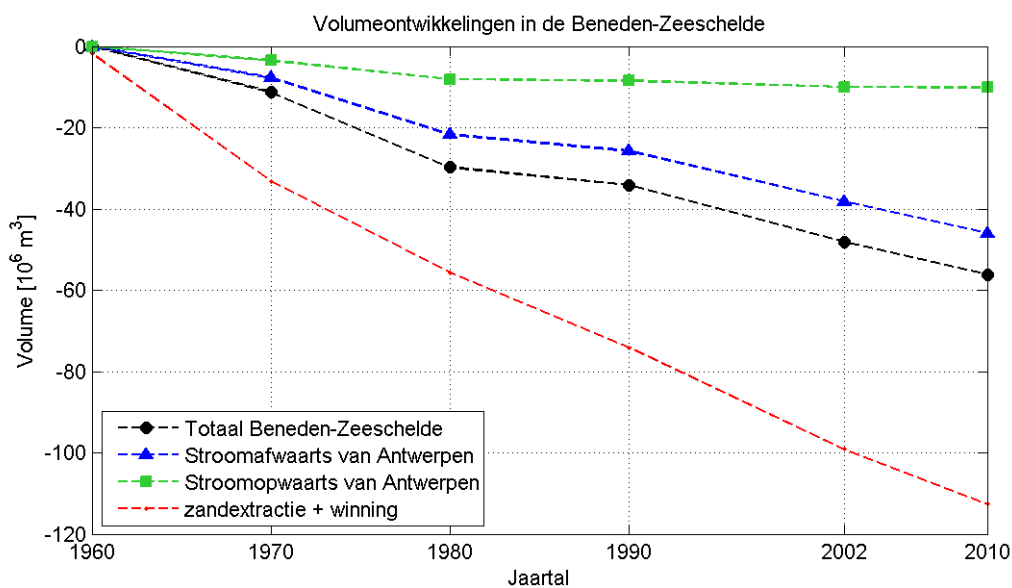
Er is onderscheid gemaakt tussen boven- en benedenstrooms van Antwerpen omdat er bovenstrooms niet is gebaggerd en benedenstrooms wel. Voor beide deelgebieden is een dominante trend van verdieping zichtbaar in de eerste twee decennia. Voor het gebied stroomopwaarts van Antwerpen vindt er na het derde decennium in verhouding met de eerste decennia minder verdieping plaats vergeleken met het gedeelte stroomafwaarts van Antwerpen.

Uit dwarsdoorsneden die van de bodems zijn gemaakt blijkt dat er in 50 jaar tijd lokale verdiepingen tot 10 meter zijn opgetreden in het gedeelte benedenstrooms van Antwerpen en tot 7 meter bovenstrooms van Antwerpen. In Bijlage D zijn de dwarsdoorsneden te zien van 12 raaien die in de Beneden-Zeeschelde zijn gedefinieerd.

2.2.3 Volumeontwikkelingen

Aan de hand van de bodemligging is af te leiden hoeveel zand er in totaal door de jaren heen netto uit de Beneden-Zeeschelde is verdwenen (door zowel menselijk ingrijpen als natuurlijke erosie). Voor elke beschikbare bodem is het totale volume aan water bepaald door op elk punt de diepte te vermenigvuldigen met het oppervlakte van een gridcel. Door voor iedere bodem het volume te vergelijken met de eerdere bodem, wordt bepaald wat de toe- of afname aan volume is geweest in die tijd. Een toename aan watervolume betekent dat er sediment uit de Beneden-Zeeschelde is verdwenen. Wederom geldt dat de waarden mogelijk lager uitvallen omdat er gedeelten niet zijn meegenomen.

In Figuur 2-3 is te zien hoeveel sediment er netto uit de Beneden-Zeeschelde is verdwenen sinds 1960. In de figuur is te zien dat er de gehele Beneden-Zeeschelde bijna 60 miljoen m³ ruimer geworden is in 50 jaar tijd, waarvan ca. 20% in het gedeelte waarin niet is gebaggerd. Voor de gehele Beneden-Zeeschelde geldt dat er in het tweede decennium de grootste hoeveelheid sediment geërodeerd of verwijderd is, dit is ca. 20 miljoen m³ in 10 jaar tijd. De rode lijn is het totaal van de hoeveelheden zandextractie en winning. Uit de figuur kan worden opgemaakt dat er sprake is van grootschalig sedimenttransport in de Beneden-Zeeschelde. Er wordt ruim 100 miljoen m³ zand uit de Beneden-Zeeschelde onttrokken, maar netto verdwijnt er slechts 60 miljoen m³.

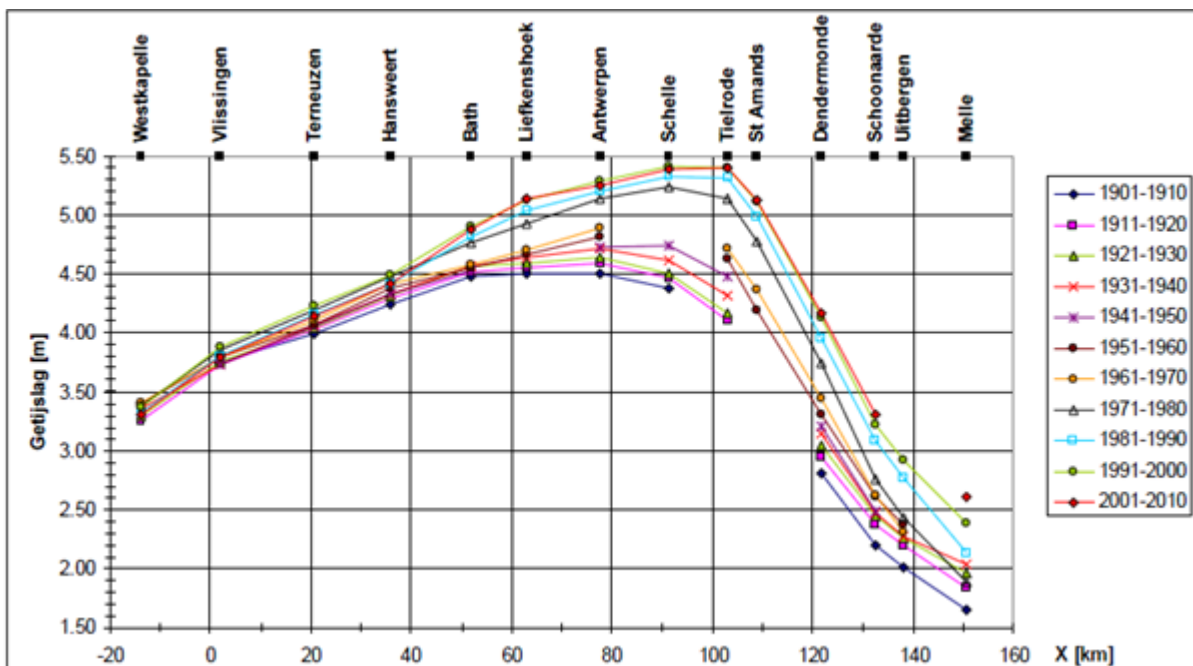


Figuur 2-3: De hoeveelheid netto sediment verlies uit de Beneden-Zeeschelde

2.3 Hydrodynamische ontwikkelingen

Het getij in het Schelde estuarium is een dynamisch fenomeen. Door de jaren heen zijn zowel het horizontale en verticale getij als de getijvoortplanting binnen het estuarium veranderd. Vanaf ongeveer halverwege de 19^e eeuw zijn meetgegevens beschikbaar en aan de hand van historische data is het getij vanaf de 16^e eeuw gereconstrueerd (Mol, 1995). Omstreeks 1550 bedroeg de gemiddelde getijslag ca. 3.10 meter ter hoogte van Vlissingen. Dit was de plaats binnen het estuarium waar toentertijd de grootste getijslag optrad, hoe verder bovenstrooms van Vlissingen, des te meer nam de getijslag af. Halverwege de 19^e eeuw bedraagt de maximale tienjarig gemiddelde getijslag ca. 3.60 meter en treedt op ter hoogte van Bath, nabij de Nederlandse-Belgische grens (LTV, 2007). De toename van de getijslag en de verschuiving van de plaats waar de maximale getijslag optreedt, is zich tot op heden blijven voortzetten. De getijslag ter hoogte van Vlissingen is in 2011 gemiddeld ca. 3.8 meter en 100 km verderop, ter hoogte van Tielrode, bedraagt deze in dit zelfde jaar ca. 5.5 meter. Bij Gent is deze getijslag nog steeds merkbaar en bedraagt daar ca. 2.3 meter (Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, 2013a).

Het verloop van de tienjarig gemiddelde getijslag langs het estuarium voor de afgelopen eeuw is getoond in Figuur 2-4. Hierin is goed te zien dat er in deze tijdreeks een verschuiving plaatsvindt van de locatie waar de maximale getijslag optreedt. In het begin van de 20^e eeuw treedt de maximale tienjarig gemiddelde getijslag op bij Liefkenshoek, terwijl deze aan het eind van deze eeuw optreedt bij Tielrode, 40 km bovenstrooms van Liefkenshoek (Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis (2013a). Een overzicht van waar de waterstandstations zich binnen het estuarium bevinden wordt getoond in Figuur 4-6.



Figuur 2-4: tienjarig gemiddelde getijslag voor opeenvolgende decennia tussen 1901 en 2010. Bron: Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis (2013a).

3 MORFOLOGISCH FINEL2D MODEL

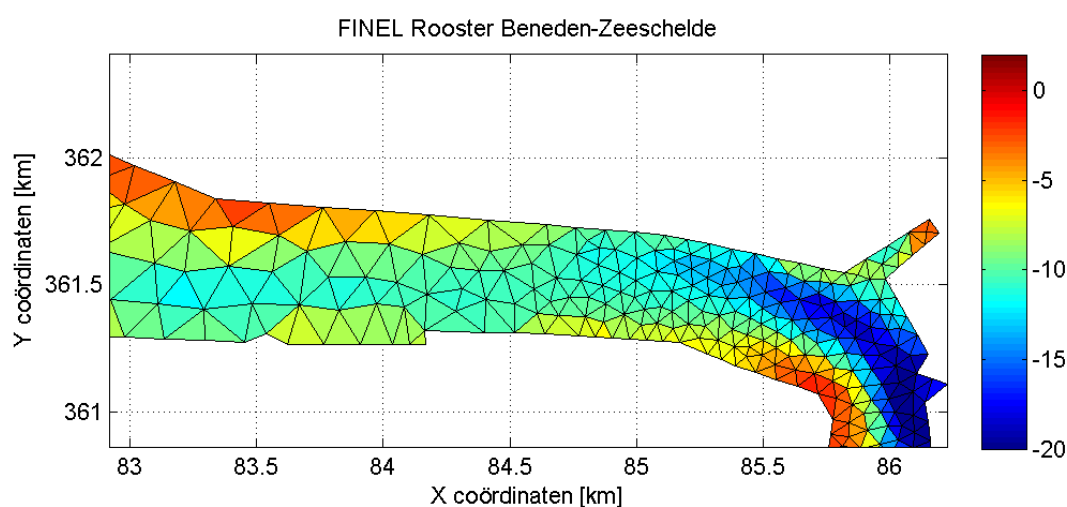
Om na te gaan welke factoren invloed hebben gehad op de opgetreden ontwikkelingen wordt gebruik gemaakt van een numeriek morfologisch model genaamd FINEL2D. Met het model wordt een hindcast uitgevoerd van de periode van 1960 tot 2010. Hierbij wordt het model gekalibreerd en geoptimaliseerd om de opgetreden ontwikkelingen van 1960 tot 2010 zo goed mogelijk te reproduceren. Wanneer het model hiertoe in staat blijkt, kan worden gekeken naar de invloed van bepaalde factoren op deze ontwikkelingen door verschillende scenario's door te rekenen en de uitkomsten hiervan te vergelijken.

In dit hoofdstuk wordt in grote lijnen uitgelegd hoe het morfologische FINEL2D model rekt. In paragraaf 3.1 wordt het stromingsmodel FINEL2D geïntroduceerd, vervolgens wordt in paragraaf 3.2 ingegaan op de morfologische module binnen FINEL2D, in paragraaf 3.3 wordt uitgelegd hoe en waarom er bij simulaties een morfologische versnellingsfactor wordt toegepast en tot slot wordt het begrip spiraalstroming in paragraaf 3.4 toegelicht.

3.1 Stroming

FINEL2D is een numeriek 2DH stromingsmodel dat is gebaseerd op de Eindige Elementen Methode. 2DH, tweedimensionaal horizontaal, houdt in dat de stroming in twee richtingen, de x- en y-richting, wordt berekend en dat de stroomsnelheid dieptegemiddeld is. Het model is ontwikkeld door Svašek Hydraulics en wordt gebruikt voor het simuleren van stroming en morfologie in rivieren, estuaria en kustgebieden. Het model rekt met ongestructureerde roosters, waarbij de driehoekige elementen variëren in zowel grootte als vorm, zie Figuur 3-1.

De stroomsnelheden worden in FINEL2D berekend aan de hand van de bodemligging. Aan de hand van de stroomsnelheden worden in de morfologische module MORFIN de sedimentconcentraties bepaald. Vervolgens wordt de bodemligging opnieuw bepaald en berekent FINEL2D opnieuw de stroomsnelheden. Deze stappen worden telkens herhaald, wat een grote reken capaciteit en lange doorrekeningstijden vereist. Het rekenen met een ongestructureerd rooster biedt de mogelijkheid om in een bepaald interessegebied lokaal de fijnheid te verhogen. Op deze manier kan veel rekentijd worden bespaard doordat de grote rekeninspanning enkel in de interessegebieden plaatsvindt.



Figuur 3-1: Onregelmatig rooster van het FINEL2D model van de Beneden-Zeeschelde.

3.2 Morfologie

Binnen FINEL2D bestaat er een sedimenttransport-module, "MORFIN", waarin onderscheid kan worden gemaakt tussen zand, slib en een combinatie van zand en slib waarbij interactie tussen de twee soorten sediment wordt meegenomen. Bij dit onderzoek wordt de aanwezigheid van slib buiten beschouwing gelaten en wordt gerekend met de module MORFIN-Sand. Er zijn verschillende zandtransport formules die beschikbaar zijn in deze module. De zandtransportformule die bij dit onderzoek is toegepast is die van Engelund-Hansen (1967). De transportformule van Engelund-Hansen volgens Dam et al. (2014b) in de module MORFIN-Sand luidt:

$$q_t = \frac{0.05 \cdot U^5}{(s-1)^2 g^{0.5} d_{50} C^3}$$

Waarin:

Symbol	Definitie		Eenheid
q_t	Sedimentflux	<i>(berekent MORFIN-Sand)</i>	m ² /s
U	dieptegemiddelde stroomsnelheid	<i>(berekent FINEL2D)</i>	m/s
s	relatieve dichtheid sediment	$s = \frac{\rho_s}{\rho_w}$	-
g	zwaartekrachtversnelling	$g = 9.81$	m/s ²
d_{50}	nominale korreldiameter	<i>varieert</i>	m
C	coëfficiënt van Chezy	$18 \log \left(\frac{12h}{k_s} \right)$	m ^{0.5} /s
h	Waterdiepte	<i>varieert</i>	m
k_s	Bodemruwheid	<i>varieert</i>	m

3.3 Morfologische versnellingsfactor

Om de reketijden te beperken wordt bij langdurige simulaties een morfologische versnellingsfactor toegepast. De morfologische versnellingsfactor die bij dit onderzoek is gebruikt is 24.75. Hiermee wordt de reketijd een factor 24.75 korter en de bodemveranderingen die het model iedere tijdstap berekend worden dan met een factor 24.75 vermenigvuldigd.

Voor deze factor is gekozen om de invloed van een springtij doottij cyclus periodiek mee te nemen. Een springtij doottij cyclus duurt ca. 14.8 dagen, en heeft veel invloed op de mate van sedimenttransport. Door de duur van deze cyclus gelijk te stellen aan een jaar wordt de invloed van doottij en springtij jaarlijks meegenomen.

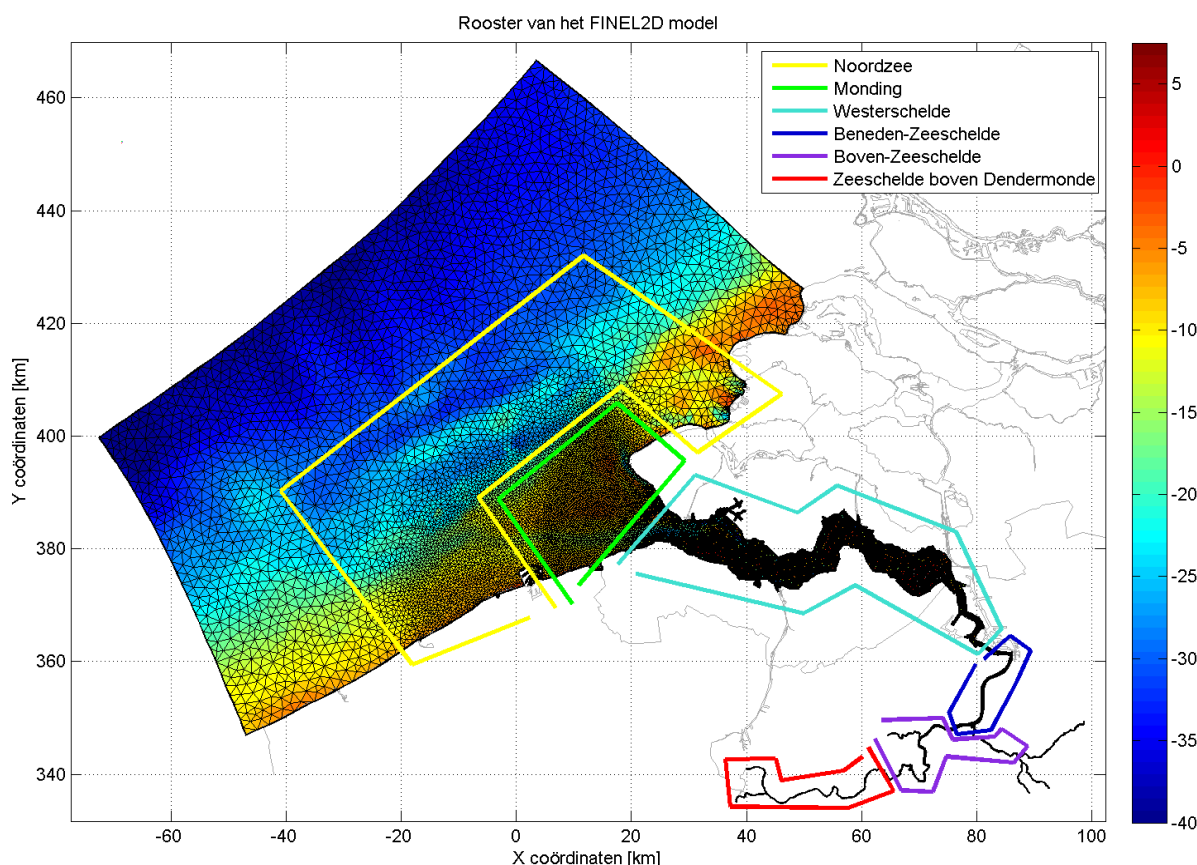
3.4 Spiraalstroming

In bochten van een rivier doet zich een driedimensionale stroming voor die sediment van de buitenbocht naar de binnenbocht verplaatst. FINEL2D is een tweedimensionaal stromingsmodel en berekent geen driedimensionale stroming. Er bestaat echter een module binnen FINEL2D welke deze driedimensionale stroming weet mee te nemen door middel van een parametrisatie.

4 OPZET VAN HET MODEL

4.1 Rooster

Met behulp van Google Earth zijn de grenzen van het model aangegeven. Tevens is in Google Earth de grootte van het elementen opgegeven per deelgebied binnen het estuarium. Het Schelde estuarium is als volgt onderverdeeld in 6 deelgebieden, met elk een andere fijnheid van het rooster. In Figuur 4-1 zijn de verschillende deelgebieden binnen het estuarium te zien.



Figuur 4-1: Het rooster van het FINEL2D model van het Schelde estuarium met de daarin gedefinieerde deelgebieden.

Voor de deelgebieden in Figuur 4-1 gelden de volgende fijnheden van het rooster:

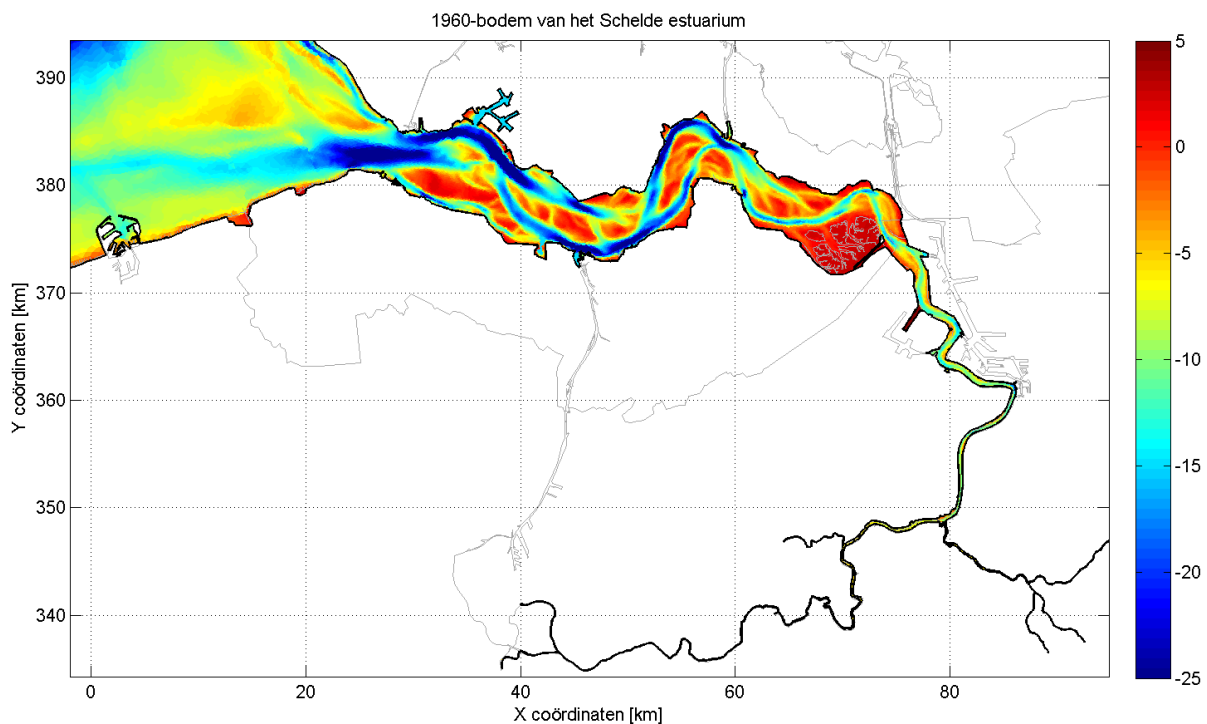
Gebied 1	Noordzee	1500 m
Gebied 2	Monding	480 m
Gebied 3	De Westerschelde	137 m
Gebied 4	De Beneden-Zeeschelde	40 m
Gebied 5	De Boven-Zeeschelde	100 m
Gebied 6	Zeeschelde boven Dendermonde	350 m

In de studie van Dam (2006) is reeds een FINEL2D model van de Westerschelde gekalibreerd. De grootte van de elementen voor de gebieden 1, 2 en 3 zijn hieruit overgenomen. Er is overwogen om de fijnheid van de Westerschelde en de monding te verlagen. Er zijn echter baggerwerkzaamheden in het model ingevoerd in dit gebied, welke mogelijk niet nauwkeurig genoeg worden meegenomen. Ook vereist het nauwkeurig reproduceren van de waterbeweging een rooster met voldoende resolutie, daarom is besloten om de resolutie niet te verlagen in de Westerschelde.

4.2 Startbodem

Als startbodem is een samengestelde bodem voor het jaar 1960 gemaakt, omdat er niet één complete bodem van het gehele Schelde estuarium beschikbaar was, zie Figuur 4-2. Voor de Boven-Zeeschelde en alle vertakkingen zijn handmatig globale dieptes opgegeven omdat hiervan geen data beschikbaar was. Voor de monding, de Westerschelde en de Beneden-Zeeschelde zijn beschikbare gegevens gebruikt. De volgende bodems zijn samen geïnterpoleerd tot één samengestelde bodem van het estuarium:

Westerschelde Oost	bodem uit 1960
Westerschelde West	bodem uit 1959
Beneden-Zeeschelde	bodem uit 1960
Monding	bodem uit 1978



Figuur 4-2: Startbodem voor het FINEL2D model van het Schelde estuarium in 1960.

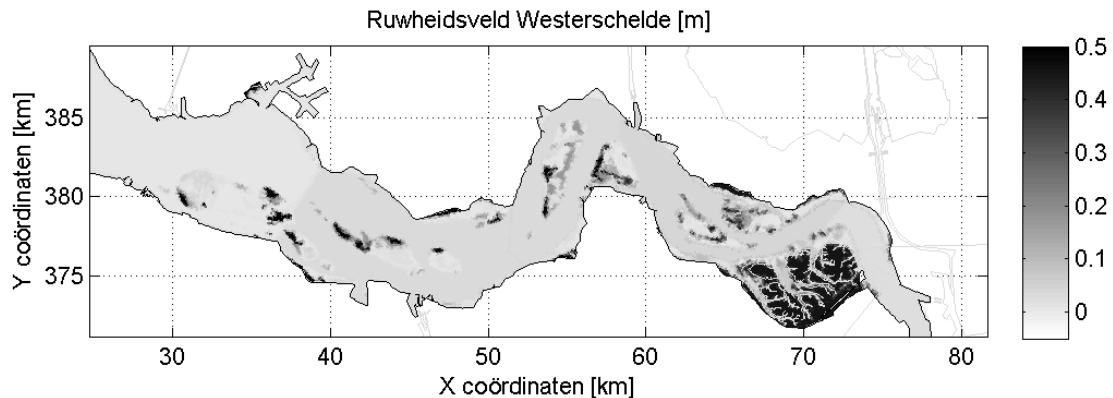
4.3 Tijden

Het beginjaar van de simulatie is 1960 en het eindjaar is 2010. In het model kan worden opgegeven voor welke tijdstap er een bodem moet worden weggeschreven (flow files). Tevens kan worden opgegeven om de hoeveel tijd het model de waterstand en stroomsnelheden weg moet schrijven voor aangegeven locaties binnen het model (history files). Flow files worden maandelijks weggeschreven en history files worden elke 10 minuten weggeschreven. In paragraaf 4.7 wordt verder ingegaan op de histories.

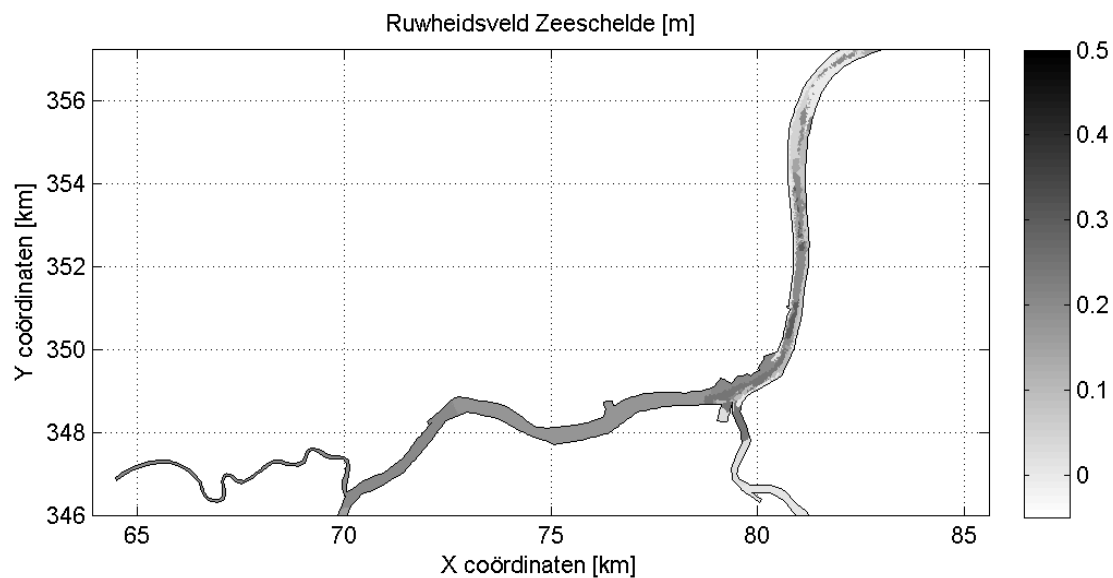
Voor de module MORFIN-Sand in werking gaat, wordt eerst de waterbeweging een dag ingespeeld zonder morfologie. Na een dag wordt geacht dat de waterbeweging stabiel is en wordt de module ingeschakeld. Ook de morfologische versnellingsfactor zal dan pas worden meegenomen.

4.4 Bodemruwheid

In eerste instantie is één globale ruwheid gekozen voor het gehele model. Vervolgens is er een veld gemaakt waarin de ruwheid in de ruimte varieert. Dit ruwheidsveld is gemaakt op basis van een eerdere studie (Dam, 2006) en van een geomorfologische kaart van de Beneden-Zeeschelde (Chen et al., 2010). Deze geomorfologische kaart is opgenomen in Bijlage B. Voor delen waarvan er geen beschikking is over gegevens van de bodemstructuur is geoptimaliseerd op basis van het vergelijken van erosie- en sedimentatiepatronen en hoog- en laagwaterstanden van het model en metingen.



Figuur 4-3: Ruwheidsveld voor de Westerschelde. Een aanpassing op het ruwheidsveld van Dam (2006).



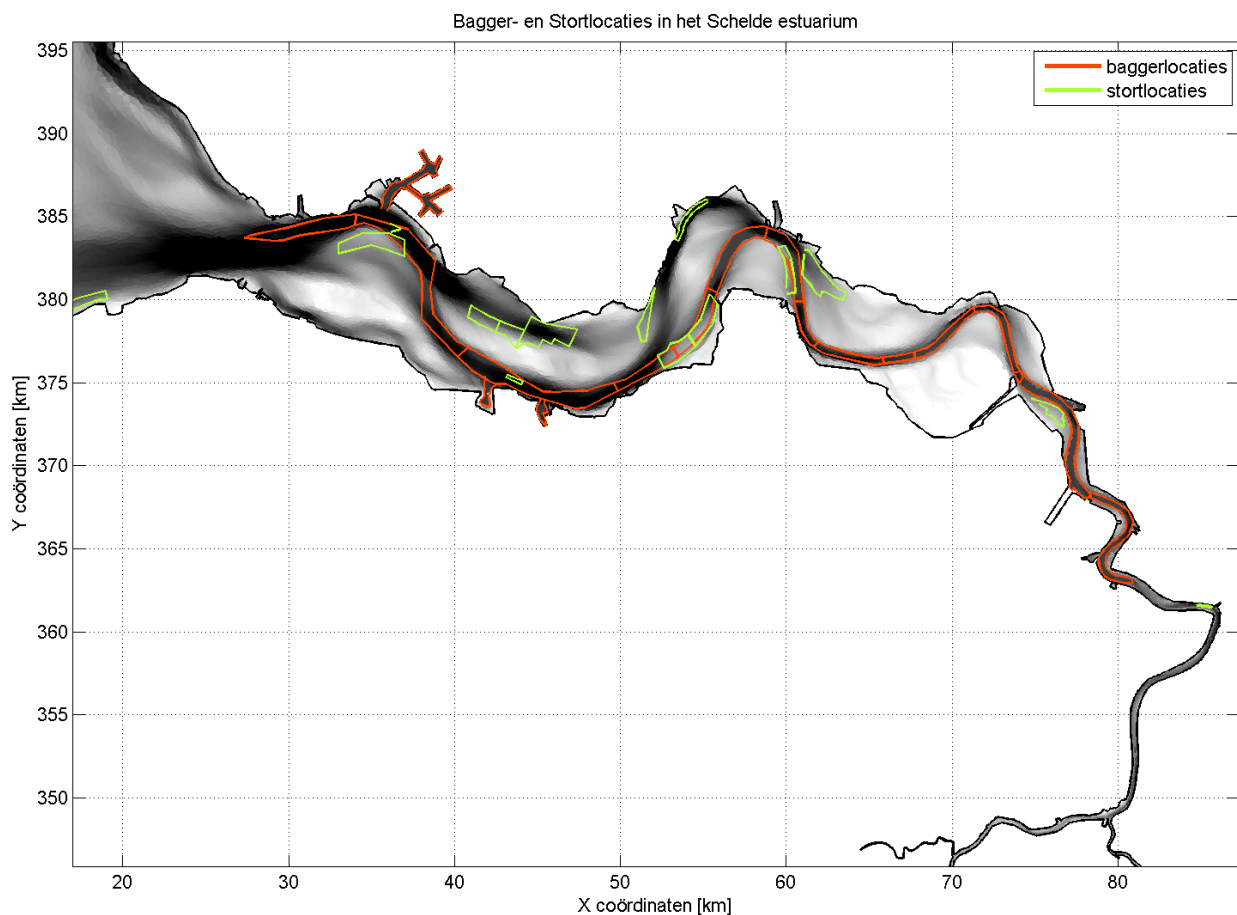
Figuur 4-4: Ruwheidsveld voor de Zeeschelde. Aan de hand van geomorfologische gegevens (Chen et al., 2010).

4.5 Harde lagen

Door Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis (2013e) is een kaart samengesteld waarin de diepte van de harde laag van de Beneden-Zeeschelde is opgenomen. Deze kaart is gecombineerd met een zelfde kaart voor de Westerschelde (Dam, 2012). Deze gecombineerde kaart is in eerste instantie toegepast in het model. Na het uitvoeren van een simulatie bleek dat de bodem van het model op een aantal plaatsen niet erodeerde, waar dit in werkelijkheid wel gebeurde. Om de harde laag te verbeteren is van alle beschikbare bodems één laagste bodem gemaakt. Vervolgens is deze laagste bodem vergeleken met de niet-erodeerbare bodem. Zo werd duidelijk op welke plaatsen de harde laag te ondiep lag. Er is een nieuwe harde laag gemaakt door de huidige harde laag te verlagen tot de diepte van de laagste bodem op de plaatsen waar deze te hoog lag. De nieuwe harde laag wordt getoond in Figuur 2-10 van Bijlage A.

4.6 Menselijk ingrijpen

Ten behoeve van het uitvoeren van de hindcast van 1960 - 2010 is getracht de baggerwerkzaamheden die zijn uitgevoerd zo nauwkeurig mogelijk op te geven in het model. Hierbij is er voor verschillende locaties binnen de vaargeul een bepaalde onderhoudsdiepte opgegeven. Het model 'baggert' dan sediment weg dat boven deze onderhoudsdiepte komt te liggen. Net als in werkelijkheid, wordt het gebaggerde zand grotendeels terug gestort in het estuarium. De locaties van deze stortvakken zijn bekend, deze zijn 'overgetrokken' en in het model ingevoerd. Per stortgebied wordt in het model opgegeven hoeveel procent van het gebaggerde sediment van ieder willekeurig baggergebied er daar wordt terug gestort. In Figuur 4-5 zijn de bagger- en stortvakken weergegeven voor het jaar 2009.



Figuur 4-5: Bagger- en stortlocaties in het FINEL2D model van het Schelde estuarium.

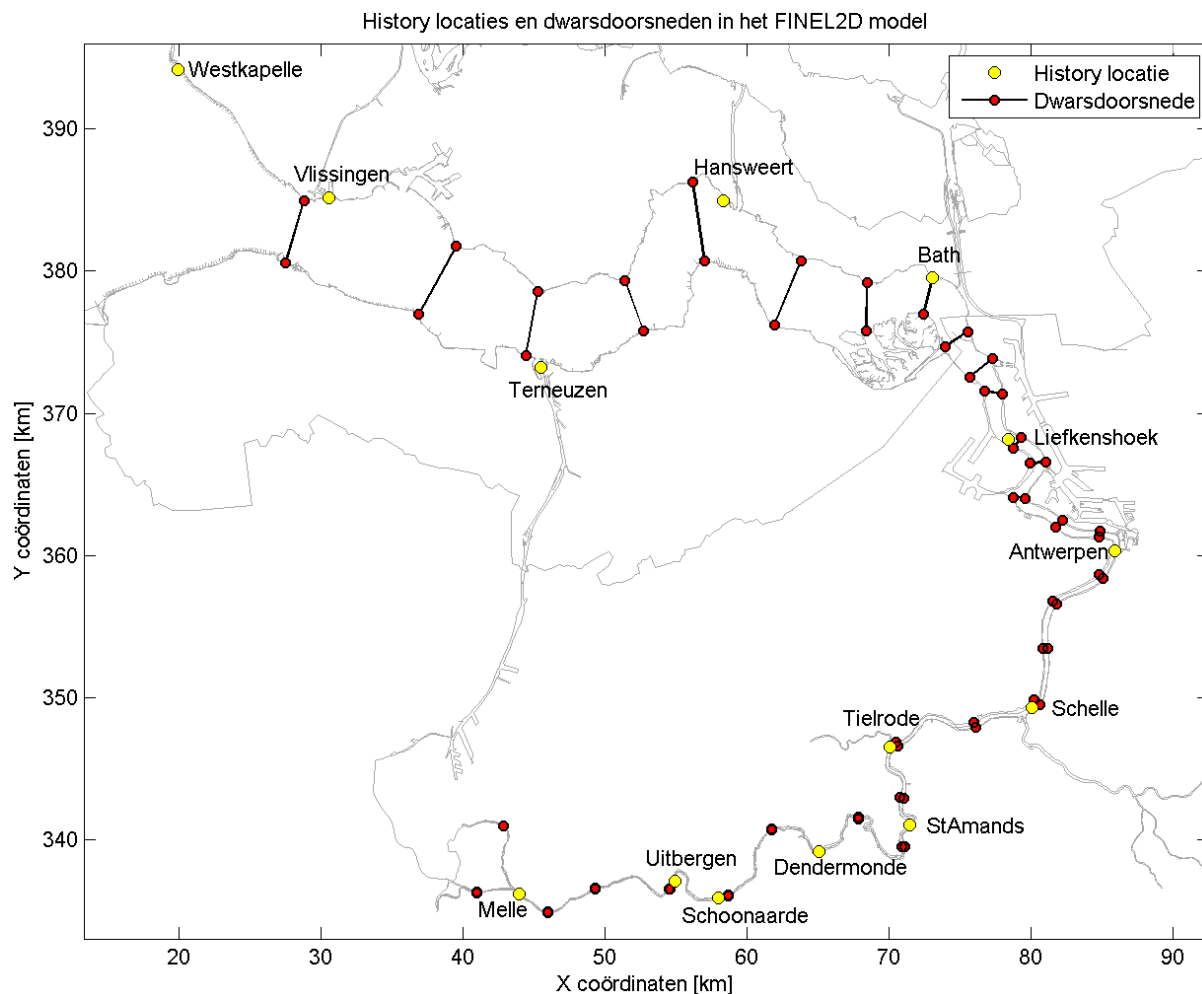
4.7 Histories

In FINEL2D is er een input optie genaamd histories. Met histories kunnen voor verschillende soorten locaties tijdseries worden weggeschreven, waaronder history locaties en dwarsdoorsneden. Bij de input optie 'tijden' wordt onder andere aangegeven met welke frequentie de tijdseries worden weggeschreven. Bij de simulaties die bij dit onderzoek zijn uitgevoerd is gekozen voor een frequentie van elke 10 minuten.

De history locaties die zijn opgegeven in het model zijn de locaties van de waterstandstations die zijn beschouwd bij de analyse van de hydrodynamische ontwikkelingen in paragraaf 2.3. De tijdseries voor een history locatie worden weggeschreven in de vorm van een 'history.mat' file, welke voor alle opgegeven locaties onder andere de waterstand, de bodemligging en de stroomsnelheid in de x- en y-richting bevat.

Tevens zijn er dwarsdoorsneden opgegeven in het model. Van de opgegeven dwarsdoorsneden worden de tijdseries weggeschreven in de vorm van een 'discharge.mat' file met dezelfde frequentie als bij de history locaties. In een 'discharge.mat' file wordt door FINEL2D voor alle opgegeven doorsneden onder andere het debiet, het bodemtransport en het zwevende transport van het sediment weggeschreven.

In het model zijn onder andere de dwarsdoorsneden opgegeven die in ook bij de analyse zijn beschouwd, zie Bijlage D. Daarnaast zijn er nog een aantal dwarsdoorsneden in de Westerschelde en in de Boven-Zeeschelde gedefinieerd. In Figuur 4-6 zijn de opgegeven history locaties en de dwarsdoorsneden te zien. De history locaties zijn met geel gegeven en de dwarsdoorsneden met rood. Tevens zijn de namen van de history locaties opgenomen in de figuur.



Figuur 4-6: History locaties en dwarsdoorsneden die zijn opgegeven in het FINEL2D model.

5 KALIBRATIE FINEL2D MODEL

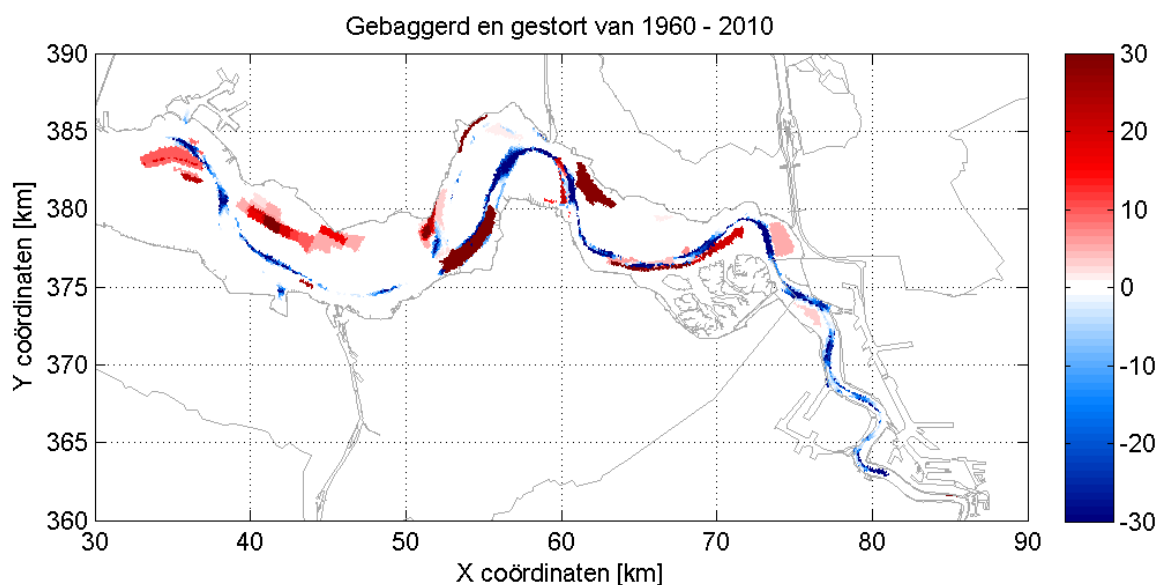
In dit hoofdstuk worden de modelresultaten van de kalibratie van het FINEL2D model besproken. Er wordt gekeken naar hoe goed het model in staat is om alle ontwikkelingen te reproduceren, waarbij de focus ligt op de ontwikkelingen die in hoofdstuk 2 zijn geanalyseerd. In paragraaf 5.1 wordt de nauwkeurigheid van de baggerwerkzaamheden besproken. De morfologische ontwikkelingen worden besproken in paragraaf 5.2, 5.3 en 5.4, waarbij wordt gekeken naar erosie- en sedimentatiepatronen, de bodemligging en de volumeontwikkelingen. Tot slot wordt gekeken naar de hydrodynamische ontwikkelingen in paragraaf 5.5. In paragraaf 5.6 wordt een overzicht gegeven van de optimalisatieslagen die zijn gedaan bij de kalibratie van het model.

5.1 Menselijk ingrijpen

De in het model ingevoerde baggerwerkzaamheden zijn uitgevoerd op basis van het opgeven van een vastgestelde minimumdiepte in de vaargeul. Een flowfile geeft onder andere als output hoeveel er per element sinds het begin van de simulatie gebaggerd en gestort is in m^3 per m^2 . In Figuur 5-1 is te zien op welke plaatsen en in welke mate er in het morfologische model van het Schelde estuarium is gebaggerd en gestort van 1960 tot 2010. Wat uit de figuur kan worden opgemaakt is dat er door de jaren heen in de Westerschelde meer is gebaggerd en gestort dan in de Beneden-Zeeschelde. Dit komt overeen met de baggerstatistieken, zie hoofdstuk 3 van het analyserapport.

Voor de Beneden-Zeeschelde geldt dat er veel gebaggerd is bij de drempel van Zandvliet, Frederick, Lillo en Krankeloon. Uit de baggerstatistieken blijkt ook dat er door de jaren heen voornamelijk zand wordt gebaggerd bij deze drempels. Ook de locaties waar volgens de baggerstatistieken veel is gestort, komen goed overeen met de stortlocaties in het model, zie bijlage C voor een kaart van de Beneden-Zeeschelde waarin de drempels en platen zijn aangegeven.

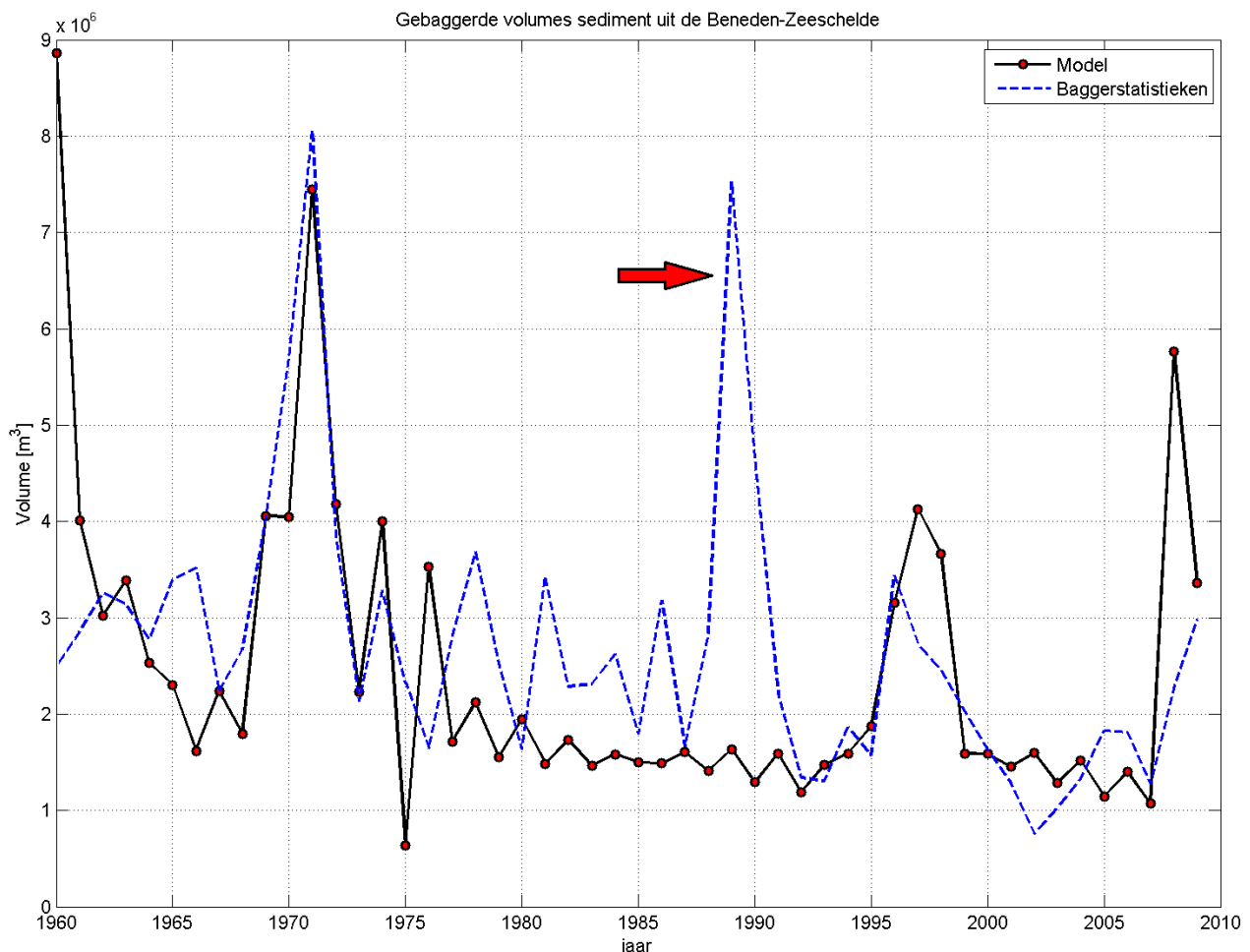
Van al het gebaggerde zand uit de Beneden-Zeeschelde wordt ca. 60 tot 100% teruggestort bij Schaar van Ouden Doel, waar sinds 1990 zand wordt gewonnen. Het model gaat er vanuit dat er sinds 1990 geen zand meer wordt gestort bij Schaar van Ouden Doel, maar dat het gebaggerde zand rechtstreeks wordt gewonnen uit de Beneden-Zeeschelde. Het model toont dan ook dat hier minder zand is gestort dan bij andere stortlocaties in het estuarium.



Figuur 5-1: De gebaggerde en gestorte hoeveelheden in het Schelde estuarium volgens FINEL2D van 1960 tot 2010 [m^3/m^2].

Om na te gaan hoe betrouwbaar deze gebruikte methode is, is gekeken of de gebaggerde volumes uit de Beneden-Zeeschelde in het model overeen komen met de daadwerkelijk gebaggerde volumes. Het model geeft als output, 'dz_dredge', hoeveel m³ er per m² is gebaggerd binnen één element. Om het gebaggerde volume te achterhalen, moet de oppervlakte van ieder element vermenigvuldigd worden met de gebaggerde diepte in dat element. Door voor ieder jaar het gebaggerde volume te verminderen met het volume van het voorgaande jaar eerder krijg je de jaarlijks gebaggerde volumes.

In Figuur 5-2 zijn de jaarlijks gebaggerde volumes volgens het model vergeleken met de jaarlijks gebaggerde volumes volgens de baggerstatistieken. Uit de figuur blijkt dat de gebaggerde volumes in het model goed overeenkomen met de daadwerkelijk gebaggerde volumes. Wat echter opvalt, is de piek in 1960, welke het gevolg is van het inspelen van het model. Daarnaast is in 1989 (zie rode pijl) een piek te zien voor de baggerstatistieken, die niet in het model is terug te zien. Dit heeft te maken met de aanleg van de Liefkenshoektunnel, waarvoor er in dat jaar meer dan 4 miljoen m³ zand is gebaggerd. Ook is er voor de bouw van de Europaterminal in 1989 - 1990 ca. 1.5 miljoen m³ zand gebaggerd. Deze ingrepen zijn niet in het model opgenomen. Tot slot is in 2008 een piek te zien voor het model, welke volgens de statistieken vele malen lager uitvalt. Dit heeft te maken met het niet correct invoeren van de derde verdieping die plaats heeft gevonden van 2008 tot 2010. In het model heeft deze verdieping plaatsgevonden over de jaren 2008 en 2009, waardoor er in 2008 iets meer is gebaggerd.

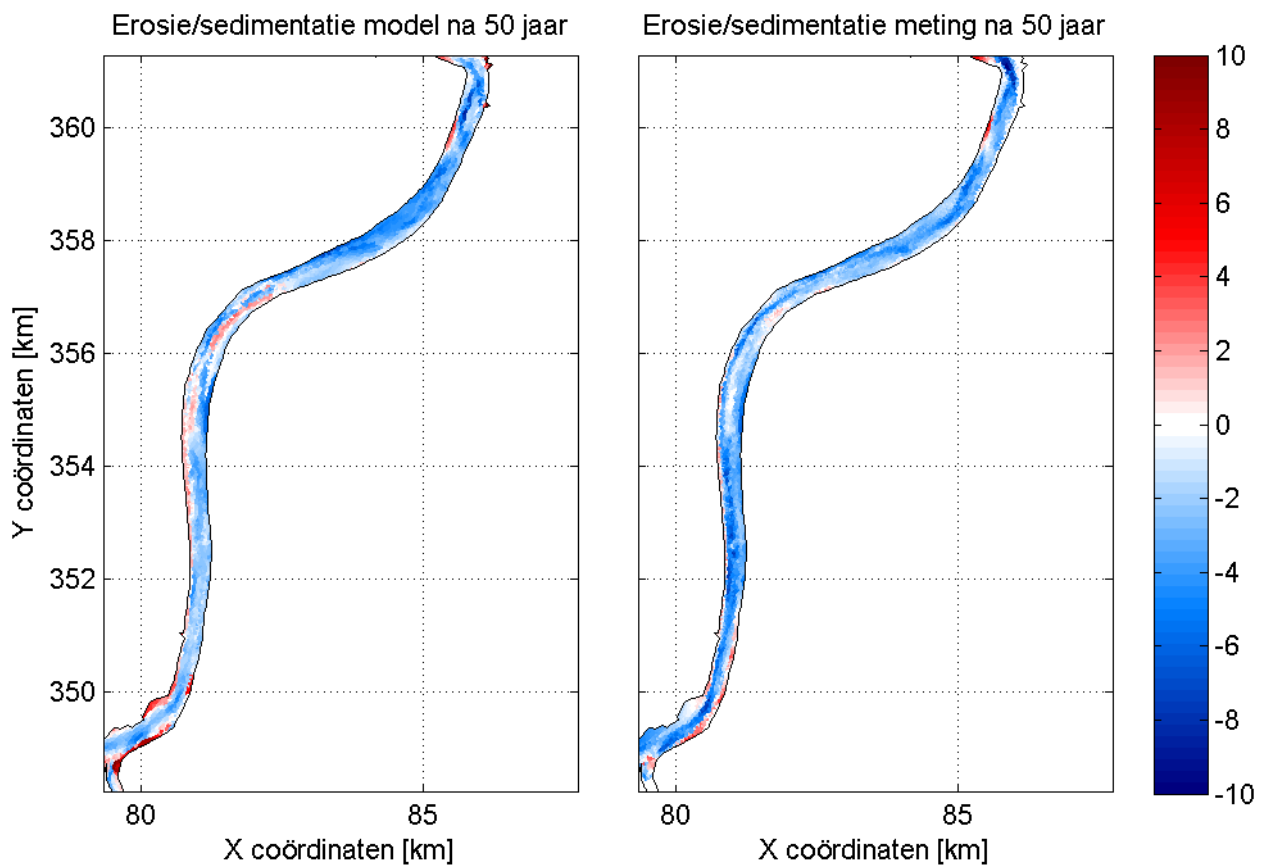


Figuur 5-2: Jaarlijks gebaggerde volumes zand uit de Beneden-Zeeschelde.

5.2 Erosie- en sedimentatiepatronen

De erosie- en sedimentatiepatronen zijn de verschillen in bodemligging die (op natuurlijke wijze) optreden na een bepaalde tijd. De bodemligging, 'z', zit in de flowfiles en wordt maandelijks weggeschreven. In de analyse is gebruik gemaakt van de beschikbare bodems (1960, 1970, 1980, 1990, 2002 en 2010) en is ook gekeken naar de erosie- en sedimentatiepatronen. In het model komt dit overeen met de bodems in flow 1, 121, 241, 361, 505 en 601.

In Figuur 5-3 is de door het model gesimuleerde (links) en de aan de hand van metingen geobserveerde erosie/sedimentatie te zien na 50 jaar. Het model lijkt de opgetreden bodemverandering goed te kunnen reproduceren. Waar volgens de metingen erosie en sedimentatie optreedt, voorspelt het model dit ook. Helemaal links onderin de figuren is bevindt zich een gebied dat niet onder water ligt en dus niet aan erosie onderhevig is. De erosie die hier volgens de meting is opgetreden is het gevolg van het interpoleren van de gemeten bodem naar het FINEL2D rooster.



Figuur 5-3: Erosie- en sedimentatiepatronen volgens het FINEL2D model (links) en de gemeten bodems (rechts) na 50 jaar.

5.2.1 Brier Skill Score

Naast het visueel vergelijken van de door het model gesimuleerde bodemveranderingen en de gemeten bodemverandering, is er een methode om de kwaliteit van een morfologisch model te toetsen aan de hand van een Brier Skill Score, ofwel BSS. Deze BSS score wordt bepaald met behulp van onderstaande vergelijking (Sutherland et al., 2004).

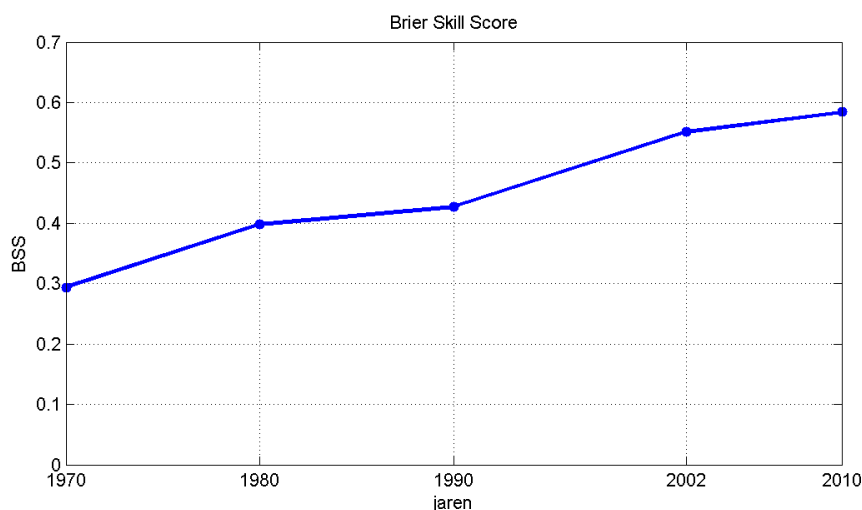
$$BSS = 1 - \frac{\langle (Y - X)^2 \rangle}{\langle (B - X)^2 \rangle}$$

In deze vergelijking is Y de door het model gesimuleerde bodemligging, X de gemeten bodemligging en B de referentiebodem. Met de vergelijking wordt gekeken naar het verschil tussen de simulatie en de werkelijkheid, ten opzichte van de opgetreden veranderingen. Een score van 1 is de perfecte score en een negatieve score geeft aan dat het model niet bruikbaar is. In Van Rijn, et al. (2003) is de waarde van de Brier Skill Score geassocieerd als weergegeven in kolom 3 van Tabel 5.1.

Tabel 5.1: Classificatie van de Brier Skill Score (Van Rijn et al., 2003).

Qualification	Wave height; RMAE	Velocity; RMAE	Morphology; BSS
Excellent	< 0.05	< 0.1	1.0–0.8
Good	0.05–0.1	0.1–0.3	0.8–0.6
Reasonable/fair	0.1–0.2	0.3–0.5	0.6–0.3
Poor	0.2–0.3	0.5–0.7	0.3–0
Bad	>0.3	>0.7	<0

Voor de uitgevoerde simulatie is de Brier Skill Score bepaald voor de bodems die overeenkomen met de jaartallen van de beschikbare gemeten bodems. In Figuur 5-4 is het verloop van de BSS te zien, welke in de tijd stijgende is. Volgens de classificering van Van Rijn et al. (2003) blijkt het model de ontwikkelingen met een redelijk goede reproductienaauwkeurigheid te kunnen voorspellen. Uiteindelijk wordt een BSS van 0.58 verkregen na 50 jaar.

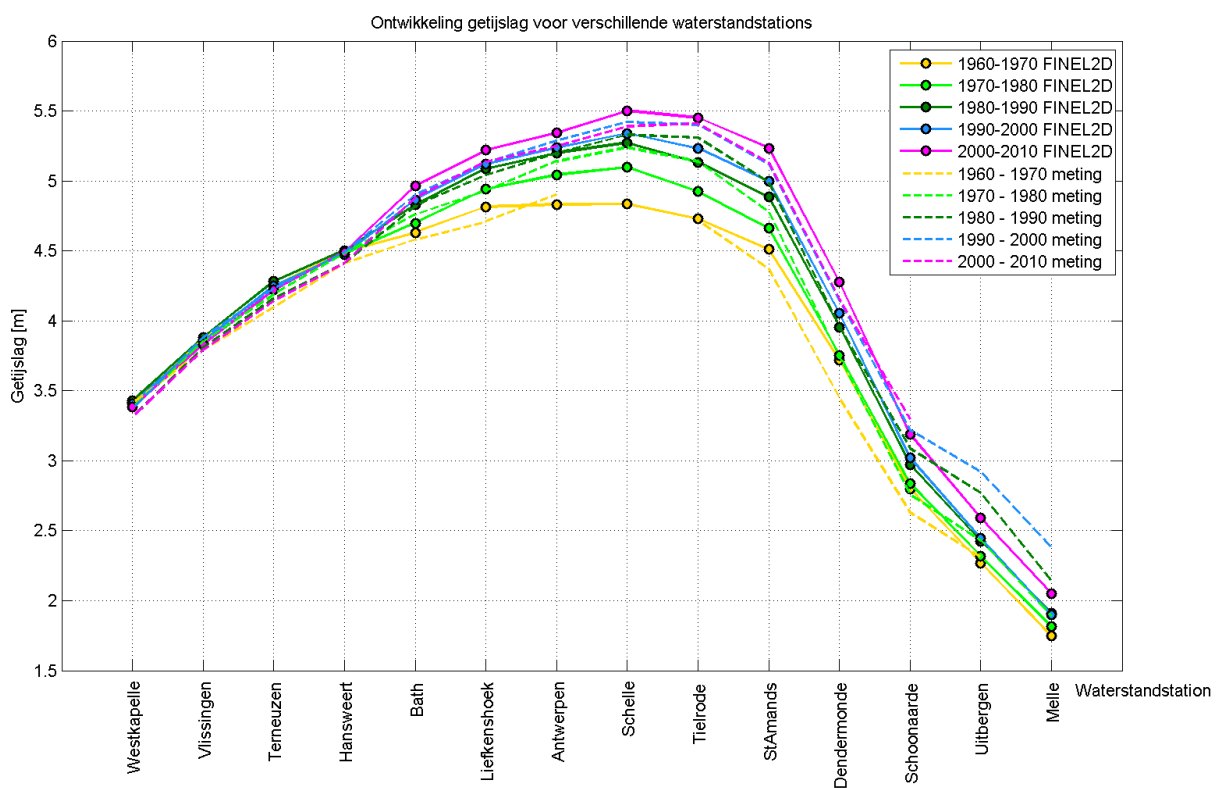


Figuur 5-4: Verloop van de Brier Skill Score voor de periode 1960 - 2010.

5.3 Hydrodynamische ontwikkelingen

Bij de analyse is gekeken naar de hydrodynamische ontwikkelingen in het gehele estuarium. In dit hoofdstuk wordt gekeken in hoeverre het model in staat is om deze ontwikkelingen te reproduceren. De waterstandstations die in de analyse zijn beschouwd, zijn in het model ingevoerd als history locaties, zie Figuur 4-6.

Om de getijslag te kunnen bepalen is per station eerst gedefinieerd waar zich de toppen en dalen in de waterstanden bevinden (hoog- en laagwaterstanden). Vervolgens is voor perioden van 10 jaar het gemiddelde verschil tussen deze hoog- en laagwaterstanden berekend, ofwel de tienjarig gemiddelde getijslag, welke ook is beschouwd in de analyse. In Figuur 5-5 zijn de ontwikkelingen van de tienjarig gemiddelde getijslag in het estuarium te zien en in Bijlage E is een Matlab script opgenomen waarmee Figuur 5-5 is gemaakt.

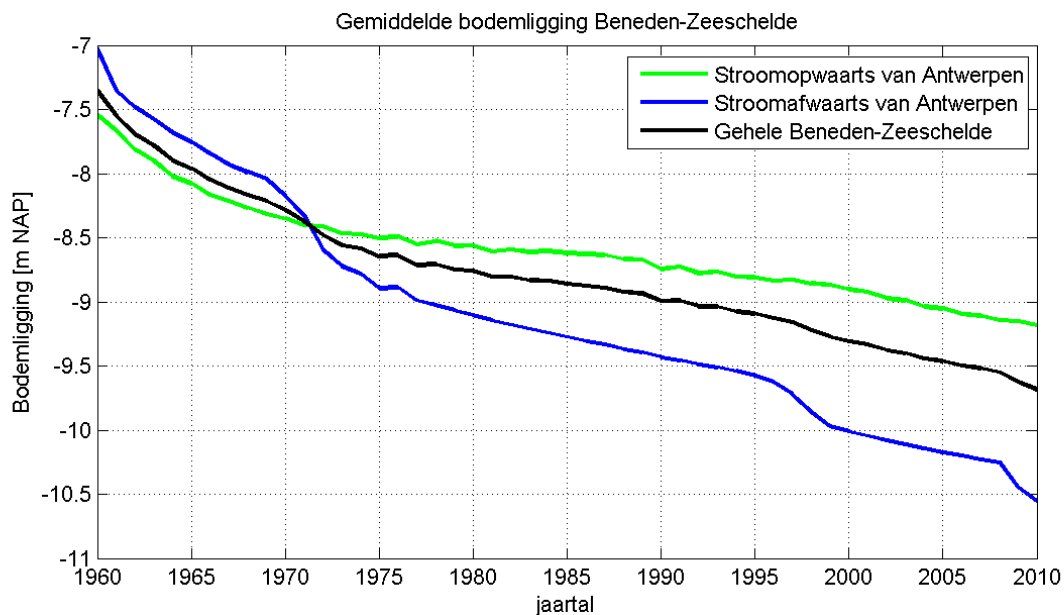


Figuur 5-5: tienjarig gemiddelde getijslag van 1960 - 2010, volgens FINEL2D en metingen.

Het model blijkt goed in staat te zijn om de hydrodynamische ontwikkelingen te reproduceren. Zowel de verschuiving van de locatie waar de grootste getijslag optreedt als de orde grootte van de getijslag komt dicht in de buurt van de werkelijkheid. Zo treedt de maximale tienjarig gemiddelde getijslag voor de periode 1960 - 1970 op bij Liefkenshoek en een decennium later is dit verder bovenstrooms. Volgens de metingen treedt de maximale tienjarig gemiddelde getijslag vanaf 1990 - 2000 op bij Tielrode. Dit meetpunt ligt echter in een vertakking van de Boven-Zeeschelde waar slechts met één gridcel over de breedte wordt gerekend.

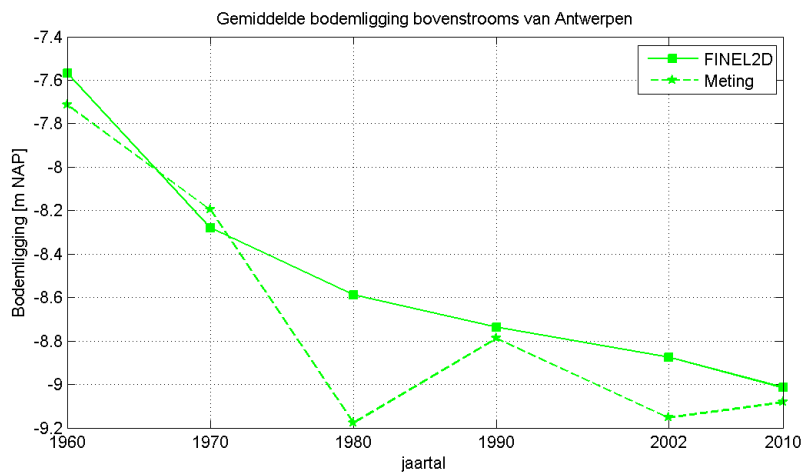
5.4 Gemiddelde bodemligging

De ontwikkelingen in de gemiddelde bodemligging komen goed overeen met de metingen. In Figuur 5-6 zijn voor het gedeelte bovenstrooms van Antwerpen, benedenstrooms van Antwerpen en voor de gehele Beneden-Zeeschelde het verloop van de gemiddelde bodemligging door de jaren heen weergegeven. In Figuur 5-7 t/m Figuur 5-9 wordt de bodemligging per gebied vergeleken met de ontwikkelingen volgens de metingen.

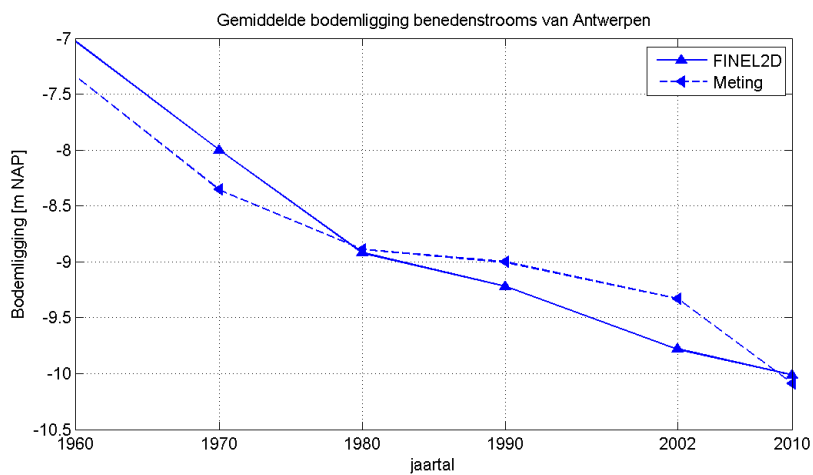


Figuur 5-6: Gemiddelde bodemligging in de Beneden-Zeeschelde volgens het FINEL2D model.

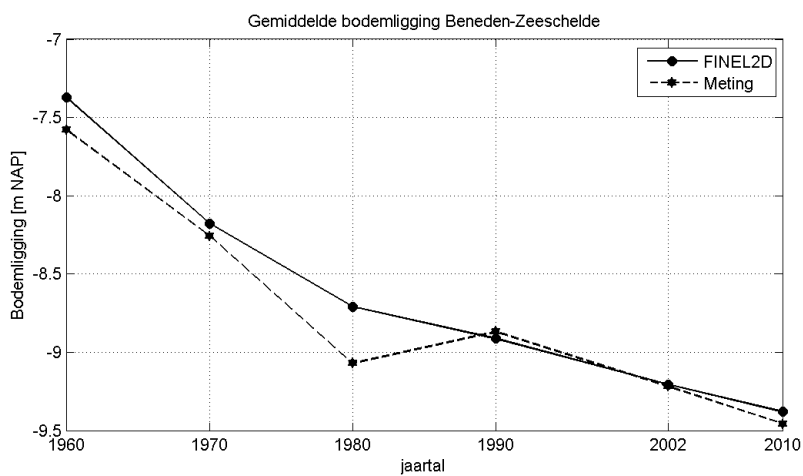
De ontwikkeling van de gemiddelde bodemligging die het model voorspelt, komt goed overeen met de geobserveerde ontwikkeling. Wat opvalt aan de figuur is dat de gemeten bodemligging met de tijd erg schommelt, in tegenstelling tot de gemodelleerde bodemligging en de gemeten bodemligging volgens figuur Figuur 2-2 in hoofdstuk 2. Om een goede vergelijking te maken tussen de modelbodems en de gemeten bodems, zijn de gemeten bodems geïnterpoleerd naar het rooster van het FINEL2D model. Omdat de bodems elkaar niet helemaal dekken ontstaan er na het interpoleren van de gemeten bodems verschillen ten opzichte van de figuren in hoofdstuk 2.



Figuur 5-7: Gemiddelde bodemligging bovenstrooms van Antwerpen volgens het model en de metingen.



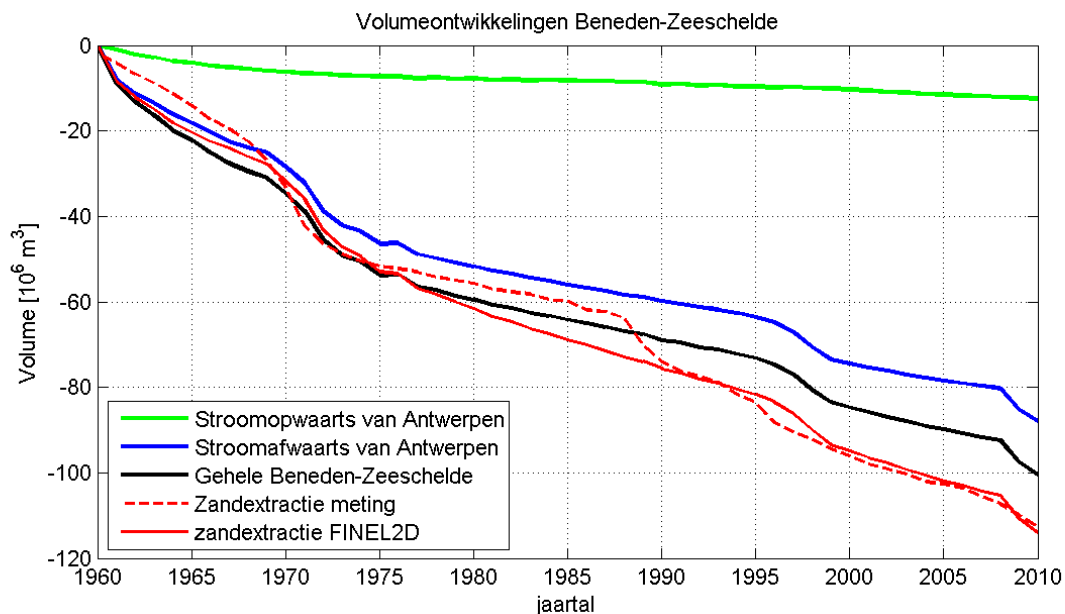
Figuur 5-8: Gemiddelde bodemligging benedenstrooms van Antwerpen volgens het model en de metingen.



Figuur 5-9: Gemiddelde bodemligging van de gehele Beneden-Zeeschelde volgens het model en de metingen.

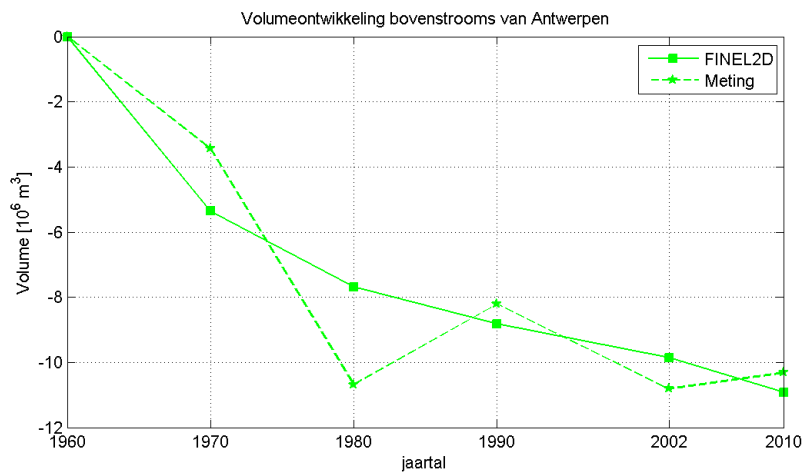
5.5 Volumeontwikkelingen

De volumeontwikkelingen die het model voorspelt zijn vergelijkbaar met de werkelijkheid. In het model is het alleen zo dat er in het eerste decennium meer sediment verdwijnt uit de Beneden-Zeeschelde dan in werkelijkheid. Verder komt wel goed overeen dat er in het derde decennium minder verlies van sediment is en dat dit vervolgens weer toeneemt. In Figuur 5-10 zijn de volumeontwikkelingen te zien van 1960 tot 2010 voor het gedeelte bovenstrooms van Antwerpen, benedenstrooms van Antwerpen en de gehele Beneden-Zeeschelde. In de figuur is tevens de werkelijke hoeveelheid zandextractie en de gemodelleerde hoeveelheid zandextractie opgenomen (in dit geval zandextractie + winning). In Figuur 5-11 t/m Figuur 5-13 zijn de volumeontwikkelingen per gebied te zien.

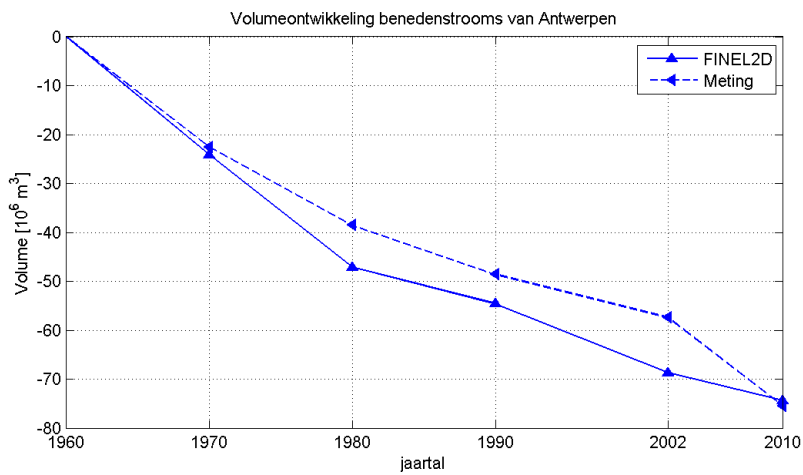


Figuur 5-10: Volumeontwikkelingen in de Beneden-Zeeschelde volgens FINEL2D.

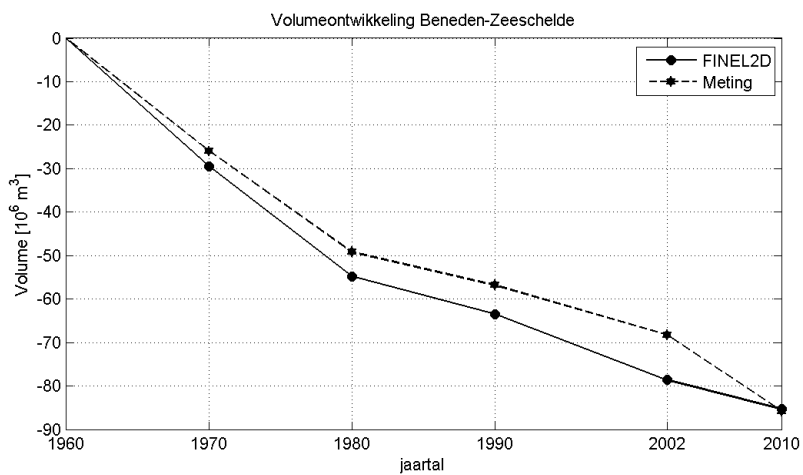
Voor de geobserveerde volumeontwikkelingen in deze figuren is net als bij de gemiddelde bodemligging een verschil te zien ten opzichte van de figuren in hoofdstuk 2, wederom ten gevolge van het interpoleren van de bodems naar het FINEL2D rooster.



Figuur 5-11: Volumeontwikkelingen Beneden-Zeeschelde bovenstrooms van Antwerpen volgens het model en metingen.



Figuur 5-12: Volumeontwikkelingen Beneden-Zeeschelde benedenstrooms van Antwerpen volgens het model en metingen.



Figuur 5-13: Volumeontwikkelingen in de gehele Beneden-Zeeschelde volgens het model en metingen.

5.6 Samenvatting kalibratieproces

Ten behoeve van het, met een redelijke reproductienauwkeurigheid, voorspellen van de ontwikkelingen tijdens de hindcast voor de periode van 1960 tot 2010 zijn er meerdere simulaties gedaan. De uitkomst van iedere simulatie heeft bijgedragen aan de invoer van de volgende simulatie om het model te optimaliseren. Dit proces heet de kalibratie van het model. Bij deze studie zijn in totaal 35 kalibratieruns gedaan. In deze paragraaf wordt besproken welke runs er zijn uitgevoerd en welke aanpassingen zijn gedaan om tot de uiteindelijke modelkalibratie te komen.

5.6.1 Testruns

Bij de eerste testrun is het oorspronkelijke model van Dam (2006) gebruikt, welke is gekalibreerd voor de Westerschelde voor de periode van 1964 tot 2002. In dit oorspronkelijke model zijn de morfologische ontwikkelingen bovenstrooms van Antwerpen niet meegenomen. Deze run is uitgevoerd om een idee te krijgen hoe het model werkt en welke output het model geeft. Vervolgens zijn een aantal testruns gedaan waarbij is gerekend van 1960 tot 2010. Hierbij zijn verschillende waarden voor de globale bodemruwheid aangenomen om inzicht te krijgen in het effect en de gevoeligheid van deze parameter. Ook is gekeken naar de gevoeligheid van het meenemen van de spiraalstroming.

5.6.2 Kalibratieruns

Door het uitvoeren van de testruns is handigheid verkregen in het model en inzicht in de invloed en gevoeligheid van verschillende parameters. Na de testruns is de daadwerkelijke kalibratie begonnen. Allereerst is er een nieuwe startbodem gemaakt voor het jaar 1960, zie paragraaf 4.2. Vervolgens is ook een nieuw modelrooster gemaakt, waarbij onder andere het interessegebied in verfijnd. Daarnaast is er een nieuwe harde laag gemaakt, welke later nog is aangepast, en zijn de in het model opgegeven menselijke ingrepen nauwkeuriger ingevoerd. In een van de laatste runs is een nieuwe bodem van de Boven-Zeeschelde gemaakt. Bij de kalibratie van het model zijn de morfologische en hydraulische ruwheid de belangrijkste afregelparameters geweest. Deze zijn in het gehele proces meerdere keren aangepast. Hieronder zijn de belangrijkste stappen bij de kalibratie van het FINEL2D model getoond.

Tabel 5.2: Belangrijkste stappen bij de modelkalibratie.

1	Oorspronkelijke model (Dam, 2006)
2	globale ruwheid en spiral flow
3	nieuwe startbodem
4	nieuw modelrooster
5	Nieuwe harde laag
6	hydraulisch en morfologisch ruwheidsveld
7	baggervakken uitgebreid
8	verdiepingen aangepast
9	aanpassing harde laag
10	stortvak Beneden-Zeeschelde toegevoegd
11	Nieuwe startbodem Boven-Zeeschelde
12	aanpassingen ruwheidsvelden

6 SCENARIO'S

In dit hoofdstuk worden verschillende scenario's besproken welke zijn doorgerekend met FINEL2D om inzicht te krijgen in de invloed van bepaalde factoren. Zo is er een T0 scenario doorgerekend van 1960 tot 2010, dit is de het scenario waarin de werkelijkheid wordt gesimuleerd en waarop het model is gekalibreerd. Hierin zijn alle baggerwerkzaamheden meegenomen. De resultaten van dit scenario zijn reeds uitgebreid behandeld in hoofdstuk 5 en zullen hier niet opnieuw worden beschreven. Daarnaast is er een T1 scenario doorgerekend met dezelfde instellingen en tijdsduur als het T0 scenario, maar waarin geen menselijk ingrijpen is meegenomen. Ook is er een T2 scenario doorgerekend waarbij er wel onderhoudsbaggerwerk uitgevoerd is in de vaargeul, maar geen terugstorting van het gebaggerde zand heeft plaatsgevonden. In dit scenario wordt in feite een extreem zandwin scenario gesimuleerd. Tot slot is een T3 scenario doorgerekend, waarbij er geen verdiepingen worden uitgevoerd. Hier blijft de te onderhouden vaargeuldiepte van 1960 gehandhaafd. De scenario's zijn toegepast voor het gehele estuarium en beslaan hiermee de menselijke ingrepen in zowel de Westerschelde als de Beneden-Zeeschelde.

Tabel 6.1: Defenitie van de verschillende scenario's

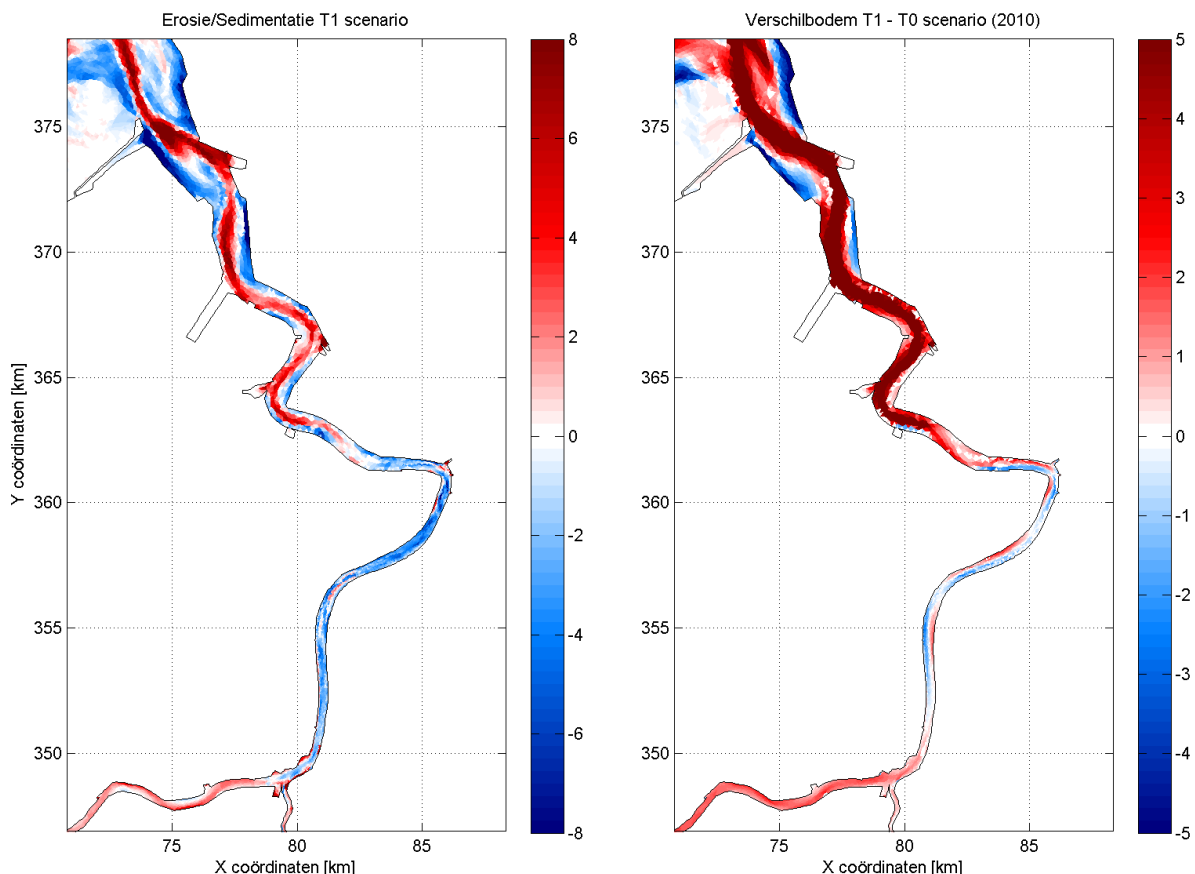
Scenario	Omschrijving van het scenario (1960-2010)
T0	Huidige situatie, menselijk ingrijpen zoals werkelijkheid.
T1	Geen menselijk ingrijpen, verder gelijk aan T0.
T2	menselijk ingrijpen zoals T0, maar zonder terugstorting van gebaggerd materiaal.
T3	menselijk ingrijpen zonder verdiepingen, met gehandhaafde vaargeuldiepte van 1960.

6.1 T1 Scenario

In het T1 scenario zijn menselijke ingrepen ‘uitgezet’ en voor de rest zijn alle parameterinstellingen hetzelfde als in het T0 scenario. Op deze manier voorspelt FINEL2D welke ontwikkelingen zouden hebben plaatsgevonden wanneer er geen baggerwerkzaamheden zouden zijn uitgevoerd sinds 1960. Door de ontwikkelingen van dit scenario te vergelijken met de uitkomsten van het T0 scenario wordt duidelijk wat de invloed is geweest van de uitgevoerde baggerwerkzaamheden van 1960 tot 2010. De aspecten die worden beschouwd zijn de ontstane erosie- en sedimentatiepatronen, de gemiddelde bodemligging, de volumeontwikkelingen en de ontwikkelingen met betrekking tot de waterstanden.

6.1.1 Erosie- en Sedimentatiepatronen

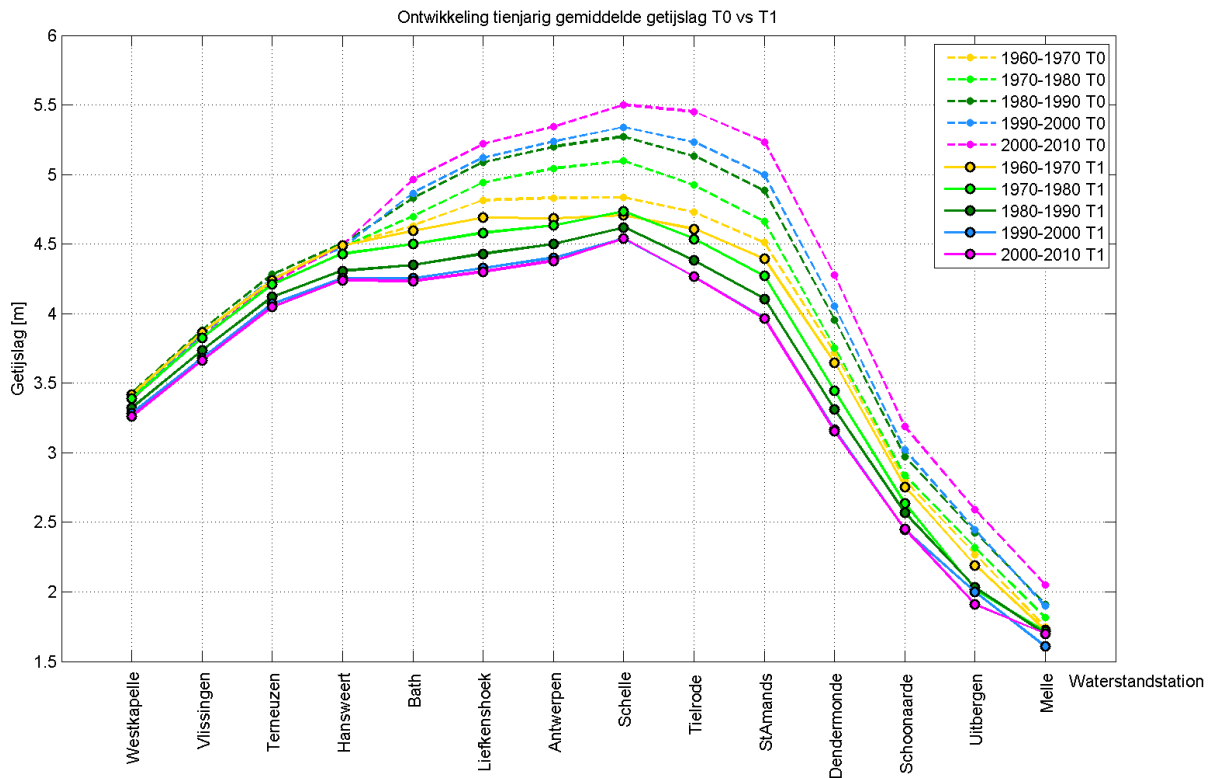
Ten opzichte van het T0 scenario vindt er sterke aanzanding plaats in de vaargeul bovenstrooms van Antwerpen en in de Boven-Zeeschelde. Daarentegen treedt er in het gedeelte bovenstrooms van Antwerpen, waar niet is gebaggerd op sommige plaatsen meer erosie op dan in het T0 scenario. In Figuur 6-1 zijn links de erosie- en sedimentatiepatronen na 50 jaar te zien en rechts is de verschilbodem van 2010 te zien ten opzichte van het T0 scenario. De rode kleur duidt aan dat er ten opzichte van het T0 scenario aanzanding optreedt en blauw duidt op erosie. In de Beneden-Zeeschelde bovenstrooms van Antwerpen zijn de bodemverschillen tussen T1 en T0 klein.



Figuur 6-1: Erosie- sedimentatiepatronen T1 scenario (links) en het bodemverschil in 2010 tussen scenario T0 en T1 (rechts).

6.1.2 Hydrodynamische ontwikkelingen

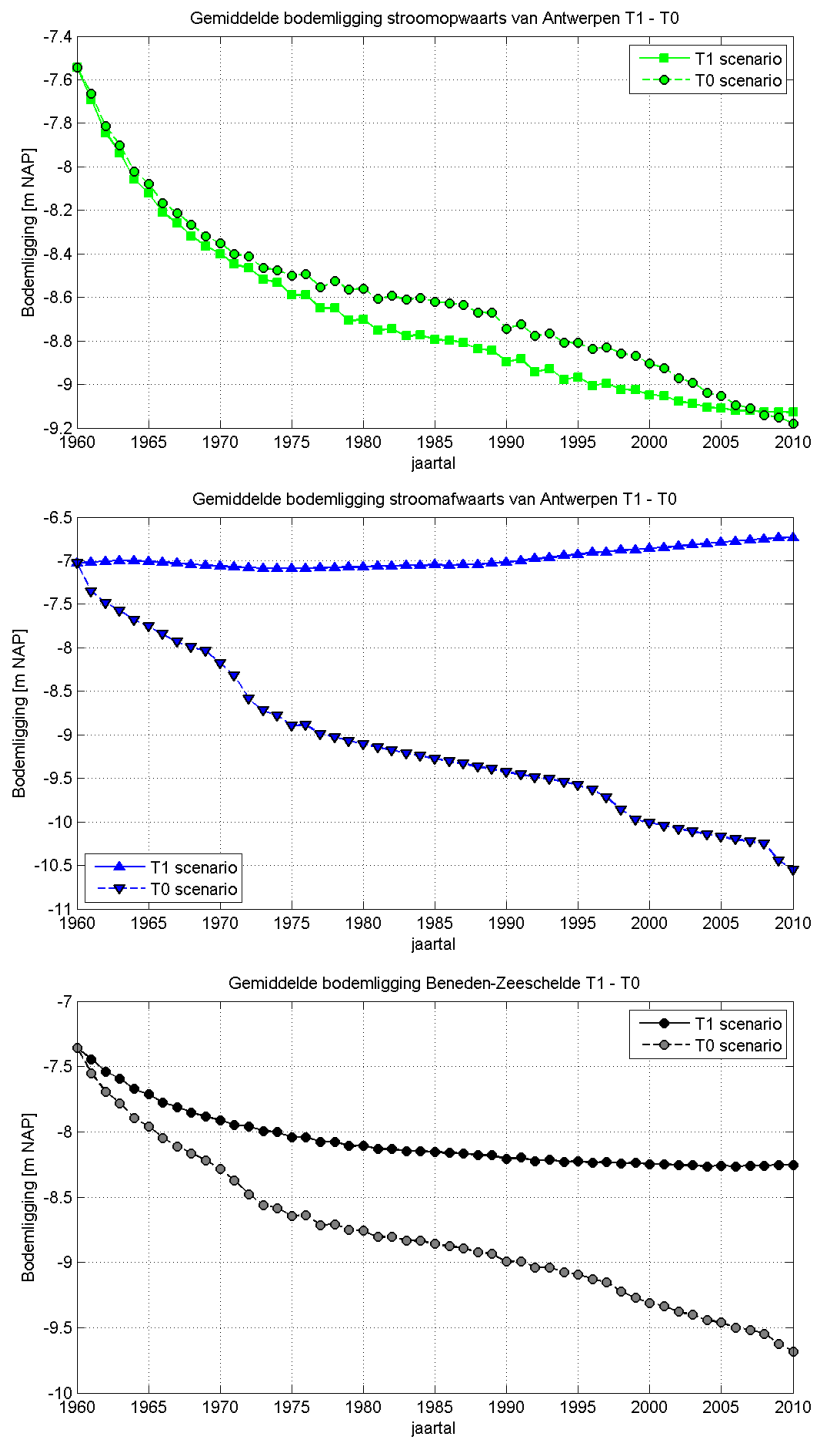
Door de baggerwerkzaamheden in het T1 scenario uit te zetten en de ontwikkelingen van de getijslag in dit scenario te bestuderen kan worden bepaald wat de invloed ervan is geweest op de toename van de getijslag. In Figuur 6-2 is de ontwikkeling van de tienjarig gemiddelde getijslag van 1960 tot 2010 in het T1 scenario vergeleken met het T0 scenario. In deze figuur is te zien dat de tienjarig gemiddelde getijslag in het T1 scenario met de tijd over het algemeen dalende is, in tegenstelling tot het T0 scenario.



Figuur 6-2: tienjarig gemiddelde getijslag in het Schelde estuarium in het T1 scenario.

6.1.3 Gemiddelde bodemligging

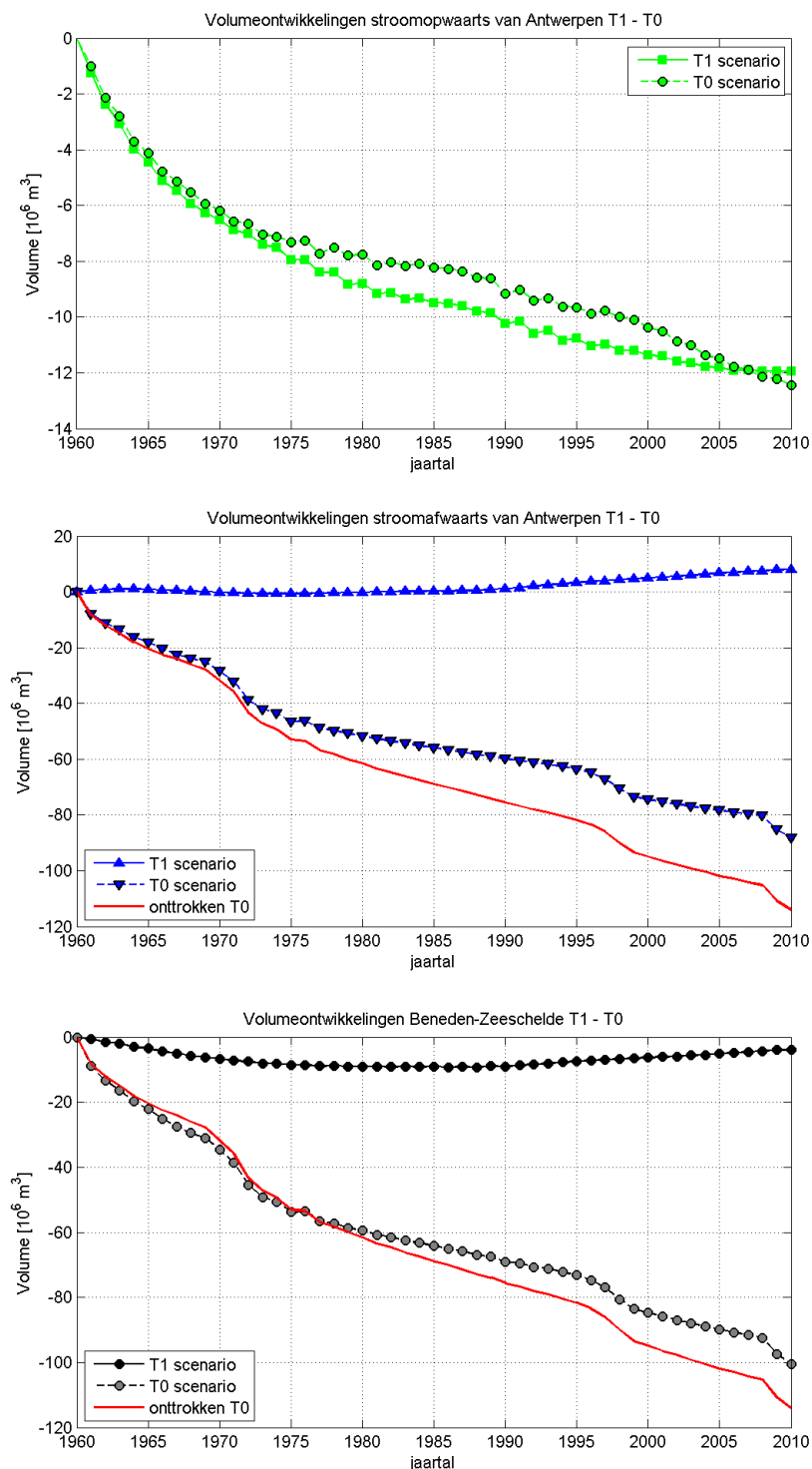
De gemiddelde bodemligging in het T1 scenario is dalende in de tijd voor het gedeelte bovenstrooms van Antwerpen en stijgende benedenstrooms van Antwerpen, zie Figuur 6-3. In het gedeelte benedenstrooms van Antwerpen geldt dat de bodemligging gedomineerd wordt door de baggerwerkzaamheden. In het gedeelte bovenstrooms is niet veel verschil te zien tussen beide scenario's en is zelfs zichtbaar dat bodem in het T1 scenario tussen 1965 en 2005 dieper ligt dan in het T0 scenario.



Figuur 6-3: Ontwikkeling van de gemiddelde bodemligging in de Beneden-Zeeschelde in het T1 scenario.

6.1.4 Volumeontwikkelingen.

Voor de volumeontwikkelingen geldt hetzelfde als voor de gemiddelde bodemligging. Deze zijn in het gedeelte benedenstrooms van Antwerpen gedomineerd door de baggerwerkzaamheden. In Figuur 6-4 zijn de volumeontwikkelingen in het T0 en het T1 scenario te zien, waarbij in Figuur 6-4b en c de door het model gesimuleerde onttrekking van zand (zandextractie + winning) is opgenomen.



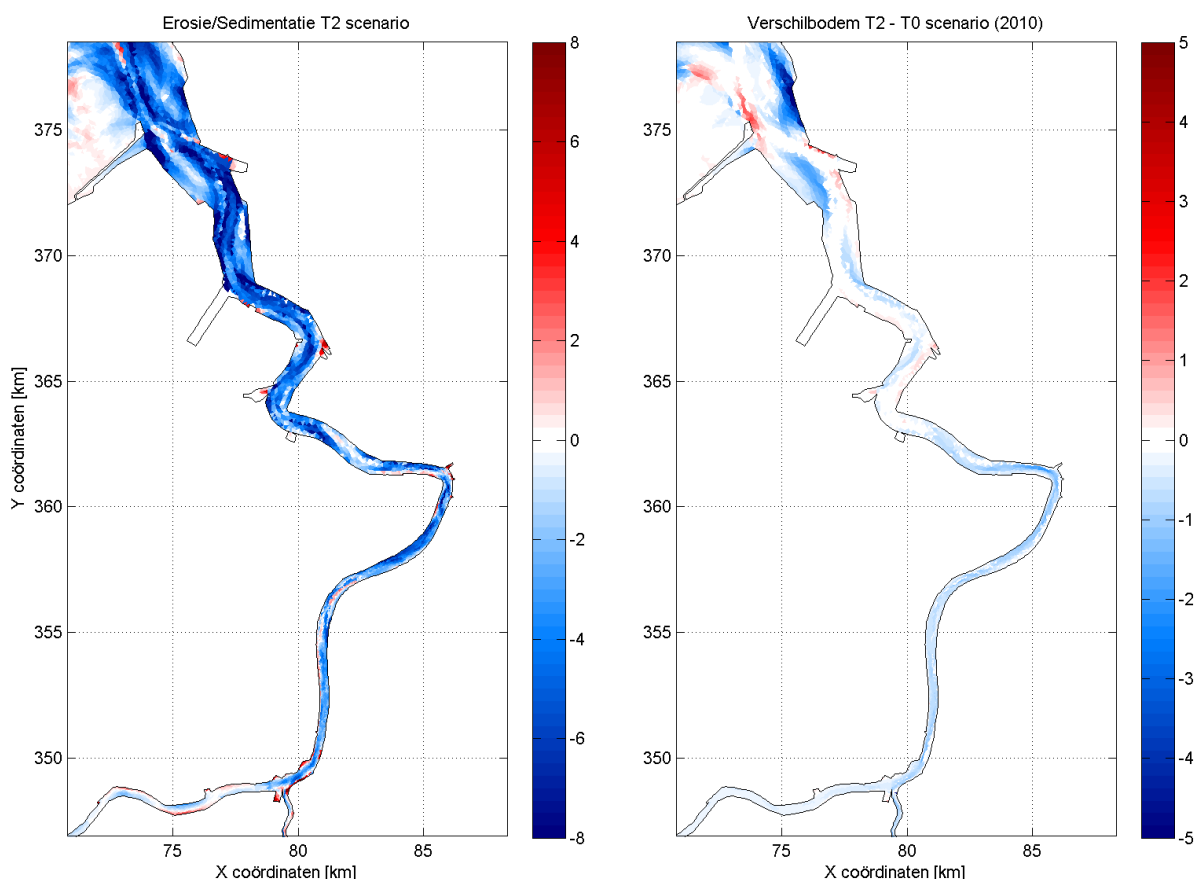
Figuur 6-4: Volumeontwikkelingen in de Beneden-Zeeschelde van 1960 tot 2010 in het T1 scenario.

6.2 T2 Scenario

In het T2 scenario vindt er geen terugstorting plaats van het zand van het onderhoudsbaggerwerk in de vaargeul. Op deze manier kan worden gekeken wat de invloed is geweest van het terugstorten van gebaggerd zand de afgelopen decennia op de opgetreden ontwikkelingen. Er wordt in dit scenario meer zand onttrokken uit het systeem dan in werkelijkheid is gebeurd, waardoor er een extreem zandwin scenario wordt gesimuleerd. Hiermee geven de uitkomsten tevens inzicht in de invloed van zandextractie en winning.

6.2.1 Erosie- sedimentatiepatronen

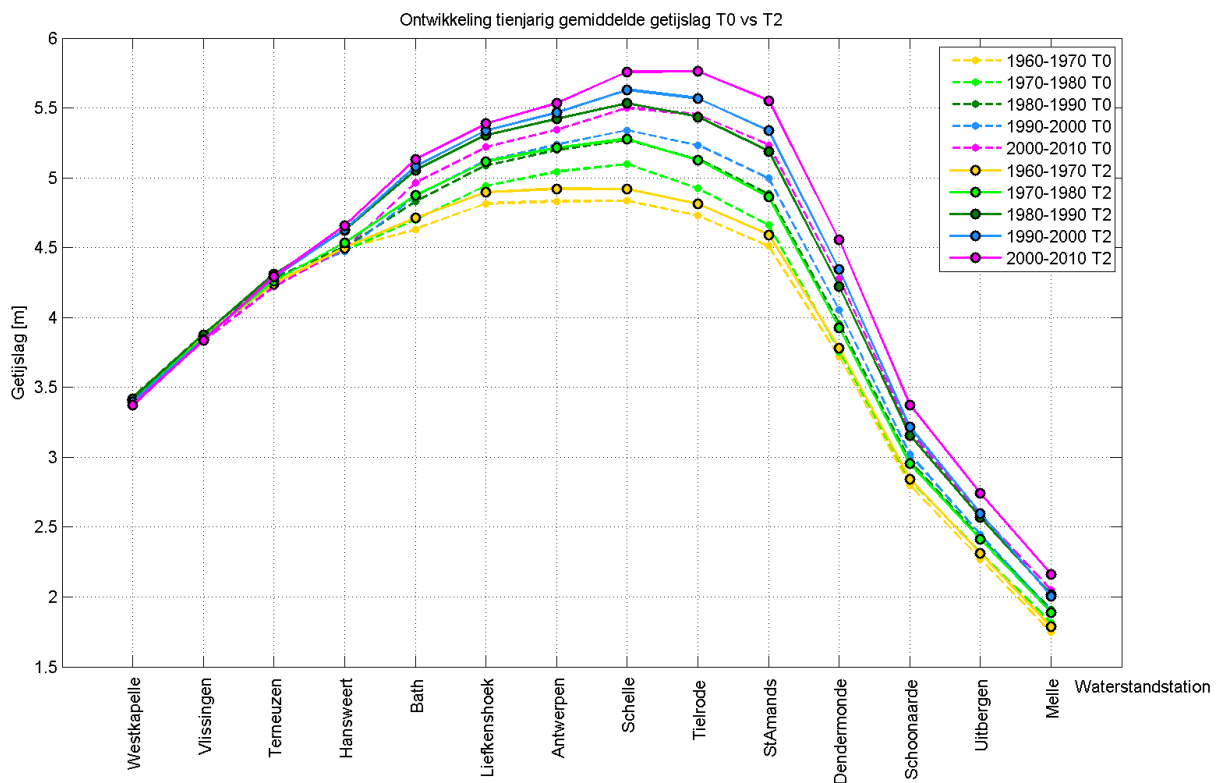
Wanneer de erosie- en sedimentatiepatronen van het T2 scenario worden vergeleken met het T0 scenario wordt duidelijk dat het terugstorten van gebaggerd zand de erosie van de Beneden-Zeeschelde bovenstrooms van Antwerpen gedeeltelijk is tegengegaan, zie Figuur 6-5. Ook bij schaar van Ouden Doel (bovenin de figuur) treedt er meer erosie op dan in het T0 scenario. Dit betekent dat het niet terugstorten van zand in het T2 scenario zorgt voor extra erosie in de Beneden-Zeeschelde ten opzichte van het T0 scenario.



Figuur 6-5: Erosie- sedimentatiepatronen T2 scenario (links) en het bodemverschil in 2010 tussen scenario T0 en T2 (rechts).

6.2.2 Hydrodynamische ontwikkelingen

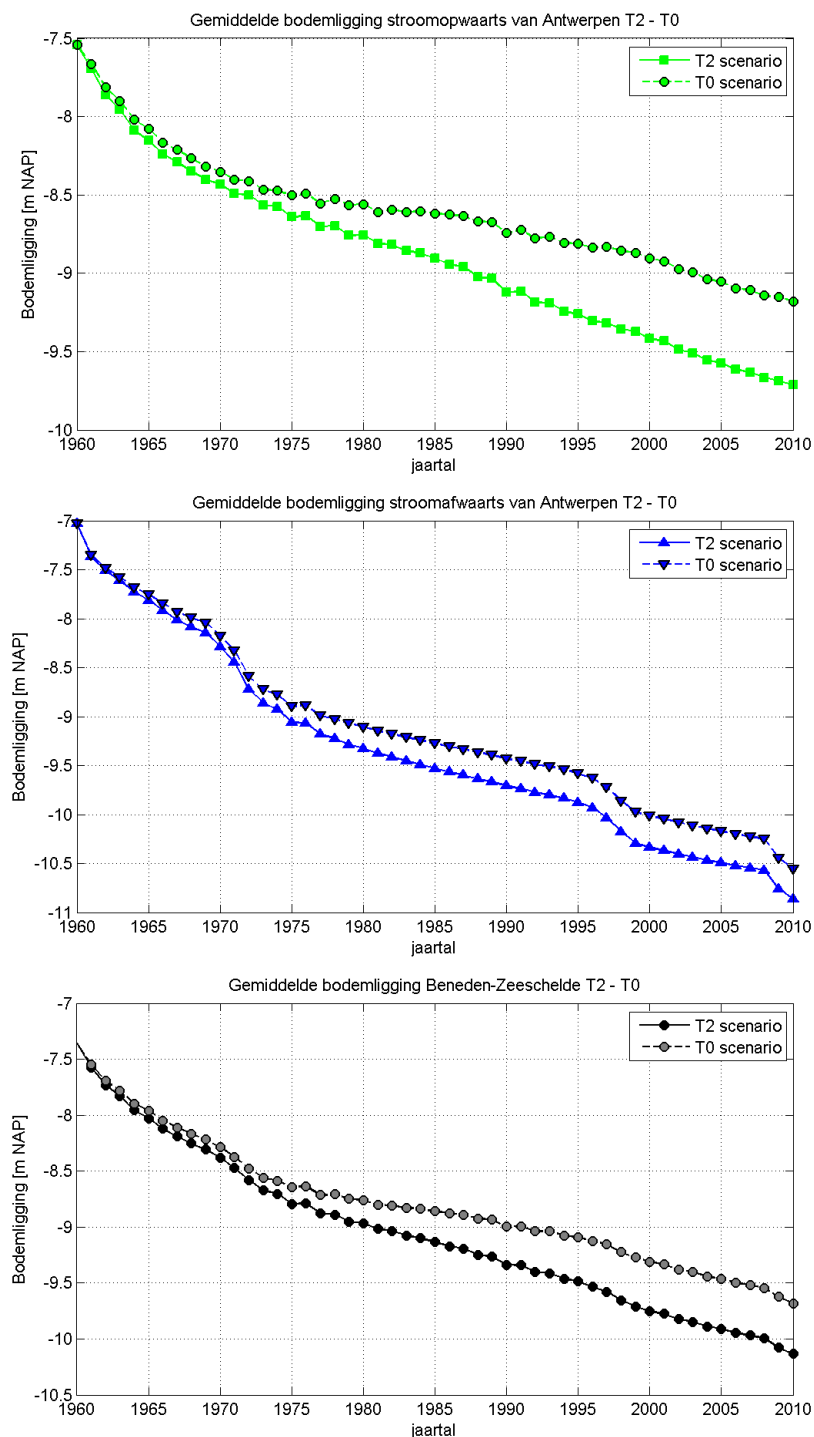
De getijslag in het estuarium neemt in het T2 scenario in de tijd meer toe dan in het T0 scenario, zie Figuur 6-6. Ook blijkt de verschuiving van de locatie waar de maximale getijslag optreedt sneller door te zetten in dit scenario. De tienjaarlijks gemiddelde getijslag in de periode 1980 - 1990 is in het T0 scenario maximaal bij Antwerpen en in het T2 scenario is dit bij Schelle. In de periode 2000-2010 treedt de maximale getijslag in het T0 scenario op ter hoogte van Schelle en in het T2 scenario is dit bij Tielrode.



Figuur 6-6: Ontwikkeling tienjarig gemiddelde getijslag van 1960 tot 2010 in het T0 scenario en het T2 scenario.

6.2.3 Gemiddelde bodemligging

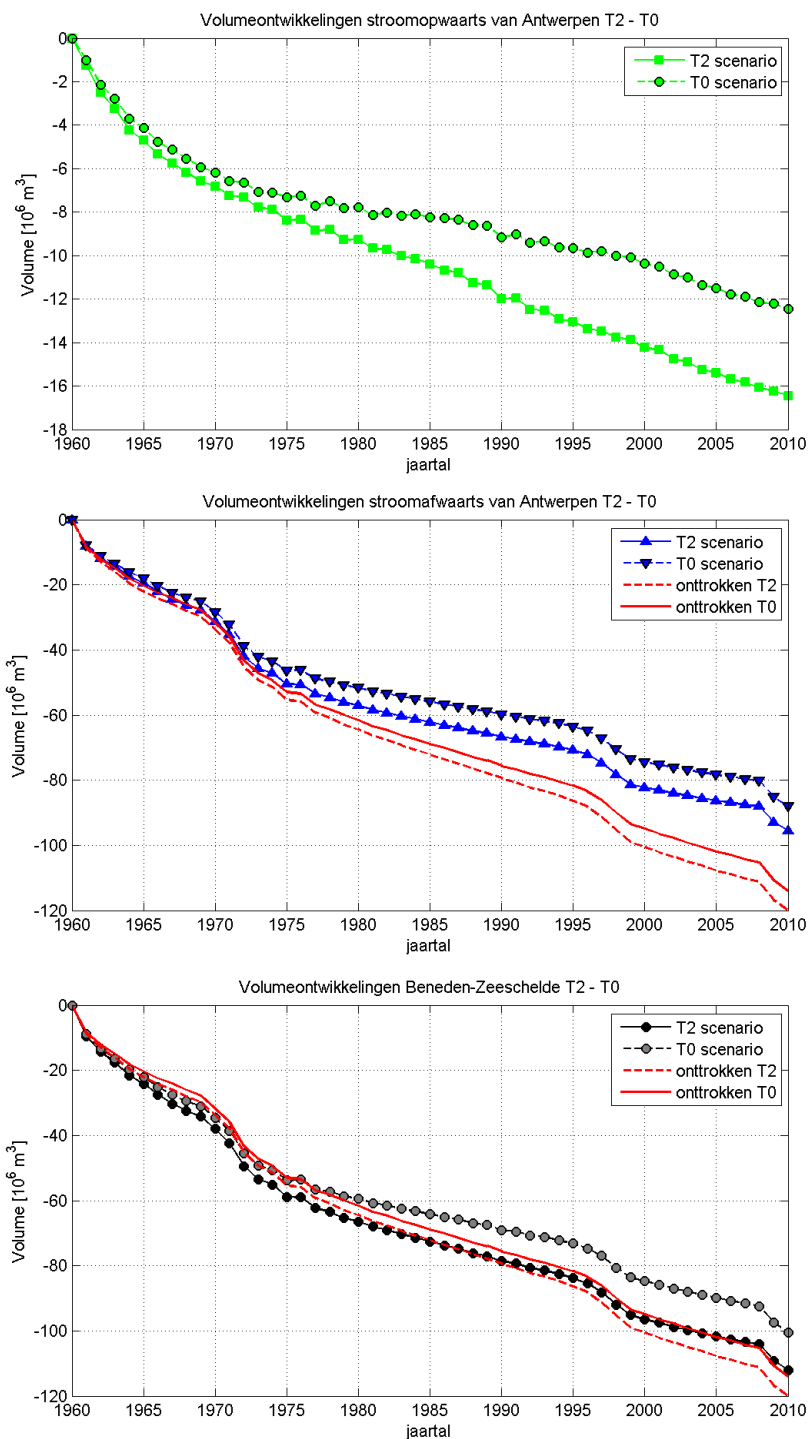
De gemiddelde bodemligging is na 50 jaar in de hele Beneden-Zeeschelde ca. een halve meter lager komen te liggen dan in het T0 scenario. In het gedeelte bovenstrooms van Antwerpen is de bodemligging ca. 55 cm lager in 2010 ten opzichte van het T0 scenario en in het gedeelte stroomafwaarts van Antwerpen ca. 40 cm, zie Figuur 6-7.



Figuur 6-7: Ontwikkeling van de gemiddelde bodemligging in de Beneden-Zeeschelde in het T0 en T2 scenario.

6.2.4 Volumeontwikkelingen

De volumeontwikkelingen sluiten aan bij de ontwikkeling van de gemiddelde bodemligging. De trend is ongeveer hetzelfde als in het T0 scenario, echter in versterkte mate. In het gedeelte bovenstrooms van Antwerpen wordt de rivier in 50 jaar tijd ca. 4 miljoen m³ ruimer dan in het T0 scenario en voor de gehele Beneden-Zeeschelde is dit ca. 11.5 miljoen m³.



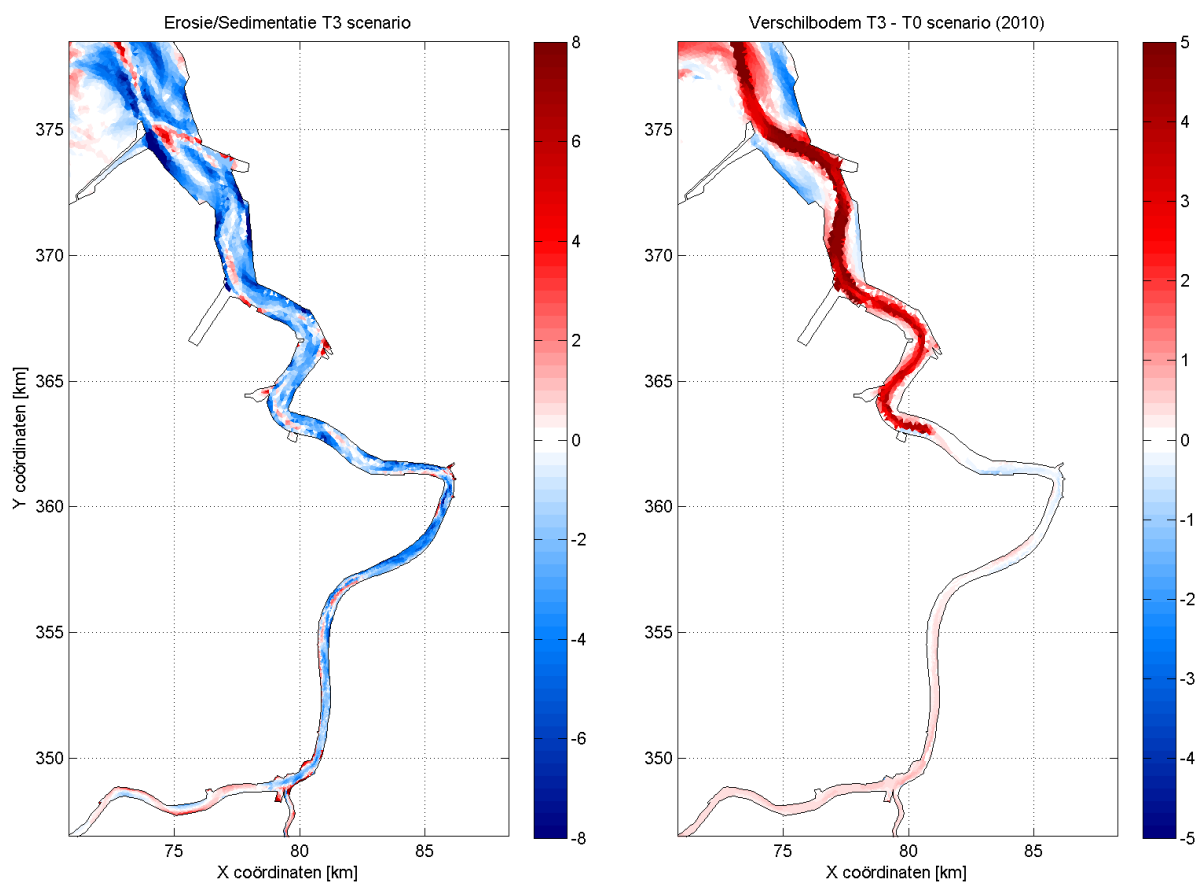
Figuur 6-8: Volumeontwikkelingen in de Beneden-Zeeschelde in het T0 en T2 scenario.

6.3 T3 scenario

In het T3 scenario wordt gekeken naar de ontwikkelingen wanneer er geen verdiepingen zouden zijn uitgevoerd. Hierbij blijft de onderhoudsdiepte van de vaargeul uit 1960 gehandhaafd. Er wordt in dit scenario minder zand gebaggerd en daarmee onttrokken uit het systeem dan in het T0 scenario.

6.3.1 Erosie- sedimentatiepatronen

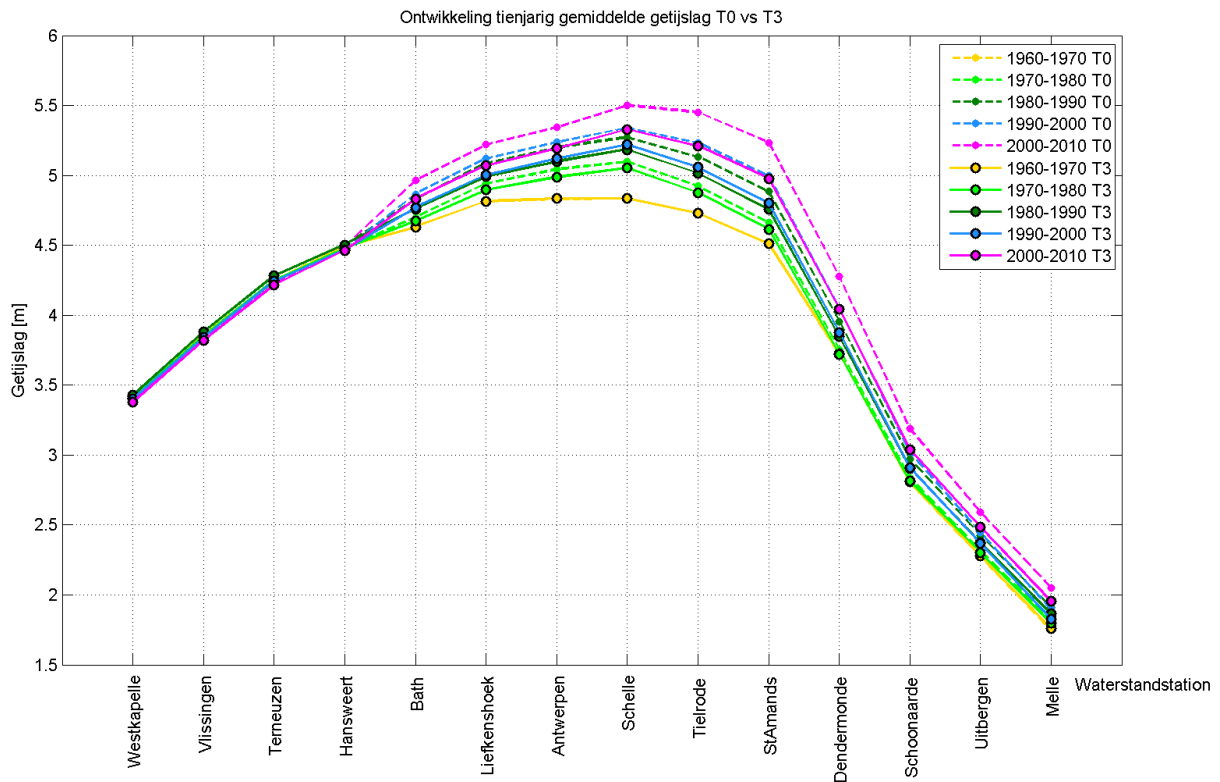
Ten opzichte van het T0 scenario vindt er sterke aanzanding plaats in de vaargeul. Ook in het gedeelte bovenstrooms van Antwerpen en in de Boven-Zeeschelde is te zien dat er in dit scenario ten opzichte van het T0 scenario minder erosie plaatsvindt, zie Figuur 6-9.



Figuur 6-9: Erosie- sedimentatiepatronen T3 scenario (links) en het bodemverschil in 2010 tussen scenario T0 en T3 (rechts).

6.3.2 Hydrodynamische ontwikkelingen

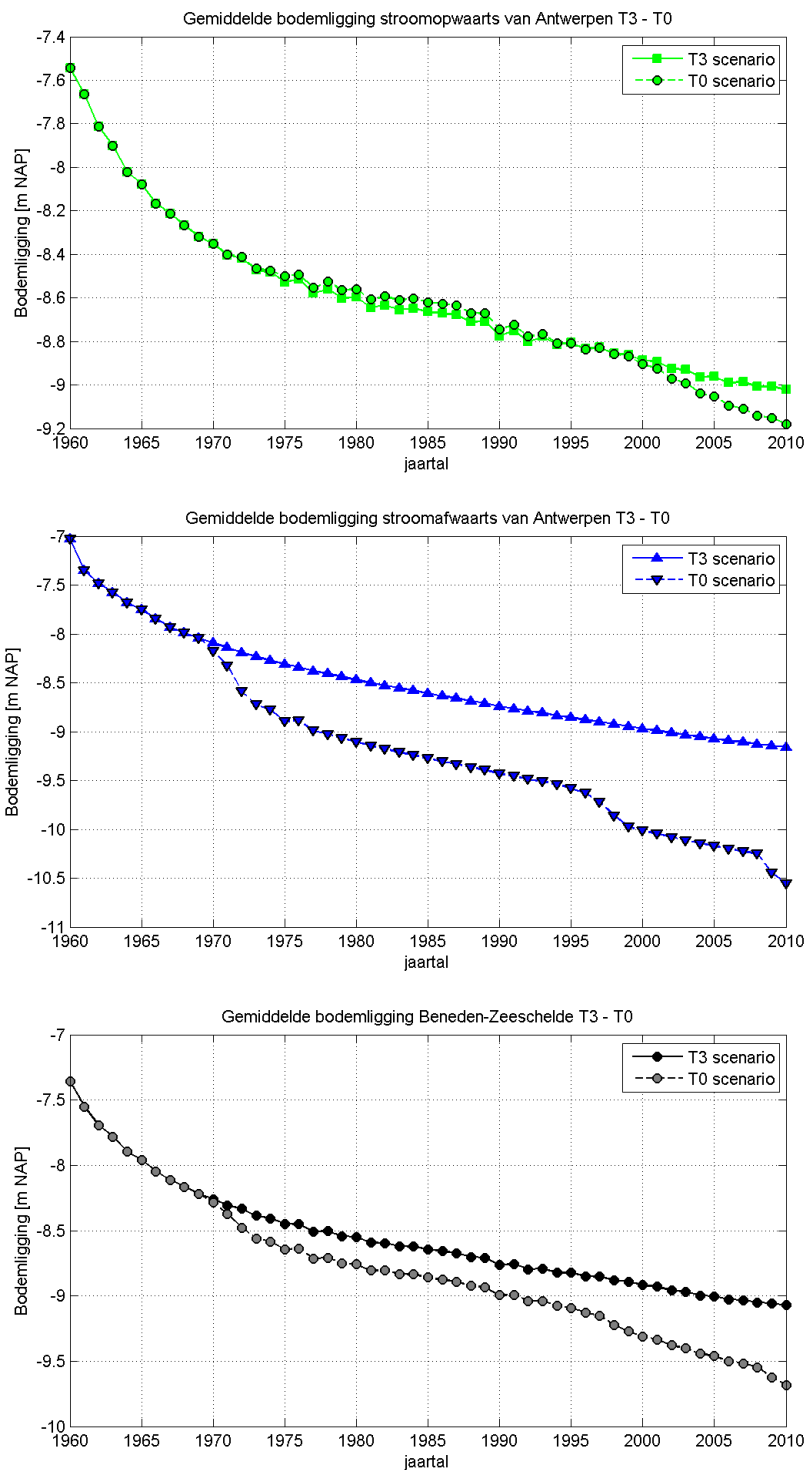
De tienjarig gemiddelde getijslag in het T3 scenario neemt in de tijd minder toe dan in het T0 scenario. In Van 1960 tot 1970 is er nog geen verschil te zien tussen beide scenario's maar vanaf het tweede decennium wordt het verschil goed zichtbaar vanaf meetstation Bath. Tot Melle blijft het verschil tussen het T3 en het T0 scenario duidelijk zichtbaar, vooral in het laatste decennium. Hierin is de gemiddelde getijslag in het T3 scenario gemiddeld ca. 20 cm kleiner is dan in het T0 scenario.



Figuur 6-10: Ontwikkeling van de tienjarig gemiddelde getijslag van 1960 tot 2010 in het T0 en het T3 scenario.

6.3.3 Gemiddelde bodemligging

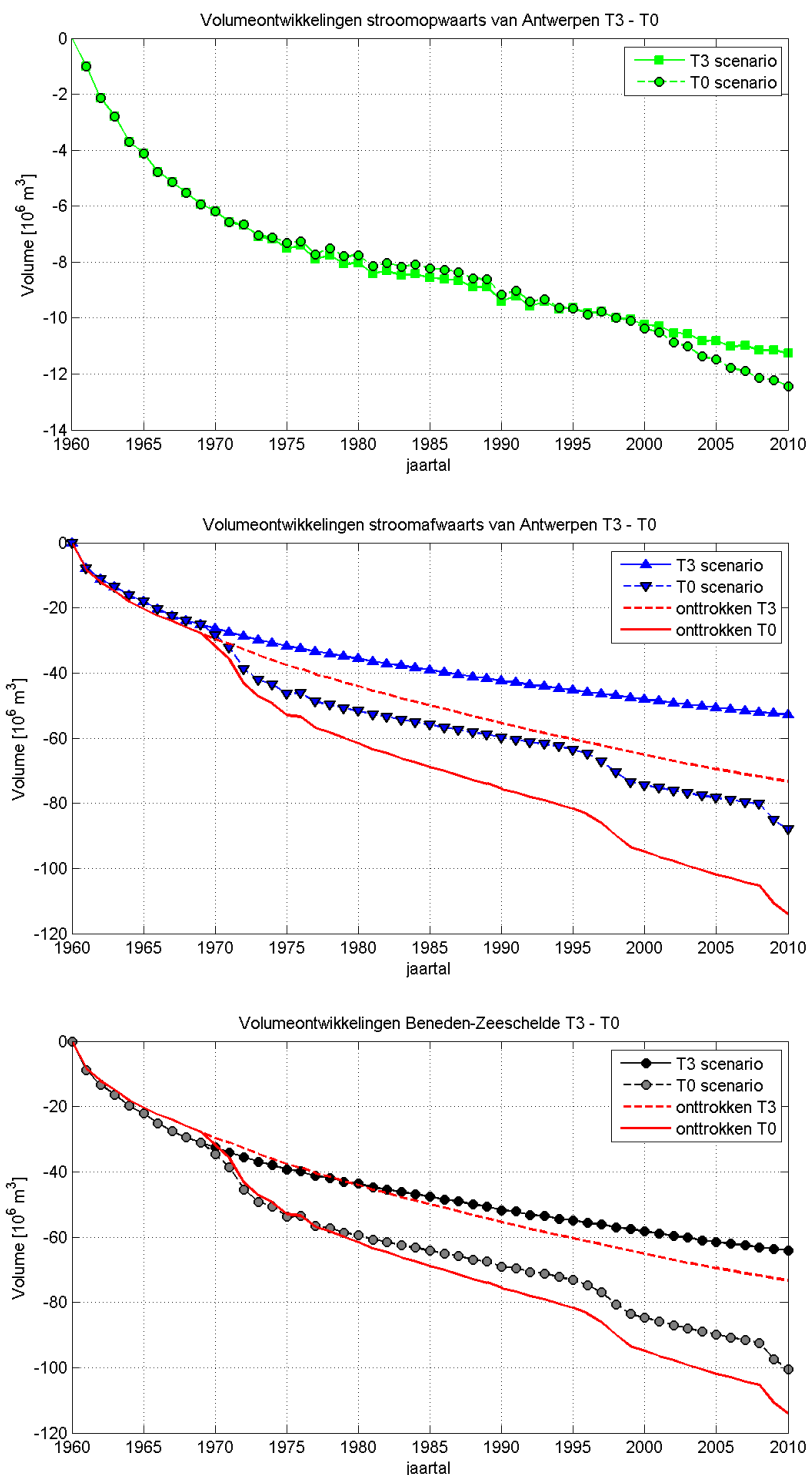
De gemiddelde bodemligging is in dit scenario in de gehele Beneden-Zeeschelde hoger dan in het T0 scenario. Bovenstrooms van Antwerpen is er in de eerste decennia niet veel verschil ten opzichte van het T0 scenario, maar de bodem ligt hier in 2010 toch gemiddeld ca. 25 cm hoger. Benedenstrooms van Antwerpen is het verschil bijna anderhalve meter.



Figuur 6-11: Gemiddelde bodemligging Beneden-Zeeschelde in het T0 en het T3 scenario.

6.3.4 Volumeontwikkelingen

In de gehele Beneden-Zeeschelde wordt in het T3 scenario ca. 35 miljoen m³ zand minder onttrokken door erosie of baggerwerkzaamheden. In het gedeelte bovenstrooms van Antwerpen erodeert in het T3 scenario slechts ca. 1.2 miljoen m³ zand minder ten opzichte van het T0 scenario. De invloed van de verdiepingen lijkt pas vanaf het jaar 2000 zichtbaar te worden (net na de tweede verdieping).



Figuur 6-12: Volumeontwikkelingen in de Beneden-Zeeschelde in het T0 en het T3 scenario.

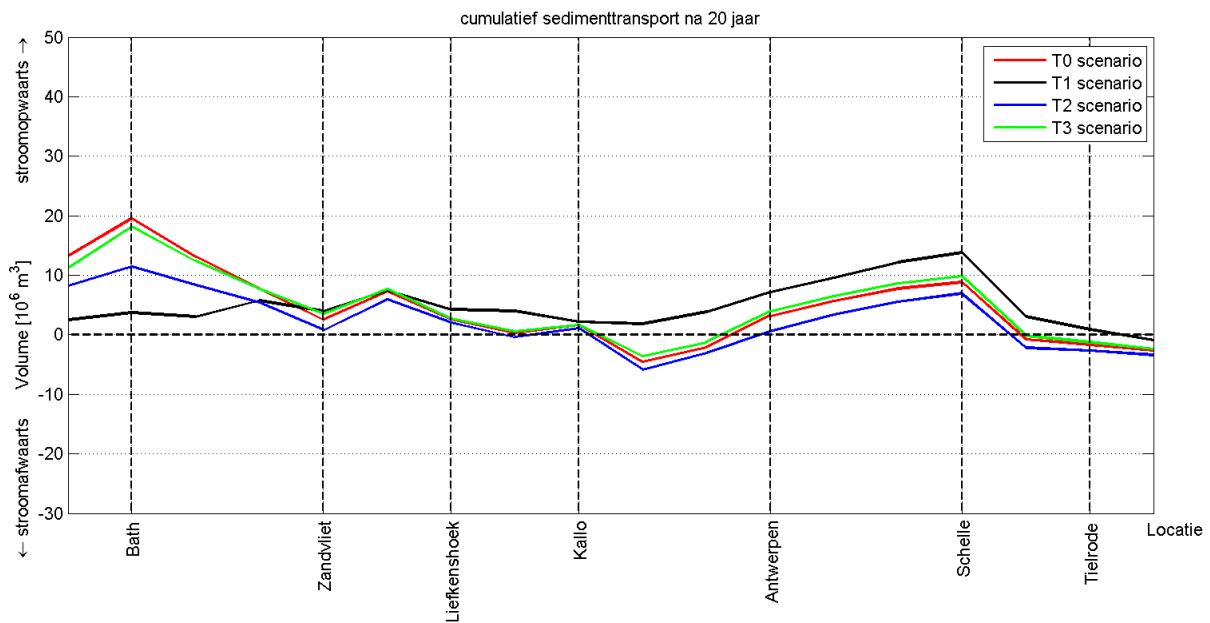
6.4 Analyse van de uitkomsten

In Figuur 6-13 is het cumulatieve zandtransport te zien over de eerste 20 jaar voor de verschillende scenario's. In Figuur 6-14 is het cumulatieve zandtransport te zien over 50 jaar tijd. In Figuur 6-15 is een zandbalans opgesteld voor de Beneden-Zeeschelde van de modeluitkomsten over de 50 jaar simulatietijd, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen het gedeelte bovenstrooms en benedenstrooms van Antwerpen.

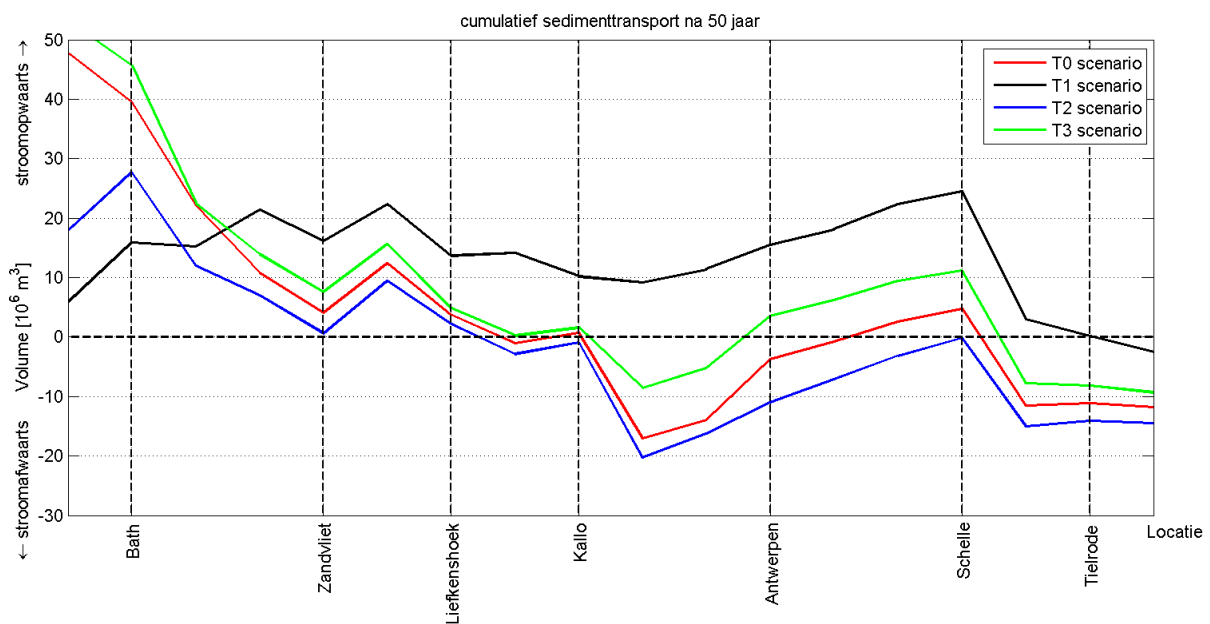
Het sedimenttransport ter hoogte van de Belgische-Nederlandse grens vindt in alle vier de scenario's plaats in stroomopwaartse richting. Dit zand is afkomstig uit de Westerschelde, waar de menselijke ingrepen voor de verschillende scenario's op dezelfde manier zijn meegenomen zoals in de Beneden-Zeeschelde.

In het T1 scenario, waarin geen menselijke ingrepen worden uitgevoerd, vindt er een vrij continue transport van sediment plaats in stroomopwaartse richting. Ter hoogte van Antwerpen is het cumulatieve stroomopwaartse zandtransport in dit scenario over 50 jaar +15.5 miljoen m³. In het T2 scenario, waarbij sprake is van een extreme onttrekking van zand, is het cumulatieve zandtransport ter hoogte van Antwerpen -11 miljoen m³ en vindt juist richting benedenstrooms plaats. Het scenario T0 en T3 liggen tussen deze twee scenario's in. Uit deze resultaten valt af te leiden dat door de uitgevoerde baggerwerkzaamheden benedenstrooms van Antwerpen als het ware een artificiele 'kuil' wordt gecreeerd. Uit de figuren blijkt dat hoe meer zand er netto wordt onttrokken uit de Beneden-Zeeschelde, des te meer zand er richting deze 'kuil' wordt getrokken van bovenstrooms.

Ter hoogte van Schelle wordt het netto sedimenttransport bijna even sterk beïnvloed dan bij Antwerpen door de onttrekking in het gedeelte stroomafwaarts van Antwerpen. In het T1 scenario vindt er een cumulatief stroomopwaarts zandtransport plaats van +24.5 miljoen m³. In de overige scenario's wordt het zandtransport naarmate de omvang van de baggerwerkzaamheden toeneemt steeds meer stroomafwaarts getrokken, zie ook Figuur 6-13 en Figuur 6-14. Na 50 jaar vindt er cumulatief gezien -0.15 Miljoen m³ zandtransport plaats in de richting van de 'kuil' bij scenario T2. De twee overige scenario's, te weten T0 en T3, liggen hier weer tussen in. In Bijlage F is het tienjaarlijks cumulatieve zandtransport te zien van 1960 tot 2010.

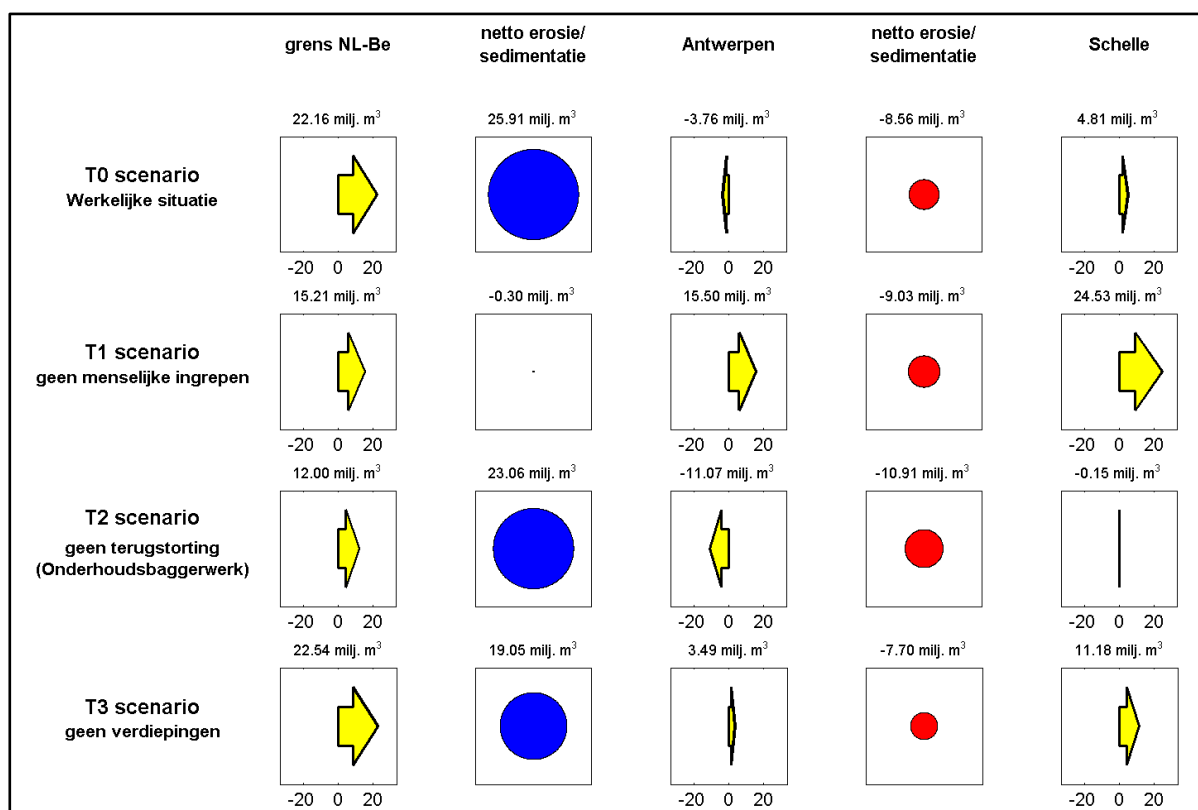


Figuur 6-13: Cumulatief zandtransport over de periode 1960 - 1980 voor de vier scenario's.



Figuur 6-14: Cumulatief zandtransport over de periode 1960 - 2010 voor de vier scenario's.

Het interessegebied bij dit onderzoek, de Beneden-Zeeschelde tussen Antwerpen en Schelle in, is in elk scenario aan ongeveer dezelfde mate van erosie onderhevig doordat het netto sedimenttransport bij de raaien bij Antwerpen en Schelle ongeveer evenveel beïnvloed wordt door de ingrepen. De rode cirkels in Figuur 6-15, die de netto erosie aangeven in het interessegebied, zijn in alle vier de scenario's dan ook ongeveer dezelfde grootte.



Figuur 6-15: (Natuurlijke) Zandbalans van de Beneden-Zeeschelde volgens FINEL2D over de periode 1960-2010.

Deze uitkomsten geven aan dat de gestelde hypothese gedeeltelijk juist is. Het netto zandtransport ter hoogte van Antwerpen wordt in sterke mate beïnvloed door baggerwerkzaamheden. Echter blijkt dat het zandtransport ter hoogte van Schelle even sterk beïnvloed wordt door deze ingrepen, met als gevolg dat de baggerwerkzaamheden niet veel invloed hebben op de netto erosie die er optreedt in het gedeelte tussen Antwerpen en Schelle (de rode cirkels in Figuur 6-15).

Het lijkt er dus op dat de erosie in het traject Antwerpen-Schelle een andere oorzaak heeft, omdat de grootte van de erosie nauwelijks te beïnvloeden lijkt door baggerwerkzaamheden.

Het is mogelijk dat het model foutieve resultaten geeft. De T0 situatie geeft echter zeer goede uitkomsten, wanneer wordt gekeken naar hoe goed het model in staat is om de opgetreden ontwikkelingen te reproduceren. Zo wordt door het model een BSS van 0.58 verkregen en blijkt dat de opgetreden toename van de getijslag, het verder doordringen van het getij, de baggerhoeveelheden en de hoeveelheid erosie ook goed door het model berekend worden. Dit alles geeft vertrouwen in het model. Bovenstrooms van Dendermonde en in de Rupel is het model echter sterk geschematiseerd, waarbij er slechts met één element over de breedte wordt gerekend. Mogelijk beïnvloedt dit de modeluitkomsten op een negatieve manier.

De oorzaak van de erosie is mogelijk een autonome ontwikkeling en moet wellicht gezocht worden in de vorm van het systeem, waardoor het getij zich op een specifieke manier voortplant. Tevens kan niet worden uitgesloten dat de aanleg van de Stuw bij Gent invloed heeft gehad op de ontwikkeling van het getij, het zandtransport en de opgetreden erosie.

7 CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN

7.1 Calibratie en bruikbaarheid van het model

Het FINEL2d model weet de ontwikkelingen die zijn opgetreden van 1960 tot 2010 goed te simuleren. Zo komt de gemodelleerde erosie en sedimentatie in de Beneden-Zeeschelde goed overeen met de geobserveerde erosie en sedimentatie. Na een simulatietijd van 50 jaar wordt een Brier Skill Score van 0.58 verkregen, dit betekent dat het model de opgetreden erosie en sedimentatie goed kan simuleren. De ontwikkeling van de gemiddelde bodemligging en de volumeontwikkelingen die het model voorspelt komen redelijk goed overeen met de werkelijkheid. De toename van de getijslag en de verschuiving van de maximale getijslag weet het model ook goed te voorspellen. Tot slot komen de gebaggerde volumes in het FINEL2D model goed overeen met de gemiddelde jaarlijkse baggerhoeveelheden. Geconcludeerd kan worden dat alle data die gebruikt zijn om het model te verifiëren goed door het model gesimuleerd kunnen worden en dat het model bruikbaar is voor de scenario berekeningen.

7.2 Scenario's

De volgende scenario's zijn uitgevoerd met:

- T0: Simulatieperiode van 1960-2010, waarbij alle menselijke ingrepen (baggeren, storten en zandwinning) volgens de werkelijkheid geschieden. Dit scenario is gelijk aan de kalibratie.
- T1: Als T0, maar nu geen menselijke ingrepen.
- T2: Als T0, maar nu geen terugstorting van het gebaggerde zand.
- T3: Als T0, maar nu geen verdiepingen van de vaargeul uitgevoerd. De in 1960 vastgestelde onderhoudsdiepte van de vaargeul blijft hier gehanteerd.

7.3 Toename getijslag

In het T1 scenario, waarin geen menselijke ingrepen zijn uitgevoerd, neemt de getijslag in het estuarium af met de tijd, waar deze in het T0 scenario toeneemt met de tijd. In het T2 scenario vindt geen terugstorting van het gebaggerde zand plaats, waardoor er in dit scenario netto meer zand wordt onttrokken uit het systeem. In dit scenario is dan ook te zien dat de getijslag nog meer toe neemt dan in het T0 scenario. In het T3 scenario, waarin geen verdiepingen plaatsvinden, neemt de getijslag in het estuarium minder toe dan in het T0 scenario. Uit deze bevindingen kan de conclusie worden getrokken dat de toename van de getijslag is gestuurd door de uitgevoerde baggerwerkzaamheden.

7.4 Opgetreden erosie

Voor het interessegebied, de Beneden-Zeeschelde tussen Antwerpen en Schelle, geldt dat de menselijke ingrepen die van 1960 tot 2010 zijn uitgevoerd grote invloed hebben en zelfs sturend zijn voor het sedimenttransport ter hoogte van Antwerpen. Hoe meer menselijke ingrepen uitgevoerd worden benedenstrooms van Antwerpen hoe meer zand vanuit het bovenstroomse deel richting Antwerpen getrokken wordt. Doordat deze invloed zich even sterk doorzet tot Schelle hebben de uitgevoerde baggerwerkzaamheden echter nauwelijks invloed op de netto erosie die optreedt in het interessegebied. Mogelijk is de opgetreden erosie een autonome ontwikkeling en is wellicht te wijten aan de vorm van het systeem, waardoor het getij zich op een specifieke manier voortplant of heeft de aanleg van de stuw bij Gent invloed gehad op de opgetreden erosie.

7.5 Antwoord op de deelvragen

Uit dit onderzoek blijkt dat de uitgevoerde baggerwerkzaamheden sturend zijn geweest voor de toename van de getijslag. Ook hebben de menselijke ingrepen grote invloed op het sedimenttransport in de gehele Beneden-Zeeschelde. De erosie bovenstrooms van Antwerpen blijft echter optreden wanneer er geen menselijke ingrepen worden uitgevoerd en uit dit onderzoek blijkt dat dit niet direct te relateren is aan de uitgevoerde baggerwerkzaamheden. De oorzaak moet wellicht gezocht worden in een natuurlijke ontwikkeling van het gebied, waarbij de vorm van het systeem een rol kan spelen of bijvoorbeeld de aanleg van de stuw in de Schelde bij Gent. Verder is het model verder bovenstrooms van Dendermonde en in de kleinere riviertjes sterk vereenvoudigd, waardoor de resultaten mogelijk beïnvloed worden.

7.6 Aanbevelingen

Naar aanleiding van deze studie volgt de aanbeveling om te kijken naar de invloed van de vorm van het systeem en om te kijken of de erosie een natuurlijke trend is. Ook de invloed van andere menselijke ingrepen zoals bijvoorbeeld de aanleg van de stuw bij Gent dient onderzocht te worden. Verder wordt aanbevolen om het model te verfijnen verder bovenstrooms van Dendermonde en in de Rupel om hier zodoende de reproductienauwkeurigheid te verbeteren.

BIBLIOGRAPHY

- Belmans, H. (1988). *Verdiepings- en onderhoudsbaggerwerken in de Wester- en Zeeschelde*.
- Chen, M., Wartel, S., & De Smedt, F. (2010). *Lithologische en geomorfologische kaart van de Beneden-Zeeschelde*.
- Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis. (2013a). *Aanvullend onderzoek historische ontwikkelingen getij*.
- Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis. (2013b). *Ontwikkeling mesoschaal Zeeschelde (factsheets)*.
- Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis. (2013c). *Achtergrondrapport baggeren en storten*.
- Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis. (2013d). *Zeeschelde- nota analyse bodemligging*.
- Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis. (2013e). *Harde lagen Beneden-Zeeschelde*.
- Dam, G. (2006). *Morfodynamische berekeningen van de Westerschelde met behulp van FINEL2D*.
- Dam, G. (2012). *Harde lagen Westerschelde*. Svašek Hydraulics.
- Dam, G., de Wit, L., van Leeuwen, B., & Klein, M. (2014). *Technical manual FINEL2D version 7.21*.
- Dam, G., de Wit, L., van Leeuwen, B., & Klein, M. (2014). *User manual FINEL2D version 7.21*.
- Kornman, B., Liek, G., & Schippers, H. (2002). *Baggeren en storten in de Westerschelde een nieuwe kijk op het onderhoudsbaggerwerk*.
- LTV. (2007). *Koploperproject LTV-O&M - Thema Veiligheid*.
- McLaren, P. (1994). *SEDIMENT TRANSPORT IN THE WESTERSCHELDE BETWEEN BAARLAND AND RUPELMONDE*. Rijkswaterstaat.
- Meire, P., Rossaert, G., De Regge, T., Ysebaert, T., & Kuijken, E. (1992). *Het Schelde-estuarium: ecologische beschrijving en een visie op de toekomst*. Gent.
- Mol, G. (1995). *De Westerschelde: een resultaat van menselijke ingrepen*. Middelburg: Rijksinstituut voor Kust en Zee.
- Plancke, Y., Maximova, T., Ides, S., Peeters, P., Taverniers, E., & Mostaert, F. (2012). *Werkgroep O&M - Projectgroep Veiligheid: Sub project 1: Data analysis and hypothesis - Lower Sea Scheldt*.
- Storm, C., & Van Maldegem, D. (1997). *De Scheldebodem in 1992/1993*.
- Sutherland, J., Peet, A., & Soulsby, R. (2004). Evaluating the performance of morphological models. *Coastal Engineering* 51, 917-939.
- Technische Scheldecommissie. (1984). *Nota Verdieping Westerschelde Programma 48'/43'*.
- Van der Werf, J., & Briere, C. (2013). *The influence of morphology on tidal dynamics and sand transport in the Scheldt estuary*.
- Van Rijn, L. (2010). *Tidal Phenomena in the Scheldt Estuary*.
- Van Rijn, L., Walstra, D., Grasmeyer, B., Sutherland, J., Pan, S., & Sierra, J. (2003). The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based Profile models. *Coastal Engineering* 47, 295-327.
- Wang, Z., Jeuken, M., Gerritsen, H., de Vriend, H., & Kornman, B. (2002). *Morphology and asymmetry of the vertical tide in the Westerschelde estuary*.

Bijlagen

A ANALYSERAPPORT

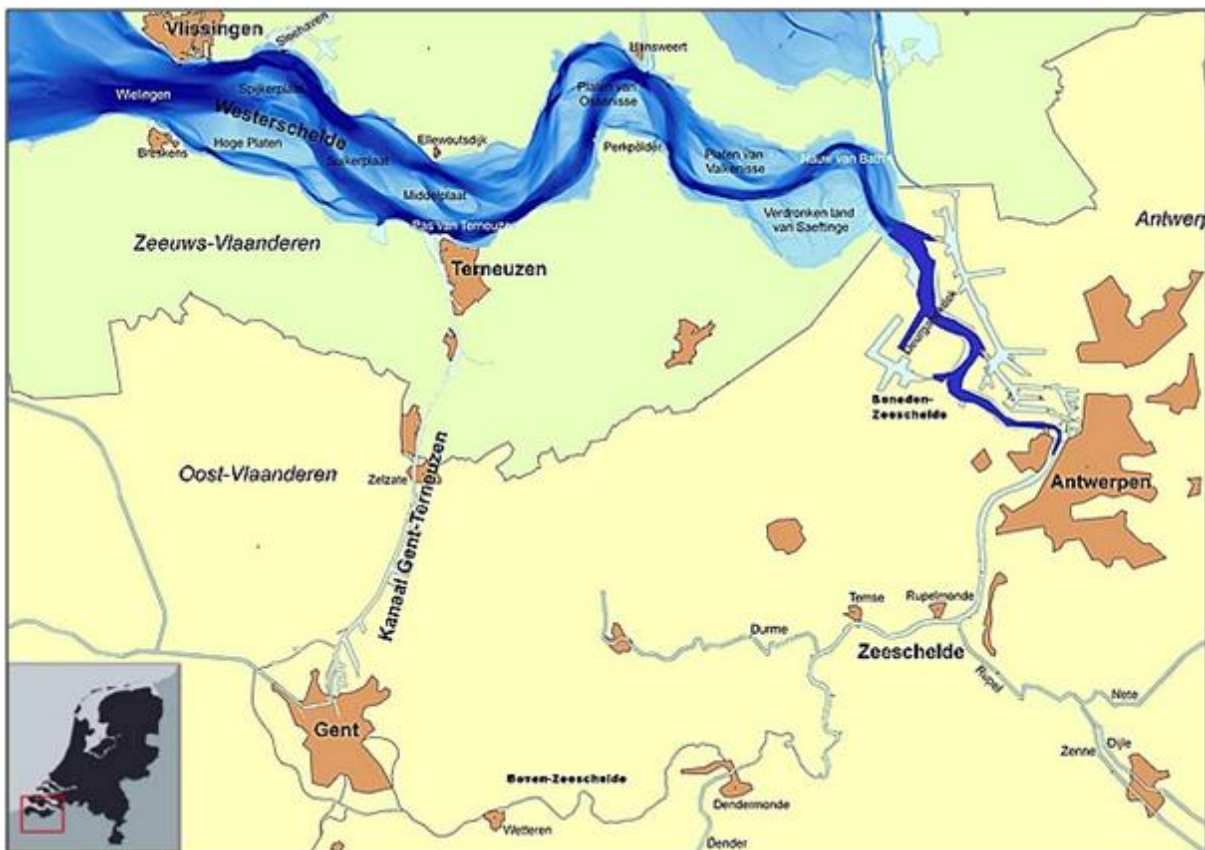
INHOUDSOPGAVE

	Pag.	
1	INTRODUCTIE	3
1.1	Achtergrond	3
2	SEDIMENTEIGENSCHAPPEN	4
2.1	Gebruikte gegevens	4
2.2	Sedimenteigenschappen in een tijdreeks	4
2.3	Bodemkaart volgens McLaren	9
2.4	Geomorfologische kaart	11
2.5	Niet-erodeerbare lagen	11
3	MENSELIJK INGRIJPEN	12
3.1	Baggeren en Storten	12
3.2	Zandextractie en -winning	16
3.3	Verdiepingen	19
3.4	Inpolderingen	20
3.5	Harde begrenzingen	21
4	BODEMONTWIKKELING	23
4.1	Beschikbare gegevens	23
4.2	Erosie- en sedimentatiepatronen	23
4.3	Bodemligging	27
4.4	Volumeontwikkeling	33
5	HYDRODYNAMISCHE ONTWIKKELINGEN.	34
5.1	Historische ontwikkelingen.	35
5.2	Ontwikkelingen sinds 1900	35

1 INTRODUCTIE

1.1 Achtergrond

Het Schelde estuarium, zie Figuur 1-1, is een estuarium dat op morfologisch gebied actief is. Het is gelegen in Zuidwest Nederland en Vlaanderen en staat in verbinding met de rivier de Schelde, welke zijn oorsprong vindt in het Noordwesten van Frankrijk. De Schelde is een rivier van ca. 350 km lang, het getij dringt door tot en met Gent, ca. 180 km bovenstrooms van de mond (Van Rijn, 2010). De Westerschelde, het Nederlandse deel van het estuarium, loopt van de mond tot aan de Belgische-Nederlandse grens en is ca. 60 km lang. De Beneden-Zeeschelde is het Vlaamse deel dat ligt tussen de Belgische-Nederlandse grens en Rupelmonde. Bovenstrooms van Rupelmonde tot aan Gent bevindt zich de Boven-Zeeschelde.



Figuur 1-1: Het Schelde estuarium. (Schelde Lessen, 2014)

Er is in het estuarium sprake van een wisselwerking tussen het getij en de morfologie. Wanneer de morfologie in het estuarium verandert, heeft dit invloed op het getij waardoor de verandering van het getij op zijn beurt weer invloed heeft op de morfologie (Wang et al., 2002). Grootschalig zandtransport speelt een belangrijke rol bij het handhaven van de toegankelijkheid (door onderhoudsbaggerwerk en stortbeleid), de natuurlijkheid (ontwikkeling van morfologische elementen) en de veiligheid (ontwikkeling van hoogwaters) van het estuarium (Van der Werf & Briere, 2013).

De getijslag (het verschil tussen hoog en laag water) ter hoogte van Vlissingen was in 2011 gemiddeld ca. 3.8 meter. Ter hoogte van Antwerpen, 75 km verderop, bedraagt de gemiddelde getijslag in dit zelfde jaar ca. 5.3 meter. Bij Gent is deze getijslag nog steeds merkbaar en bedraagt daar in de periode 2001 - 2010 gemiddeld ca. 2.5 meter (Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, 2013a).

2 SEDIMENTEIGENSCHAPPEN

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de bodem van het Schelde estuarium. Er wordt gekeken waar de bodem uit bestaat, waarbij de sedimenteigenschappen op verschillende locaties in het estuarium in kaart worden gebracht. Hierbij wordt vooral gekeken naar de korrelgrootte. Daarnaast wordt ook ingegaan op de structuur van de bodem van de rivier en naar harde lagen die zicht aan het bodemoppervlak of daar onder bevinden.

2.1 Gebruikte gegevens

In dit rapport wordt bij de analyse van de sedimenteigenschappen gekeken naar verschillende bronnen. Er wordt gekeken naar de data van McLaren (1994), welke vergaard is op basis van bodembemonstering in 1992-1993. Het voordeel van deze data is dat het het gehele oppervlakte van het Schelde estuarium beslaat en daarmee een gedetailleerd beeld geeft van de bodem.

Daarnaast wordt ook gekeken naar data van de Vlaamse Milieumaatschappij (VMM). De VMM neemt sinds 1989 monsters van de bodem en voert bijbehorende laboratoriumanalyses uit. Het voordeel van deze data ten opzichte van McLaren is dat het meerdere jaren beslaat, waardoor het mogelijk is om ontwikkelingen die de bodem heeft doorgemaakt waar te nemen.

In hoofdstuk 2.2 worden de sedimenteigenschappen voor verschillende meetpunten beschouwd in een tijdreeks. Deze data is beschikbaar gesteld door de VMM. In hoofdstuk 2.3 wordt een bodemkaart getoond van de situatie volgens McLaren (1994).

2.2 Sedimenteigenschappen in een tijdreeks

Soorten sediment

Op basis van de beschikbare data van de VMM is het sediment in drie categorieën onderverdeeld; klei, silt en zand. De categorie klei is gedefinieerd voor korrels met een diameter die kleiner is dan 2 μm . De categorie silt betreft korrels met een diameter tussen de 2 en 63 μm en zand met een diameter groter dan 63 μm . Bij dit onderzoek worden de categorieën klei en silt gezamenlijk als slib gedefinieerd. De categorie slib betreft hiermee alle deeltjes met een diameter kleiner dan 63 μm (Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, 2013c).

De sedimenteigenschappen in het Schelde estuarium zijn zowel ruimtelijk als in de tijd niet eenduidig of constant. Om hier een beter beeld van te krijgen wordt bij deze analyse onderscheid gemaakt tussen de Westerschelde en de Beneden-Zeeschelde en binnen deze twee gebieden ook weer tussen verschillende meetpunten. Aangezien het interessegebied bij dit onderzoek ligt in de Beneden-Zeeschelde zal hier uitgebreider op in worden gegaan dan op de sedimenteigenschappen van de Westerschelde.

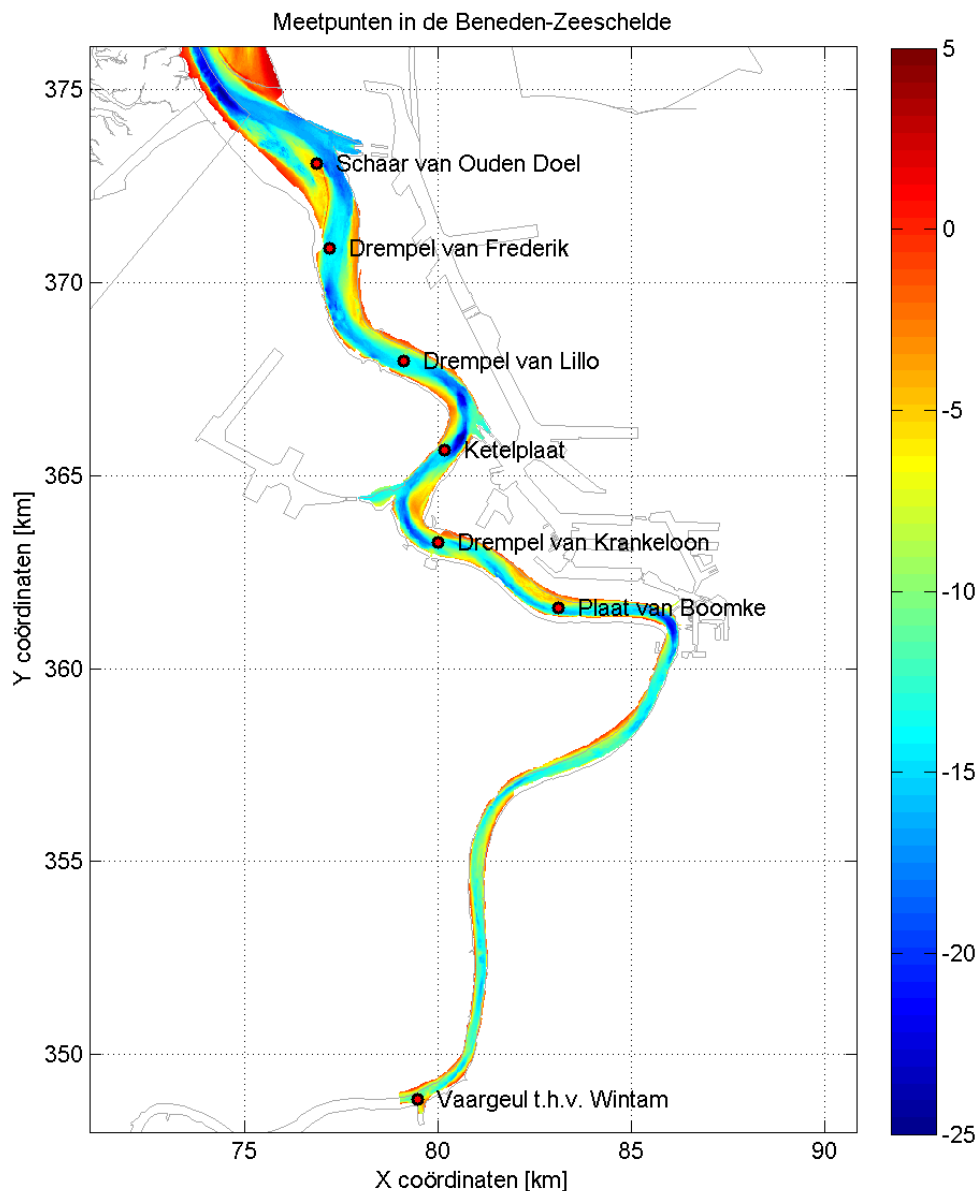
De Westerschelde

Voor de monsters die uit de Westerschelde zijn genomen, geldt dat de bodem door de jaren heen nauwelijks uit iets anders dan zand bestaat, 95% of meer. De data toont eveneens dat de verdeling in de tijdreeks min of meer constant is en dat er geen temporele veranderingen voorkomen. Voor een compleet overzicht van de sedimenteigenschappen in de Westerschelde wordt verwezen naar Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis (2013c).

De Beneden-Zeeschelde

Voor de Beneden-Zeeschelde geldt ook dat er overwegend zand in de bodem is aangetroffen. Bij deze analyse worden enkel de meetpunten die zich in de vaargeul bevinden geanalyseerd. De monsters die zijn genomen in de vaargeul van de Beneden-Zeeschelde tonen dat de bodem door de jaren heen gemiddeld voor ca. 85% uit zand bestaat. Voor een compleet overzicht van de sedimenteigenschappen wordt verwezen naar Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis (2013c).

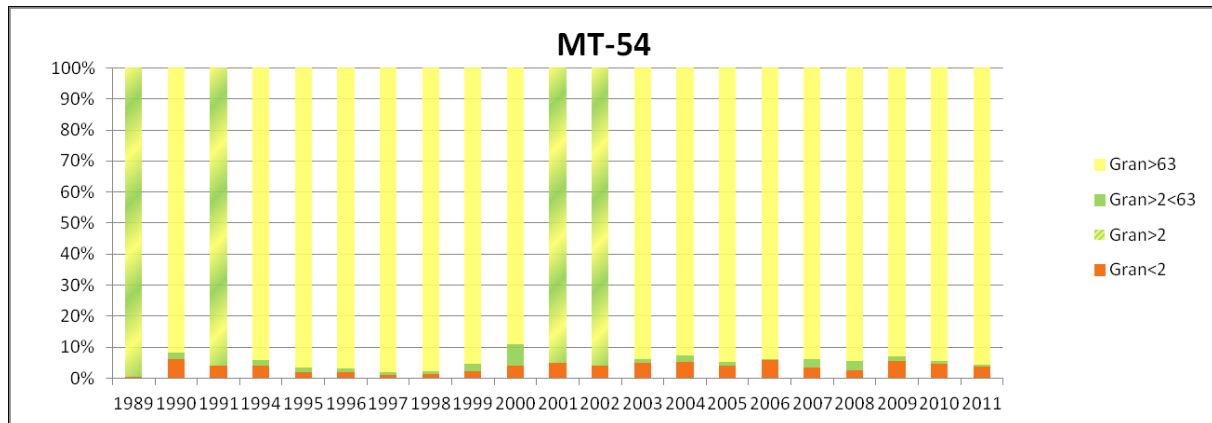
De meetpunten die in dit rapport aan bod komen zijn Schaar van Ouden Doel, Drempel van Frederick, Drempel van Lillo, Ketelplaat, Drempel van Krankeloon, Plaat van Boomke en de vaargeul t.h.v. Wintam. Figuur 2-1 geeft in een overzicht waar deze meetpunten zich in de Beneden-Zeeschelde bevinden.



Figuur 2-1: Meetpunten in de Beneden-Zeeschelde.

Schaar van Ouden Doel

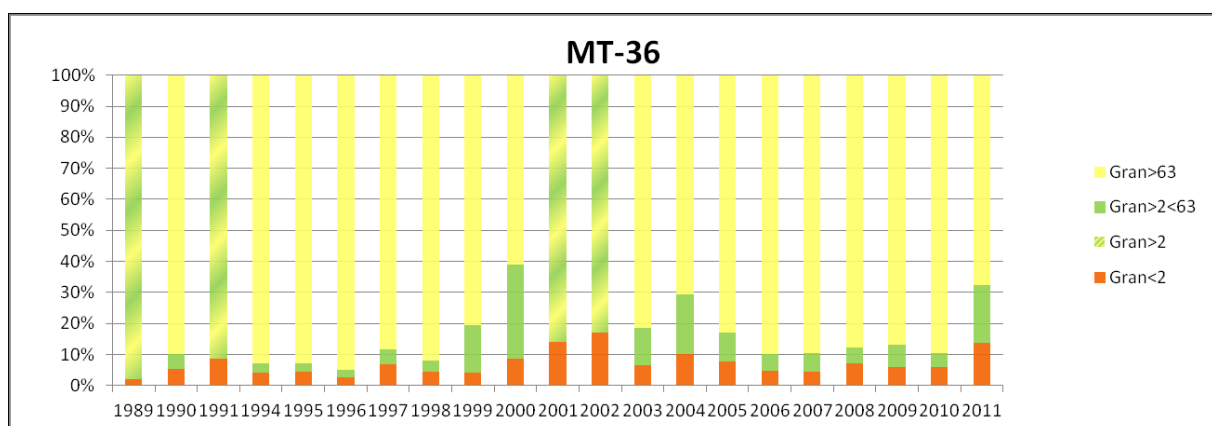
Schaar van Ouden Doel is een stort- en zandwinlocatie van de Beneden-Zeeschelde en is gelegen ter hoogte van de Zandvlietsluizen. De sedimenteigenschappen ter hoogte van de Schaar van Ouden Doel variëren door de jaren heen. Het is goed mogelijk dat dit te maken heeft met de zandwinning en het storten van zand in het gebied. Er wordt bij Schaar van Ouden Doel zand gestort dat op verschillende locaties in de Zeeschelde is gebaggerd. De zandwinning in Schaar van Ouden Doel vindt niet primair plaats vanuit financieel oogpunt maar is vooral gericht op het op diepte houden van de bodem, in hoofdstuk 3.2 wordt hier dieper op ingegaan.



Figuur 2-2: Sedimenteigenschappen in een tijdreeks t.h.v. Schaar van Ouden Doel. Bron: Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis (2013c).

Drempel van Frederick

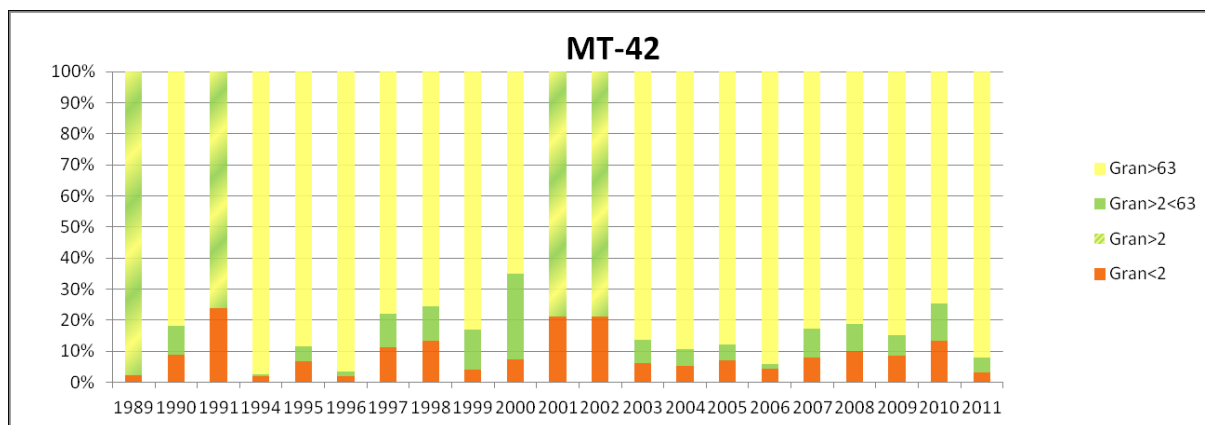
De drempel van Frederick ligt net bovenstrooms van Schaar van Ouden Doel en benedenstrooms van het Deurganckdok. Bij de drempel van Frederick is overwegend zand aangetroffen in de bodem. Voor 1999 was het zandpercentage gemiddeld meer dan 90%, tussen 1999 en 2005 werd een zandpercentage van ca. 75% waargenomen en vanaf 2006 stijgt dit weer naar ca. 90%. De sedimenteigenschappen bij de drempel van Frederick zijn in Figuur 2-3 getoond in een tijdreeks van 1989 tot 2011.



Figuur 2-3: Sedimenteigenschappen in een tijdreeks t.h.v. de drempel van Frederick. Bron: Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis (2013c).

Drempel van Lillo

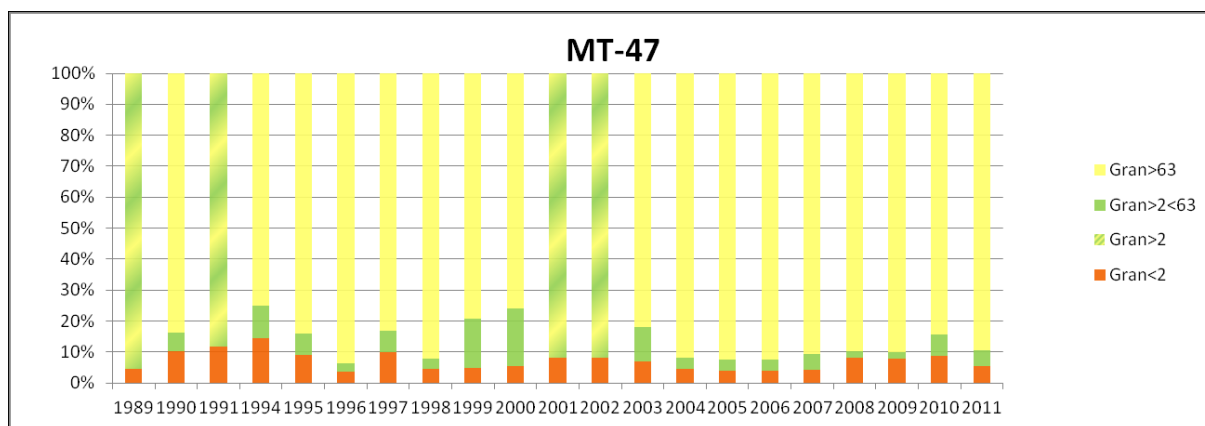
De drempel van Lillo is, net als Schaar van Ouden Doel, een stortlocatie in de Beneden-Zeeschelde. Bij de drempel van Lillo wordt echter niet gebaggerd. Figuur 2-4 toont vergelijkbare patronen van de aanwezige concentraties zand en slib in de tijdreeks als bij de drempel van Frederick en Schaar van Ouden Doel. Eind jaren 90 is er een toename van slib te zien en na 2000 lijkt dit zich weer te stabiliseren.



Figuur 2-4: Sedimenteigenschappen in een tijdreeks t.h.v. de drempel van Lillo. Bron: Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis (2013c).

Ketelplaat

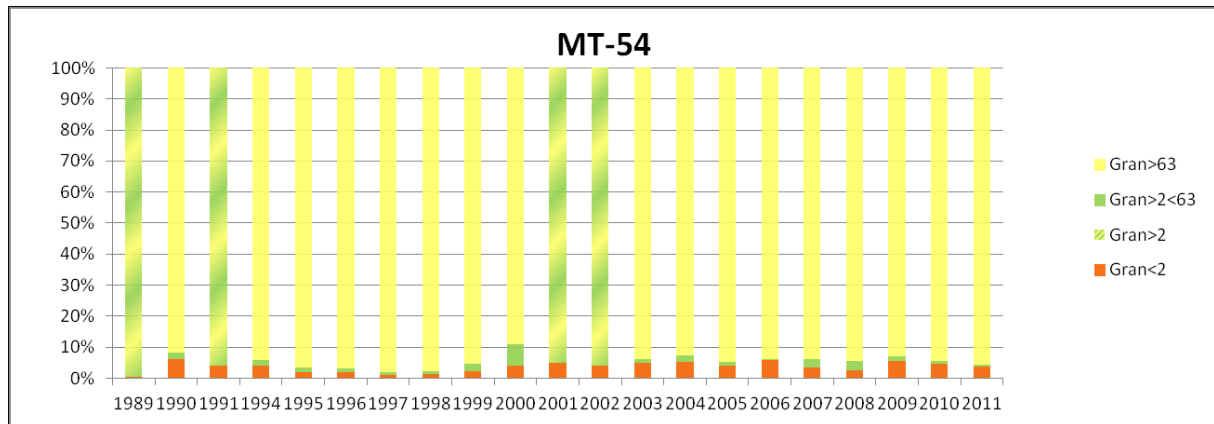
Ketelplaat is gelegen tussen de toegangsgeul van de Cauwelaert- en Boudewijnsluizen en de toegangsgeul van de Kallosluis. De bodem bestaat hier voor gemiddeld 90% uit zand door de jaren heen. In Figuur 2-5 is dit te zien in een tijdreeks. Vanaf 2004 blijft de samenstelling van de bodem nagenoeg constant.



Figuur 2-5: Sedimenteigenschappen in een tijdreeks t.h.v. Ketelplaat. Bron: Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis (2013c).

Drempel van Krankeloon

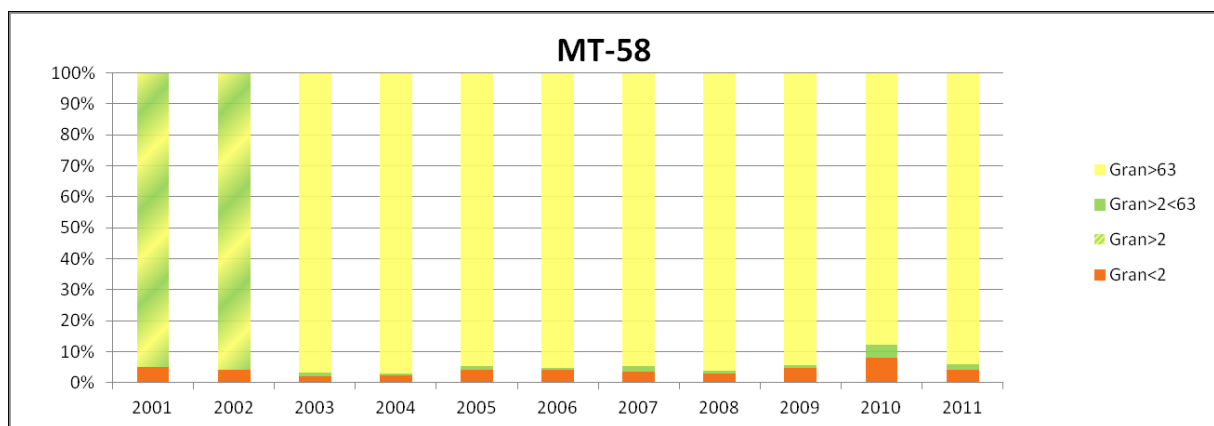
De drempel van Krankeloon bevindt zich net bovenstrooms van de toegangseul van de Kallosluis. Hier bestaat de bodem voor gemiddeld 95% uit zand en komt in de tijdreeks niet onder de 90%. In Figuur 2-6 is te zien dat er door de jaren heen geen grote verschillen in bodemsamenstelling voorkomen.



Figuur 2-6: Sedimenteigenschappen in een tijdreeks t.h.v. de Drempel van Krankeloon. Bron: Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis (2013c).

Plaat van Boomke

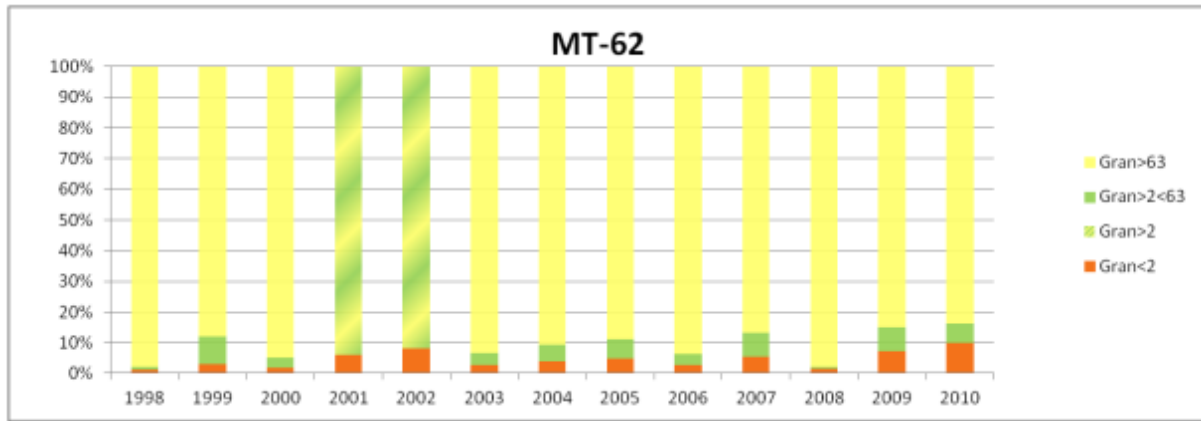
Bij de plaat van Boomke zijn slechts meetgegevens beschikbaar vanaf 2001. Uit Figuur 2-7 blijkt dat de bodem hier vanaf 2001 gemiddeld voor 95% uit zand bestaat. In 2010 is een ietwat lagere waarde van ca. 88% gemeten, maar verder zijn er in de tijd geen temporele verschillen te zien.



Figuur 2-7: Sedimenteigenschappen in een tijdreeks t.h.v. de plaat van Boomke. Bron: Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis (2013c).

Vaargeul t.h.v. Wintam

Ter hoogte van Wintam komen de Boven-Zeeschelde en de Rupel samen in de Beneden-Zeeschelde. Het meetpunt ligt net in de Boven-Zeeschelde en daarmee bovenstrooms van de monding van de Rupel. In Figuur 2-8 zijn de sedimenteigenschappen in dit punt te zien in een tijdreeks. De bodem bestaat ook hier overwegend uit zand, gemiddeld ca. 90%.



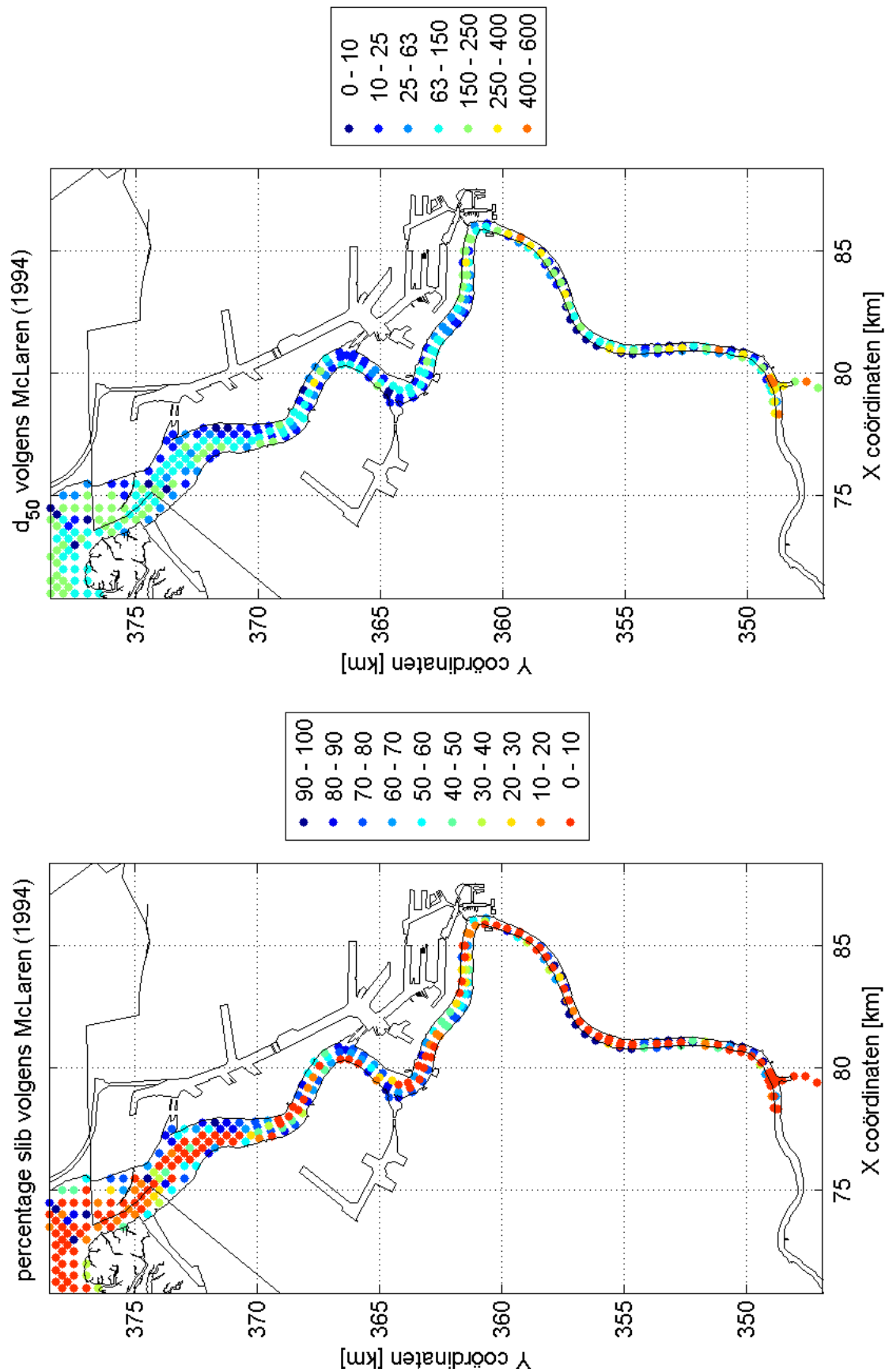
Figuur 2-8: Sedimenteigenschappen in een tijdreeks t.h.v. Wintam. Bron: Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis (2013c).

2.3 Bodemkaart volgens McLaren

De bodem van het gehele Schelde estuarium is in 1992-1993 bemonsterd. De bemonstering is uitgevoerd door de Meetdienst Zeeland in een regelmatig grid met afstanden van 500 meter. Schorren en havengebieden zijn niet bemonsterd (Storm & Van Maldegem, 1997). De resultaten van de bemonstering zijn verwerkt door McLaren (1994).

In Figuur 2-9 is links het slibpercentage en rechts het verloop van de d_{50} in de Beneden-Zeeschelde te zien volgens McLaren (1994). Wat blijkt uit de rechter figuur is dat er op veel plaatsen in de Beneden-Zeeschelde een d_{50} wordt aangetroffen die kleiner is dan $63 \mu\text{m}$. Ook uit de linker figuur blijkt dat er op sommige plaatsen een hoge concentratie slib is aangetroffen. Stroomopwaarts van Antwerpen worden ook wel hogere waarden gevonden voor de d_{50} .

Storm & Van Maldegem (1997) merken op dat deze bodemkaart een goede referentie is voor de huidige ligging van de zandrijke gebieden in het Schelde estuarium, maar dat deze geen hoge betrouwbaarheid heeft in de meer slibrijke delen van het estuarium.



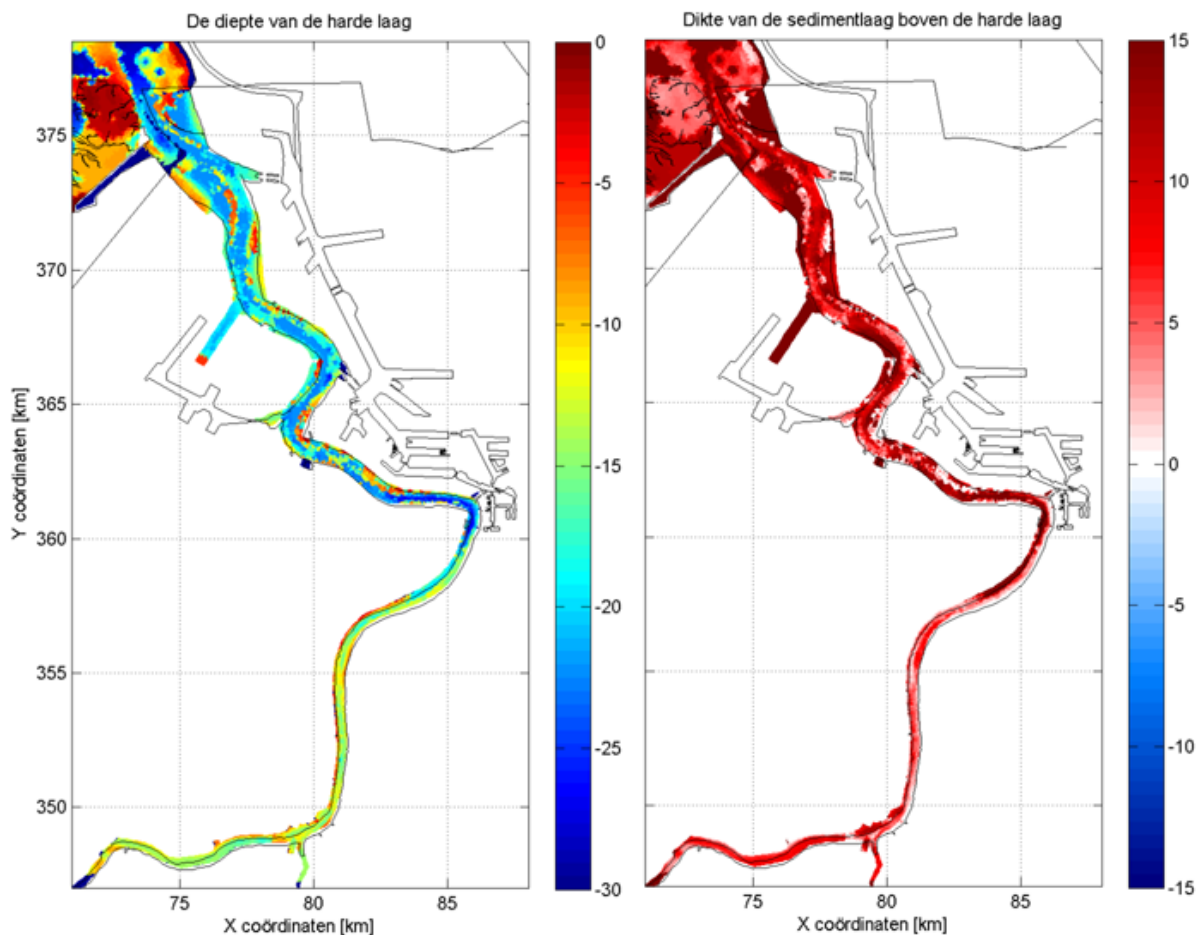
Figuur 2-9: Het slibpercentage (links) en het verloop van de d_{50} (rechts) in de Beneden-Zeeschelde volgens McLaren (1994).

2.4 Geomorfologische kaart

In Chen et al. (2010) is een analyse gemaakt van de bodemstructuren van de Beneden-Zeeschelde. Hierbij zijn verschillende classificaties gemaakt van de lengte en hoogte van de bedvormen. Met behulp van deze analyse is een geomorfologische tot stand gebracht waarin de bodemstructuur in de volgende klassen wordt ingedeeld: afglijdingen, klifjes, grote duinen, kleine tot middelgrote duinen, onregelmatige bodemstructuur, baggersporen en structuurloos bodemoppervlak. Voor deze geomorfologische kaart van de Beneden-Zeeschelde wordt verwezen naar Bijlage B.

2.5 Niet-erodeerbare lagen

In de bodem bevinden zich harde lagen die niet of moeilijk erodeerbaar door natuurlijke verschijnselen, in dit geval stroming. Deze lagen bevinden zich op sommige plaatsen in de Beneden-Zeeschelde aan het bodemoppervlak of niet ver daar onder. In Figuur 2-10 is in de linker figuur de diepte van de harde laag te zien en in de rechter figuur is de dikte van de sedimentlaag op de harde laag te zien. Uit de rechter figuur kan worden opgemaakt dat de bodem op sommige plaatsen niet verder kan eroderen.



Figuur 2-10: Harde lagen in de Beneden-Zeeschelde. In de linker figuur is de diepte van de harde laag te zien en in de rechter figuur is de dikte van de sedimentlaag boven de harde laag te zien (bodem van 1960).

3 MENSELIJK INGRIJPEN

Al eeuwen geleden is de mens begonnen met ingrepen op (de morfologie van) het Schelde estuarium. Zo zijn er door de jaren heen gebieden ingepolderd en harde begrenzingen aangebracht. Ook wordt er in het gehele estuarium al decennia lang onderhoudsmatig gebaggerd en gestort, wordt er zand gewonnen en zijn er verdiepingen uitgevoerd.

3.1 Baggeren en Storten

De eerste baggerwerken in het Schelde estuarium zijn uitgevoerd in 1885. De baggerwerkzaamheden hebben zich tot ca. 1900 alleen tot de Zeeschelde beperkt. In de tijd hebben de baggerwerkzaamheden zich steeds verder stroomafwaarts uitgebreid.

Voor 1950 (naar Belmans, 1988)

Zonder baggerwerken zou de natuurlijke diepte van de drempels variëren van 5 tot 9 meter onder gemiddeld laagwater. In 1885 werd voor het eerst gebaggerd in het estuarium, dit was op de Zeeschelde, met als meest afwaartse drempel die van Frederik. Dit betrof een eenmalige verdieping, en vanaf 1896 kan men spreken van systematisch onderhoud van verschillende drempels. Met de tijd breidt het baggergebied zich steeds verder uit stroomafwaarts en sinds 1902 is de drempel van Zandvliet de meest stroomafwaartse drempel van het estuarium waar gebaggerd wordt. Na WO I hebben de baggerwerkzaamheden 4 jaar stilgelegen, de werkzaamheden komen langzaam weer op gang, maar komen niet boven de 0.5 miljoen m³ per jaar uit. Vanaf 1923 groeit deze hoeveelheid weer en na het openen van de Kruisschanssluis in 1928 kan worden gerekend met een jaarlijks volume van 3 á 4 miljoen m³. Sinds 1927 wordt gebaggerd vanaf de bocht van Walsoorden en wordt er meer gebaggerd uit het Nederlandse deel dan uit het Belgische deel. Gedurende WO II wordt slechts het noodzakelijke onderhoudsbaggerwerk verricht van ca. 1,5 miljoen m³ per jaar. Hierna stijgt het jaarlijks gebaggerde volume naar ca. 6,7 miljoen m³ per jaar.

Tot 1924 werd zo goed als al het gebaggerde sediment in België opgespoten. Hierna werd ca. tweederde van het gebaggerde volume grotendeels in het Nederlandse deel van Het estuarium terug gestort.

Na 1950

Er zijn in het estuarium 3 verdiepingen uitgevoerd naast de onderhoudsmatige baggerwerkzaamheden, waarbij de vaargeul is verbreed of tot op een nieuwe te onderhouden diepte is gebracht. De eerste verruiming vond plaats in het begin van de jaren 70, de tweede in 1997-1998 en de derde van 2008 tot 2010. Hier wordt dieper op ingegaan in hoofdstuk 3.3.

In dit rapport wordt binnen het Schelde estuarium onderscheid gemaakt tussen de Westerschelde en de Beneden-Zeeschelde. Omdat het interessegebied bij dit onderzoek de Beneden-Zeeschelde betreft zal er slechts kort worden ingegaan op de Westerschelde en zal er meer aandacht worden besteed aan de Beneden-Zeeschelde.

De Westerschelde

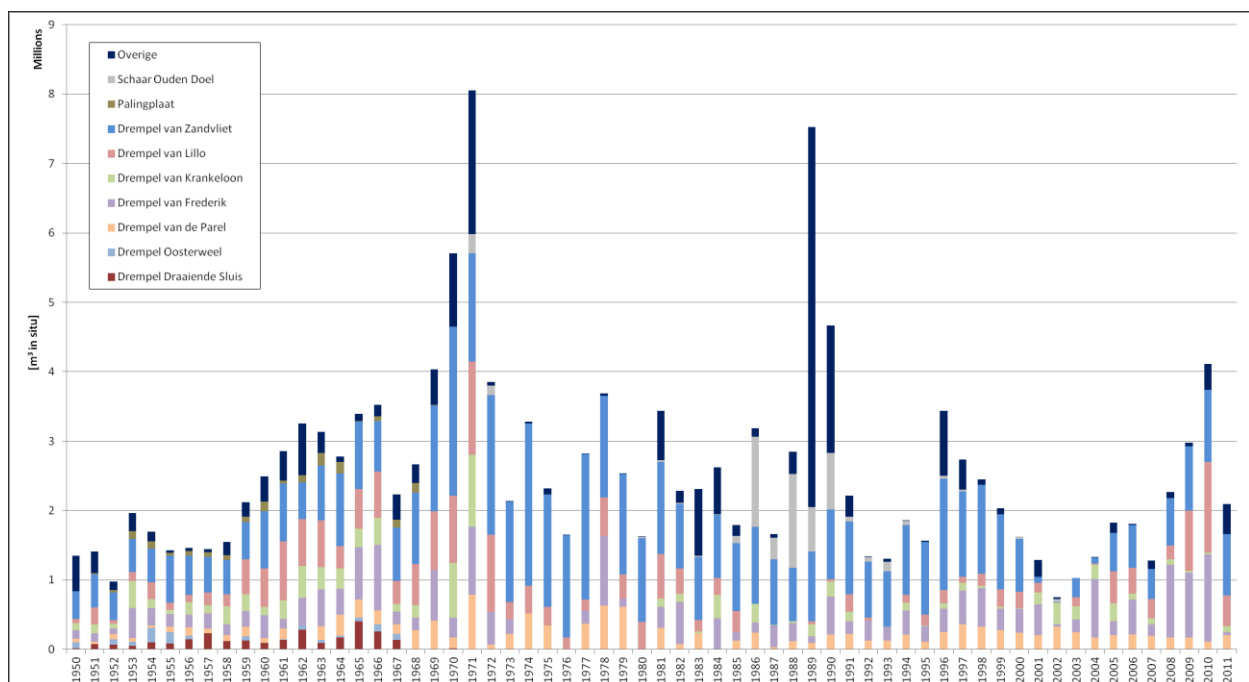
Voor 1969 is er in het westelijke deel van de Westerschelde enkel in 1953 gebaggerd. Dit was echter een fractie van de hoeveelheden die vanaf 1969 zijn gebaggerd. De gebaggerde volumes lopen door de jaren heen uiteen van 0.4 miljoen tot 5 miljoen m³ zand in situ per jaar. In het Oostelijke deel van de Westerschelde wordt reeds sinds het begin van de 19^e eeuw gebaggerd. Hier lopen de gebaggerde volumes uiteen van 2 miljoen tot 10 miljoen m³ per jaar. Voor een overzicht van de gebaggerde volumes in de Westerschelde wordt verwezen naar Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis (2013c).

De Beneden-Zeeschelde

Baggeren

De gebaggerde hoeveelheden zand uit de Beneden-Zeeschelde lopen sinds 1950 uiteen van 1 miljoen m³ per jaar tot 8 miljoen m³ per jaar. De locatie die door de jaren heen het meest onderhevig is geweest aan baggerwerkzaamheden is de drempel van Zandvliet. De jaarlijkse gebaggerde volumes voor verschillende baggerlocaties worden weergegeven in Figuur 3-1.

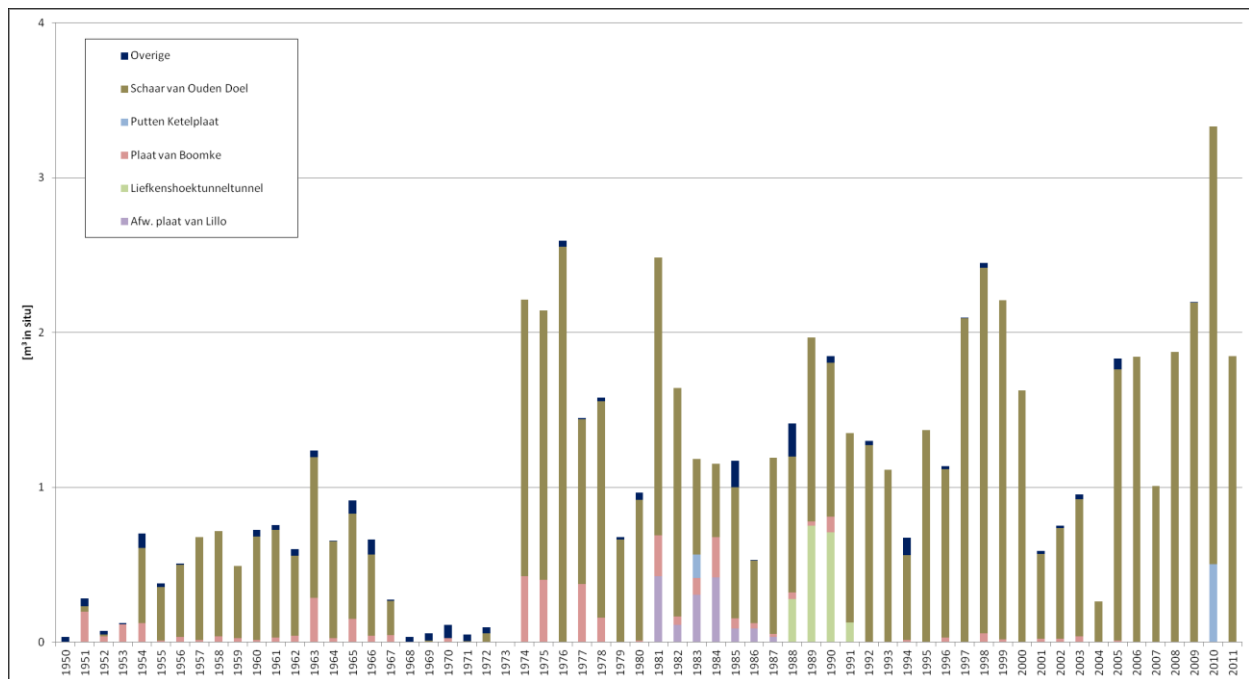
Wat allereerst opvalt, is dat er voor een aantal jaren een piek te zien is in de jaartotalen. De eerste piek is in het begin van de jaren 70 en maakt deel uit van de eerste verdieping die er is uitgevoerd. De tweede piek is in 1989 en maakt geen deel uit van een verdieping. De piek is het gevolg van de aanleg van de Liefkenshoektunnel waarbij er 4 miljoen m³ zand is gebaggerd. Ook is er in 1989-1990 ca. 1.5 miljoen m³ zand gebaggerd voor de bouw van de Europaterminal (Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, 2013c). De tweede verdieping is in de figuur nauwelijks terug te zien, maar valt binnen de derde piek in het einde van de jaren 90. In 1996 wordt er voor de bouw van de Noordzeeterminal ca. 1 miljoen m³ zand gebaggerd naast de onderhoudsmatige werkzaamheden. Als dit bijkomende volume van het jaartotaal wordt afgetrokken is er wel een kleine piek te zien voor de jaren 1997 en 1998. De derde verdieping is ook te zien in de figuur, tussen 2008 en 2010, waarbij vooral de drempel van Frederick en de drempel van Lillo verlaagd worden.



Figuur 3-1: Gebaggerde hoeveelheden zand vanaf 1950 uit de Beneden-Zeeschelde. Bron: Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis (2013c).

Storten

Veel van het gebaggerde sediment van de drempels en platen wordt elders terug gestort in de rivier. Bijna al het gebaggerde zand uit de Beneden-Zeeschelde wordt terug gestort bij Schaar van Ouden Doel. In Figuur 3-2 is te zien dat er ten tijde van de eerste verdieping vrijwel niet gestort is in de Beneden-Zeeschelde. Het zand dat tijdens de eerste verdieping gebaggerd is, is gebruikt voor opspuitingen en daarmee uit het systeem onttrokken (Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, 2013c). Voor de tweede en de derde verdieping is wel een piek te zien in de gestorte volumes zand. Ook ten tijde van de aanleg van de Liefkenshoektunnel is te zien dat er meer zand is gestort.

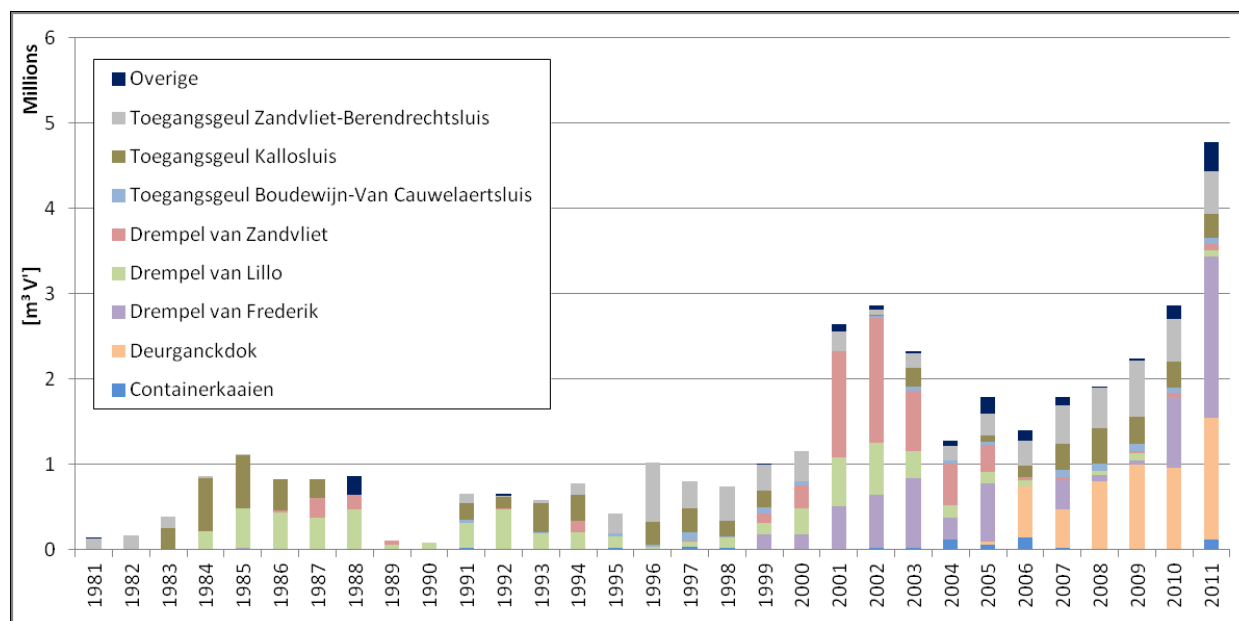


Figuur 3-2: Gestorte hoeveelheden zand vanaf 1950 uit de Beneden-Zeeschelde. Bron: Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis (2013c).

Slib

Naast zand wordt er de laatste decennia ook slib gebaggerd uit de Beneden-Zeeschelde. De locaties waar slib wordt gebaggerd zijn voornamelijk toegangsheuvelen tot sluizen en de drempels van Zandvliet, Lillo en Frederik. In Figuur 3-3 worden de volumes slib getoond die sinds 1981 zijn gebaggerd in de Beneden-Zeeschelde. Tot het jaar 2000 wordt er nauwelijks meer dan een miljoen m³ slib gebaggerd en bijna uitsluitend in de toegangsheuvelen en op de drempel van Lillo. Tussen 2001 en 2003 is er een toename aan de gebaggerde hoeveelheid slib te zien, voornamelijk op de drempel van Zandvliet. In 2005 is het Deurganckdok aangelegd, wat erg gevoelig is voor aanslibbing. Vanaf 2006 is ca. een derde tot de helft van het gebaggerde slib uit de Beneden-Zeeschelde afkomstig uit het Deurganckdok. In 2011 is er bijna 5 miljoen m³ slib gebaggerd, grotendeels afkomstig van de drempel van Frederik en uit het Deurganckdok.

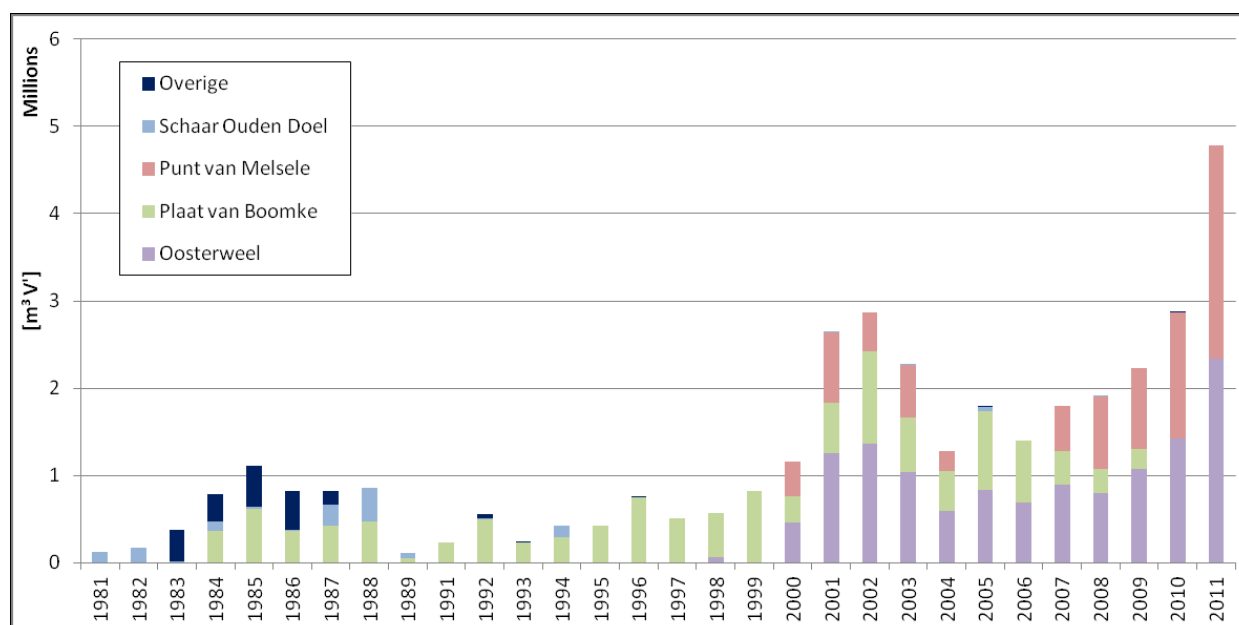
Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis (2013c) maakt de opmerking dat de toegangsheuvelen eveneens worden gebaggerd met behulp van een ploeg, welke het slib onder water naar de vaargeul sleept en waar het vervolgens met de stroming wordt meegevoerd. Deze hoeveelheden zijn niet opgemeten en bijgehouden in de baggerstatistieken.



Figuur 3-3: Gebaggerde volumes slib vanaf 1981 in de Beneden-Zeeschelde. Bron: Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis (2013c).

Storten

Voor de gestorte volumes slib is dezelfde trend te ontdekken als bij de gebaggerde volumes. Nagenoeg al het gebaggerde slib wordt elders in de Beneden-Zeeschelde terug gestort. Vanaf 1991 werd bijna uitsluitend bij de plaat van Boomke gestort en vanaf 2000 werd dit langzaam overgenomen door de put van Melsele en Oosterweel, zie Figuur 3-4.



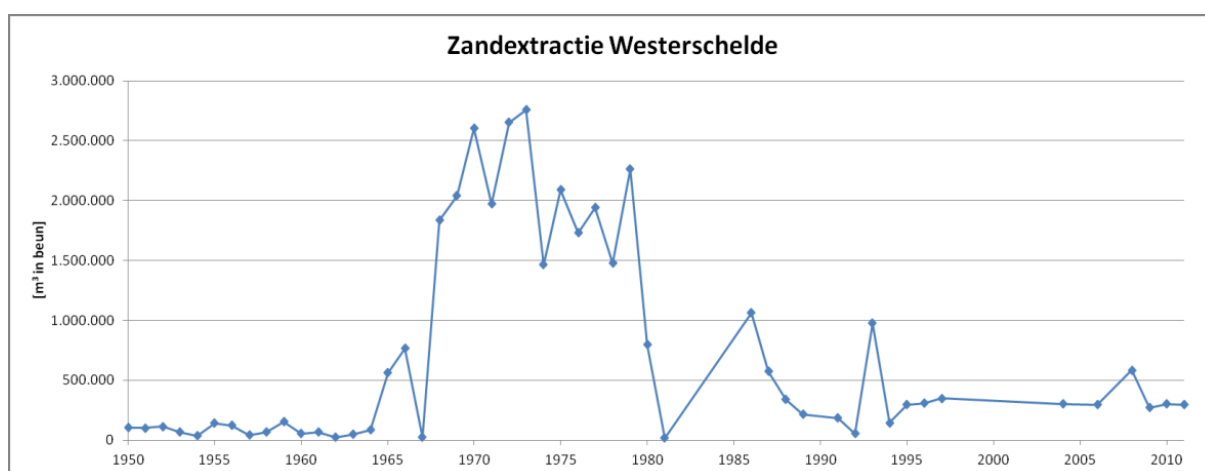
Figuur 3-4: Gestorte volumes slib vanaf 1981 in de Beneden-Zeeschelde. Bron: Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis (2013c).

3.2 Zandextractie en -winning

Reguliere baggerwerken waarbij het zand vervolgens door middel van opspuiten of op een andere manier wordt gebruikt voor aanlegwerken en op deze manier wordt onttrokken, wordt gezien als zandextractie. Er wordt gesproken van zandwinning wanneer er door de overheid of de handel wordt gebaggerd met als doel om dit zand aan land te gebruiken. Zandextractie vindt plaats bij de reguliere baggerwerken en is om deze reden opgenomen in de baggerstatistieken, in tegenstelling tot de zandwinning (Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis (2013c)).

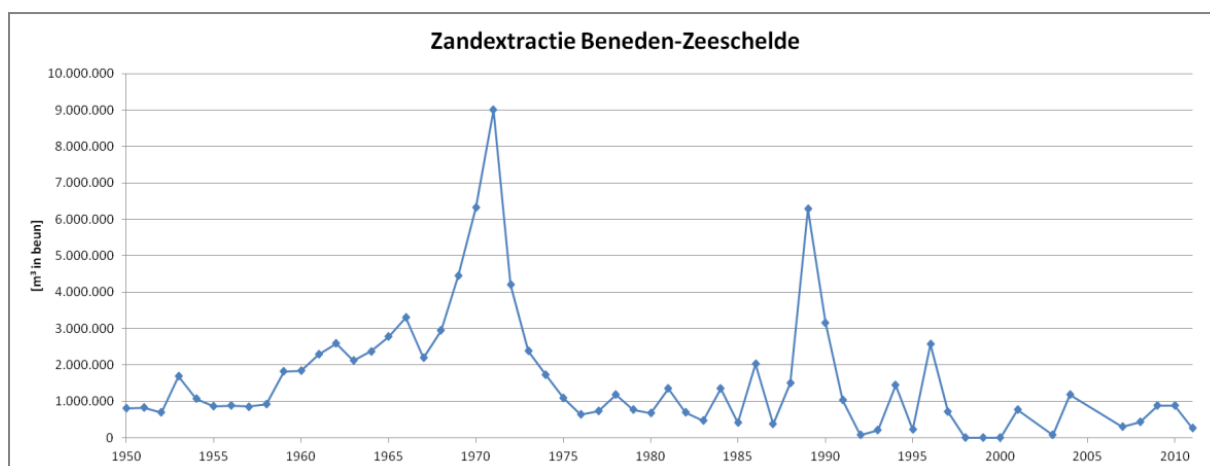
Extractie

In Figuur 3-5 is de zandextractie uit de Westerschelde weergegeven. De eerste en de derde verdieping zijn terug te zien in deze figuur. Net als bij de gebaggerde hoeveelheden is de tweede verdieping niet terug te zien in de figuur.



Figuur 3-5: Zandextractie uit de Westerschelde. Bron: Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis (2013c).

In Figuur 3-6 is de zandextractie uit de Beneden-Zeeschelde te zien. De eerste piek is ten tijde van de eerste verdieping, waarbij er in 7 jaar tijd ruim 30 miljoen m³ zand uit de Beneden-Zeeschelde wordt onttrokken. De tweede piek is ten tijde van de bouw van de Liefkenshoektunnel, waarbij er in 1989 ruim 6 miljoen m³ zand is onttrokken. De tweede verdieping lijkt te ontbreken en ook de derde verdieping is nauwelijks te zien.



Figuur 3-6: Zandextractie uit de Beneden-Zeeschelde. Bron: Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis (2013c).

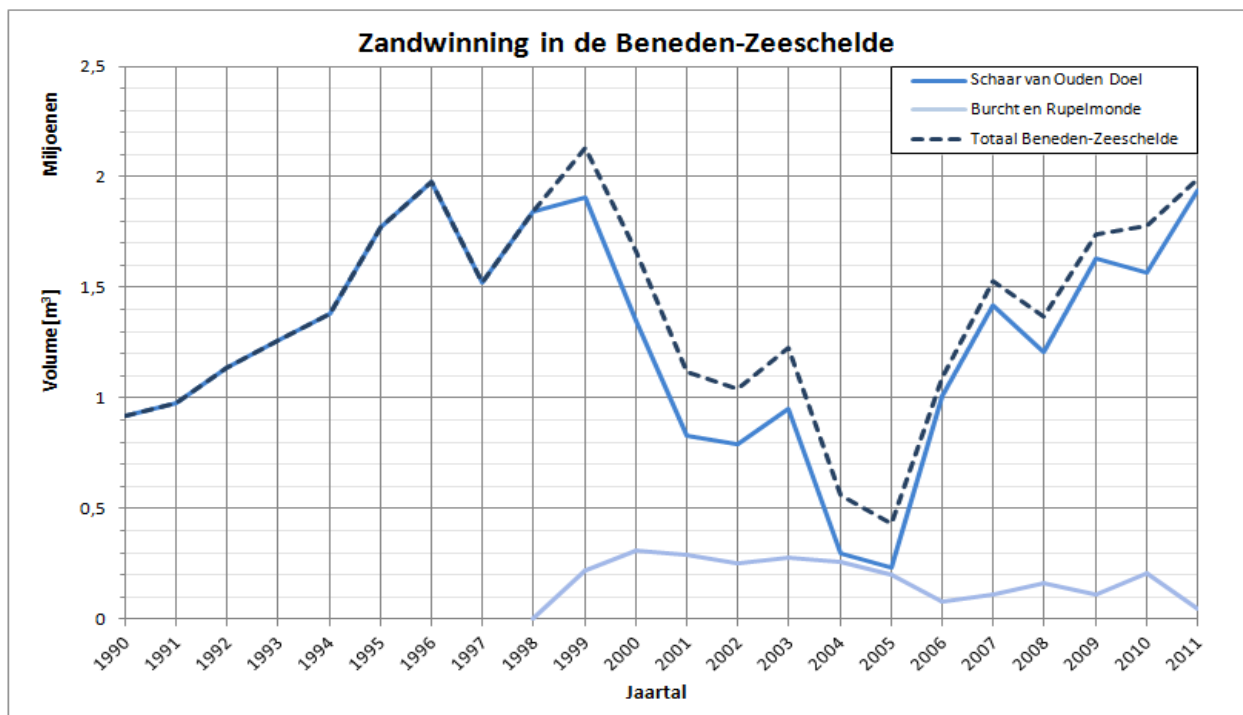
Zandwinning

Zandwinning in het Schelde estuarium gebeurt vanaf 1956 in de Westerschelde en sinds 1990 ook in de Beneden-Zeeschelde, zie Figuur 3-7. In de Westerschelde wordt gemiddeld ca. 2.3 miljoen m³ zand per jaar gewonnen met uitschieters tot wel 5 miljoen m³ per jaar. In de Beneden-Zeeschelde liggen deze waarden ietwat lager rond een gemiddelde van ca. 1.5 miljoen m³ per jaar.



Figuur 3-7: Zandwinning in het Schelde estuarium. Bron: Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis (2013c).

De zandwinning in de Beneden-Zeeschelde vindt bijna uitsluitend plaats uit Schaar van Ouden Doel, zie Figuur 3-8, waar jaarlijks 60 tot 100% van al het gebaggerde zand uit de Beneden-Zeeschelde is gestort.

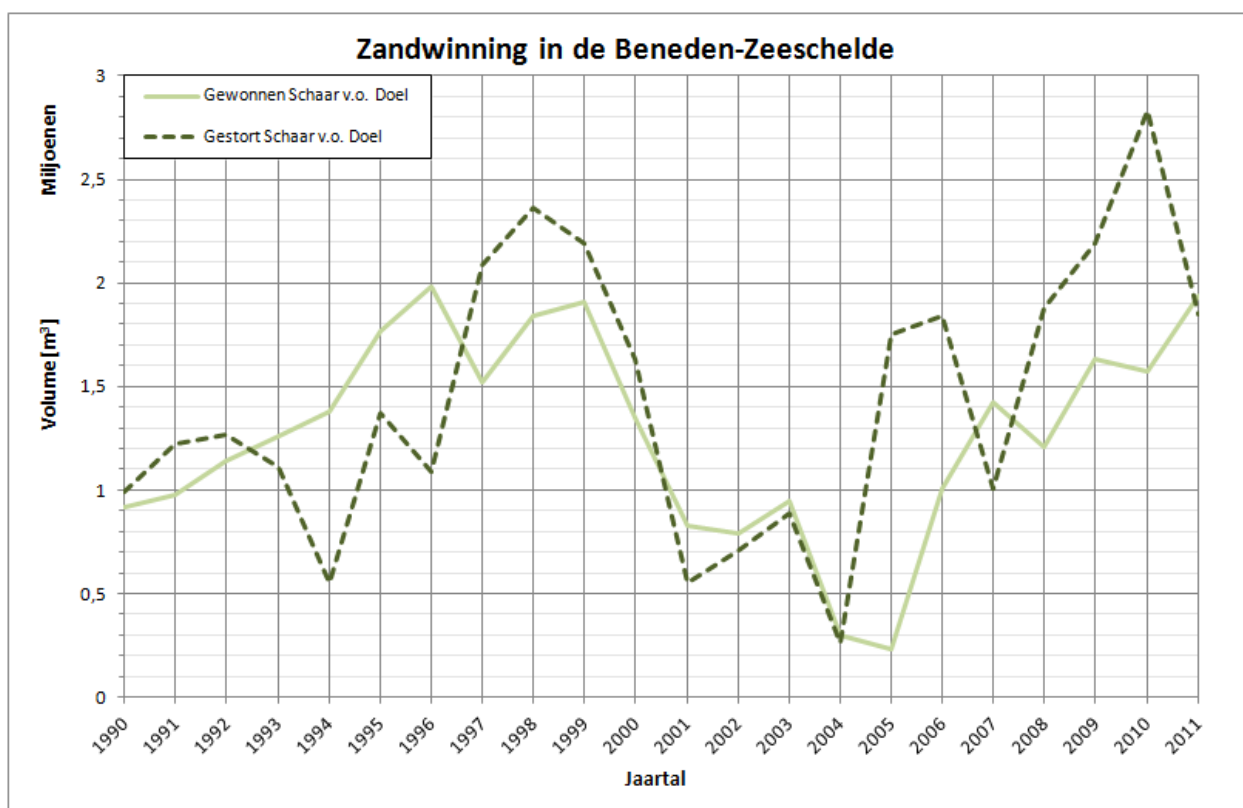


Figuur 3-8: Zandwinning in de Beneden-Zeeschelde. De volumes zijn overgenomen uit Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis (2013d).

Schaar van Ouden Doel

De zandwinning in Schaar van Ouden Doel vindt niet primair plaats vanuit financieel oogpunt maar is met name gericht op het op diepte houden van de bodem (Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, 2013d). In Figuur 3-9 is te zien dat de gewonnen volumes bij Schaar van Ouden Doel in grote lijnen dezelfde trend volgen als de gestorte volumes.

Het is van belang dat er niet te veel zand wordt gewonnen uit Schaar van Ouden Doel omdat de fundering van de leidammen anders bloot komt te liggen. Er wordt periodiek gepeild om dit te controleren. Er wordt op de Beneden-Zeeschelde veel gebaggerd, daarom is er in de praktijk vrijwel nooit een tekort aan zand bij Schaar van Ouden Doel. In 2004 werd er tijdelijk minder gestort, de zandwinning is toen tijdelijk stopgezet (Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, 2013d).



Figuur 3-9: Stort- en zandwinvolumes bij Schaar van Ouden Doel. De volumes zijn overgenomen uit Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis (2013d) en Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis (2013c).

3.3 Verdiepingen

Het Schelde estuarium is voor de scheepvaart vanuit de Noordzee de enige toegang tot de haven van Antwerpen. Door de jaren heen, en in het bijzonder in de laatste vijf decennia, zijn afmetingen van de schepen, en hiermee de benodigde vaargeuldiepte) aanzienlijk toegenomen. Ook heeft het havengebied zich verder uitgebreid. Om de groter wordende scheepvaart toegang tot het havengebied te kunnen blijven bieden zijn er sinds 1970 een drietal verdiepingen uitgevoerd.

De eerste verdieping

Het doel van de verdieping van de maritieme toegangsweg naar de haven van Antwerpen was om de haven toegankelijk te maken voor massagoedschepen en te zorgen dat de scheepvaart zoveel mogelijk onafhankelijk is van het getij. Er is tijdens deze eerste verdieping 1.5 tot 2 meter verdiept, wanneer dit exact is uitgevoerd is niet duidelijk. Volgens Belmans (1988) heeft de eerste verdieping van 1971 tot 1976 plaatsgevonden. In het rapport van de Technische Scheldec commissie (1984) wordt gesproken van de eerste verdieping die plaatsvond van 1970 tot 1975. In het algemeen wordt aangehouden dat de eerste verruiming plaatsvond tussen 1970 en 1975 (Kornman et al., 2002).

De tweede verdieping

Over de tweede verdieping die heeft plaatsgevonden in het estuarium is meer eenduidigheid dan bij de eerste verdieping. De tweede verdieping heeft plaatsgevonden van juli 1997 tot juli 1998, waarbij er wederom verdiept is met 1.5 á 2 meter (Kornman et al., 2002). Tijdens deze verdieping wordt ook de Beneden-Zeeschelde tot de zeesluis te Wintam verdiept en golden er voor de gehele Beneden-Zeeschelde te onderhouden bodemdieptes (Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, 2013b). *Er is echter geen data gevonden waarin is terug te vinden dat er daadwerkelijk gebaggerd is bovenstrooms van Oosterweel.*

De derde verdieping

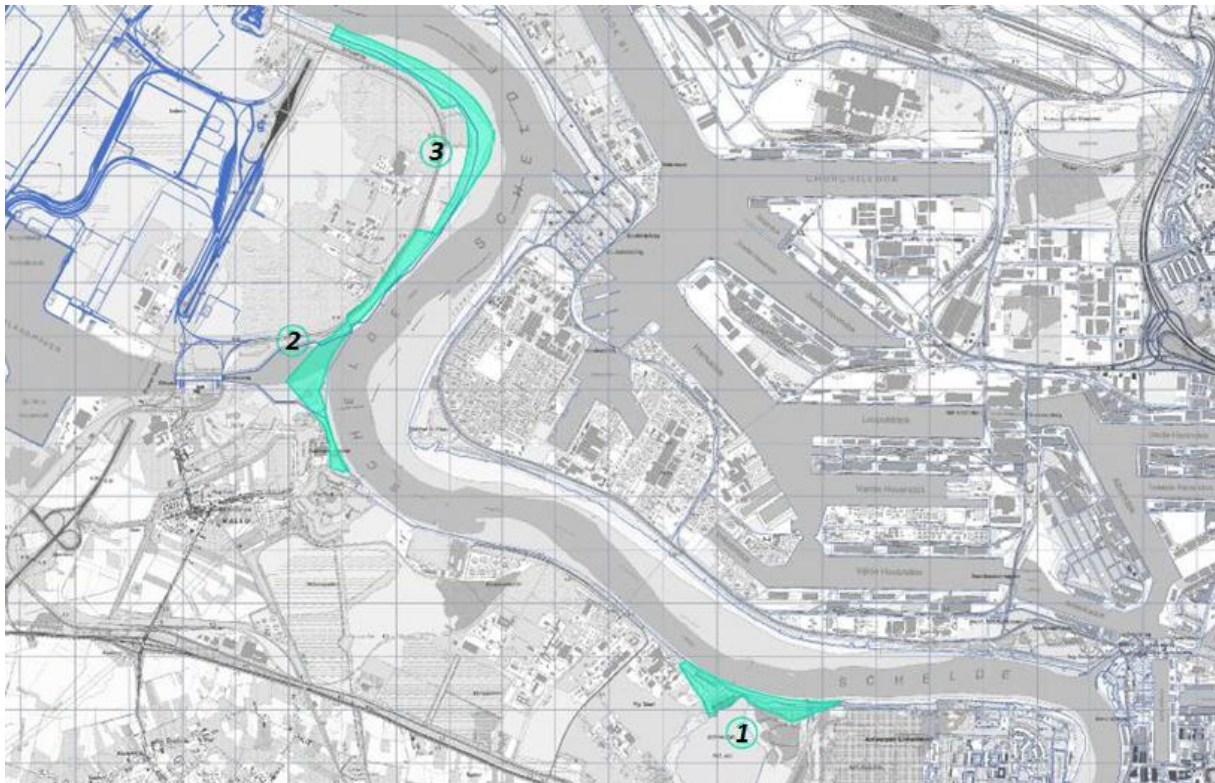
Tussen 2008 en 2010 is een derde verdieping uitgevoerd in de Westerschelde en de Beneden-Zeeschelde. Het doel van deze derde verdieping was om schepen met een diepgang van 13.1 meter de mogelijkheid te bieden om de Europaterminal en het Deurganckdok te bereiken zonder afhankelijk te zijn van het getij. Hierbij is er op verschillende plaatsen verdiept tot -14,7 m. GLLWS. Tevens is de vaargeul tussen de Europaterminal en 500 meter bovenstrooms van het Deurganckdock verbreed tot 370 meter (Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, 2013b).

3.4 Inpolderingen

In de afgelopen 50 jaar zijn er vijf belangrijke werken verricht in de Beneden-Zeeschelde die duidelijk zichtbaar zijn wanneer de huidige situatie wordt vergeleken met een kaart uit 1960 (Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, 2013b). Deze werken zijn:

1. Indijking ter hoogte van Blokkersdijk
2. Inname van het slik-schorgebied ter hoogte van Kallo
3. Opspuiten van de Ketenisseplaat
4. Opspuitingen ten behoeve van de Europaterminal
5. Ophoging van de Slikken en schorren van Zandvliet

In Figuur 3-10 en Figuur 3-11 zijn deze ingrepen in kaart gebracht. In het groen zijn de slikken en schorren weergegeven zoals deze er in 1960 bij lagen, en op de achtergrond is de kaart van 2005 te zien.



Figuur 3-10: Vergelijking achtergrondkaart (2005) met in de het groen aangegeven schorgebieden (1960), ingrepen bij Blokkersdijk, Kallo en de Ketenisseplaat. Bron: Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis (2013b).



Figuur 3-11: Vergelijking achtergrondkaart (2005) met in de het groen aangegeven schorgebieden (1960), ingrepen bij de Europaterminal en Zandvliet. Bron: Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis (2013b).

3.5 Harde begrenzingsen

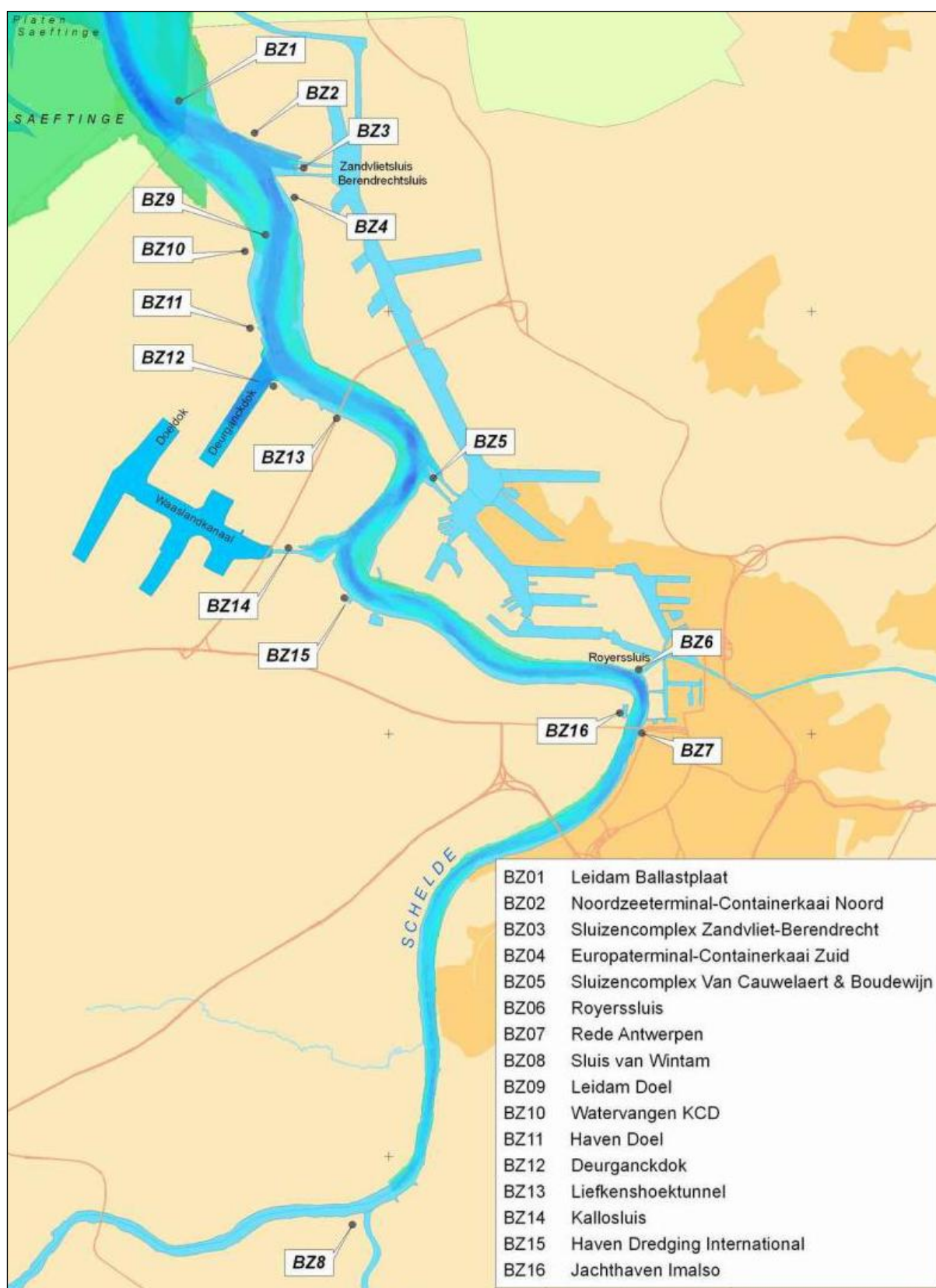
De laatste 50 jaar zijn er in zowel de Wester- als de Beneden-Zeeschelde veel havengerelateerde constructies, sluiscomplexen, toegangseulen, leidammen etc. gebouwd. Met deze menselijke ingrepen zijn de begrenzingsen binnen het estuarium op veel plaatsen vastgelegd voor wat betreft de mogelijkheid op eroderen (Mol, 1995). In Figuur 3-12 is een overzicht gegeven van de aangebrachte harde begrenzingsen in de Beneden-Zeeschelde.

Leidammen

Eind jaren 60 zijn er twee leidammen gebouwd, bij Schaar van Ouden Doel en bij Balastplaat. Het doel van de aanleg van de leidammen was om de ebstroom te concentreren en de vloedstroom als het ware te hinderen. Op deze manier zou het afwaartse sedimenttransport toe moeten nemen en zo een grotere natuurlijke diepte in stand gehouden kunnen worden (Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, 2013b).

Sluiscomplexen

Enkele sluiscomplexen die de afgelopen decennia zijn gebouwd in de Beneden-Zeeschelde zijn de Zandvlietsluis (1961 - 1967), de Kallosluis (1979 - 1990) en de Berendrechtsluis (1983 - 1989). De overige sluiscomplexen dateren van voor 1960. Voor een uitgebreider overzicht wordt verwezen naar Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis (2013b) en Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis (2013c).



Figuur 3-12: Belangrijkste harde begrenzingen in de Beneden-Zeeschelde. Bron: Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis (2013b).

4 BODEMONTWIKKELING

In dit hoofdstuk wordt geanalyseerd hoe de ligging van de bodem van de Beneden-Zeeschelde zich in de loop der jaren heeft ontwikkeld. Er wordt gekeken naar de erosie en sedimentatie die door de jaren heen is opgetreden. Ook wordt er ingegaan op de variatie in de gemiddelde diepte van de bodem. Tot slot wordt gekeken naar de hoeveelheid sediment die netto uit de Beneden-Zeeschelde verdwijnt.

4.1 Beschikbare gegevens

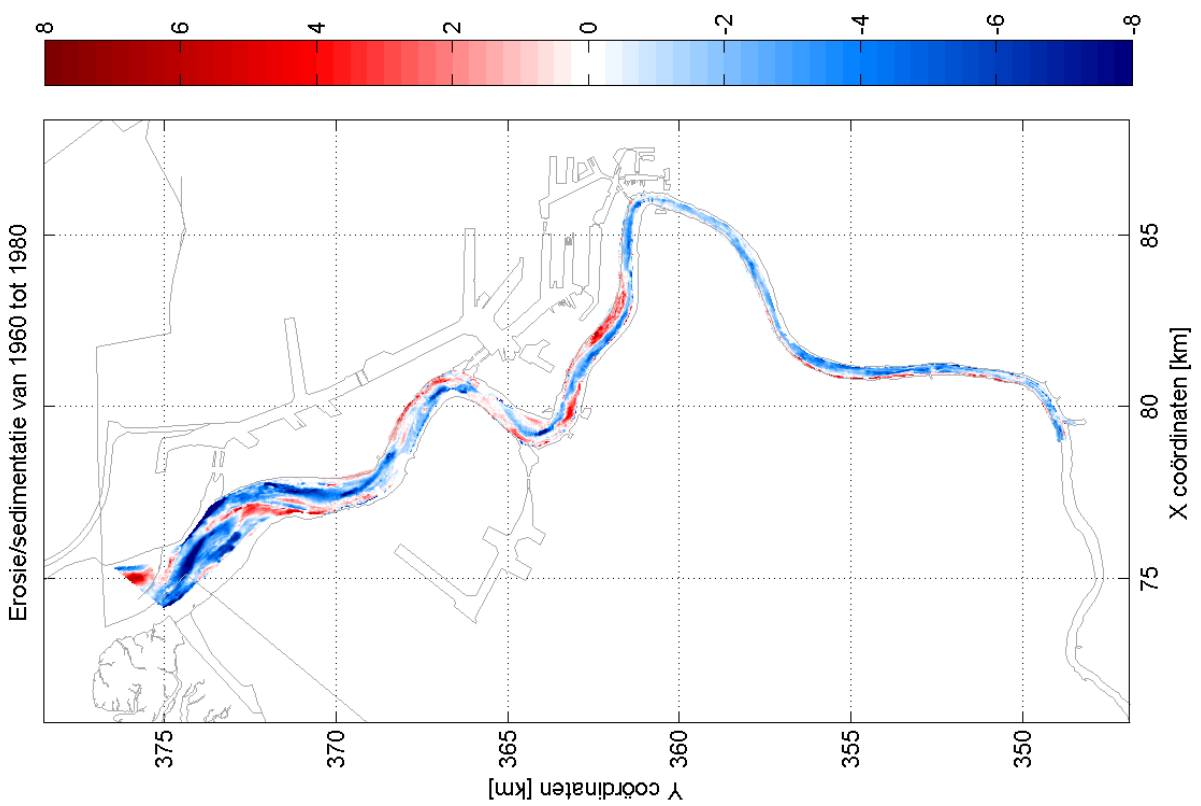
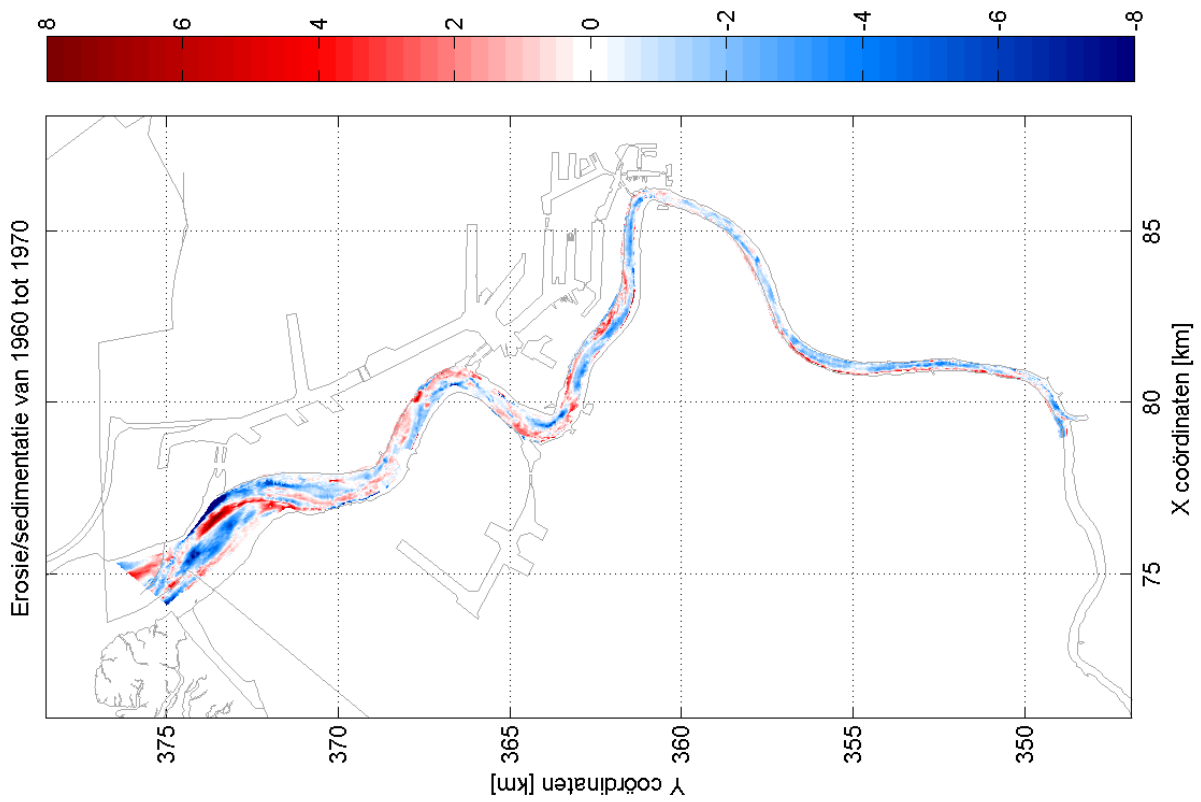
Het analyseren van de ontwikkelingen van de bodemligging wordt gedaan aan de hand van meetgegevens die zijn verzameld en beschikbaar gesteld door het aMT (afdeling Maritieme Toegang). Voor de Beneden-Zeeschelde zijn slechts voor een specifiek aantal jaren bodemgegevens beschikbaar. Vóór het jaar 2000 is er van ongeveer ieder decade een bathymetrie beschikbaar, in de jaren daarna zijn er meerdere bathymetrieën per decennium beschikbaar en vanaf 2007 is er een bathymetrie van elk jaar beschikbaar.

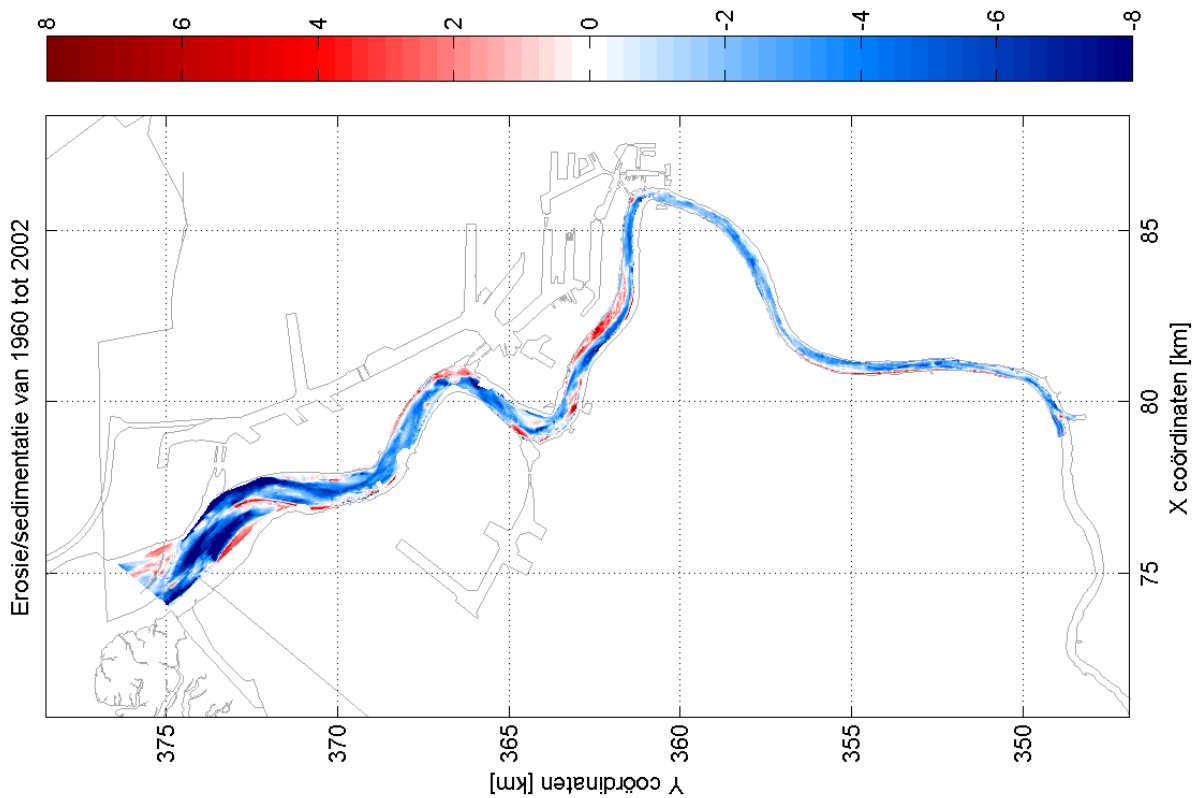
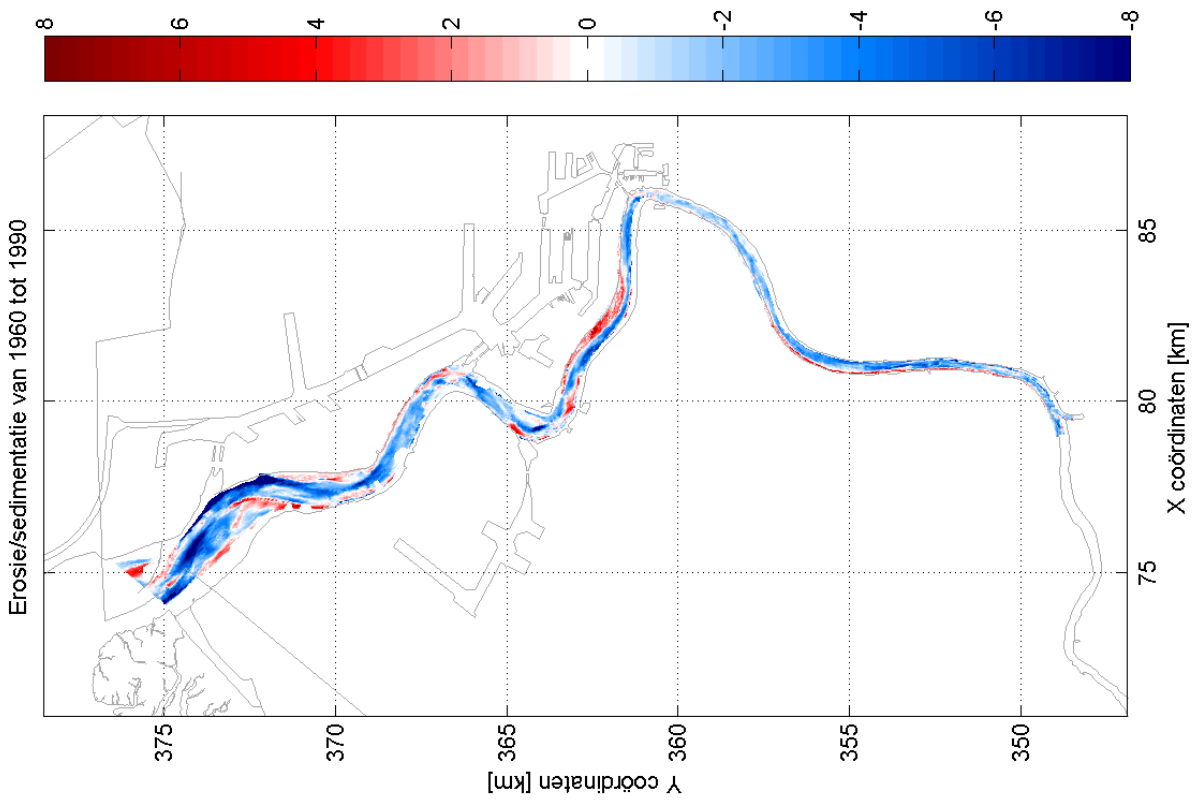
De bodemgegevens die bij dit onderzoek gebruikt worden zijn de bathymetrieën van 1960, 1970, 1980, 1990, 2002 en 2010.

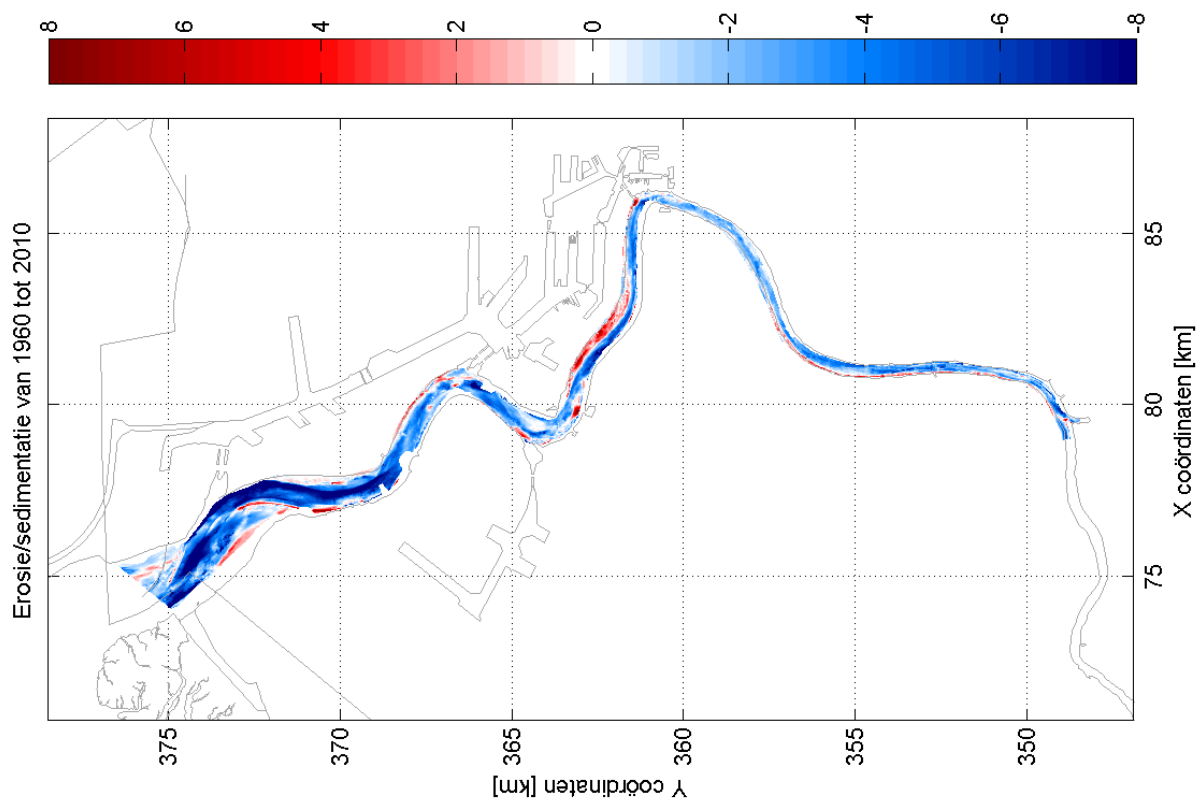
4.2 Erosie- en sedimentatiepatronen

Door elke willekeurige bodem van na 1960 van de bodem van 1960 af te trekken, kan worden gemeten in welke mate er erosie of sedimentatie heeft opgetreden in die periode. In Figuur 4-1-a t/m Figuur 4-1-e zijn de erosie- en sedimentatiepatronen te zien voor elke bodem ten opzichte van de bodem van 1960. Blauw geeft aan dat er erosie van de bodem heeft plaatsgevonden en rood duidt sedimentatie aan.

Wat direct opvalt is dat er bijna alleen maar erosie heeft opgetreden. Benedenstrooms van Antwerpen wordt in al deze jaren veel gebaggerd, wat ook terug is te zien in de erosie- sedimentatiepatronen. Bovenstrooms van Antwerpen is er ook nog relatief veel erosie opgetreden, ondanks dat dit gebied niet onderhevig is geweest aan baggerwerkzaamheden. Met name in het tweede en in het laatste decennium is er hier veel erosie opgetreden.



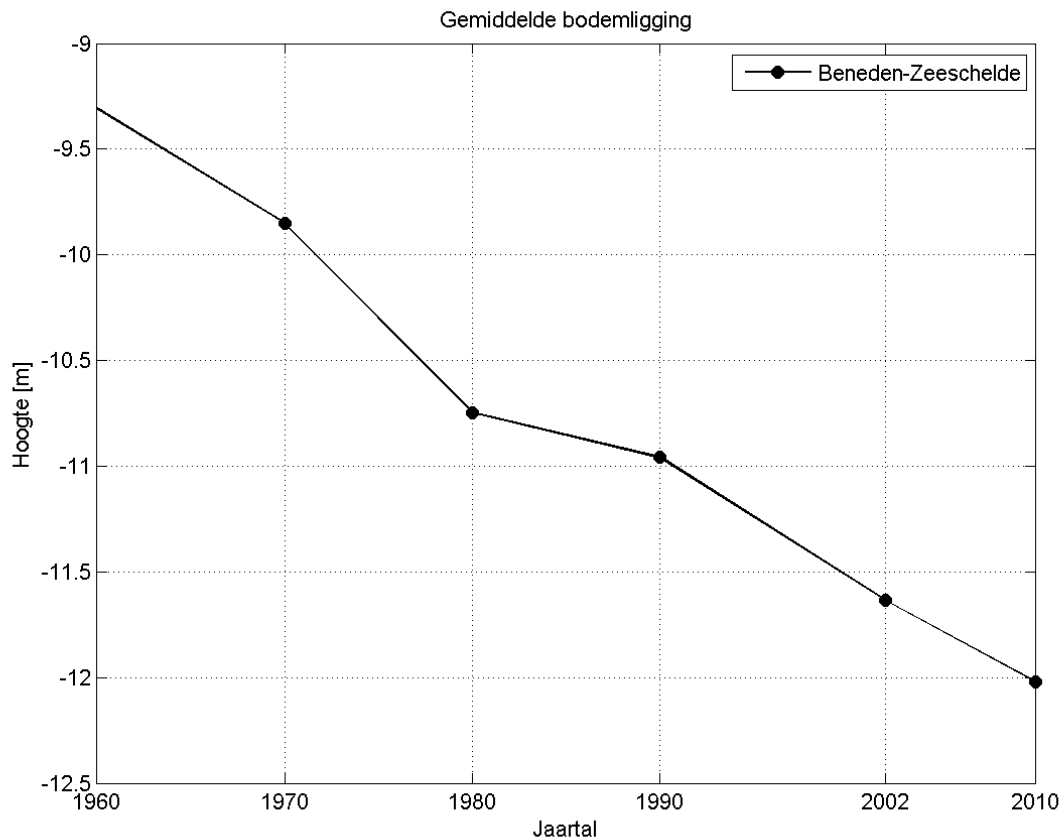




Figuur 4-1: Erosie- en sedimentatiepatronen in 1970 (a), 1980 (b), 1990 (c), 2002 (d) en 2010 (e) ten opzichte van de bodem van 1960. De blauwe kleur geeft aan dat er erosie heeft plaatsgevonden en rood duidt sedimentatie aan.

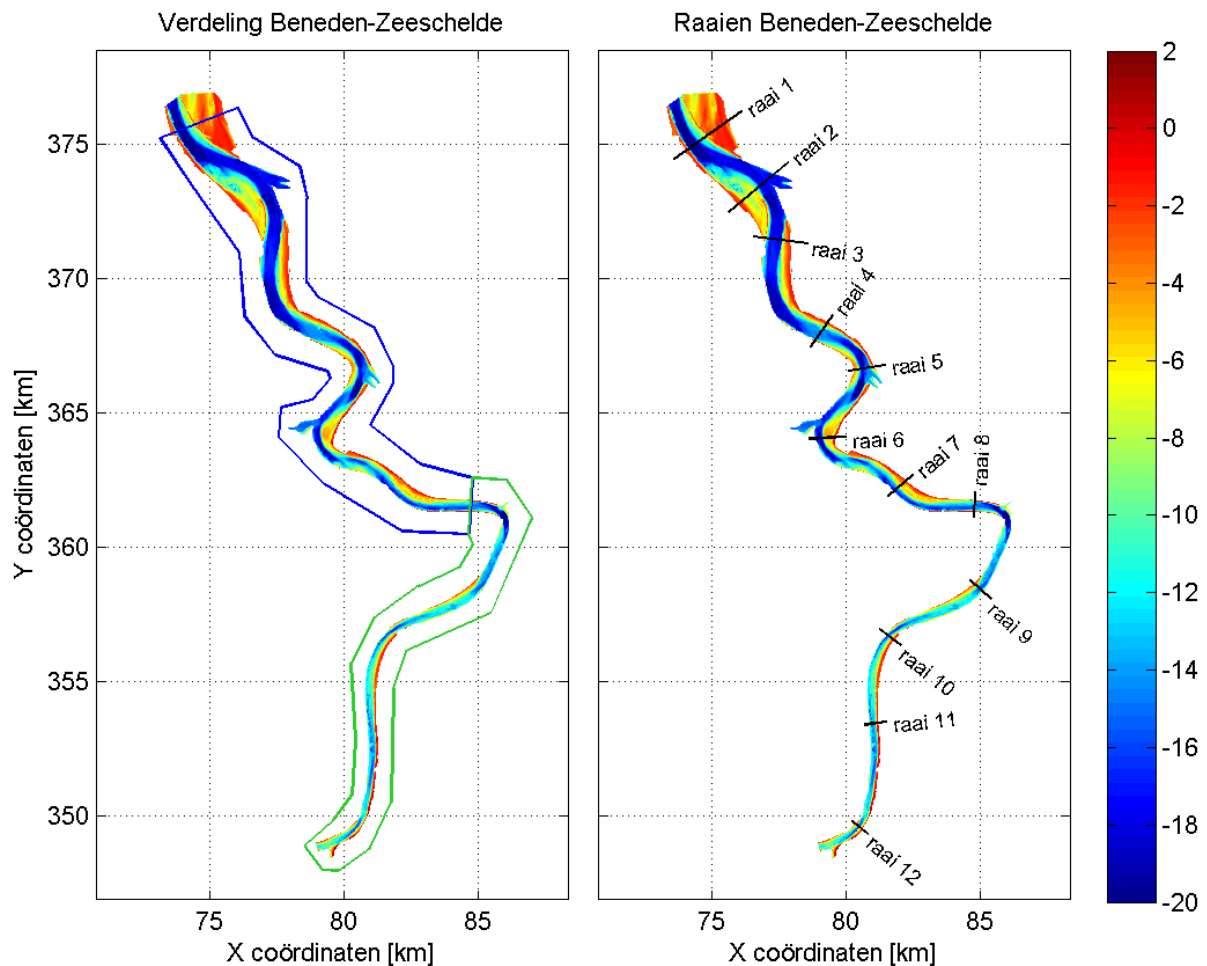
4.3 Bodemligging

Uit de bodemgegevens van de Beneden-Zeeschelde blijkt dat er van 1960 tot 2010 een dominante trend van verdieping is. In Figuur 4-2 is te zien dat de gemiddelde bodemligging in deze tijdreeks continu dalend is. De gemiddelde bodemligging van de Beneden-Zeeschelde is in 1960 ca. -9,3 meter NAP. In 2010, 50 jaar later, ligt de bodem gemiddeld ruim 2.5 meter lager op -11,8 meter NAP. Lokaal zijn er verdiepingen in de Beneden-Zeeschelde opgetreden in orde grootte van 10 meter in 50 jaar tijd.



Figuur 4-2: Variatie in gemiddelde bodemligging van de gehele Beneden-Zeeschelde van 1960 tot 2010.

De diepte van de Beneden-Zeeschelde varieert sterk in zowel de tijd als de ruimte. Benedenstrooms van Antwerpen wordt op veel plaatsen al decennia lang gebaggerd, terwijl er bovenstrooms van Antwerpen geen baggerwerkzaamheden zijn verricht. Om deze reden wordt de Beneden-Zeeschelde bij de analyse van de bodemligging in twee gebieden opgesplitst. Tevens zijn er 12 raaien gedefinieerd over het gehele verloop van de rivier, waarvan dwarsdoorsneden zijn gemaakt. In Figuur 4-3 is te zien hoe de Beneden-Zeeschelde is verdeeld in twee gebieden en welke raaien er zijn gedefinieerd.

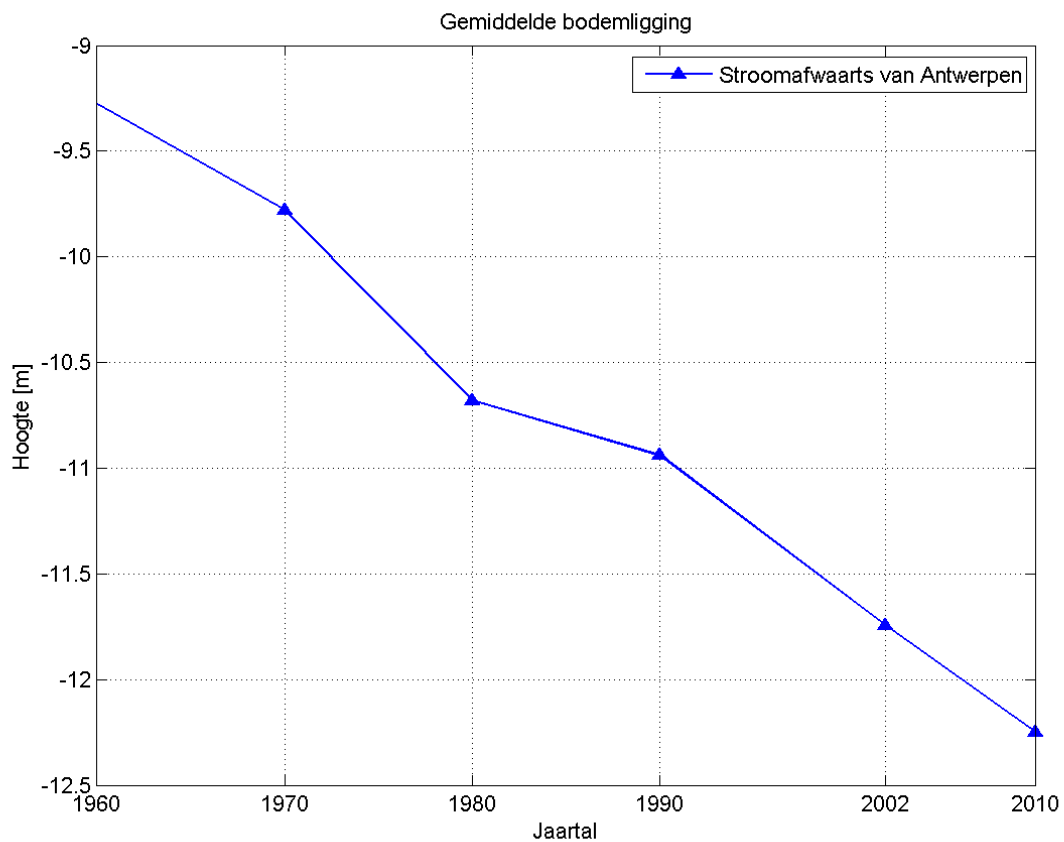


Figuur 4-3: Verdeling van de Beneden-Zeeschelde (links) en gedefinieerde raaien (rechts). Met blauw omlijnd is het gebied benedenstrooms van Antwerpen en de groene omlijning geeft het gebied bovenstrooms van Antwerpen aan.

Benedenstrooms van Antwerpen

In dit gedeelte van de Beneden-Zeeschelde zijn er in de afgelopen decennia veel onderhoudsmatige baggerwerkzaamheden uitgevoerd. Ook is er een drietal verdiepingen uitgevoerd. De eerste verdieping heeft begin jaren 70 plaatsgevonden, de tweede eind jaren 90 en de derde tussen 2008 en 2010, zie Baggeren en Storten.

Benedenstrooms van Antwerpen is de variatie in gemiddelde bodemligging vergelijkbaar met de gemiddelde bodemligging van de gehele Beneden-Zeeschelde. In Figuur 4-4 is te zien dat er een dominante trend van verdieping is tot 2010 en dat er tweede decennium de grootste verdieping optreedt. In 50 jaar tijd treedt er een verdieping op van ca. 2.9 meter. Tussen 1970 en 1980 daalt de gemiddelde bodemligging een meter.

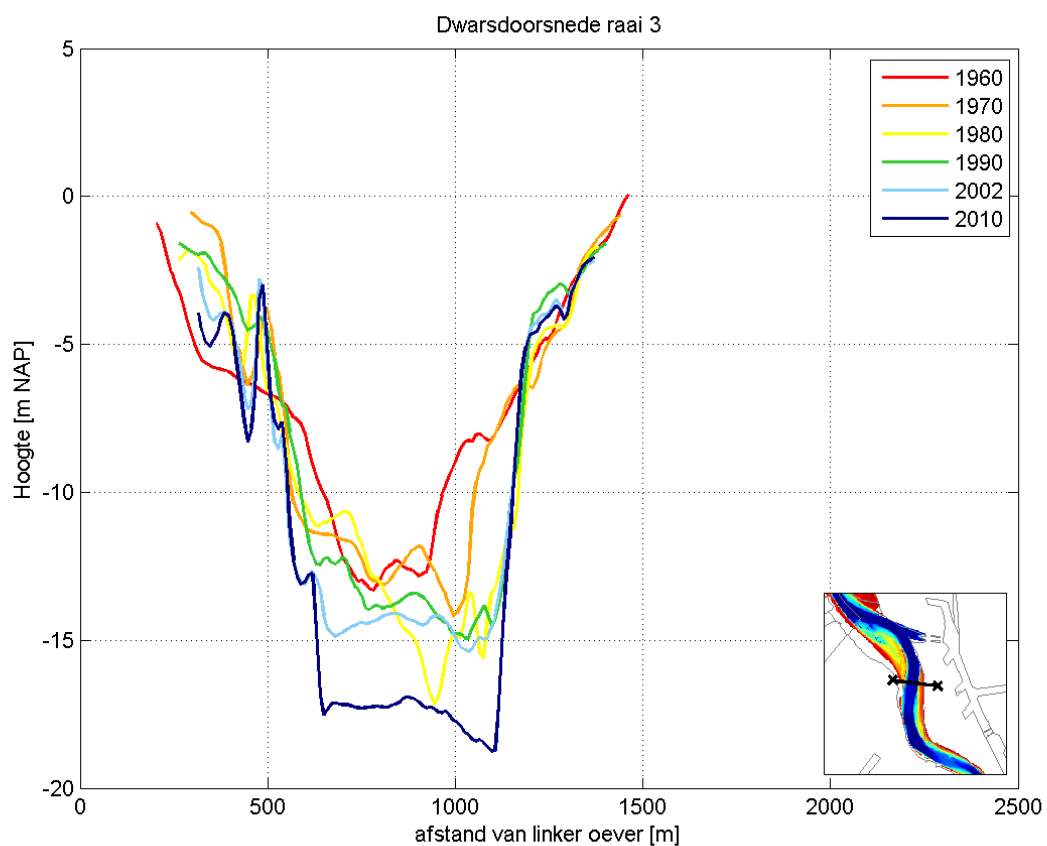


Figuur 4-4: Variatie in gemiddelde bodemligging van de Beneden-Zeeschelde benedenstrooms van Antwerpen.

De raaien 1 t/m 7 vallen binnen het gedeelte van de Beneden-Zeeschelde dat benedenstrooms van Antwerpen ligt. In de doorsneden die van deze raaien zijn gemaakt, zijn de bodems van 1960, 1970, 1980, 1990, 2002 en 2010 opgenomen. Benedenstrooms van Antwerpen zijn er lokaal verdiepingen opgetreden tot 10 meter. De doorsneden van raai 3 laten de grootste morfologische ontwikkelingen zien die zich in de beschouwde tijdreeks hebben voorgedaan.

Raai 3

In de dwarsdoorsnede van raai 3 is te zien dat de vaargeul in 2010 om sommige plaatsen 10 meter lager ligt dan in 1960 het geval was. Wat ook opvalt, is dat de vaargeul door de jaren heen niet alleen dieper, maar ook breder is geworden. De grootste verandering voor wat betreft de diepte van de vaargeul is tussen 2002 en 2010. De vaargeul is in 2010 gemiddeld ruim 3 meter dieper gelegen dan in 2002, wat het gevolg is van baggerwerkzaamheden die zijn uitgevoerd in het kader van de derde verruiming.

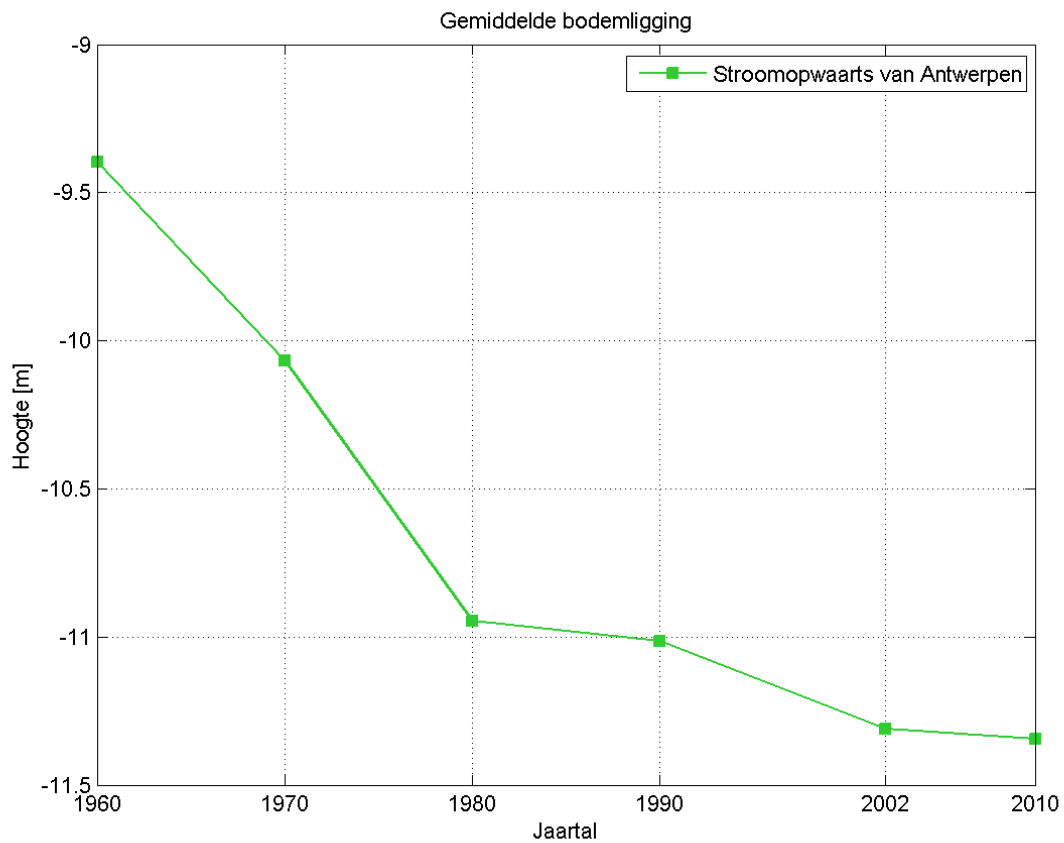


Figuur 4-5: Dwarsdoorsneden van raai 3 in een tijdreeks van 1960 tot 2010.

Bovenstrooms van Antwerpen

In dit gedeelte van de Beneden-Zeeschelde wordt niet gebaggerd. Wanneer we kijken naar de gemiddelde bodemligging is te zien dat er in mindere mate verdieping optreedt dan benedenstrooms van Antwerpen.

De dominante trend van verdieping die te zien was bij de Beneden-Zeeschelde benedenstrooms van Antwerpen, is bovenstrooms van Antwerpen ook te zien, met name in de eerste twee decennia.

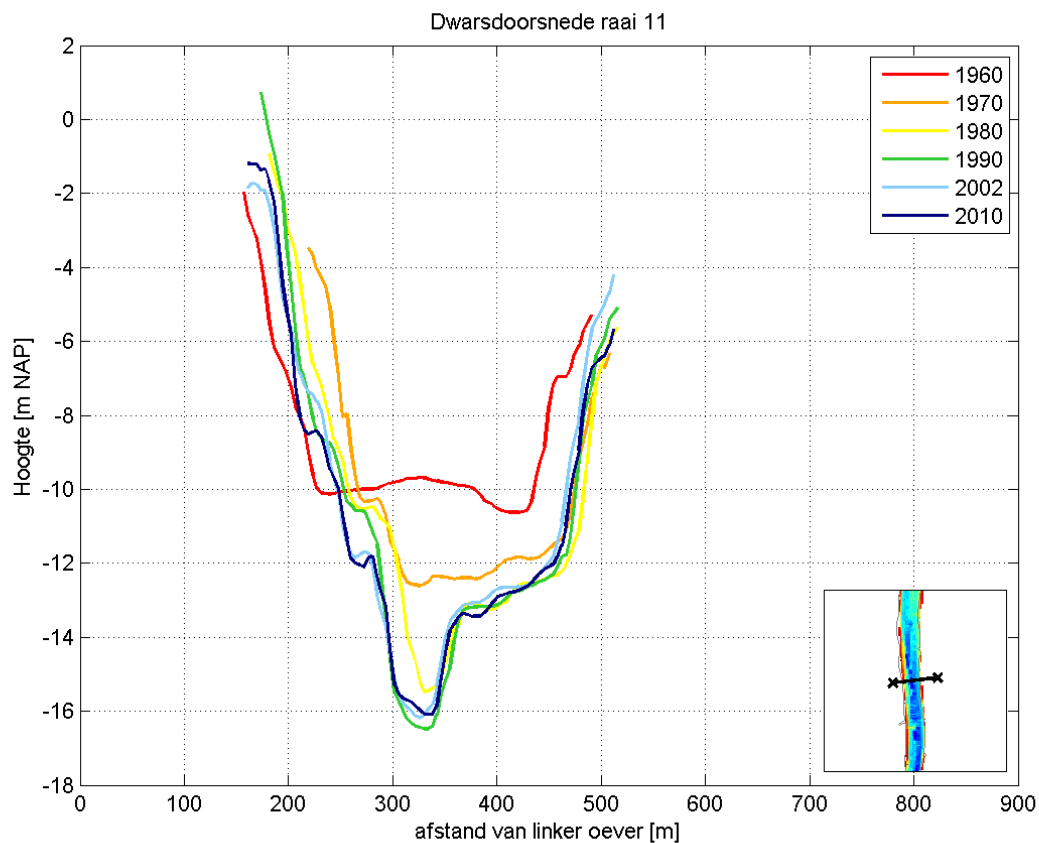


Figuur 4-6: Variatie in gemiddelde bodemligging van de Beneden-Zeeschelde bovenstrooms van Antwerpen.

De raaien 8 t/m 12 vallen binnen het gebied waarin niet gebaggerd is. Ondanks de in mindere mate opgetreden verdieping van de gemiddelde bodem, is er in dit gebied lokaal tot wel 7 meter verdieping opgetreden in 50 jaar tijd. De raaien waar de grootste morfologische ontwikkelingen zichtbaar zijn, zijn raai 8 en raai 12. Enkel de doorsneden van raai 8 en raai 11 komen in dit hoofdstuk aan bod, voor de doorsneden van alle raaien van de Beneden-Zeeschelde wordt verwezen naar Bijlage D.

Raai 11

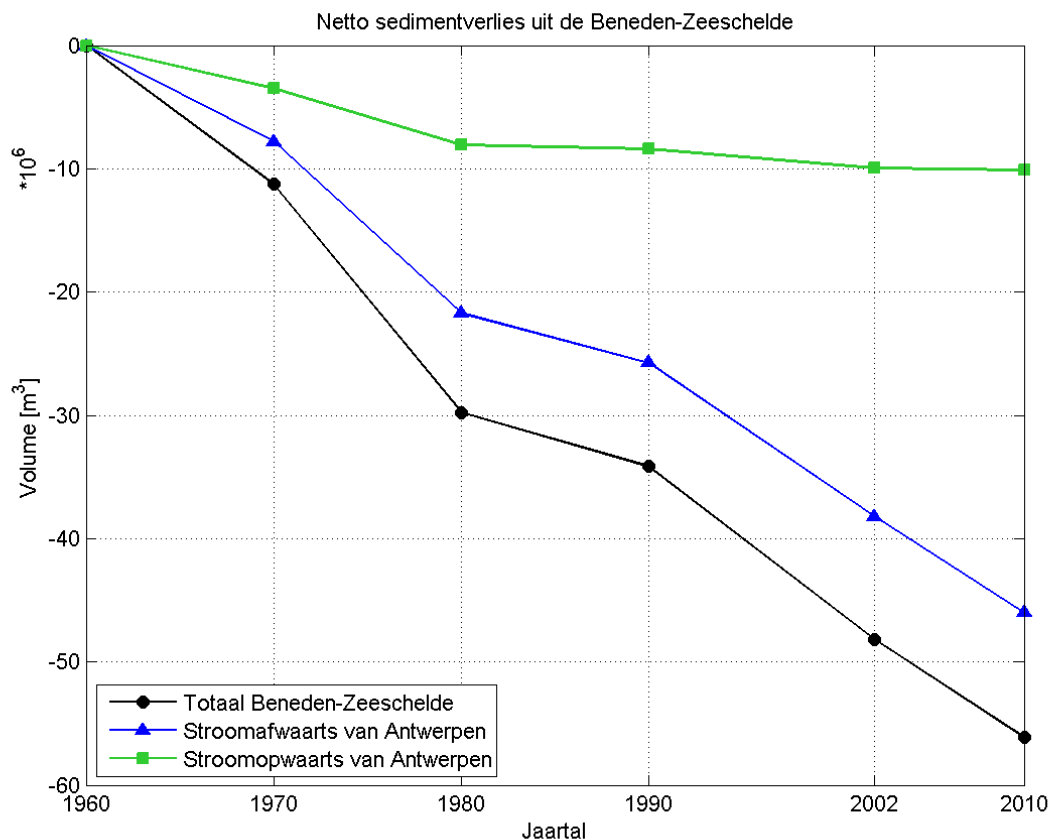
De doorsnede van raai 11 laat zo ongeveer de grootste verdieping zien die in de Beneden-Zeeschelde bovenstrooms van Antwerpen heeft plaatsgevonden. Er is hier geen sprake meer van havenactiviteiten en er wordt in dit gedeelte dan ook geen onderhoudsbaggerwerk verricht. Wat opvallend is, is dat er toch een aanzienlijke verdieping is opgetreden ter hoogte van deze raai. In het midden van de rivier is een maximale verdieping van ca. 7 meter te zien, zie Figuur 4-7. De grootste verdieping lijkt wederom tussen 1960 en 1980 te zijn opgetreden, net als bij de doorsnede van raai 8 en zoals blijkt uit Figuur 4-6.



Figuur 4-7: Dwarsdoorsneden van raai 11 in een tijdreeks van 1960 tot 2010.

4.4 Volumeontwikkeling

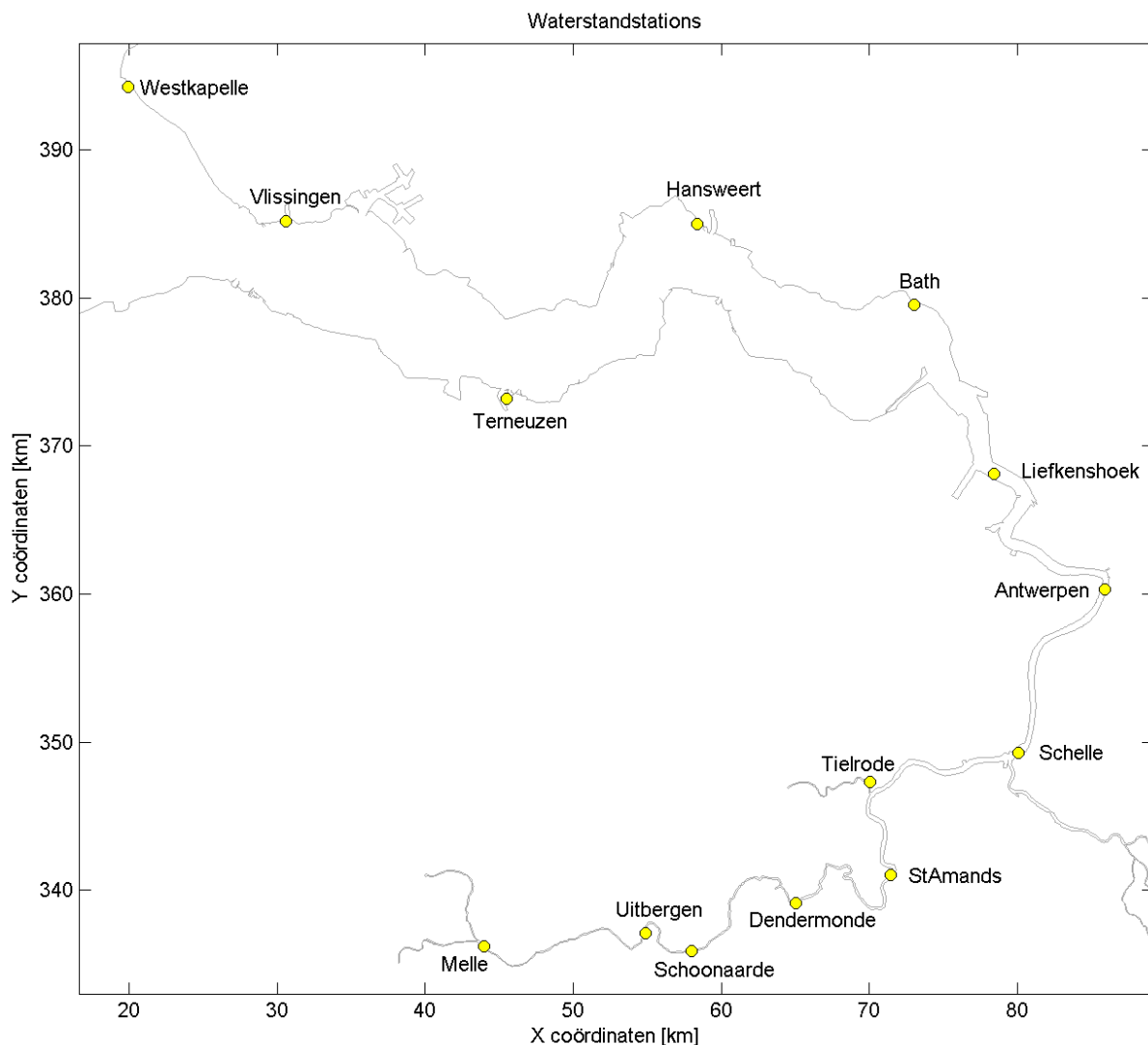
Door het analyseren van de gemiddelde bodemligging van de Beneden-Zeeschelde door de jaren heen is gebleken dat er een dominante trend van verdieping is geweest van 1960 tot 2010. In Figuur 4-8 wordt weergegeven hoe de volumeontwikkeling van de Beneden-Zeeschelde is geweest, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen boven- en benedenstrooms van Antwerpen. In de figuur is te zien dat er in de gehele Beneden-Zeeschelde ca. 55 miljoen m³ sediment verdwijnt in 50 jaar tijd, waarvan ca. 20% uit het gedeelte waarin niet is gebaggerd.



Figuur 4-8: Volumeontwikkeling in de Beneden-Zeeschelde

5 HYDRODYNAMISCHE ONTWIKKELINGEN.

Om een goed beeld te kunnen vormen van het Schelde estuarium als geheel is het van belang om inzicht te hebben in het getij. In het Schelde estuarium is er sprake van een wisselwerking tussen het getij en de morfologie. Het getij verbindt de verschillende onderdelen van het estuarium, doordat de getijdengolf tweemaal per dag het estuarium van begin tot eind doorloopt. De toegankelijkheid van het estuarium hangt samen met de laagwaterstand en is dus afhankelijk van het getij. Het getij is een drijvende kracht voor veranderingen in bodemligging en daarmee voor veranderingen in leefgebieden voor planten en dieren. Andersom hebben de veranderingen in waterdiepte, bodemhoogte en bodemsamenstelling weer invloed op het getij (Wang et al., 2002). In Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis (2013a) wordt de ontwikkeling van de waterstanden in het estuarium onderzocht van 1900 tot 2010. De waterstandstations die hierbij aan bod komen zijn weergegeven in Figuur 5-1 en zullen ook bij deze analyse gebruikt worden.



Figuur 5-1: Waterstandstations in het Schelde estuarium die in deze analyse worden beschouwd.

5.1 Historische ontwikkelingen.

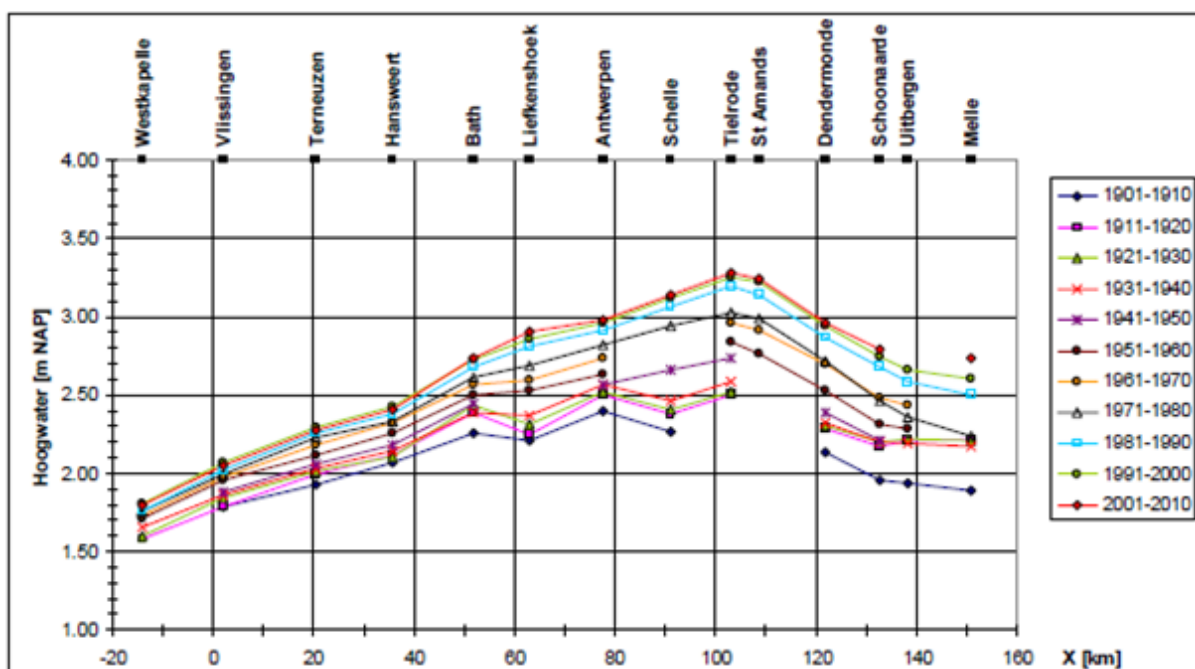
Het getij in het Schelde estuarium is een dynamisch fenomeen. Door de jaren heen zijn zowel het horizontale en verticale getij als de getijvoortplanting binnen het estuarium erg veranderd. Vanaf ongeveer halverwege de 19^e eeuw zijn meetgegevens beschikbaar en aan de hand van historische data is het getij vanaf de 16^e eeuw gereconstrueerd (Mol, 1995). Omstreeks 1550 bedroeg de gemiddelde getijslag ca. 3.10 meter ter hoogte van Vlissingen. Dit was de plaats binnen het estuarium waar toentertijd de grootste getijslag optrad, hoe verder bovenstrooms van Vlissingen, des te meer nam de getijslag af. Halverwege de 19^e eeuw bedroeg de gemiddelde getijslag ca. 3.60 meter en trad op ter hoogte van Bath, nabij de Nederlandse-Belgische grens (LTV, 2007).

5.2 Ontwikkelingen sinds 1900

Het getij in het Schelde estuarium wordt op veel verschillende locaties gemeten. De getijslag (het verschil tussen hoog en laag water) ter hoogte van Vlissingen was in 2011 gemiddeld ca. 3,8 meter. 95 km verderop, ter hoogte van Tielrode, bedroeg de gemiddelde getijslag in dit zelfde jaar ca. 5,5 meter. Bij Gent is deze getijslag nog steeds merkbaar en bedraagt daar ca. 2,3 meter (Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, 2013a).

Hoogwaterstanden

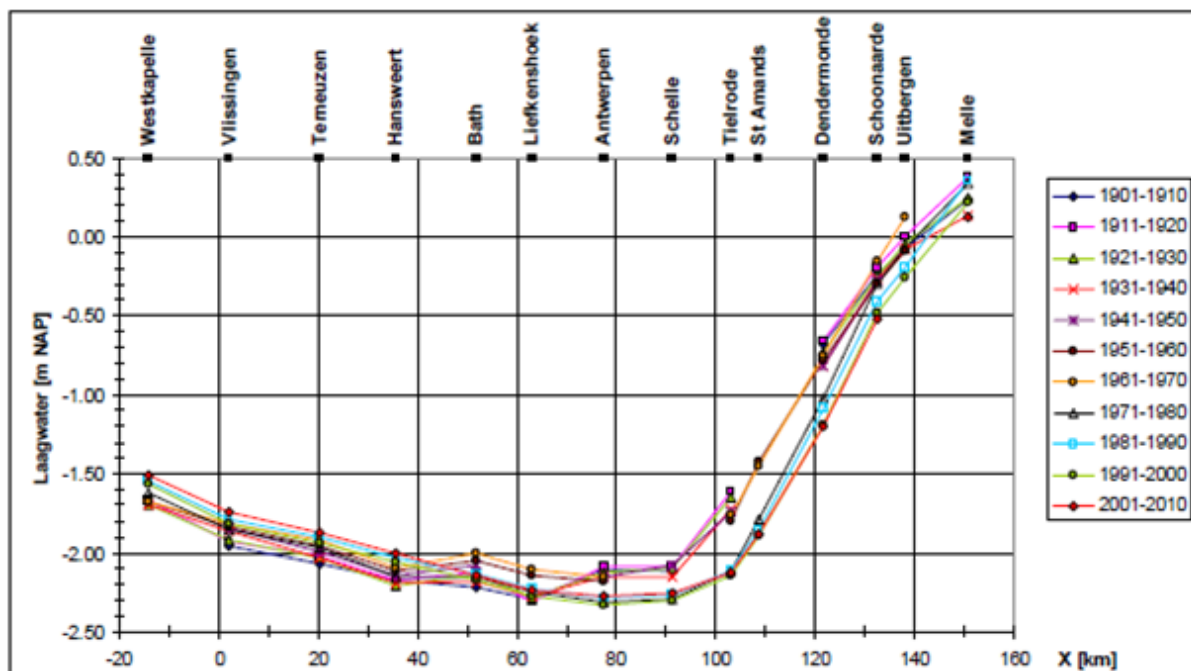
Uit de gegevens blijkt dat de gemiddelde hoogwaterstand in de tijd in het gehele estuarium is gestegen. Hoe groot deze stijging is, is sterk plaatsafhankelijk. In Figuur 5-2 is te zien dat ter hoogte van Vlissingen de 10-jarig gemiddelde hoogwaterstand van 1901 tot 2010 ca. met 0.3 meter is gestegen, terwijl dit ter hoogte van Tielrode bijna een meter is. Bovenstrooms van Antwerpen ontbreekt voor een aantal stations data van voor 1970. Hierdoor is niet duidelijk hoe de waterstanden zich ter hoogte van deze stations precies ontwikkelen in de tijd. Aangenomen kan worden dat de hoogste hoogwaterstand in het estuarium in deze tijdreeks gemeten wordt ter hoogte van Tielrode (Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, 2013a).



Figuur 5-2: 10-jarig gemiddeld hoogwater voor opeenvolgende decennia tussen 1901 en 2010. Bron: Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis (2013a).

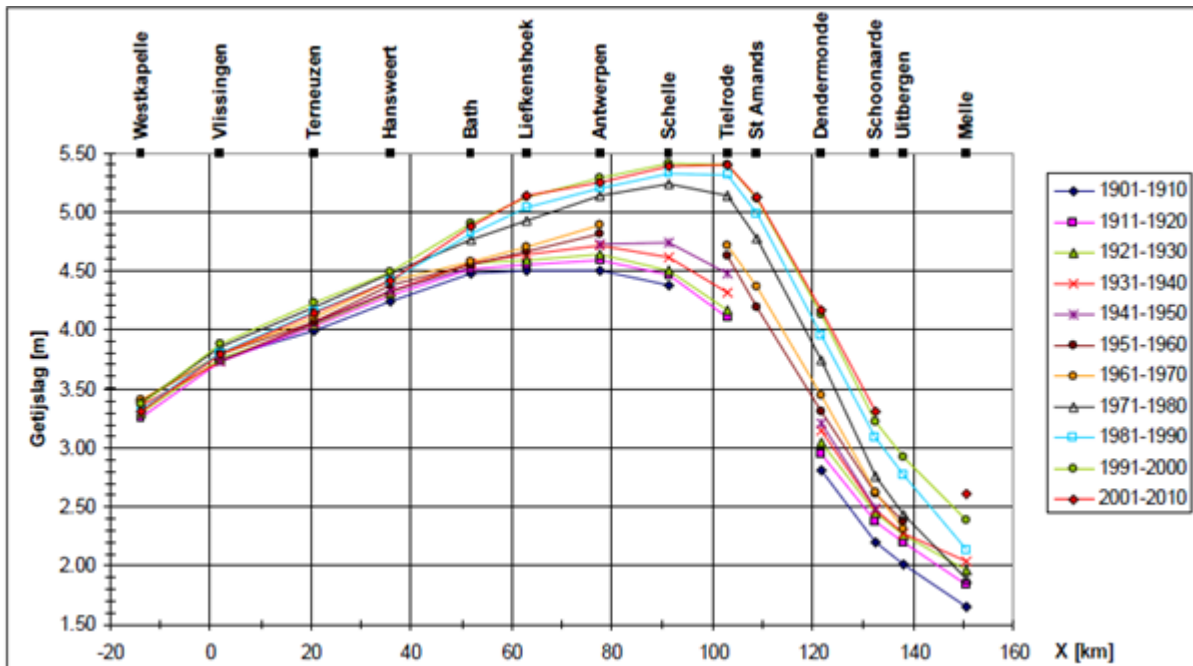
Laagwaterstanden

Voor de laagwaterstanden geldt dat er in de tijd niet overal een stijging optreedt. In het westelijk deel van het estuarium (t/m Bath) is het zo dat de laagwaterstand in de tijd stijgt. Vanaf Liefkenshoek is het echter zo dat er een keerpunt in deze trend ontstaat. Vanaf Tielrode is het over het algemeen zo dat de laagwaterstand in de tijd daalt, met uitzondering van een aantal jaartallen en stations, zie Figuur 5-3. De laagste laagwaterstand is in de tijdreeks vrijwel altijd Antwerpen - Schelle, met uitzondering van het tienjarig gemiddelde van 1911-1920 en 1961-1970 (Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, 2013a).



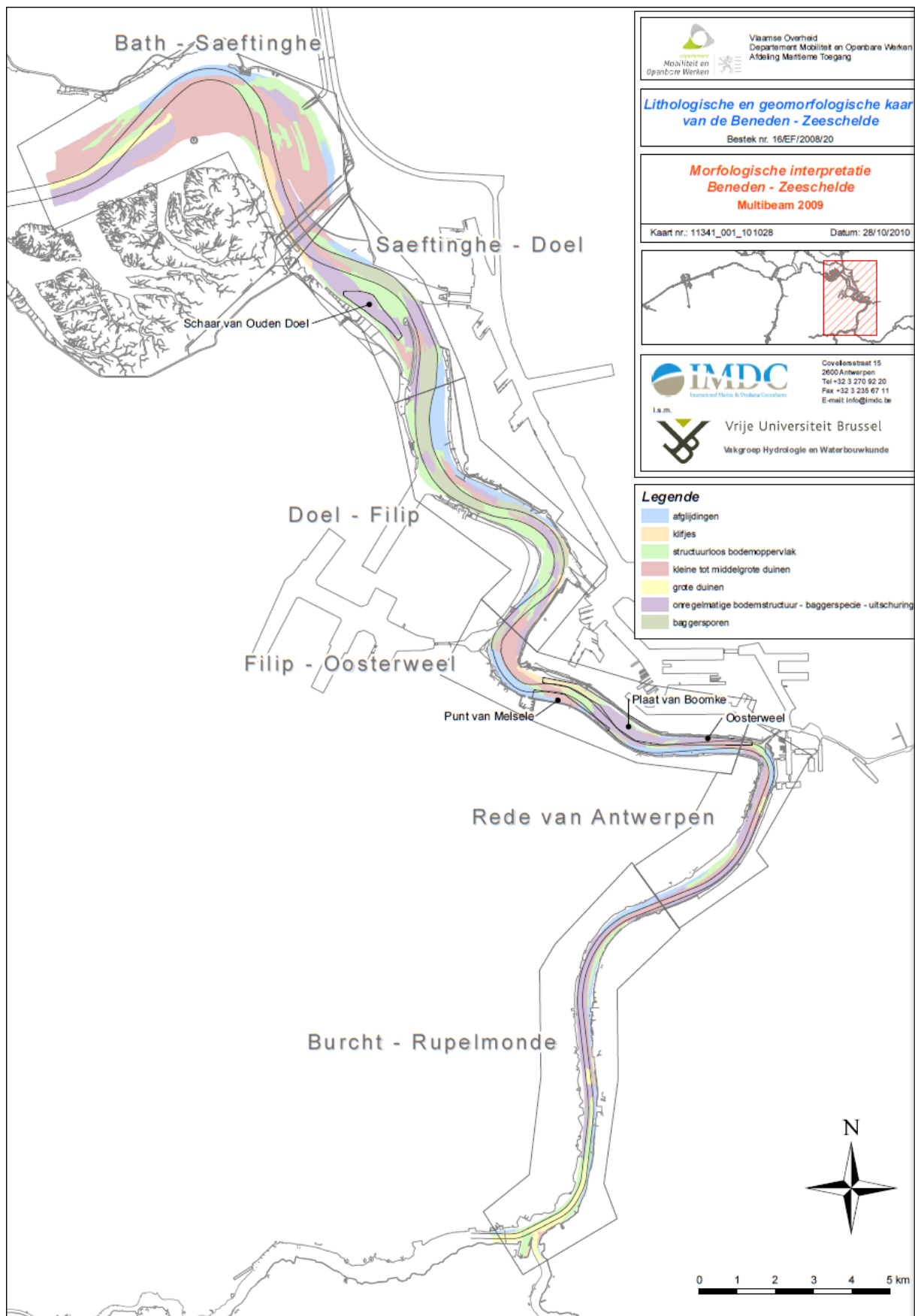
Figuur 5-3: 10-jarig gemiddeld laagwater voor opeenvolgende decennia tussen 1901 en 2010. Bron: Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis (2013a).

Deze ontwikkelingen in hoog- en laagwaterstanden resulteren in een getijslag die in het oostelijk deel van het estuarium (vanaf Bath - Liefkenshoek) stijgende is in de tijd. In het westelijke deel is hiervoor in de tijd geen duidelijke trend waar te nemen. Het verloop van de 10-jarig gemiddelde getijslag langs het estuarium is getoond in Figuur 5-4. Hierin is goed te zien dat er in deze tijdreeks een verschuiving plaatsvindt van de maximaal optredende getijslag. In het begin van de 20^e eeuw treedt de maximale getijslag op bij Liefkenshoek, terwijl deze aan het eind van deze eeuw optreedt bij Tielrode, 40 km bovenstrooms van Liefkenshoek (Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, 2013a).

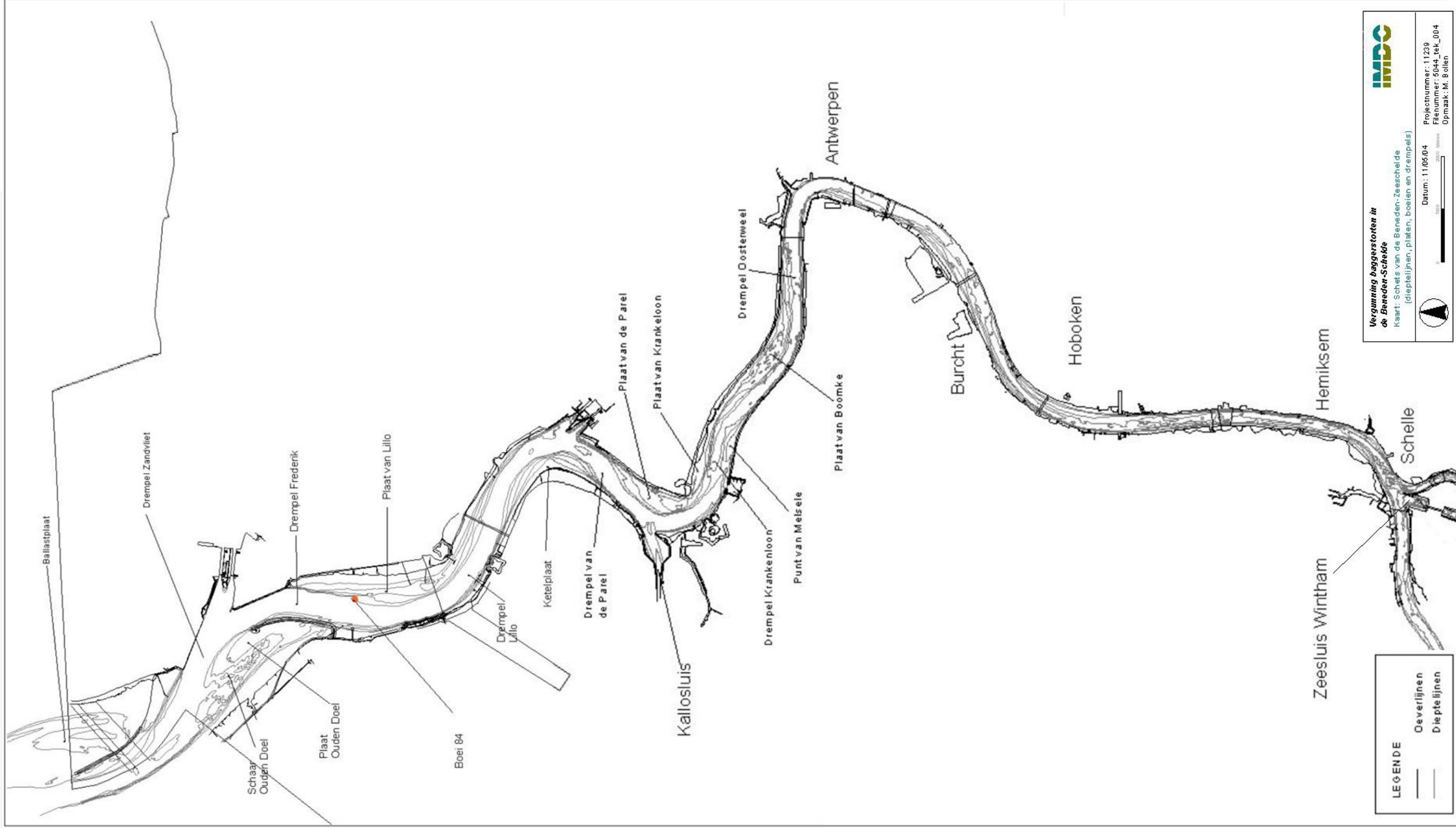


Figuur 5-4: 10-jarig gemiddelde getijslag voor opeenvolgende decennia tussen 1901 en 2010. Bron: Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis (2013a).

B GEOMORFOLOGISCHE KAART



C KAART BENEDEN-ZEESHELDE



IMDO

Vergoeding Aangevorderen in de Beneden-Schelde

Kaart: Schets van de Beneden-Zeeschelde (dieptelijnen, platen, boeien en drempels)

Datum: 11/06/04

Projectnummer: 11239
 Filenummer: 5044_tek_004
 Opmaak: M. Bollen

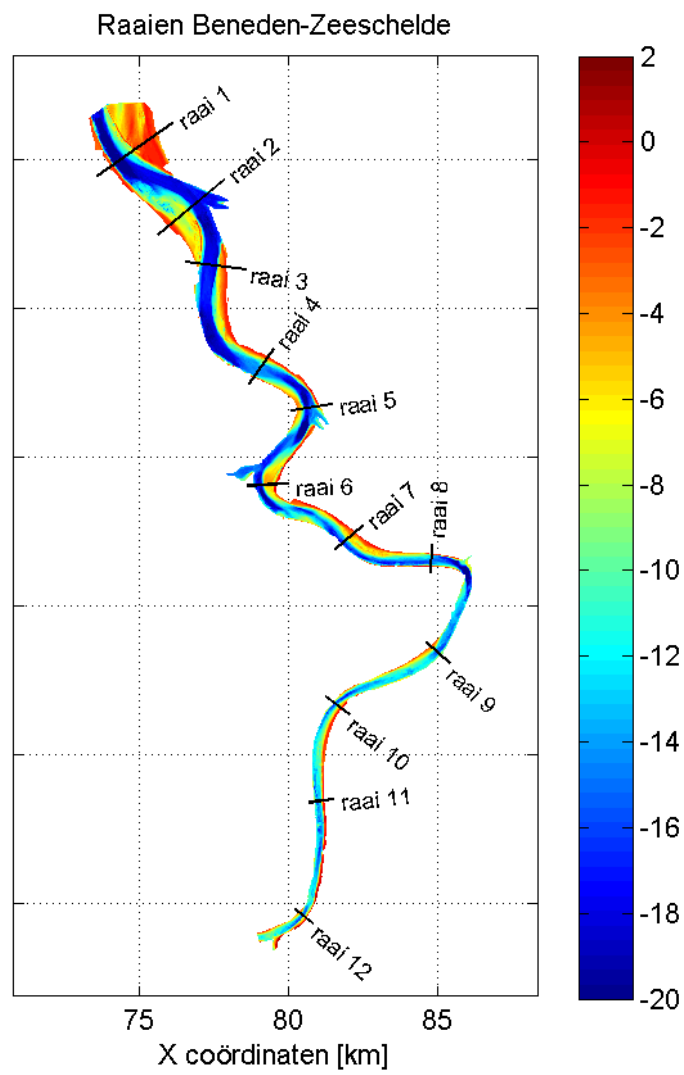
0 1000 2000 Meter

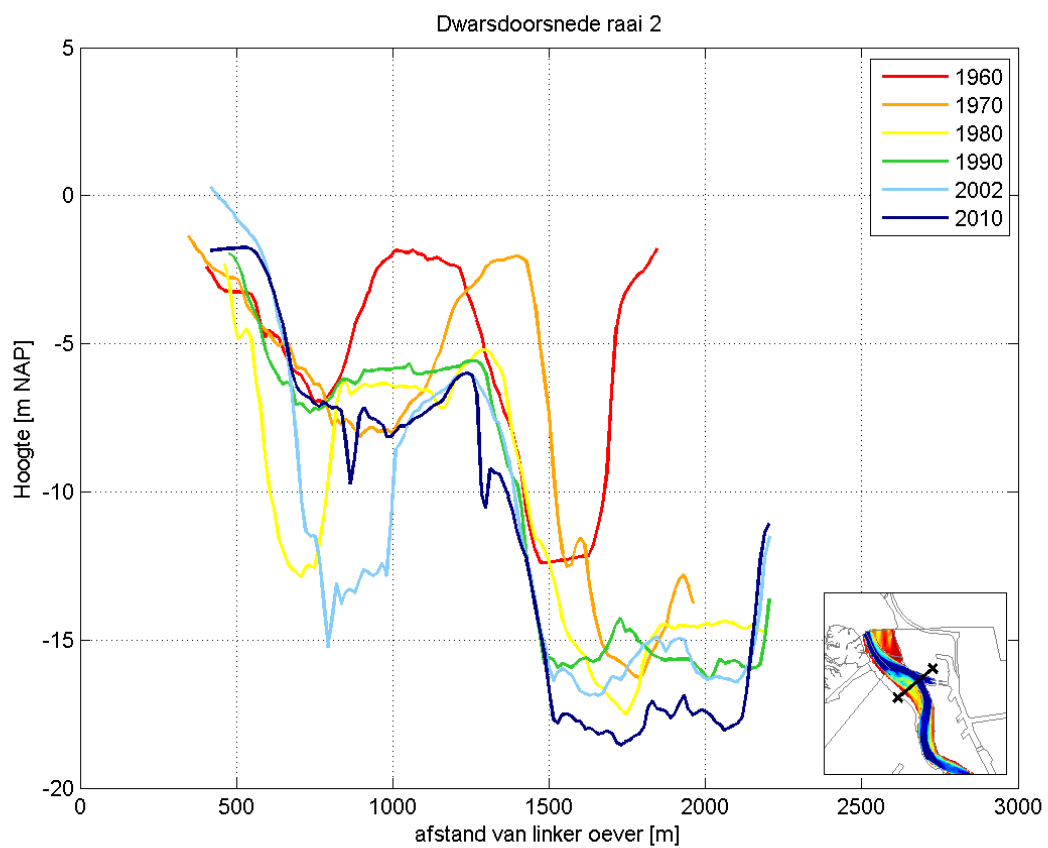
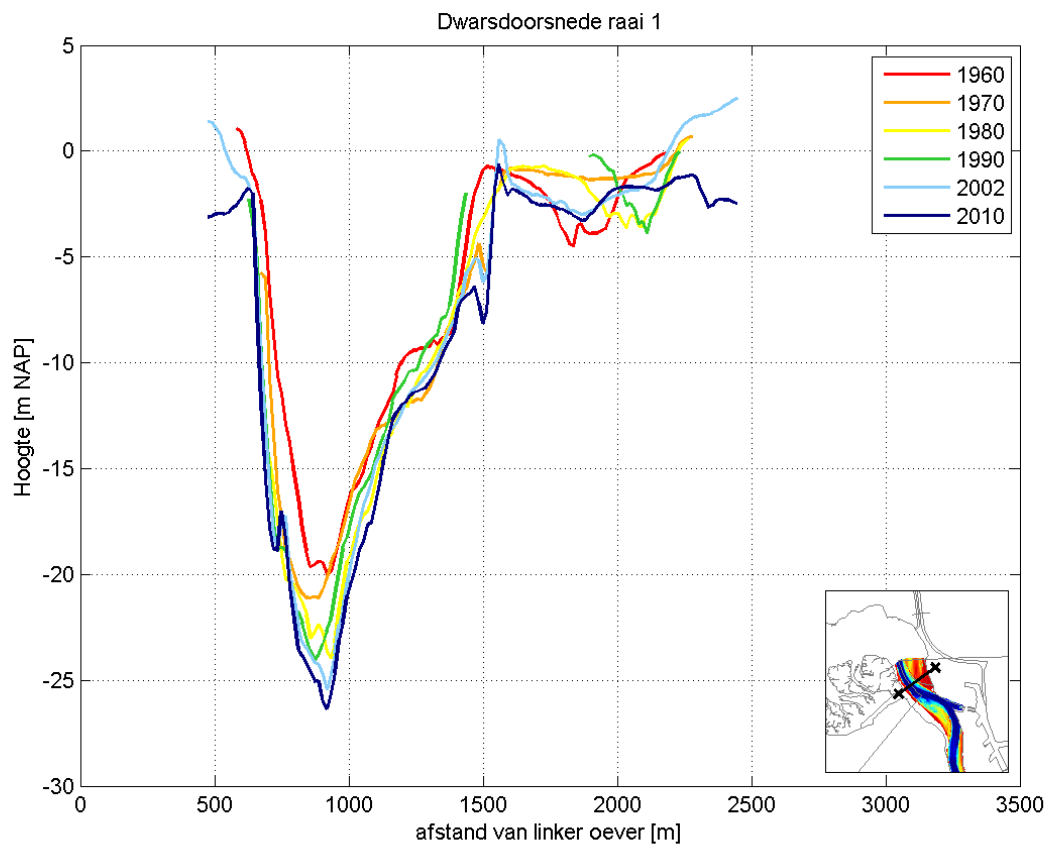
North arrow symbol

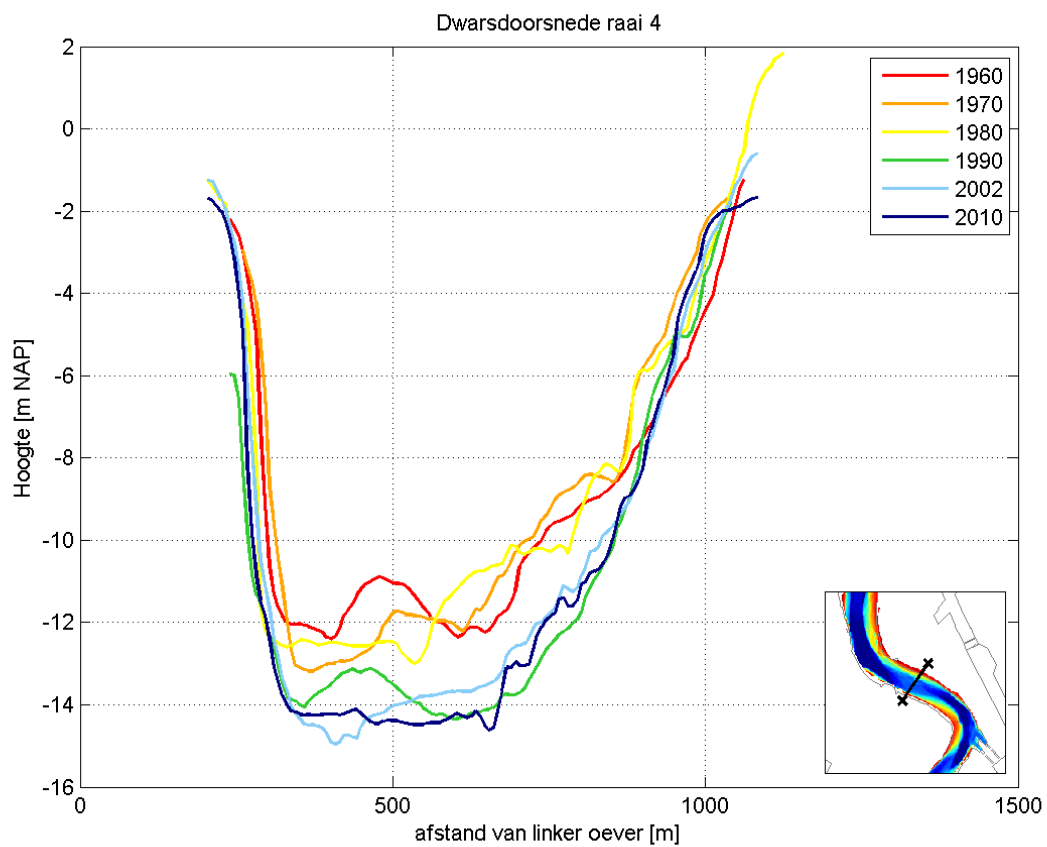
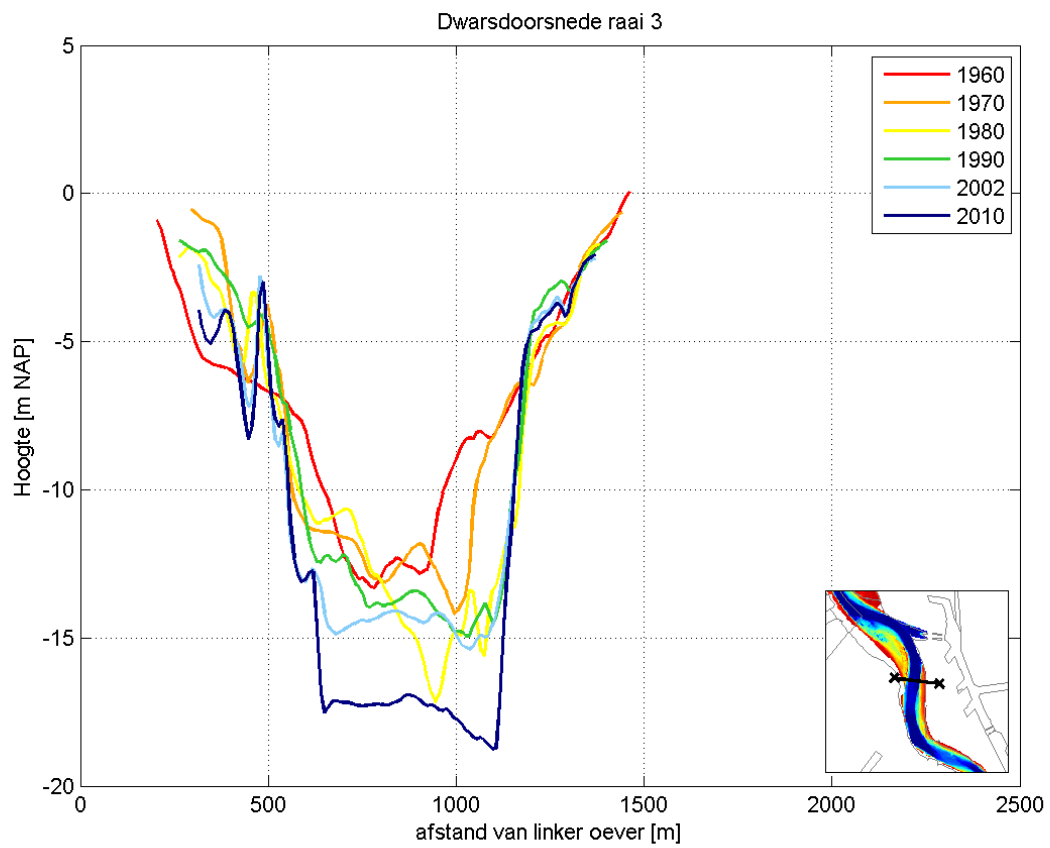
LEGENDE

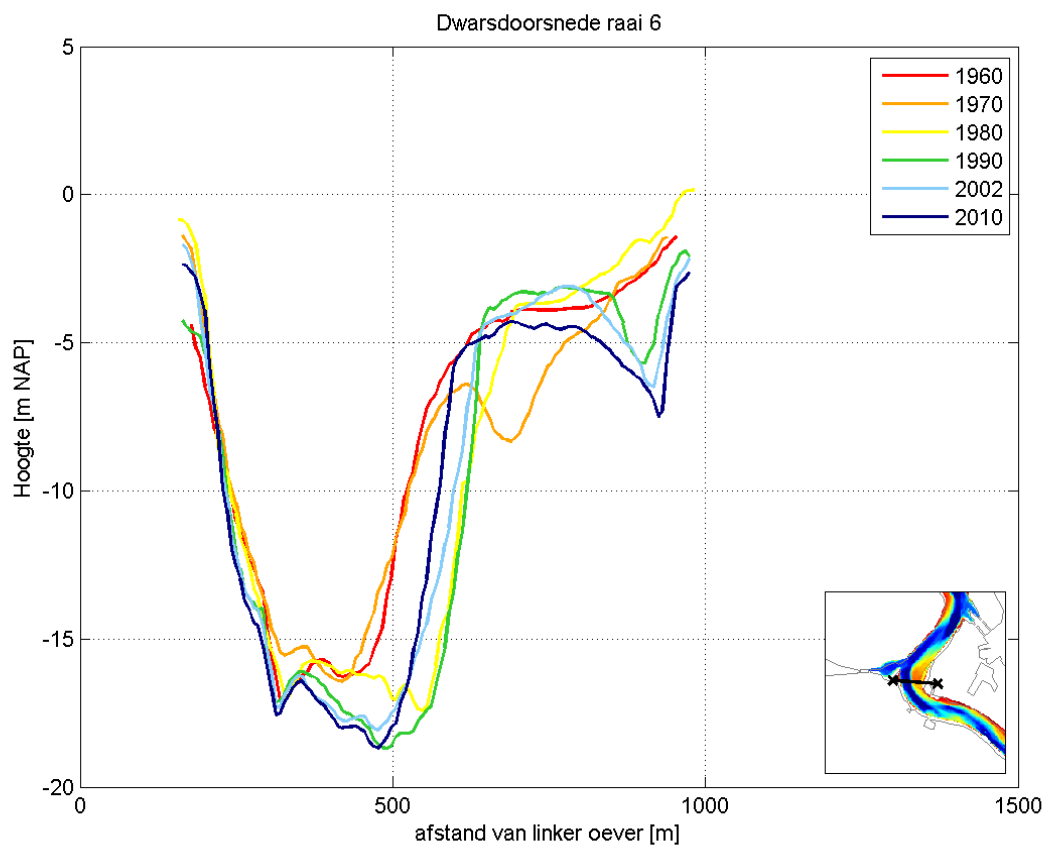
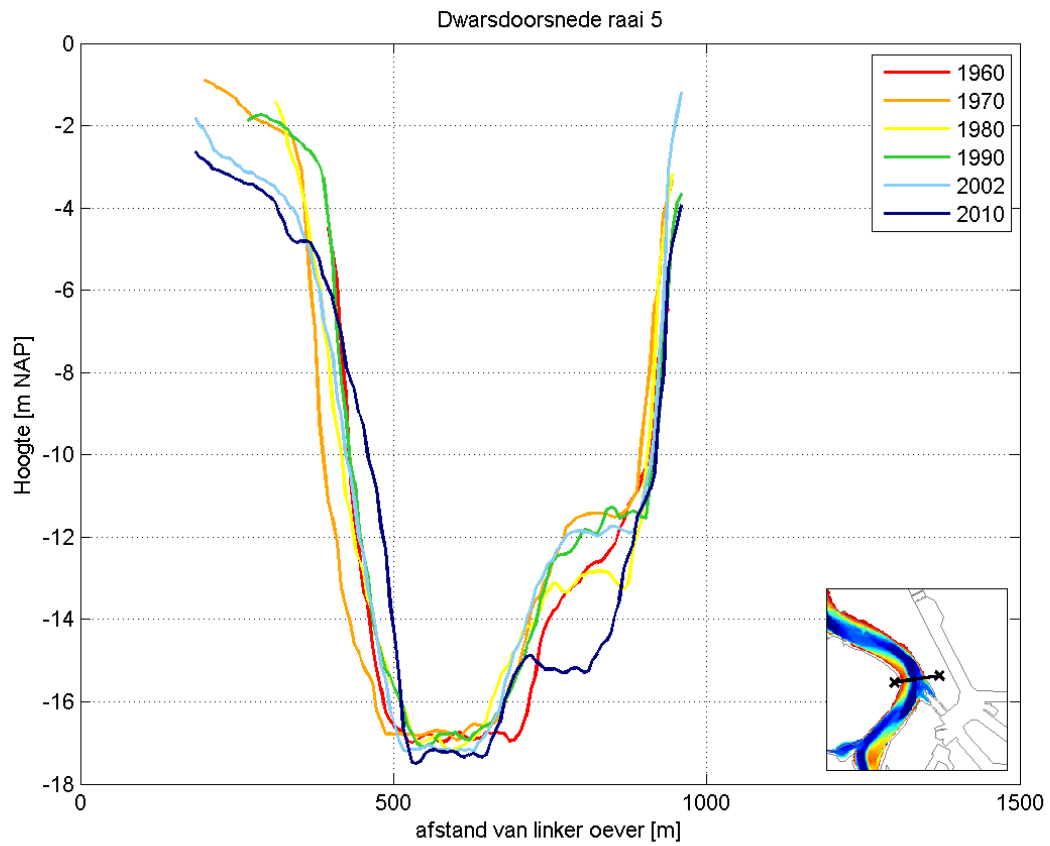
— Oeverlijnen
 - - - Diepte lijnen

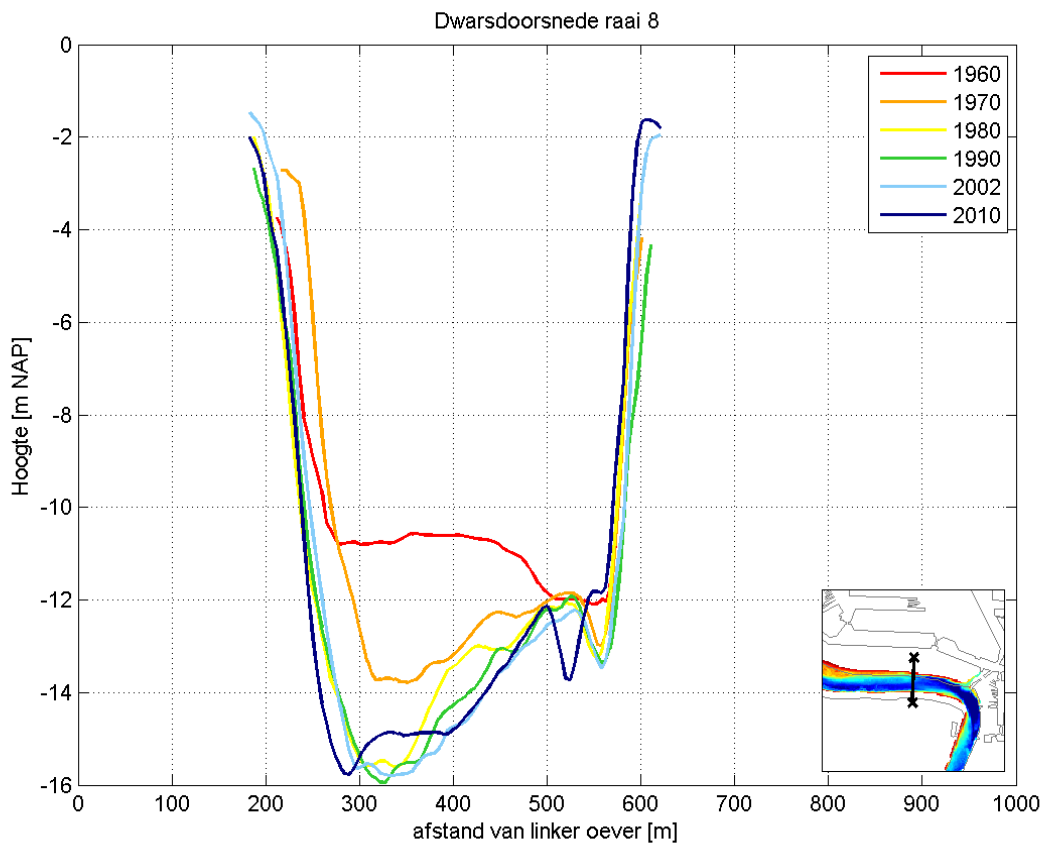
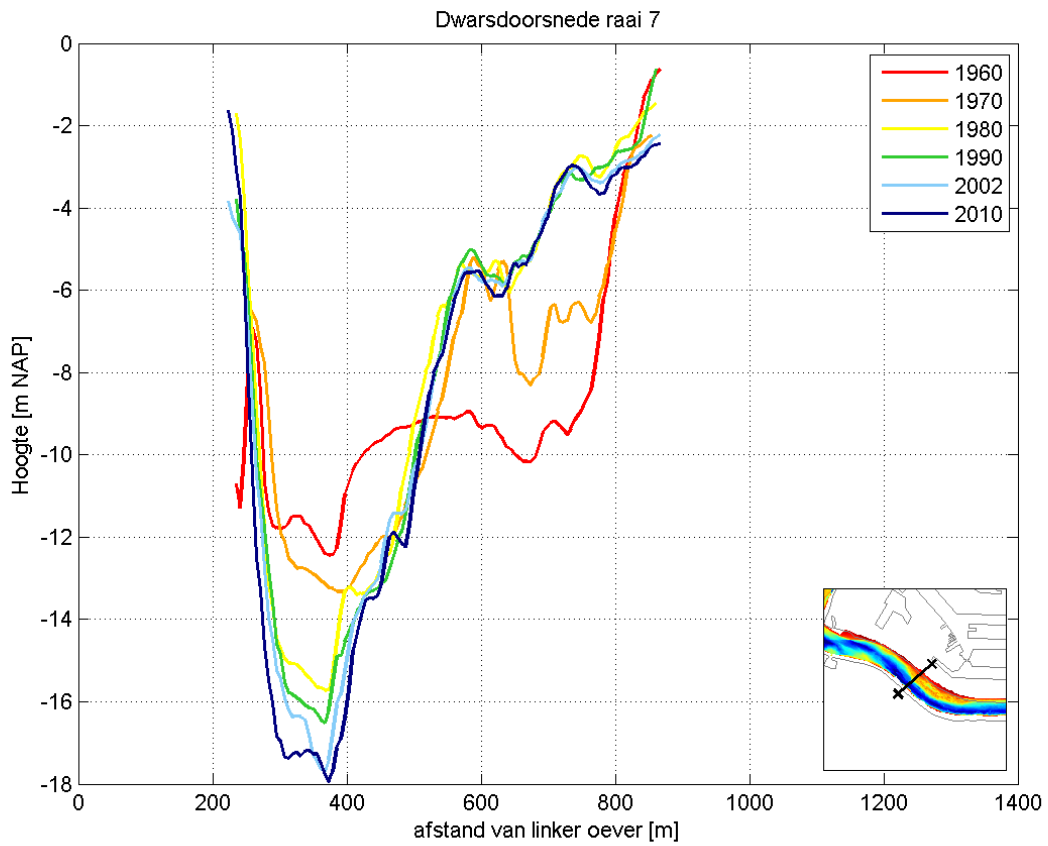
D DWARSDOORSNEDEN RAAIEN

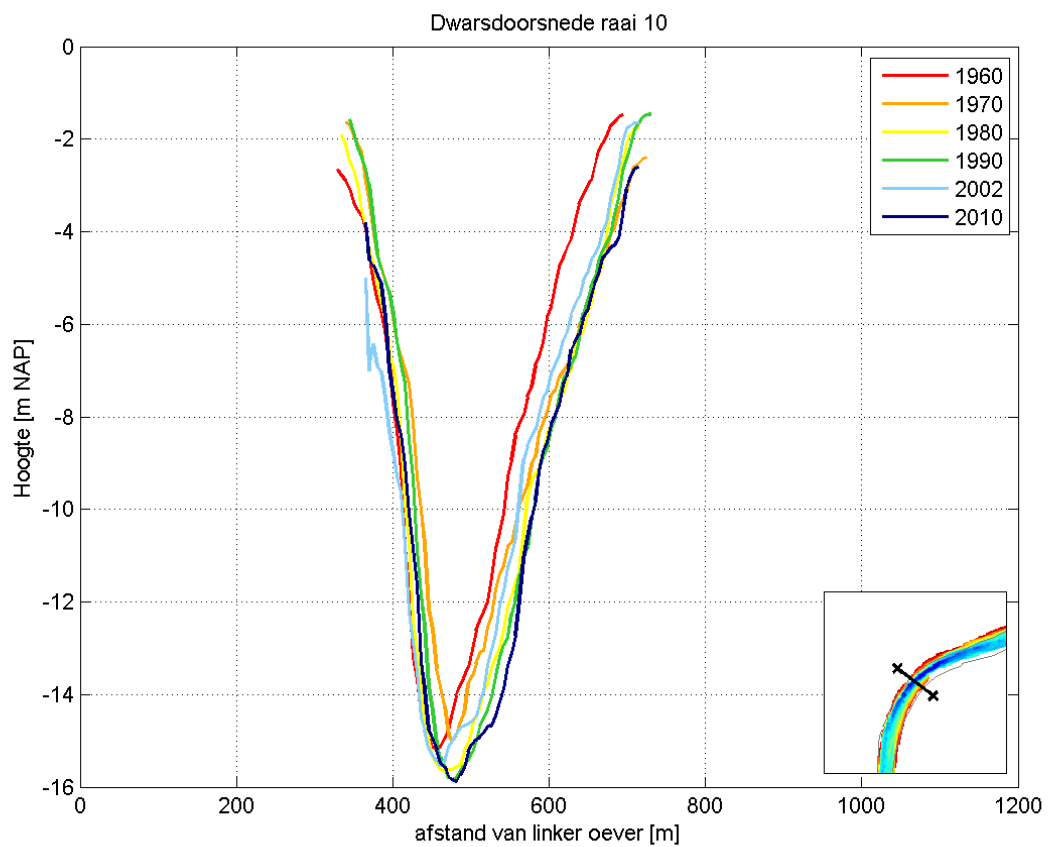
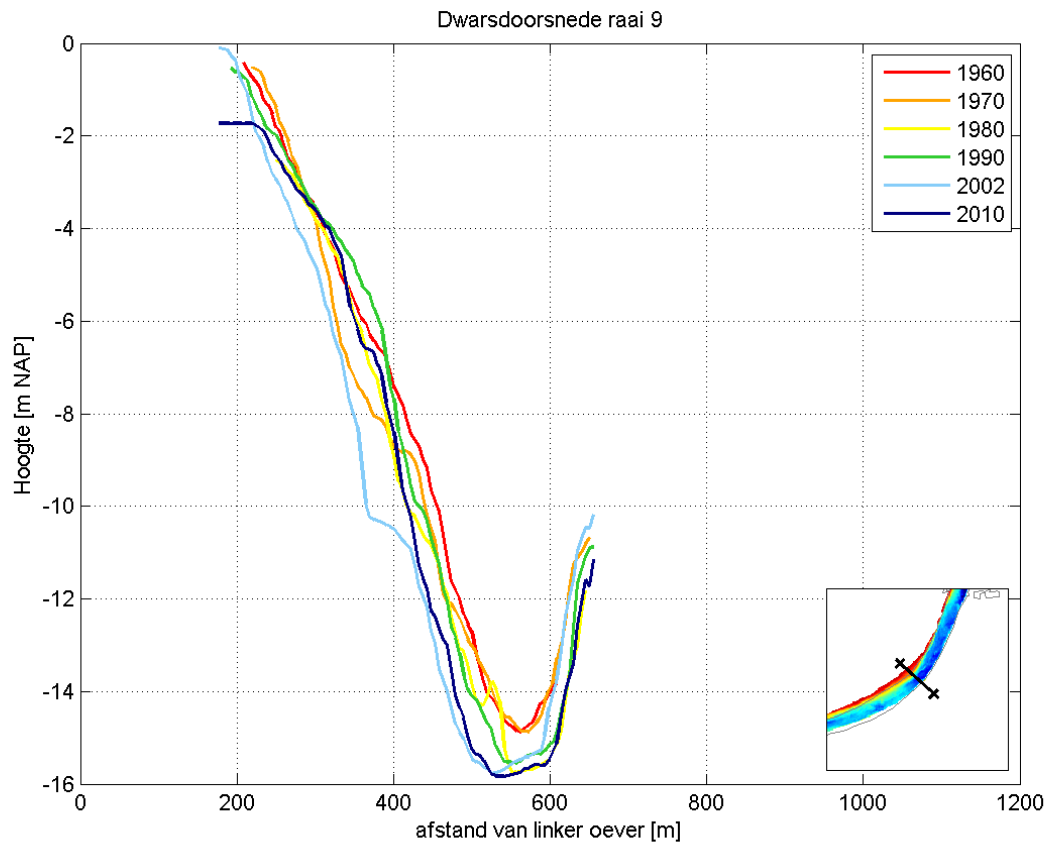


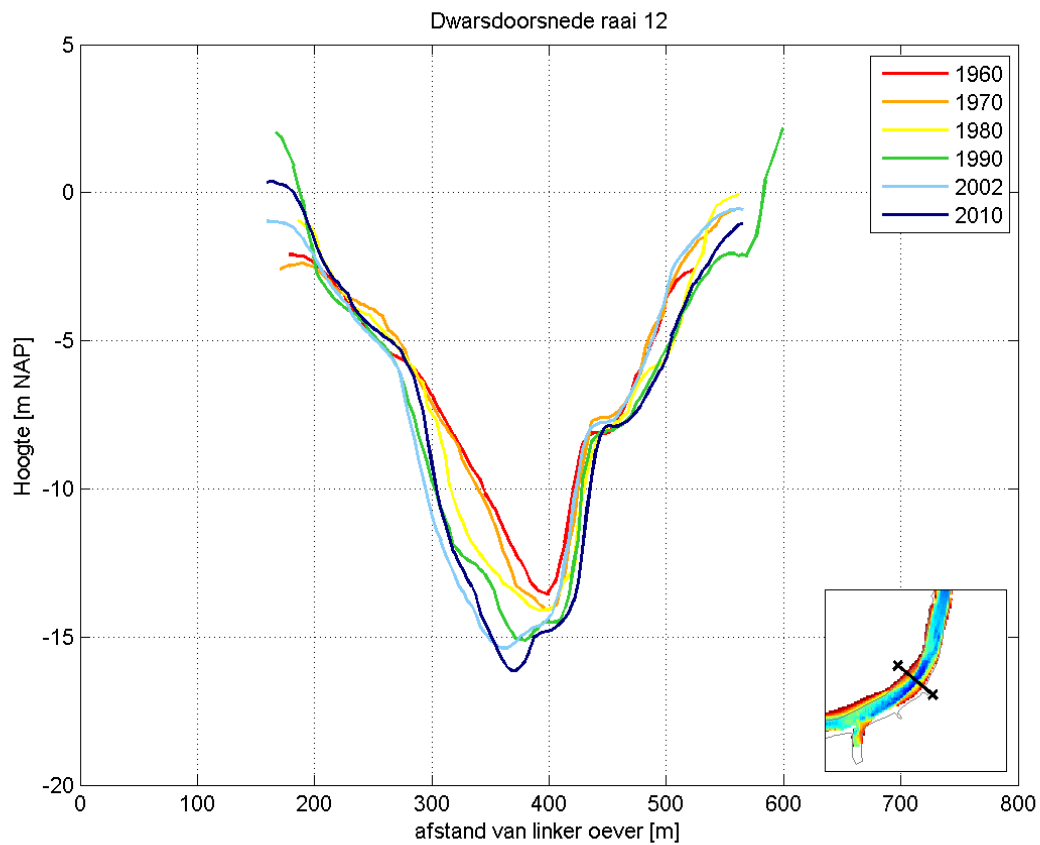
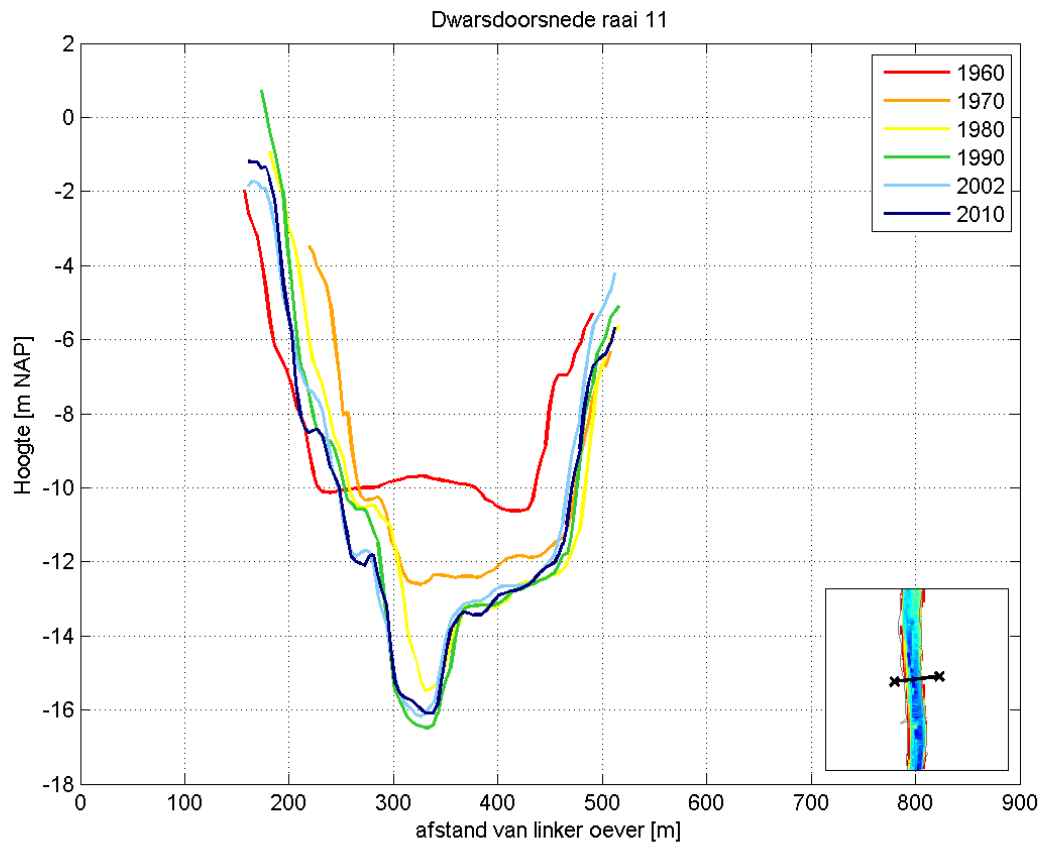












E SCRIPT GETIJSLAG

```
% vergelijkt de gemeten met de berekende tienjarig gemiddelde getijslag
```

```
clear;  
csl;
```

```
warning('off', 'MATLAB:colon:nonIntegerIndex');  
sname='T0';
```

```
if sname=='T0'  
    sscname='kalibratie';  
else  
    sscname=[sname ' scenario'];  
end
```

```
homedir  
cd(['.\Eindrapport\' sscname]);
```

```
uit=0;  
aan=1;  
handmatig=0;  
alle=1;
```

```
printen=aan;
```

```
rdir=['Z:\Student\Afstuderen_Tim\FINEL\rundir\dv3_' sname '\'];  
load([rdir 'history.mat']);  
load([rdir 'flow00001'], 'mattime');
```

```
% Welke stations meenemen?  
% Alle of handmatig invoeren  
stations=alle;
```

```
if stations==alle  
    for i=1:length(his)  
        sname{i}=his(i).name;  
    end  
    stations=sname;
```

```
elseif stations==handmatig
```

```
stations={  
    'Westkapelle'  
    'Vlissingen'  
    'Terneuzen'  
    'Hansweert'  
    'Bath'  
    'Liefkenshoek'  
    'Antwerpen'  
    'Schelle'  
    'Tielrode'  
    'StAmands'  
    'Dendermonde'  
    'Schoonaarde'  
    'Uitbergen'  
    'Melle'  
};
```



```

    for i=1:length(stations)
        stname(i)=stations(i);
    end
end

for i=1:length(stname)
    statname=stname{i};
    for ii=1:length(his)
        stattname=his(ii).name;
        if length(statname)==length(stattname)
            if statname==stattname
                order(i)=ii;
            end
        end
    end
end
end

tell=1;
for i=1:length(rdir)
    letter(i)=rdir(i);
    if letter(i)=='\'
        sl(tell)=i;
        tell=tell+1;
    end
end

dirname=rdir(sl(end-1)+1:end-1);

%%% TIMES % % %
%aantal jaren
jaren=(length(his(1).H)/(365.25*24*6)).*24.75;

%%beginjaar berekening
begjr=datevec(mattime);
begjr=begjr(1);

endjrbegjr+jaren;

%Specifieke periode opgeven
%Beginjaar
jrbegjr=1978;

%Duur periode
jaar=1;
maand=0;
dag=0;

if jrbegjr>0 | jaar>0 | maand>0 | dag>0
dt=((24.*6.*dag)+((365.25./12).*maand.*24.*6)+(365.25.*24.*6.*jaar))./24.75
;
    jdt=dt.*(24.75./(365.25*24*6));
end

tbeg=(jrbegjr-begjr).*dt;
tend=tbeg+dt;
ejrbegjr+jdt;

```

```

% Een specifiek interval opgeven voor een x-jaarlijks gemiddelde als output
% int=[0 5 10 15 ...] geeft de gemiddelde getijslag voor de perioden:
% periode 1 =0-5 jaar, periode 2 = 5-10 jaar enz...
% Tijd is t.o.v. het beginjaar van de som

int=[0 10 20 30 40 50]; % Tienjaarlijks gemiddelde van 1960 - 2010

for ii=1:length(int)

    if ii<length(int)
        tb(ii)=int(ii).*(length(his(1).H)./jaren);
    end

    if ii>1
        te(ii-1)=int(ii).*(length(his(1).H)./jaren);
        lleg{ii-1}=( [num2str(begjr+int(ii-1)) '-' num2str(begjr+int(ii)) '
FINEL2D' ] );
    end
end

figure;
subplot(20,1,1:16);
for pp=1:length(te)

    tbeg=tb(pp);
    tend=te(pp);

%%% MAIN LOOP %%%
for p=1:length(order)
    HH=his(order(p)).H(tbeg:tend);

    aaa=0;
    bbb=0;
    tel=1;

    % Eerst top of eerst dal?
    for i=1:length(HH)
        if i>2
            if HH(i-1)>HH(i-2) & HH(i-1)>HH(i)
                top(tel)=HH(i-1);
                if tel==1
                    aaa=1;
                end
            end

            if HH(i-1)<HH(i-2) & HH(i-1)<HH(i)
                dal(tel)=HH(i-1);
                if tel==1
                    bbb=1;
                end
            end
        end
    end

    if tel==1
        if aaa>bbb
            break
        end
    end
end

```

```

        elseif bbb>aaa
            break
        end
    end
end

% Toppen en dalen definiëren
for i=1:length(HH)
    if i>2
        if HH(i-1)>HH(i-2) & HH(i-1)>HH(i)
            top(tel)=HH(i-1);
            ttop(tel)=i-1;
            if bbb>aaa
                tel=tel+1;
            end
        end
    end

    if HH(i-1)<HH(i-2) & HH(i-1)<HH(i)
        dal(tel)=HH(i-1);
        tdal(tel)=i-1;
        if aaa>bbb
            tel=tel+1;
        end
    end
end
end

if length(top)>length(dal)
    lengte=1:length(dal);
    top=top(1:end-1);
    ttop=ttop(1:end-1);
else
    lengte=1:length(top);
end

step=jdt./length(HH);
tt=jr:step:ejr;
tt=tt(1:end-1);
topstep=(step.*ttop)-step;
tttop=topstep+begjr;
dalstep=(step.*tdal)-step;
ttdal=dalstep+begjr;

for i=lengte
    dH(i)=top(i)-dal(i);
end

for i=1:length(ttop)
    tdH(i)=0.5.*(tttop(i)+ttdal(i));
end

mdH(p)=mean(dH);
dH_st{p}=dH(:);
HH_st{p}=HH(:);

end

```

```

if pp==1
    cc='gold';
elseif pp==2
    cc='lime';
elseif pp==3
    cc='green';
elseif pp==4
    cc='dodgerblue';
elseif pp==5
    cc='magenta';
end

if mdH(1)==mdH(end)
    break
end

    if pp==1
        dHmax=max(mdH);
        dHmin=min(mdH);
    else
        if max(mdH)>dHmax
            dHmax=max(mdH);
        end

        if min(mdH)<dHmin
            dHmin=min(mdH);
        end
    end

plot(mdH, 'linewidth', 1.5, 'color', rgb(cc), 'marker', 'o', 'markerfacecolor', rgb
(cc), 'markeredgecolor', 'k');
ho;
end

A=[0 length(stations)+1 1.5 ceil(dHmax)];

grid on;
title('Ontwikkeling getijslag voor verschillende waterstandstations');
ho;
axis (A);

xlimits=get(gca, 'Xlim');
xpos=xlimits(2)+.02*(xlimits(2)-xlimits(1));
xlabpos=get(gca, 'xlabel');
ylimits=get(gca, 'Ylim');
ypos=ylimits(1)-.02*(ylimits(2)-ylimits(1));
set(xlabpos, 'position', [xpos ypos 1]);

xlabel('Waterstandstation');
ylabel('Getijslag [m]');
set(gca, 'XTick', [1:p]);
set(gca, 'XTicklabel', stname);

ax=gca;
usethesevalues=get(ax, 'XTickLabel');
set(ax, 'XTickLabel', []);
putthemhere=get(ax, 'XTick');

```

```

th=text(putthemhere,ypos*ones(1,length(putthemhere)),usethesevalues,...
    'HorizontalAlignment','right','rotation',90,'parent',ax);

% Vergelijking met de gemeten getijslag

cc={
    'gold'
    'lime'
    'green'
    'dodgerblue'
    'magenta'
};

% Gemeten getijslag
mH{1}=[3.41 3.79 4.10 4.41 4.58 4.71 4.90 NaN 4.72 4.37 3.45 2.63 2.31 NaN];
mH{2}=[3.38 3.85 4.19 4.48 4.76 4.93 5.14 5.24 5.14 4.78 3.74 2.76 2.43 1.89];
mH{3}=[3.31 3.81 4.16 4.41 4.82 5.04 5.20 5.33 5.31 4.99 3.96 3.09 2.77 2.14];
mH{4}=[3.37 3.88 4.23 4.49 4.90 5.13 5.29 5.42 5.40 5.12 4.14 3.22 2.92 2.38];
mH{5}=[3.31 3.79 4.14 4.41 4.88 5.14 5.25 5.39 5.41 5.13 4.16 3.30 NaN 2.61];

jaren=1960+int;
for i=1:length(jaren)
    jaar=jaren(i);
    if i>1
        llegi{i-1}=[num2str(jaren(i-1)) ' - ' num2str(jaar) ' meting'];
    end
end

t=1:length(mH{1});

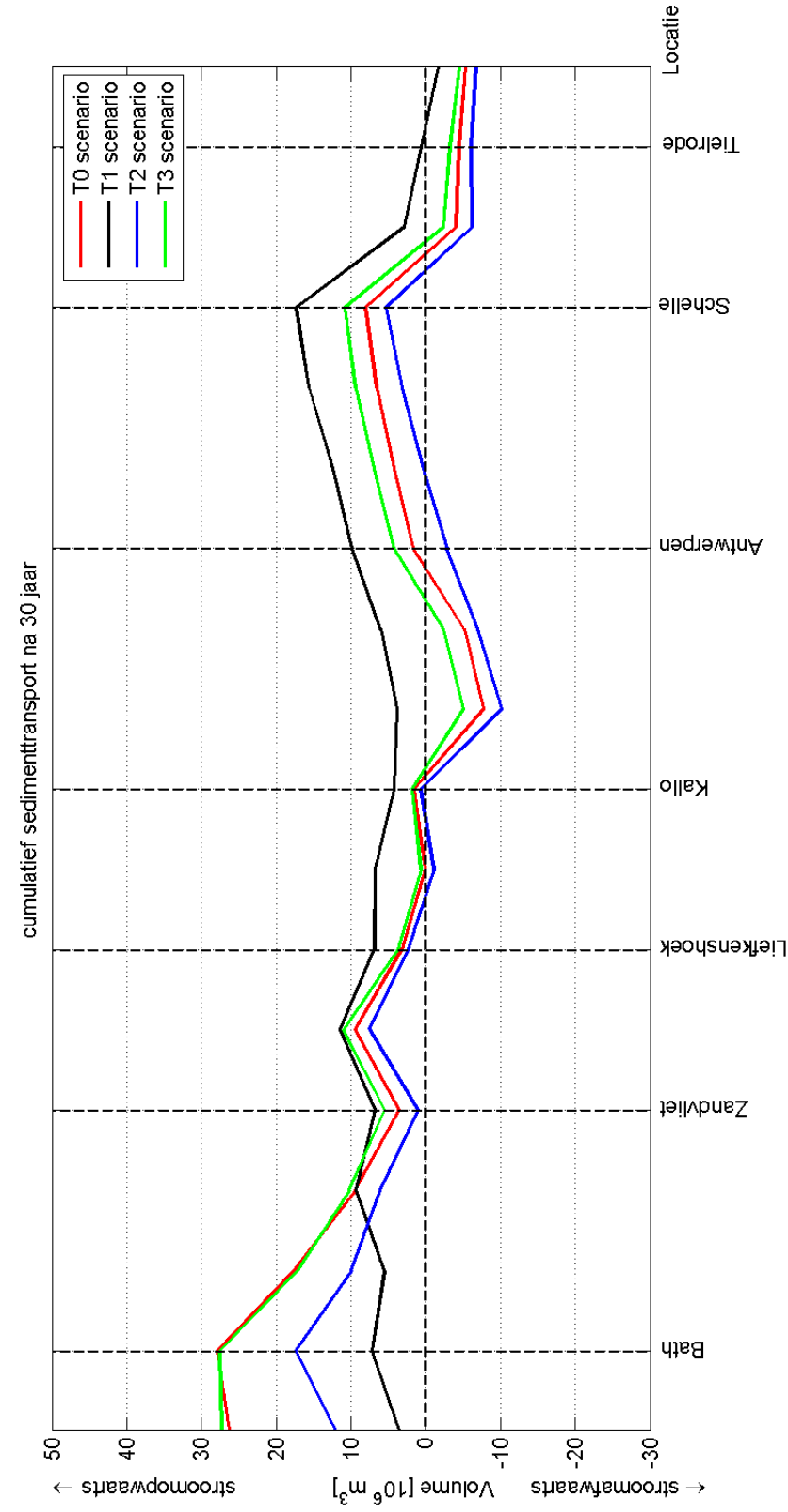
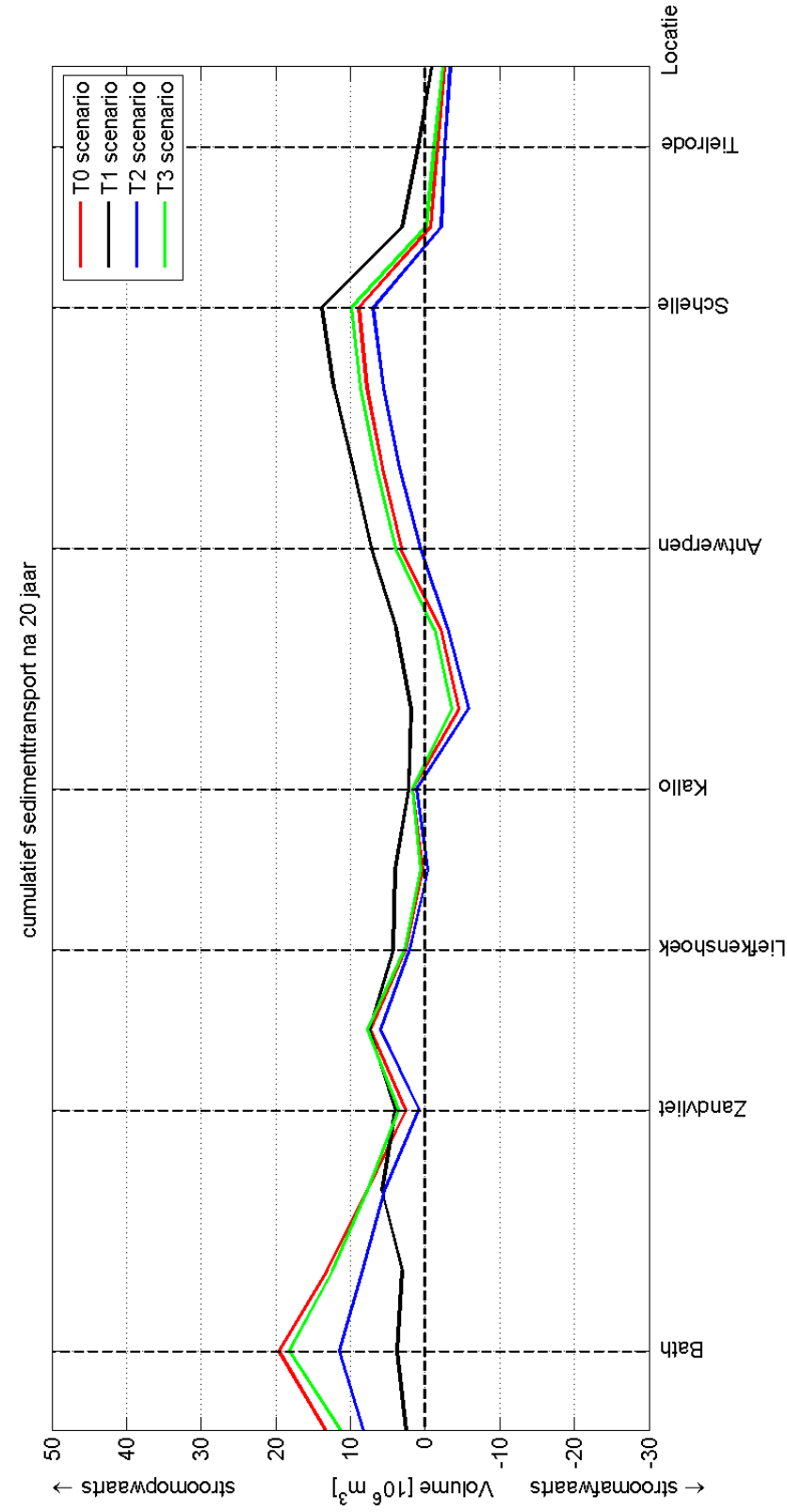
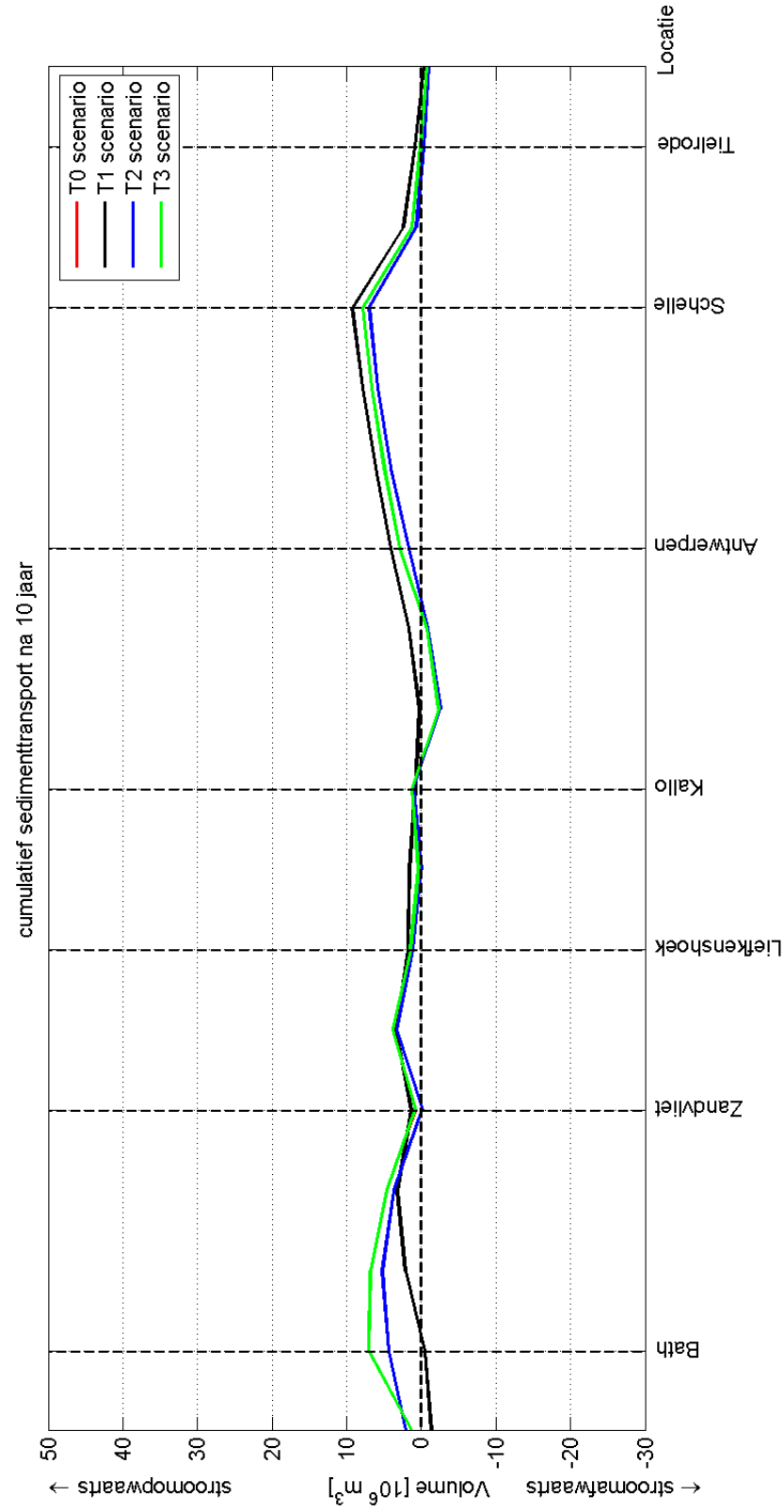
for i=1:length(jaren)-1
    ho;
    plot(t,mH{i},'--','color',rgb(cc(i)),'linewidth',1.5);
end
box on;
legend([lleg llegi]);
zbuf
ext;
ol;

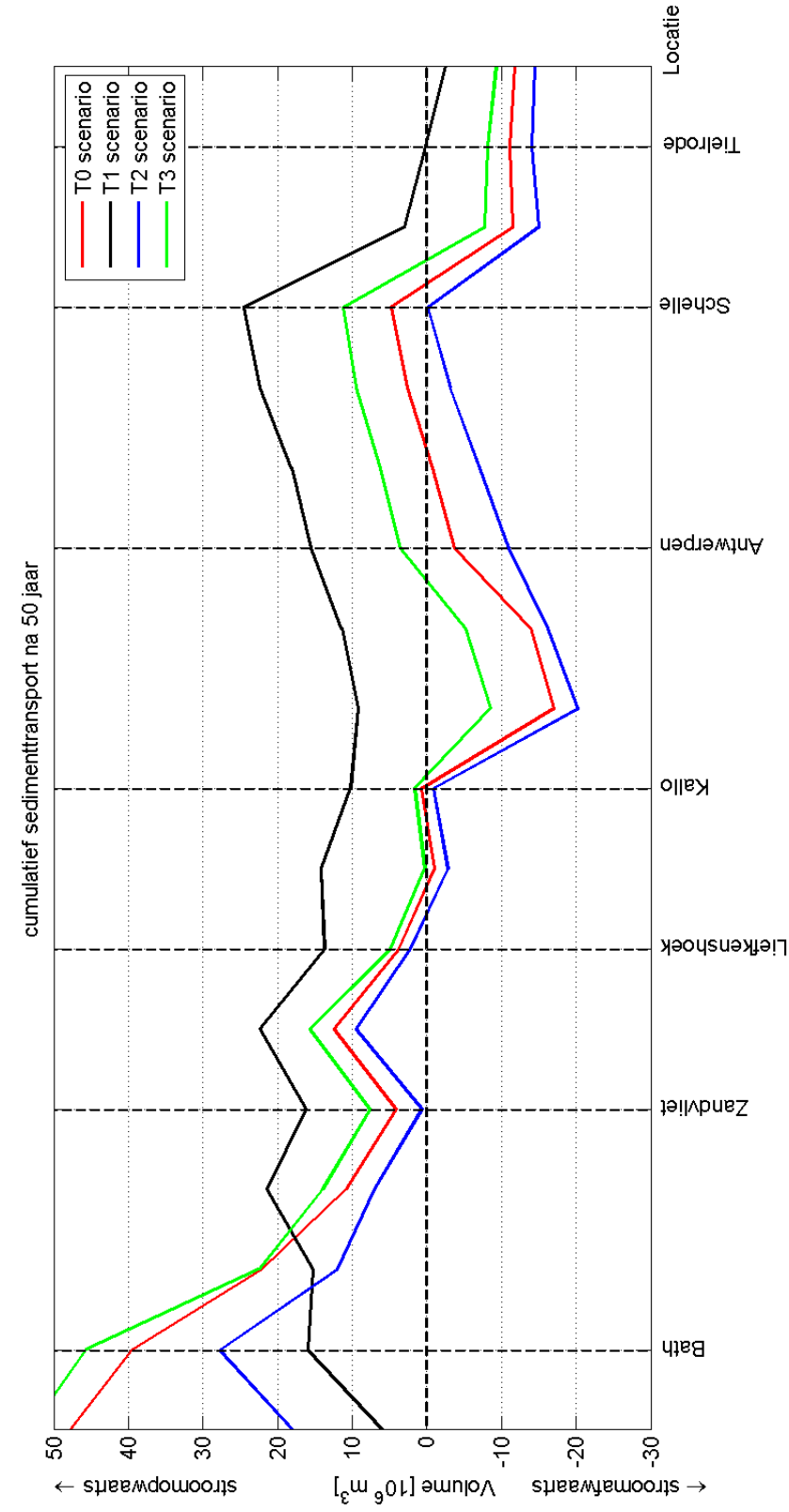
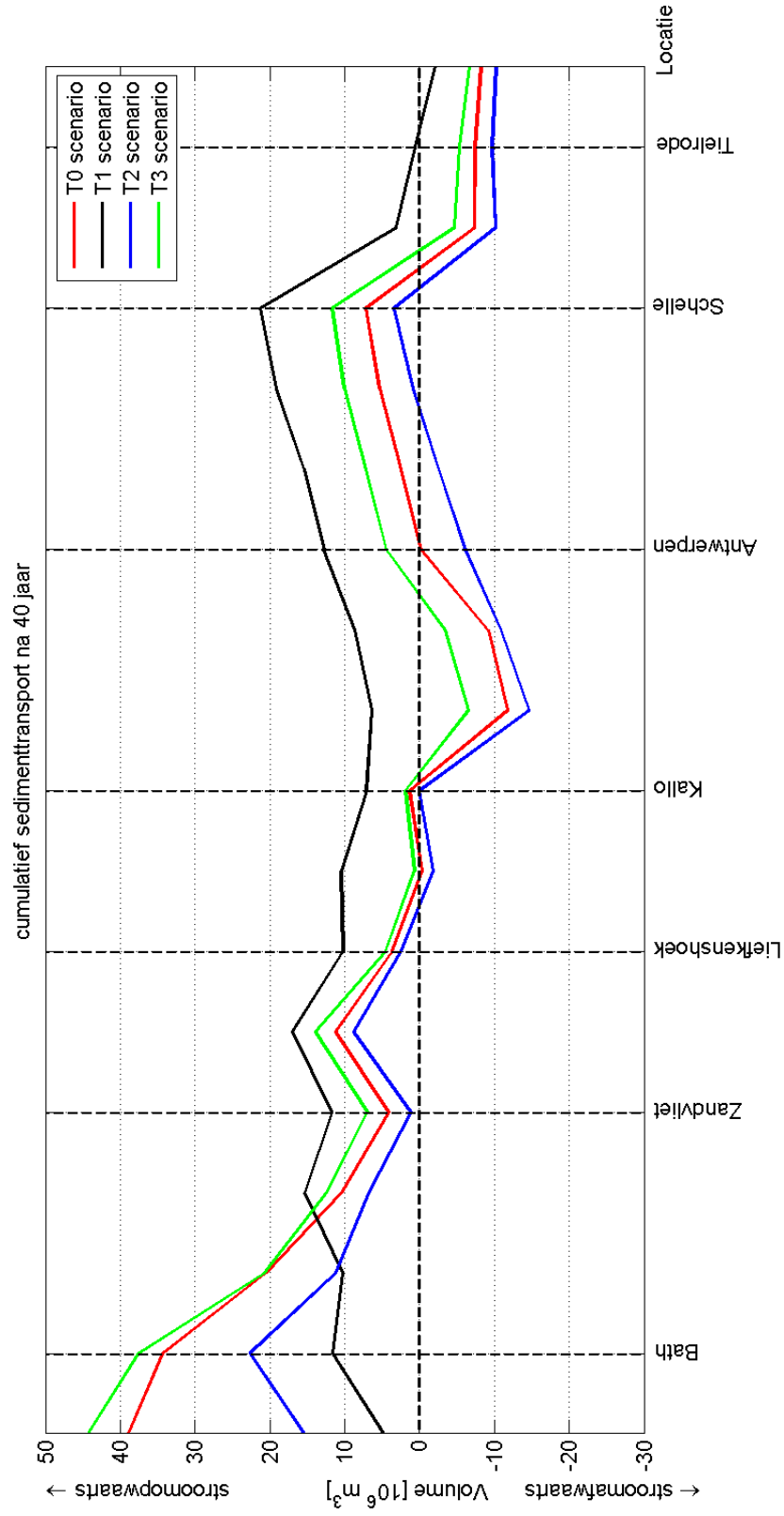
if printen==aan
    print(gcf,'-dpng',['verg_getijslag_' sprintf('%s',dirname),'_'
num2str(begjr+int(1)) '-' num2str(begjr+int(end))]);
end

warning('on','MATLAB:colon:nonIntegerIndex');
homedir

```

F CUMULATIEF ZANDTRANSPORT





SVASEK
HYDRAULICS
COASTAL, HARBOUR AND RIVER CONSULTANTS