Rijkswaterstaat
Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ
Bibliotheek (Middelburg)

C - 14107 430
dl. 1. Hoofdrapport

Lange Termijnvisie Schelde-estuarium cluster morfologie

Uitvoeringsfase

Deel 1: hoofdrapport

J.C. Winterwerp , M.C.J.L. Jeuken, M.A.G. van Helvert (RWS/RIKZ),
C. Kuijper, A. van der Spek (TNO-NITG), M.J.F. Stive,
P.M.C. Thoolen en Z.B. Wang

augustus 2000

WL | delft hydraulics

WL | delft hydraulics

OPDRACHTGEVER:	Ministerie van Verkeer en Waterstaat Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat Rijksinstituut voor Kust en Zee / RIKZ
TITEL:	Lange Termijnvisie Schelde-estuarium - Cluster Morfologie Rapportage uitvoeringsfase

SAMENVATTING:

Door Rijkswaterstaat en de Vlaamse overheid wordt een Lange Termijn Visie voor het Schelde-estuarium opgesteld, waarbij de *Toegankelijkheid*, *Veiligheid* en *Natuurlijkheid* van het gebied een centrale plaats innemen. Voor het vaststellen van een verantwoord beheer m.b.t. deze aspecten is begrip van de morfologie van het estuarium onontbeerlijk. Daartoe is de Cluster Morfologie opgericht die bestaande kennis en hulpmiddelen moet gebruiken om vragen, die betrekking hebben op de toegankelijkheid, veiligheid en natuurlijkheid van het gebied, te kunnen beantwoorden. Het voorliggende rapport bevat de resultaten van de uitvoeringsfase.

Vanuit genoemde aandachtsgebieden wordt gesteld dat het handhaven van het meergeulenstelsel een noodzakelijke voorwaarde is voor het ontwikkelen van een gezond en multifunctioneel estuarien watersysteem dat op een duurzame wijze gebruikt kan worden voor menselijke behoeften.

Op basis van een analyse van de historische ontwikkelingen van het estuarium is geconcludeerd dat de huidige afmetingen van het systeem bepaald worden door de aanwezigheid en afmetingen van het meergeulenstelsel. Er wordt verondersteld dat het huidige meergeulensysteem zichzelf in stand houdt op een tijdschaal van decennia - dit is dus de basishypothese bij de studie. Dit meergeulenstelsel bestaat uit een complex van eb- en vloedgeulen en tussenliggende platen, welke geschematiseerd kunnen worden in de vorm van geschakelde morfologische cellen. Met behulp van een stabiliteitsanalyse is bestudeerd bij welke verstoringen, in de vorm van verdiepingen en/of specie-stortingen, deze cellen al dan geen stabiel evenwicht vertonen, m.a.w. onder welke condities zo'n cel degenereert tot een ééngeulsysteem.

Deze analyse is verder gekwantificeerd m.b.v. sedimenttransportberekeningen met DELFT2D-mor, en de te verwachten baggervolumina, berekend met ESTMORF voor diverse scenario's, i.e. vaardieptes, zeespiegelrijzing, ontpoldering en baggerstrategie. Het concept is kwalitatief gevalideerd aan de hand van ervaringen van de Belgische en Nederlandse beheerders.

Tevens is voor de diverse scenario's een aantal indicatoren bepaald, waaronder de getij-asymmetrie, maximale stroomsnelheden, en de longitudinale zoutverdeling.

Eén van de conclusies van de studie is dat de hoeveelheid te storten baggerspecie, in relatie tot zandwinning en aanlegbaggerwerk, maatgevend is voor de stabiliteit van het systeem en haar zandhuishouding.

REFERENTIES: overeenkomst RKZ-822, kenmerk RIKZ/ABE-2000/05454, d.d. 28 maart 2000

VER.	AUTEUR		DATUM	OPMERK.	REVIEW		GOEDKEURING
1.0	J.C. Winterwerp		11 juli 2000		H.J. de Vriend		T. Schilperoort
2.0	J.C. Winterwerp		15 augustus 2000				
2.1	J.C. Winterwerp		22 augustus 2000				T. Schilperoort

PROJECTNUMMER:	Z2878							
TREFWOORDEN:	morfologie, Schelde-estuarium, verdiepen, baggerstrategie							
INHOUD:	TEKST	30	TABELLEN	3	FIGUREN	15	APPENDICES	1
STATUS:	☐ VOORLOPIG		☐ CONCEPT		☒ DEFINITIEF			

Inhoud

Samenvatting

1 Inleiding 1

2 Het morfologisch systeem 2

3 Werkhypothese en opzet van het onderzoek 5

4 Gedrag van het Schelde-estuarium op mega-schaal 8

5 Gedrag van het Schelde-estuarium op macro- en meso-schaal - handhaving van het meergeulenstelsel 10

6 Bagger- en stortvolumina 18

7 Morfologische ontwikkeling tot 2030 22

8 Ontwikkeling indicatoren 24

9 Extreme waterstanden - Veiligheid 26

10 Conclusies/aandachtspunten voor duurzaam beheer 27

11 Geraadpleegde literatuur 30

Appendices

A Overzicht appendices met achtergrond- en detailinformatie

Samenvatting

Vraagstelling: waar liggen de grenzen van het meergeulenstelsel

Het cluster morfologie van het project Lange Termijn Visie Schelde-estuarium behandelt de gemeenschappelijke morfologische aspecten van het Schelde-estuarium met betrekking tot de functies toegankelijkheid, natuurlijkheid en veiligheid. Uitgangspunt van de lange termijnvisie is het ontwikkelen van een gezond en multifunctioneel estuarien watersysteem dat op een duurzame wijze gebruikt wordt voor menselijke behoeften. Door drie werkgroepen zijn subdoelstellingen geformuleerd:

Toegankelijkheid: Een optimale toegang tot de Scheldehavens in relatie tot de sociaal-economisch gewenste ontwikkeling van de regio.

Natuurlijkheid: Een ecologisch gezond, compleet en duurzaam functionerend estuarien watersysteem waarvan de kwaliteit gewaarborgd is.

Veiligheid: een optimaal beschermingsniveau waarin het risico van overstromen bepalend is voor de toe te passen veiligheidsmaatregelen.

Op basis van deze doelstellingen en de vragen gesteld vanuit de werkgroepen, heeft het morfologisch onderzoek zich gericht op de aanwezige beheersvrijheid (waar liggen de grenzen van het systeem) waarbij behoud van het meergeulenstelsel als uitgangspunt ("no-regret-scenario") is genomen.

De Westerschelde: een meergeulenstelsel

Estuaria zijn van nature hoog dynamische gebieden. Veranderingen van o.a. de morfologie spelen zich af op diverse tijd- en ruimteschalen. Wereldwijd blijkt dat estuaria in drie kenmerkende toestanden voorkomen, afhankelijk van de omvang van het door het getij te vullen en ledigen gebied, de rivierafvoer, de relatieve zeespiegelstijging en het beschikbare sediment (zand en slib). Het ene uiterste is *een situatie met één enkele geul met aangrenzend platen en slikken.* Estuaria van dit type bevinden zich over het algemeen in een proces van verlanding. De omvang van de geuldoorsnede wordt mede bepaald door de afvoer van de rivier. Indien de Westerschelde in zo'n toestand zou geraken, bij een gemiddelde Schelde-afvoer van 120 m^3/s, wordt een evenwicht gevonden met een geul met een diepte van 5 à 10 meter. Het Eems-Dollard estuarium is een voorbeeld van een verlandend estuarium. Het andere uiterste is een *situatie waarin geen platen bij laagwater droogvallen, een zgn. verdronken estuarium.* Een tussenvorm is een *systeem met min of meer parallelle geulen met tussenliggende platen en slikken, een zgn. meergeulenstelsel.* Dergelijke estuaria zijn (door de aanwezigheid van interne aandrijvende krachten) veerkrachtig over een redelijke range van interne en externe condities en hebben daardoor meer vrijheidsgraden voor het beheer dan de eerder genoemde toestanden. Afhankelijk van de grootte van de zeespiegelrijzing en het aanbod van sediment kan ook het laatste type estuarium uiteindelijk verlanden dan wel verdrinken.

De huidige Westerschelde kan gekarakteriseerd worden als meergeulenstelsel, dat in een dynamisch evenwicht verkeert op een tijdschaal van decennia. De combinatie van ingrepen en de gematigde zeespiegelstijging heeft bijgedragen aan het (schijnbare) evenwicht waarin het estuarium nu verkeert.

Schematisatie van het meergeulensysteem: het cellenconcept

Het meergeulenstelsel van de Westerschelde kan geschematiseerd worden door parallel en serieel geschakelde geulen met tussenliggende platen, zgn. morfologische cellen. De Westerschelde is geschematiseerd als een stelsel geschakelde morfologische cellen. Deze schematisatie vormt de basis voor een stabiliteitsanalyse van het systeem.

Hoe het meergeulenstelsel te handhaven

Indien gekozen wordt voor het behoud van het meergeulenstelsel, heeft dat consequenties voor het beheer. Dit betekent niet dat er geen ingrepen meer mogelijk zijn. Met gericht beheer kan voorkomen worden dat een onomkeerbare trend ingezet wordt in de richting van een ééngeulsysteem. Dit vraagt, uitgaande van de grenzen die het systeem stelt, om een optimaliseren en mogelijk begrenzen van de storthoeveelheden en -locaties. Als dit op de juiste wijze gebeurt blijft het meergeulenstelsel behouden, ook bij een diepere vaargeul. De hoeveelheid sediment die in een cel gestort kan worden is afhankelijk van de bruto transportcapaciteit binnen de cel. Een cel waarin van nature grote zandtransporten plaatsvinden, kan meer hebben dan een cel waar het sediment vrijwel stil ligt. Ingrepen in het systeem hebben invloed op de transportcapaciteit van de geulen. Voor de huidige Westerschelde is een transportcapaciteit van ca 96,5 Mton/jaar gevonden. Afhankelijk van de bagger- en stortscenario's betekent dit dat de nevengebieden een stortcapaciteit hebben variërend tussen de 5 en 10 Mton per jaar. Dit komt overeen met 5 à 10% van de transportcapaciteit. Deze stortcapaciteit kan vergroot worden door een optimale combinatie van verdiepen, zandwinnen en storten in de vaargeul. Verder blijkt uit de berekeningen dat verder kunstmatig ingrijpen invloed heeft op de transportcapaciteit en daarmee op de stortcapaciteit.

Invloed ontpolderen

De invloed van grootschalig ontpolderen in Vlaanderen zal een netto verlaging in stortcapaciteit (in het westen omlaag, in het oosten omhoog) tot gevolg te hebben. Tevens neigt het estuarium dan naar 'vloeddominantie', wat snellere sedimentatie kan betekenen (als sediment beschikbaar is). Dit resultaat kan niet veralgemeniseerd worden voor andere ontpolderingen. De invloed is namelijk sterk afhankelijk van locatie en grootte. Bovendien is de conclusie gebaseerd op de evaluatie van één scenario.

Toetsing aan de praktijk

Er is een vergelijking uitgevoerd tussen het theoretische cellenconcept en de ervaringen uit de praktijk. Algemeen beeld is dat de praktijk goed overeenstemt met de theorie. Bijvoorbeeld: in het oostelijk deel van het estuarium is de maximale stortcapaciteit volgens het cellenconcept vergeleken met de werkelijk gestorte hoeveelheden. Het cellenconcept voorspelde dat meer dan de beschikbare capaciteit gestort was, hetgeen overeenkomt met de ervaring: de dynamiek in dit deel is afgenomen.

Beperkingen van het concept

Niet alle morfologische aspecten van de Westerschelde kunnen in de cellenschematisatie worden meegenomen. Het gedrag van de hoogdynamische gebieden, vaak de knooppunten tussen de cellen, is morfologisch moeilijk te schematiseren. De effecten van ingrepen in deze gebieden is niet goed voorspelbaar. Daarnaast houdt het cellenconcept geen rekening met geometrische veranderingen, zoals bijvoorbeeld versteiling van plaatranden als gevolg van een vaargeulverdieping. Deze veranderingen hebben effecten op de natuurlijkheid. De

kunstmatige herverdeling van sediment in de lengterichting door het baggeren in het oosten en het storten in het westen, die invloed heeft op de grootschalige sedimentuitwisseling met de monding, wordt in het concept ook niet meegenomen. Grootschalige sedimentuitwisseling is belangrijk als door versnelde zeespiegelstijging zandimport vanuit de monding nodig is.

Consequenties / Conclusies

Vanuit het cellenconcept worden geen grenzen gesteld aan verdieping, wel aan de storthoeveelheden. Een vergelijking tussen de jaarlijks te storten hoeveelheden sediment en de beheersvrijheid binnen het cellenconcept leert ons dat we aan de grens zitten. Momenteel wordt jaarlijks ongeveer 13 Mton sediment gestort. Uit de berekeningen blijkt dat in de nevengeulen een stortcapaciteit van 5 tot 10 Mton sediment aanwezig is. Door integratie van baggeren, baggerstort en zandwinning kan deze stortcapaciteit wat vergroot worden. Echter, de combinatie van handhaven van het meergeulensysteem en binnen het systeem storten van zowel initieel baggerwerk (van eventueel nieuwe ingrepen) als het onderhoudsbaggerwerk is uitgaande van de systeemgrenzen niet mogelijk. Een oplossing kan gevonden worden door een deel van het sediment buiten het systeem te brengen. De Voordelta biedt mogelijk kansen om als sedimentbuffer te fungeren. In dat geval blijft het materiaal beschikbaar, bijvoorbeeld om de mogelijke versterkte zeespiegelstijging te compenseren. Hieraan zitten echter de nodige onzekerheden en vragen vast. Deze betreffen de effecten op huidige gebruiksfuncties van de Voordelta (is stort daarmee te verenigen?), de baggertechnische mogelijkheden en de transportcapaciteit ten behoeve van grootschalige sedimentuitwisseling (kan het gebufferde sediment snel genoeg terug van de Voordelta naar de Westerschelde als het weer nodig is?). Kanttekening is dat de effecten van de vorige verdieping niet zijn uitgewerkt. Het systeem bevindt zich sinds de vorige verruiming in een overgangsfase waardoor extra onzekerheden zitten aan het ingrijpen in het systeem.

1 Inleiding

Het Cluster Morfologie van het project Lange Termijnvisie Schelde-estuarium (LTV) behandelt de gemeenschappelijke morfologische aspecten van het Schelde-estuarium met betrekking tot de functies Toegankelijkheid, Natuurlijkheid en Veiligheid. Uitgangspunt van het LTV is het ontwikkelen van een gezond en multifunctioneel estuarien watersysteem dat op een duurzame wijze gebruikt wordt voor menselijke behoeften. Vanuit drie werkgroepen zijn de volgende subdoelstellingen geformuleerd:

Toegankelijkheid:
Een optimale toegang tot de Scheldehavens in relatie tot de sociaal-economisch gewenste ontwikkeling van de regio.
Natuurlijkheid:
Een ecologisch gezond, compleet en duurzaam functionerend estuarien watersysteem waarvan de kwaliteit gewaarborgd is.
Veiligheid:
Een optimaal beschermingsniveau waarin het risico van overstroming bepalend is voor de toe te passen veiligheidsmaatregelen.

Tevens is door de Werkgroepen een bijdrage geleverd aan het lange-termijn streefbeeld (i.e. tot 2030) van het Schelde-estuarium (RA/00-402, mei 2000). Op basis van deze (sub)doelstellingen en de vragen vanuit de werkgroepen heeft het morfologisch onderzoek zich gericht op de beheersvrijheid van het systeem, waarbij het behoud van het meergeulenstelsel ("no-regret-scenario") als uitgangspunt is genomen. Het doel van de binnen het Cluster Morfologie uitgevoerde werkzaamheden is:
Bepaal hoe het meergeulensysteem gehandhaafd kan worden en waar vanuit het morfologisch functioneren de grenzen van het systeem liggen, m.a.w. welke natuurlijke processen en menselijk ingrijpen beïnvloeden de stabiliteit, i.e. het al dan niet kunnen bestaan van het meergeulenstelsel, en op welke wijze?

Dit rapport bevat de hoofdtekst van het binnen het Cluster Morfologie uitgevoerde werk, dat in nauwe samenwerking met medewerkers van Rijkswaterstaat/RIKZ is uitgevoerd, en onder begeleiding van de Begeleidingsgroep Morfologie. Onderbouwing, verdere details, etc. zijn in een aantal appendices gerapporteerd, welke separaat beschikbaar zijn. Een overzicht van deze appendices is in dit rapport opgenomen.

De voorliggende studie bouwt voort op een aantal aanbevelingen van de Oost-Weststudie en in dat kader uitgevoerde studies naar de morfologie, het getij en de ecologie in de Westerschelde. Zij concentreert zich op die morfologische aspecten die direct van belang zijn voor de aspecten Veiligheid, Natuurlijkheid en Toegankelijkheid, op een tijdschaal van enkele decennia. Er wordt benadrukt dat de studie is uitgevoerd op basis van en met de op het moment van uitvoering beschikbare kennis en (numerieke) modellen, en daardoor haar beperkingen kent, met name ten aanzien van de kwantitatieve lange-termijn ontwikkelingen.

2 Het morfologisch systeem

Vanuit geologisch oogpunt bezien zijn estuaria jonge systemen, die meestal een verlandingstendens vertonen, dat wil zeggen dat het kombergend volume en de doorsnede van de geulen in de loop van de tijd fors afnemen. De Westerschelde wordt momenteel gekenmerkt door een meergeulenstelsel, dat waarschijnlijk op een tijdschaal van enkele decennia min of meer in een vorm van dynamisch evenwicht verkeert, dat wil zeggen dat, met name op kleinere schaal, geulen en intergetijdegebieden gevormd worden en weer verdwijnen. Afhankelijk van de natuurlijke processen (zeespiegelrijzing, sedimentaanbod, schorvorming e.d.) en menselijke ingrepen (verdiepingen, zandwinning, ont- en inpolderingen, stroombaangeleiding, enz.) kan het meergeulenstelsel verdrinken (d.w.z. dat de intergetijdegebieden niet meer droog vallen), verlanden (d.w.z. dat kombergend volume en geuldoorsneden sterk afnemen), dan wel dat een dynamisch evenwicht gehandhaafd blijft. Het is mogelijk, hoewel momenteel niet wetenschappelijk onderbouwd, dat het huidige dynamische evenwicht in de Westerschelde mede in stand wordt gehouden door de menselijke ingrepen (geulverdiepingen) van de laatste decennia.

Verder bovenstrooms wordt het Schelde-estuarium (Zeeschelde) gekenmerkt door een ééngeulsysteem.

Het morfologisch gedrag van het Schelde-estuarium speelt zich af op diverse schalen:

Mega-schaal dynamiek. Veranderingen op de schaal van het hele estuarium of van de grootste compartimenten van het estuarium (zoals de Westerschelde zelf). De bijbehorende tijdschalen zijn vele eeuwen. De relevante natuurlijke ontwikkelingen en menselijke ingrepen (forcering) zijn zeespiegelrijzing, inpolderingen en doorgaande zandwinning.
Macro-schaal dynamiek. Veranderingen op het niveau van hoofd- en nevengeulen, zoals functiewisseling van de geulen. De bijbehorende tijdschalen zijn decennia. De relevante externe forcering bestaat uit verdiepingen, onderhoudsbaggerwerk, storten van baggerspecie, de 18.6 jarige cyclus van het getij en dergelijke.
Meso-schaal dynamiek. Veranderingen zoals het ontstaan, migreren en verdwijnen van kortsluitgeulen, sedimenttransport over de platen, plaat-geul uitwisseling van sediment, enz. De bijbehorende tijdschalen zijn jaren. Relevante externe forcering bestaat uit extreme condities, getijbeweging, baggeren, storten en zandwinning.
Micro-schaal dynamiek. Veranderingen op het niveau van beddingvormen, zoals megaribbels. Bijbehorende tijdschalen zijn dagen. Relevante externe forcering is alleen natuurlijk (getijbeweging, golfwerking).

Merk op dat bovengenoemde tijdschalen de reponstijden van het systeem op die schaal zijn, hetgeen niet overeenkomt met de levensduur van zo'n morfologische eenheid (Bijlage B).

De voorliggende studie richt zich met name op de vraag onder welke omstandigheden het genoemd dynamisch evenwicht met een regenererend meergeulenstelsel kan blijven voortbestaan op een termijn van enkele decennia (tot ca. 2030), dus op de bovengenoemde macro- en mesoschaal. Dit zijn dus primair de schalen waarop de respons van het systeem op menselijk ingrijpen (verdiepen, speciestort, e.d.) bestudeerd dient te worden.

De huidige toestand

Het Schelde-estuarium is morfologisch opgebouwd uit twee deelsystemen. Zoals opgemerkt, bestaat het estuarium nabij en bovenstrooms Antwerpen uit een ééngeulsysteem (de rivier de Zeeschelde); in de Westerschelde zelf wordt het gebied gekarakteriseerd door een meergeulensysteem met hoofd- en nevengeulen, vloed- en ebscharen, relatief stabiele platen en hoogdynamische gebieden welke gevonden worden waar eb- en vloedgeulen door relatief kleine kortsluitgeulen met elkaar worden verbonden. Het mondingsgebied, de Voordelta, vormt een groot en integraal onderdeel van het totale Schelde-estuarium. Vanuit de morfologie is het Schelde-estuarium bestudeerd vanaf de Vlakte van de Raan tot aan het troebelingsmaximum rondom Antwerpen. De voordelta van het Schelde-estuarium bestaat uit holocene afzettingen, en is dus relatief makkelijk erodeerbaar. Historische gegevens suggereren dat de voordelta van het Schelde-estuarium momenteel beneden haar evenwichtsdiepte ligt.

Bedijkingen en inpolderingen in het verleden hebben geleid tot een fixatie en stroomlijning van het totale estuarium. De breedte van het systeem ligt vast waardoor het systeem op mega-schaal geen horizontale vrijheidsgraden meer heeft. Gestuurd door deze vastlegging heeft het Schelde-estuarium een groot en opvallend regelmatig repeterend patroon ontwikkeld. Dit bestaat uit een systeem van gekromde ebgeulen en, min of meer parallel daaraan, grote rechte vloedgeulen. Kleinere 'kortsluitgeulen' vormen de verbinding tussen de hoofdgeulen. De dynamiek en het regenererend vermogen van het huidige geul-plaatsysteem worden in belangrijke mate bepaald door de aanwezigheid en het quasi-cyclische gedrag van de kortsluitgeulen, met name daar waar eb- en vloedgeulen elkaar ontmoeten. De aanwezigheid van het meergeulensysteem op macroschaal is de motor voor het bestaan van de kortsluitgeulen.

Lange-termijn ontwikkeling

De historische ontwikkelingen werken nog steeds door op de morfologie van het systeem. Het huidige estuarium is een verschijningstoestand, gecreëerd door een combinatie van ingrepen en autonome factoren (zeespiegelrijzing en beschikbaarheid van zand). In de loop van de laatste vijfhonderd jaar is het bergend volume van het Schelde-estuarium fors afgenomen (zie Fig. 1). Als gevolg daarvan heeft een aantal geulen hun komvullende functie verloren. Het Vaarwater Langs Hoofdplaat bijvoorbeeld degenereert daardoor.

In feite is het Schelde-bekken geëvalueerd van een estuariene delta, dat mede gevormd werd door een deel van de rest van de Zeeuwse delta, tot een estuarium met meerdere geulen. Een uitgebreide beschrijving van de historische ontwikkelingen in opgenomen in Appendix A.

Op langere tijdschaal gezien is de natuurlijke ontwikkeling van het Schelde-estuarium (en van veel estuaria met een geringe bovenafvoer in het algemeen) afhankelijk van de balans tussen sediment beschikbaarheid (m.n. vanuit de aan de monding aangrenzende kust en zeebodem) en sedimentvraag ten gevolge van relatieve zeespiegelstijging. Bij de relatief geringe zeespiegelstijging van de laatste eeuwen lijkt de natuurlijke ontwikkeling van dit type estuaria (als gevolg van een op sedimentimport gerichte transportcapaciteit) te leiden tot "verlanding" naar een ééngeulsysteem met een karakteristieke tijdschaal van orde eeuwen, zoals bij het Eems-Dollard estuarium. Uit geologische informatie kan geconcludeerd worden dat een toename van de relatieve zeespiegelstijging, zeg met een factor twee tot drie, onder bepaalde voorwaarden (zoals een substraat waarover de

transgressie kan plaatsvinden en het verder ontbreken van geologische beperkingen) kan leiden tot een natuurlijk dynamisch evenwicht waarbij de sediment-beschikbaarheid en de sedimentvraag met elkaar in evenwicht zijn. Het dynamische karakter van het estuarium zou dan op een min of meer natuurlijke wijze gehandhaafd kunnen blijven.

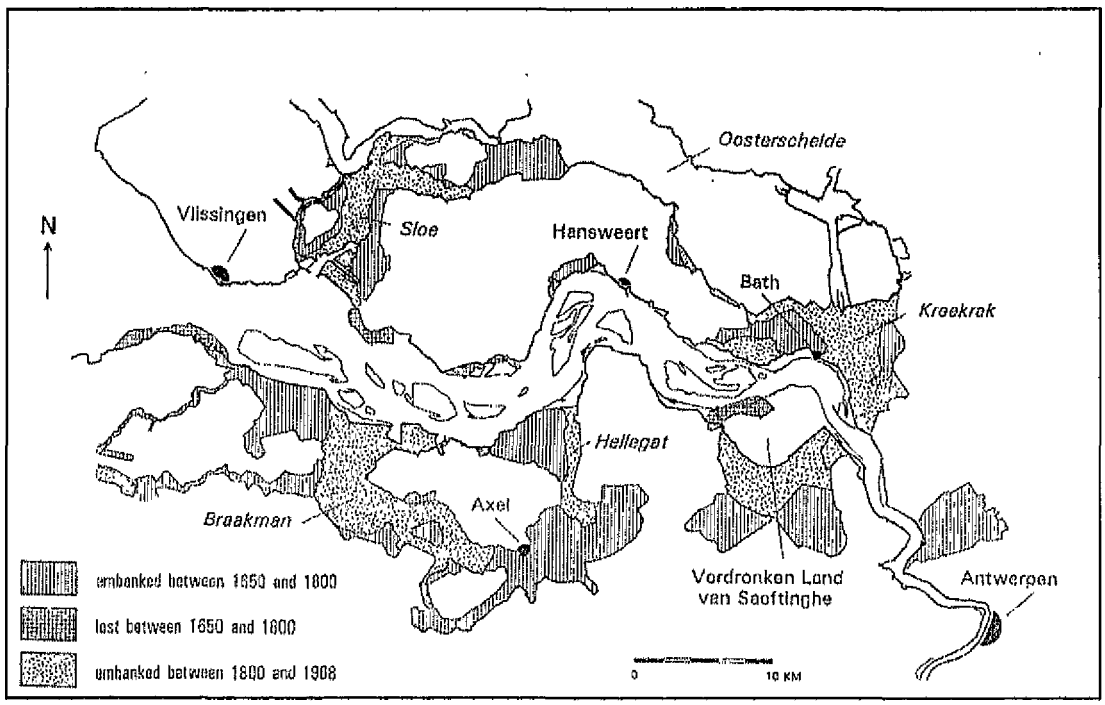


Fig. 1: Historische afname komberging Westerschelde (v.d. Spek, 1994).

Bij een nog sterkere toename (zeg een factor drie tot vier en hoger) is de verwachting dat verdrinking van zo'n estuarium zal optreden, ofwel door een gebrek aan sediment dan wel door een gebrek aan transportcapaciteit.

3 Werkhypothese en opzet van het onderzoek

Het bergend volume van het Schelde-estuarium is de laatste vijfhonderd jaar fors afgenomen door natuurlijke processen en menselijke ingrepen. Als gevolg van deze ontwikkeling op mega-schaal heeft een aantal geulen van het huidige meergeulenstelsel hun komvullende functie verloren. De huidige (horizontale) afmetingen van het Schelde-estuarium worden daarom bepaald door de afmetingen van dit meergeulenstelsel, bestaande uit een complex van platen, en eb- en vloedgeulen. Deze plaat-geulcomplexen vormen morfologische (morfometrische) eenheden en het Schelde-estuarium kan geschematiseerd worden als een geschakeld stelsel van zulke eenheden.

De **werkhypothese** bij de huidige studie is dat op een tijdschaal van enkele decennia dit meergeulensysteem (i.e. het stelsel van geschakelde morfologische eenheden) zichzelf in stand houdt door transportprocessen op de macro- en meso-schaal. Er wordt verondersteld dat eventuele morfologische veranderingen, in gang gezet door menselijke ingrepen op de macro- en meso-schaal (baggeren en storten), op die tijdschaal optreden, en te superponeren zijn op de autonome ontwikkeling op een veel grotere tijdschaal van het systeem.

Via schaaloverdracht kunnen de ontwikkelingen op macro- en mesoschaal overigens op mega-schaal het Schelde-estuarium beïnvloeden. Deze werkhypothese impliceert onder meer dat het estuarium zal kunnen degenereren tot een ééngeulsysteem met een aanzienlijk kleinere dwarsdoorsnede, indien de plaat-geulcomplexen (morfologische eenheden) fors en onomkeerbaar worden verstoord (i.e. volstorten van de nevengeulen). Deze hypothese wordt in de volgende hoofdstukken nader onderbouwd.

Zoals in de Inleiding is beschreven, is op basis van de doelstellingen van de diverse Werkgroepen, het uitgangspunt van de morfologische studie het handhaven van het meergeulenstelsel op een tijdschaal van decennia in relatie tot de "natuurlijke" morfologische ontwikkeling van het systeem. Dit impliceert tevens dat onderzocht dient te worden wanneer ook deze natuurlijke ontwikkelingen versneld worden, d.w.z. gezocht wordt naar de grenzen van het systeem.

Het is echter niet goed bekend, en binnen het huidige kader ook niet goed te onderzoeken, hoe de diverse morfologische eenheden interacteren, i.e. het is niet goed bekend of bijvoorbeeld een lokale degeneratie slechts lokale effecten zal hebben, dan wel het gehele systeem zal beïnvloeden. Daarom is in de huidige studie een "no-regret" scenario gedefinieerd, waarbij een zodanig beheer van het systeem wordt verondersteld dat **alle** geulen (morfologische eenheden) op macro- en mesoschaal gehandhaafd blijven. Merk op dat het handhaven van het meergeulenstelsel een noodzakelijke, doch geen voldoende voorwaarde is voor het handhaven van de plaatgebieden.

Bovenstaande overwegingen hebben geleid tot de volgende aanpak van de voorliggende studie:

1. Bestuderen van de historische ontwikkelingen van het Schelde-estuarium om de functie-veranderingen in het systeem vast te leggen (hoofdstuk 4),

2. Identificeren van de rol van de voordelta in de ontwikkeling van het Schelde-estuarium, met name met betrekking tot de uitwisseling van sedimenten tussen delta en estuarium (hoofdstuk 4),
3. Afschatting van de dimensies van een ééngeulsysteem in het Schelde-estuarium op basis van morfologische evenwichtsrelaties en de tijdschaal van de degeneratie tot zo'n enkelvoudig geulsysteem (hoofdstuk 4),
4. Schematisatie van het gehele Schelde-estuarium in deze morfometrische eenheden (morfologische cellen) op basis van berekeningen met DELFT2D-mor van het residuele sedimenttransport en bathymetrische kaarten (hoofdstuk 5),
5. Uitvoeren van een stabiliteitsanalyse van de primaire morfometrische eenheden van het Schelde-estuarium, i.e. de plaat-geulcomplexen ("de cellen"), om te bestuderen bij welk beheer (bagger/stortstrategie) het meergeulensysteem gehandhaafd blijft (hoofdstuk 5).

Deze activiteiten geven inzicht in het functioneren van het systeem. De verkregen resultaten hebben een hoog abstractie-niveau en worden, bij toepassing van de no-regret beheerstrategie, niet direct beïnvloed door dit beheer. De volgende activiteiten worden voor de hieronder beschreven scenario's uitgevoerd:

6. Het bruto sedimenttransport (i.e. de som van het totale eb- en vloedtransport) per morfometrische eenheid wordt berekend met DELFT2D-mor voor een morfologisch getij; tezamen met 4. en 5. levert dit de stortcapaciteit voor baggerspecie in het Schelde-estuarium (hoofdstuk 6),
7. De baggervolumina (onderhoud en aanleg, voor zover relevant) voor de diverse scenario's worden bepaald op basis van ervaringscijfers, kuberingen en ESTMORF-simulaties (hoofdstuk 6),
8. Op basis van 6. en 7. kan dus de no-regret strategie worden ontwikkeld voor het Schelde-estuarium voor de diverse scenario's (hoofdstuk 6), i.e. hoeveel baggerspecie kan gestort worden en hoeveel dient uit het systeem verwijderd te worden om het meergeulensysteem geheel te handhaven,
9. Met behulp van ESTMORF-simulaties wordt vervolgens de morfologische ontwikkeling tot 2030 bepaald om de ontwikkeling van de platen en de geulen te bestuderen (hoofdstuk 7),
10. Vaststellen van diverse indicatoren om de ontwikkeling van het Schelde-estuarium te beschrijven en te monitoren (hoofdstuk 8),
11. De extreme waterstanden bij de diverse scenario's worden met behulp van WAQUA-simulaties bepaald t.b.v. de functie Veiligheid (hoofdstuk 9).

Om inzicht te krijgen in de effecten van de huidige en door Antwerpen gewenste verdiepingen, autonome ontwikkelingen (zeespiegelrijzing) en van het beheer van het systeem zijn de volgende scenario's door de Begeleidingsgroep Morfologie gedefinieerd:

	toenemende diepte →		
scenario beheer zeespiegelrijzing	**(A) referentie (1996)**	**(B) huidig (1999)** huidig beleid 20 cm/eeuw	**(E) toekomstig (14 m)** no-regret 20 cm/eeuw
scenario beheer zeespiegelrijzing		**(C) huidig (1999)** no-regret 20 cm/eeuw	**(F) toekomstig (14 m)** no-regret 60 cm/eeuw
scenario beheer zeespiegelrijzing		**(D) huidig (1999)** no-regret + ontpolderen†) 20 cm/eeuw	

Tabel 1: Combinatie scenario's en beheer; †) 3000 ha nabij Ruppelmonde.

4 Gedrag van het Schelde-estuarium op mega-schaal

Voordelta als onderdeel van het Schelde-estuarium

Het geulenstelsel in het mondingsgebied is gedurende de laatste eeuwen veelvuldig veranderd, zie Appendix A. Aan het eind van de 16e eeuw was een radiaal-georiënteerd patroon aanwezig met vijf geulen die door de buitendelta liepen, waarvan de Wielingen de belangrijkste was. Vervolgens ontwikkelde de Deurloo zich in de 17e en 18e eeuw tot de belangrijkste vaargeul. Na 1800 nam de betekenis van de Deurloo weer af en nam de betekenis van de Wielingen en het Oostgat toe. Gedurende genoemde periode tot op heden is de Vlakte van de Raan vrij stabiel geweest al wordt ook genoemd dat sinds 1800 sprake is van een verondieping van de Vlakte. Veranderingen in de morfologie van de buitendelta zijn waarschijnlijk gestuurd door veranderingen in de hydraulische condities in het gebied, zoals de vervroeging van de getijstroming in het zeegat na de 17e eeuw als gevolg van de verlanding van het estuarium.

Historische gegevens suggereren dat de voordelta van het Schelde-estuarium momenteel beneden haar evenwichtsdiepte ligt. Als dit juist is, impliceert dit dat deze voordelta mogelijk als buffer kan dienen om zand in het systeem vast te houden, bijvoorbeeld ten behoeve van een toekomstige zandvraag bij verdergaande zeespiegelrijzing. Voldoende sediment-uitwisseling tussen voordelta en Westerschelde is daartoe uiteraard een noodzakelijke voorwaarde. De voordelta speelt een cruciale rol bij de lange-termijnontwikkeling van het Schelde-estuarium op mega-schaal.

Op basis van eerder uitgevoerde ASMITA-simulaties (een lange-termijn morfologisch box-model op een hoog aggregatie-niveau) wordt geconcludeerd dat de voordelta (zowel de geulen als de ondiepe delen) zand tijdelijk kan opnemen en afgeven. Eén en ander is beschreven in Appendix I. Als zand op de voordelta geborgen kan worden, zal een deel beschikbaar kunnen blijven voor de Westerschelde. Welk deel van het zandvolume verloren gaat door export naar de Noordzee en aangrenzende kustgebieden en op welke termijn dit gebeurt zijn echter momenteel onbekend. De ASMITA-simulaties suggereren dat de transportcapaciteit in de mond onvoldoende is om de zandvraag van de Westerschelde, bijv. t.g.v. zandwinning en het verwijderen van de te baggeren specie, te compenseren. Dit "blokkerende" effect zou vergroot kunnen worden door grootschalig storten in het westelijk deel van de Westerschelde. Tijdschalen voor aanpassingen aan gewijzigde omstandigheden zijn in het algemeen groot, d.w.z. 100 jaar of meer.

De laatste decennia neemt de invloed van menselijke ingrepen snel toe. Door de uitbouw van Zeebrugge wordt de Wielingen in noordelijke richting "gedrukt". Ook is het Scheur verdiept, zonder dat dit echter invloed blijkt te hebben op het naastgelegen plaatgebied: onder evenwichtscondities zou een verdieping van de geul leiden tot erosie van het naastgelegen plaatgebied. Dat dit niet gebeurt is inderdaad een indicatie dat de omvang van dit plaatgebied kleiner is dan haar evenwichtswaarde.

Door het grote zandvolume dat kan worden geborgen op de Vlakte van de Raan en de uitwisseling tussen de buitendelta en de Westerschelde o.i.v. de getijstroming dienen de morfologische ontwikkelingen van het estuarium in samenhang met die in de Voordelta te worden beschouwd. Vragen die hierbij centraal staan zijn: (i) onder welke omstandigheden

wordt sediment gebufferd en weer vrijgegeven, (ii) wat is de transportcapaciteit van de geulen tussen de kust en het estuarium, (iii) welke zijn de tijdschalen waarop veranderingen zich voltrekken? en (iv) de rol van het overall kustbeheer op de beschikbaarheid van sediment.

Eén-geulsysteem in de Westerschelde

Het type estuarium met één enkele geul en met platen, slikken en schorren langs haar oevers, bevindt zich over het algemeen in een proces van verlanding. De omvang van de geuldoorsnede wordt bepaald door de rivierafvoer, in dit geval de Schelde. Binnen het morfologische onderzoek zijn afmetingen van het Schelde-estuarium afgeschat in geval het estuarium zou degenereren tot een eengeulsysteem. De invloed van de Schelde-afvoer speelt hierbij geen belangrijke rol.

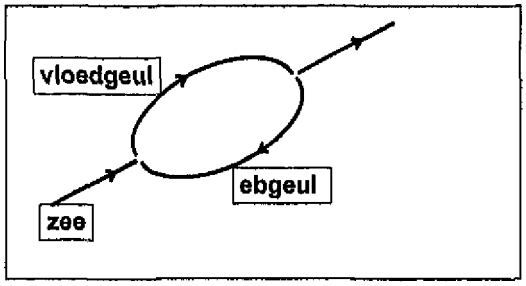
Een hiervoor geschikte, en in de morfologie wordt veelvuldig gebruikte relatie is $A = \alpha P^n$, met $n \approx 1$: de dwarsdoorsnede A van een geul is een functie van (vrijwel evenredig met) het achterliggende getijprisma P van de kom die door die geul gevuld wordt. Deze relatie is gebruikt om een schatting te maken van de vorm van het ééngeulsysteem dat zou ontstaan na degeneratie van het huidige meergeulensysteem door haar stroomopwaarts te integreren over de lengte van de Westerschelde, startend vanaf de zee (Vlissingen). Uit een empirische analyse uit de literatuur volgt dat de maximale dwarsdoorsnede van een geul in een ééngeulsysteem ca. 25000 m^2 bedraagt. Integratie van de empirische morfologische relaties leert dan dat:

- Het totale volume van het ééngeulsysteem zal afnemen tot ca. 750 à $950 \cdot 10^6$ m^3 t.o.v. NAP in relatie tot een huidig volume ter grootte van ca. $2500 \cdot 10^6$ m^3, i.e. een afname van 40 %,
- De geuldiepte zal variëren van ca. 10 m in het mondingsgebied tot ca. 5 m bij de Belgisch-Nederlandse grens,
- Uitgaande van een netto zandimport t.g.v. $1 \cdot 10^6$ m^3 per jaar impliceert dit een tijdschaal van ca. 1000 jaar voor het verlandings/degeneratieproces.

Opgemerkt wordt dat een schatting van de afmetingen van het ééngeulsysteem ook gemaakt is op basis van een aanname voor de geuldoorsnede bij de Belgisch-Nederlandse grens, en de daarbij behorende stroomafwaartse integratie van de empirische relatie. De resultaten van deze afschatting zijn echter niet realistisch en daarom niet in dit rapport, maar wel in Appendix C opgenomen.

5 Gedrag van het Schelde-estuarium op macro- en meso-schaal - handhaving van het meergeulenstelsel

Het gedrag van het Schelde-estuarium op macro- en meso-schaal kan geanalyseerd worden op basis van de morfometrische eenheden of morfologische cellen, bestaande uit een vloedgeul, een ebgeul en de tussenliggende plaat, zoals geschetst in Figuur 2.



Figuur 2: Elementaire morfometrische eenheid (morfologische cel).

Schematisatie Westerschelde in morfometrische eenheden

Op basis van berekeningen met DELFT2D-mor van het netto sedimenttransport over één morfologisch getij (d.w.z. een 12.5-uurs getij dat karakteristiek is voor de lange-termijn sedimenttransporten) voor de referentie-situatie (1996, zie tabel 1) en gedetailleerde bathymetrische kaarten is het Schelde-estuarium geschematiseerd in de vorm van een aantal geschakelde morfometrische eenheden (morfologische cellen of schakels) op macro- en meso-schaal. De resulterende schematisatie is in Figuur 3 gegeven.

Stabiliteit van de morfometrische cellen

De stabiliteit van zo'n morfometrische eenheid (geulenstelsel) voor relatief kleine verstoringen wordt bepaald door het evenwicht tussen de transportcapaciteit van elk der geulen onderling en van het geulenstelsel in haar geheel. Een kleine verondieping in één der geulen leidt lokaal tot het vernauwen van de geuldoorsnede en daarmee tot het vergroten van de lokale stroomsnelheid, waardoor de transportcapaciteit toeneemt, en de verondieping weggeërodeerd wordt. Dit is dus een stabiele situatie. Indien echter de verondieping een zekere grootte overschrijdt, neemt de hydraulische ruwheid van die geul snel toe, met als gevolg dat er minder water door de verondiepte geul, en meer water door de verdiepte geul stroomt. Het gevolg is dan een afnemende transportcapaciteit in de verondiepte geul, met als gevolg een zich versterkend proces: de verondiepte geul wordt steeds ondieper en degenereert. Dit is dus een instabiele situatie.

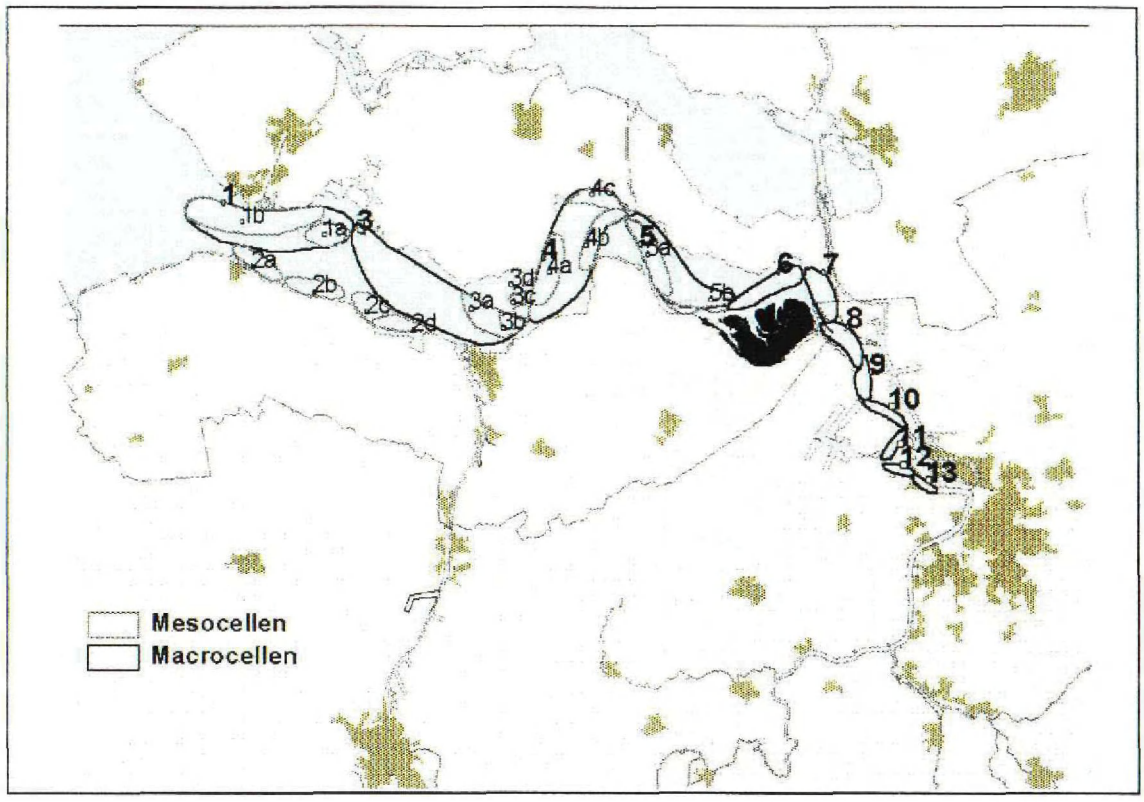


Fig. 3: Morfologische schematisatie van het Schelde-estuarium in morfometrische eenheden.

Dit proces is gekwantificeerd met een stabiliteitsanalyse van het stelsel vergelijkingen dat de morfologische ontwikkeling van zo'n geulenstelsel beschrijft, waarbij de transportverdeling over de knooppunten, het sedimenttransport in de twee geulen en de plaat-geulontwikkeling zijn verdisconteerd. De analyse is in detail beschreven in Appendix D. Onderzocht is wanneer een verstoring, in de vorm van een verdieping of een speciestort, in één der geulen uitdempt, dan wel groeit. De groei van zo'n verstoring wordt geïnterpreteerd als de aanzet tot degeneratie van het plaat-geulcomplex tot een ééngeulsysteem. Uit deze analyse en haar interpretatie kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

1. Een tweegeulsysteem kan zich ontwikkelen tot een beperkt aantal (meestal drie) stabiele evenwichtssituaties in de zin van een beperkt aantal stabiele combinaties van afmetingen van de eb- en vloedgeul, namelijk één der geulen dicht en de andere dus open (twee evenwichtssituaties) en beide geulen open en op hun evenwichtsdiepte,
2. Het verdiepen van één der geulen (binnen realistische grenzen) heeft geen invloed op de stabiliteit van het geulsysteem; de tussenliggende plaat zal naar verwachting echter een paar cm per jaar eroderen via de plaat-geulinteractie,
3. Deze degeneratie kan omkeerbaar zijn, mits de aandrijvende krachten op een hoger schaalniveau gehandhaafd blijven en mits de totale verstoring gemeten over de gehele karakteristieke tijdschaal van het plaat-geulcomplex kleiner is dan de over die periode relevante transportcapaciteit. Met andere woorden: de stortcapaciteit van een geul mag tijdelijk overschreden worden; en overschrijding over een te lange periode leidt waarschijnlijk tot een irreversibele degeneratie,
4. De onder 3. genoemde hoeveelheid te storten baggerspecie betreft de netto hoeveelheid:

- storten van een gelijke hoeveelheid in beide geulen heeft geen invloed op de morfologische stabiliteit van het systeem,
- het relevante stortvolume betreft het verschil van storten en verdiepen, m.a.w. storten in de geul die door baggerwerk op diepte wordt gehouden, heeft geen invloed op de stabiliteit van het systeem (maar wel op de hoeveelheid baggerwerk zelf, uiteraard),

5. Indien in één der geulen een hoeveelheid baggerspecie gestort wordt, afkomstig vanuit een ander gebied, die groter is dan 10 % van de bruto sedimenttransportcapaciteit van het plaat-geulcomplex, zal de daardoor veroorzaakte verstoring groeien en kan een oorspronkelijk stabiel systeem degenereren tot een ééngeulsysteem; de tussenliggende plaat zal naar verwachting een paar cm per jaar aangroeien,
6. Indien baggerspecie, gebaggerd in een geul van zo'n complex, wordt gestort in de parallelle geul, ligt het omslagpunt op 5 % van de bruto sedimenttransportcapaciteit,
7. Indien baggerspecie in één geul gebaggerd en gestort wordt, is de netto stort- of baggerhoeveelheid van belang voor de stabiliteit van het systeem.

De onder 5., 6. en 7. genoemde consequenties zijn in Fig. 4. geschetst.

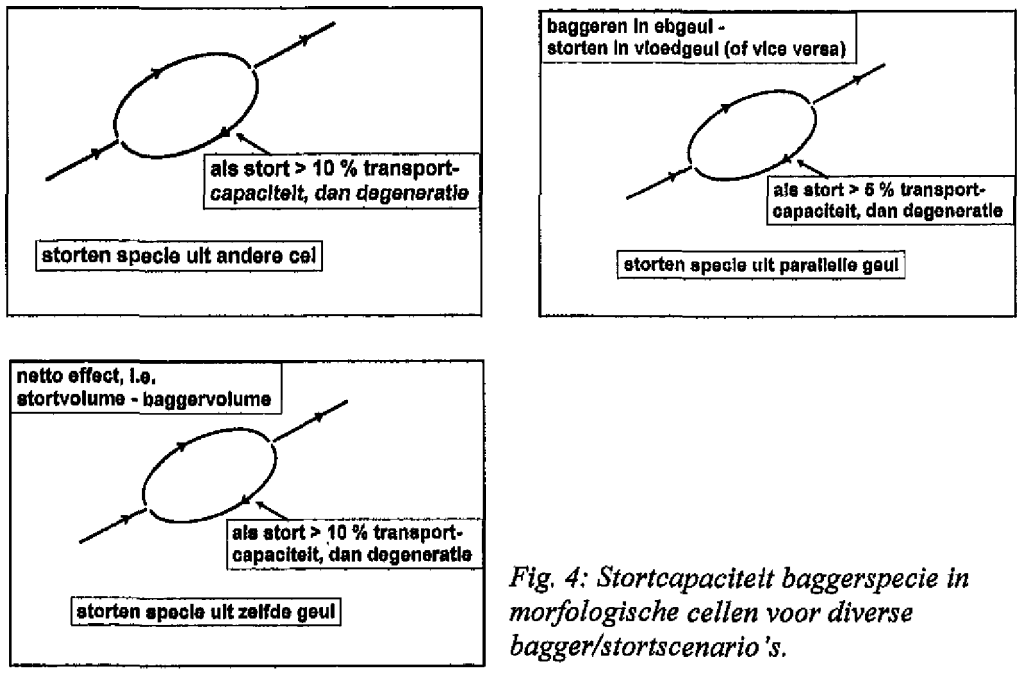


Fig. 4: Stortcapaciteit baggerspecie in morfologische cellen voor diverse bagger/stortscenario's.

Merk op dat het cellenconcept een interpretatie-gereedschap is en geen numeriek-wiskundig model. of in het gedrag van de hoogdynamische gebieden; het voorspelt dus slechts een deel van de geometrische veranderingen. Daarnaast kent het concept en de tot nog toe uitgevoerde studie een aantal (inherente) beperkingen:

- Er wordt verondersteld dat het Schelde-estuarium momenteel min of meer in (een dynamisch) evenwicht verkeert. Autonome ontwikkelingen worden nu dus niet door het concept beschreven,
- Het cellenconcept geeft geen inzicht in de stabiliteit van het gehele estuarium of in de interactie tussen de diverse cellen,

- Het gedrag van de hoogdynamische gebieden, waar eb- en vloedgeulen door nevengeulen verbonden worden, kan niet met het cellenconcept worden bestudeerd, en is vooralsnog niet goed begrepen,
- De sedimentuitwisseling(scapaciteit) tussen Westerschelde en voordelta, en het gedrag van de voordelta zelf, is onbekend, doch waarschijnlijk zeer belangrijk voor het overall gedrag van het systeem, en wordt niet met het cellenconcept beschreven.

Transportcapaciteit cellen op basis van DELFT2D-mor berekeningen

Vervolgens is op basis van de schematisatie van Fig. 3 met behulp van simulaties met DELFT2D-mor (een numeriek 2D / quasi-3D morfodynamisch model) over één morfologisch getij het bruto sedimenttransport, i.e. de transportcapaciteit door de diverse cellen bepaald voor de scenario's A, B, D en E (zie Tabel 1). De werkwijze en de resultaten zijn beschreven in Appendix F.

De resultaten zijn weergegeven in de Figuren 5, 6, 7 en 8; de resultaten voor scenario B en C zijn gelijk aangezien in het geval van het no-regret scenario de transportcapaciteit niet door bagger- en stortinspanningen wordt beïnvloed. De verschillen met scenario A (huidige situatie) en E (verder verdiepen) worden bepaald door verschillen in bathymetrie (geuldiepte), en blijken maximaal orde 10 % te bedragen. Een overall toename van de geuldiepte blijkt te leiden tot een toename van de transportcapaciteit in het westelijk deel en een afname in het oostelijk deel; overall neemt de transportcapaciteit echter af.

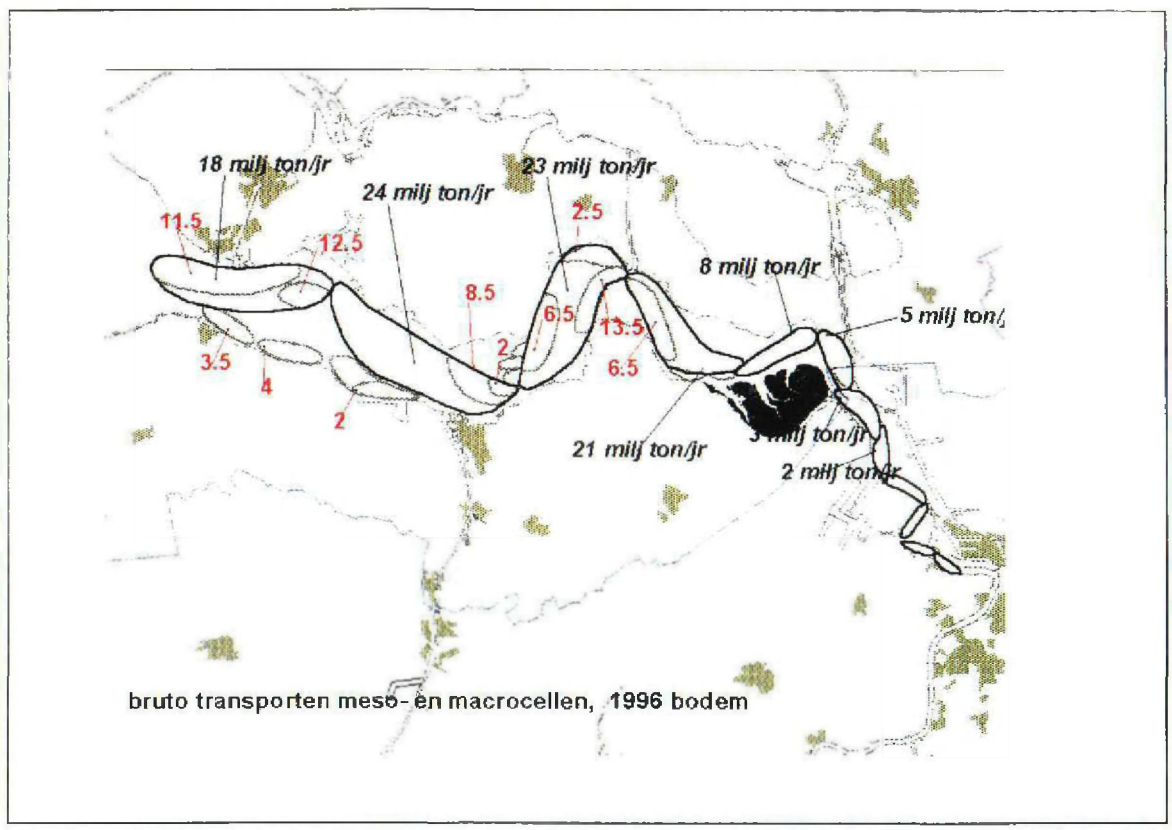


Fig. 5: Bruto-transportcapaciteit voor scenario A: referentie situatie (1996).

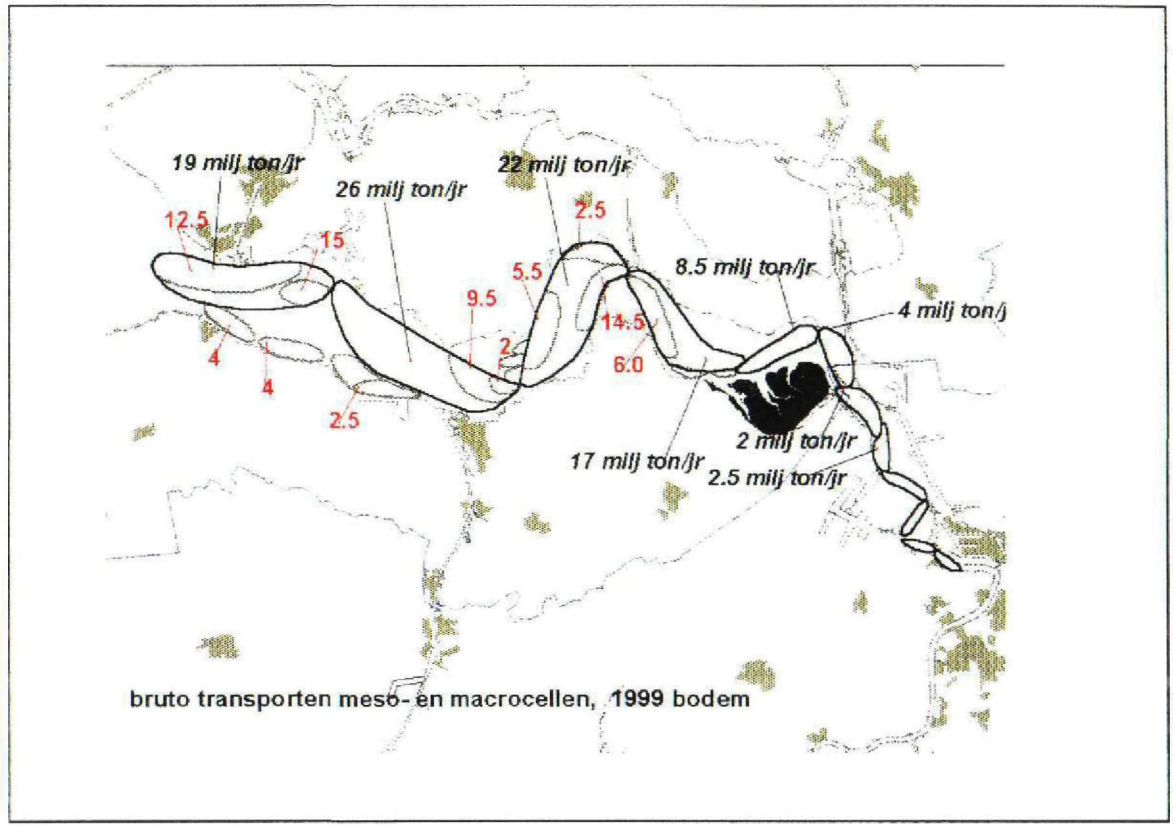


Fig. 6: Bruto-transportcapaciteit voor scenario B en C: huidige situatie (1999).

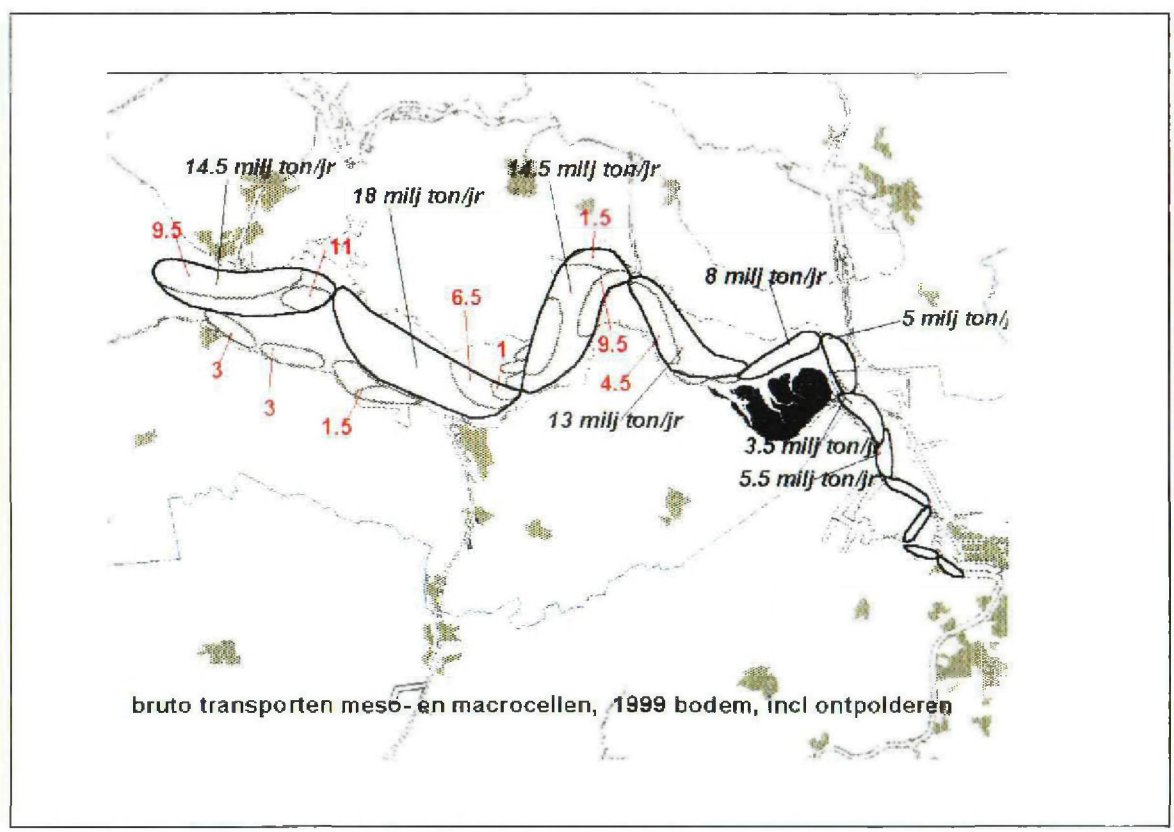


Fig. 7: Bruto-transportcapaciteit voor scenario D: huidige situatie (1996), incl. ontpolderen.

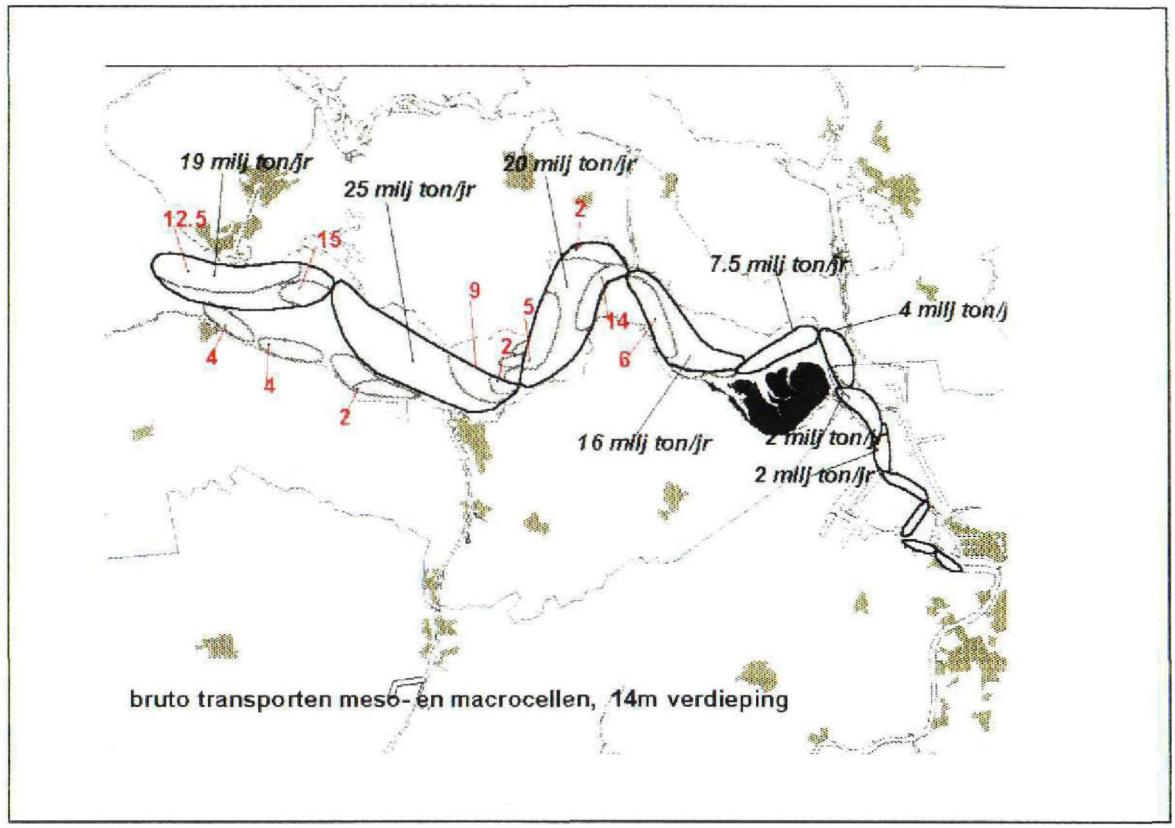


Fig. 8: Bruto-transportcapaciteit voor scenario E: toekomstige situatie (14 m).

Merk op dat de effecten van ontpolderen **voor het hier gekozen scenario** leiden tot een verlaging van de transportcapaciteit in het westelijk en midden deel van het estuarium, en een geringe vergroting in het oostelijk deel. Dit op het eerste gezicht wat onverwachte resultaat is waarschijnlijk het gevolg van veranderingen in de getijbeweging t.g.v. deze ontpoldering. Er wordt benadrukt dat het effect van ontpolderen op de transportcapaciteit sterk afhankelijk is van de grootte en de lokatie van de ontpoldering, en dat het huidige resultaat niet als algemene conclusie mag worden geïnterpreteerd.

Toetsing met de praktijk

Op basis van deze berekende bruto transportcapaciteit kan dus de netto stortcapaciteit voor baggerspecie in de verschillende geulen bepaald worden; deze bedraagt immers 5 tot 10 % van de transportcapaciteit. In de tachtiger en negentiger jaren (referentie situatie, scenario A) is ca. 9 - 13 Mton zand per jaar gebaggerd en gestort (hoofdzakelijk in het oostelijk deel van de Westerschelde - zie hoofdstuk 6), en ca 3.5 Mton/jaar zand gewonnen. Volgens Fig. 5 is de totale stortcapaciteit in dit geval ca 10 Mton/jaar. Met andere woorden, in de referentiesituatie was de transportcapaciteit, mede ten gevolge van de zandwinning, (net) voldoende om de gebaggerde specie in de geulen te storten, zonder dat een onomkeerbare degeneratie van het systeem optrad.

Tabel 2 geeft een vergelijking van de voor 1996 bepaalde stortcapaciteit met de ervaringen van de beheerder met het daadwerkelijk uitgevoerde stortbeleid en de daarbij al dan niet opgetreden moeilijkheden. De verificatie is in detail beschreven in Appendix E. Lokaal in de Schaar van de Waarde (cel 5) is de stortcapaciteit overschreden, met als gevolg het

baggerspecie elders wordt gestort, te herstellen, hetgeen momenteel onderwerp van nader onderzoek is. Het aaneengroeien en ophogen van de platen lijkt zich nu voor te doen in het westelijk deel van de Westerschelde, alwaar momenteel een groot deel van de baggerspecie wordt gestort.

Cel	Periode	Geul	Stortcriterium		Netto hoeveelheid gestort		Gedrag geul
			Mm^3/jaar	Mton/jaar	Mm^3/jaar	Mton/jaar	
1a Schaar van de Spijkerplaat	1985-1997	eb	0,7	0,9	0,5	0,7	Cel 1a bestaat uit kortsluitende drempelgeulen met een quasi-cyclisch gedrag. De cel *degenereert sinds 1984. Echter,* er wordt beneden de norm gestort.
1a Schaar van de Spijkerplaat	na 1997	eb	0,9	1,2	4,0	5,3	Ver boven de norm. Momenteel grote stortproblemen in kortsluit-geul op Schaar v.d. Spijkerplaat
3 geul Everingen	1990-1995	vloed	0,8	1,1	0,5	0,7	Volgens theorie onder het omslagpunt. De vloedgeul erodeert enigszins. De ebgeul is redelijk stabiel.
4 Gat van Ossenisse	1985-1995	eb en vloed	1,7	2,3	1,8	2,4	Na decennia van sedimentatie is de ebgeul over de periode '86-'96 stabiel. De vloedgeul erodeert van nature, d.w.z. extra storten behoeft niet bezwaarlijk te zijn, al lijkt de stortcapaciteit volgens het criterium bereikt.
5 Schaar van Valkenisse Schaar van Waarde	1990-1995	vloed	0,7	0,9	0,1	0,1	Onder de grens voor het storten. De vloedgeul vertoont sinds 1990 een netto erosie. De ebgeul verruimt mede a.g.v. baggeren.
6 Schaar van de Noord	1980-1985	vloed	0,3	0,4	0,9	1,2	Boven de norm. De vloedgeul liep voor de beschouwde periode vol. Momenteel wordt er niet meer gestort. Het systeem lijkt zich nu weer te herstellen. De ebgeul is netto geërodeerd.

Tabel 2: Vergelijking netto stortvolume en -massa met stortcriterium (volumina zijn 'beunkuubs' voor scenario A).

6 Bagger- en stortvolumina

De hoeveelheden te baggeren sediment kunnen onderverdeeld worden in:

- aanlegvolumina (alleen relevant voor een toekomstige situatie (14 m)) verkregen uit kuberingen, en
- onderhoudsbaggerwerk.

De aanlegvolumina zijn bepaald door AWZ en als functie van de te realiseren vaardiepte in Fig. 9 opgenomen.

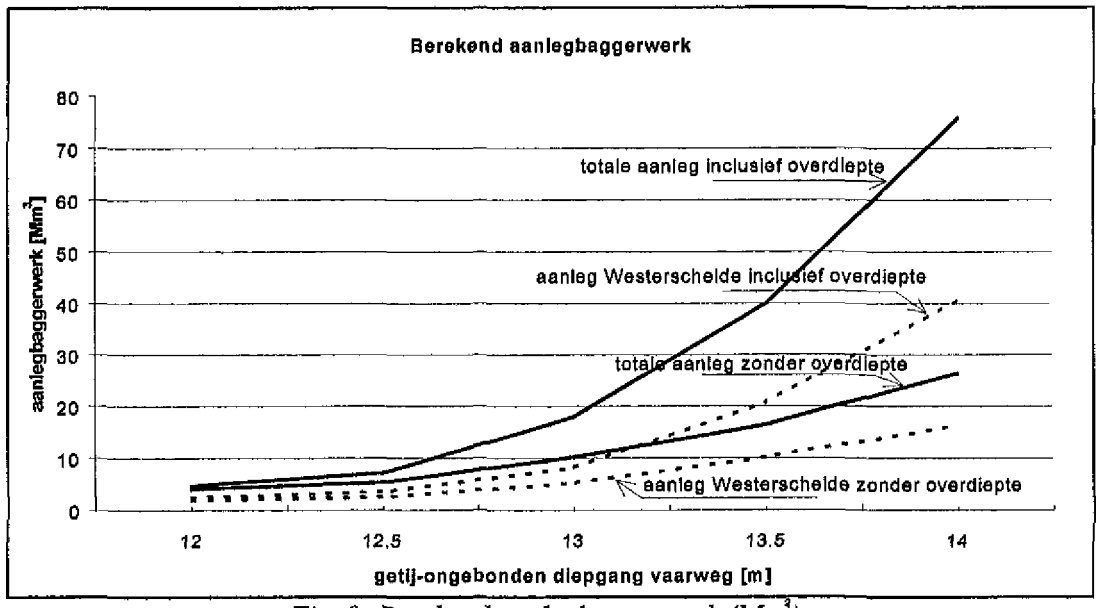


Fig. 9: Berekend aanlegbaggerwerk (Mm^3).

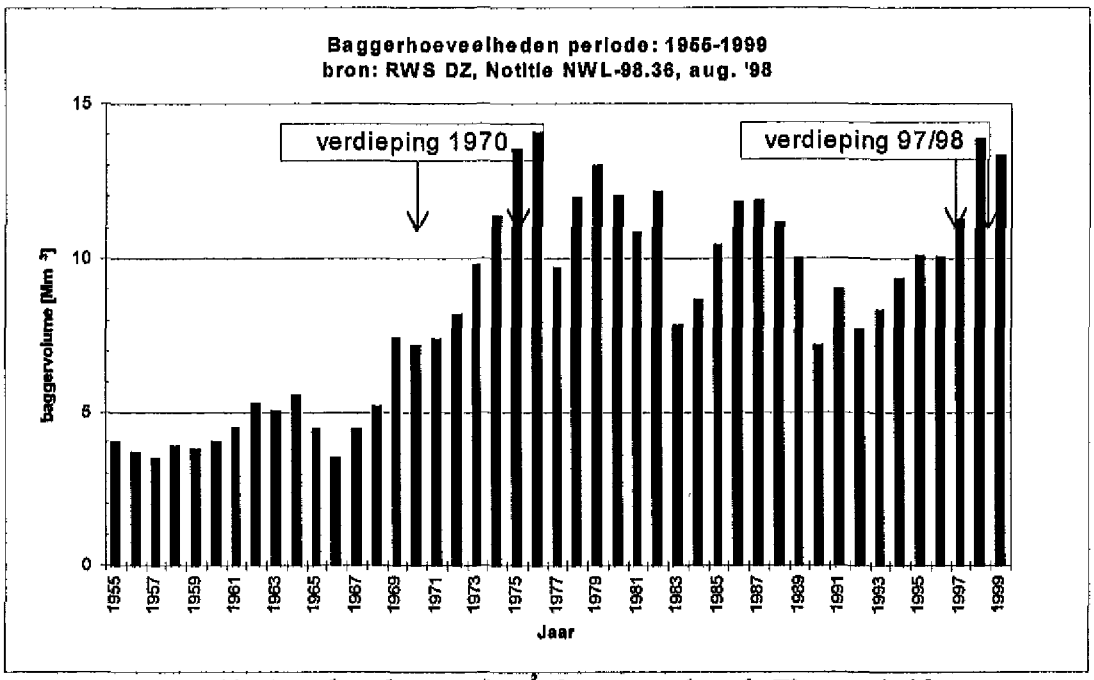


Fig. 10: Actuele volumina (Mm^3) baggerwerk in de Westerschelde.

De toename in baggervolume tussen 1970 en 1974 is het gevolg van de 1970-verdieping, de hoge inspanning in de tweede helft van de 80-er jaren bevatten aanlegwerk voor de verbreding van het Vaarwater boven Bath en de verbreding van het Kanaal Gent-Terneuzen.

Voor de huidige situatie (1999) zijn nauwelijks ervaringscijfers beschikbaar, voor de toekomstige situatie uiteraard in het geheel niet. Het onderhoudsbaggerwerk is daarom ook bepaald met ESTMORF-simulaties; ESTMORF is een hybried (in de zin van een combinatie van een deterministisch waterbewegingsmodel en empirische morfologische relaties) quasi-2Dh lange-termijn morfologisch model. In deze simulaties wordt ten opzichte van de referentie bathymetrie een gewenste vaarwegdiepte voorgeschreven, welke wordt onderhouden door regelmatig onderhoudsbaggerwerk. De te verwijderen specie wordt gestort volgens een stortstrategie gebaseerd op de "10 %-regel", d.w.z. dat in elke cel maximaal 10 % van de bruto transportcapaciteit gestort wordt en volgens de "5 %-regel". Indien het onderhoudsbaggerwerk de stortcapaciteit overschrijdt, wordt in de simulaties het surplus uit het systeem verwijderd. Bij deze berekening is verder verondersteld dat de aanleg van de verdieping zonder overdiepte is uitgevoerd; bovendien is zandwinning uitgevoerd volgens het huidige beleid. Een gedetailleerde beschrijving van de activiteiten en de ESTMORF resultaten is gegeven in Appendix G.

Het met ESTMORF berekende onderhoudsbaggerwerk voor scenario C in de vorm van een over één jaar lopend gemiddelde, berekend met de "10 %-regel" is als voorbeeld in Fig. 11 opgenomen. In Tabel 3 en in Appendix G zijn ook resultaten met de "5 %-regel" opgenomen, zodat een bandbreedte in de resultaten verkregen wordt. Een optimalisatie van de bagger-stortstrategie is vooralsnog niet uitgevoerd.

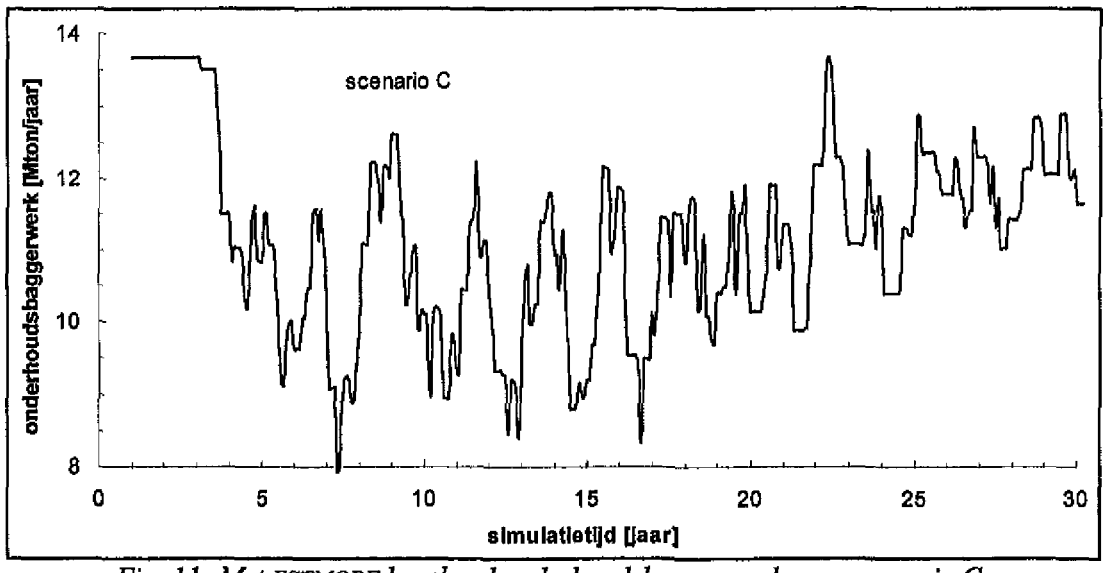


Fig. 11: Met ESTMORF berekend onderhoudsbaggerwerk voor scenario C.

In de simulaties wordt de gewenste overdiepte wel gerealiseerd tijdens het onderhoudswerk; de eerste drie jaar in Fig. 11 laten daarom een relatief hoog onderhoudsniveau zien. De jaren daarna neemt het onderhoudswerk af vanwege de reserve die door de overdiepte wordt gecreëerd. Dit effect blijkt na ca. 8 jaar uitgewerkt, waarna het onderhoudswerk langzaam toeneemt. Deze toename wordt kwantitatief vooralsnog niet volledig begrepen, doch is mogelijk het gevolg van de langzame respons van het estuarium op de ingreep.

Meer onderzoek is nodig om het noodzakelijke onderhoudswerk beter te onderbouwen en te kwantificeren (zie ook hoofdstuk 7).

De gegevens voor de diverse scenario's zijn samengevat in Tabel 3.

Als gevolg van de "10 %-regel" is de toegestane hoeveelheid te storten baggerspecie beperkt. Zoals gezegd is in de ESTMORF-simulatie het surplus uit het systeem verwijderd; in de praktijk kan dit een daadwerkelijke verwijdering betekenen, een (tijdelijke?) opslag op de voordelta, of een inefficiënte onderhoudsstrategie (i.e. storten in de te baggeren geul), met als gevolg uiteraard een veel grotere baggerinspanning - deze is echter niet berekend.

Opgemerkt wordt dat voor scenario D (1999 met ontpolderen) momenteel niet eenvoudig ESTMORF-simulaties uitgevoerd kunnen worden, aangezien het model dan bovenstrooms uitgebreid dient te worden en gecalibreerd.

	scenario A ref. (1996)	scenario B huidig	scenario C B + no-regret	scenario D C + ontpold.	scenario E 14 m	scenario F E + zeesp.
aanleg†):						
voordelta/zee	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	39 - 79	39 - 79
estuarium	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	26 - 42	26 - 42
tot. stort cap.‡)	4.9 - 9.9	4.8 - 9.7	4.8 - 9.7	3. 7 - 7.3	4.6 - 9.1	-
onderhoud:						
ervaring	9 - 13	14 - 18	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
zandwinning	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
ESTMORF baggeren	n.v.t.	10 - 13	9 - 13	-	8 - 13	-
ESTMORF storten in WS¶)	n.v.t.	alles	4.8 - 9.7	-	4.6 - 9.1	-
ESTMORF verwijderen¶)	n.v.t.	0	3 - 4	-	3 - 4	-

*Tabel 3: Aanlegbaggerwerk en jaarlijks onderhoud in **Mton** voor de in Tabel 1 beschreven scenario's;*
†) hoeveelheden zonder en met overdiepte, ‡) bandbreedte uit 5 %- & 10 %-regel,
¶) het totale onderhoudsbaggerwerk is dus de som van deze twee rijen.

Bij de simulaties voor scenario E en F is **alle** aanlegbaggerwerk uit het Schelde-estuarium verwijderd. Bij scenario's C en E dient een deel van het onderhoudsbaggerwerk uit het systeem verwijderd te worden om binnen de stortcapaciteit te blijven (bijvoorbeeld storten op de Vlakte van de Raan). Dit impliceert dat er geen capaciteit is om het voor de 14 m verdieping noodzakelijke aanlegbaggerwerk in de Westerschelde zelf te storten. Er is niet bestudeerd of deze specie op de voordelta gestort kan worden.

Merk op dat het met ESTMORF berekende onderhoudsbaggerbezwaar voor de huidige situatie ca. 40 % kleiner is dan de waargenomen hoeveelheid; echter, de huidige 14 - 18 Mton/jaar bevat een onbekende hoeveelheid aanlegbaggerwerk. Voorzichtigheid is geboden bij de interpretatie van de cijfers, en aanbevolen wordt om het onderhoudsbaggerwerk, tezamen met het uitgevoerde aanlegwerk in de nabije toekomst goed af te schatten. Merk verder op dat ESTMORF gecalibreerd is inclusief de effecten van het onderhoudsbaggerwerk voor de referentie-situatie.

Tenslotte wordt opgemerkt dat het onderhoudsbaggerwerk voor een verdere verdieping tot 14 m nauwelijks lijkt toe te nemen. Dit onverwachte resultaat wordt veroorzaakt door de verwijdering van het totale aanlegbaggerwerk uit het systeem.

7 Morfologische ontwikkeling tot 2030

Met ESTMORF is ook de morfologische ontwikkeling over 30 jaar voor de diverse scenario's, waarvan de berekende baggervolumina zijn gepresenteerd in hoofdstuk 6, bestudeerd. Hiertoe zijn het geulvolume en de plaatoppervlaktes, -volumes en -hoogtes gedestilleerd uit rekenresultaten. De morfologische ontwikkeling voor de diverse scenario's is in Appendix G gegeven. Als voorbeeld wordt hier de ontwikkeling voor scenario C behandeld - zie Fig. 12 en 13.

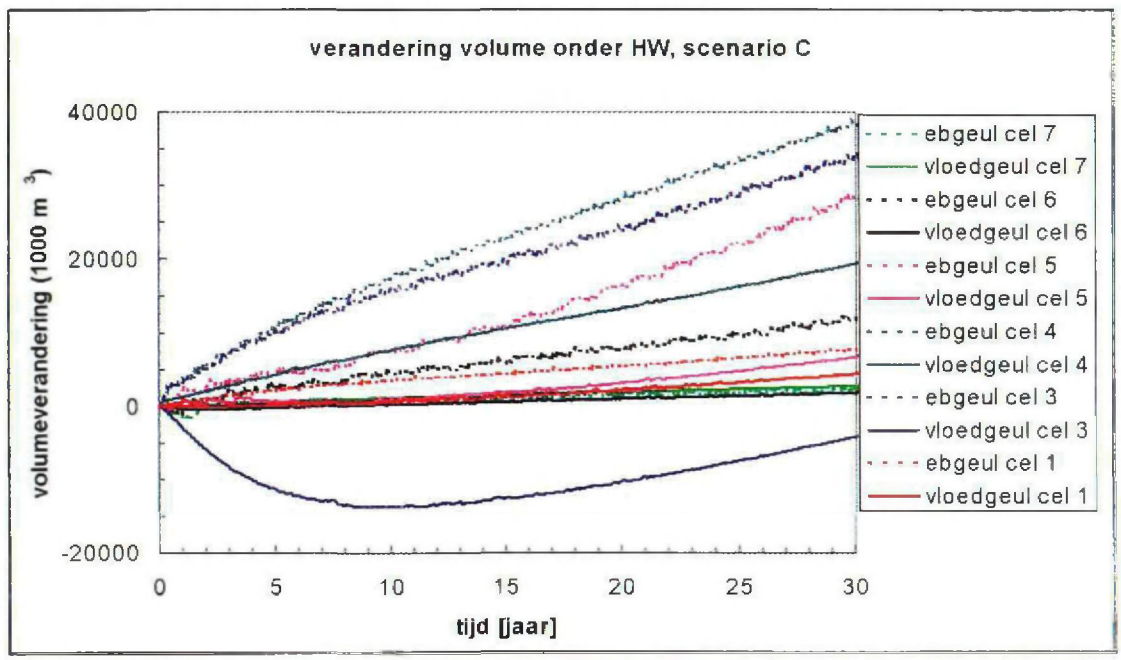


Fig. 12: Verandering geulvolume onder hoogwater, scenario C.

Volgens Fig. 12 ruimen alle geulen uit, behalve aanvankelijk de vloedgeul van cel 3 (Everingen). Dit uitruimen wordt veroorzaakt door het voortdurend verwijderen van 3 à 4 Mton sediment per jaar (Tabel 3), hetgeen over 30 jaar ongeveer 2 - 3 % van het totale huidige volume bedraagt. Het blijkt verder dat het systeem na 30 jaar nog niet in evenwicht is. Verder blijkt een aantal geulen in dwarsrichting te kantelen: de ebgeul ruimt meer dan de vloedgeul - ook dit is een gevolg van de gevolgde baggerstrategie, er wordt immers in de vloedgeul gestort. Volgens de ESTMORF-simulaties treedt echter geen degeneratie op binnen de simulatieperiode. Uit de ESTMORF-resultaten, gepresenteerd in Appendix G, blijkt dat ook voor scenario B, waarbij geen baggerspecie uit het systeem verwijderd wordt, de geulen uitruimen, doch bijna 50 % minder dan voor scenario C.

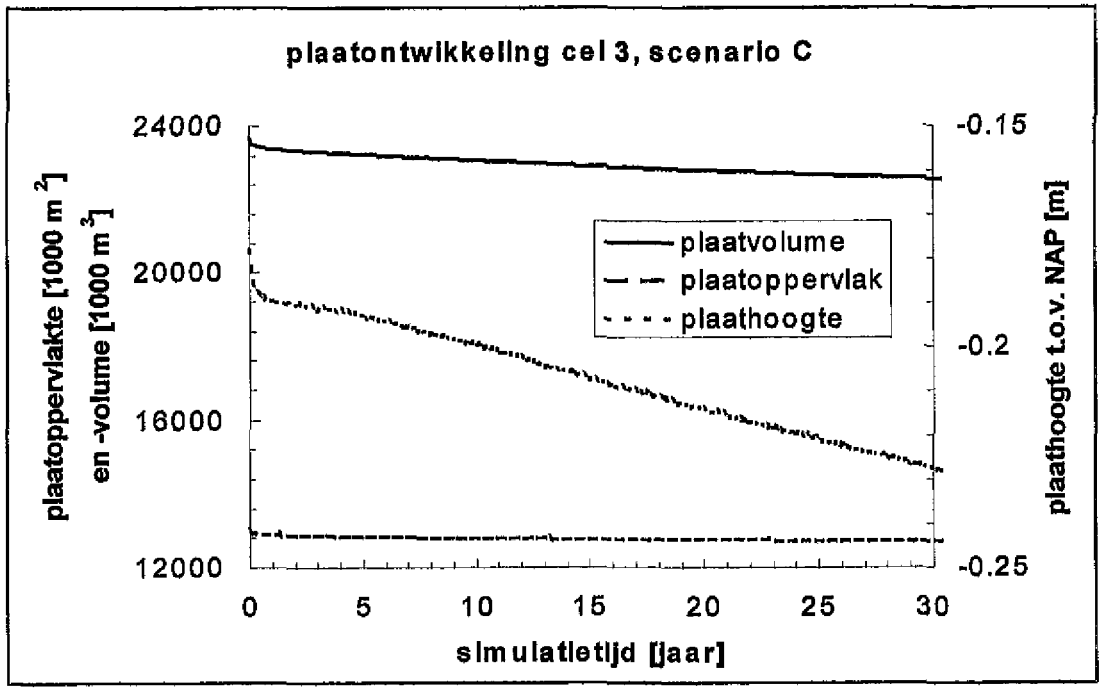


Fig. 13: Verandering plaat in cel 3, scenario C.

Volgens Fig. 13 neemt de hoogte van de in cel 3 gelegen plaat (Middelplaat) in 30 jaar met ca. 5 cm af, ten gevolge waarvan ook het plaatvolume afneemt, terwijl het plaatoppervlak ongeveer gelijk blijft. Omdat de geul meer verdiept dan de plaat, resulteert dit gedrag in een versteiling van de plaatoevers. Merk op dat deze afname in plaatvolume de resultante is van een erosie van de plaat t.g.v. de verdiepingen en een verhoging t.g.v. het storten van baggerspecie. Merk op dat de empirische relaties voor de plaatgebieden minder gevalideerd zijn dan die voor de geulen, waardoor de betrouwbaarheid van de voorspelde plaatontwikkeling kleiner is dan die van de geulontwikkeling.

Merk tenslotte op dat de geulen bij verdere verdiepingen mogelijk niet of slecht erodeerbare kleilagen kunnen doorsnijden, waardoor de morfologische respons van de geulen zou afnemen. Dit zou tot gevolg hebben dat de platen sneller eroderen, omdat zij dan een deel van het benodigde sediment gaan leveren.

De in dit hoofdstuk beschreven resultaten lijken representatief voor de ontwikkelingen van andere platen en voor de andere scenario's - zie appendix G bij dit rapport.

8 Ontwikkeling indicatoren

Voor de verschillende scenario's is de ontwikkeling in de tijd van diverse indicatoren bepaald: maximale stroomsnelheid, maximale bodemschuifspanning, verandering in maximale zoutindringing, en verandering in getijcomponenten. De verhouding van de amplitude en het faseverschil van de vierdaagse en dubbeldaagse M_4 en M_2 getijcomponenten is een maat voor de residuele sedimenttransporten op macro- en mega-schaal en daarom voor de lange-termijn morfologische ontwikkeling.

Fig. 14 toont als voorbeeld het relatief grote effect van ontpolderen op de getijbeweging. Fig. 14a toont dat de amplitudeverhouding M_4/M_2 fors toeneemt over de lengte van het estuarium, met maximale waarden nabij de Belgisch-Nederlandse grens. Fig. 14b toont dat het fase-verschil M_4-$2M_2$ over het grootste deel van het estuarium afneemt. Dit impliceert dat t.g.v. het ontpolderscenario de vloeddominantie (fors) toeneemt, m.a.w. het estuarium zal neigen naar een snellere aanzanding. Dit, op haar beurt, impliceert dat ontpolderen significante lange-termijneffecten zal hebben; de mate waarin wordt echter niet voorspeld met deze indicatoren. Merk op dat deze effecten waarschijnlijk anders zijn voor een ander ontpolderingsscenario. De resultaten van de overige scenario's zijn vermeld in Appendix F.

De ontwikkeling van de getijcomponenten is daarmee één van de mogelijke indicatoren om de morfologische ontwikkeling van het systeem te monitoren. Een groot voordeel van deze indicator is dat zij zeer eenvoudig te meten is, en dat historische gegevens waarschijnlijk eenvoudig beschikbaar gemaakt kunnen worden. Aanbevolen wordt om na te gaan of morfologische ontwikkelingen in het verleden te relateren zijn aan de ontwikkeling van de getijcomponenten.

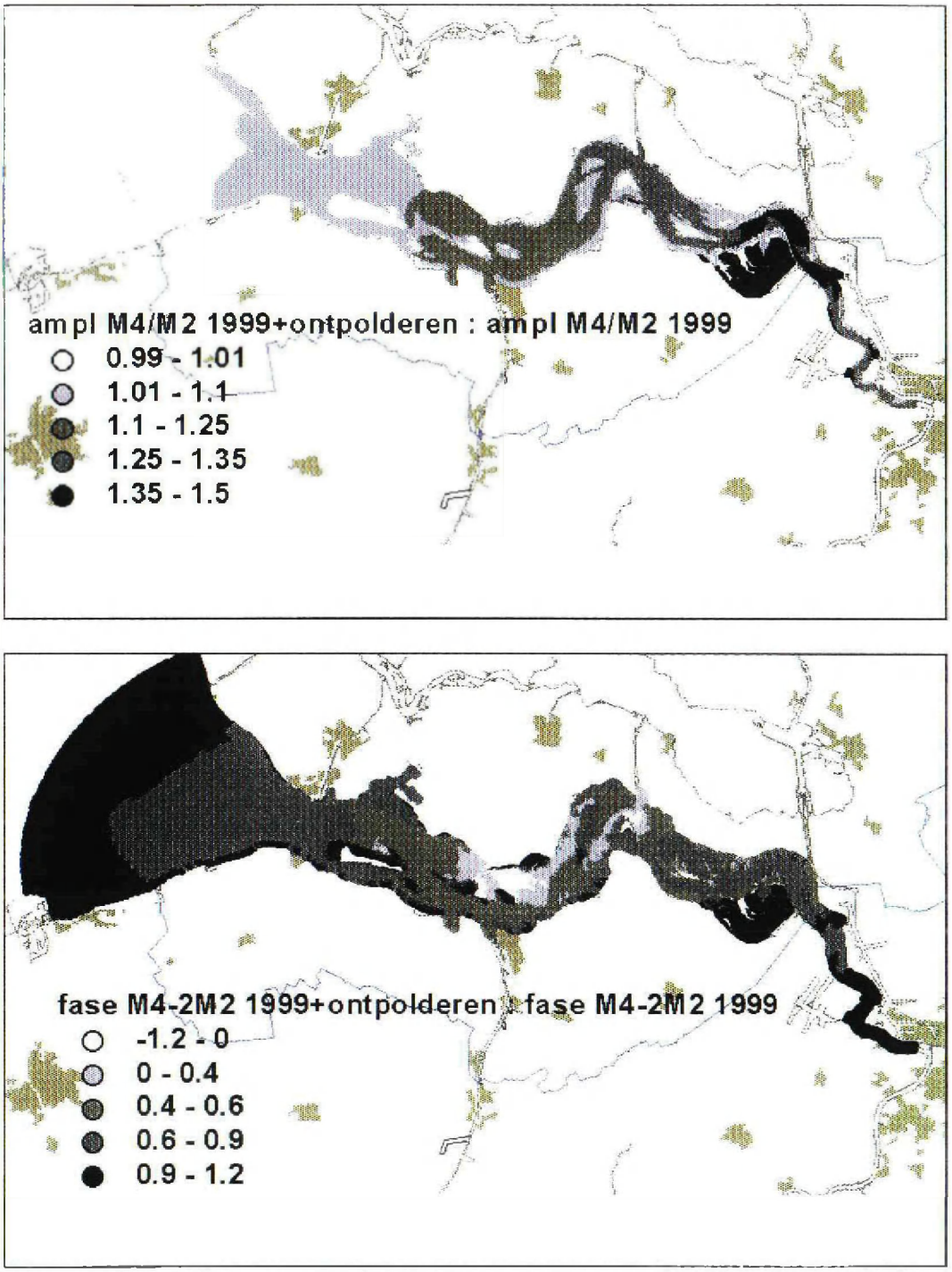


Fig. 14: Verandering verhouding amplitudes en fasehoeken van het verticaal getij ten gevolge van ontpolderen ten opzichte van de huidige situatie.

9 Extreme waterstanden - Veiligheid

In Fig. 15 en Appendix H zijn de met WAQUA berekende extreme hoogwaterstanden bij Antwerpen gepresenteerd voor de scenario's A, B, D en E (Tabel 1). Het blijkt dat de waterstanden voor de scenario's A, B en E onderling weinig afwijken. Een forse reductie wordt gevonden voor scenario D, de huidige situatie met ontpolderen.
Merk op dat deze simulaties zijn uitgevoerd voor de initiële bodemligging na verdieping; morfologische ontwikkelingen zijn niet verdisconteerd.

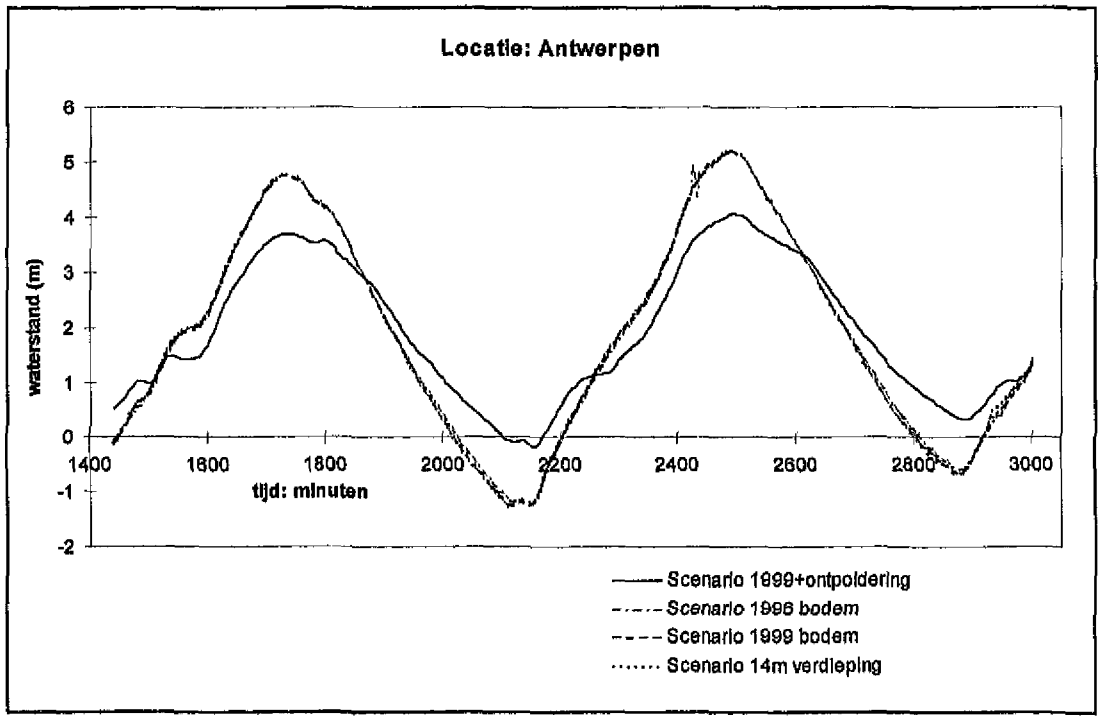


Fig. 15: Met WAQUA berekende extreme waterstanden in Antwerpen.

10 Conclusies/aandachtspunten voor duurzaam beheer

Het morfologisch systeem

Het Schelde-estuarium bestaat uit de Voordelta, de Westerschelde en de Zeeschelde (en de Bovenschelde, doch deze is in de huidige studie niet bestudeerd). De sedimentuitwisseling tussen de Voordelta en de Westerschelde is cruciaal voor de lange-termijnontwikkelingen van het systeem, en bepaalt in belangrijke maken in hoeverre mariene sedimenten geïmporteerd kunnen worden. De huidige vorm van het estuarium is bepaald door eeuwenlange natuurlijke ontwikkelingen en menselijke ingrepen. Momenteel verkeert het Schelde-estuarium waarschijnlijk min of meer in een dynamische evenwicht, gekenmerkt door een dynamisch meergeulensysteem met regenererende platen en geulen op kleinere schaal.

Grenzen van het systeem

Het handhaven van het meergeulensysteem bepaalt de grenzen in het beheer van het estuarium. Zo'n beheer is het no-regret scenario genoemd. Opgemerkt dient te worden dat dit voor Natuurlijkheid een noodzakelijke, maar nog geen voldoende voorwaarde is, aangezien dit niet het handhaven van de schorren en slikken garandeert.

Met behulp van een stabiliteitsanalyse en een schematisatie van het Schelde-estuarium in een aantal morfologische cellen zijn de grenzen aan dit beheer onderzocht. Uit dit zogenaamde cellenconcept blijkt dat met name het storten van baggerspecie, meer dan het baggeren, limiterend is voor het handhaven van het meergeulenstelsel.

Met het cellenconcept is het effect van een aantal scenario's bestudeerd op de ontwikkeling van het Schelde-estuarium, waaronder de invloed van verder verdiepen, toepassing van de no-regret strategie en het uitvoeren van ontpolderingen.

Uit deze analyse blijkt dat in de referentie-situatie aan het stortcriterium op mega-schaal voldaan wordt, mede dankzij het zandwinbeleid. Op kleinere schaal traden lokaal, met name in het oosten, problemen op, die echter omkeerbaar lijken te zijn.

In de huidige situatie is een nieuw stortbeleid in uitvoering genomen, dat momenteel reeds tot problemen blijkt te leiden in het westelijk deel van de Westerschelde, hetgeen in overeenstemming is met de morfologische analyse.

Om een verdere verdieping tot 14 m mogelijk te maken, bij handhaving van het meergeulensysteem, zal op een uitgekiende wijze gebruik gemaakt dienen te worden van de vrijheidsgraden die bij het huidige beleid ter beschikking staan. Aanbevolen wordt om in ieder geval de specie vrijkomend bij het aanlegbaggerwerk niet in de Westerschelde te storten, aangezien dit de stortcapaciteit van het meergeulensysteem drastisch zal reduceren. Deze specie kan ofwel uit het systeem verwijderd worden, dan wel op de voordelta gestort worden - in het laatste geval blijft het sediment in het systeem.

Onzekerheden en beperkingen cellenconcept

Het cellenconcept is een instrument om het complexe gedrag van het Schelde-estuarium inzichtelijk te maken met behulp van een overzichtelijke schematisatie en integratie van diverse gegevens, waaronder de resultaten van numerieke modellen. Bij de opzet van het

cellenconcept is een aantal veronderstellingen gedaan. Daarnaast kent het concept en de tot nog toe uitgevoerde studie een aantal (inherente) beperkingen:

- Er wordt verondersteld dat het Schelde-estuarium op een tijdschaal van decennia momenteel min of meer in (een dynamisch) evenwicht verkeert. Autonome ontwikkelingen worden nu dus niet door het concept beschreven.
- De morfologische ontwikkelingen van de plaatcomplexen is onzekerder dan die van de geulen, omdat de empirische relaties voor plaatontwikkelingen op minder gegevens zijn gebaseerd dan voor geulontwikkelingen.
- Het verdiepen van de geulen zal leiden tot verdere geometrieveranderingen, waaronder versteiling van de geuloevers - de mate waarin is echter niet goed bekend.
- Het gedrag van intergetijdegebieden (o.a. slikken en schorren) langs de oevers van het estuarium is niet bestudeerd.
- Het gedrag van de hoogdynamische gebieden, waar eb- en vloedgeulen door nevengeulen verbonden worden, kan niet met het cellenconcept worden bestudeerd, en is vooralsnog niet goed begrepen. Aangezien vermoed wordt dat deze hoogdynamische gebieden erg belangrijk zijn voor het gedrag van het gehele systeem wordt aanbevolen deze bij het beheer (storten van baggerspecie) te ontzien.
- De sedimentuitwisseling(scapaciteit) tussen Westerschelde en voordelta, en het gedrag van de voordelta zelf, is onbekend, doch waarschijnlijk zeer belangrijk voor het overall gedrag van het systeem.
- Verder verdiepen heeft risico's i.v.m. instabiliteiten op mega-schaal (netto sedimenttransporten); het vaststellen van de netto sedimenttransporten (zandbalans) en de veranderingen daarin zou dan ook hoge prioriteit dienen te hebben.

Ontwikkelingen van het Schelde-estuarium

Ten gevolge van de recente verdieping verkeert het Schelde-estuarium nu in een overgangsfase. Het systeem lijkt nog wel veerkrachtig, waarschijnlijk door haar vele vrijheidsgraden, zoals kan worden afgeleid uit het schijnbare herstel van de morfologie van de Schaar van de Waarde nu daar niet meer gestort wordt.

Met de recente verdieping zijn waarschijnlijk de grenzen van het systeem bereikt, in de zin dat de stortvolumina nu van de orde van grootte zijn van de stortcapaciteit. Opgemerkt wordt dat het voor Toegankelijkheid noodzakelijke baggervolume een directe functie is van de vigerende stortstrategie. Zandwinning in een geuloever kan bovendien het noodzakelijke baggervolume vergroten.

De grootschalige sedimentverdeling (oost-west!) is van groot belang. Deze beïnvloedt de netto sedimenttransporten, inclusief import en/of export, en kan deze zelfs blokkeren, o.a. ten gevolge van veranderingen in de getij-asymmetrie.

Vrijheidsgraden voor beheer

Uit de morfologische studie kan geconcludeerd worden dat het Schelde-estuarium nog steeds een veerkrachtig systeem is. Hiervan kan bij het beheer van het estuarium gebruik gemaakt worden:

- Integratie van het zandwin- en stortbeleid levert mogelijkheden om de baggerinspanningen te beperken, en daarmee de verstoring van het systeem,
- Met het zandwin-, bagger- en stortbeleid kan de morfologie van het estuarium op diverse schalen gestuurd worden,

- Maak gebruik van alle stortmogelijkheden in het estuarium, ook in het oostelijk deel, en maak daarbij gebruik van de nu verworven inzichten in overall en lokale stortcapaciteit en de relevante tijdschalen van de deelsystemen,
- *Integreer de Voordelta in het beleid en gebruik deze bijvoorbeeld als buffer voor* "tijdelijke" opslag van sediment; houdt hierbij rekening met andere gebruikersfuncties van het systeem,
- Gelijktijdig storten in eb- en vloedgeulen vergroot weliswaar de baggerinspanning, doch houdt het meergeulenstelsel in stand,
- Storten in de geul waar ook gebaggerd wordt vergroot weliswaar de baggerinspanning aanzienlijk, doch houdt het meergeulenstelsel in stand.

Aanbevelingen

Aanbevolen wordt om een toegesneden monitoringprogramma op te zetten om de morfologische ontwikkelingen van het Schelde-estuarium goed te volgen, rekening houdend met de relevante tijdschalen van de verschillende subsystemen. Voor de interpretatie van de motitoringresultaten is een goed kwantitatief begrip van het morfologisch gedrag van het Schelde-estuarium van groot belang, bijvoorbeeld in de vorm van een operationeel modellensysteem. Hierbij kan bijvoorbeeld gebruik gemaakt worden het gedrag van de enkel- en dubbeldaagse getijcomponenten.

Verder wordt aanbevolen de genoemde onzekerheden nader te onderzoeken en het stort- en zandwinbeleid te integreren.

Appendix J bevat een meer gedetailleerd overzicht met aanbevelingen voor verder onderzoek.

11 Geraadpleegde literatuur

Allersma, E. 1992 *Studie inrichting Oostelijk deel Westerschelde; analyse van het fysische systeem* report Z368 Delft Hydraulics

Arends, A., P. Kamermans, E. Stikvoort, B. de Winder, 1999, *MOVE, een eerste evaluatie van de bagger- en stortstrategie - rapport 4,* Rapport RIKZ-99.019, Rijkswaterstaat

Claessens, J., 2000 *Bepaling van de te baggeren volumes bij een verdere verdieping van de Schelde* Min. Vlaamse Gemeenschap, afd. Maritieme Schelde

DHV, 1998, *Verkenning effecten versnelde zeespiegelstijging op dynamiek Westerschelde estuariene systeem.* rapport nummer IS-NW980254.

Eck, B. van, 1999, *De Schelde-atlas; een beeld van een estuarium,* Rijkswaterstaat.

Fokkink, R.J., Weck, A. van der, 1998 *Final version of the Estmorf model* report Z2662, Delft Hydraulics

Fokkink, R.J., Wang, Z.B., Schropp, M.H.I. 1995 *On 1D morphodynamic network models* Hydra 2000, Vol 3, pp 104-109

Jeuken, M.C.J.L., 2000, *On the morphodynamics of the tidal channels in the Westerschelde estuary,* PhD-thesis, University of Utrecht, in preparation.

Jong, J. de, G. Krijger, L. Nijsse, S. Huijs, 1996, *MOVE, Beoordeling van de effecten van de verdieping 48' - 43' - plan van aanpak, rapport 2,* Rijkswaterstaat.

Kornman, B., A. Arends, D. Dunsbergen, 2000, Westerscheldemond 1970-2020 - een morfologische blik op de toekomst, Kust*2000, Rapport RIKZ/2000.030, Rijkswaterstaat.

Krijger, G., J. Coosen, J. de Jong, L. Dekker, 1999, *MOVE, Monitoring van de effecten van de verruiming 48' - 43', voortgangsrapportage periode 1997 - 1998 - rapport 3,* nota AXW-99.005, Rijkswaterstaat.

Mol, G., A.M. van Berchum, G.M. Krijger, 1997, *MOVE, De toestand van de Westerschelde aan het begin van de verdieping 48'/43' - rapport 1,* Rapport RIKZ - 97.049, Rijkswaterstaat.

Nihoul, J.C.J., Wollast, R., *Project Zee: het Schelde-Estuarium* Nationaal Onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma

Nijssse, L., 1998 *Bagger-, stort- en zandwinhoeveelheden in de Westerschelde 1955-1996* report Rijkswaterstaat

Slikke, M.J. van der, 1999 *Morfologische ontwikkeling Westerscheldemonding tot 2020; een fenomenologische visie* Institute for Marine and Atmospheric Research Utrecht, report R 99-16

Spek, A.J.F. van der 1994 *Large-scale evolution of Holocene tidal basins in The Netherlands* PhD-thesis Utrecht University

Spek, A.J.F. van der, 1997 *De geologische opbouw van de ondergrond van het mondingsgebied van de Westerschelde en de rol hiervan in de morfologische ontwikkeling* TNO-report NITG 97-284-B

Spek, A.J.F. van der, 1997 *Tidal asymmetry and long-term evolution of Holocene tidal basins in The Netherlands: simulation of palaeo-tides in the Schelde estuary* Marine Geology, Vol 141, pp 71-90

Thoolen, P.M.C., 2000 *Modellering secundaire stroming en 3D sedimenttransport Westerschelde* report Z2799 Delft Hydraulics

Veen, J. van, 1950 *Eb- en vloedschaar systemen in de Nederlandsche getijwateren* Tijdschrift Kon. Ned. Aard. Gen. vol 67, pp 406-413

Vriend, H.J. de, J. Berlamont, C. Heip, Z.B. Wang, J.J. Brinkman, A.G. van Os, A. Roelfzema, 1996, Kwaliteitstoets OOSTWEST; Westerschelde, Rapportage Expert Commissie, Rapport Z1021, Waterloopkundig Laboratorium.

Vroon, J., Storm, C. Coossen, J., 1997 *Westerschelde, stram of struis? Eindrapport van het Project Oostwest, een studie naar de beïnvloeding van fysische en verwante biologische patronen in een estuarium* Rijkswaterstaat, RIKZ, Rapport RIKZ-97.023

Wang, Z.B., Jeuken, M.C.J.L., Vriend, H.J. de, 1999 *Tidal asymmetry and residual sediment transport in estuaries* report Z2749 Delft Hydraulics

Wang, Z.B., Vries, M. de, Fokkink, R.J., Langerak, A. 1995 *Stability of river bifurcations in 1D morphodynamic models* Journal of Hydraulic Research, Vol 33, No 6

A Overzicht appendices met achtergrond- en detailinformatie

A. Historische ontwikkeling Westerschelde en Voordelta

B. Tijdschalen van macro- en mesocellen

C. Sedimentbehoefte ééngeulsysteem

D. Analyse morfologische cel

E. Toetsing storteriterium

F. DELFT2DMOR simulaties sedimenttransporten

G. ESTMORF simulaties

H. Extreme waterstanden

I. ASMITA simulaties

J. Aanbevelingen voor verder onderzoek

Rijkswaterstaat
Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ
Bibliotheek (Middelburg)
C-14107 430
dl. 2. Appendices

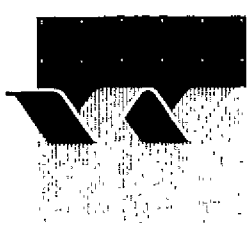
Lange Termijnvisie Schelde-estuarium cluster morfologie

Uitvoeringsfase

Deel 2: Appendices

J.C. Winterwerp , M.C.J.L. Jeuken, M.A.G. van Helvert (RWS/RIKZ),
C. Kuijper, A. van der Spek (TNO-NITG), M.J.F. Stive,
P.M.C. Thoolen en Z.B. Wang

augustus 2000



WL | delft hydraulics

Appendices

A Historische ontwikkeling Westerschelde en Voordelta

B Tijdschalen van macro- en mesocellen

C Sedimentbehoefte ééngeulsysteem

D Analyse morfologische cel

E Toetsing stortcriterium

F DELFT2DMOR simulaties sedimenttransporten

G ESTMORF simulaties

H Extreme waterstanden

I ASMITA-simulaties

J Aanbevelingen voor verder onderzoek

Appendix A
Historische ontwikkeling Westerschelde en Voordelta

Ad v.d. Spek (TNO-NITG)

Z2878

A Historische ontwikkeling Westerschelde en Voordelta 1

A.1 Westerschelde 1

A.1.1 Ontstaan en ontwikkeling van de Westerschelde 1

A.1.2 De samenstelling van de ondergrond en de invloed hiervan op de morfodynamiek 2

A.1.3 De ontwikkeling van het geulpatroon 3

A.1.4 De stabiliteit van de geulen 3

A.2 Gedrag voordelta 5

A.2.1 Beschrijving van de morfologische ontwikkeling van het mondingsgebied 5

A.2.2 Opbouw van de ondergrond van het mondingsgebied 7

A.2.3 Invloed van de samenstelling van de ondergrond op de morfodynamiek 7

A.2.4 Grootschalige ontwikkeling van getijbekkens en effecten op de sedimentimport 8

A.2.5 Hydraulische veranderingen en mogelijke effecten op de morfologie van de buitendelta 9

A.2.6 Sedimentuitwisseling tussen mondingsgebied en omgeving 10

A Historische ontwikkeling Westerschelde en Voordelta

A.1 Westerschelde

A.1.1 Ontstaan en ontwikkeling van de Westerschelde

Oorspronkelijk stroomde de rivier de Schelde van Antwerpen naar het noorden, door het gebied van het huidige Tholen, in de richting van de Rijn-Maasmonding. Dit rivierdal werd gescheiden van het gebied van de huidige Westerschelde door een Pleistocene rug. Tot de vroege Middeleeuwen (ca. 700 AD) werd er veen gevormd op deze rug. In die tijd lag de monding van de Schelde rivier inmiddels ter plaatse van de huidige Oosterscheldemonding. Tot het begin van onze jaartelling was er geen grote mariene invloed in het huidige mondingsgebied van de Westerschelde: er waren slechts enkele riviertjes van lokale betekenis actief. Vanaf ca. 200 AD breidde de mariene invloed zich landwaarts uit, waarbij zich geleidelijk aan een groot geulensysteem ontwikkelde: de Honte.

Tussen ca. 800 AD en 1100 AD ontstond er een connectie tussen de Schelde rivier en de Honte, even ten noorden van Antwerpen. Aanvankelijk was dit een ondiepe verbinding, welke niet navigeerbaar was voor schepen. Vanaf ca. 1400 AD nam het belang van de verbinding toe omdat ondiep stekende schepen de verbinding konden bevaren. De toename van de omvang van het geulsysteem van de Honte door stormvloeden, welke inbraken in de veengebieden van o.a. centraal Zeeuws-Vlaanderen, werd gevolgd door uitruiming van de geulen en het zeegat. Dit leidde vanaf de late Middeleeuwen o.a. tot het verdwijnen van de eilanden en platen welke in het mondingsgebied voorkwamen. Op dat moment was de Oosterschelde nog steeds de hoofdafvoer van de Schelde. Tot het einde van de 15e eeuw lag er een wantij tussen de Ooster- en Westerschelde ter hoogte van de lijn Bath-Saeftinge. Door de uitbreidingen in het Westerscheldegebied werd de laatste uiteindelijk de hoofdafvoer, waardoor het wantij zich verlegde naar de lijn Bath-Woensdrecht. Dit wantij slibde vervolgens zeer snel op. Tijdens de tweede helft van de 16e eeuw breidde het Westerschelde bekken zich verder uit als gevolg van militaire inundaties (Tachtigjarige Oorlog).

Sinds de 17e eeuw zijn grote oppervlaktes intergetijdegebied opgeslibd en vervolgens ingepolderd of bedijkt. Deze afname van het kombergend oppervlak in de Westerschelde was grotendeels een natuurlijk proces. De intergetijdegebieden slibden hoog op, tot ruim boven het gemiddeld hoogwater, waarna ze met dijken omringd werden. Dat betekent dat het bergend vermogen onder gemiddelde getijomstandigheden van deze gebieden al voor de bedijking tot vrijwel nihil was teruggelopen. Bedijking maakte deze ontwikkeling vrijwel onomkeerbaar (calamiteiten daargelaten). Naast een sterke afname van de omvang van het bekken, kregen de hoofdgeulen van het estuarium een minder kronkelig verloop en werden

zij dieper. Ondanks dat het kombergend oppervlak met gemiddeld 44% afnam, daalde het vloedvolume slechts met 13%. De verkleining van het vloedvolume door afname van het kombergend oppervlak is grotendeels gecompenseerd door de sterke toename van het verticale getij. Daarnaast draagt ook een efficiëntere vulling van het kombergend vermogen door versnelling van de getijgolf bij aan een verminderde afname van het vloedvolume.

De connecties tussen de Wester- en Oosterschelde werden definitief verbroken in 1867 / 1871 door de aanleg van dammen over de sterk opgeslibde wantijen Kreekrak en Sloe t.b.v. de spoorwegverbinding met Vlissingen. De Westerschelde heeft zich ontwikkeld van een relatief ondiep, sterk vertakt getijdebekken tot het huidige "gladde" en diepere estuarium met de kenmerkende "trompetvorm". Ten gevolge hiervan namen de snelheid van de getijgolf en de getijverschillen in het estuarium toe. Deze ontwikkeling gaat door tot op de dag van vandaag

A.1.2 De samenstelling van de ondergrond en de invloed hiervan op de morfodynamiek

In de ondergrond van de Westerschelde worden Tertiaire, Pleistocene en Oud-Holocene lagen aangetroffen. Hierop liggen o.a. de (sub)recente afzettingen van de geulen van het Honte bekken en de voormalige zijtakken van de Westerschelde. Langs de zuidelijke oevers van Walcheren en Zuid-Beveland komt een (vrijwel) complete opeenvolging van Tertiaire, Pleistocene en Holocene sedimenten voor. Langs de oever van Zeeuws-Vlaanderen liggen de jonge Holocene afzettingen meestal direct op Tertiaire afzettingen. De genoemde oudere afzettingen kunnen in principe aangesneden worden door migrerende geulen in het mondingsgebied.

De invloed van de opbouw van de ondergrond zal zich het duidelijkst manifesteren in het geulgedrag. Hierbij moet gedacht worden aan het al dan niet belemmeren van de laterale verplaatsing van getijgeulen door moeilijk te eroderen lagen. Geulen snijden zich in de ondergrond in en/of eroderen hun buitenbochten. Daarbij lopen zij de kans om op oudere, erosiebestendige afzettingen te stuiten.

Vooral de Tertiaire maar ook de Pleistocene afzettingen hebben door verkitting van de zanden en vooral sterke consolidatie van de kleien een matige tot (zeer) hoge erosiebestendigheid. Met name de overgeconsolideerde Boomse Klei is in dit opzicht een belangrijke afzetting. Door hun diepte van voorkomen zullen deze lagen vooral door de diepste delen van migrerende geulen aangesneden worden en een verdere verdieping van de geul (sterk) vertragen. Een belemmering van uitschuring in de diepte zal dan eerder tot verbreding van dit deel van de geul leiden. Ondieper voorkomende lagen kunnen de laterale migratie van een geul directer belemmeren. Aangezien het dan meestal om minder sterk geconsolideerde lagen gaat is dit waarschijnlijk slechts van tijdelijke aard. Hierbij zullen klei- en veenlagen en afzettingen, die bestaan uit een afwisseling van zand en klei op cm-schaal, welke eenzelfde erosiebestendigheid vertonen als geconsolideerde kleilagen, aanzienlijk meer weerstand bieden dan zandige afzettingen.

De conclusie is dat de samenstelling van de ondergrond de morfologische ontwikkeling van het estuarium en de buitendelta niet kan aansturen, maar wel beïnvloeden. Het ligt voor de hand dat hydraulische ontwikkelingen de morfodynamiek aansturen.

A.1.3 De ontwikkeling van het geulpatroon

Het geulpatroon van de Westerschelde is in eerste aanleg overerfd van het Honte bekken van vóór de onthoofding van de Schelde rivier. De Honte was een sterk vertakt getijdebekken, met verbindingen naar de Oosterschelde via het Sloe en het Kreekrak. Langs de hoofdgeulen kwamen uitgestrekte schorren en slikken voor. In de hals van het zeegat kwamen drie geulen voor, één naar de Braakman, een grote inbraak in Zeeuws-Vlaanderen, één naar het Sloe, tussen Walcheren en Zuid-Beveland, en één geul naar het achterliggende gebied, de Honte. Deze geulen werden gescheiden door ondiepe plaatgebieden. De Braakman stond via het Hellegat weer in verbinding met de Westerschelde, waardoor er een wantij bestond ten oosten van Axel. Door verlanding en bedijking van dit wantij werden beide geulen gescheiden.

Het bochtige verloop van de Westerschelde vindt waarschijnlijk zijn oorsprong in de tracés van de oudere geulen die onderdeel uitmaakten van het Honte getijdebekken. Zo is in de bocht van de Westerschelde rond het schiereiland van Ossenisse, de oude loop van de geul de Hinkele te herkennen. Met de inpoldering en afdamming van de zijtakken is het Westerschelde bekken veranderd van het oorspronkelijke getijdebekken met een sterk vertakt geulpatroon, in het huidige onvertakte estuarium. Hierbij is het huidige geulpatroon, dat gedomineerd wordt door eb- en vloedscharen, ontstaan.

A.1.4 De stabiliteit van de geulen

In de samenstelling van de ondergrond van de Westerschelde en de aangrenzende gebieden kunnen geen directe redenen gevonden worden voor het huidige bochtige verloop van het estuarium. De zogenaamde 'ophangpunten' van het estuarium lijken niet direct geologische bepaald te zijn. Het huidige verloop van het estuarium is eerder een overblijfsel van het door de Schelde rivier aangetapte, sterk vertakte getijdebekken. Ondanks dat vrijwel alle zijtakken van dit estuarium verland en vervolgens ingepolderd zijn, is het kronkelende verloop van het estuarium door, onder meer, de verdediging van de oevers, grotendeels bewaard gebleven.

De noordelijke oever van het estuarium bestaat uit een opeenvolging van afzettingen uit, van beneden naar boven, het Tertiair, Pleistoceen en Vroeg-Holoceen. De afzettingen uit het Tertiair en Pleistoceen bestaan vooral uit meer of minder gecompacteerde zanden, de Vroeg-Holocene afzettingen vooral uit klei en veen. Dit pakket afzettingen wordt op drie plaatsen (bij het Sloe, ten oosten van Ellewoutsdijk, en tussen Hoedekenskerke en Hansweert) doorsneden door de vooral zandige opvulling van grote, relatief jonge geulen (jong wil hier zeggen: niet ouder dan ca. 1500 jaar). In deze opvullingen komen echter ook dikke kleilagen voor, vooral aan de top. De zuidelijke oever bestaat vrijwel geheel uit afzettingen van jongen geulen, welke direct op Tertiaire afzettingen liggen. De geulopvullingen zijn veelal kleiïg. Slechts op enkele plaatsen (bijvoorbeeld de westzijde van het 'schiereiland van Ossenisse', grenzend aan het Gat van Ossenisse) bestaat de oever

uit een complete opeenvolging van Tertiaire, Pleistocene en Vroeg-Holocene afzettingen. Overwegend zandige opvullingen van jonge geulen blijken vaak weinig stabiel te zijn: zettingsvloeingen en dijkvallen treden hier relatief vaak op.

Uit de huidige diepteligging van oudere afzettingen blijkt dat deze waarschijnlijk in het verleden door geulen in het estuarium (ten dele) geërodeerd zijn, maar dat deze afzettingen nu afgedekt worden door recente estuariene afzettingen. De geuldiepte ter plaatse is (soms aanzienlijk) minder. Deze recente estuariene afzettingen zijn van weinig invloed op het gedrag van de geulen.

De hoofdgeulen van het estuarium snijden in hun bochten vaak diep in de ondergrond in, waarbij de diepste delen van de geulen zich in oudere Pleistocene of Tertiaire afzettingen insnijden. Zo heeft de Pas van Terneuzen zich tussen de Braakman en de Platen van Hulst tot een maximum van ca. 7 m ingesneden in de Boomse Klei. Bij Borssele heeft de Honte zich meer dan 20 m ingesneden in de overwegend zandige afzettingen van de Formatie van Oosterhout. Wat de consequenties hiervan zijn voor het gedrag van de geulen is niet zonder meer duidelijk. Dat geulen zich minder snel en daardoor relatief minder diep insnijden in deze lagen lijkt duidelijk. Wat dit echter betekent voor de laterale verplaatsing van geulen is minder helder. Hierbij speelt de vraag of de laterale verplaatsing van een geul in zijn geheel afhangt van de verplaatsing van het diepe deel van de geul of van het ondiepe deel. Als het diepste deel van de geul vastligt, zal in theorie het ondiepe deel van de geul zich maximaal zo ver verplaatsen totdat de buitenbocht een stabiele helling vormt, afhankelijk van de korrelgrootte en de cohesie van de te eroderen sedimenten. Als het gedrag van het ondiepe deel van de geul de verplaatsing van de gehele geul bepaalt, zal het zich insnijden in erosie-resistente afzettingen door het diepste deel er minder toe doen. Vooralsnog moeten zowel de samenstelling van de geul'vloer' als van de geulwand meebeschouwd worden.

Het effect van het al dan niet vastleggen van het diepste deel van een geul op het gedrag van de gehele geul moet nader uitgezocht worden.

Referenties:

Rijks Geologische Dienst, 1995. Geologische Inventarisatie Westerschelde. Rapport 11.132, Rijks Geologische Dienst, Nuenen, 21 pp. + 41 bijlagen.

Spek, A.J.F. van der, 1997a. Tidal asymmetry and long-term evolution of Holocene tidal basins in The Netherlands: simulation of palaeo-tides in the Schelde estuary. Marine Geology, 141: 71-90.

Spek, A.J.F. van der, 1997b. De geologische opbouw van de ondergrond van het mondingsgebied van de Westerschelde en de rol hiervan in de morfologische ontwikkeling. Rapport NITG 97-284-B, Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO, Haarlem, 46 pp.

Vos, P.C., en R.M. van Heeringen, 1996. Paleogeografische kaarten van Zeeland, Holoceen, 1:500.000. Rijks Geologische Dienst, Haarlem.

Vos, P.C., en R.M. van Heeringen, 1997. Holocene geology and occupation history of the Province of Zeeland. In: M.M. Fischer (red.), Holocene evolution of Zeeland (SW Netherlands), Mededelingen Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO, 59: 5-109.

A.2 Gedrag voordelta

A.2.1 Beschrijving van de morfologische ontwikkeling van het mondingsgebied

- tot 1800

Met de forse middeleeuwse uitbreiding van het Honte/Westerschelde systeem zullen de getijgeulen in de monding zich verbreed en verdiept hebben, en zal de huidige buitendelta gevormd zijn. Aanvankelijk bevonden zich enkele eilanden en platen, zoals bijvoorbeeld o.a. Wulpen, Schooneveld en Koezand, in het mondingsgebied. Daarnaast mondden een aantal lokale getijgeulen, welke het land van Zeeuws-Vlaanderen inliepen, uit in de huidige Westerscheldemonding. Door erosie van de eilanden en verlanding en/of inpoldering van de getijgeulen is uiteindelijk de huidige configuratie van de monding ontstaan.

Zeekaarten stammend uit het eind van de 16e eeuw laten, van noord naar zuid, de volgende geulen door de buitendelta zien: Botkil, Deurloo, Spleet, Wielingen en Heijst-Knokke diep. De kaarten suggereren een sterk radiaal georiënteerd geulenpatroon, uitwaaierend vanuit het zeegat. De Wielingen is dan de belangrijkste geul voor de scheepvaart. Het Heijst-Knokke diep was de aanloop naar het Zwin. Het werd in die tijd nog steeds van betonning voorzien door de stad Brugge, ondanks dat de verzanding van de geul tijdens de 16e eeuw steeds sterker werd. Daarnaast mondde het Sluissche Gat, een geul welke naar Sluis in Zeeuws-Vlaanderen liep, uit in het meest landwaartse deel van de Wielingen. De morfologische situatie hier werd verder gecompliceerd door het voorkomen van een aantal banken.

In het midden van de 17e eeuw werd onder de kust van Vlaanderen een aparte geul naar het Zwin gevormd. Door het verhelen van de zandbanken Paardemarkt en Hartsand werd deze geul afgescheiden van de Wielingen. Vóór die tijd kwam de geul naar het Zwin rechtstreeks in de Wielingen uit.

De Wielingen en de Spleet verloren in de 17e en 18e eeuw hun betekenis voor de scheepvaart, door het ontstaan van ondiepe bankengebieden in hun loop. De Deurloo *ontwikkelde zich tegelijkertijd tot een diepe geul. In het midden van de 18e eeuw is de* Deurloo de enige betonde vaarweg door de buitendelta. Buyskes geeft op zijn kaart uit 1796 alleen diepten voor de Deurloo en het Oostgat. Het ligt voor de hand hieruit te concluderen dat deze twee geulen op dat moment de belangrijkste vaarwegen vormen.

De morfologie en de hydraulica van het Schelde estuarium zijn in dezelfde periode als hierboven beschreven sterk veranderd. Aan het eind van de 16e en in de eerste helft van de 17e eeuw breidde het estuarium zich sterk uit door dijkdoorbraken en inundatie van het achterliggende, laaggelegen land. Dit hield in dat het areaal aan intergetijdegebied in het estuarium fors toenam. Daarnaast nam in het estuarium het getijverschil toe. Als gevolg van beide factoren zal het getijvolume van het estuarium toegenomen zijn. In de tweede helft

van de 17e eeuw stopte de uitbreiding. Door bedijking van tot boven gemiddeld hoog water opgeslibde schorren nam het intergetijde areaal vanaf dat moment weer af. Reconstructie van de geometrie van het estuarium laat zien dat dit areaal met 170 km² afnam tussen 1650 en 1800. De getijslag in het estuarium bleef echter toenemen, waardoor het getijprisma niet noemenswaardig afnam.

- ná 1800

De ontwikkeling van de morfologie van de Westerscheldemonding sinds 1800 is bekend uit hydrografische opnamen en wordt, onder meer, beschreven door Van Cauwenberghe (1966), Van den Berg (1987), en Van Enckevort (1996b).

De ontwikkeling van de Westerscheldemonding sinds 1800 kan worden samengevat als erosie van de noordwestelijke rand van de buitendelta, een toename in grootte van de Wielingen en het Oostgat, waarbij verdiepingen van meer dan twee meter optraden, en verondieping van de Deurloo en de Vlakte van de Raan. Aangezien de eb- en vloeddebieten door het zeegat niet veranderd zijn over deze periode, moet er sprake zijn van een herverdeling van de debieten over de geulen. De verzanding van de Spleet zette zich voort. De verdieping van de Wielingen zal ten koste van de Deurloo gegaan zijn, waarna de Deurloo geleidelijk verzandde. Samenvattend kan gesteld worden dat de getijgeulen langs de oevers van Walcheren en Zeeuws-Vlaanderen in omvang toenamen, terwijl de betekenis van de getijgeulen op het centrale deel van de buitendelta afnam. De toename in grootte van de Wielingen ging gepaard met het opruimen van een aantal banken in en langs de geul.

Tegelijkertijd veranderde het morfologisch karakter van een aantal geulen in het centrale en zuidelijke deel van de buitendelta. De Wielingen ontwikkelde van een gecompliceerd stelsel van eb- en vloedscharen naar één, grote ebgeul. Vanuit het zeegat ontstond ten zuiden van de Deurlo een nieuwe ebschaar welke de loop van de Spleet overnam. De Deurlo zelf onderging diverse veranderingen. Door deze ontwikkelingen is het geulpatroon in het mondingsgebied veranderd van een systeem waarbij de grootste scharen in het centrale deel lagen naar een systeem waarbij langs de Vlaamse kust één grote ebschaar ligt en in het centrale deel meerdere kleine eb- en vloedscharen ontstaan zijn. Opvallend hierbij is het ontstaan van nieuwe ebscharen vanuit het zeegat, waardoor er een herverdeling van eb- en vloeddebieten in het centrale deel van de buitendelta ontstaat.

Tussen 1800 en 1968 nam het oppervlak aan intergetijdegebied in het estuarium met 90 km² verder af. Als gevolg hiervan, alsook van de verdieping van de geulen, nam de gemiddelde diepte sterk toe.

- Samenvatting

De ontwikkeling van de Westerschelde buitendelta sinds het begin van de 16e eeuw kan als volgt samengevat worden: In het centrale deel van de buitendelta ontwikkelde de Deurloo in de 17e eeuw tot een belangrijke geul, welke zijn grootste omvang aan het eind van de 18e eeuw bereikte. Tegelijkertijd verminderde de betekenis van de geulen Wielingen en Spleet door het ontstaan van banken in hun landwaartse deel. Na 1800 nam de betekenis van de Deurloo weer af en werd de Wielingen de belangrijkste geul in het buitengebied. De Spleet

is vrijwel geheel verdwenen. Gedurende de gehele periode was er een geul dicht onder de oever van Walcheren aanwezig (Botkil, Oostgat). De betekenis van het Oostgat is vanaf 1800 toegenomen.

De verlanding van het Zwin, en ook oudere geulsystemen in Zeeuws-Vlaanderen, heeft geresulteerd in het geleidelijk verdwijnen van de hiermee samenhangende morfologie welke de ontwikkeling van de Wielingen beïnvloedde. De invloed van deze ontwikkeling is in veel studies over het Westerschelde mondingsgebied ten onrechte buiten beschouwing gelaten.

De veranderingen in de morfologie van de buitendelta werden waarschijnlijk gestuurd door veranderingen in de hydraulische condities in het gebied. Met name de vervroeging van de getijstroming in het zeegat na de 17e eeuw als gevolg van de verlanding van het estuarium kan hierop van invloed geweest zijn.

A.2.2 Opbouw van de ondergrond van het mondingsgebied

In de ondergrond van de Westerschelde monding worden Tertiaire, Pleistocene en Oud-Holocene lagen aangetroffen. Hierop liggen de (sub)recente afzettingen van de Westerschelde buitendelta. Langs de ZW-oever van Walcheren komt een (vrijwel) complete opeenvolging van Tertiaire, Pleistocene en Holocene sedimenten voor. Langs de oever van Zeeuws-Vlaanderen liggen de Holocene afzettingen direct op Tertiaire afzettingen. De genoemde oudere afzettingen kunnen in principe aangesneden worden door migrerende geulen in het mondingsgebied.

De Westerschelde buitendelta bestaat grotendeels uit een pakket zandige en siltige afzettingen van migrerende geulen, met een gemiddelde dikte van 15 á 25 m. Deze afzettingen bevatten dunne kleilaagjes, terwijl lokaal dikkere kleilagen (tot ca. 2 m dikte) voor kunnen komen. Hierop komen slib-arme zanden voor welke in de ondiepe bankgebieden gevormd zijn, waar slib nauwelijks bezinkt als gevolg van de golfwerking. De dikte van het sedimentpakket neemt globaal toe van ZW naar NO en bereikt een maximum van meer dan 25 m in het noordoostelijk deel van de buitendelta. In de huidige geulen is het pakket dun. Lokaal in de geulen Wielingen, Oostgat en Honte ontbreken deze afzettingen en komen de onderliggende Tertiaire en Pleistocene formaties aan het oppervlak voor.

A.2.3 Invloed van de samenstelling van de ondergrond op de morfodynamiek

Zoals in Par. A2.1 is geconstateerd, zal de invloed van de opbouw van de ondergrond zich het duidelijkst doen gelden in het morfodynamisch gedrag van de geulen.

In Oostgat ter hoogte van Westkapelle worden Laat-Pliocene en Vroeg-Pleistocene, overwegend zandige afzettingen aangesneden op een diepte van 20 m en meer. Of de hier bereikte diepte van het Oostgat natuurlijk is valt te betwijfelen. Door de oeververdediging op Walcheren zal het Oostgat zich aan de voet van de verdediging ingesneden hebben. Het is niet waarschijnlijk dat de kleihoudende fijne zanden van de genoemde Tertiaire en Pleistocene afzettingen hier veel weerstand tegen geboden hebben.

De Wielingen snijdt ten noordwesten van Breskens, op de overgang naar de Rede van Vlissingen, de Boomse Klei aan. Dit betekent dat het diepste deel van de Wielingen hier vastgelegd is door de Boomse Klei, en dat een westwaartse uitbreiding van het diepste deel van de Wielingen sterk bemoeilijkt zal worden. Ook een noordwaartse verplaatsing van het diepste deel van de Wielingen in de toekomst zal bemoeilijkt worden.

Het ligt voor de hand dat het zo ondiep voorkomen van de Boomse Klei een rol heeft gespeeld in de ontwikkeling van de Wielingen. Door de complexiteit van de morfologische veranderingen in en rond de Wielingen over de laatste eeuwen is deze invloed op dit moment niet duidelijk vast te stellen.

In de Honte bij Rammekens en Borssele worden Laat-Tertiaire en Vroeg-Pleistocene zanden met ingeschakelde kleilagen aangesneden. Bovenin deze afzettingen komen metersdikke schelpenbanken voor. Ook hier zal de oeververdediging een rol spelen in de diepe uitschuring van de geulen. De zanden waaruit deze afzettingen hier vooral bestaan zullen waarschijnlijk weinig weerstand tegen erosie geboden hebben. De lokaal ingeschakelde kleilagen en schelpenbanken zullen meer weerstand tegen erosie bieden.

Op grond van de huidige informatie lijkt onder de Raan en de Vlakte van de Raan, vanaf een diepte ca. 10 onder NAP, een ouder Holoceen kleipakket voor te komen. Dit pakket zal invloed uitgeoefend hebben op de laterale verplaatsing van de Deurloo. De Tertiaire en Pleistocene formaties liggen in dit gebied te diep om van enige betekenis te zijn voor de dynamiek van de relatief ondiepe geulen. Een eventuele landwaartse verplaatsing van het zeewaartse deltafront van de buitendelta kan vertraagd worden door de oudere Holocene lagen.

A.2.4 Grootschalige ontwikkeling van getijbekkens en effecten op de sedimentimport

De morfologische ontwikkelingen in het estuarium hebben o.a. ook invloed op de getijstroming en het sedimenttransport in de monding. Op lange termijn wordt het sedimenttransport naar een getijbekken in de Nederlandse kustvlakte in principe bepaald door twee, elkaar tegenwerkende, mechanismen. Het getij in de Noordzee veroorzaakt grotere landwaartse vloedsnelheden in het zeegat van een bekken, welke op hun beurt zullen leiden tot een netto bekkeninwaarts sedimenttransport. Echter, deze bekkenwaartse transportgradiënt wordt tegengewerkt door de vervorming van het getij in het bekken als gevolg van de aanwezigheid van grote oppervlaktes intergetijde platen. Platen zijn in verhouding tot geulen ondiep, waardoor de stroomsnelheden er relatief laag zijn. Hierdoor verloopt de vulling van een platengebied langzaam en blijft de vloedstroming in de geulen doorgaan totdat de waterstanden op de plaat en in de geul gelijk zijn, vaak ruim ná hoogwater. Het maximale vloeddebiet valt dan later in de tijd, dat wil zeggen bij een hogere waterstand en dus een grotere natte doorsnede van de geulen. Dit heeft lagere maximale vloedsnelheden en verlenging van de vloedperiode tot gevolg. Daarnaast versterkt de aanwezigheid van platen de ebstroming. Dit laatste is weer het gevolg van het vertraagd leegstromen van de platen, waardoor de maximum debieten bij lagere waterstanden, en dus

kleinere doorstroomoppervlakken, optreden. De aanwezigheid van platen werkt de netto import van sediment dus tegen.

In theorie kan er op den duur een evenwichtsoppervlak aan platen bereikt worden waarbij het vloeddominante verticale getij in het zeegat gecompenseerd wordt door een ebdominant horizontaal getij als gevolg van de getijvervorming door grote plaatgebieden. Dit evenwicht is echter niet te verwachten omdat door het settling- and scour lag effect toch zwevend sediment zal bezinken in het bekken. Door deze sedimentatie, welke vooral in de ondiepe gebieden plaatsvindt, slibt het intergetijdegebied tot boven GHW op, waardoor het netto plaatareaal weer afneemt. De vervorming van het horizontale getij zal hierdoor afnemen. Daarnaast creëert deze verkleining van het getijprisma een nieuwe vraag naar sediment om de doorsnede van de geulen te verkleinen.

Modellering van de getijbeweging in de Westerschelde voor 1650, 1800 en 1961 (Van der Spek, 1997a) laat zien dat de afname van het oppervlak aan intergetijdegebied in het estuarium, in de monding leidde tot een afname in de naijling van de getijstroming ten opzichte van de waterstandsveranderingen. De stroomkenteringen, vooral de laagwaterkentering, vallen sneller na hoog- en laagwater. Het maximale ebdebiet valt aanzienlijk vroeger en dus bij een hogere waterstand. Verder suggereren de simulaties dat de ebperiode in duur afnam en dat de maximale vloedsnelheid ten opzichte van de maximale ebsnelheid verminderde. Dit betekent dus dat de aanvoer van sediment in de tijd afgenomen zal zijn.

De simulaties van de getijstroming in de Westerschelde laten zien dat het getijdeprisma sinds het midden van de 17e eeuw niet veel veranderd is. Indien dit juist is zal de omvang van de buitendelta ook niet veel veranderd zijn.

A.2.5 Hydraulische veranderingen en mogelijke effecten op de morfologie van de buitendelta

Van den Berg (1987) en Sha en Van den Berg (1993) geven een theoretische beschouwing over de interactie van de getijstroming langs de kust en in een zeegat. De faseverschillen tussen beiden bepalen het stroompatroon in de buitendelta's en daarmee waarschijnlijk ook de morfologische ontwikkeling. Voor de Zeeuwse kust blijkt dat de noordwaartse vloedstroming op zee nog aanhoudt na het bereiken van hoogwater. Hierdoor is er een faseverschil van ca. 3 uur tussen het getij in het zeegat en het getij buitengaats (Van den Berg, 1987). Dit betekent dat de maximale eb- en vloedstroming in het zeegat ongeveer samenvallen met kentering op zee, waardoor er dan een min of meer radiaal stromingspatroon over de buitendelta bestaat. Dit vindt zijn weerslag in het geulpatroon van het mondingsgebied.

Het bovenstaande betekent dat eventuele veranderingen in het faseverschil tussen het getij buitengaats en in het zeegat hun weerslag zullen hebben op de morfologie van de buitendelta. De simulaties van het paleogetij in de Westerschelde laten zien dat tussen 1650 en 1800 met het afnemen van het oppervlak aan intergetijdegebied in het estuarium het horizontale getij in het zeegat meer in fase komt met het verticale getij. Dit betekent een

vervroeging van de momenten van maximale stroming, met name van maximale ebstroming.

De uitbreiding van het estuarium tot het midden van de 17e eeuw zal waarschijnlijk een omgekeerd effect op het getij gehad hebben als de veranderingen daarna. Door de toename van het oppervlak aan intergetijdegebied zal de vulling en lediging van het estuarium vertraagd zijn. De maximale debieten vielen waarschijnlijk steeds later in de getijcyclus, waardoor de verhangen over de buitendelta veranderd zullen zijn. Deze verhangen zijn sturend voor de stroming over de buitendelta (Van Veen, 1936). Een significante verandering in fase tussen horizontaal en verticaal getij in het zeegat zou aldus tot een verandering van het geulpatroon op de buitendelta aanleiding kunnen geven. Als we dit vertalen naar de situatie in de Westerscheldemond dan zou gesteld kunnen worden dat in de 17e eeuw de periode van uitstroming uit het zeegat vooral tijdens vloedstroming op zee en instroming door het zeegat tijdens ebstroming op zee valt. Hierdoor kwam een meer radiaal stromingspatroon dan heden ten dagen voor, waarbij een relatief groot deel van het debiet door de geulen in het centrale deel van de buitendelta (Deurloo, Spleet) stroomde. Met het afnemen van het oppervlak aan intergetijdegebied in het estuarium na de 17e eeuw zullen de hoog- en laagwaterkenteringen in het zeegat eerder vallen, waardoor de in- en uitstroming meer gaat samenvallen met stroming op zee. Hierbij zal het in- en uitgaande debiet in het zuidelijk deel van de buitendelta, met name door de Wielingen, relatief toegenomen zijn en het in- en uitgaande debiet in het centrale deel van de buitendelta (Deurloo, Spleet) relatief afgenomen zijn.

Deze hypothese dient verder uitgewerkt en getoetst te worden.

A.2.6 Sedimentuitwisseling tussen mondingsgebied en omgeving

De beschikbare gegevens met betrekking tot grootschalig sediment transport laten zien dat fossielen welke ter hoogte van de Westerschelde monding uit oude afzettingen eroderen, tot aan IJmuiden aangetroffen worden. Dit suggereert een netto noordwaarts transport. De samenstelling van de buitendelta sedimenten duidt op de omwerking van ter plaatse voorkomende oude afzettingen en een aanvoer van sediment uit zee. Een eenduidige conclusie over aanvoer van zand is niet te trekken.

De verlanding van het estuarium suggereert een aanzienlijke import van sediment. Zie verder sedimentbalans studies (v.d. Slikke etc.)

Referenties

Berg, J.H. van den, 1987. Toelichting bij de Isallobatenkaart Voordelta 1975-1984. Nota ZL 87.0020, Rijkswaterstaat, Directie Zeeland, Middelburg, 49 pp.

Cauwenberghe, C. van, 1966. Hydrografische analyse van de Scheldemonding ten oosten van de meridiaan 3°05' tot Vlissingen. Het Ingenieursblad (Halfmaandelijks Orgaan van de Koninklijke Vlaamse Ingenieursvereniging KVIV), 35, 17: 565-576.

Enckevoort, I. Van, 1996. Morfologisch Onderzoek Westerschelde Monding, Deel 2; Morfologische Ontwikkeling van de Westerschelde Monding sinds 1800. Rapport R96-21-2, Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek Utrecht, Universiteit Utrecht, 44 pp.

Sha, L.P., en J.H. van de Berg, 1993. Variation in ebb-delta geometry along the coast of the Netherlands and the German Bight. Journal of Coastal Research, 9, 3: 730-746.

Slikke, M.J. van der, 1997. Grootschalige zandbalans van de Westerscheldemonding (1969-1993). Een inventarisatie van de dieptegegevens (1800-1996). Rapport R97-18. Institute for marine and atmospheric research Utrecht.

Slikke, M.J. van der, 1998. Grootschalige zandbalans Westerscheldemonding (1969-1993). Rapport R98-05. Institute for marine and atmospheric research Utrecht.

Spek, A.J.F. van der, 1997a. Tidal asymmetry and long-term evolution of Holocene tidal basins in The Netherlands: simulation of palaeo-tides in the Schelde estuary. Marine Geology, 141: 71-90.

Spek, A.J.F. van der, 1997b. De geologische opbouw van de ondergrond van het mondingsgebied van de Westerschelde en de rol hiervan in de morfologische ontwikkeling. Rapport NITG 97-284-B, Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO, Haarlem, 46 pp.

Veen, J. van, 1936. Onderzoekingen in de Hoofden in Verband met de Gesteldheid van de Nederlandsche Kust. Proefschrift, Leiden. Algemeene Landsdrukkerij, 's Gravenhage, 252 pp.

Appendix B
Tijdschalen macro- en mesocellen

Claire Jeuken

Z2878

B Tijdschalen van macro- en mesocellen

De tijdschalen in Tabel B.1 zijn bepaald op basis van analyses van historische gegevens (vaklodingen).
'Aanwezig sinds' heeft betrekking op de cel zoals aangegeven in de kaart van 1996. Met de **tijdschaal** wordt hier de **levensduur van de geulen** bedoeld. Deze is niet specifiek voor de kaart van 1996, maar geeft een indicatie van de variatie in tijdschalen op die plaats, zoals die uit kaartanalyses naar voren komt. De tijdschalen voor de macro- en mesocellen, genoemd in Deel 1, hebben betrekking op de responstijd van de cellen, d.w.z. de tijd waarover veranderingen zich voltrekken.

*Tabel B.1: Overzicht met karakteristieke tijdschalen en morfologische processen in de diverse macro- en mesocellen in de Westerschelde. Gegevens ontleend aan Jeuken (2000, in voorbereiding). **EG**=ebgeul, **VG**=vloedgeul. **KG**=kortsluitgeul.*

Cel	Geulnamen (indien van toepassing).	Aanwezig sinds	Tijdschaal levensduur (jaren)	Morfologisch processen
1	Honte = EG Schaar van de Spijkerplaat =VG	1818/1860	>150	Vloedgeul erodeert sinds tenminste 1955. Ebgeul wordt gekenmerkt door sedimentatie sinds ca. 1964.
1a	Ebschaar naar de Spijkerplaat = EG en KG	1964	10-35	Kortsluitende drempelgeulen die een quasi-cyclisch gedrag vertonen. Cel 1a degenereert sinds ongeveer 1984. Sinds 1990 nieuwe kortsluitgeulen die in 1996 nog geen duidelijke meso-schaal cel vormen.
1b			?	Inscharing door vloedstroom, geen uitgesproken geulvorming.
2a,2b	Vaarwater langs Hoofdplaat		>150	Voormalige grote vloedgeul die tot ca. 1818 met de ebgeul van de huidige cel 1 een macro-cel vormde. Sindsdien is de geul aan het degenereren. Rond 1931 ontstaan de huidige meso-schaal cellen. Degeneratie van de meso-cellen gaat tot op heden door.
2c,2d	Springergeul = KG Thomaesgeul = KG Vaarwater langs Hoofdplaat	ca. 1931	50-100	Ebgedomineerde kortsluitgeulen die intergetijde gebieden doorsnijden. Quasi-cyclisch geulgedrag.

Cel	Geulnamen (indien van toepassing).	Aanwezig sinds	Tijdschaal levensduur (jaren)	Morfologisch processen
3	Everingen = VG Pas van Terneuzen = EG		>200	Vloedgeul erodeert. De sedimentbalans van de ebgeul is redelijk stabiel.
3a	Zuid-Everingen = KG	1945/1955	50-100	De vorige kortsluitgeul het Stoombotengat heeft een levensduur van ca. 100 jaar gekend. Geul is vermoedelijk aan het degenereren.
3b		1996	50-100?	Nieuwe kortsluitgeul Zuid-Everingen (3a)?
3c	Ebschaar naar de Everingen = KG	1988	10-15	Degenererende meso-cel. Quasi-cyclisch gedrag van kortsluitgeulen.
3d	nieuwe Ebschaar naar de Everingen	1995	10-15?	Nieuwe kortsluitgeul (ebgeul).
4	Middelgat = EG Gat van Ossenisse=VG	1890	>100	Ebgeul sedimenteert 1931-1986, daarna stabiel. Vloedgeul erodeert tot op heden.
4a		<1974	25-50?	Inscharing door vloedstroom. Geen echte geulvorming.
4b	Overloop van Hansweert =VG	1951	>50	De aanwezigheid van deze cel hangt samen met het ontstaan van een kortsluitgeul in 1951. Door deze natuurlijke 'bochtafsnijding' is het ondiepe drempelgebied van de vloedgeul verdwenen. De huidige meso-cel is groter dan de oorspronkelijk kortsluitgeul door het optreden van binnen- en buitenbocht effecten in de waterbeweging.
5	Schaar van Valkenisse =VG Schaar van Waarde = VG Zuidergat/Overloop van Valkenisse = EG	1818	>200	Vloedgeul lijkt sinds begin 1900 te degenereren: opsplitsing in kleinere geulen, waarvan de Schaar van Valkenisse er 1 is. Omvangrijke storting na de eerste verdieping hebben geleid tot een (versterkte?) netto sedimentatie in de geul . Sinds ca. 1990 is de geul weer aan het eroderen. De ebgeul is verruimd, mede als gevolg van baggeren.
5a	Schaar van Walsoorden = VG	1970?	>30	Inscharing en tendens tot geulvorming ten gevolge van de vloedstroom.
5b		?	5-10	Mesocel circulaties zijn met het degenereren van de vloedgeul in aantal en omvang afgenomen. Sinds ca. 1986 weer nieuwe kortsluit-geulen in drempelgebied van de vloedgeul.

Cel	Geulnamen (indien van toepassing).	Aanwezig sinds	Tijdschaal levensduur (jaren)	Morfologisch processen
6	Nauw van Bath = EG Schaar van de Noord = VG	1818/1860	>150	Ebgeul is netto geërodeerd als gevolg van baggeren. Vloedgeul verandert weinig. In het verleden werd de geul volgestort totdat deze onbereikbaar werd voor de baggerschepen. Na een paar jaar kon de geul weer als stortlocatie in gebruik worden genomen. Aanpassingstijdschaal een paar jaar.
7	Vaarwater van Bath = EG Appelzak = VG	1818/1860	>150	Ebgeul erodeert netto als gevolg van baggeren. Vloedgeul erodeert enigszins. Sinds 1971 wordt de geul aan de landwaartse zijde begrensd door een leidam.

Referenties

Jeuken, M.C.J.L., 2000, On the morphodynamics of the tidal channels in the Westerschelde estuary, PhD-thesis, University of Utrecht, in preparation.

Appendix C
Sedimentbehoefte ééngeulsysteem

Z.B. Wang

Z2878

C Sedimentbehoefte ééngeulsysteem 1

C.1 Inleiding 1

C.2 Beschrijving ééngeul systeem 1

C.2.1 Algemeen model 1

C.2.2 Alternatief I 2

C.2.3 Alternatief II 2

C.2.4 Randvoorwaarde 3

C.2.5 Discussie 3

C.3 Berekenen van zandbehoefte en tijdschaal 4

C Sedimentbehoefte ééngeulsysteem

C.1 Inleiding

Eén van de basishypothesen van de huidige studie is dat de eb-vloedschaarsystemen in de Westerschelde een belangrijke rol spelen in de morfologische dynamiek van het estuarium. Het verdwijnen van deze systemen zal leiden tot verlanding en het estuarium zal tot een ééngeulsysteem ontaarden. Dit verlandingsproces heeft sediment nodig dat via de monding moet worden geïmporteerd. In deze analyse wordt de totale sedimentbehoefte voor de verandering van het huidige estuarium tot een ééngeulsysteem geschat. Aan de hand van het sediment-importerend vermogen van het systeem kan vervolgens een schatting worden gemaakt van de orde van grootte van de morfologische tijdschaal voor deze mega-schaal ontwikkeling.

C.2 Beschrijving ééngeul systeem

C.2.1 Algemeen model

De schatting van deze morfologische tijdschaal wordt gemaakt door het totale natte volume van het toekomstige ééngeulsysteem te berekenen, en dit van het huidige volume af te trekken. Dit betekent dat een voorspelling moet worden gemaakt van het volume van het ééngeulsysteem onder evenwichtscondities. Voor deze voorspelling wordt gebruik gemaakt van de volgende empirische relatie:

$$A = \alpha P \tag{C.1}$$

met

A = oppervlakte van dwarsprofiel
α = coëfficiënt, met dimensie [L^{-1}]
P = getijprisma

Voor het getijprisma geldt per definitie

$$\frac{dP}{dx} = B(x)H(x) \tag{C.2}$$

waarbij

x = coördinaat, positief = van bovenstrooms naar benedenstrooms
B = representatieve breedte
H = getijverschil

Als er ook een vergelijking beschikbaar is voor de relatie tussen B en A kan een vergelijking voor A worden afgeleid. Het ééngeulvolume zal voor twee alternatieve relaties worden uitgewerkt.

C.2.2 Alternatief I

Als eerste alternatief wordt een lineaire relatie tussen B en A gebruikt. Met andere woorden, de gemiddelde diepte in het estuarium wordt constant (= h_0) verondersteld:

$$B(x) = \frac{A(x)}{h_0} \tag{C.3}$$

Er volgt nu

$$\frac{dA}{dx} = \alpha \frac{H(x)}{h_0} A \tag{C.4}$$

Voor het berekenen van het verloop van het getijverschil H(x) is eigenlijk een stromingsmodel vereist. Maar het gaat hier om een orde van grootte schatting. Daarom wordt een vereenvoudiging gehanteerd door te veronderstellen dat het getijverschil over de lengte van het systeem constant is. De oplossing van vergelijking (C.4) is dan:

$$A = A(0)\exp\left(\alpha \frac{H}{h_0} x\right) \tag{C.5}$$

C.2.3 Alternatief II

Voor het tweede alternatief wordt de relatie tussen breedte en diepte van onbelemmerde geulen, zoals gepresenteerd door Allersma (1992), gebruikt (zie Fig. C.1):

$$B = 2.5\,h^2 \tag{C.6}$$

Met A = BH volgt hieruit

$$B = \beta A^{2/3} \tag{C.7}$$

Met deze relatie wordt de oplossing van (C.4):

$$A = \left(\frac{\alpha\beta H}{3} x + A_0^{1/3}\right)^3 \tag{C.8}$$

Hierin is A_0 de waarde van A bij x = 0 en $\beta = 2.5^{1/3}\ m^{-1/3}$.

C.2.4 Randvoorwaarde

Voor de oplossing van de oppervlakte van het dwarsprofiel, zoals weergegeven in vergelijkingen (C.5) en (C.8), moet A op x = 0 bekend zijn. Zoals in deze twee vergelijkingen is gepresenteerd, wordt de randvoorwaarde aan de bovenstroomse zijde opgelegd, wat eigenlijk niet zo handig is gezien het exponentieel groeiende karakter van de oplossingen. De oplossing zou minder gevoelig zijn voor fouten in deze randvoorwaarde als de rand aan de benedenstroomse zijde wordt gekozen.

Gezien het feit dat het dwarsprofiel onbekend is aan beide zijden van het estuarium wordt een minimale en een maximale optie uitgewerkt. Voor de minimale optie wordt verondersteld dat de invloed van het getij bij de Nederlandse grens verdwenen is. Uit het feit dat de gemiddelde afvoer van de rivier ongeveer 100 m^3/s is, volgt dat de dwarsoppervlakte daar in de orde van grootte van 100 m^2 zal zijn. Voor de maximale optie wordt gebruik gemaakt van de gegevens zoals door Allersma (1992) is gebruikt voor het bepalen van de empirische relatie tussen de oppervlakte van het dwarsprofiel en het getijvolume (zie Fig. C.2). Deze figuur laat zien dat de verhouding tussen het getijvolume en het dwarsoppervlak van het estuarium ongeveer 25 km is. De figuur laat ook zien, dat er blijkbaar een maximale afmeting van geulen is. Als het dwarsoppervlak groter dan ongeveer 25000 m^2 is, is er sprake van een meergeulensysteem. Omgekeerd kan ook worden gesteld dat in een ééngeulsysteem de oppervlakte van het dwarsprofiel maximaal ongeveer 25000 m^2 is. Daarom wordt voor de maximale optie als randvoorwaarde de waarde van 25000 m^2 toegepast bij de Westerscheldemonding.

C.2.5 Discussie

Eerst wordt gekeken of de gevonden oplossingen realistisch zijn, voordat de zandbehoefte er mee wordt berekend. De oplossing (C.5) laat een exponentieel verloop van de oppervlakte van het dwarsprofiel zien met een lengteschaal van

$$L_a = \frac{h_0}{\alpha H} \tag{C.9}$$

Met h_0 = 10 m, H = 4 m en α = 1/12500 m^{-1} is de orde van grootte van deze lengteschaal 30 km. In Fig. C.3 is het verloop van het vloedvolume en het getijprisma van het estuarium in de huidige situatie weergegeven, waaruit blijkt dat 30 km een goede schatting (zij het een ondergrens) van de lengteschaal van dit verloop is.

Voor de tweede oplossing (C.8) kan men ook een lengteschaal afleiden, maar deze is dan afhankelijk van de waarde van A:

$$L_a = \frac{3A}{2\alpha\beta H} \tag{C.10}$$

L_a varieert dus van ongeveer 16 km bij A = 100 m^2 tot ongeveer 100 km bij A=25000 m^2. Dus ook deze oplossing ziet er niet onrealistisch uit in vergelijking met de data. Op basis

hiervan wordt dan ook verwacht dat het verschil tussen de twee verschillende oplossingen niet erg groot zal zijn.

C.3 Berekenen van zandbehoefte en tijdschaal

Voor het bepalen van het natte volume van het estuarium worden de data van 1996 gebruikt. Uit de gegevens zoals gerapporteerd in Mol e.a. (1997) kan worden afgeleid dat het totale natte volume van het estuarium onder NAP op dit moment ongeveer 1,9 miljard m^3 is.

Voor het bepalen van het toekomstige volume bij het ééngeulsysteem worden de hierboven gepresenteerde oplossingen voor A gebruikt. Er geldt per definitie

$$V_{nat} = \int_0^L A \, dx \tag{C.11}$$

Voor de lengte van het estuarium wordt de afstand tussen Vlisssingen en de grens gebruikt, dus ongeveer 60 km.

In de tabel hieronder worden de berekende volumes gegeven volgens beide oplossingen en de twee opties.

	Minimale optie (A_0 = 100 m^2)	Maximale optie (A_0 = 2500 m^2)
Oplossing (C.5)	18 miljoen m^3	750 miljoen m^3
Oplossing (C.8)	54 miljoen m^3	950 miljoen m^3

Voor de minimale optie is het resultaat veel gevoeliger voor de keuze van de oplossing. Dit komt doordat de randvoorwaarde aan de bovenstroomse zijde is opgelegd.

Zoals Fig. C.3 laat zien is het ééngeul gedeelte van het huidige estuarium veel langer dan 60 km. Dit betekent dat de minimale optie waarschijnlijk minder realistisch is dan de maximale optie. Daarom wordt de maximale optie verder gehanteerd. In dat geval is het resultaat niet meer zo gevoelig voor de keuze van de oplossing. Volgens beide oplossingen is de orde van grootte van de zandbehoefte 1 miljard m^3.

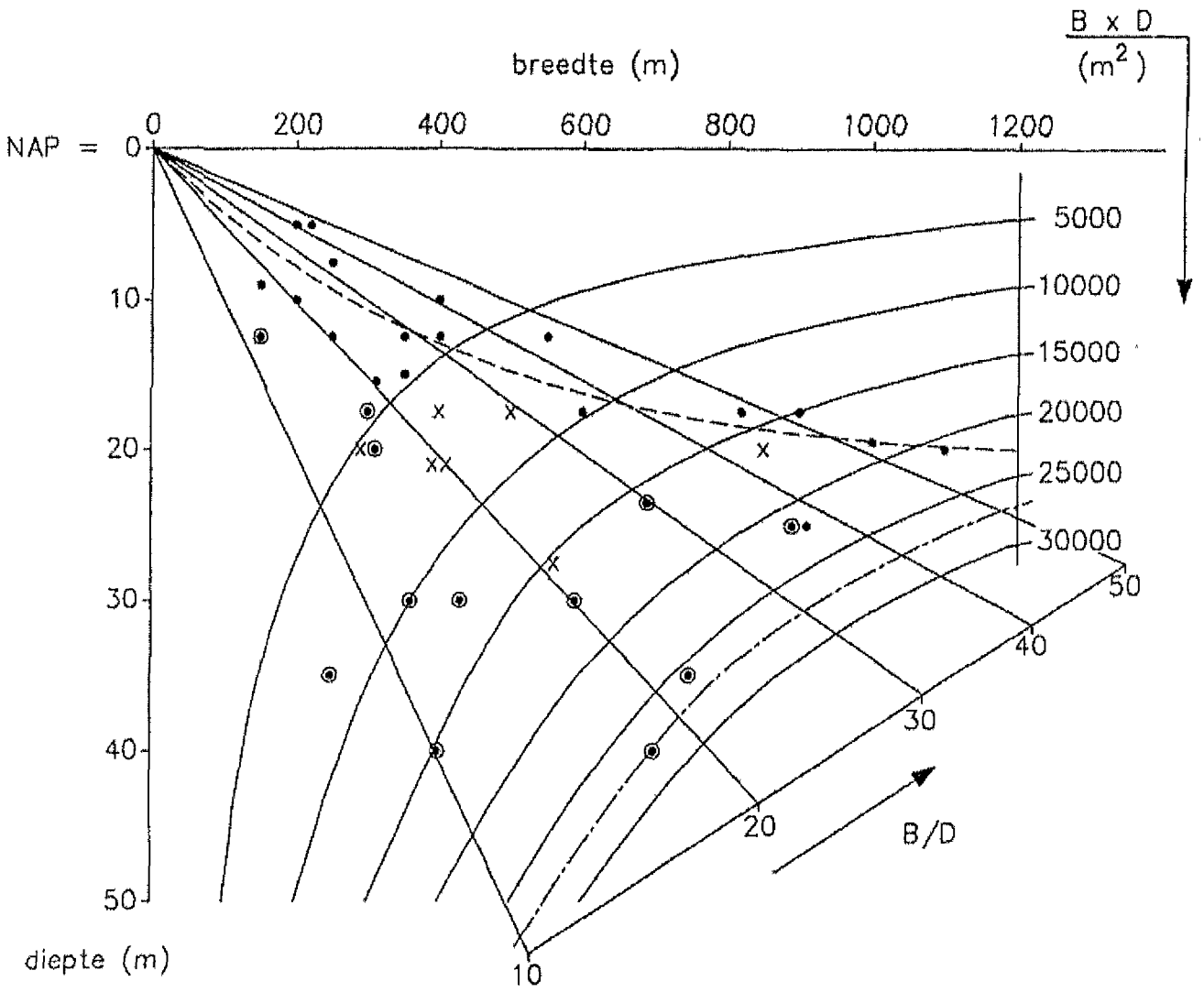
Uit de zandbalansanalyse door Uit den Bogaard (1995) blijkt dat de import van sediment bij de monding orde van grootte 1 miljoen m^3 per jaar is. Dit sedimenttransportend vermogen kan afnemen als gevolg van verlanding maar het kan ook vergroten door verandering van getijkarakteristieken (getijasymmetrie etc.) in het estuarium. Globaal kan worden gesteld dat de orde van grootte van de tijdschaal van de eventuele verlanding 1000 jaar is.

Referenties

Allersma, E., 1992, Studie inrichting oostelijk deel Westerschelde, Analyse van het Fysische systeem, Nota voor de werkgroep OOSTWEST, Rapport Z368, Waterloopkundig Laboratorium.

Bogaard, L.A. Uit den, Resultaten Zandbalans Westerschelde, Rapport R 95-08, IMAU.

Mol, G., A.M. van Berchum, G.M. Krijger, 1997, De toestand van de Westerschelde aan het begin van de verdieping 48'/43', Rapport RIKZ 97-049, RIKZ.

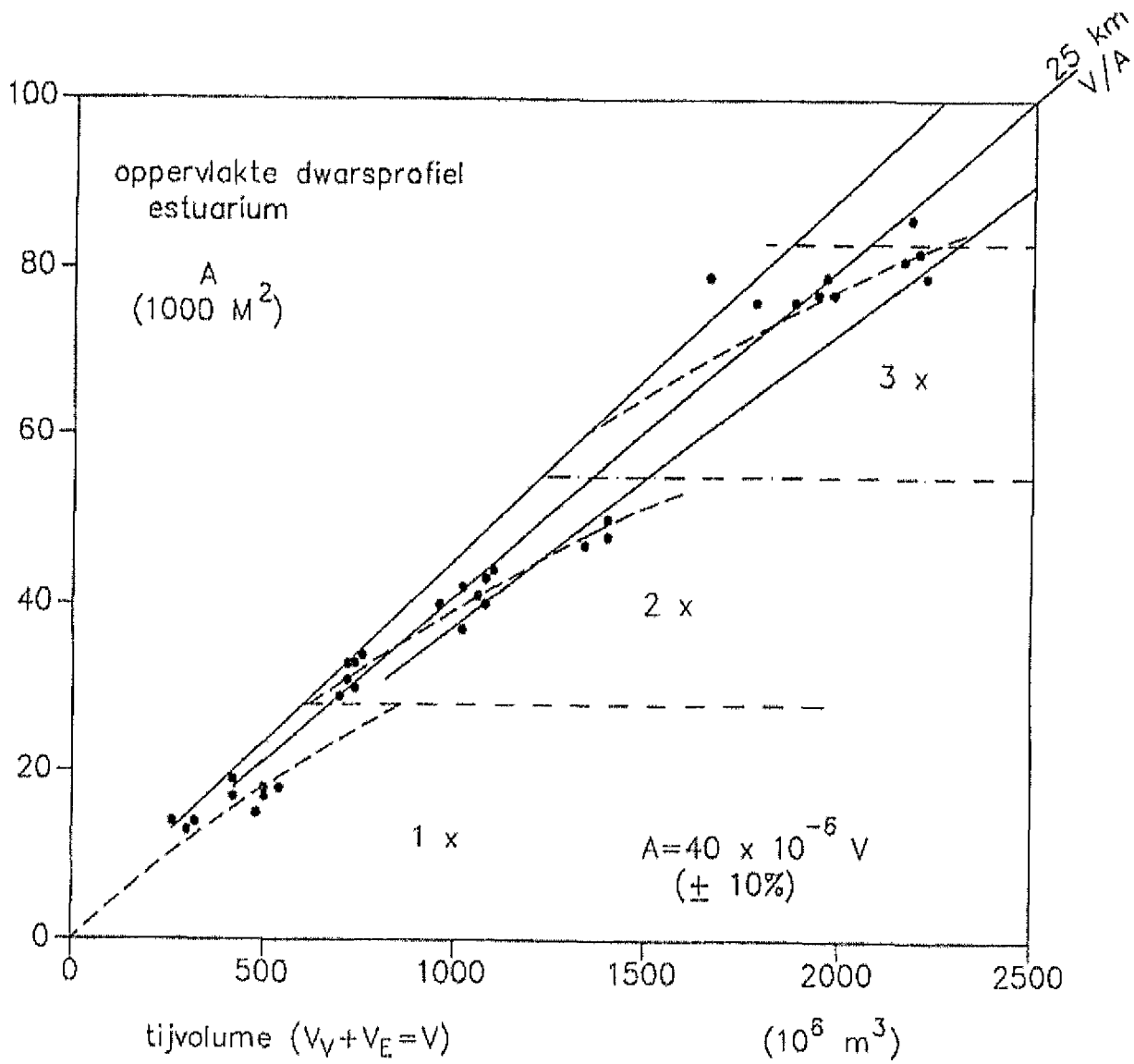


• onbelemmerd (---) $B \approx 2{,}5\ h^2$

x in een (scherpe) bocht

⊛ insnoering

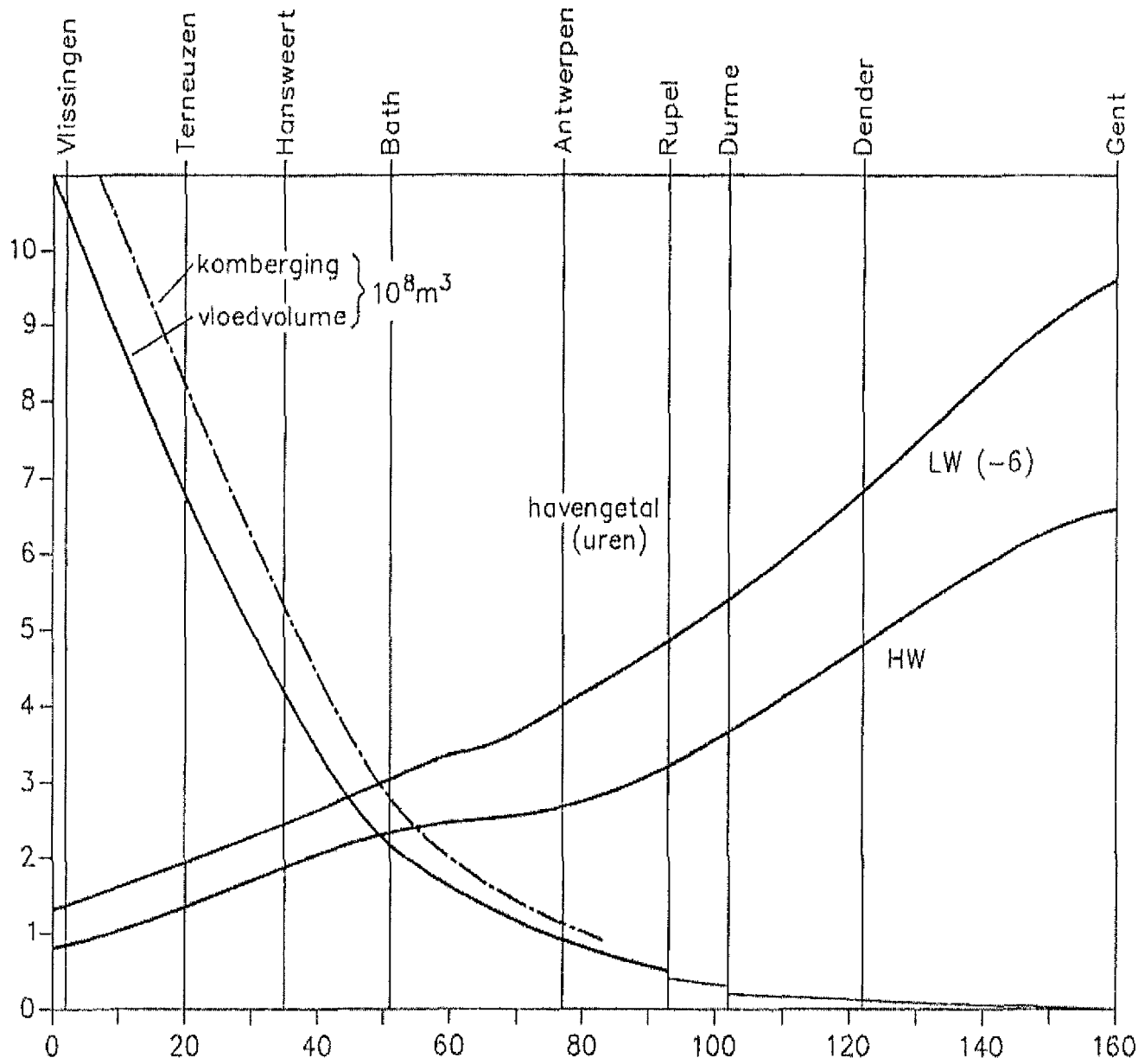
Breedte diepte verhouding van geulen Allersma (1992)	Aug.	2000
	LTV W'schelde	
WL | DELFT HYDRAULICS	Z2878	Fig.C.1



Relatie tussen oppervlakte van dwarsprofielen en getijvolume
Westerschelde
Allersma (1992)

Aug.	2000
LTV W'schelde	
Z2878	Fig.C.2

WL | DELFT HYDRAULICS



Verloop van getijvolume in de Westerschelde
Allersma (1992)

Aug.	2000
LTV W'schelde	
Z2878	Fig.C.3

WL | DELFT HYDRAULICS

Appendix D
Analyse morfologische cel

Z.B. Wang

Z2878

D Analyse morfologische cel 1

D.1 Inleiding 1

D.2 Basistheorie 1

D.3 Plaat-geulinteractie 4

D.4 Tijdschaal beschouwing 6

D.5 Conclusies 7

D Analyse morfologische cel

D.1 Inleiding

In een natuurlijk estuarium kunnen verschillende geulen parallel naast elkaar bestaan. Een veel voorkomend systeem is het eb- en vloedgeulsysteem. In de Westerschelde bestaan er verschillende eb- en vloedgeulsystemen. Menselijke ingrepen zoals baggeren en storten kan de natuurlijkheid van het estuarium beïnvloeden. Door baggeren in de ebgeul t.b.v. voldoende diepgang voor de scheepvaart, en storten van het gebaggerde materiaal in de vloedgeul, kan het meergeulensysteem meer de neiging krijgen over te gaan in een ééngeulsysteem. In dit hoofdstuk wordt onderzocht wat de omvang van ingrepen is, zodat het meergeulensysteem zich net nog kan handhaven.

Binnen het kader van de Milieuaspectenstudie Baggerspeciestort Westerschelde (Verbeek, 1997) heef Wang (1997) deze vraag beschouwd met een stabiliteitsanalyse. De conclusie daaruit is dat baggeren zelf de stabiliteit van een meergeulensysteem weinig beïnvloedt, maar het storten wel. Als de hoeveelheid van storten meer dan ongeveer 10% van het totale transportvermogen van een tweegeulensysteem bedraagt, zal het systeem instabiel worden en de neiging krijgen om tot een ééngeulsysteem over te gaan. Deze grens van 10% zal lager worden, wanneer er in de andere geul ook gebaggerd wordt.

De stabiliteitsanalyse was uitgevoerd door gebruik te maken van de theorie voor riviersplitsingen. Een belangrijke beperking van de analyse is dat het intergetijdegebied niet is meegenomen. Eb- en vloedgeulen in estuaria, zoals de Westerschelde zijn gescheiden door platen. De morfologische ontwikkeling van de geulen hangt samen met de ontwikkeling van de intergetijdegebieden. Daarom wordt in deze studie de analyse uitgebreid door de plaat-geulinteractie mee te nemen. Deze uitbreiding heeft twee doelen:

1. kijken of de plaat-geulinteractie de stabiliteit van het systeem beïnvloedt, en of de grens voor het storten daarmee wordt beïnvloed;
2. kijken hoe de plaat zelf wordt beïnvloed door het baggeren en storten.

Een andere aspect die in de vorige analyse niet is beschouwd is de tijdschaal van de ontwikkeling. Er was alleen gekeken of het gevaar bestaat dat een meergeulensysteem overgaat naar een ééngeulsysteem maar geen uitspraak is gedaan hoe lang het zal duren. In principe geeft de stabiliteitsanalyse ook enige informatie over dit aspect. Daarom wordt dit in de huidige studie nader bekeken.

D.2 Basistheorie

De bij de stabiliteitsanalyse gebruikte methode werd oorspronkelijk ontwikkeld voor riviersplitsingen (Wang e.a., 1995) en is beschreven door Wang en van der Kaaij (1994). Hier wordt een beknopte beschrijving van de methode gegeven.

Beschouw een tweegeulensysteem en neem de gemiddelde diepten van de geulen (h_1 en h_2) als morfologische toestandsvariabelen. De volgende vergelijkingen gelden dan voor de massabalans voor sediment:

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{S_{1e} - S_{1i} - I_1}{B_1 L_1}$$
$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{S_{2e} - S_{2i} - I_2}{B_2 L_2} \qquad \text{(D.1)}$$

Hierin S = sediment transport, index $_e$ staat voor uitgaand en $_i$ voor ingaand;
I = ingreep (storten is positief);
B= breedte van de geul;
L = lengte van de geul.

Het ingaand transport bij het begin van een geul wordt bepaald via de splitsingspuntrelatie:

$$\frac{S_{1i}}{S_{2i}} = \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^{1-k} \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^{k} \qquad \text{(D.2)}$$

en de continuïteitsvergelijking:

$$S_{i1} + S_{i2} = S_0 \qquad \text{(D.3)}$$

Hierbij: Q = debiet, S_0 = het bovenstrooms sedimenttransport en k = constante coëfficiënt (meestal k = 2), waarvan de waarde de stabiliteit van het systeem bepaalt in geval er geen ingreep plaatsvindt.

Het uitgaande transport aan het eind van een geul wordt bepaald door de transportcapaciteit die afhankelijk is van de stroomsnelheid Q/(Bh). De exacte vorm van deze vergelijkingen is afhankelijk van de gekozen transportformule.

De debietverdeling naar de twee geulen wordt bepaald door de geometrische parameters (B en L) en de ruwheidscoëfficiënten (Chezy).

Door al deze vergelijkingen te substitueren in (D.1) ontstaat een stelsel van twee vergelijkingen voor twee variabelen:

$$\frac{dh_1}{dt} = f_1(h_1, h_2)$$
$$\frac{dh_2}{dt} = f_2(h_1, h_2) \qquad \text{(D.4)}$$

De evenwichtstoestanden worden gerepresenteerd door de combinaties van h_1 en h_2 waarvoor geldt dat $f_1 = f_2 = 0$. Om te bekijken of een evenwichtstoestand wel of niet stabiel

is, wordt het gedrag van het systeem in de directe omgeving van dat evenwicht bekeken. In de buurt van een evenwichtstoestand (h_{1e}, h_{2e}) kan het stelsel differentiaalvergelijkingen worden gelineariseerd:

$$\begin{bmatrix} \frac{dh'_1}{dt} \\ \\ \frac{dh'_2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial h_1} & \frac{\partial f_1}{\partial h_2} \\ \\ \frac{\partial f_2}{\partial h_1} & \frac{\partial f_2}{\partial h_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h'_1 \\ h'_2 \end{bmatrix} \tag{D.5}$$

waarbij

$$\begin{aligned} h'_1 &= h_1 - h_{1e} \\ h'_2 &= h_2 - h_{2e} \end{aligned} \tag{D.6}$$

De matrix aan de rechter zijde van (D.5) wordt de Jacobiaan genoemd. Probeer nu een oplossing van (D.5) te vinden in de vorm van

$$\begin{bmatrix} h'_1 \\ h'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \end{bmatrix} \exp(\lambda t) \tag{D.7}$$

Substitutie van (D.7) in (D.5) levert

$$J \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \end{bmatrix} \tag{D.8}$$

λ is dus de eigenwaarde van de Jacobiaan met de bijbehorende eigen vector (H_1, H_2). De eigenwaarde wordt opgelost uit

$$\det \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial h_1} - \lambda & \frac{\partial f_1}{\partial h_2} \\ \\ \frac{\partial f_2}{\partial h_1} & \frac{\partial f_2}{\partial h_2} - \lambda \end{bmatrix} = 0 \tag{D.9}$$

De oplossing van (D.5) kan dus worden geschreven als

$$\begin{bmatrix} h'_1 \\ h'_2 \end{bmatrix} = \alpha_1 \begin{bmatrix} H_{11} \\ H_{21} \end{bmatrix} \exp(\lambda_1 t) + \alpha_2 \begin{bmatrix} H_{12} \\ H_{22} \end{bmatrix} \exp(\lambda_2 t) \tag{D.10}$$

Duidelijk is nu dat de stabiliteit van een evenwichtspunt wordt bepaald door het teken van de eigenwaarden van de Jacobiaan matrix. Als (de reële delen van) beide eigenwaarden negatief zijn is het evenwicht stabiel en anders is het instabiel.

Omdat het analytisch bepalen van de evenwichtstoestanden en de bijbehorende stabiliteitsanalyse voor algemene gevallen erg ingewikkeld is, wordt de methode van het numerieke fasediagram gebruikt en als volgt toegepast. In het relevante domein op het h_1-h_2 vlak worden de waarden van de twee functies in (D.4) numeriek bepaald. Vervolgens worden de isolijnen $f_1 = 0$ en $f_2 = 0$ bepaald met behulp van het tekenpakket TEKAL van WL. De kruispunten van de twee lijnen zijn per definitie de evenwichtspunten. De richting van de vector (f_1, f_2) wordt grafisch weergegeven met behulp van hetzelfde tekenpakket. Zo is direct duidelijk te zien of een evenwichtstoestand al dan niet stabiel is.

Bij de methode, zoals hierboven beschreven, is in eerste instantie uitgegaan van quasi-stationaire stroming als bij rivieren. Voor getijstromingen in een estuarium geldt hetzelfde stabiliteitscriterium voor de splitsingspunten (zie bijv. van Kerckhoven, 1995). De heen en weer gaande getijstroming kan geschematiseerd worden tot een quasi-stationaire stroming. Voor het bovenstrooms transport moet dan het totale transport (eb- + vloedtransport) worden gebruikt.

D.3 Plaat-geulinteractie

Fysisch is de sedimentuitwisseling tussen geulen en platen bepaald door het samenspel van getijstroming en windinvloeden (golven en stroming). De algemene opinie is dat platen worden opgebouwd onder rustig-weer omstandigheden en afgebroken tijdens stormen. Over de lange termijn gezien heeft de plaathoogte de neiging het hoogwater te volgen. Met andere woorden, empirisch lijkt er een evenwichtshoogte van de plaat te bestaan. Dit laatste is gebruikt in de (semi-) empirische modellen voor morfologische ontwikkelingen zoals ESTMORF.

Implementatie van de plaat-geulinteractie in deze studie via procesbeschrijving is een onhaalbare weg om twee redenen. Ten eerste, onze algemene kennis van de relevante processen is nog te beperkt. Ten tweede, het huidige model is niet geschikt om de gedetailleerde procesbeschrijving mee te nemen. Daarom wordt besloten de ESTMORF aanpak te gebruiken voor het meenemen van de plaat-geuluitwisseling. Het stelsel vergelijkingen (D.4) wordt dus als volgt uitgebreid:

$$\begin{aligned} \frac{dh_1}{dt} &= f_1(h_1, h_2) + g_1(h_1, h_p) \\ \frac{dh_2}{dt} &= f_2(h_1, h_2) + g_2(h_2, h_p) \end{aligned} \tag{D.11}$$

waarbij h_p de plaathoogte is. Voor het meenemen van de plaat-geulinteractie is dus een nieuwe afhankelijke variabele geïntroduceerd. Dit betekent dat het een stelsel van drie vergelijkingen voor drie variabelen wordt. Stabiliteitsanalyse van zo'n drie-dimensionaal

probleem is echter erg gecompliceerd. Daarom wordt het probleem vereenvoudigd door de variatie van de plaathoogte niet mee te nemen in het model.

Het transport van een geul naar de plaat per eenheid van lengte van de geul wordt als volgt geformuleerd:

$$s_{gp} = \delta\left(c_{ge} - c_p\right) \tag{D.12}$$

Voor de uitwisselingscoëfficiënt δ wordt aangenomen dat het van dezelfde orde van grootte is als het volume van wateruitwisseling op de plaat per getijperiode:

$$\delta = \frac{BH}{T} \tag{D.13}$$

Voor de breedte van de plaat wordt verondersteld dat het ongeveer gelijk is aan de breedte van de eb- en vloedgeul tezamen. De evenwichtsconcentratie in de geul wordt berekend met

$$c_{ge} = \frac{S}{Q} \tag{D.14}$$

De concentratie op de plaat wordt gelijk ongeacht de morfologische toestand omdat de plaathoogte niet als aparte variabele wordt meegenomen. Dus de concentratie in de geulen bij het stabiele evenwicht zonder ingreep wordt gebruikt:

$$c_p = c_{ge}\big|_{evenwicht} \tag{D.15}$$

Samengevat wordt de formulering:

$$\begin{aligned} g_1(h_1) &= \frac{H}{T}\left(\frac{S_{1e}}{Q_1} - \left[\frac{S_{1e}}{Q_1}\right]_{evenwicht}\right) \\ g_2(h_2) &= \frac{H}{T}\left(\frac{S_{2e}}{Q_2} - \left[\frac{S_{2e}}{Q_2}\right]_{evenwicht}\right) \end{aligned} \tag{D.16}$$

Deze formulering garandeert in ieder geval dat het stabiele evenwicht niet wordt beïnvloed door het meenemen van de plaat-geulinteractie.

Om de invloed van de plaat-geulinteractie op de stabiliteit van een tweegeulensysteem te bekijken wordt het geval van Terneuzen-Everingen, zoals door Wang (1997) is geanalyseerd, opnieuw beschouwd. In Fig.D.1 t/m Fig.D.3 worden de resultaten van de analyse voor het geval dat plaat-geulinteractie niet is meegenomen gepresenteerd. De drie beschouwde situaties zijn geen ingreep (Fig.D.1), 5% van het totale transport storten in geul 1 (Fig.D.2), en ca 10% van het totale transport storten in geul 1 (Fig.D.3). Het is te zien dat bij 10% storten de kritische grens net overschreden is. In Fig.D.4 t/m Fig.D.6 worden dezelfde drie situaties gepresenteerd met plaat-geulinteractie. De volgende conclusies worden getrokken:

1. Voor de situatie zonder ingreep (Fig.D.4) zijn er twee instabiele evenwichtstoestanden bijgekomen (vergelijk met Fig.D.1). Het stabiele evenwicht met beide geulen open blijft stabiel. De twee instabiele evenwichten met alleen één geul open zijn nu ook stabiel geworden. Blijkbaar heeft de plaat-geulinteractie een destabiliserende werking voor het tweegeulensysteem.
2. De kritische grens van het storten is iets lager geworden. Fig.D.6. lijkt iets meer van de van de kritische toestand verwijderd dan Fig.D.3. Maar het verschil is klein. Dit betekent dat de invloed van de plaat-geulinteractie op de stabiliteit van het meergeulen systeem beperkt is. Aangezien in Wang (1997) al een uitvoerige gevoeligheidsanalyse voor de keuze van de transportformule en verschillende parameters is uitgevoerd, blijft de conclusie dat de kritische grens voor het storten ongeveer 10% van het totale transport door het systeem.

Een andere relevante vraag is hoe de plaat zelf wordt beïnvloed. Hoewel de plaathoogte niet meegenomen is in de analyse kan men een indicatie van de verandering daarvan krijgen door naar de som van g_1 en g_2 te bekijken. Er geldt:

$$\frac{dh_p}{dt} \approx g_1 + g_2 \tag{D.17}$$

Deze grootheid kan voor ieder punt op het h_1-h_2 vlak worden uitgerekend en is gepresenteerd in Fig.D.7. Men kan deze figuur gebruiken voor het bekijken van de invloeden van ingrepen op de ontwikkeling van de plaat. Door baggeren en storten beïnvloedt men zowel de initiële als de evenwichtsdiepten van de geulen. Met de veranderde dieptes kan men uit de figuur lezen hoe groot de extra groei of afbraak van de plaat wordt. De eenheid in Fig.D.7 is m/jaar. Voor de meeste gangbare situaties, i.e. ingreep binnen 10% van het totale transport, is dit in de orde van enkele centimeters per jaar, waarbij baggeren tot afbraak en storten tot groei leidt. Opmerkelijk is ook dat volgens deze analyse storten aanzienlijk meer invloed heeft dan baggeren.

De inschatting is dat het daadwerkelijk meenemen van de plaathoogte als variabele in (D.11) een stabiliserend effect zal hebben, i.e. de groei en afbraak van de platen zal dan naar verwachting met de tijd afnemen.

D.4 Tijdschaal beschouwing

Zoals in Par. D.2 is uitgelegd moet men voor de morfologische tijdschalen kijken naar de absolute waarden van de eigenwaarden van de Jacobiaan. Rondom elk evenwicht zijn er dus twee tijdschalen. Voor de situatie zonder ingreep (zie bijvoorbeeld Fig.D.1) zijn de relevante tijdschalen geplot in Fig.D.8. In feite zijn de inverse eigenwaarden gegeven, een negatieve eigenwaarde duidt op een stabiel systeem. De volgende constateringen zijn van belang:

1. Voor het evenwicht met beide geulen open heeft één van de tijdschalen (in de richting (1,1)) betrekking op verstoringen van de gemiddelde diepte van de twee geulen. Deze tijdschaal vindt men ook als de twee geulen tot één tak zouden worden geschematiseerd. *Deze tijdschaal is onafhankelijk van de splitsingspuntrelatie en gelijk aan* $B_0H_{1e}L_1/nS_0$, waarbij n de macht van de snelheid in de transportformule is (= 5 bij Engelund-Hansen). De tweede tijdschaal (in de richting (1,-1)) heeft betrekking op verstoringen waarbij het systeem kantelt, dat wil zeggen dat één der beide geulen verdiept en de andere tegelijkertijd verondiept; deze is sterk afhankelijk van de splitsingspuntrelatie (k is de macht van de verhouding van debieten in die relatie). Voor de stabiele situatie is de tijdschaal in de orde van grootte van $B_1H_{1e}L_1/S_0$, en voor de instabiele situatie kan dit al gauw een orde groter worden.
2. Voor het evenwicht met maar één geul open zijn de twee eigenvectoren (1,0) en (0,1). De twee tijdschalen hebben dus betrekking op de ontwikkeling van de twee geulen. Voor de tijdschaal voor de open geul geldt hetzelfde als de tijdschaal voor de gemiddelde diepte bij het evenwicht met beide geulen open. Alleen moet B_0 vervangen worden door de breedte van de betreffende geul. De tijdschaal in de andere richting is theoretisch oneindig groot. Dit betekent fysisch dat de snelheid van het afsluiten dan wel openen van de andere geul afneemt met de afnemende afmeting van de andere geul.

Voor de situatie met ingreep is het relevant te kijken hoe snel het systeem van een tweegeulensysteem naar een ééngeulsysteem ontwikkelt. Voor het beantwoorden van deze vraag moet zowel de tijdschaal in de richting (1,-1) rond het evenwicht met beide geulen open als de tijdschaal in de richting (0,1) rond het evenwicht met alleen geul 1 open bestudeerd worden. Voor beide tijdschalen moet de invloed van de ingrepen worden meegenomen. De eerste tijdschaal kan geschat worden als

$$T_1 = \frac{B_2 h_{2e} L_2}{I - I_{cr}} \tag{D.18}$$

waarbij I bijvoorbeeld de stortsnelheid is en I_{cr} de kritische waarde van I is (orde 10% S_0). De tweede tijdschaal kan men schatten als

$$T_2 = \frac{B_2 h_{2e} L_2}{I} \tag{D.19}$$

In tegenstelling tot de situatie bij natuurlijke ontwikkeling wordt de snelheid van afsluiting t.g.v. storten groter naarmate de afmeting van de geul kleiner wordt.

D.5 Conclusies

Samengevat worden de volgende conclusies getrokken:

1. Het meenemen van de plaat-geulinteractie heeft een negatieve invloed op de stabiliteit van een tweegeulensysteem, maar de invloed ervan op de kritische grens van de ingrepen is relatief klein. Daarom blijft de eerder gemaakte conclusie overeind dat de kritisch grens voor storten ongeveer 10% van het totale transportcapaciteit is.

2. Baggeren en storten hebben invloed op de platen. Baggeren leidt tot afbraak van platen en storten leidt tot groei van platen. De invloed van storten is sterker dan de invloed van baggeren. Als de ingrepen binnen de kritische grens blijven, beperkt de verandering van de plaathoogte t.g.v. ingrepen tot enkele centimeters per jaar.
3. Wanneer de kritische grens van ingrepen is overschreden varieert de tijdschaal voor het afsluiten van de geul waarin is gestort van (D.18) tot (D.19). De snelheid van de afsluiting neemt toe in de tijd.

Referenties

Huijs, S.W.E., 1996, De ontwikkeling van de morfologie in de Westerschelde in relatie tot menselijke ingrepen, Rapport R96-17, IMAU.

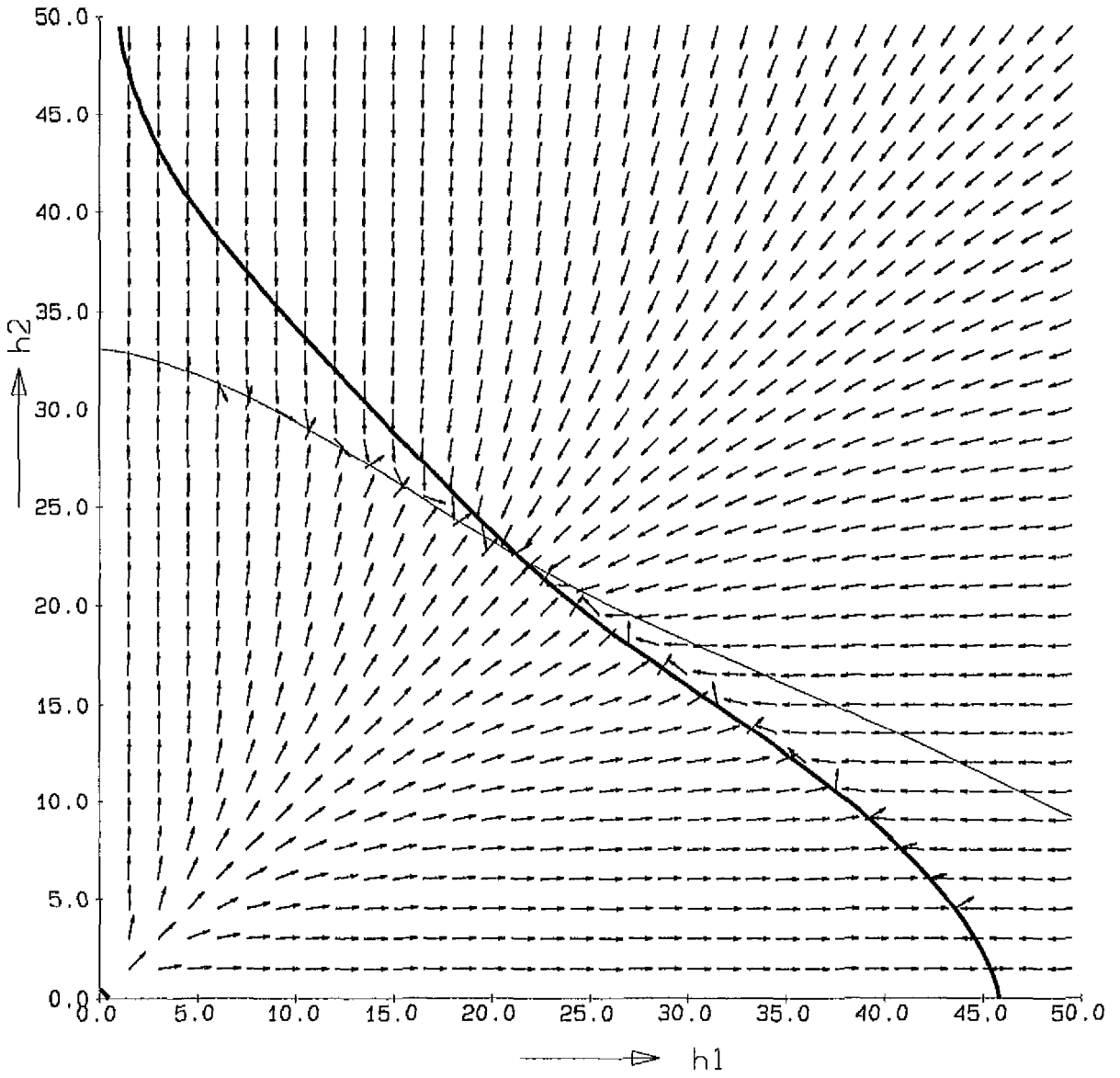
Kerckhoven J.D.M. van, 1995, Morphological modelling of ebb and flood channel systems in estuaries, Afstudeerrapport, Faculteit van Civiele Techniek, TU Delft.

Verbeek, H., 1997, Milieuaspectenstudie baggerspeciestort Westerschelde. Studie naar de effecten van het storten van specie vrijkomend bij de 43/48 voet verruiming van de vaarweg in de Westerschelde.

Wang, Z.B.en Th. van der Kaaij, 1994, Morphodynamic development of secondary channels systems along Rhine Branches in The Netherlands, Rapport Q1963, Waterloopkundig Laboratorium.

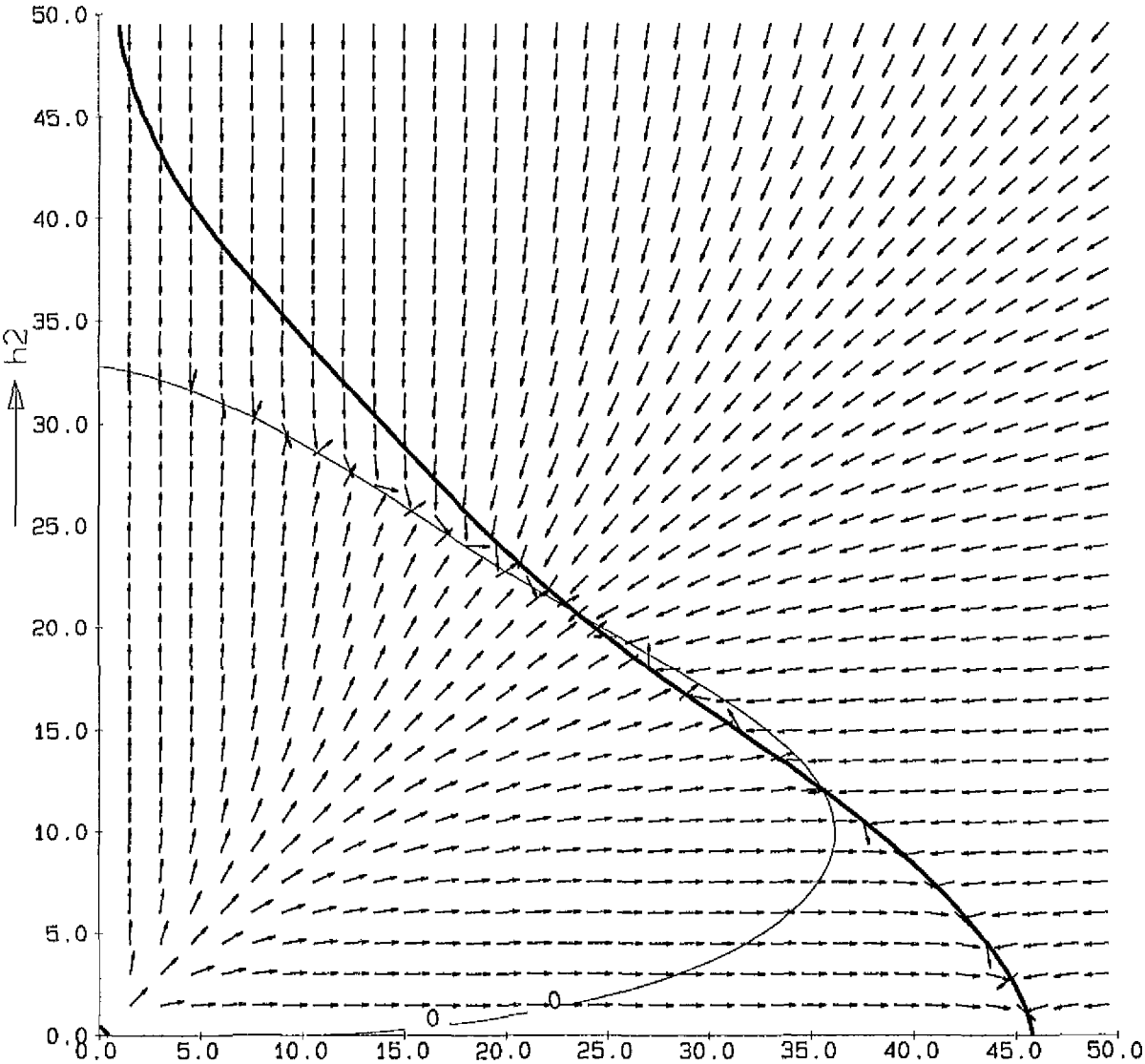
Wang, Z.B., Vries, M. de, Fokkink, R.J., Langerak, A. 1995 *Stability of river bifurcations in 1D morphodynamic models* Journal of Hydraulic Research, Vol 33, No 6

Wang, Z.B., 1997, Studie naar morfologische effecten van storten en baggeren in de Westerschelde. Ten behoeve van MER storten gebaggerd materiaal, Rapport Z2310, Waterloopkundig Laboratorium.

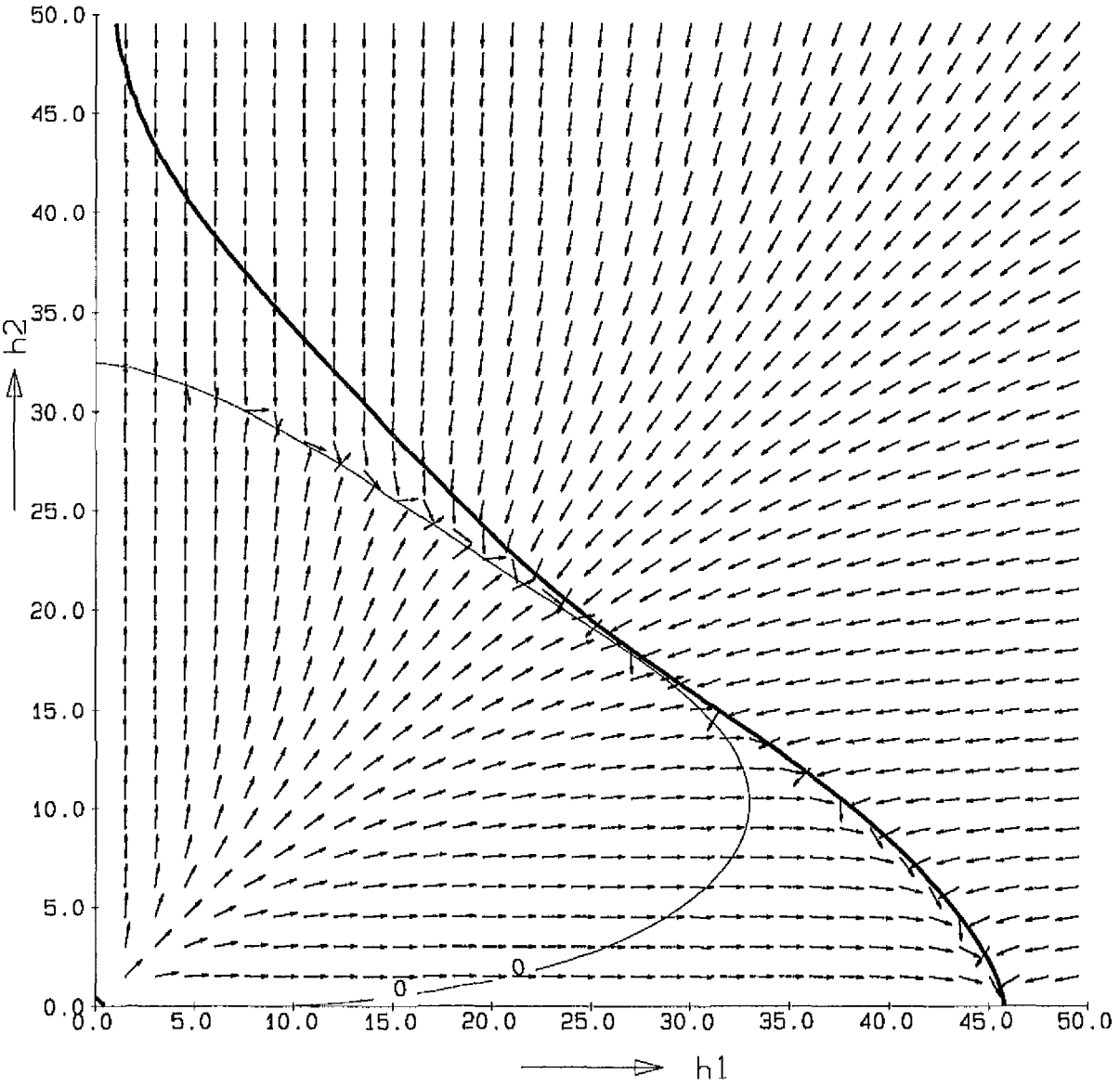


dh1/dt = 0 dh2/dt = 0

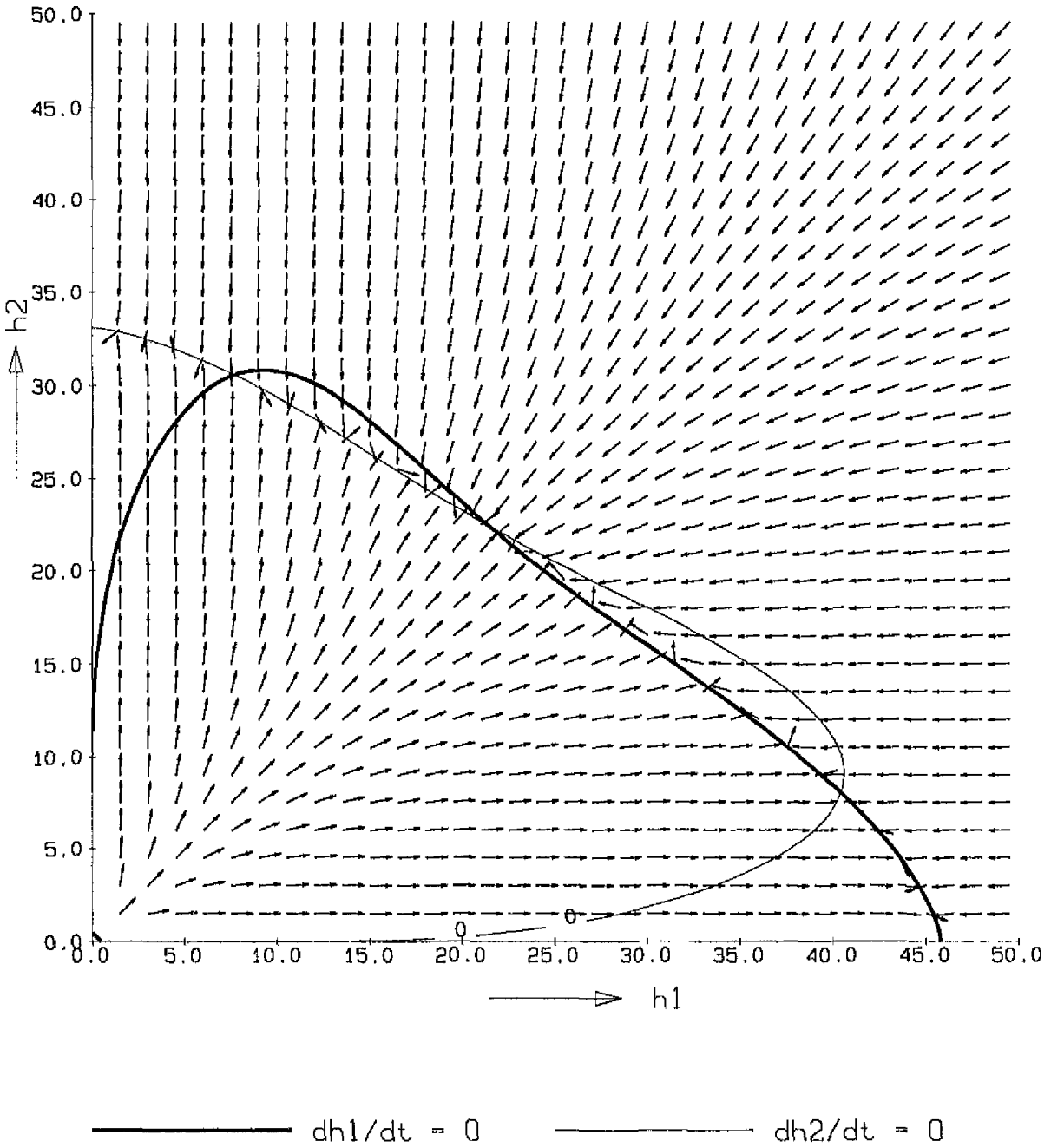
Evenwichtssituatie en hun stabiliteit symmetrisch geval Zonder ingreep, zonder plaat-geul uitwisseling Transport formule Englund-Hansen, k=2		2000-03-16
	LTV Westerschelde	
WL | DELFT HYDRAULICS	Z2878	Fig.D.1



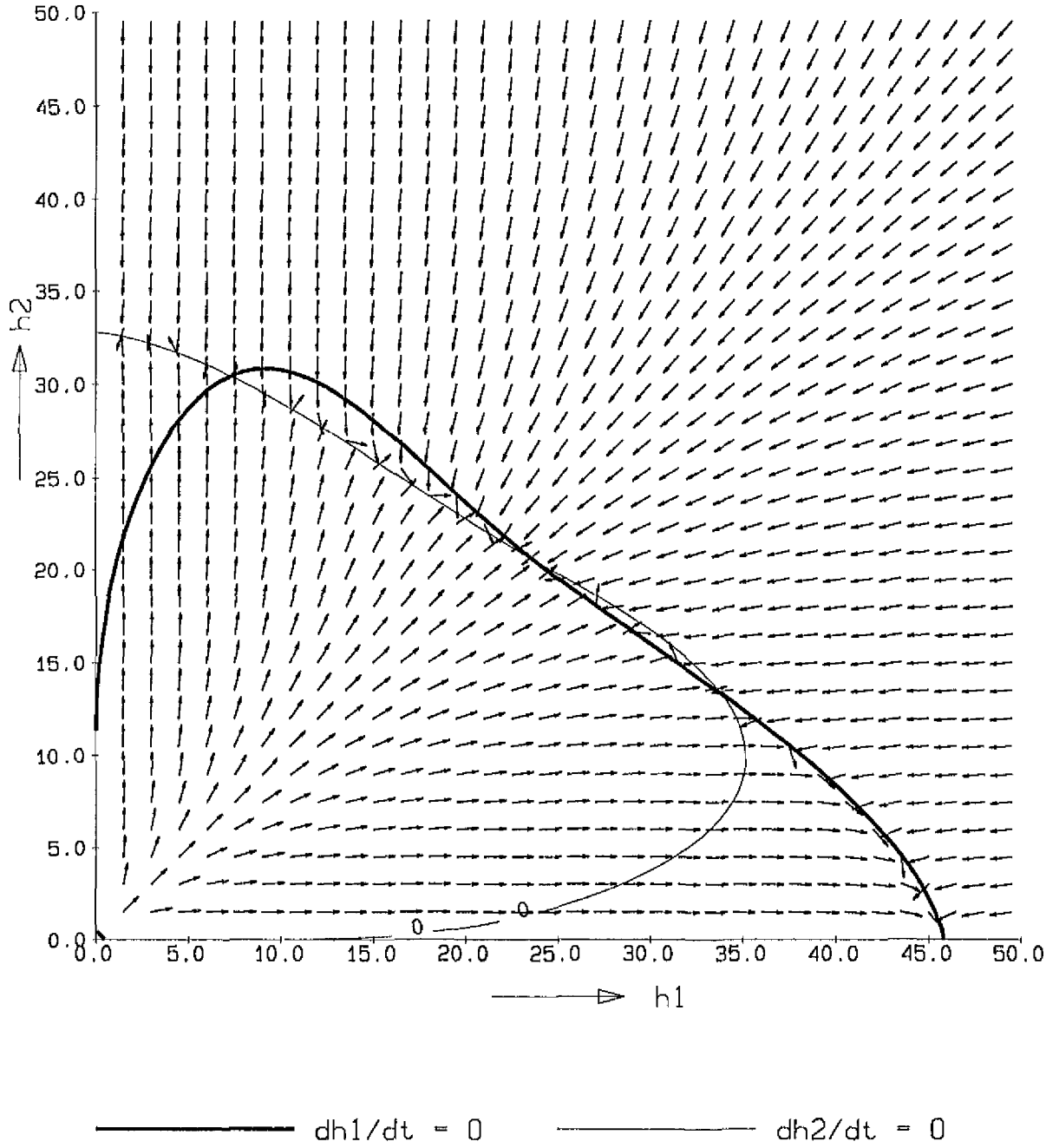
Evenwichtssituatie en hun stabiliteit symmetrisch geval 5% starten, zonder plaat-geul uitwisseling Transport formule Englund-Hansen, k=2		2000-03-16
	LTV Westerschelde	
WL | DELFT HYDRAULICS	Z2878	Fig.D.2



Evenwichtssituatie en hun stabiliteit symmetrisch geval 10% storten, zonder plaat-geul uitwisseling Transport formule Englund-Hansen, k=2		2000-03-16
	LTV Westerschelde	
WL | DELFT HYDRAULICS	Z2878	Fig.D.3



Evenwichtssituatie en hun stabiliteit symmetrisch geval Zander ingreep met plaat-geul uitwisseling Transport formule Englund-Hansen, k=2		2000-03-16
	LTV Westerschelde	
WL | DELFT HYDRAULICS	Z2878	Fig.D.4



Evenwichtssituatie en hun stabiliteit symmetrisch geval
5% storten met plaat-geul uitwisseling
Transport formule Englund-Hansen, k=2

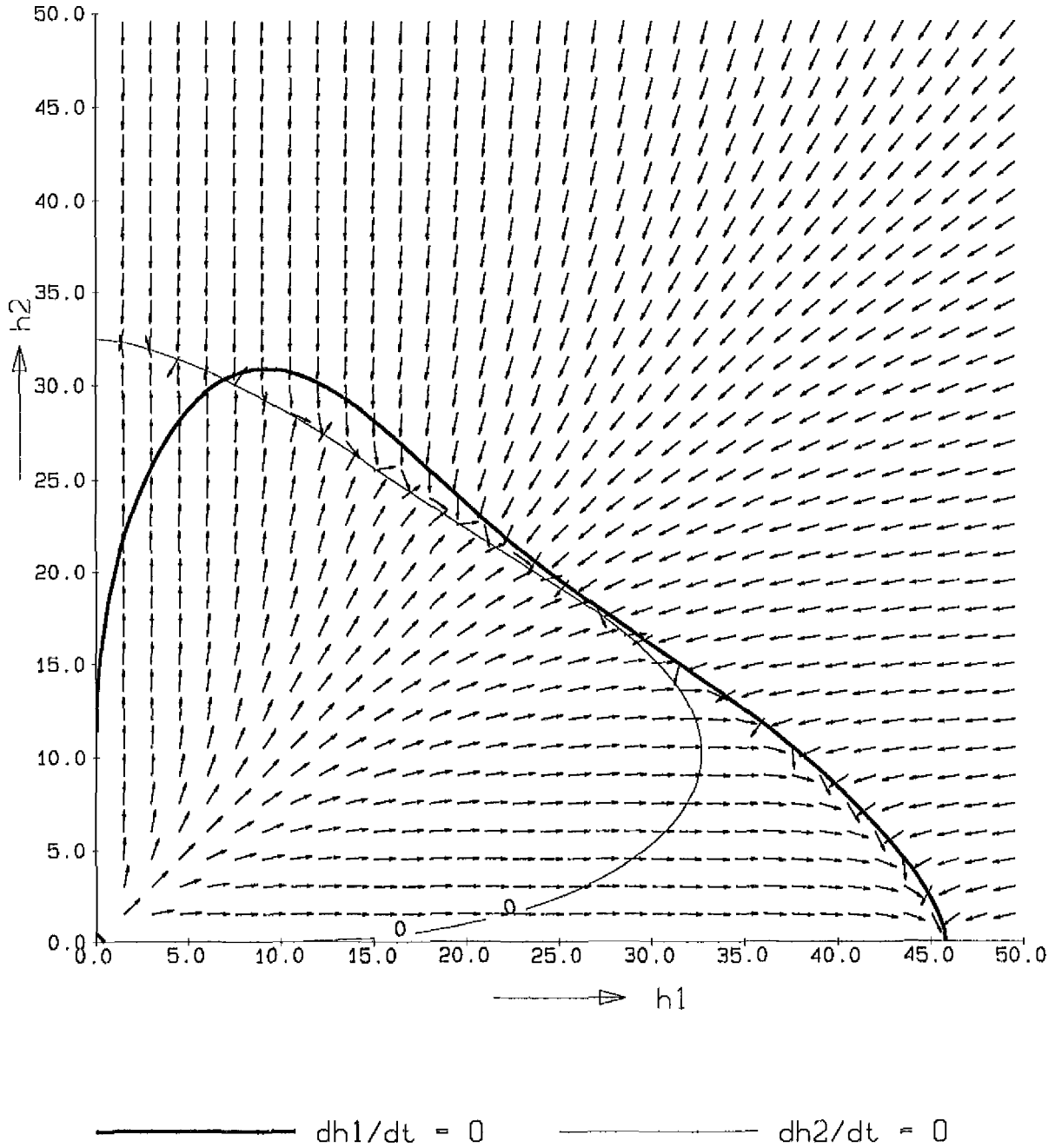
2000-03-16

LTV Westerschelde

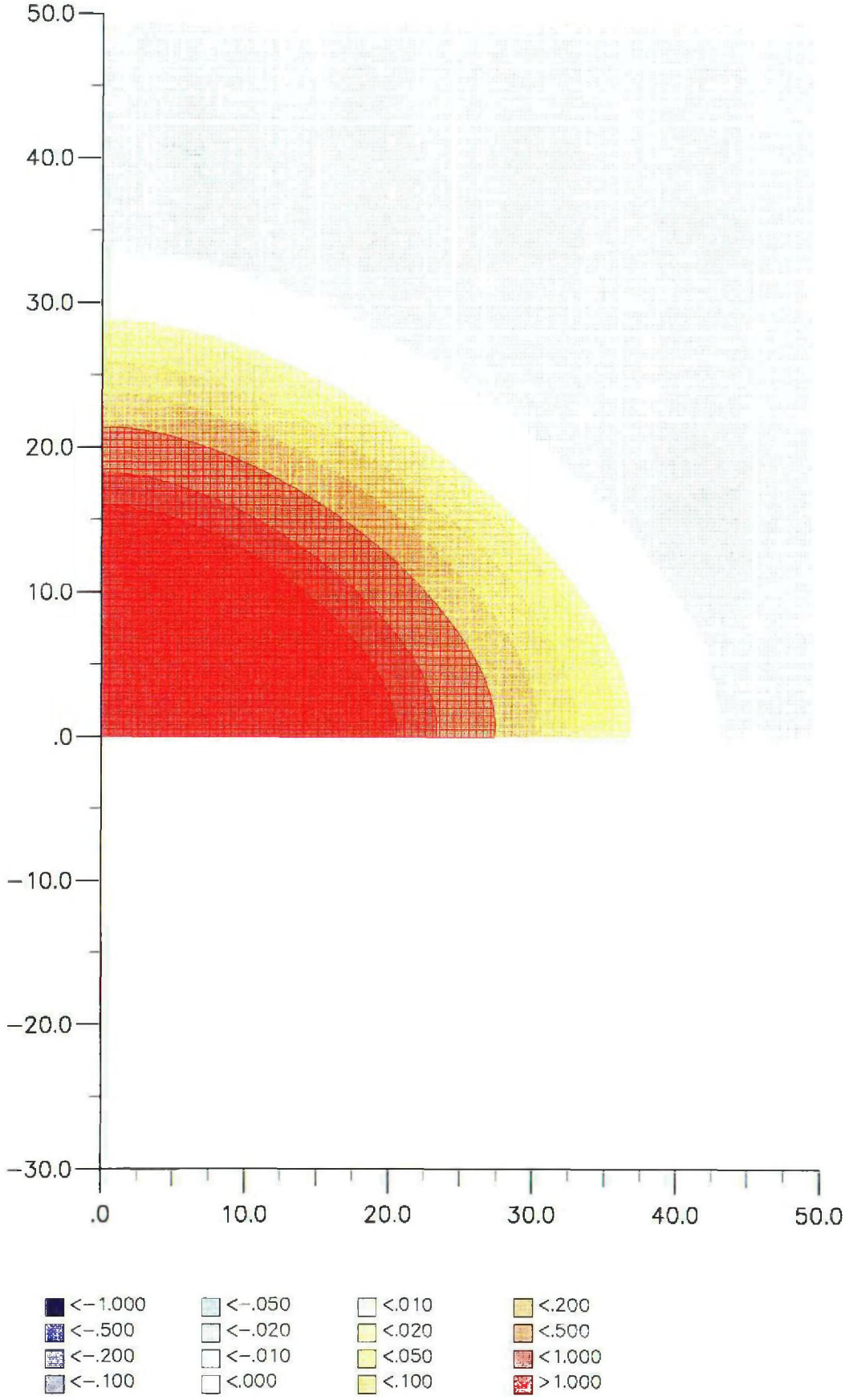
WL | DELFT HYDRAULICS

Z2878

Fig.D.5



Evenwichtssituatie en hun stabiliteit symmetrisch geval 10% storten met plaat-geul uitwisseling Transport formule Englund-Hansen, k=2		2000-03-16
	LTV Westerschelde	
WL | DELFT HYDRAULICS	Z2878	Fig.D.6



Verandering van de ploathoogte in m/jaar
als functie van de geuldieptes h1 en h2

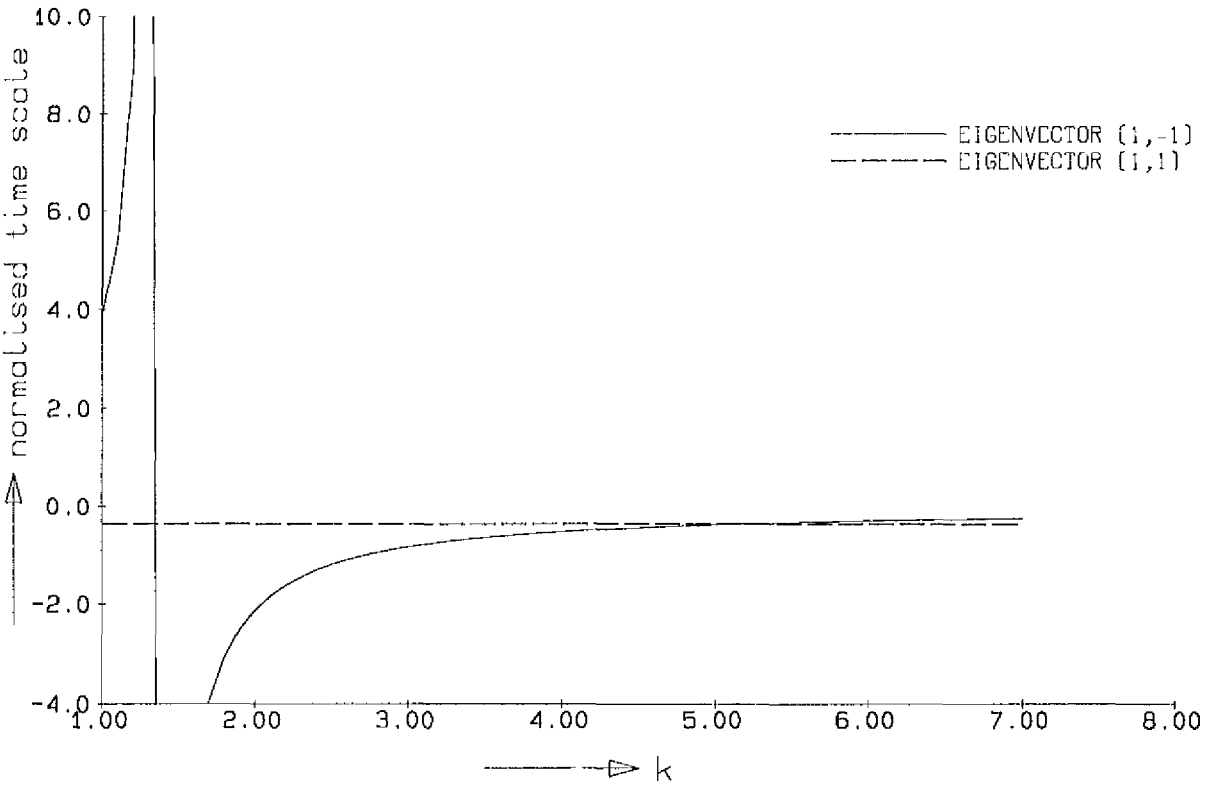
2000-03-16

LTV Westerschelde

WL | DELFT HYDRAULICS

Z2878

Fig.D.7



Tijdschaal voor het symmetrische geval as1 functie van k genormaliseerd met B1.L1.H1/S0 Situatie met twee open takken		2000-03-16
	LTV Westerschelde	
WL | DELFT HYDRAULICS	Z2878	Fig.D.8

Appendix E
Toetsing stortcriterium

Kees Kuijper

Z2878

E Toetsing stortcriterium 1

E.1 Inleiding 1

E.2 Omrekeningen 3

E.3 Validatie stortcriterium 4

E Toetsing stortcriterium

E.1 Inleiding

Op basis van de stabiliteitsanalyse zoals gepresenteerd in Appendix D, is afgeleid dat in een tweegeulensysteem niet meer dan orde 10% van de transportcapaciteit in één van de geulen mag worden gestort, om te voorkomen dat de geul degenereert en uiteindelijk verlandt. Voor situaties waarbij zowel gestort als gebaggerd wordt in beide geulen geldt:

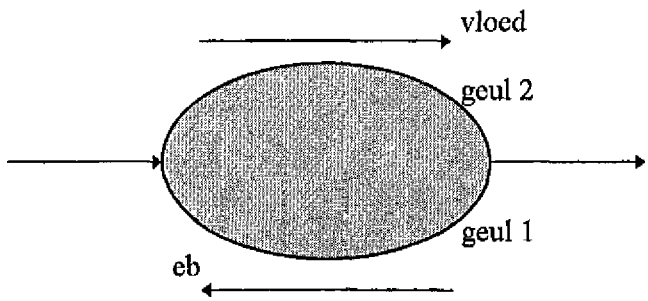
$$|netto\,stort\,geul\,1 - netto\,stort\,geul\,2| < 0{,}1 \bullet T_{cel} \qquad \text{(E.1a)}$$

$$\left|\left(|S_1| - |B_1|\right) - \left(|S_2| - |B_2|\right)\right| < 0{,}1 \bullet T_{cel} \qquad \text{(E.1b)}$$

met,

S_1	-	netto storthoeveelheid in geul 1 [ton of m^3/jaar],
B_1	-	netto baggerhoeveelheid in geul 1 [ton of m^3/jaar],
S_2	-	netto storthoeveelheid in geul 2 [ton of m^3/jaar],
B_2	-	netto baggerhoeveelheid in geul 2 [ton of m^3/jaar],
T_{cel}	-	transportcapaciteit in de cel [ton of m^3/jaar].

De modulus van de stort- en baggerhoeveelheden is gebruikt, omdat storthoeveelheden hierna als positieve en de baggerhoeveelheden als negatieve waarden worden aangegeven. Voor getijomstandigheden is de transportcapaciteit van een cel gedefinieerd als het totaal van eb- en vloedtransport.



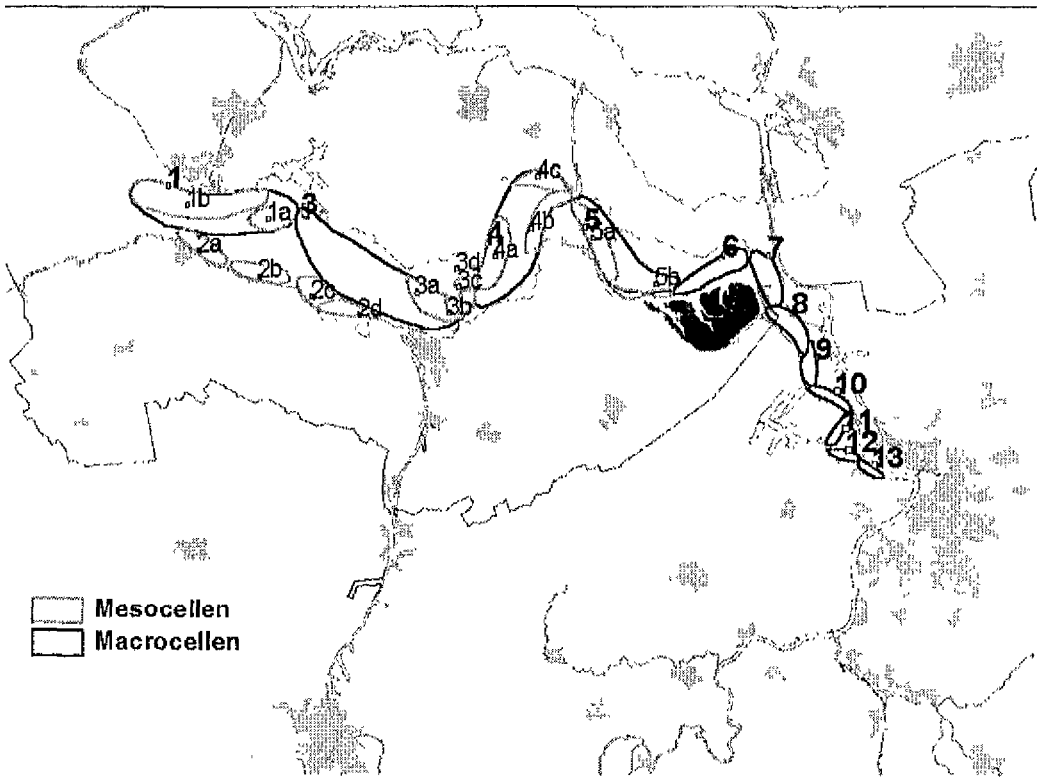
Figuur E.1 Principeschets tweegeulensysteem

Er wordt een aantal principegevallen onderscheiden:

1. Er wordt in de eb- óf in de vloedgeul sediment gestort afkomstig uit een ander gebied. Het stortvolume wordt vergeleken met het criterium '10%'.
2. Er wordt in één van de geulen gestort én gebaggerd. Het netto stortvolume wordt bepaald en vergeleken met het '10%' criterium.
3. Er wordt in de vloedgeul gestort en in de ebgeul evenveel gebaggerd. Het stortcriterium reduceert tot '5%'. Omdat door het baggeren het systeem al uit evenwicht wordt gebracht, is er minder stortcapaciteit. Een verdere toename van de baggerhoeveelheid zou volgens (E.1) leiden tot een verdere reductie van het stortcriterium. Hierna wordt echter verondersteld dat ook dan nog 5% van de transportcapaciteit kan worden gestort.

4. Er wordt in beide geulen netto gestort. Volgens (E.1) mag *het verschil* van beide storthoeveelheden niet groter zijn dan 10% van de transportcapaciteit. Uiteraard kan niet een ongelimiteerde hoeveelheid in beide geulen worden gestort, omdat dan de transportcapaciteit onvoldoende is om het sediment af te voeren. Deze situatie doet zich echter voor bij veel grotere storthoeveelheden dan aangegeven door de stabiliteitsanalyse voor een omslag van een tweegeulen- naar een ééngeulensysteem.

Voor de Westerschelde zijn op basis van de bathymetry en de resttransporten van sediment de morfologische cellen op macro- en mesoschaal afgeleid, zie Figuur E.2. In deze figuur zijn tevens de celnummers vermeld, waarnaar in de tekst wordt verwezen.



Figuur E.2 Morfologische cellen in de Westerschelde

De morfologische cellen representeren circulaties van het sediment in het systeem, waarvoor het genoemde criterium wordt toegepast. Op deze wijze volgt de maximale hoeveelheid te storten sediment in een cel, waarbij nog juist wordt voorkomen dat een 'geul' degenereert en uiteindelijk verlandt.

Met een DELFT2DMOR simulatie voor de situatie van vóór de recente verdieping (1996) zijn de tijdsafhankelijke sedimenttransporten bepaald. Hieruit zijn voor een aantal raaien in een cel de brutotransporten afgeleid, d.w.z. het totaal van eb- en vloedtransport. Vervolgens is een karakteristiek brutotransport voor de betreffende cel bepaald, waarop het stortcriterium wordt toegepast. Het resultaat wordt vergeleken met de stortvolumina in de cel met inachtneming van de bagger- en zandwinningshoeveelheden. Overschrijding van het criterium betekent dat de betreffende cel (geul) zal degenereren, hetgeen kan worden gecontroleerd a.d.h.v. de beschikbare historische gegevens van die geul.

E.2 Omrekeningen

Voor de vergelijking tussen het sedimentvolume volgens DELFT2DMOR (volume van de korrels) en het sedimentvolume, zoals dat tijdens het baggeren in de beun wordt bepaald, geldt het volgende. Tijdens het baggeren wordt water bijgemengd, waardoor het volume ongeveer met 10% toeneemt (voor zand). De stort- en baggerhoeveelheden worden gegeven als 'beunkuubs', dus:

1 beunkuub ≡ 1/1,1 = 0,9 profielkuub

Indien voor de profielkuubs een porositeit van 40% wordt aangehouden geldt dat het sedimentvolume 60% bedraagt van het totale volume, dus:

1 beunkuub ≡ 1/1,1 = 0,9 profielkuub = 0,6 * 0,9 = 0,54 m^3 sediment

Vaak kan de uitlevering tijdens het baggeren 20 tot 30 % zijn, met name wanneer een fijne slibfractie aanwezig is. In dat geval geldt:

1 beunkuub ≡ 1/(1,2 à 1,3) = 0,8 profielkuub = 0,6 * 0,8 = 0,48 m^3 sediment.

In het vervolg wordt uitgegaan van een gemiddelde uitlevering van 20% en een porositeit van 40% zodat geldt:

1 beunkuub ≡ 0,5 m^3 sediment.

De sedimentmassa in ton wordt berekend met:

$$M = \frac{V_s \bullet \rho_s}{1000} \qquad \text{(E.2)}$$

met, M - sedimentmassa [ton]
V_s - volume van de sedimentkorrels [m^3]
ρ_s - sedimentdichtheid [kg/m^3].

In (E.2) wordt een sedimentdichtheid van 2650 kg/m^3 aangehouden.

Hiermee volgen de omrekeningsverbanden:

1 beunkuub ≡ 1,33 ton sediment

1 ton sediment ≡ 0,75 beunkuub.

E.3 Validatie stortcriterium

Het stortcriterium wordt toegepast op 5 macrocellen in de Westerschelde voor de referentiesituatie van vóór 1997. In Tabel E.1 zijn de resultaten samengevat, waarbij de jaarlijkse stort- en baggerhoeveelheden zowel in kubieke meter ('beunkuubs') als tonnen worden gepresenteerd.

a) Macrocel 1/mesocel 1a (tussen Honte en Schaar van de Spijkerplaat)

periode: 1985-1997

Storten (per jaar)			**Baggeren (B) en Zandwinning (Z) (per jaar)**		
Vak	Naam	Volume $[10^6\ m^3]$	Vak	Naam	Volume $[10^6\ m^3]$
22	Schaar van de Spijkerplaat	+0,5	Ia		-0,2 (Z)
	Totaal	+0,5		Totaal	-0,2

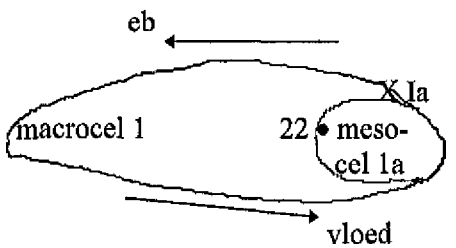


Fig. E.3 Macrocel 1 en mesocel 1a met vaknummers van stort-(•) en zandwinlokaties (X)

Vóór 1997 werd 0,5 miljoen m^3 beunkuub in de vloedgeul gestort, terwijl 0,2 miljoen m^3 zandwinning plaatsvond (de exacte lokatie van de zandwinning t.o.v. de cellen is onbekend). In dat geval geldt als maximale storthoeveelheid (vgl. (E.1)):

$$(|S_1|)+(|B_2|) < 0{,}1 \bullet T_{cel}$$

De transportcapaciteit van de mesocel 1a is 12,5 miljoen ton sediment = 9,4 miljoen m^3 (beunkuub), zodat maximaal 0,94 miljoen - (evt.) 0,2 miljoen = 0,7 miljoen m^3 beunkuub mag worden gestort. Gedurende de periode is dus beneden de norm gestort, zodat geen effecten m.b.t. geuldegeneratie verwacht mogen worden. Cel 1a, bestaande uit quasi-cyclische kortsluitgeulen, degenereert echter sinds 1984, d.i. enkele jaren nadat ter plaatse begonnen is met storten.

Opm.: Sinds juni 1997 is er vergunning om 4 miljoen m^3 beunkuub te storten. Er wordt dus veel meer gestort dan volgens de norm (ook wanneer wordt verondersteld dat niet gebaggerd wordt in de vloedgeul). De huidige ervaring is dat de geul snel volloopt

(mondelinge communicatie ir. Claessens, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Afdeling Maritieme Schelde).

b) Macrocel 3 (geul Everingen - Pas van Terneuzen)

periode: 1990-1995

Storten (per jaar)			**Baggeren (B) en Zandwinning (Z) (per jaar)**		
Vak	Naam	Volume $[10^6\ m^3]$	Vak	Naam	Volume $[10^6\ m^3]$
20	Vloedschaar Everingen Eb	+0,2	12	Put van Terneuzen	-0,1 (B)
21	Vloedschaar Everingen Vloed	+0,3	13	Drempel van Borssele	-0,8 (B)
			IIa		-0,01 (Z)
			IIb		-0,06 (Z)
			IIc		-0,07 (Z)
	Totaal	+0,5		Totaal	-1,0

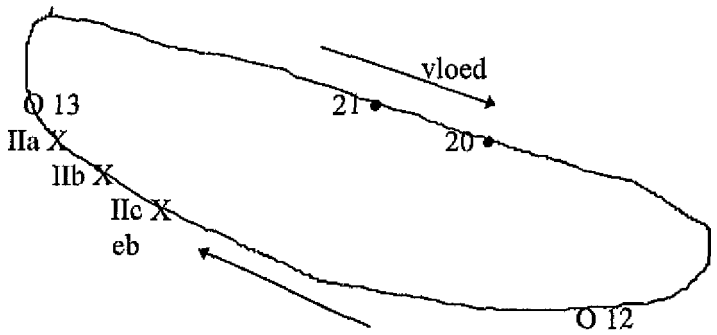


Fig. E.4 Macrocel 3 met vaknummers van stort-(•), bagger-(O) en zandwinlokaties (X)

In de ebgeul wordt 1,0 miljoen m^3 beunkuub gebaggerd (baggervakken 12+13 en zandwinlokaties IIa+IIb+IIc); in de vloedgeul wordt 0,5 miljoen m^3 beunkuub gestort (stortvakken 20+21). Voor de vloedgeul geldt dus als criterium:

$$(|S_1|) + (|B_2|) < 0{,}1 \bullet T_{cel}$$

De transportcapaciteit van de cel bedraagt 24 miljoen ton sediment d.i. 18 miljoen m^3 beunkuub, zodat voor de stortcapaciteit van de cel 1,8 miljoen - 1,0 miljoen = 0,8 miljoen m^3 beunkuub volgt. Er is met 0,5 miljoen m^3 dus gestort beneden de stortcapaciteit. De ervaring is dat de geul enigszins erodeert, hetgeen consistent is met bovenstaande analyse.

c) Macrocel 4 (Middelgat - Gat van Ossenisse)

periode 1985-1995

Storten (per jaar)			Baggeren (B) en Zandwinning (Z) (per jaar)		
Vak	Naam	Volume [10^6 m^3]	Vak	Naam	Volume [10^6 m^3]
15	Molenplaat	0	9	Overloop van Hansweert	-0,8 (B)
16	Gat van Ossenisse Eb	+1,4	10	Platen van Ossenisse	0
17	Gat van Ossenisse Vloed	+1,4	11	Drempel van Baarland	0
18	Rug van Baarland	0	IVa		0,17 (Z)
19	Ebschaar Everingen	+0,3 [1])	IVb		0,13 (Z)
	Totaal	+3,1		Totaal	-1,1

[1]) de overige 0,3 miljoen m^3 wordt toegerekend aan het drempelgebied Middelgat (cel 3c).

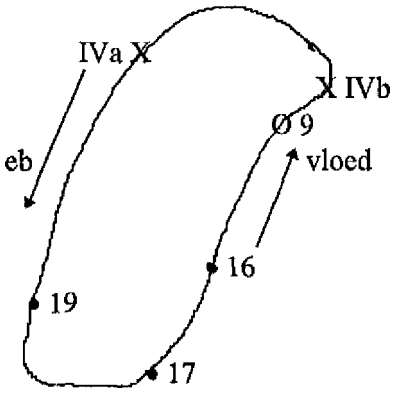


Fig. E.5 Macrocel 4 met vaknummers van stort-(•), bagger-(O) en zandwinlokaties (X)

In de vloedgeul wordt netto 1,9 miljoen m^3 beunkuub gestort (stortvak 16+17-baggervak 9 - zandwinlokatie IVb); in de ebgeul wordt netto 0,1 miljoen m^3 beunkuub gestort (stortlokatie 19 - zandwinlokatie IVa). Als stortcriterium geldt:

$$\left(|S_1| - |B_1|\right) - \left(|S_2| - |B_2|\right) < 0{,}1 \bullet T_{cel}$$

d.w.z. het verschil van de netto storthoeveelheden (1,8 miljoen m^3) dient kleiner te zijn dan 10% van de transportcapaciteit van de cel.

De transportcapaciteit van de macrocel is 23 miljoen ton sediment, d.i. 17,3 miljoen m^3 beunkuub, zodat maximaal 1,7 miljoen m^3 beunkuub mag worden gestort. Dit criterium wordt met de netto storthoeveelheden in beide geulen net overschreden.

Voor de vloedgeul geldt dat deze van nature (d.w.z. zonder het effect van ingrepen) erodeert; het extra storten in de geul behoeft dus niet nadelig te zijn. De ebgeul verzandde over de periode van 1931 tot 1986, resulterend in een evenwichtssituatie omstreeks 1986. Na 1986 (tot 1996) was de ebgeul stabiel al bestond er een natuurlijke tendens tot erosie (d.i. als de volumeveranderingen gecorrigeerd worden voor de ingrepen). (Claessens, pers. comm.: lichte aanzanding ebgeul (Middelgat); erosie vloedgeul). Hoewel het stortcriterium juist overschreden wordt vindt geen degeneratie van de geul plaats, mogelijk dankzij de van

nature eroderende karakteristiek van de geul. Sinds 1980 is dan ook het vaarwater verplaatst van de *eb*- naar de *vloed*geul (enige uitzondering voor de Westerschelde).

d) Macrocel 5 (Zuidergat / Schaar van Valkenisse)

periode: 1990-1995:

Storten (per jaar)			**Baggeren (B) en Zandwinning (Z) (per jaar)**		
Vak	Naam	Volume [10^6 m^3]	Vak	Naam	Volume [10^6 m^3]
5	Zimmermangeul eb	0	5	Overloop van Valkenisse	-0,6 (B)
6	Zimmermangeul vloed	0	6	Platen van Valkenisse	-0,2 (B)
7	Konijnenschor	+1,6	7	Platen van Walsoorden	-0,7 (B)
8	Baalhoek	+1,6	8	Drempel van Hansweert	-2,5 (B)
9	Slikken van Walsoorden	0	Va		0,10 (Z)
10	Schaar van Walsoorden	0	Vb		0,08 (Z)
12	Schaar van Waarde	+0,6	Vc		0,08 (Z)
(13)	Perkpolder	(0)	VII		0,21 (Z)
14	Platen van Ossenisse	+0,3	VIIIa		0,21 (Z)
			VIIIb		0,13 (Z)
			VIIIc		0,05 (Z)
	Totaal	+4,1		Totaal	-4,9

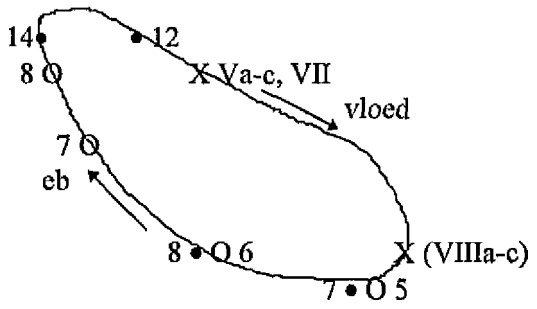


Fig. E.6 Macrocel 5 met vaknummers van stort-(•), bagger-(O) en zandwinlokaties (X)

Opm. De baggerlokatie 'Drempel van Valkenisse' is niet meegenomen, omdat deze buiten de beschouwde cel ligt.

Het netto baggervolume in de ebgeul is: baggerlokatie 5+6+7+8 - stortlokatie 7+8+14 - zandwinlokaties VIIIa-c geeft 0,9 miljoen m^3 beunkuub. Het netto stortvolume in de vloedgeul (lokatie 12-zandwinlokaties Va-c en VII) bedraagt 0,1 miljoen m^3 beunkuub. Als criterium geldt:

$$(|S_1| - |B_1|) - (|S_2| - |B_2|) < 0{,}1 \bullet T_{cel}$$

De transportcapaciteit van de cel is 21 miljoen ton sediment d.i. 15,8 miljoen m^3 beunkuub. Er volgt dus:

netto stort in vloedgeul - (-0,9 miljoen m^3) < 1,6 miljoen m^3

Er mag dus maximaal netto 0,7 miljoen m^3 (beunkuub) gestort worden. Dit houdt in dat het storten van 0,1 miljoen m^3 beunkuub in de vloedgeul toelaatbaar is. Het criterium is dus voor de periode 1990-1995 niet overschreden.

De geul is tussen 1970 en 1985 verondiept t.g.v. het storten, ondanks de natuurlijke tendens tot verruiming. Voor de beschouwde periode (1990-1995) is er weer een netto erosie omdat de omvang van de ingrepen is geminimaliseerd. Dit is dus consistent met de bovenstaande analyse.

e) Macrocel 6 (Schaar van de Noord)

periode: 1980-1985:

Storten (per jaar)			**Baggeren (B) en Zandwinning (Z) (per jaar)**		
Vak	Naam	Volume $[10^6\ m^3]$	Vak	Naam	Volume $[10^6\ m^3]$
4	Schaar van de Noord	+0,9	4	Drempel van Valkenisse	-2,2 (B)
	Totaal	+0,9		Totaal	-2,2

Opm. De baggerlokatie Overloop van Valkenisse ligt net in cel 5 en wordt hier dus niet meegenomen. Stortlokatie 7 (Konijnenschor) ligt net niet meer in cel 6 (maar in cel 5) en is dus evenmin meegenomen..

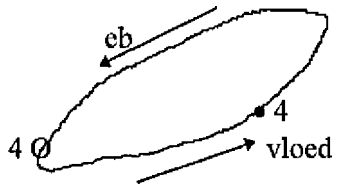


Fig. E.7Macrocel 6 met vaknummers van stort-(•) en baggerlokaties (O)

Er wordt in de vloedgeul 0,9 miljoen m^3 beunkuub gestort en in de ebgeul 2,2 miljoen m^3 gebaggerd. Als stortcriterium geldt:

$$(|S_1|)+(|B_2|)<0{,}1\bullet T_{cel}$$

De transportcapaciteit van de cel is 8 miljoen ton sediment d.w.z. 6 miljoen m^3 beunkuub. De toelaatbare storthoeveelheid is dan 0,6 miljoen m^3 - 2,2 miljoen m^3 = - 1,6 miljoen m^3. In dat geval kan echter als maximum storthoeveelheid 5% van de transportcapaciteit van de cel worden aangehouden d.i. 0,3 miljoen m^3 beunkuub, hetgeen dus ruim is overschreden. Dit betekent dat de stort tot degeneratie van de vloedgeul zal leiden.

Waargenomen is dat in de beschouwde periode de vloedgeul 'vol' liep (niet meer vaarbaar), maar het herstelde zich wel nadat vanaf 1987 niet meer gestort werd. Dit is in overeenstemming met de bovengenoemde analyse.

Cel	Periode	Geul	Stortcriterium		Netto hoeveelheid gestort		Gedrag geul
			Mm^3/jaar	Mton/jaar	Mm^3/jaar	Mton/jaar	
1a Schaar van de Spijkerplaat	1985-1997	eb	0,7	0,9	0,5	0,7	Cel 1a bestaat uit kortsluitende drempelgeulen met een quasi-cyclisch gedrag. De cel degenereert sinds 1984. Echter, er wordt beneden de norm gestort.
1a Schaar van de Spijkerplaat	na 1997	eb	0,9	1,2	4,0	5,3	Ver boven de norm. Momenteel grote stortproblemen in kortsluitgeul op Schaar v.d. Spijkerplaat
3 geul Everingen	1990-1995	vloed	0,8	1,1	0,5	0,7	Volgens theorie onder het omslagpunt. De vloedgeul erodeert enigszins. De ebgeul is redelijk stabiel.
4 Gat van Ossenisse	1985-1995	eb en vloed	1,7	2,3	1,8	2,4	Na decennia van sedimentatie is de ebgeul over de periode '86-'96 stabiel. De vloedgeul erodeert van nature, d.w.z. extra storten behoeft niet bezwaarlijk te zijn, al lijkt de stortcapaciteit volgens het criterium bereikt.
5 Schaar van Valkenisse Schaar van Waarde	1990-1995	vloed	0,7	0,9	0,1	0,1	Onder de grens voor het storten. De vloedgeul vertoont sinds 1990 een netto erosie. De ebgeul verruimt mede a.g.v. baggeren.
6 Schaar van de Noord	1980-1985	vloed	0,3	0,4	0,9	1,2	Boven de norm. De vloedgeul liep voor de beschouwde periode vol. Momenteel wordt er niet meer gestort. Het systeem lijkt zich nu weer te herstellen. De ebgeul is netto geërodeerd.

Tabel E.1 Vergelijking netto stortvolume en -massa met stortcriterium (volumina zijn 'beunkuubs' voor scenario A).

Appendix F
DELFT2DMOR simulaties sedimenttransporten

Pauline Thoolen

Z2878

F delft2dmor simulaties sedimenttransporten 1

F.1 Inleiding 1

F.2 Modelbeschrijving hydrodynamica 2

F.3 Modelbeschrijving sedimenttransport 2

F.4 Resultaten beheersscenario's 4

F.4.1 Hydrodynamica 4

F.4.2 Analyse bruto sedimenttransporten beheersscenario's 10

F.4.3 Grootte van de sedimenttransporten 13

F delft2dmor simulaties sedimenttransporten

F.1 Inleiding

Het patroon van de morfologische cellen op meso- en macroschaal kan worden afgeleid op basis van (historische) bathymetrische kaarten en resttransporten van een doodtij-springtij cyclus. Het patroon en de bijbehorende nummering is hieronder weergegeven:

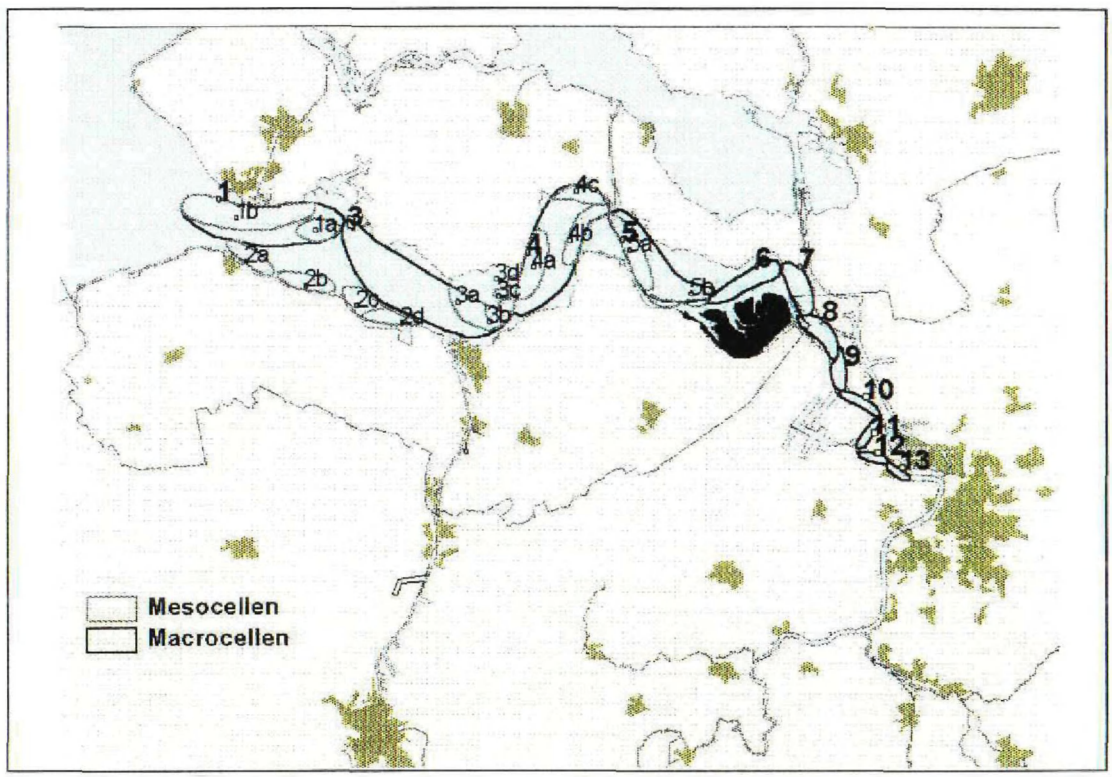


Fig. F1: Morfologische schematisatie van het Schelde-estuarium in morfometrische eenheden.

In deze studie is het resttransport van een doodtij-springtij cyclus in het Schelde-estuarium gesimuleerd met een sedimenttransportberekening van een morfologische getij. Dit (cyclisch) morfologisch getij omvat een periode van 12 uur en 30 minuten. Het is gekozen op basis van de definitie van Groenewoud (1997) en de methode van Latteux (1995). Het kan worden toegepast met de veronderstelling dat herhaald simuleren van dit morfologisch getij voor de duur van een doodtij-springtij cyclus dezelfde bodem-verandering geeft als simulatie van de gehele doodtij-springtij cyclus. Simulatie van de gehele doodtij-springtij cyclus is vanwege de afmetingen van het model ondoenlijk: het leidt tot lange rekentijden en zeer grote onhanteerbare datafiles.

F.2 Modelbeschrijving hydrodynamica

Het DELFT2D-MOR model van het Schelde-estuarium is afgeleid van het waterbewegingsmodel SCALWEST, ontwikkeld en gecalibreerd voor de hydrodynamica door Rijkswaterstaat-RIKZ (zie Jansen, 1997). De benedenstroomse rand van SCALWEST loopt van Zeebrugge tot iets zeewaarts van Westkapelle. De bovenstroomse rand loopt tot voorbij Rupelmonde, waar de getij-invloed niet merkbaar meer is. In het Delft2D-MOR model is de bovenstroomse rand iets voorbij de haven van Antwerpen gelegd ter vermindering van de rekentijd. Voor alle simulaties die tijdens deze studie zijn uitgevoerd is steeds de bovenstroomse debietrand gegenereerd door het SCALWEST model. Benedenstrooms worden beide modellen gestuurd door hetzelfde cyclisch morfologisch getij.

Het model omvat 542x569 punten en heeft een resolutie van ca 500m bij 500m aan de zeerand tot ca 20m bij 20m op sommige plaatsen in het binnengebied. De gemodelleerde referentie bathymetry betreft de bodem van 1996. De bodemruwheid is gesimuleerd met een ruimtelijk variërende Manningcoëfficiënt van 0.022-0.026 $m^{-1/3}$.s. De tijdstap voor de hydrodynamische simulaties bedraagt 0,5 min. Er is een inspeelduur van enkele getijden toegepast.

F.3 Modelbeschrijving sedimenttransport

De sedimenttransportsimulaties zijn uitgevoerd met DELFT2D-MOR. Binnen het Delft2D-MOR systeem zijn acht verschillende transportformuleringen beschikbaar. In deze studie is gekozen voor de transportformule van Englund-Hansen (1967) die het totaal transport (suspensief transport en bodemtransport) simuleert (zie verg. (F.1)). De methode is algemeen in gebruik en gevalideerd.

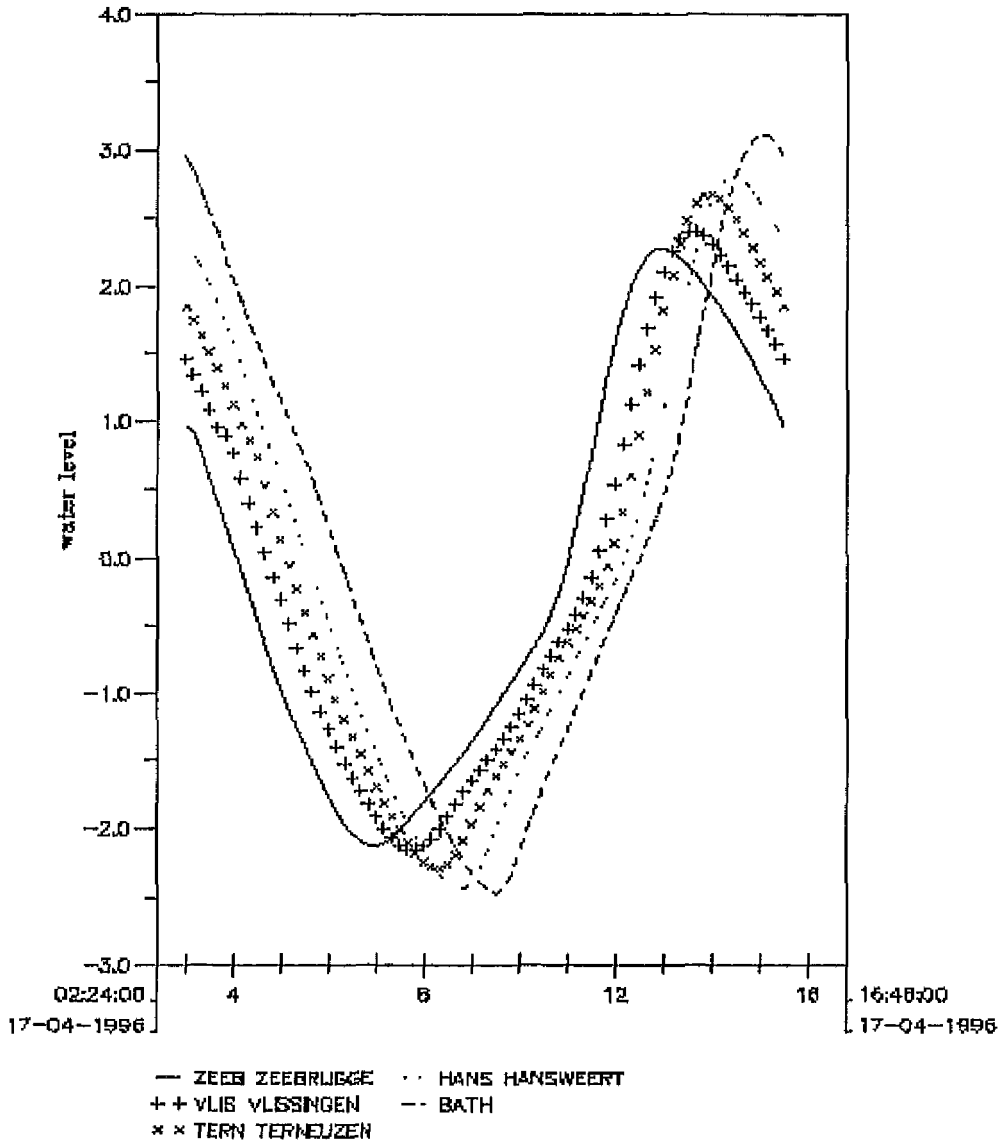
$$q_{t,c} = \frac{0.05\overline{u}^{5}}{(s-1)g^{0.5}d_{50}C^{3}} \qquad \text{(F.1)}$$

$q_{t,c}$ = totaal transport [m^2/s]
$\overline{u}$ = diepte-gemiddelde snelheid [m/s]
C = Chezy coëfficient [$m^{1/2}/s$]
s = specifieke dichtheid (ρ_s/ρ)
ρ_s = sedimentdichtheid (2650 kg/m^3)
d_{50} = gemiddelde korreldiameter van het bodemmateriaal [m] (240 μm)

De gebruikte korreldiameter d_{50} komt uit (Groenewoud, 1997).

De sedimenttransportsimulaties zijn gedraaid met een tijdstap van 10 minuten. De onderliggende waterbeweging betreft het cyclisch morfologisch getij van 750 minuten, zoals beschreven in de vorige paragraaf en weergegeven in onderstaande figuur:

Figuur F2: Cyclisch morfologisch getij



De volgende sedimenttransportsimulaties zijn uitgevoerd:

Transportsimulatie	beschrijving
ts8	referentiebodem 1996
ts9	huidige bodem 1999
t10	bodem inclusief toekomstige verdieping naar 14m, exclusief gestorte materiaal
t11	huidige bodem 1999, inclusief ontpoldering

F.4 Resultaten beheersscenario's

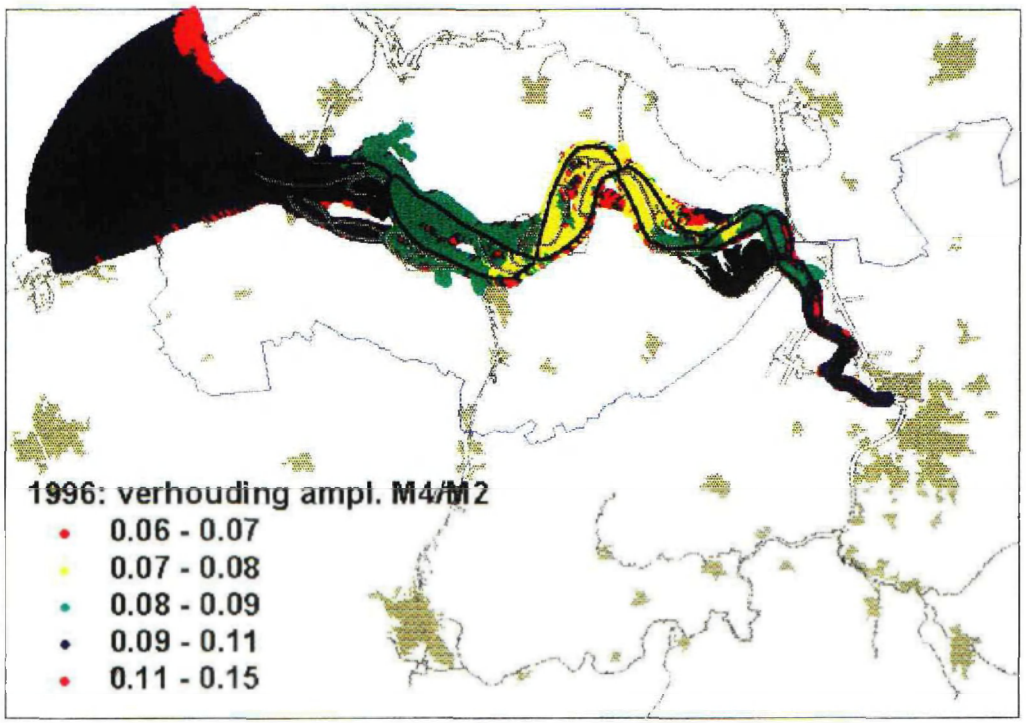
F.4.1 Hydrodynamica

De cyclische waterbeweging is met een tijdstap van 20 minuten weggeschreven naar een uitvoerfile. Uit deze file zijn vervolgens

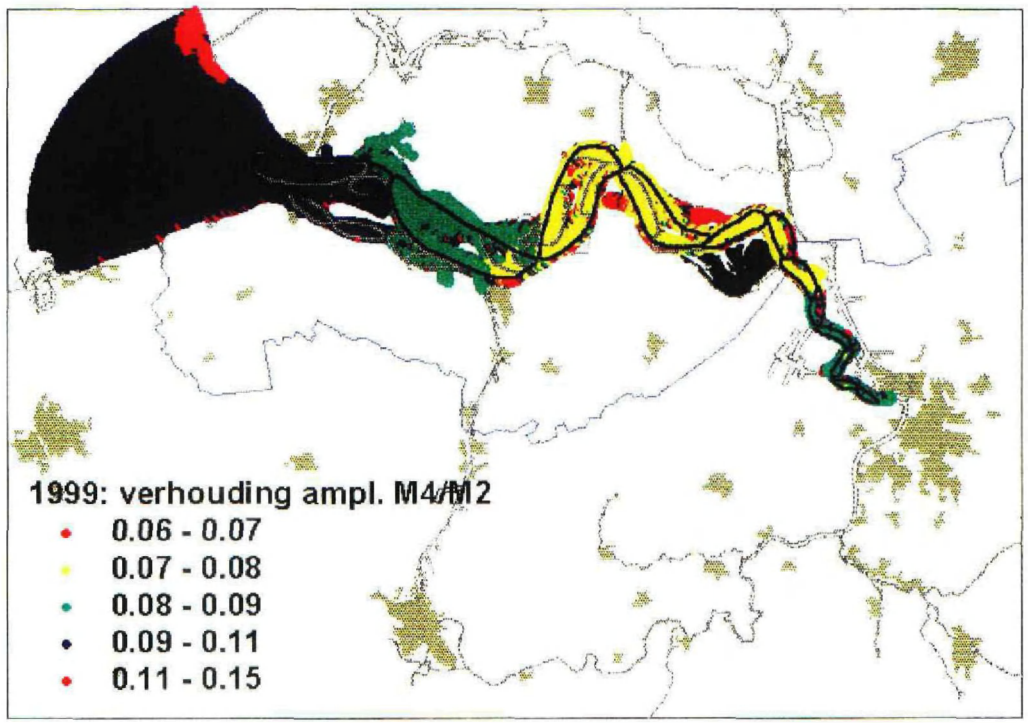
- de maximale waterstand
- de maximale snelheid
- de maximale bodemschuifspanning, en
- de maximale zoutindringing in het estuarium

bepaald. Daarnaast is tijdens de hydrodynamische simulatie voor ieder punt een Fourier analyse uitgevoerd op het verticale getij voor de tweemaal daagse en de viermaal daagse getijcomponent. Hierdoor is het ruimtelijk amplitude- en faseverloop van de M2 en de M4 getijcomponent bekend. De verhouding van de M4 en M2 amplitude geeft een indicatie van de getijasymmetrie, hetgeen van belang is voor de lange termijn morfologische ontwikkeling van het estuarium op megaschaal. Het faseverschil M4-2M2 is een indicator voor de netto sedimenttransportrichting. Onderstaande figuren tonen de amplitude verhouding van M4 en M2, en het faseverschil M4-2M2.

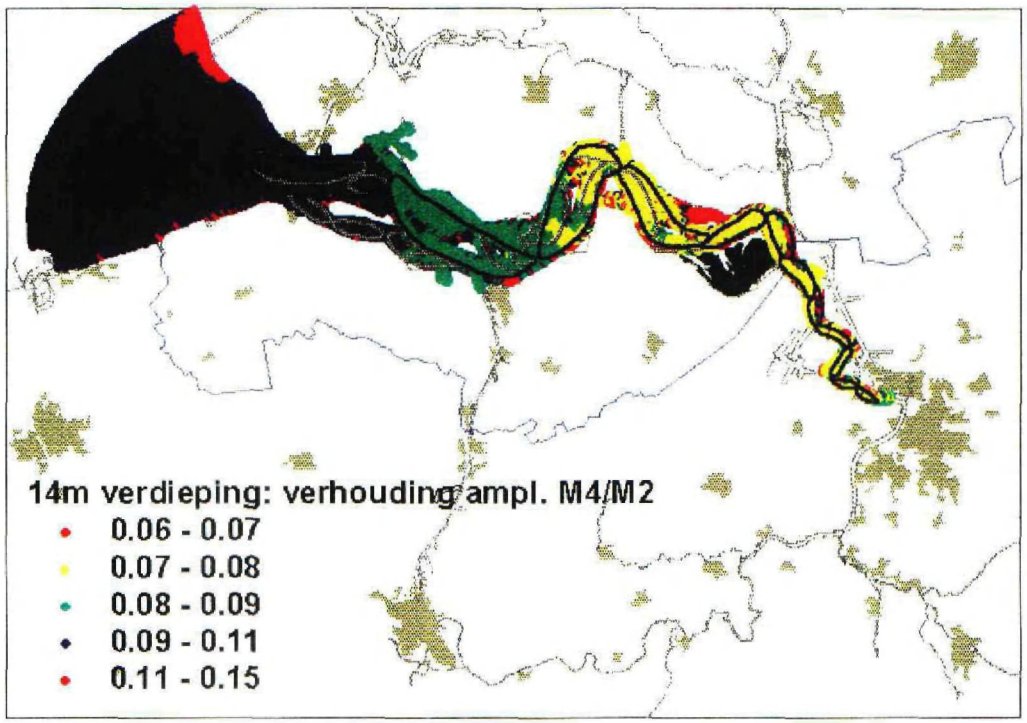
Figuur F3: Amplitude verhouding M4/M2 - referentiesituatie (1996)



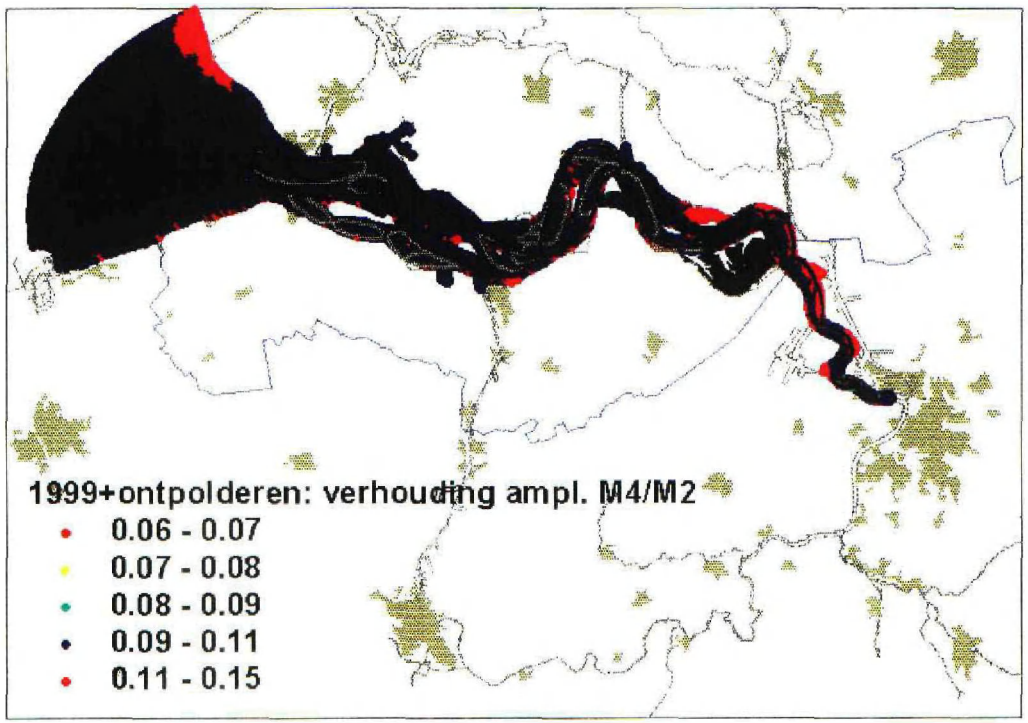
Figuur F4. Amplitude verhouding M4/M2 - huidige situatie (1999)



Figuur F5: Amplitude verhouding M4/M2 - 14m verdieping



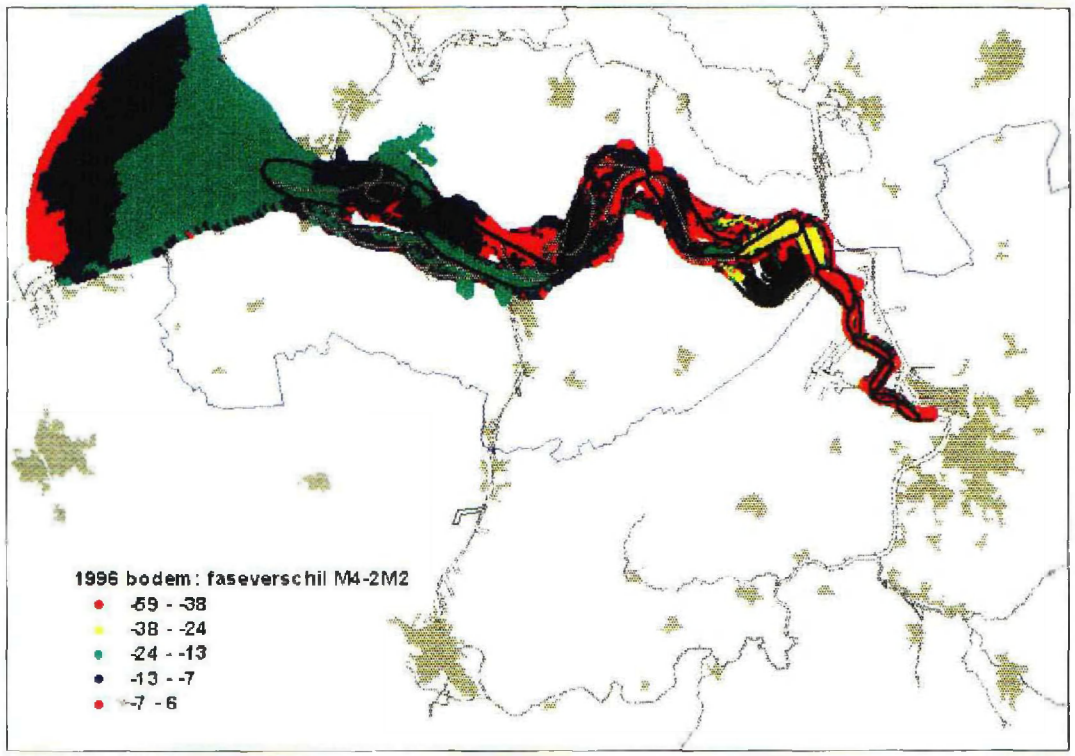
Figuur F6: Amplitude verhouding M4/M2 - 1999 + ontpolderen



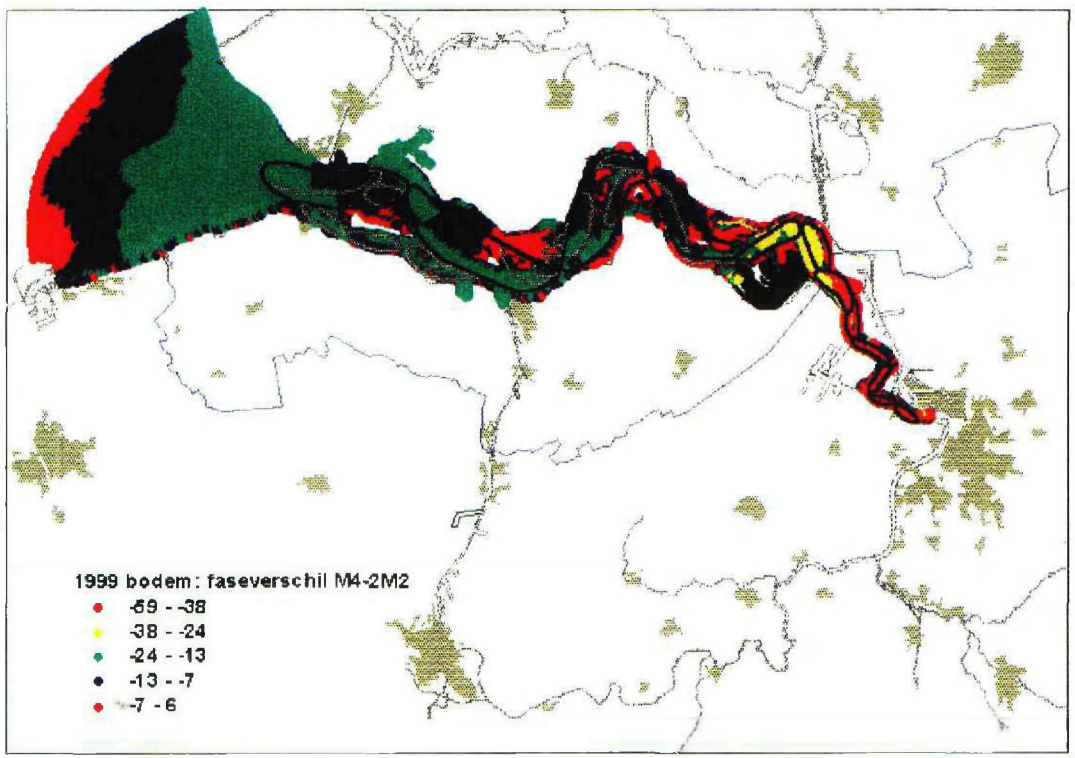
Bij de 1996 bathymetry neemt de amplitude van M4 t.o.v. M2 af in cellen 3 en 5, en langzaam weer toe in cellen 6,7,8, en 9. Bij toepassing van de 1999 bathymetry neemt door de bagger- en stortwerkzaamheden de amplitude van M4 t.o.v. M2 verder af in cellen 6 t/m 13. De 14m verdieping heeft een nog verdere afname van de amplitude van M4 t.o.v. M2 in cellen 9 t/m 13 tot gevolg.

De effecten van ontpolderen op de amplitude verhouding M4/M2 is aanzienlijk: in cellen 3 t/m 13 neemt de amplitude verhouding t.o.v. die berekend voor de 1996 en 1999 bathymetry aanzienlijk toe, tot een min of meer constante waarde van 0,1.

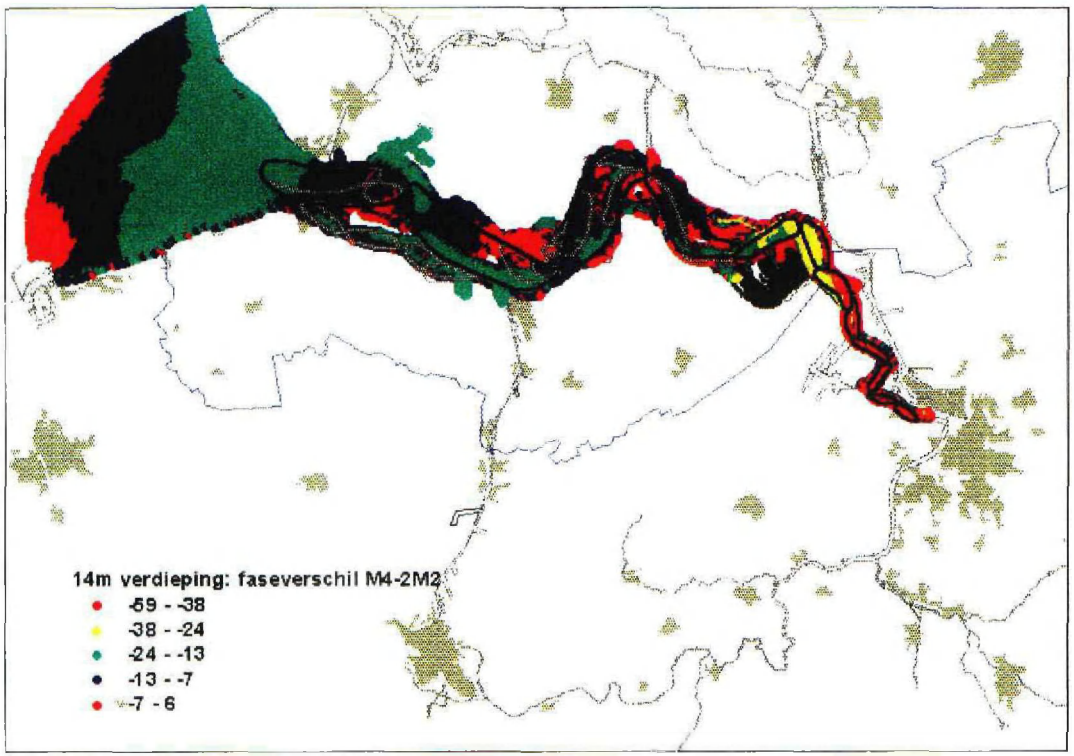
Figuur F7: Faseverschil M4-2M2 - referentiesituatie (1996)



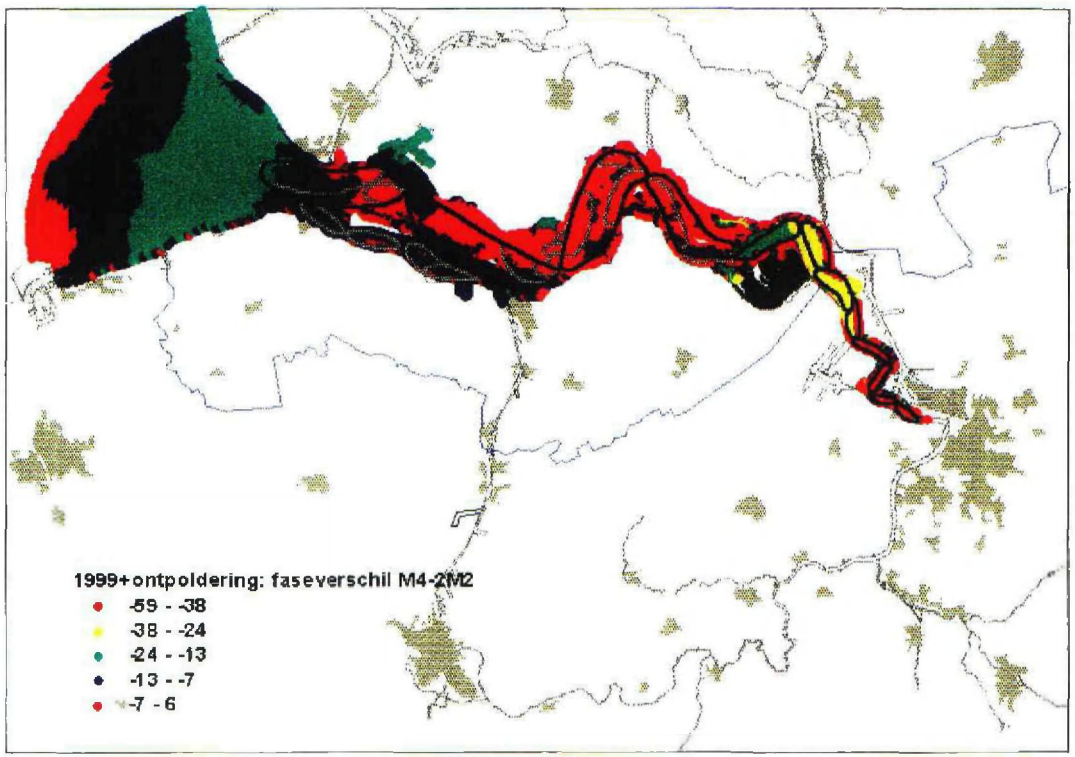
Figuur F8 Faseverschil M4-2M2 - huidige situatie (1999)



Figuur F9: Faseverschil M4-2M2 - 14m verdieping



Figuur F10: Faseverschil M4-2M2 - 1999 + ontpolderen



Appendix G
ESTMORF simulaties

Marijn van Helvert (RWS-RIKZ)

Z2878

G ESTMORF simulaties 1

G.1 ESTMORF: het model 1

G.1.1 Algemeen 1

G.1.2 De waterbeweging 1

G.1.3 Calibratie 3

G.1.4 Verbeterde versie 3

G.2 De beheersscenario's 4

G.2.1 Doel 4

G.2.2 Invoer 4

G.2.3 Beschrijving van de beheersscenario's 4

G.2.3.1 Scenario A: De referentie situatie 5
G.2.3.2 Scenario B, huidige situatie 5
G.2.3.3 Scenario C, no regret 6
G.2.3.4 Scenario E, 14 m verdieping 7

G.3 Resultaten 10

G.3.1 Inleiding 10

G.3.2 De berekende onderhoudsbaggerhoeveelheden 10

G.3.2.1 Scenario B, huidige situatie 10
G.3.2.2 Scenario C, no regret 11
G.3.2.3 Scenario E, 14 m verdieping 11
G.3.2.4 Scenario E+, 14 m verdieping met verhoogde baggercapaciteit 12

G.3.3 De morfologische ontwikkeling tot 2030 13

G.3.3.1 Scenario B, huidige situatie 13
G.3.3.2 Scenario C, no regret 13
G.3.3.3 Scenario E, 14 m verdieping 14
G.3.3.4 Scenario E+, 14 m verdieping met verhoogde baggercapaciteit 14

G.4 Slotopmerkingen 16

G ESTMORF simulaties

G.1 ESTMORF: het model

G.1.1 Algemeen

Het rekenmodel ESTMORF is ontwikkeld door het RIKZ en WL | Delft Hydraulics. ESTMORF is een dynamisch-empirisch model. Het dynamische deel van het model bestaat uit een advectie-diffusie vergelijking, waarmee op basis van concentratie(verschillen) het transport wordt berekend. Het empirische deel bestaat uit evenwichtsrelaties die de morfologie berekenen.

ESTMORF maakt gebruik van het 1D-waterbewegingsmodel IMPLIC. In IMPLIC is de Westerschelde geschematiseerd met vakken. Van deze schematisatie maakt ESTMORF gebruik door de vakken in drie morfologische eenheden te verdelen: de geul (onder laag water), de lage platen (tussen laag water en gemiddeld waterniveau) en de hoge platen (tussen gemiddeld waterniveau en hoog water). Voor alle drie componenten worden empirische relaties gebruikt. Voor de geul is het getijvolume de belangrijkste fysische parameter. Voor de lage en hoge platen is dit de getijslag Δh, wat het verschil is tussen laag water en hoog water.

Met ESTMORF kunnen lange termijn berekeningen (decennia) worden gemaakt.

G.1.2 De waterbeweging

De waterbeweging in ESTMORF wordt berekend met het 1D-waterbewegingsmodel IMPLIC. De IMPLIC-schematisatie voor ESTMORF bestaat uit 115 vakken, zie Figuur G1.1. Het ESTMORF-model heeft drie randen of begrenzingen. Voor de waterbeweging is de begrenzing in het westen de lijn Vlissingen-Breskens en in het oosten de stuw bij Gent. Voor het morfologische deel is de grens in het westen ook de lijn Vlissingen-Breskens maar in het oosten de Belgisch-Nederlandse grens. Op die randen bevinden zich de randvoorwaarden. Voor de waterbeweging is dit in het westen een getij en in het oosten een afvoer. Voor het morfologische gedeelte is de rand in het oosten gesloten, d.w.z. er vindt geen transport plaats tussen de rivier de Schelde en het estuarium. In het westen, de lijn Vlissingen-Breskens en daarbuiten, wordt verondersteld dat er morfologisch evenwicht heerst.

Voor de waterbeweging in het westen bestaat de randvoorwaarde uit een matig springtij van 11 mei 1971 van 0840 t/m 2100 uur. Met dit getij is IMPLIC ook afgeregeld.

Figuur G1.1: ESTMORF schematisatie

In het oosten is als randvoorwaarde een afvoer van totaal 29 m^3/s toegepast. Dit is opgebouwd uit de volgende afvoeren:
Schelde met 3 m^3/s;
Nete met 7 m^3/s;
Dijle met 13 m^3/s;
Zenne met 6 m^3/s.

ESTMORF maakt voor alle berekeningen gebruik van dezelfde afvoer en hetzelfde getij.

G.1.3 Calibratie

ESTMORF is gecalibreerd vanaf 1968 t/m 1993. Dit was mogelijk doordat de Westerschelde voor IMPLIC geschematiseerd was op basis van lodingen van eind jaren zestig. Bovendien is over de calibratieperiode regelmatig gemeten in de Westerschelde, waardoor de morfologische ontwikkeling bekend was. Het resultaat van de calibratie is te lezen in rapport 'Final version of the ESTMORF model' (Fokkink 1998).

G.1.4 Verbeterde versie

De eerste versie van ESTMORF is toegepast voor het project MOVE. In die versie moesten alle ingrepen zoals baggeren, storten en zandwinning door middel van een ingrepen file worden opgegeven voor de gehele berekening. Uit de resultaten bleek al snel dat teveel werd gebaggerd. Het was bovendien moeilijk om aan de hand van een aantal berekeningen een ideaal bagger- en stortscenario te ontwerpen. In de verbeterde versie, die in 1999 is opgeleverd, is dit veranderd. In deze versie is het mogelijk door het opgeven van de te handhaven baggerdiepte en -breedte de daarbij behorende bagger en stort hoeveelheden te berekenen.

Deze nieuwe optie in ESTMORF bleek uitermate geschikt om voor LTV de beheersscenario's te berekenen. Echter bij de interpretatie dient wel enige voorzichtigheid te worden betracht. Het model is op deze functionaliteit nog niet uitgebreid getest. Een afregelslag op deze functionaliteit moet nog worden uitgevoerd.

G.2 De beheersscenario's

G.2.1 Doel

Op basis van het cellenconcept zijn er in de Westerschelde 6 geschakelde macrocellen onderscheiden. Voor iedere cel is een transportcapaciteit berekend. In elke macrocel mag maximaal netto 10% van de transportcapaciteit worden gestort. M.a.w. de maximale stortcapaciteit van een macrocel is 10% van de transportcapaciteit. Met dit gegeven is de stortcapaciteit voor het gehele estuarium bepaald.

Het doel van de beheersscenario's is om op basis van de macrocellen te bepalen hoe o.a. de huidige en een toekomstige verdieping binnen dit cellenconcept kan worden beheerst. Ofwel: hoeveel moet worden gebaggerd en wat is de morfologische ontwikkeling?

G.2.2 Invoer

Met de nieuwe functionaliteit is het mogelijk om de bagger- en storthoeveelheden te berekenen. Hiervoor moet het volgende worden ingevoerd:

1. Een op te geven actuele diepte en een streefdiepte van de baggerplaatsen, in dit geval de drempels;
2. De breedte van de drempels die op diepte gehouden moeten worden;
3. Een stortstrategie, d.w.z. waar wordt het gebaggerde sediment gestort in de Westerschelde t.o.v. de baggerplaats. De strategie die wordt gehanteerd in alle berekeningen wordt de 'economische' genoemd. Dat betekent de kortste vaarafstand vanaf de baggerplaats;
4. De stortcapaciteit per stortplaats. Het stortbeleid is veranderd doordat er meer in het westen wordt gestort dan in het oosten. Doordat de stortcapaciteiten van de stortvakken in het oosten laag zijn t.o.v. het midden en het westen van de Westerschelde, wordt de stortstrategie gestuurd door de capaciteit van een stortvak. Wanneer een stortvak vol is wordt doorgegaan naar de daarop volgende;
5. Baggercapaciteit. Dit is afhankelijk van de capaciteit van de beun van de baggeraar;
6. En tot slot een baggertolerantie. Dit is de overdiepte die een baggeraar mag aanhouden bij zijn baggerwerkzaamheden.

De zandwinning moet worden opgegeven. Deze wordt gesteld op maximaal 2,6 Mln m^3/jaar (bruto). Deze is in alle beheersscenario's meegenomen.

G.2.3 Beschrijving van de beheersscenario's

Er zijn vier scenario's met ESTMORF berekend, zie het hoofddocument. De inhoud van de beheersscenario's worden beschreven in de volgende onderliggende paragrafen. In het kort zijn ze als volgt:

A: De referentiesituatie. Dit is de calibratieberekening van ESTMORF van 1968 t/m 1993. Voor LTV wordt deze berekening in ESTMORF doorgezet t/m 1998. Dit is dan inclusief de 48'/43' verdieping;
B: Berekening van de *huidige situatie*. Dit wil zeggen dat ESTMORF de baggerhoeveelheden berekent nadat de 48'/43' voet verdieping is uitgevoerd vanaf medio 1997 t/m medio 1998. De berekening start vanaf 1999 en rekent door tot aan 2030;
C: Berekening over dezelfde periode als B maar *de baggercapaciteit wordt bepaald door de stortcapaciteit van de macrocellen*;
E: Berekening onderhoudsbaggerwerk *na de 14 m verdieping*. Periode 2000 t/m 2030. De verdieping is in 1999 uitgevoerd.

G.2.3.1 Scenario A: De referentie situatie

Scenario A is geen beheersscenario. Deze ESTMORF-berekening is de calibratie berekening met een ingrepen file met daarin de opgelegde gemeten bagger- en storthoeveelheden en de zandwinning van 1968 t/m 1993, die is aangevuld t/m 1998. Voor de periode van 1994 t/m 1998 zijn de werkelijke gemeten bagger- en storthoeveelheden gebruikt. Hierin zijn de hoeveelheden van de 48'/43' verdieping verwerkt.

De reden om deze berekening te verlengen is om de 48'/43' verdieping die is uitgevoerd vanaf medio 1997 t/m medio 1998 te integreren in de referentieberekening. De beheersscenario's B en C kunnen dan beginnen vanaf 1999. Het voordeel hiervan is dat bij deze twee scenario's meteen begonnen kan worden met het berekenen van de onderhoudsbaggerhoeveelheden. In de invoerfile voor de stortstrategie kunnen de actuele diepte en de streefdiepte van de drempels gelijk worden gehouden.

De schematisatie van de Westerschelde die door ESTMORF wordt berekend en wordt weggeschreven aan het eind van de berekening, wordt gebruikt als modelinvoer voor de beheersscenario B en C.

De resultaten van deze berekening worden hier niet gepresenteerd. In het werkdocument 'Onderzoek naar de effecten van baggeren, storten en zandwinning in de Westerschelde m.b.v. het ESTMORF model in het kader van MOVE, RIKZ/OS-99.817x' kunnen de resultaten worden bekeken.

G.2.3.2 Scenario B, huidige situatie

Scenario B, de huidige situatie, berekent de benodigde bagger- en storthoeveelheden die nodig zijn om de drempels op diepte te houden na de 48'/43' verdieping. Dit wordt de huidige situatie genoemd, omdat deze verdieping al is uitgevoerd (van medio 1997 t/m medio 1998) en er vervolgens onderhoudsbaggerwerkzaamheden worden uitgevoerd. De invoer voor de scenarioberekening is als volgt:

- De plaatsen waar wordt gestort zijn hetzelfde als in het scenario gebruikt in het MOVE project. De door Dir. Zeeland aangegeven meest recente stortcapaciteiten zijn:

Locatie	Stortcapaciteit bruto m^3/jaar
Schaar van Waarde	700.000
Platen van Ossenisse	300.000
Gat van Ossenisse eb en vloed	1.700.000
Ebschaar Everingen eb	800.000
Vloedschaar Everingen eb en vloed	1.500.000
Schaar van de Spijkerplaat	2.500.000
Biezelingse Ham eb en vloed	2.000.000
Ellewoutsdijk eb en vloed	1.700.000
Totale stortcapaciteit W'schelde	**11.200.000**

De stortcapaciteiten zijn bruto kuubs of wel beun kuubs. Deze zijn omgerekend naar netto kuubs ofwel in situ kuubs door ze te delen door 1,1; er wordt dus uitgegaan van een uitleveringspercentage van 10%. In de invoer worden ze ingevoerd als stortcapaciteit per tijdstap. De tijdstap is 1 maand;

- De baggercapaciteit is gelijk aan de totale stortcapaciteit in het hele gebied. De baggercapaciteit wordt omgerekend van bruto naar netto en ingevoerd als een hoeveelheid per tijdstap. Dit is 11.200.000/1,1/12 = 848.484 m^3/tijdstap (=maand). Dit betekent dat er geen overschot aan sediment is a.g.v. baggeren of bereikte stortcapaciteit. Alles wat wordt gebaggerd wordt terug gestort in het systeem;
- De baggertolerantie is 0,30 m. Dit is conform de baggervergunning;
- In de berekening wordt de hele vaargeul opgegeven als potentiële baggerlokatie. Dit is gedaan, omdat in principe de gehele vaargeul op diepte moet worden gehouden;
- De vereiste breedte van de baggervakken zijn de breedtes van de vakken aan de bodem. Deze zijn bepaald m.b.v. de ESTMORF.map file van de referentieberekening 1968-1998;
- De zandwinning is opgelegd en bedraagt bruto 2,6 Mln m^3/jaar. Ook voor de zandwinning wordt een uitleveringspercentage van 10% toegepast en deze wordt ingevoerd per tijdstap;
- De berekening is uitgevoerd met een zeespiegelstijging van 20 cm/eeuw, ingevoerd als zeespiegelstijging per tijdstap. Voor de periode van de berekening, namelijk 30 jaar, bedraagt de zeespiegelstijging 6,2 cm;
- De duur van de berekening is vanaf jan.1999 t/m dec. 2029.

G.2.3.3 Scenario C, no regret

Dit scenario berekent de onderhoudsbaggerhoeveelheden na de 48'/43' verdieping van medio 1997 t/m medio 1998. Het verschil met scenario B is dat de stortcapaciteiten worden afgeleid van de transportcapaciteit van de macrocellen. De stortcapaciteit kan 5 tot 10% zijn van de transportcapaciteit van de macrocellen. Daarom zijn voor scenario C twee berekeningen uitgevoerd, namelijk met een stortcapaciteit van resp. 5 en 10% van de transportcapaciteit van de cel. Verdere invoer is als volgt:

- De stortcapaciteit is afgeleid uit de transportcapaciteit van de macrocellen. Voor scenario C zijn deze als volgt:

Stortplaats	stortcapaciteit 5% [netto m^3/jaar]	Stortcapaciteit 10% [netto m^3/jaar]
Schaar van de Spijkerplaat	597.484	1.194.969
Vloedschaar Everingen vloed	169.796	339.592
Vloedschaar Everingen eb	169.796	339.592
Ellewoutsdijk eb & vloed	384.871	769.741
Ebschaar Everingen	158.880	317.760
Biezelingse Ham eb & vloed	338.419	676.839
Gat van Ossenisse vloed	143.828	287.657
Gat van Ossenisse eb	143.828	287.657
Plaat van Ossenisse	160.377	320.755
Schaar van waarde eb & vloed	374.176	748.353
Schaar van de Noord	267.296	534.591
Totale stortcapaciteit W'schelde	**2.908.751**	**5.817.502**

De stortcapaciteiten zijn jaarlijkse netto hoeveelheden. Ze worden ingevoerd per tijdstap m.a.w. ze worden gedeeld door 12.

- De baggercapaciteit is gesteld op 12 Mln m^3/jaar. Dit is afgeleid uit eerdere sommen met ESTMORF. Omdat zandwinning ook in de vaargeul plaatsvindt kan de baggercapaciteit omlaag; de zandwinning is in dienst van het baggeren. De baggercapaciteit wordt 12 - 2,6 = 9,4 Mln m^3/jaar. De baggercapaciteit wordt omgerekend van bruto naar netto en ingevoerd als een hoeveelheid per tijdstap. Dit is 9.400.000/1,1/12 = 712.121 m^3/tijdstap (=maand). De stortcapaciteit per tijdstap voor 5% en 10% is respectievelijk 242.396 en 484.792 m^3 netto. Dit betekent dat er gebaggerd sediment overblijft en verdwijnt uit het systeem, wanneer de stortcapaciteit wordt bereikt.
- De baggertolerantie is 0,30 m. Dit is conform de baggervergunning;
- In de berekening wordt de hele vaargeul opgegeven als potentiële baggerlokatie. Dit is gedaan omdat in principe de gehele vaargeul op diepte moet worden gehouden;
- De vereiste breedte van de baggervakken zijn de breedtes van de vakken aan de bodem. Deze zijn bepaald m.b.v. ESTMORF.map file van de referentieberekening 1968-1998;
- De zandwinning is opgelegd en bedraagt 2,6 Mln m^3/jaar. Ook voor de zandwinning wordt een uitleveringspercentage van 10% toegepast welke wordt ingevoerd per tijdstap;
- De berekening is uitgevoerd met een zeespiegelstijging van 20 cm/eeuw, ingevoerd als zeespiegelstijging per tijdstap. Voor de periode van de berekening, namelijk 30 jaar, bedraagt de zeespiegelstijging 6,2 cm;
- De duur van de berekening is vanaf jan.1999 t/m dec. 2029.

G.2.3.4 Scenario E, 14 m verdieping

In dit scenario wordt het onderhoudsbaggerwerk berekend, nadat een nieuwe verdieping is uitgevoerd. De nieuwe verdieping is de 14 m verdieping. Scenario E behelst alleen de berekening voor het onderhoudsbaggerwerk, nadat de vaargeul op diepte is gebracht.

De verdieping is in ESTMORF, door middel van een restart, in 1 jaar uitgevoerd en wel in 1999. Hiervoor is de modelschematisatie, die aan het eind van de referentie berekening is weggeschreven door ESTMORF, gebruikt als invoer. Het sediment, dat als gevolg van het op de vereiste diepte brengen van de vaargeul is gebaggerd, wordt niet teruggestort in het systeem.

Het berekenen van het onderhoudsbaggerwerk in scenario E heeft verder dezelfde werkwijze als scenario C. Ook hier is het voordeel dat de actuele diepte en de streefdiepte, kort nadat de vaargeul op de vereiste diepte is gebracht, gelijk gehouden kunnen worden in de strategie file. De berekening begint vanaf 2000 en duurt t/m dec. 2029.

Door het uitvoeren van de 14 m verdieping zijn er nieuwe transportcapaciteiten voor de macrocellen bepaald. Dit heeft als gevolg dat de stortcapaciteiten ook veranderen. De invoer voor dit scenario zier er dan ook als volgt uit:

- De stortcapaciteit is afgeleid uit de transportcapaciteit van de macrocellen. Voor scenario E zijn ze als volgt:

Stortplaats	stortcapaciteit 5% [netto m^3/jaar]	Stortcapaciteit 10% [netto m^3/jaar]
Schaar van de Spijkerplaat	597.484	1.194.969
Vloedschaar Everingen vloed	163.265	326.531
Vloedschaar Everingen eb	163.265	326.531
Ellewoutsdijk eb & vloed	370.068	740.136
Ebschaar Everingen	149.321	298.642
Biezelingse Ham eb & vloed	307.654	615.308
Gat van Ossenisse vloed	130.753	261.506
Gat van Ossenisse eb	130.753	261.506
Plaat van Ossenisse	150.943	301.887
Schaar van waarde eb & vloed	352.166	704.332
Schaar van de Noord	235.849	471.698
Totale stortcapaciteit W'schelde	**2.751.521**	**5.503.042**

  De stortcapaciteiten zijn jaarlijkse netto hoeveelheden. Ze worden ingevoerd per tijdstap met andere woorden ze worden gedeeld door 12.
- Ook voor scenario E is de baggercapaciteit gesteld op 12 Mln m^3/jaar. Omdat zandwinning ook uit de vaargeul wordt uitgevoerd kan de baggercapaciteit omlaag (zandwinning in dienst van het baggeren). De baggercapaciteit wordt 12 - 2,6 = 9,4 Mln m^3/jaar. De baggercapaciteit wordt omgerekend van bruto naar netto en ingevoerd als een hoeveelheid per tijdstap. Dit is 9.400.000/1,1/12 = 712.121 m^3/tijdstap (=maand). De stortcapaciteit per tijdstap voor 5% en 10% is respectievelijk 229.294 en 458.587 m^3 netto. Dit betekent dat er gebaggerd sediment overblijft en verdwijnt uit het systeem wanneer de stortcapaciteit wordt bereikt.
- De baggertolerantie is 0,70 m. Dit is conform de nota 'Bepaling van de te baggeren volumes bij een verdere verdieping van de Schelde', van de afdeling Maritieme zaken van het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap;
- In de berekening wordt de hele vaargeul opgegeven als potentiële baggerlokatie. Dit is gedaan omdat in principe de gehele vaargeul op diepte moet worden gehouden;
- De vereiste breedte van de baggervakken zijn de breedtes van de vakken aan de bodem. Deze zijn bepaald m.b.v. ESTMORF.map file van de berekening waar de 14 m verdieping wordt uitgevoerd;
- De zandwinning is opgelegd en bedraagt 2,6 Mln m^3/jaar. Ook voor de zandwinning wordt een uitleveringspercentage van 10% toegepast en deze wordt ingevoerd per tijdstap;
- De berekening is uitgevoerd met een zeespiegelstijging van 20 cm/eeuw, ingevoerd als zeespiegelstijging per tijdstap. Voor de periode van de berekening, namelijk 30 jaar, bedraagt de zeespiegelstijging 6,2 cm;

- De duur van de berekening is vanaf jan.2000 t/m dec. 2029.

Voor dit scenario is nog een extra variant berekend. De baggercapaciteit is verhoogd van 12 Mln naar 15 Mln. Dit betekent dat de ingevoerde baggercapaciteit als volgt wordt:
15 - 2,6 = 12,4 Mln m3 bruto/jaar = 939.394 m3 netto/tijdstap. Deze variant op scenario E wordt E+ genoemd, wijzend op de verhoogde baggercapaciteit. De overige invoer blijft ongewijzigd.

G.3 Resultaten

G.3.1 Inleiding

De resultaten van de berekeningen zijn niet alleen de bagger- en storthoeveelheden die nodig zijn om de vaargeul op de gewenste diepte te houden, maar ook de morfologische ontwikkeling van de macrocellen. Het presenteren van de resultaten wordt in twee onderdelen gedaan. Het betreft het presenteren van de onderhoudsbaggerhoeveelheden voor de scenario's en de morfologische ontwikkeling in de macrocellen.

De resultaten van scenario A worden niet behandeld. Verondersteld wordt dat deze bekend zijn.

G.3.2 De berekende onderhoudsbaggerhoeveelheden

Een compleet overzicht van de onderhoudsbaggerhoeveelheden wordt in de onderstaande tabel gepresenteerd.

Scenario	Bepaling stortcapaciteit	Baggerhoeveelheden		Storthoeveelheden	
		Mln m^3 netto/jr	Mln ton netto/jr	Mln m^3 netto/jr	Mln ton netto/jr
B huidig	cap.stort=cap.bagg	6,5 - 8	10 - 13	6,5 - 8	10 - 13
C no regret	Cap.stort=5%transp.	5,5 - 7	9 - 11	2,9	4,6
	Cap.stort=10%transp.	6 - 7,5	10 - 12	5,8	9,2
E 14 m verd.	Cap.stort=5%transp.	6 - 7	10 - 11	2,75	4,4
	Cap.stort=10%transp.	6,5 - 7,5	10 - 12	5,5	8,7
E+ 14 m verd.	Cap.stort=5%transp.	6	10	2,75	4,4
	Cap.stort=10%transp.	7 - 8	11 - 13	5,5	8,7

Tabel G3.1: Compleet overzicht onderhoudsbaggerhoeveelheden en storthoeveelheden.

G.3.2.1 Scenario B, huidige situatie

Scenario B benadert de praktijk het meest. Alles wat wordt gebaggerd wordt weer terug gestort in het systeem. In scenario B zijn de bagger- en storthoeveelheden allebei gelijk. In figuren G3.1 en G3.2 zijn de lopende jaargemiddelde van de bagger- en storthoeveelheden afgebeeld.

De berekende hoeveelheden zijn moeilijk te vergelijken met de gemeten hoeveelheden. Het is bijna twee jaar geleden dat de 48'/43' verdieping is afgerond. Van het onderhoudsbaggerwerk zijn nog niet veel gegevens bekend. Alleen 1999 is een volledig jaar van onderhoudsbaggerwerkzaamheden. In 1999 is 12,3 Mln m^3 bruto (= 11,2 Mln m^3 netto) gebaggerd en gestort.

Uit de resultaten is af te leiden dat in het begin veel gebaggerd en gestort wordt. Dit is te wijten aan de 0,30 m baggertolerantie die direct wordt verwijderd, wanneer er maar 1 cm

sedimentatie optreedt. Deze berekende initiële hoeveelheid ligt rond de 10 Mln m^3 netto. Het effect van de baggertolerantie op de baggerhoeveelheid duurt ongeveer 8 jaar. De baggerhoeveelheid is dan afgenomen tot 6,5 Mln m^3. Daarna stijgt het baggerverloop naar 8 Mln m^3 netto per jaar. De gepresenteerde cijfers in tabel G3.1 zijn dus bepaald vanaf 8 jaar na aanvang tot het eind. Het begin wordt vanwege het verwijderen van de baggertolerantie niet als representatief beschouwd.

G.3.2.2 Scenario C, no regret

In scenario C kan door een hoge baggercapaciteit ten opzichte van de lage stortcapaciteit van de macrocellen niet al het gebaggerde sediment weer worden terug gebracht in het systeem. Maximaal kan per jaar 7,9 of 5,0 Mln m^3 netto afgevoerd worden bij resp. 5 en 10% stortcapaciteit. Het verschil, berekend met ESTMORF, geeft gemiddeld over de periode aan dat er 5,7 of 3,5 Mln m^3 netto/jaar moet worden afgevoerd. Beide cijfers zijn inclusief zandwinning, omdat bij het verschil berekend met ESTMORF het effect van zandwinning is inbegrepen. Hieruit volgt dat de baggercapaciteit niet volledig behoeft te worden gebruikt. Tabel G3.2 geeft een overzicht van de capaciteiten en de behaalde resultaten. In de tabel is de netto baggercapaciteit ter grootte van 8,5 Mln. m^3/jaar afgeleid van de bruto baggercapaciteit (12 Mln. m^3/jaar) minus de bruto zandwinning (2,6 Mln. m^3/jaar), zie Par. G 2.3.4, en rekening houdend met een uitlevering van 10%: (12-2,6)/1,1 = 8,5. De netto zandwinning van 2,3 Mln. m^3/jaar volgt uit de bruto zandwinning volgens: 2,6/1,1 = 2,3.

Scenario C	**Bagcap. + zandwinning**	**Stortcap.**	**Max. verschil Bcap+zw-Scap**	**Gem.verschil ESTMORF**
stort.cap. 5%	8,5 +2,3	2,9	7,9	5,7
stort.cap 10%	8,5 +2,3	5,8	5,0	3,5

Tabel G3.2: Overzicht van de hoeveelheden in Scenario C. Hoeveelheden zijn in Mln m^3 netto/jaar.

In de figuren G3.3 t/m G3.6 zijn in de grafieken het lopend jaargemiddelde weergegeven van het bagger en stortverloop bij 5 en 10% stortcapaciteit van de macrocellen.

In figuur G3.3 is te zien dat na ongeveer 8 jaar de jaarlijkse baggerhoeveelheid bij 5% stortcapaciteit 5,5 Mln m^3 is. Langzaam loopt het op en eindigt rond de 7 Mln m^3 per jaar. De eerste jaren worden niet meegenomen in de beschouwing. Namelijk in het begin moet teveel worden gebaggerd vanwege de baggertolerantie, waardoor de hoeveelheden in het begin niet een representatief beeld geven. Bij een stortcapaciteit van 10% is de baggerhoeveelheid hoger en begint deze vanaf 6 Mln en eindigt bij 8 Mln m^3 netto per jaar, bij dezelfde beschouwing. Doordat de maximale stortcapaciteit snel wordt bereikt zien de stortgrafieken in figuren G3.4 en 3.6 voor scenario C er anders uit dan bij scenario B. In de stortgrafiek in figuur G3.4 is de gemiddelde stortcapaciteit van 2,9 Mln m^3 weergegeven met de horizontale lijn. Bij een stortcapaciteit van 10% (figuur G3.6) is het beeld hetzelfde.

G.3.2.3 Scenario E, 14 m verdieping

Dit scenario berekent het onderhoudsbaggerwerk nadat de 14 m (=46 voet) verdieping is uitgevoerd. De streefdieptes van de vaargeul zijn 2,5 m dieper geworden. Deze diepte moet worden gehandhaafd door onderhoudsbaggerwerk. De verdieping is (in ESTMORF) in 1

jaar uitgevoerd. Van deze simulatie worden de resultaten niet gepresenteerd. Al het gebaggerde materiaal van de drempels is afgevoerd. De periode waarover de onderhoudsbaggerwerkzaamheden zijn berekend is vanaf 2000 tot 2030.

Identiek aan scenario C is in scenario E de baggercapaciteit groter dan de stortcapaciteit. De stortcapaciteit is zelfs door de lagere transportcapaciteit van de macrocellen, afgenomen ten opzichte van scenario C, waardoor het verschil nog iets groter wordt. Het resultaat is dat het maximale verschil in scenario E is toegenomen. In tabel G3.3 is een overzicht gegeven.

Scenario E	**Bagcap. + zandwinning**	**Stortcap.**	**Max. verschil Bcap+zw-Scap**	**Gem.verschil ESTMORF**
stort.cap. 5%	8,5 + 2,3	2,8	8,0	6,0
stort.cap 10%	8,5 + 2,3	5,5	5,3	4,0

Tabel G3.3: Overzicht van de hoeveelheden in Scenario E. Hoeveelheden zijn in Mln m^3 netto/jaar.

In de figuren 3.7 t/m 3.10 zijn in de grafieken het lopend jaargemiddelde weergegeven van het bagger- en stortverloop bij 5 en 10% stortcapaciteit van de macrocellen.

De baggercapaciteit van 8,5 Mln m^3 netto/jaar is hetzelfde als voor scenario C. De hoeveelheid sediment die verdwijnt is iets meer dan bij scenario C. Dit is te verklaren doordat de stortcapaciteit iets is afgenomen.

De baggertolerantie in Scenario E is 0,70 m. Dit heeft invloed op de baggerhoeveelheden. Zoals in scenario C is de baggerhoeveelheid in het begin van de periode veel. Deze is echter ook hier niet representatief. Bij analyse van de baggerhoeveelheden moet gekeken worden na ongeveer 8 jaar (ongeveer bij 100 tijdstappen).

G.3.2.4 Scenario E+, 14 m verdieping met verhoogde baggercapaciteit

Het verschil met scenario E is, dat de baggercapaciteit is verhoogd van 9,4 Mln m^3 naar 12,4 m^3 Mln bruto/jaar. De netto baggercapaciteit is dan 12,4/1,1 = 11,3 Mln. m^3/jaar. De resultaten van de bagger- en storthoeveelheden staan in tabel G3.1. Tabel G3.4 geeft het verschil weer dat maximaal afgevoerd kan worden en dat werkelijk wordt afgevoerd, inclusief zandwinning.

Scenario E	**Bagcap. + zandwinning**	**Stortcap.**	**Max. verschil Bcap+zw-Scap**	**Gem.verschil ESTMORF**
stort.cap. 5%	11,3 + 2,3	2,8	10,8	6,0
stort.cap 10%	11,3 + 2,3	5,5	8,1	4,0

Tabel G3.4: Overzicht van de hoeveelheden in Scenario E+. Hoeveelheden zijn in Mln m^3 netto/jaar.

In de figuren G3.11 t/m 3.14 zijn in de grafieken het lopend jaargemiddelde weergegeven van het bagger- en stortverloop bij 5 en 10% stortcapaciteit van de macrocellen. Ook in deze variant op scenario E moet rekening worden gehouden met de baggertolerantie van 0,70 m. De eerste 8 jaar zijn buiten beschouwing gelaten.

G.3.3 De morfologische ontwikkeling tot 2030

De onderhoudsbaggerwerken hebben een effect op de morfologie in het systeem. Deze wordt bekeken aan de hand van grafieken waarin het morfologische verloop wordt weergegeven van de macrocellen. Per scenario worden deze gepresenteerd voor de ebgeul en de vloedgeul. Vervolgens wordt voor macrocel 3 de plaatontwikkeling gepresenteerd. De plaatontwikkeling voor de overige macrocellen wordt achterwege gelaten omdat macrocel 3 representatief is voor de plaat ontwikkeling in het hele systeem en macrocel 3 het meeste intergetijdegebied heeft.

Verder moet worden opgemerkt dat de empirische relaties voor de plaatgebieden in ESTMORF minder goed zijn gevalideerd dan bij de geulen. Hierdoor is de betrouwbaarheid voor de plaatgebieden kleiner dan bij de geulen.

De gepresenteerde morfologische ontwikkeling van de geulvolumes is t.o.v. hoog water; dit is inclusief de plaatgebieden. De morfologische ontwikkeling is inclusief zandwinning. In de figuren zijn de macrocellen verdeeld in ebgeulen en vloedgeulen. De ebgeul is de vaargeul. De ebgeul is qua volume groter dan de vloedgeul. In ESTMORF is de gehele vaargeul gedefinieerd als baggerlocatie. In de vloedgeul wordt voornamelijk gestort. In de onderliggende subparagrafen wordt per scenario de morfologische ontwikkeling gepresenteerd.

G.3.3.1 Scenario B, huidige situatie

In figuur G3.15 is de figuur afgebeeld die de morfologische ontwikkeling weergeeft van alle macrocellen voor scenario B. Opvallend is dat alle geulen ruimer worden. Alleen vloedgeul 3 sedimenteert in de eerste jaren, waarna deze weer ruimer wordt. Uiteindelijk is de vloedgeul van macrocel 3 netto kleiner geworden. Dit is de enige geul van alle macrocellen die sedimenteert. Alle ebgeulen van de macrocellen, m.u.v. de cellen 1 en 7, verruimen meer dan de vloedgeulen.

In macrocellen 6 en 7 wordt niet gestort. In de overige macrocellen wordt zowel in de eb- als in de vloedgeul gestort. Overigens zijn de storthoeveelheden in de ebgeulen van de macrocellen klein. In ieder geval zo weinig dat er netto sediment onttrokken wordt.

In figuur G3.16 is de plaatontwikkeling weergegeven van macrocel 3 van scenario B. Deze grafiek bevestigt het verruimen van de geulen; het plaatvolume en de plaathoogte nemen beiden af. Het areaal neemt ook iets af maar niet veel. Het sediment dat verdwijnt komt van de platen en verdwijnt via de geulen. Waar het sediment naar toe gaat is in deze fase van het project niet onderzocht. Op basis van de resultaten van eerdere projecten en gezien de baggerhoeveelheden is export van sediment uit het systeem het meest waarschijnlijk.

G.3.3.2 Scenario C, *no regret*

Stortcapaciteit 5%: In grote lijnen ziet de morfologische ontwikkeling voor scenario C er hetzelfde uit als voor scenario B, d.w.z. alle geulen verruimen. Dit geldt ook voor de vloedgeul van cel 3, die eerst sedimenteert maar daarna gaat eroderen. Uiteindelijk wordt de

vloedgeul ruimer, in tegenstelling tot scenario B. Het algemene beeld is dat in de ebgeulen netto wordt gebaggerd en in de vloedgeulen netto wordt gestort. Het debiet door de vloedgeul heeft het vermogen om het gestorte sediment te verwijderen. Netto hoeft dit niet te betekenen dat de vloedgeulen ruimer worden, maar dat alleen het gestorte materiaal wordt verwijderd. De plaatontwikkeling in macrocel 3 laat een afname van de plaathoogte en plaatvolume zien. Het areaal blijft nagenoeg gelijk. Ook hier verdwijnt het sediment van de plaat in de geul.

Stortcapaciteit 10%: In grote lijnen is het beeld hetzelfde als hiervoor. Opvallend is dat bij een stortcapaciteit van 10% de grafiek in figuur G3.19 meer lijkt op de grafiek behorende bij scenario B in figuur G3.15. De vloedgeul in cel 3 eindigt, evenals bij scenario B, onder de 0-lijn. Dit is in tegenstelling tot het geval met een 5% stortcapaciteit, waar de volumeverandering van de vloedgeul in cel 3 boven de 0 uitkomt. Dit heeft ongetwijfeld te maken met de hogere stortcapaciteit. In vloedgeul 3 wordt met 10% teveel gestort zodat het debiet door deze geul niet het vermogen heeft om het sediment af te voeren. In de situatie met 5% stortcapaciteit was dit nog wel het geval. Het bagger- en stortbeeld is nagenoeg hetzelfde. De plaatontwikkeling geeft hetzelfde beeld als bij een 5% stortcapaciteit, zie figuur G3.20.

G.3.3.3 Scenario E, 14 m verdieping

Stortcapaciteit 5%: In figuur G3.21 is voor scenario E de volumeverandering weergegeven van alle macrocellen. Het bagger- en stortverloop ziet er hetzelfde uit als voor scenario C. Het enige verschil is dat in macrocel 5 in beide geulen wordt gebaggerd. In de geulontwikkeling is te zien dat de vloedgeul van macrocel 3 weer boven de 0-lijn eindigt. Dit beeld is hetzelfde als in scenario C bij een stortcapaciteit van 5%. Echter het eindvolume van de vloedgeul is groter geworden dan bij scenario C. Dit heeft waarschijnlijk te maken met de grotere baggerhoeveelheden die in dit scenario worden verzet als gevolg van de extra verdieping. De plaatontwikkeling, weergegeven in figuur G3.22, is hetzelfde als hiervoor. Plaatvolume en plaathoogte nemen beiden af. Het plaatareaal neemt eveneens iets af.

Stortcapaciteit 10%: In figuur G3.23 is de geulontwikkeling weergegeven. Het beeld is hetzelfde als hiervoor beschreven bij scenario C met een stortcapaciteit van 10% en scenario B. De vloedgeul van macrocel 3 eindigt nu wel hoger dan in de hiervoor genoemde scenario's. Maar het beeld verschilt wel met de 5% stortcapaciteit. Het bagger- en stortverloop is hetzelfde. De plaatontwikkeling afgebeeld in figuur G3.24 geeft geen ander beeld als hiervoor beschreven.

G.3.3.4 Scenario E+, 14 m verdieping met verhoogde baggercapaciteit

Stortcapaciteit 5%: In figuur G3.25 is de volumeverandering weergegeven in de macrocellen. Het beeld is hetzelfde als hiervoor. De vloedgeul in macrocel 3 wordt netto ruimer, analoog aan de vorige berekeningen. Echter, het ziet ernaar uit dat de volumes niet groter zijn geworden. Het bagger- en stortverloop is hetzelfde gebleven. T.a.v. de plaatontwikkeling in figuur G3.26 is ook geen verandering te herkennen.

Stortcapaciteit 10%: Figuur G3.27 laat zien dat de verandering gering is. De vloedgeul in macrocel 3 eindigt nu iets boven de 0-lijn wat betekent dat deze netto iets erodeert. Maar het beeld is vergelijkbaar met de overige 10% berekeningen. De plaatontwikkeling afgebeeld in figuur G3.28 is hetzelfde als hiervoor beschreven.

G.4 Slotopmerkingen

Een van de belangrijkste conclusies die kan worden getrokken uit de beheersscenario's, welke zijn berekend met ESTMORF, is dat binnen de simulatieperiode tot 2030 geen evenwicht wordt bereikt. De geulen in de macrocellen worden ruimer. De morfologische ontwikkeling geeft niet aan dat de volumeveranderingen afnemen. Ook voor de intergetijdegebieden kan dit worden geconcludeerd.

Het verbeterde ESTMORF-model met de functionaliteit om het bagger- en stortscenario te berekenen is niet uitgebreid getest. Een calibratie op deze functionaliteit moet nog worden uitgevoerd. Ook de empirische relaties voor de intergetijdegebieden zijn in het huidige model niet in detail gevalideerd, waardoor de berekende morfologische ontwikkeling voor de platen minder betrouwbaar is dan die voor de geulen.

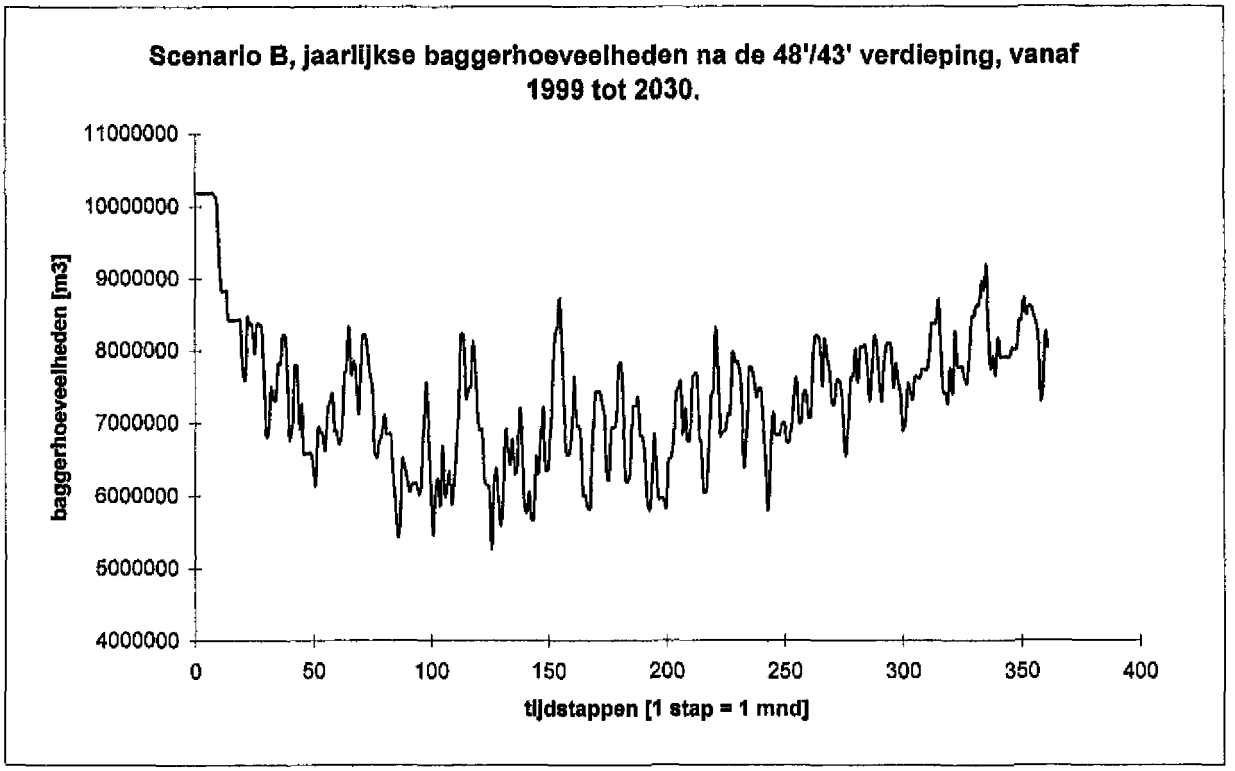
Voor het analyseren van de resultaten is het wenselijk om niet alleen te kijken naar macrocellen maar naar het totale systeem. In MOVE werd het systeem verdeeld in drie deelgebieden namelijk west, midden en oost. Per gebied is een zandbalans gemaakt. Wanneer alleen gekeken wordt naar de morfologische ontwikkeling van de macrocellen is het moeilijk te beoordelen hoe de balans eruit ziet. Verdere analyse van de resultaten zou een nog beter beeld kunnen geven van de morfologische ontwikkeling van het systeem. Dit zou ook een beter beeld kunnen geven v.w.b. de interactie tussen de macrocellen.

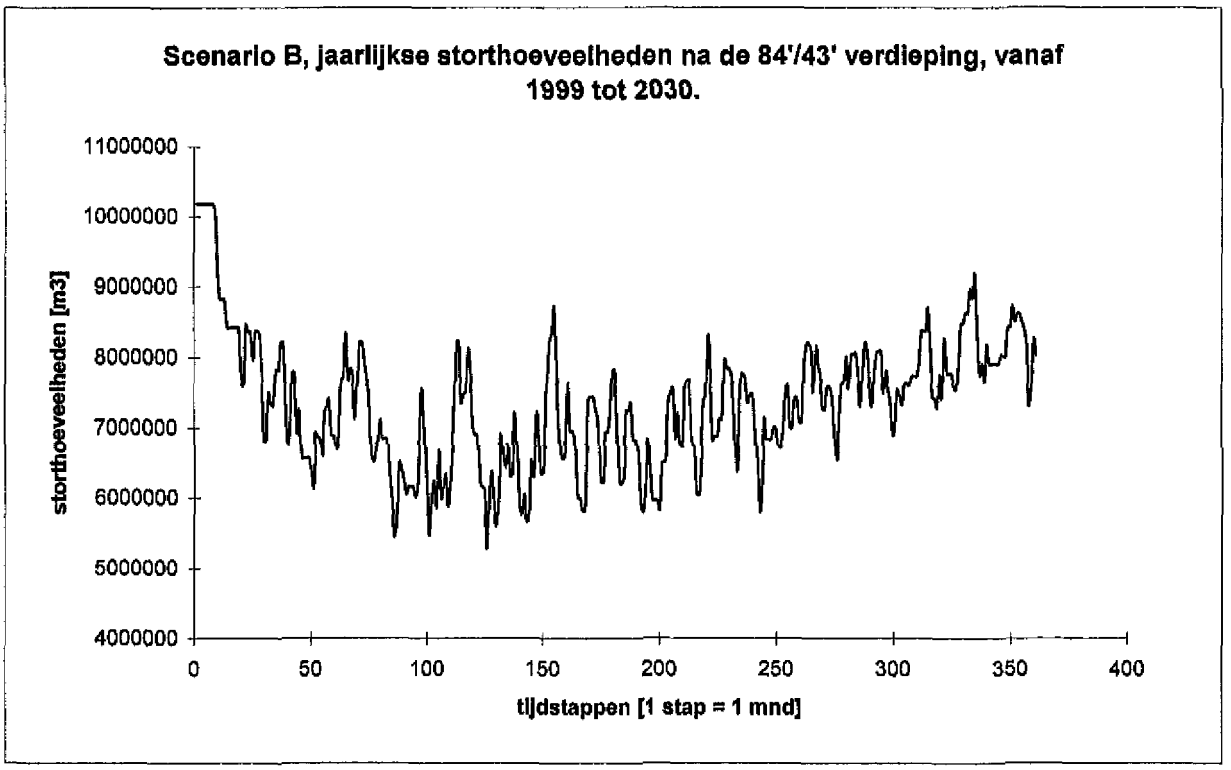
Referenties

Fokkink, 1998: Final version of the ESTMORF model.

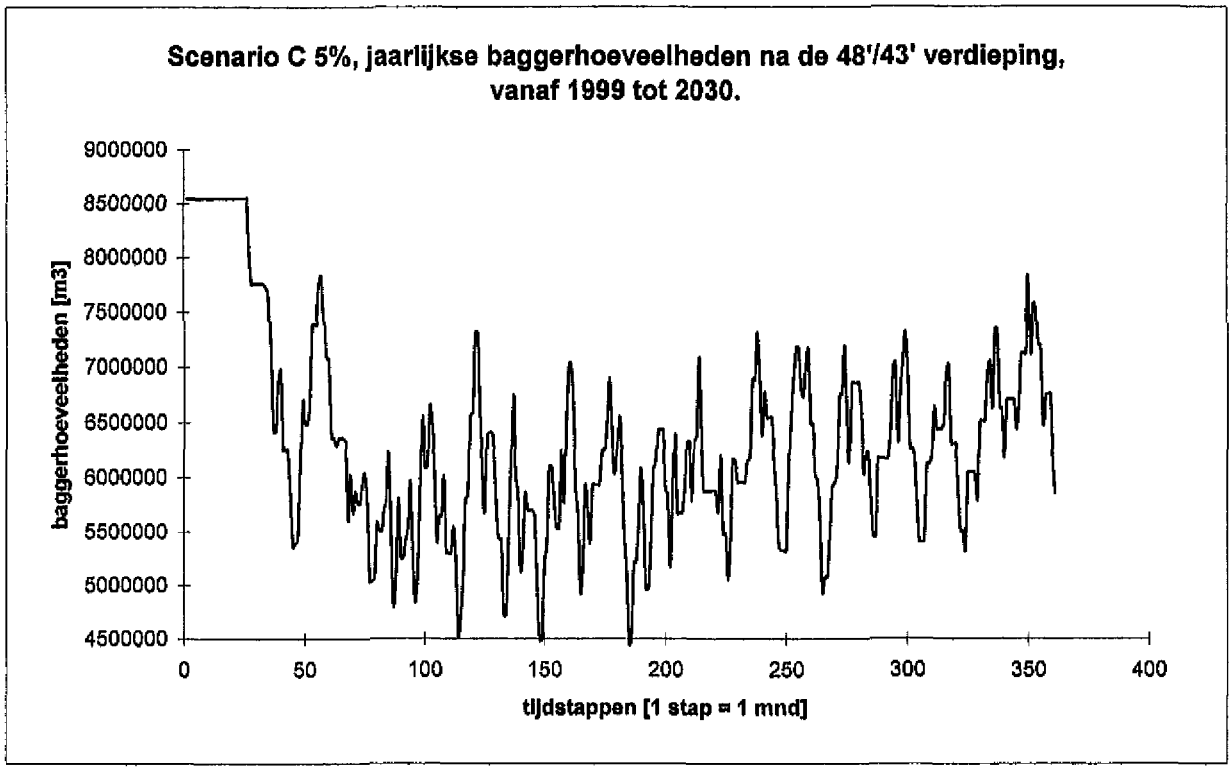
Helvert, M. van, 1999, Onderzoek naar de effecten van baggeren, storten en zandwinning in de Westerschelde m.b.v. het ESTMORF-model i.h.k.v. MOVE. Rijkswaterstaat, Werkdocument RIKZ/OS-99.817x.

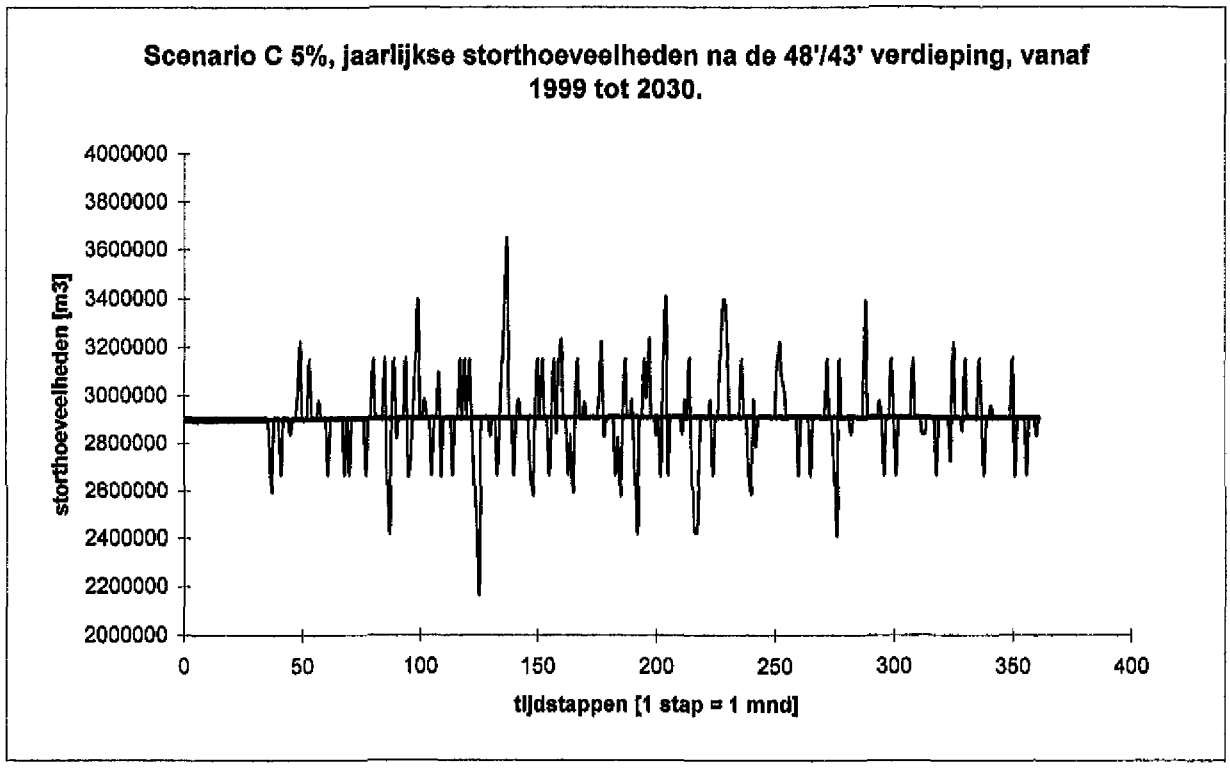
Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap: Bepaling van de te baggeren volumes bij een verdere verdieping van de Schelde, Afdeling Maritieme Schelde.





Scenario B: **Jaarlijkse bagger- en storthoeveelheden**	LTV Schelde-estuarium Z2878
WL | DELFT HYDRAULICS	Fig. G3.1/2





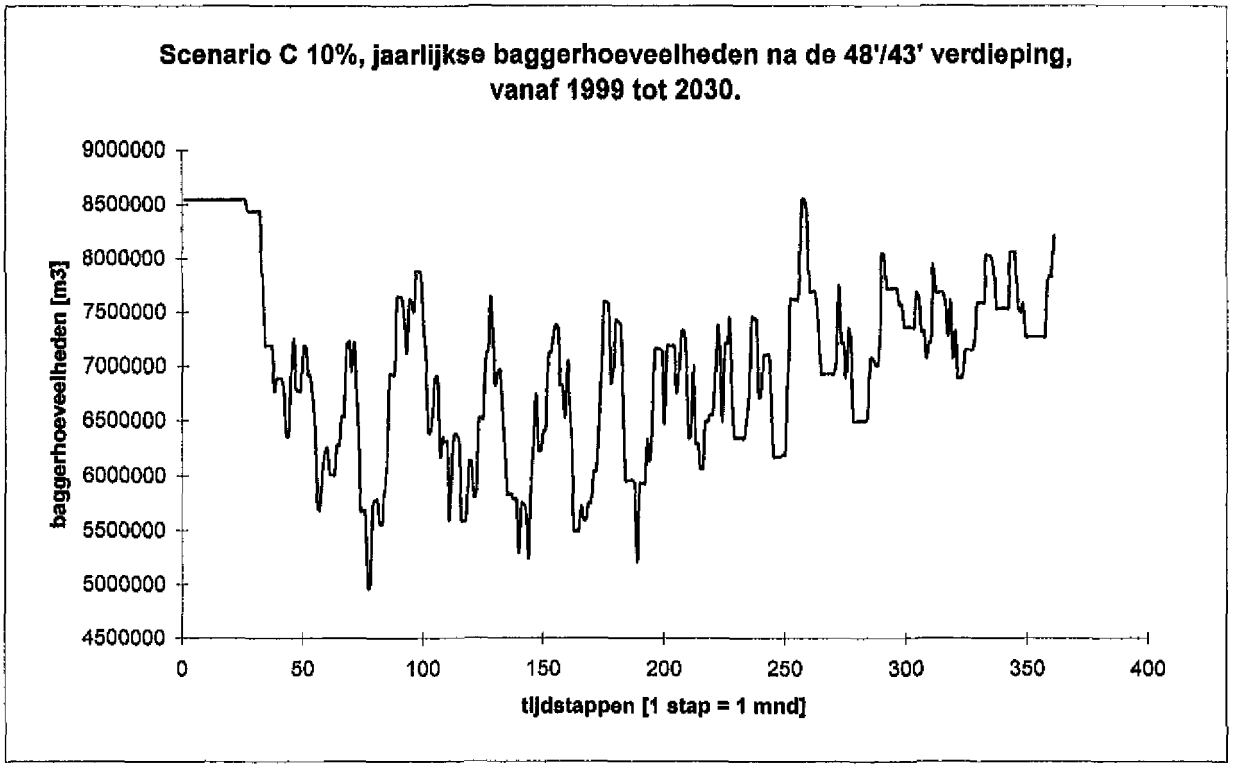
Scenario C: stortcriterium 5%
Jaarlijkse bagger- en storthoeveelheden

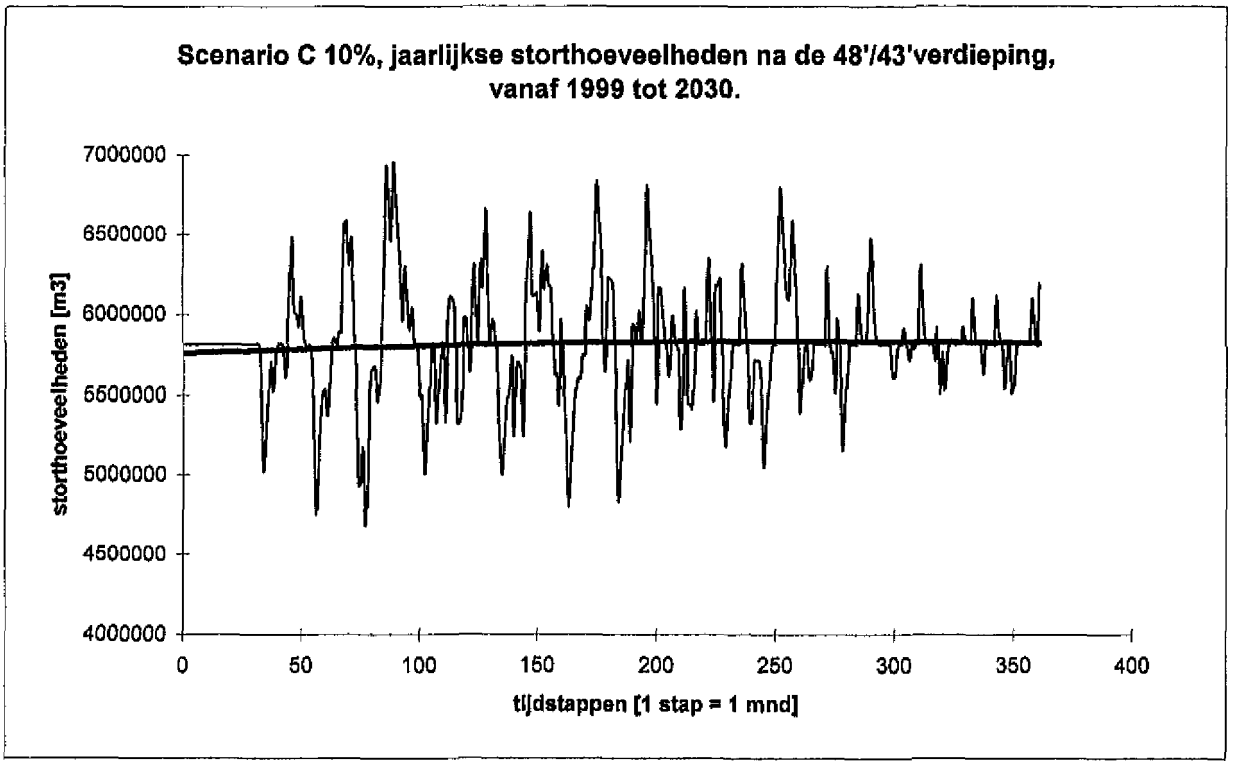
LTV Schelde-estuarium

Z2878

WL | DELFT HYDRAULICS

Fig. G3.3/4





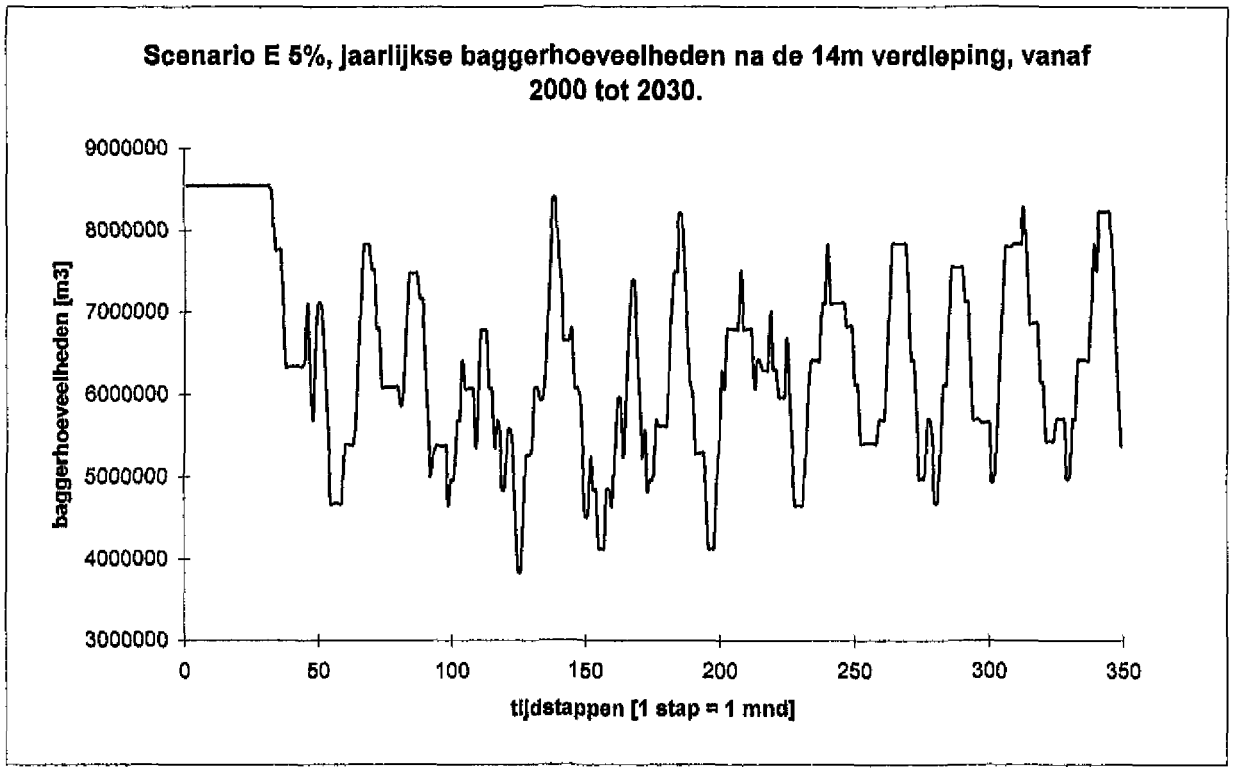
Scenario C: stortcriterium 10%
Jaarlijkse bagger- en storthoeveelheden

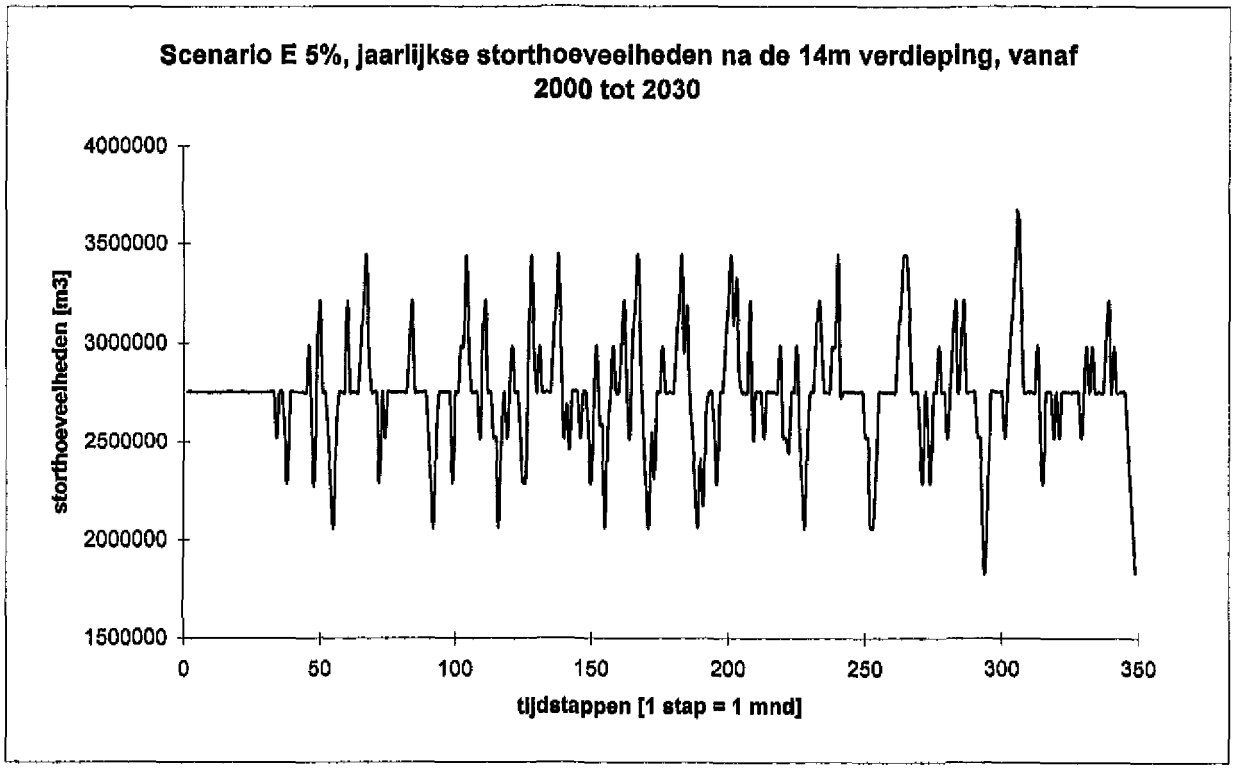
LTV Schelde-estuarium

Z2878

WL | DELFT HYDRAULICS

Fig. G3.5/6





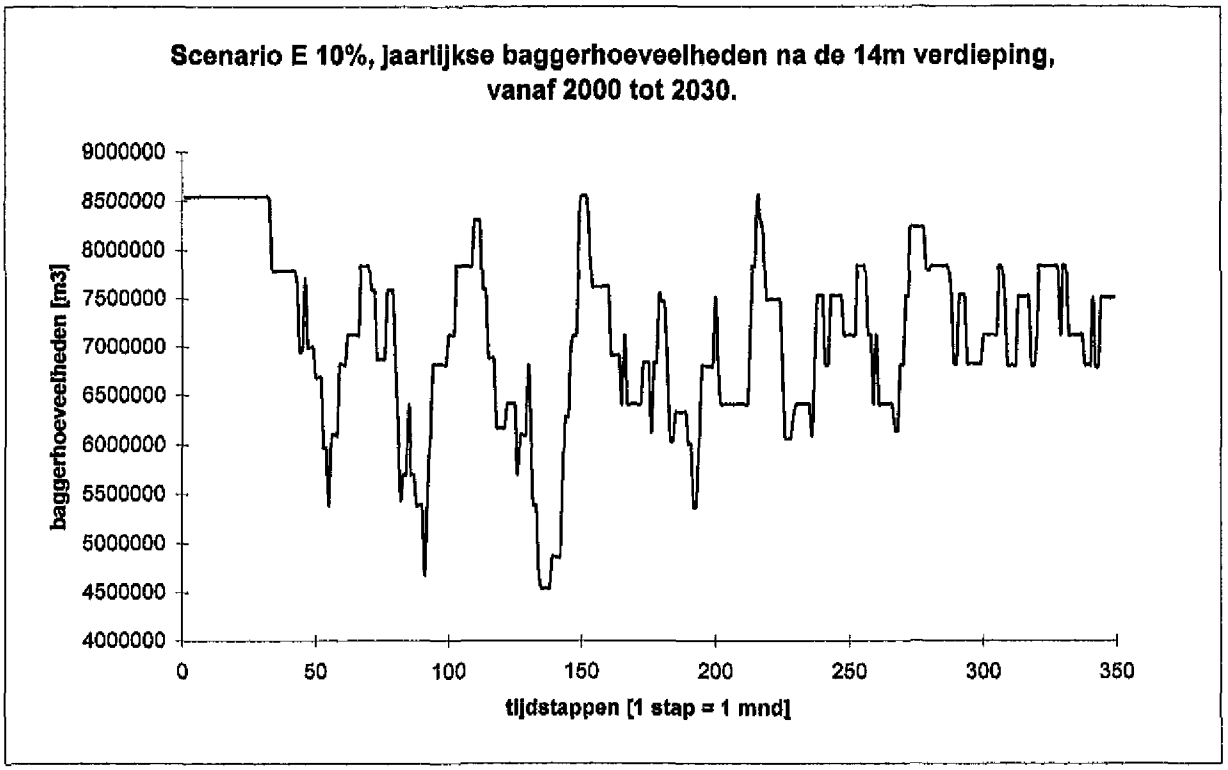
Scenario E: stortcriterium 5%
Jaarlijkse bagger- en storthoeveelheden

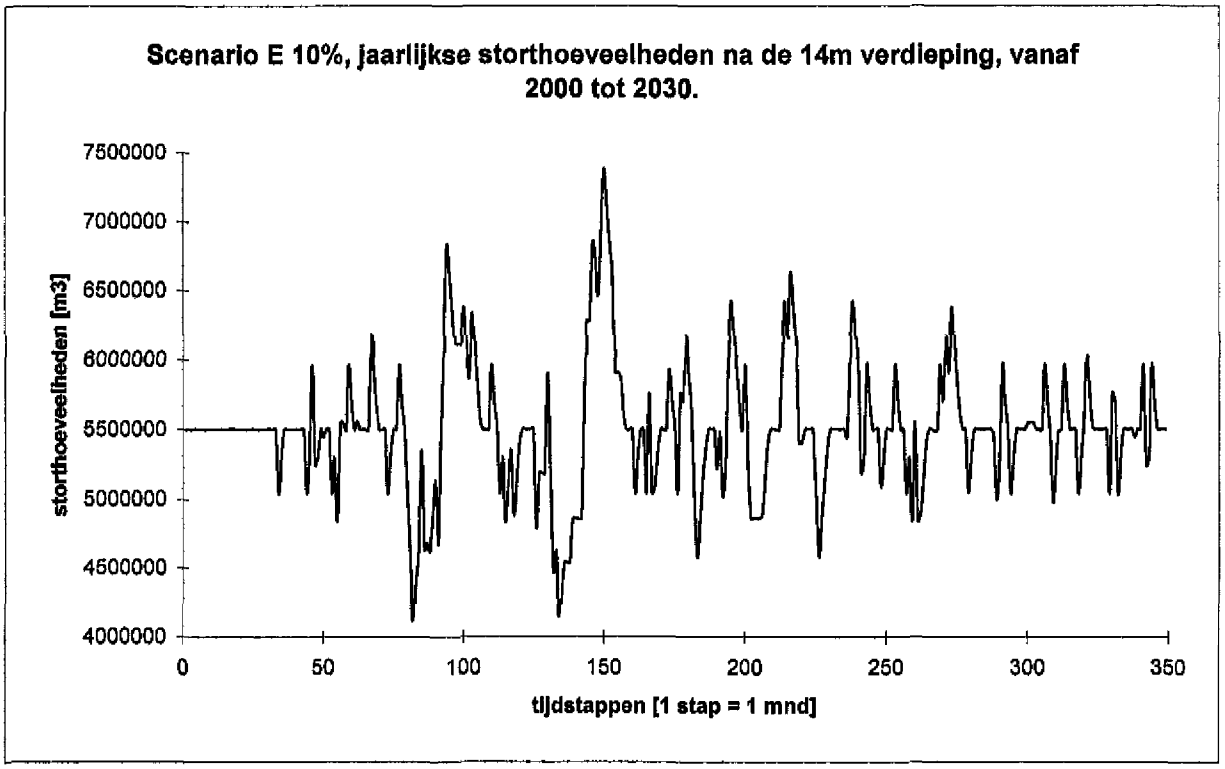
LTV Schelde-estuarium

Z2878

WL | DELFT HYDRAULICS

Fig. G3.7/8





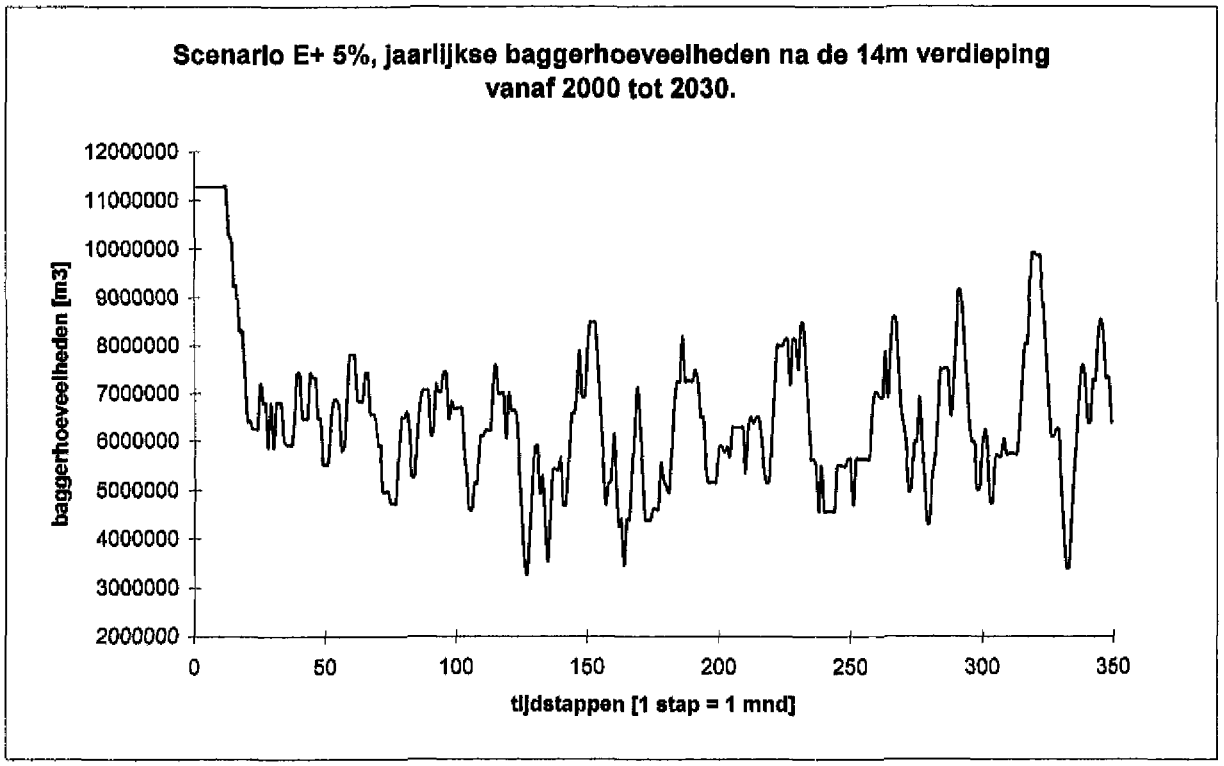
Scenario E: stortcriterium 10%
Jaarlijkse bagger- en storthoeveelheden

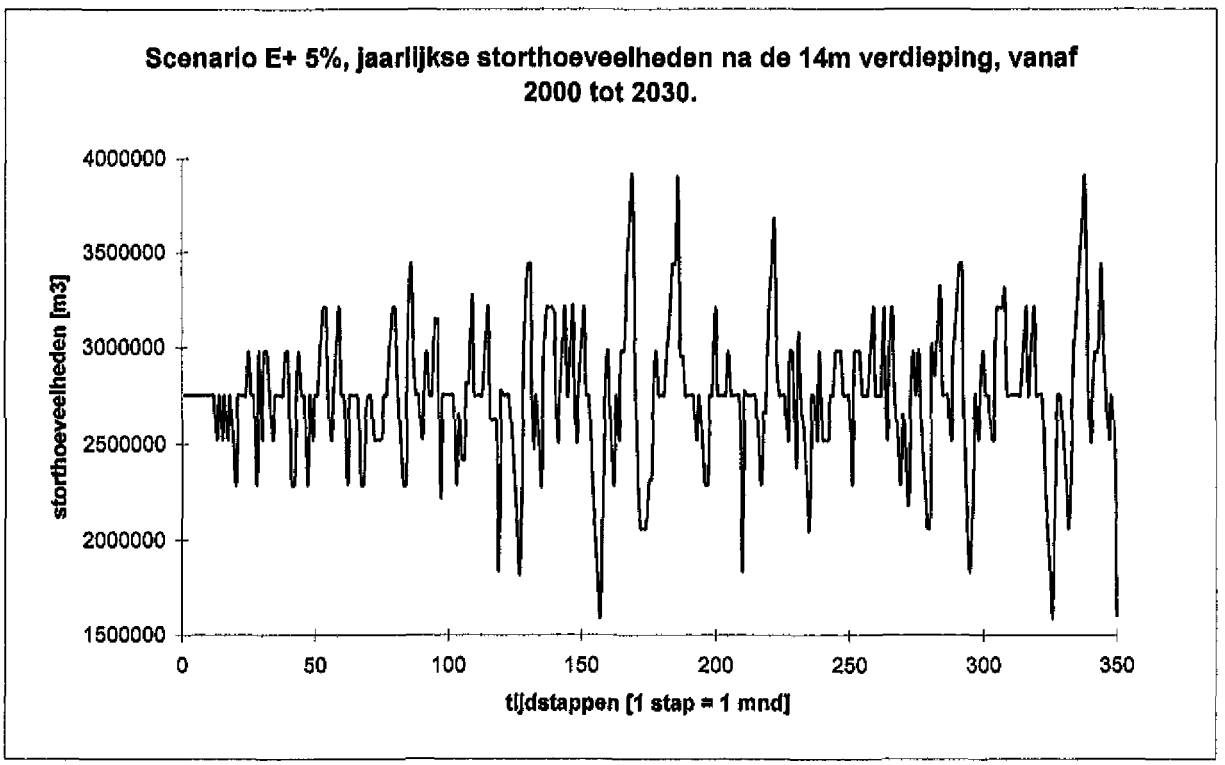
LTV Schelde-estuarium

Z2878

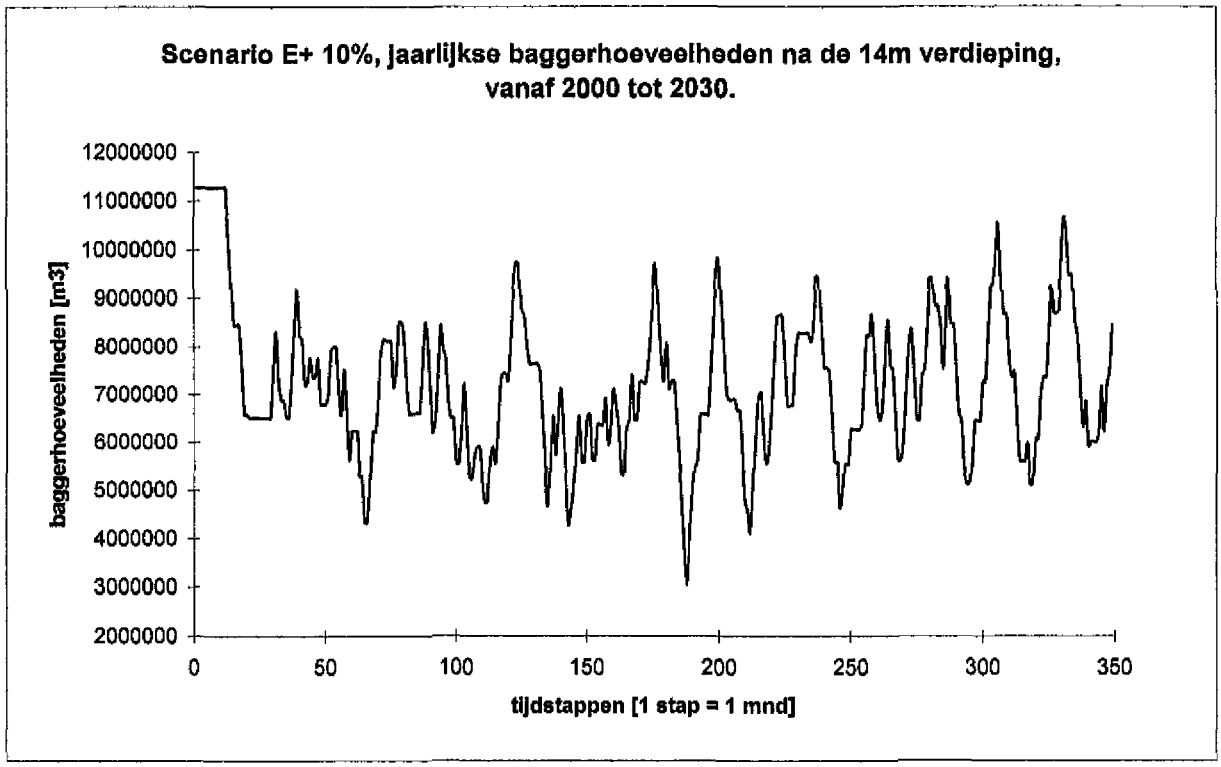
WL | DELFT HYDRAULICS

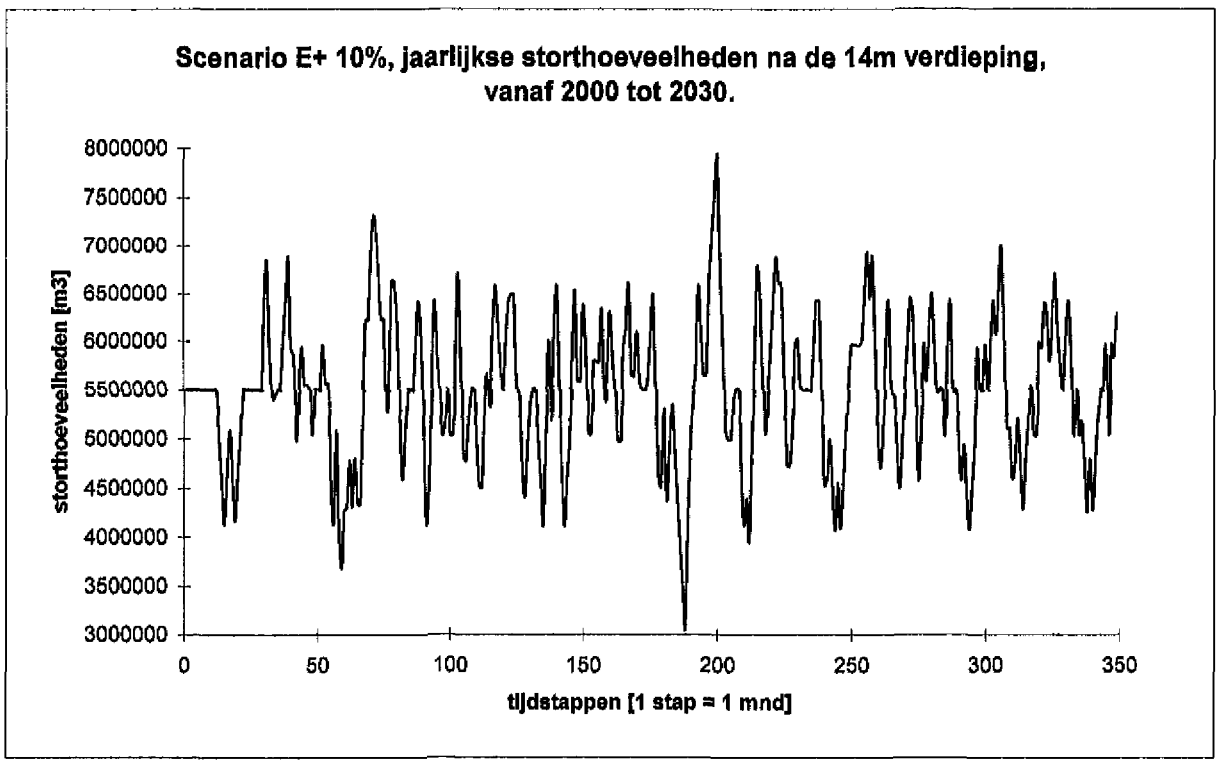
Fig. G3.9/10



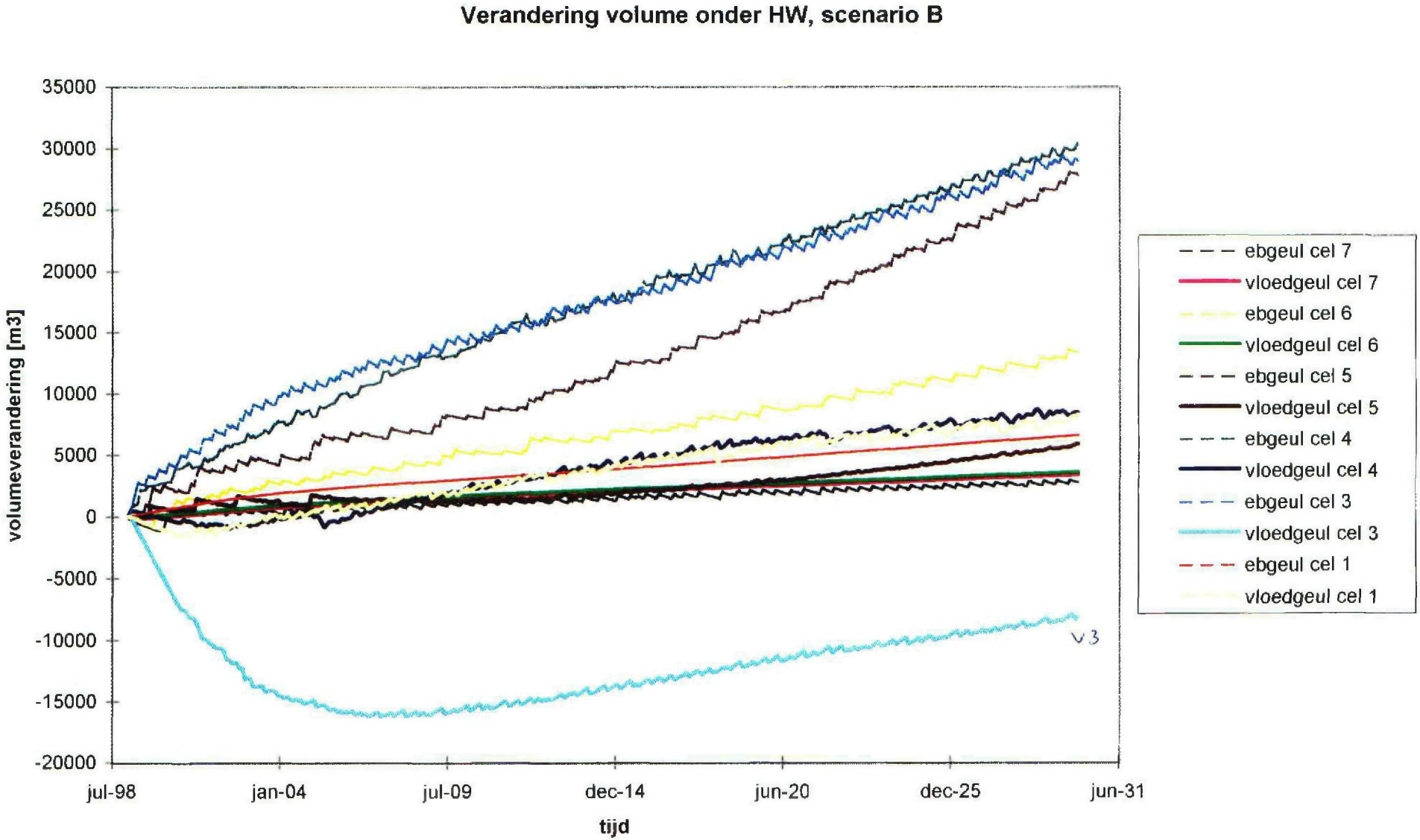


Scenario E+: stortcriterium 5% **Jaarlijkse bagger- en storthoeveelheden**	LTV Schelde-estuarium
	Z2878
WL | DELFT HYDRAULICS	Fig. G3.11/12

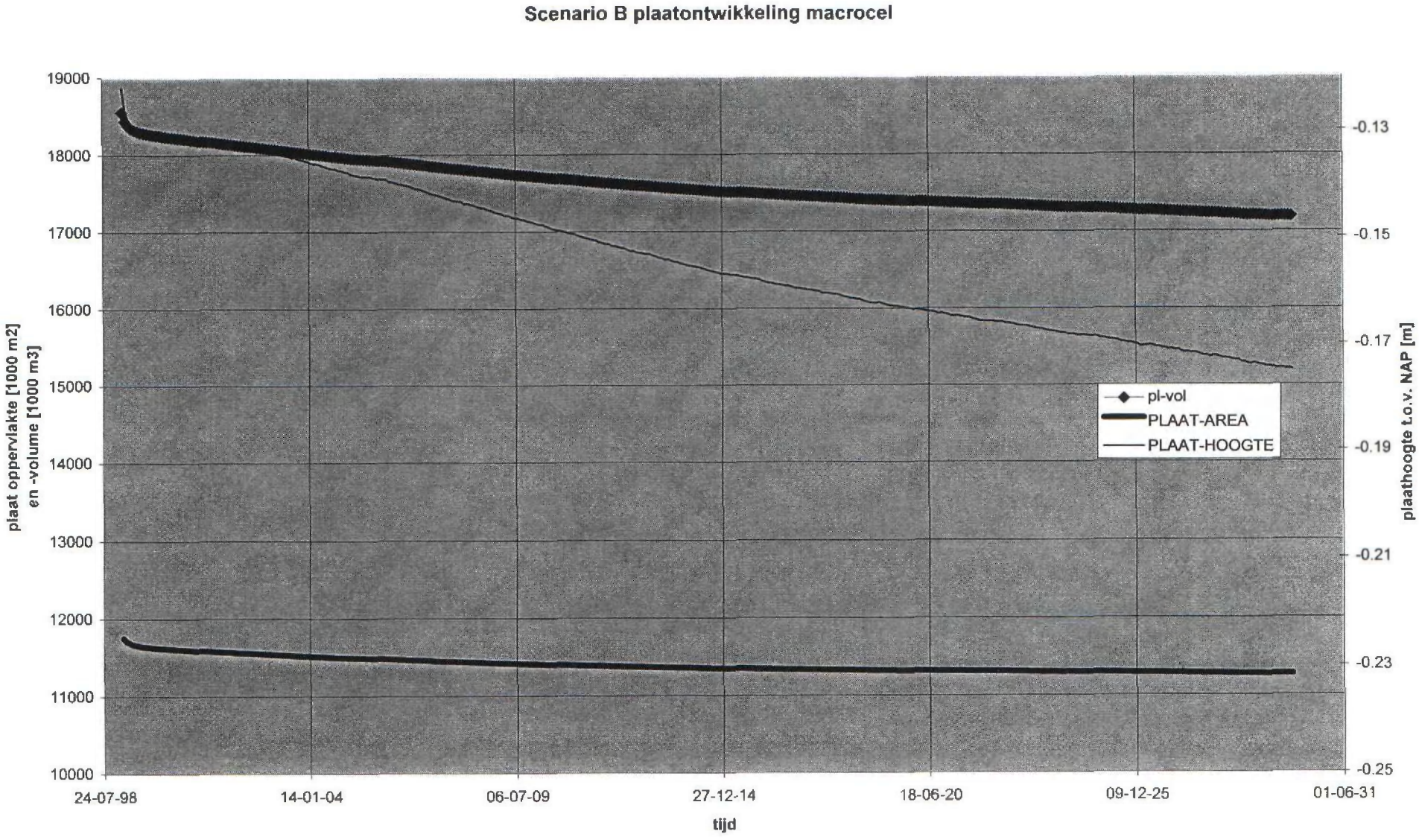




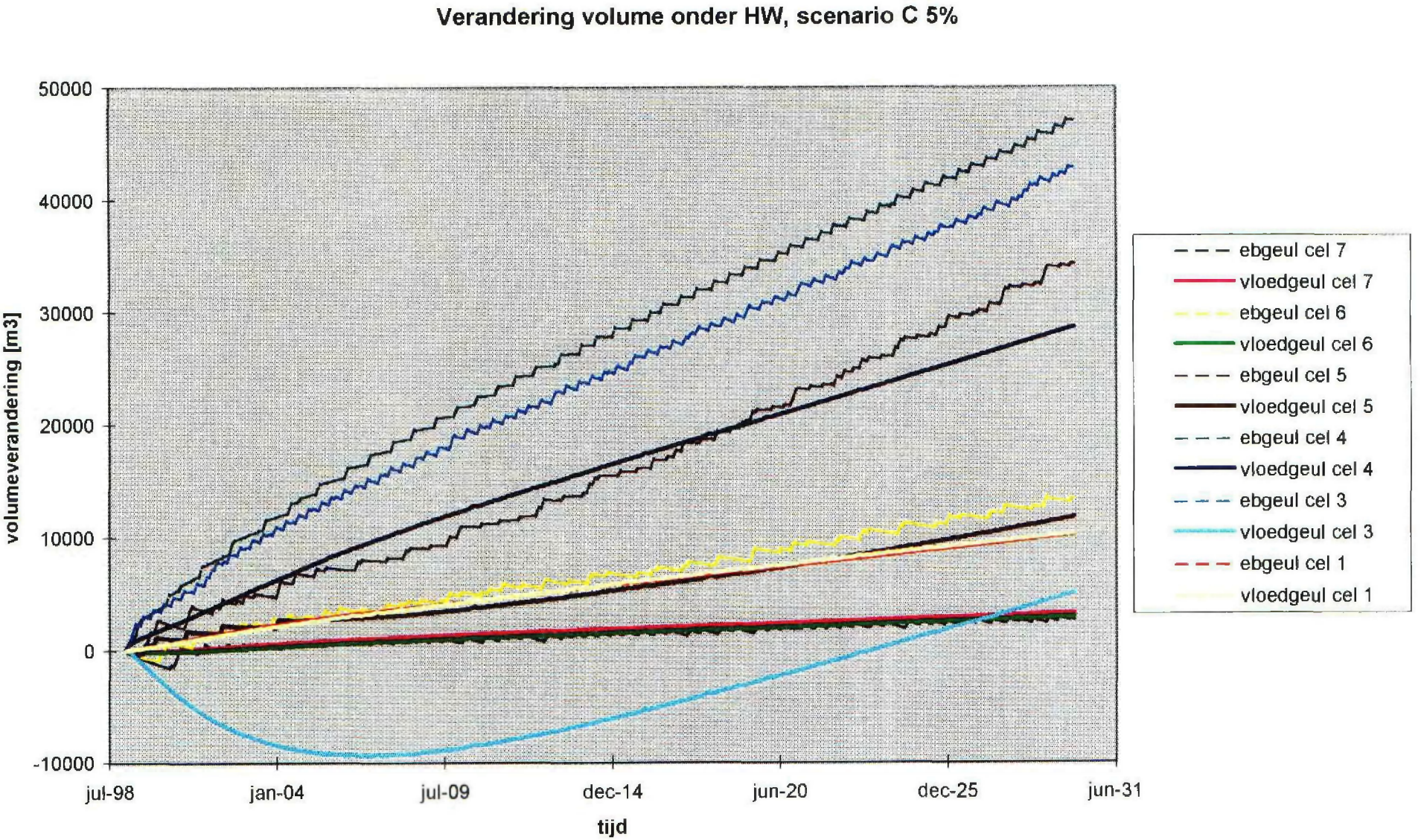
Scenario E+: stortcriterium 10% **Jaarlijkse bagger- en storthoeveelheden**	LTV Schelde-estuarium
	Z2878
WL | DELFT HYDRAULICS	Fig. G3.13/14


Verandering volume onder HW, scenario B
volumeverandering [m3]
35000
30000
25000
20000
15000
10000
5000
0
-5000
-10000
-15000
-20000
jul-98
jan-04
jul-09
dec-14
jun-20
dec-25
jun-31
tijd
ebgeul cel 7
vloedgeul cel 7
ebgeul cel 6
vloedgeul cel 6
ebgeul cel 5
vloedgeul cel 5
ebgeul cel 4
vloedgeul cel 4
ebgeul cel 3
vloedgeul cel 3
ebgeul cel 1
vloedgeul cel 1
V3

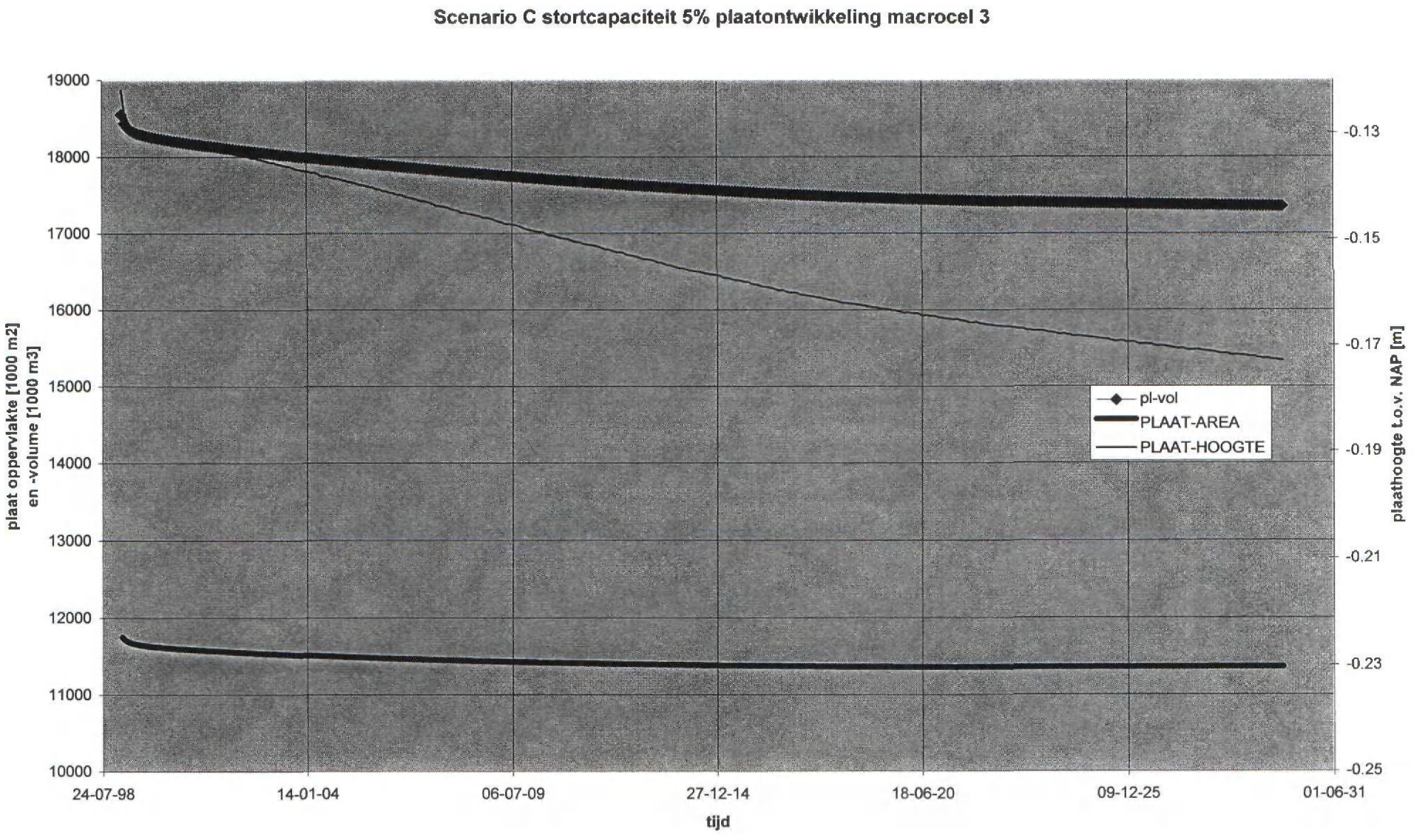
Figuur G3.15


Scenario B plaatontwikkeling macrocel
plaat oppervlakte [1000 m2]
en -volume [1000 m3]
plaathoogte t.o.v. NAP [m]
19000
18000
17000
16000
15000
14000
13000
12000
11000
10000
-0.13
-0.15
-0.17
-0.19
-0.21
-0.23
-0.25
pl-vol
PLAAT-AREA
PLAAT-HOOGTE
24-07-98
14-01-04
06-07-09
27-12-14
18-06-20
09-12-25
01-06-31
tijd

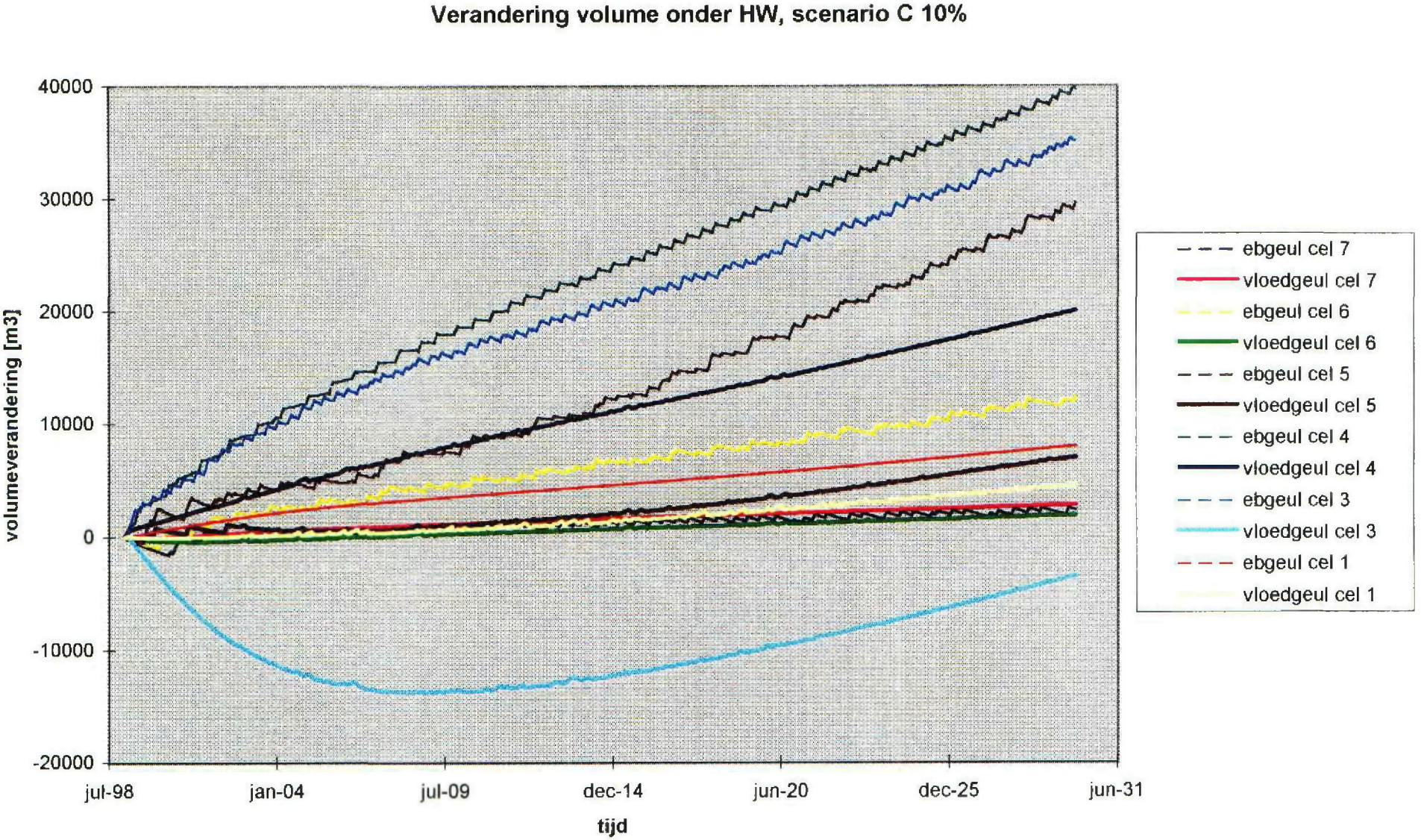
Figuur G3.16


Verandering volume onder HW, scenario C 5%
volumeverandering [m3]
50000
40000
30000
20000
10000
0
-10000
jul-98
jan-04
jul-09
dec-14
jun-20
dec-25
jun-31
tijd
ebgeul cel 7
vloedgeul cel 7
ebgeul cel 6
vloedgeul cel 6
ebgeul cel 5
vloedgeul cel 5
ebgeul cel 4
vloedgeul cel 4
ebgeul cel 3
vloedgeul cel 3
ebgeul cel 1
vloedgeul cel 1

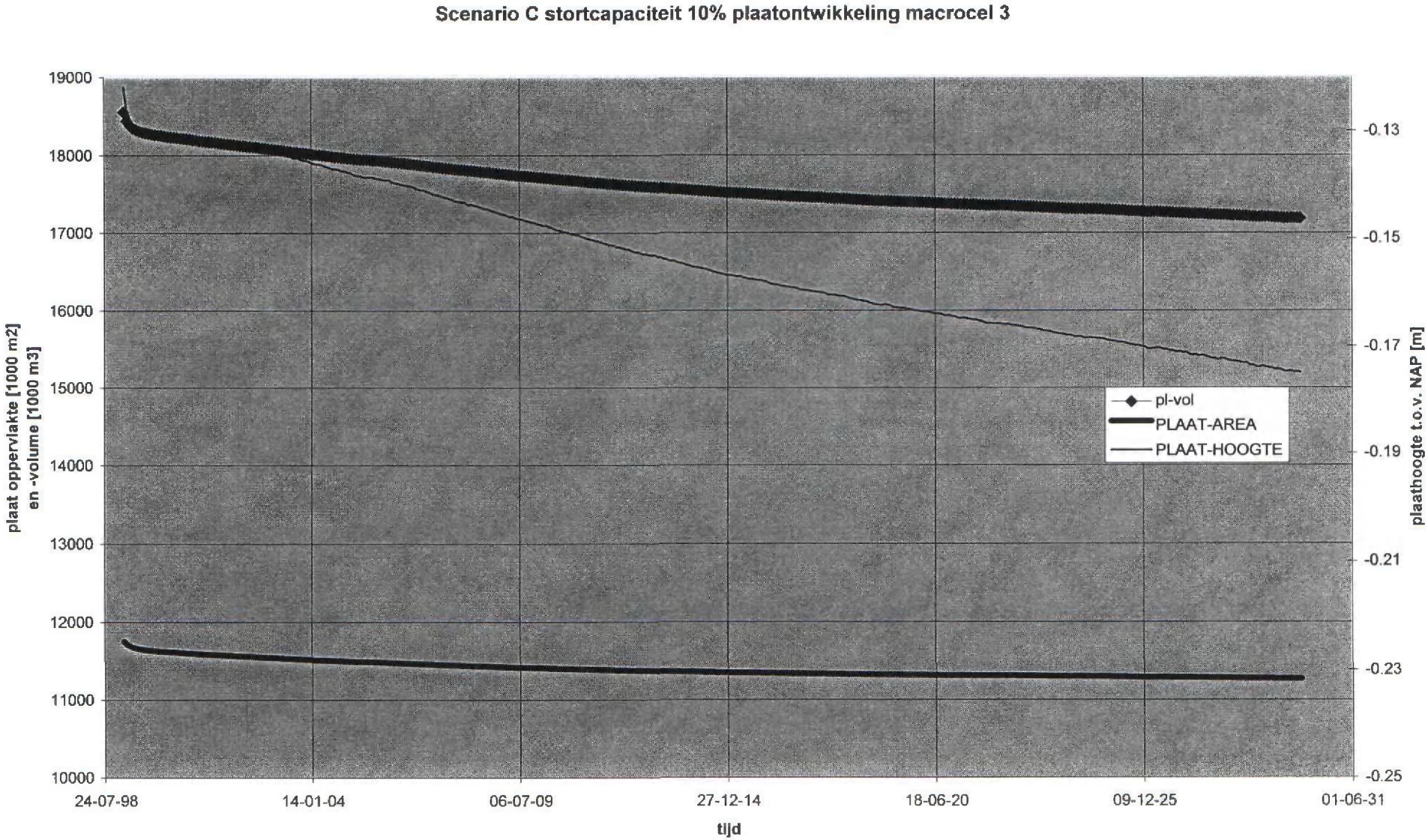
Figuur G3.17


Scenario C stortcapaciteit 5% plaatontwikkeling macrocel 3
plaat oppervlakte [1000 m2]
en -volume [1000 m3]
19000
18000
17000
16000
15000
14000
13000
12000
11000
10000
-0.13
-0.15
-0.17
-0.19
-0.21
-0.23
-0.25
plaathoogte t.o.v. NAP [m]
pl-vol
PLAAT-AREA
PLAAT-HOOGTE
24-07-98
14-01-04
06-07-09
27-12-14
18-06-20
09-12-25
01-06-31
tijd

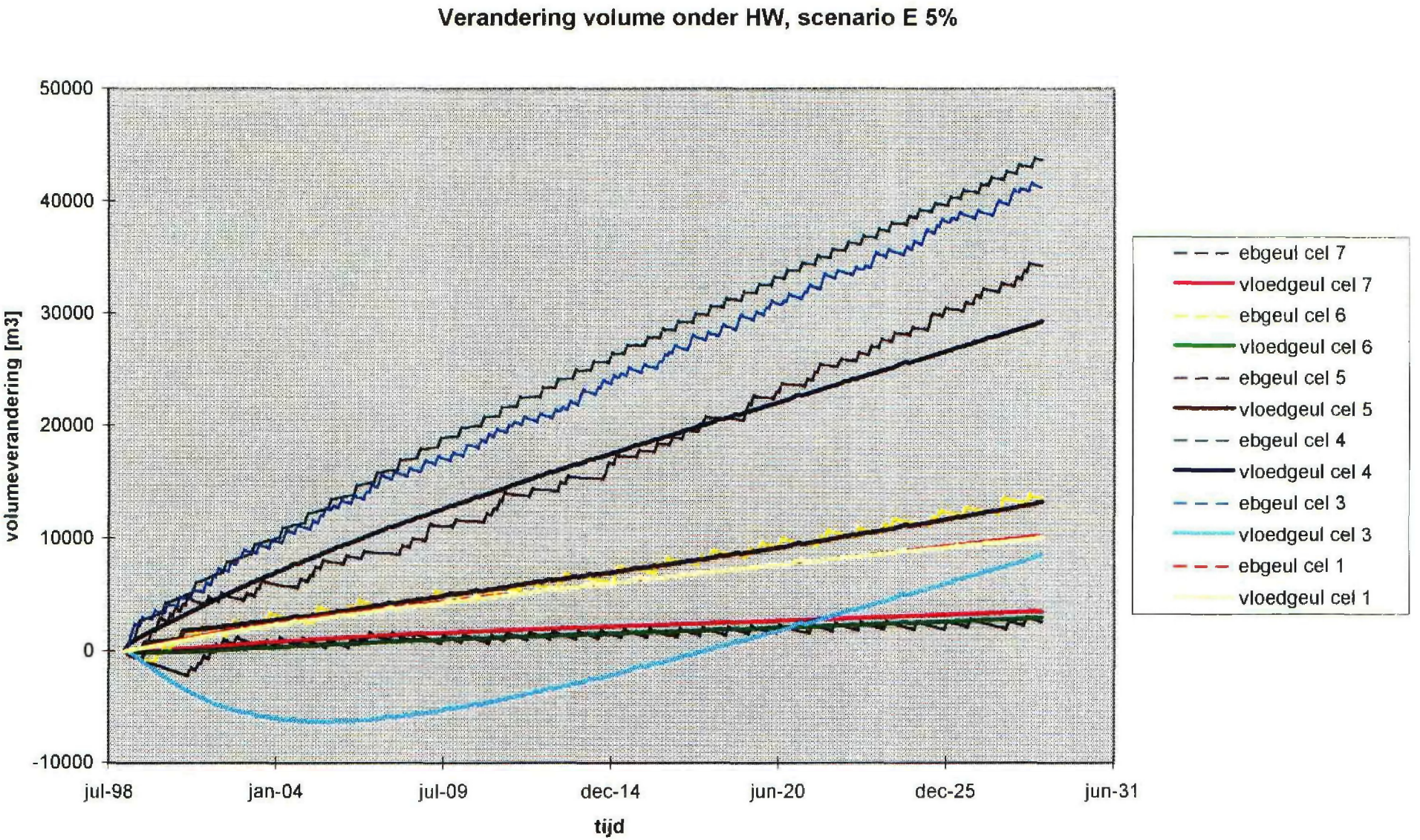
Figuur G3.18


Verandering volume onder HW, scenario C 10%
volumeverandering [m3]
40000
30000
20000
10000
0
-10000
-20000
jul-98
jan-04
jul-09
dec-14
jun-20
dec-25
jun-31
tijd
ebgeul cel 7
vloedgeul cel 7
ebgeul cel 6
vloedgeul cel 6
ebgeul cel 5
vloedgeul cel 5
ebgeul cel 4
vloedgeul cel 4
ebgeul cel 3
vloedgeul cel 3
ebgeul cel 1
vloedgeul cel 1

Figuur G3.19

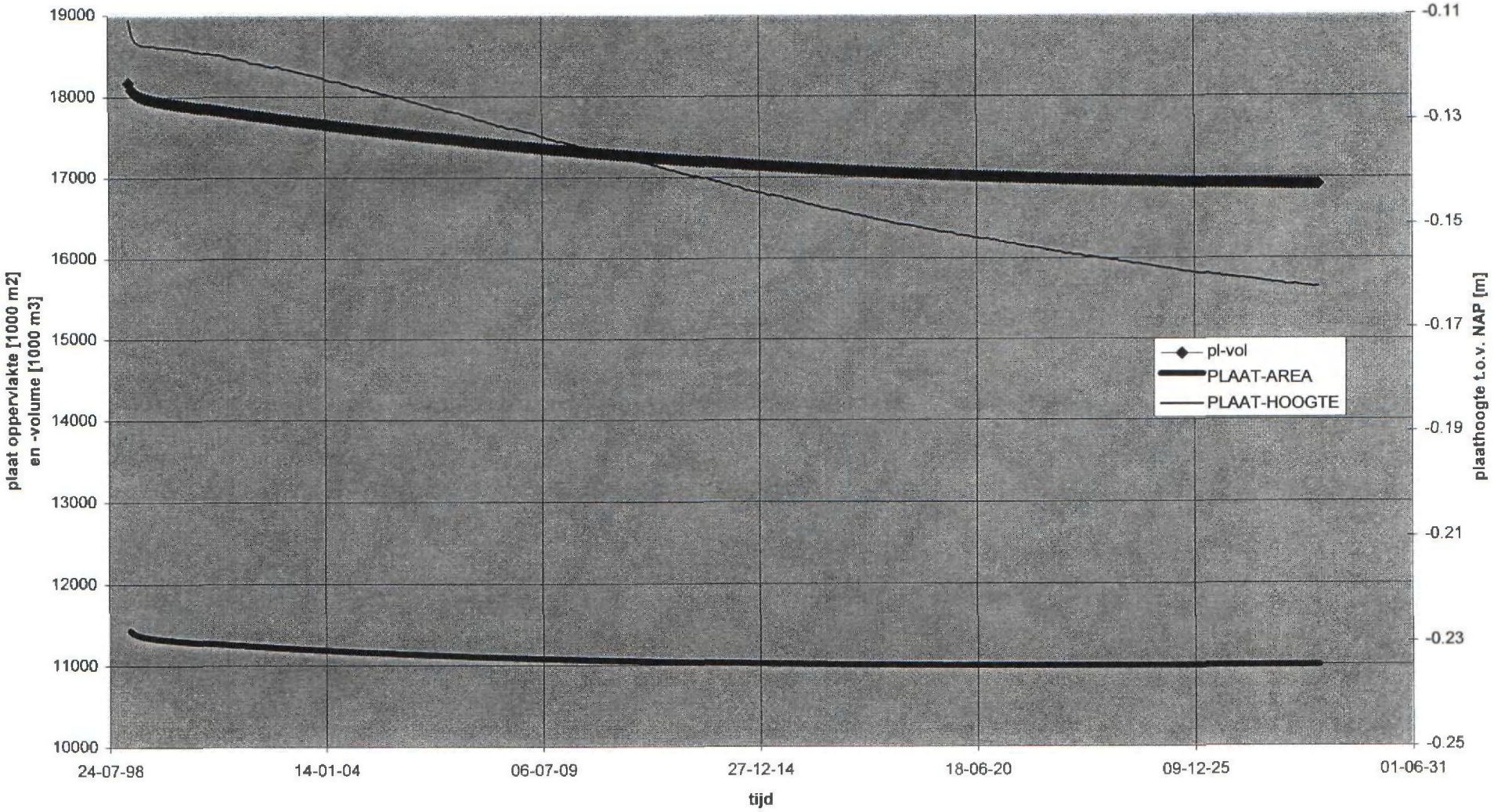

Scenario C stortcapaciteit 10% plaatontwikkeling macrocel 3
plaat oppervlakte [1000 m2]
en -volume [1000 m3]
19000
18000
17000
16000
15000
14000
13000
12000
11000
10000
-0.13
-0.15
-0.17
-0.19
-0.21
-0.23
-0.25
plaathoogte t.o.v. NAP [m]
pl-vol
PLAAT-AREA
PLAAT-HOOGTE
24-07-98
14-01-04
06-07-09
27-12-14
18-06-20
09-12-25
01-06-31
tijd

Figuur G3.20

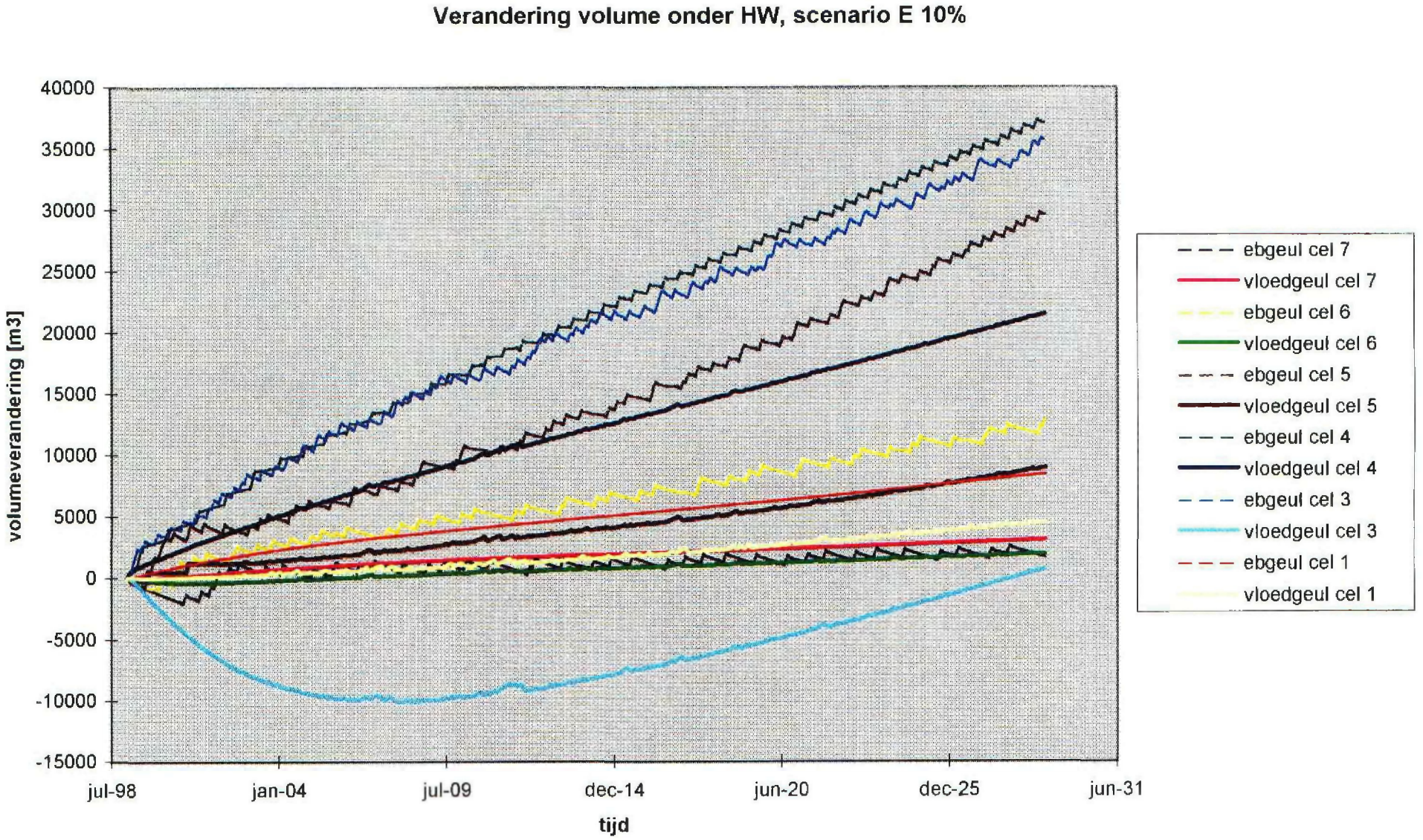

Verandering volume onder HW, scenario E 5%
volumeverandering [m3]
50000
40000
30000
20000
10000
0
-10000
jul-98
jan-04
jul-09
dec-14
jun-20
dec-25
jun-31
tijd
ebgeul cel 7
vloedgeul cel 7
ebgeul cel 6
vloedgeul cel 6
ebgeul cel 5
vloedgeul cel 5
ebgeul cel 4
vloedgeul cel 4
ebgeul cel 3
vloedgeul cel 3
ebgeul cel 1
vloedgeul cel 1

Figuur G3.2 I

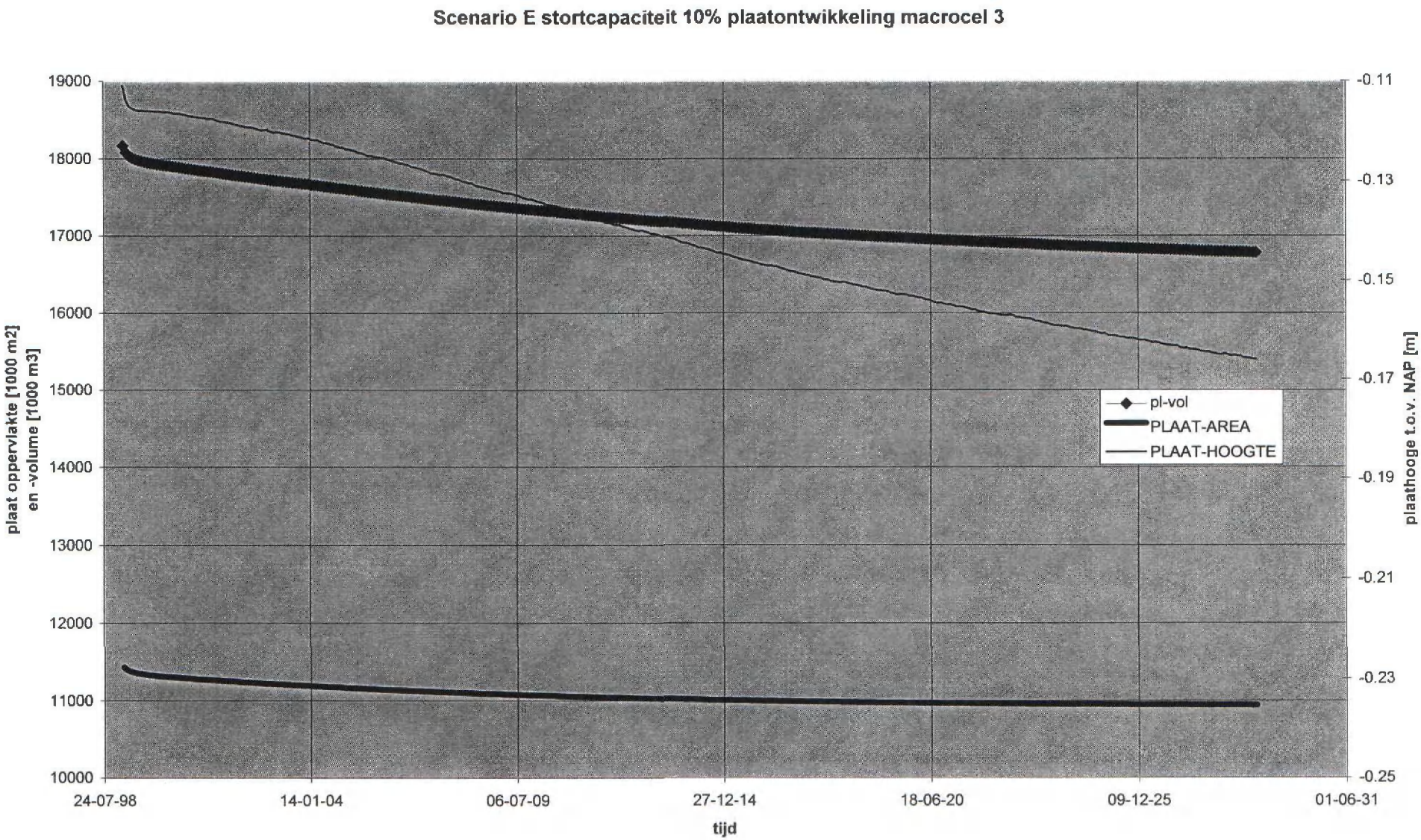
Scenario E stortcapaciteit 5% plaatontwikkeling macrocel 3



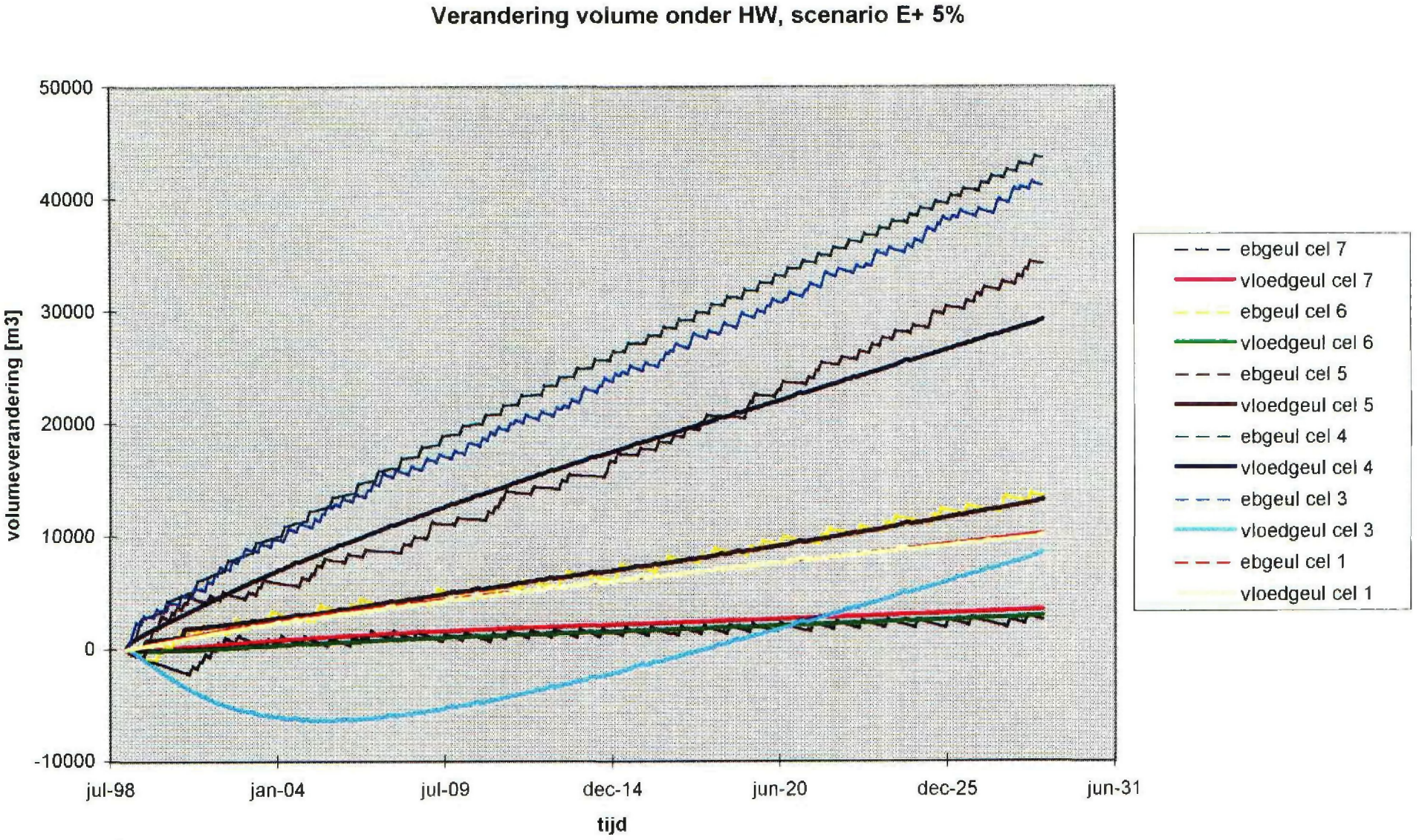
Figuur G3.22


Verandering volume onder HW, scenario E 10%
volumeverandering [m3]
40000
35000
30000
25000
20000
15000
10000
5000
0
-5000
-10000
-15000
jul-98
jan-04
jul-09
dec-14
jun-20
dec-25
jun-31
tijd
ebgeul cel 7
vloedgeul cel 7
ebgeul cel 6
vloedgeul cel 6
ebgeul cel 5
vloedgeul cel 5
ebgeul cel 4
vloedgeul cel 4
ebgeul cel 3
vloedgeul cel 3
ebgeul cel 1
vloedgeul cel 1

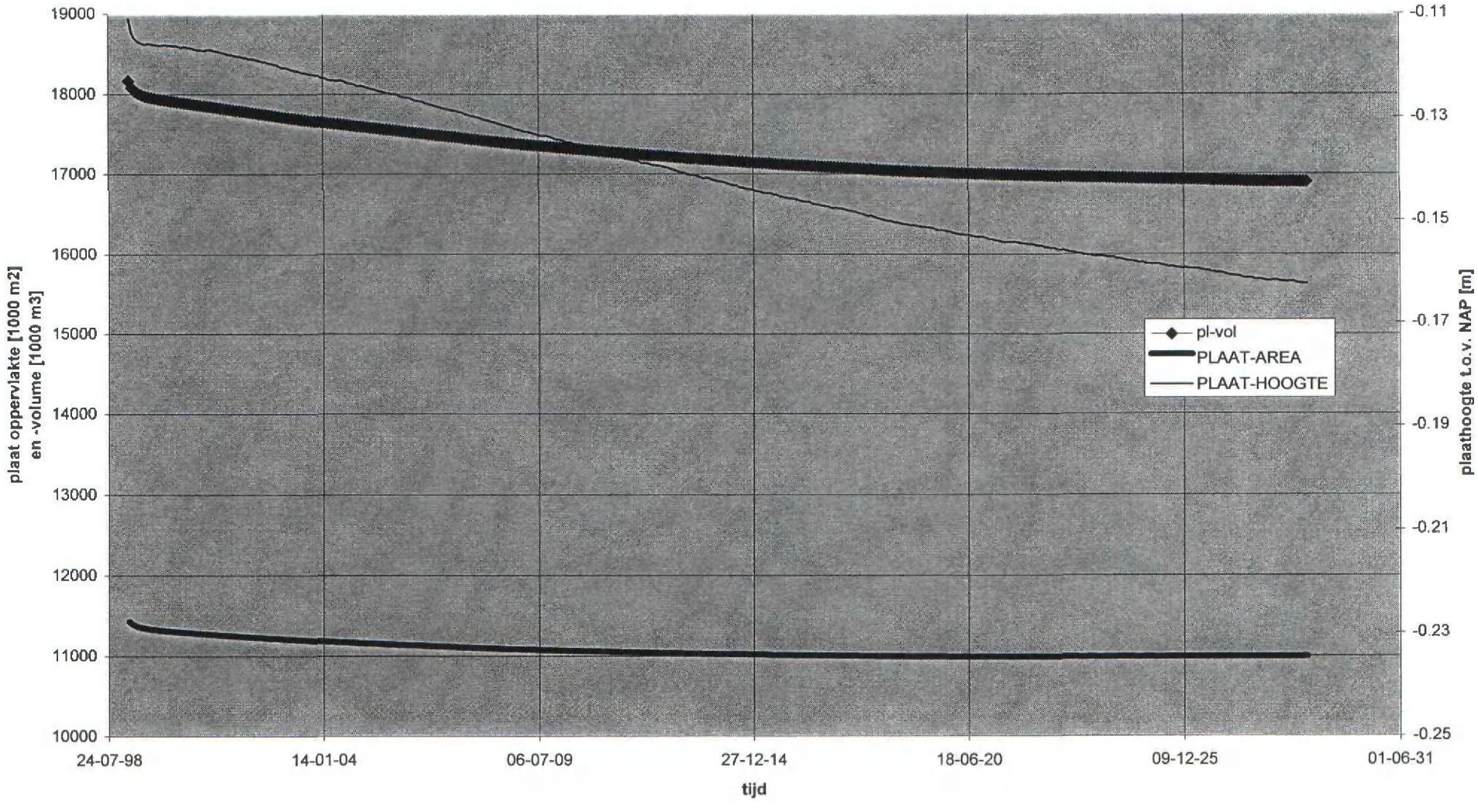
Figuur G3.23


Scenario E stortcapaciteit 10% plaatontwikkeling macrocel 3
plaat oppervlakte [1000 m2] en -volume [1000 m3]
plaathooge t.o.v. NAP [m]
tijd
pl-vol
PLAAT-AREA
PLAAT-HOOGTE
19000
18000
17000
16000
15000
14000
13000
12000
11000
10000
-0.11
-0.13
-0.15
-0.17
-0.19
-0.21
-0.23
-0.25
24-07-98
14-01-04
06-07-09
27-12-14
18-06-20
09-12-25
01-06-31

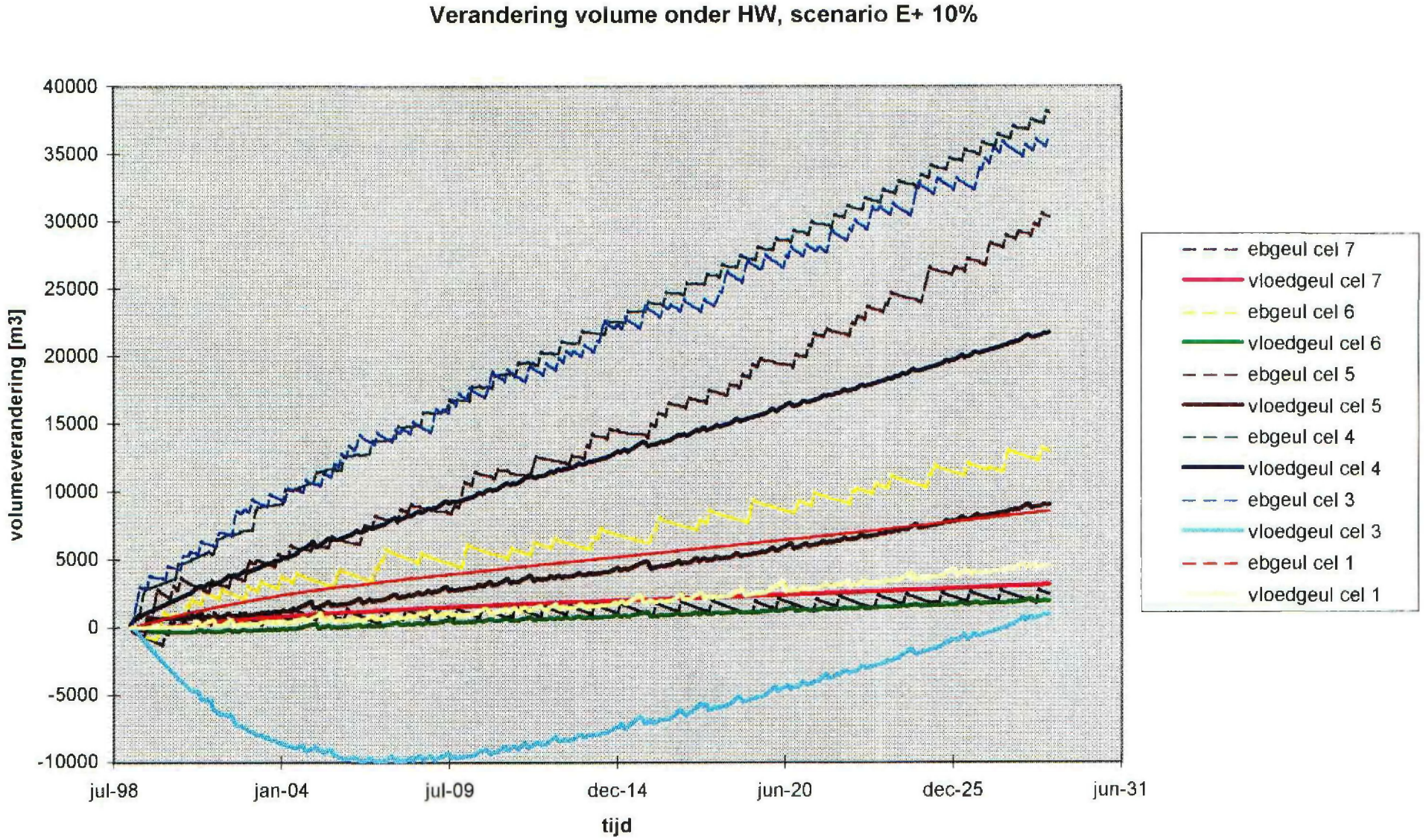
Figuur G3.24


Verandering volume onder HW, scenario E+ 5%
volumeverandering [m3]
50000
40000
30000
20000
10000
0
-10000
jul-98
jan-04
jul-09
dec-14
jun-20
dec-25
jun-31
tijd
ebgeul cel 7
vloedgeul cel 7
ebgeul cel 6
vloedgeul cel 6
ebgeul cel 5
vloedgeul cel 5
ebgeul cel 4
vloedgeul cel 4
ebgeul cel 3
vloedgeul cel 3
ebgeul cel 1
vloedgeul cel 1

Figuur G3.25

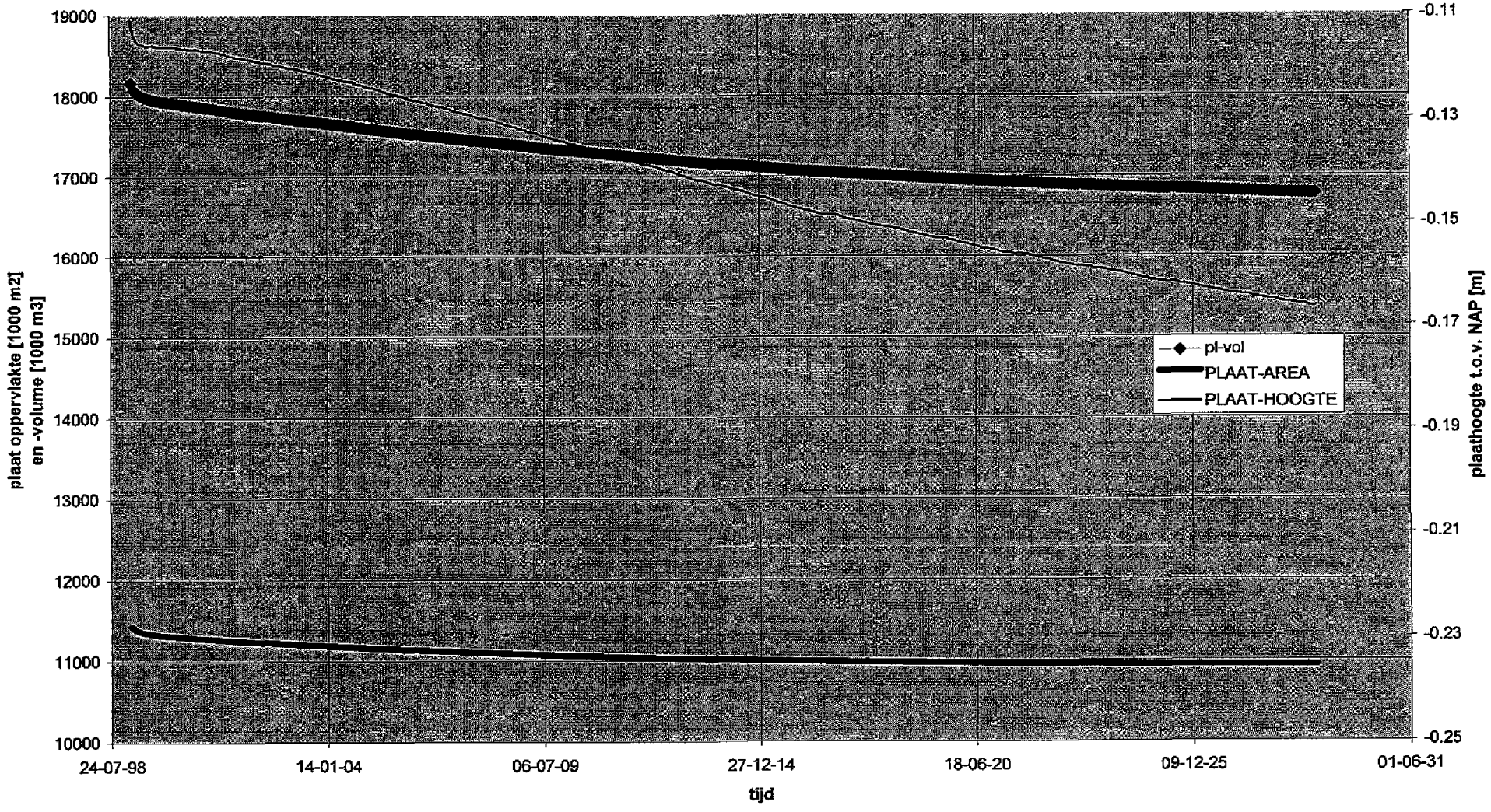

Scenario E+ stortcapaciteit 5% plaatontwikkeling macrocel 3
plaat oppervlakte [1000 m2]
en -volume [1000 m3]
19000
18000
17000
16000
15000
14000
13000
12000
11000
10000
-0.11
-0.13
-0.15
-0.17
-0.19
-0.21
-0.23
-0.25
plaathoogte t.o.v. NAP [m]
pl-vol
PLAAT-AREA
PLAAT-HOOGTE
24-07-98
14-01-04
06-07-09
27-12-14
18-06-20
09-12-25
01-06-31
tijd

Figuur G3.26


Verandering volume onder HW, scenario E+ 10%
volumeverandering [m3]
40000
35000
30000
25000
20000
15000
10000
5000
0
-5000
-10000
jul-98
jan-04
jul-09
dec-14
jun-20
dec-25
jun-31
tijd
ebgeul cel 7
vloedgeul cel 7
ebgeul cel 6
vloedgeul cel 6
ebgeul cel 5
vloedgeul cel 5
ebgeul cel 4
vloedgeul cel 4
ebgeul cel 3
vloedgeul cel 3
ebgeul cel 1
vloedgeul cel 1

Figuur G3.2

Scenario E+ stortcapaciteit 10% plaatontwikkeling macrocel 3



Figuur G3.28

Appendix H
Extreme waterstanden

Kees v.d. Male (RWS-RIKZ)

Z2878

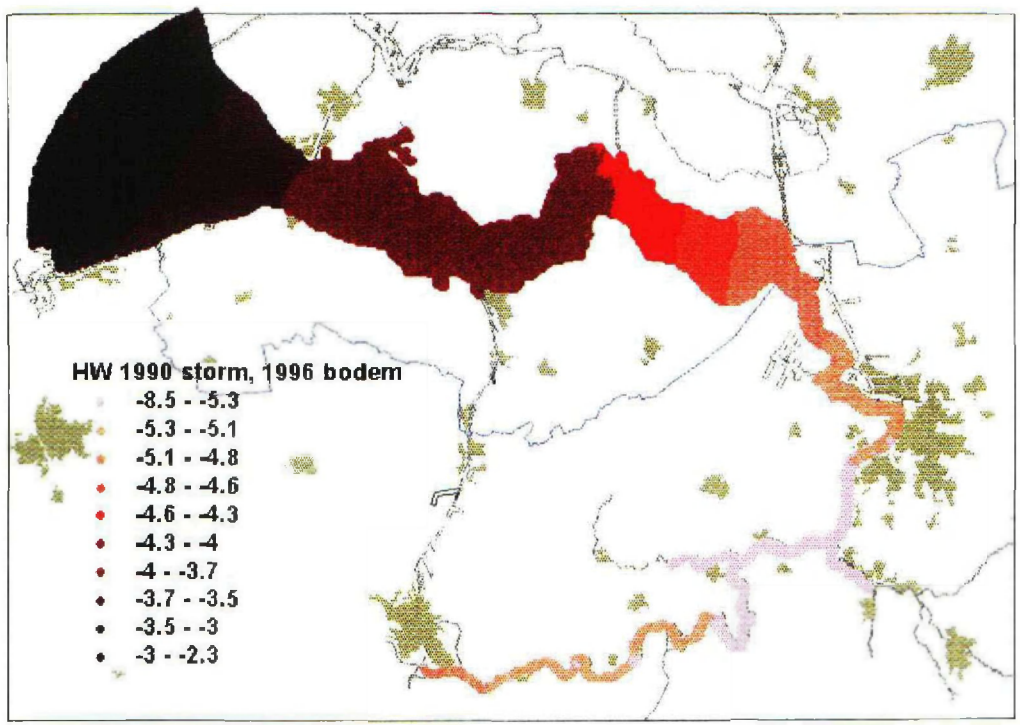
H Extreme waterstanden

Met het volledige SCALWEST model zijn voor vier beheersscenario's simulaties gedaan. De bovenstroomse rand loopt hierbij tot voorbij Rupelmonde, waar de getij-invloed niet merkbaar meer is. Als getijrandvoorwaarde op de zeerand is de zgn. crocusstorm van februari 1990 gebruikt. Tevens is een willekeurige rivierafvoer is opgedrukt; de invloed van de afvoer op het hoogwater in het Nederlands deel van het Schelde-estuarium is gering.

De resultaten van de simulaties zijn weergegeven in de Figuren H1 t/m H4 in de vorm van contourplots voor het gehele gebied en in Figuur H5 als waterstandsverloop nabij Antwerpen.

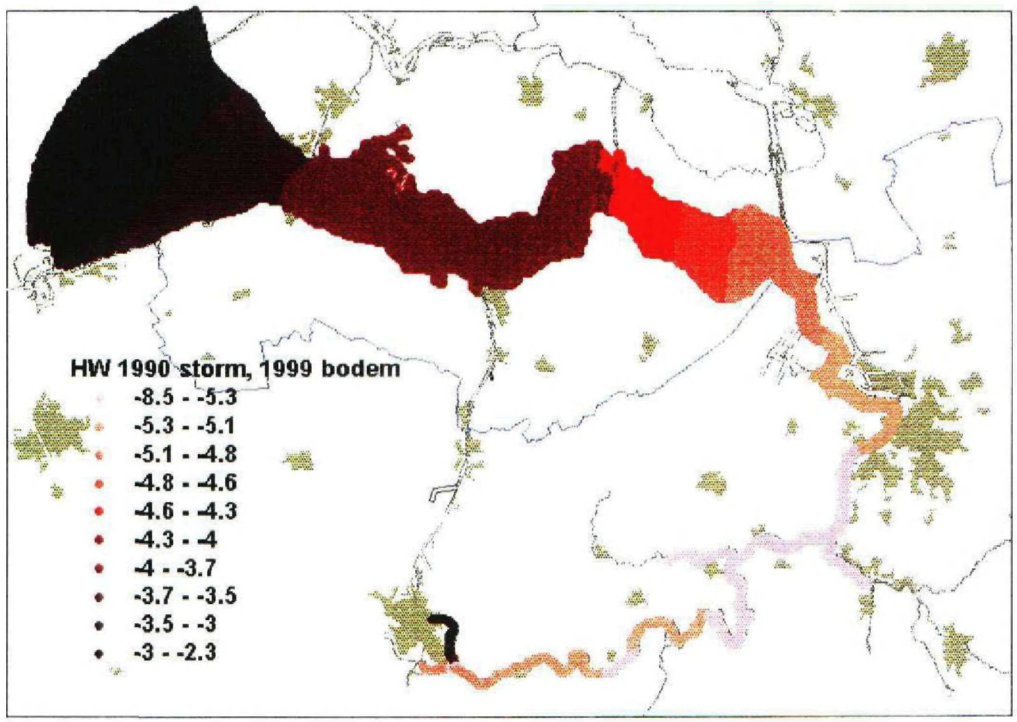
Uit de simulatieresultaten kan worden geconcludeerd dat voor de scenario's A (referentie = 1996), B (huidige situatie = 1999) en E (14 m verdieping) de berekende hoogwaters nagenoeg niet verschillen. Scenario D (huidige situatie + ontpolderen) verschilt significant van de overige drie beheersscenario's; oostelijk van Hansweert reduceren de hoogwaters orde decimeters. In het bovenstroomse (Belgische) deel is deze reductie nog groter. De waterstandsverlopen in Figuur H5 laten zien dat het hoogwater nabij Antwerpen met ongeveer 1 m verlaagt.

Figuur H1: Hoogwater tijdens 1990 storm - beheersscenario A

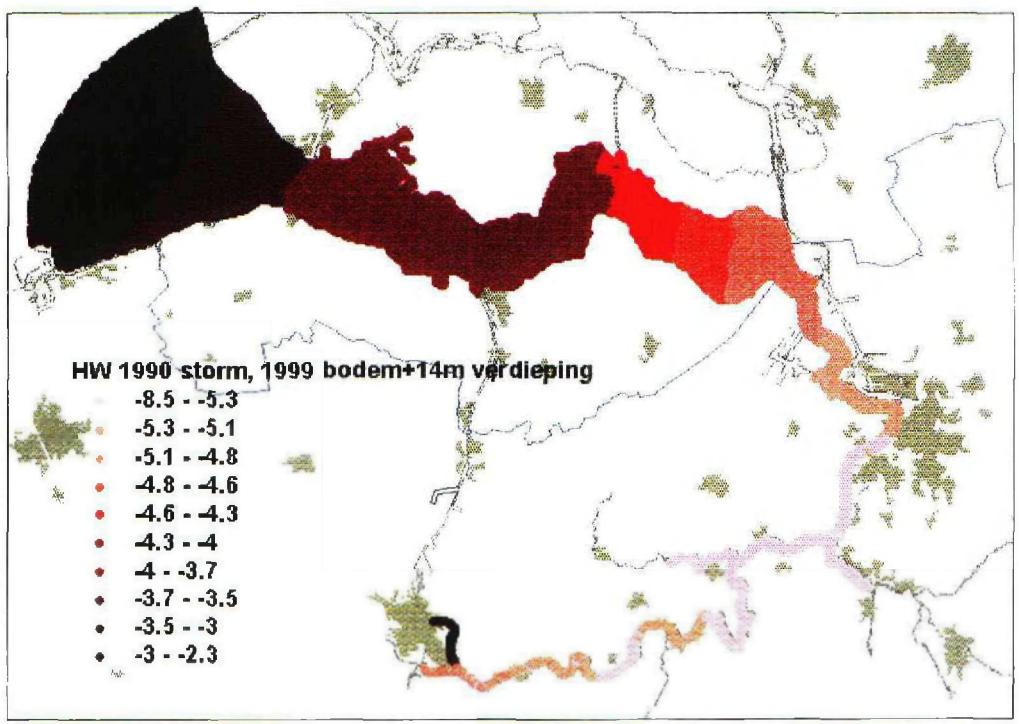


(referentie)

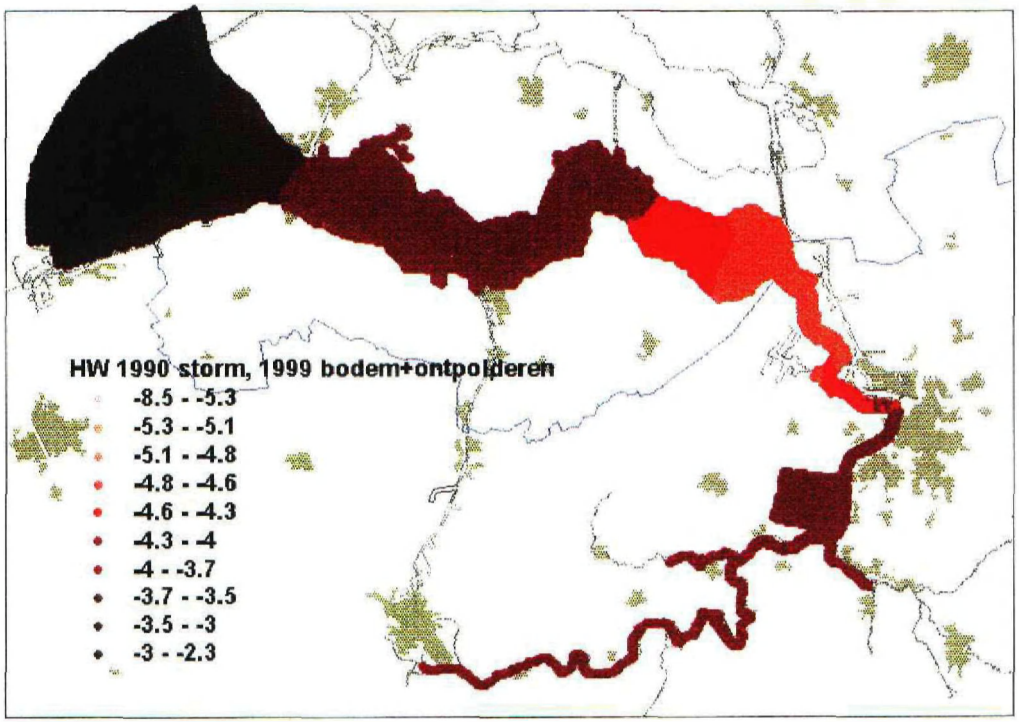
Figuur H2: Hoogwater tijdens 1990 storm - beheersscenario B (huidige situatie)



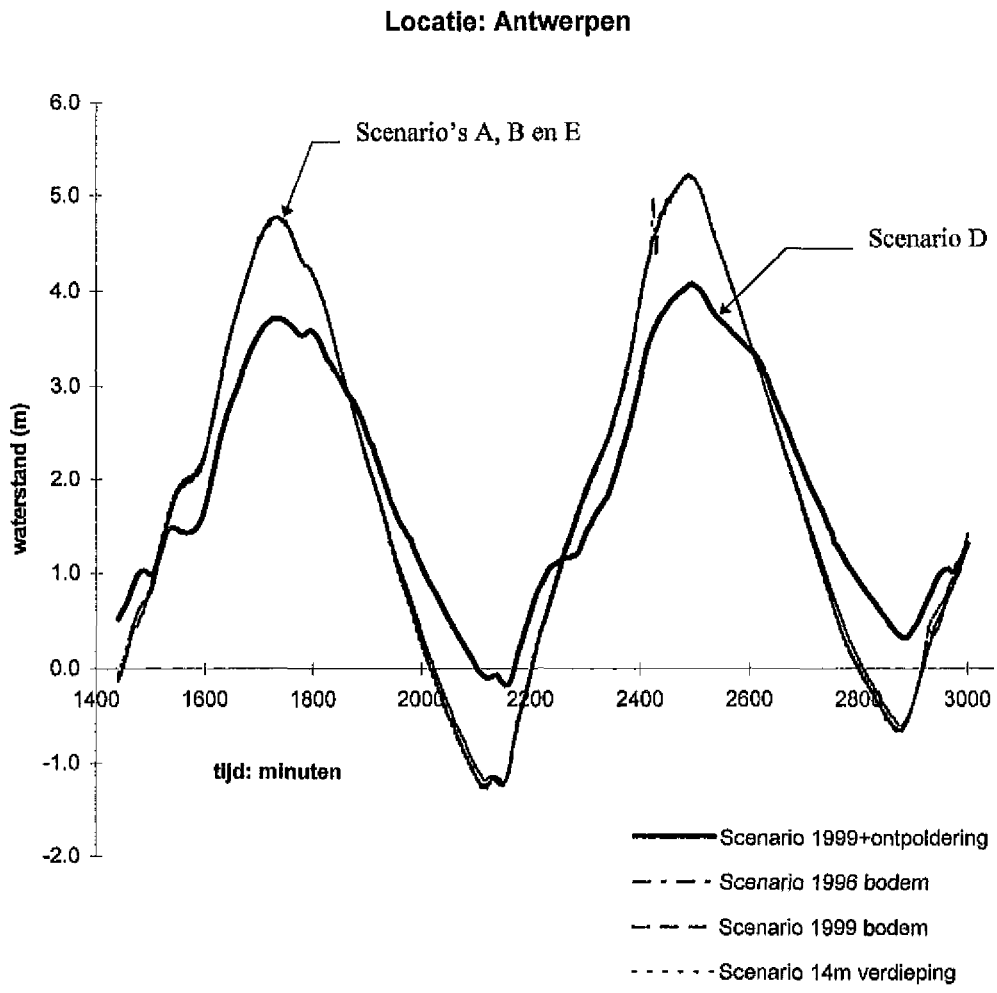
Figuur H3: Hoogwater tijdens 1990 storm - beheersscenario E (14 m verdieping)



Figuur H4: Hoogwater tijdens 1990 storm - beheersscenario D (1999 + ontpolderen)



Figuur H5: Waterstandsverloop nabij Antwerpen tijdens 1990 storm



Appendix I
ASMITA-simulaties

Kees Kuijper

Z2878

I ASMITA-simulaties 1

I.1 Inleiding 1

I.2 Uitgevoerde ASMITA simulaties 2

I.2.1 Opzet en calibratie van ASMITA 2

I.2.2 Resultaten en conclusies eerder onderzoek 2

I.3 Samenvatting en conclusies 6

I ASMITA-simulaties

I.1 Inleiding

De morfologische veranderingen in de Westerschelde kunnen niet los worden gezien van het functioneren van de Voordelta (Vlakte van de Raan). Vragen die hiermee verband houden zijn:

1. onder welke omstandigheden wordt sediment gebufferd en weer vrijgegeven;
2. wat is de transportcapaciteit van de geulen tussen de kust en het estuarium en,
3. welke zijn de tijdschalen waarop veranderingen zich voltrekken?

Binnen het onderzoekskader KUST2000 zijn met ASMITA simulaties voor de Westerschelde en het mondingsgebied uitgevoerd (Wang, 1997a). In (Wang, 1997b) zijn aanvullende ASMITA simulaties uitgevoerd voor vijf stort-alternatieven met bijbehorend baggerwerk.

I.2 Uitgevoerde ASMITA simulaties

I.2.1 Opzet en calibratie van ASMITA

Het ASMITA-model voor het Schelde-estuarium bestaat uit 6 vakken voor de Westerschelde (tussen Vlissingen en de Nederlandse-Belgische grens) en 26 vakken voor het mondingsgebied. Het mondingsgebied is hierbij gelegen westelijk van de raai Vlissingen-Breskens, langs de kust van Walcheren tot Westkapelle en langs de kust van Zeeuws-Vlaanderen en Vlaanderen tot voorbij Zeebrugge (Blankenberge). De vakkenindeling volgt die van eerdere studies of is gebaseerd op lodingskaarten en is niet gebaseerd op een indeling in morfologische eenheden. Dit introduceert onzekerheden m.b.t. het morfologisch evenwicht.

Drie van de vier fysische parameters in het model zijn ontleend aan eerdere ESTMORF simulaties: (i) de overall evenwichtsconcentratie, (ii) de uitwisselingssnelheid tussen de waterkolom en de bodem en (iii) de macht in de vergelijking voor de lokale evenwichtsconcentratie. De uitwisselingscoëfficiënten tussen de vakken zijn geschat op basis van de gemiddelde getijstroomsnelheid, de getijweglengte, de oppervlakte van het dwarsprofiel en de onderlinge afstand tussen de middens van twee naburige vakken. De overall evenwichtsconcentratie is voorgeschreven als randvoorwaarde op de zeerand. In het model is geen rekening gehouden met een reststroming. Voor de evenwichtsrelaties wordt verondersteld dat een relatieve verandering in de getijslag leidt tot een even grote relatieve verandering in het evenwichtsvolume. Voor de plaathoogte wordt aangehouden dat een verandering hierin 0,7 maal een verandering van de getijslag bedraagt. Bij een toename van de getijslag neemt het plaatvolume toe en het evenwichtsvolume van het vak dus af.

Het model is gecalibreerd aan de hand van data voor de periode 1955-1994 in het binnengebied en met lodingsgegevens voor de jaren 69/70 en 93/94 in het buitengebied. Voor de vakken 28 t/m 32 waren deze niet compleet, zodat hiervoor geen betrouwbare gegevens over de morfologische veranderingen voorhanden zijn.

I.2.2 Resultaten en conclusies eerder onderzoek

In (Wang, 1997a) is een aantal scenario's met ASMITA gesimuleerd, waarbij gevarieerd zijn:

- de zeespiegelstijging: 0,2 en 0,6 m/eeuw;
- de getijslag: 0 en 4% toename;
- de bagger- en stortvolumina in het binnengebied.

De resultaten van deze simulaties worden gebruikt voor het project "LTV-Schelde estuarium". Een beknopte samenvatting van de simulaties wordt hieronder gegeven in Tabel I2.1.

	Scenario [1])	Periode	zeespiegel-stijging [m/eeuw]	getijslag-toename [%/eeuw]	Netto baggeren en zand-winning (-) en storten (+) [10^6 m^3/jaar]		
					west	midden	oost
0	calibratieperiode	1970-1994	0	0	-1,1	-0,1	-1,8
1	voortzetting 'huidige' situatie (= 1997)	1997-2100	0,20	4	-0,5	+0,5	-2,3
2	sc. 1 met extra zee-spiegelstijging	1997-2100	0,60	4	-0,5	+0,5	-2,3
3	sc. 1 zonder getijslag-toename	1997-2100	0,20	0	-0,5	+0,5	-2,3
4	verdieping; zandwinning	1997-2000	0,20	4	+6,6	+2,4	-11,6
	onderhoud; zandwinning	2000-2100	0,20	4	+7,6	+1,7	-11,9
5	verdieping; zandwinning	1997-2000	0,20	4	+6,6	+2,4	-11,6
	geen onderhoud; zandwinning	2000-2100	0,20	4	0	0	-2,6
6	verdieping; geen zandwinning	1997-2000	0,20	4	+6,6	+2,4	-9,0
	onderhoud; geen zandwinning	2000-2100	0,20	4	+7,6	+1,7	-9,3
7	verdieping; geen zandwinning	1997-2000	0,20	4	+6,6	+2,4	-9,0
	onderhoudszand ont-trokken aan systeem	2000-2100	0,20	4	-1,4	-2,3	-10,3
8	zandwinning door minder te storten in het westen	1997-2000	0,20	4	+4,0	+2,4	-9,0
		2000-2100	0,20	4	+5,0	+1,7	-9,3

Tabel I2.1 Scenario's voor uitgevoerde ASMITA simulaties in (Wang, 1997a)

[1]) De verdieping heeft betrekking op de verruiming van de vaargeul tot 48'-43'(-38'), zoals die in 1997 en 1998 is uitgevoerd.

De belangrijkste resultaten van de uitgevoerde simulaties zijn samengevat in Tabel I2.2.

Scen.	Import (+) / export (-) mond Westerschelde	Natte volume binnengebied [1])	Natte volume buitengebied [2])	Tijdschaal:
0	+1,5 10^6 m^3/jaar	1970: te ruim 1997: evenwicht ??	evenwicht ??	-
1	geringe toename	toename (OMW) t.o.v. 0-situatie	toename (GP) t.o.v. 0-situatie	import: 100 jr volume: » 100 jr
2	+1,6 10^6 m^3/jaar	toename (OMW) t.o.v. scen. 1	toename (GP) t.o.v. scen. 1	import: 100 jr volume: » 100 jr
3	+1,7 10^6 m^3/jaar	afname (W) t.o.v. scen. 1	toename (P) en afname (G) t.o.v. scen. 1	import: 100 jr volume: » 100 jr
4	-1,4 10^6 m^3/jaar	toename (O) en afname (W) t.o.v. scen. 1	afname (GP) t.o.v. scen. 1	import: 100 jr volume: > 100 jr
5	+1,5 10^6 m^3/jaar	vrijwel gelijk (OW) aan scen. 1	vrijwel gelijk aan (GP) scen. 1	import: 100 jr volume: 0-100 jr
6	-1,6 10^6 m^3/jaar	vrijwel gelijk aan (MW) of kleiner dan (O) scen. 4	vrijwel gelijk aan (GP) scen. 4	import: 100 jr volume: > 100 jr
7	+2,7 10^6 m^3/jaar	toename (OMW) t.o.v. scen. 4	toename (GP) t.o.v. scen. 4	import: 100 jr volume: > 100 jr
8	-0,3 10^6 m^3/jaar	afname O; toename W t.o.v. scen. 4	toename (GP) t.o.v. scen. 4	import: 100 jr volume: > 100 jr

Tabel I2.2 Resultaten uitgevoerde simulaties

[1]) OMW Oosten, Midden en Westen, waarvan merendeel in westelijk deel van de Westerschelde.

[2]) GP: Geulen en Platen, waarvan merendeel uit de geulen
G: Geulen
P: Platen

Toelichting per scenario

Scenario 0 (calibratieperiode):
Het einde van de calibratieperiode representeert een evenwichtssituatie voor het buiten- en binnengebied, m.u.v. het oostelijk deel van de Westerschelde.

Scenario 1: referentie (vóór de verdieping van 1997/1998)
Voortzetting van de bagger- en stortactiviteiten conform de situatie van 1997, tezamen met een zeespiegelstijging en getijslagvergroting, laat (na 100 jaar) een zeer geringe toename van de sedimentimport zien; het merendeel van het sediment is afkomstig uit de geulen van het buitengebied. Verruiming van het profiel vindt vooral in het oostelijk en westelijk deel van de Westerschelde plaats. Dit betekent dat de import van sediment de gevolgen van sedimentonttrekking en zeespiegelrijzing niet kan compenseren.

Scenario 2: extra zeespiegelstijging (ref. scenario 1)
De extra import van sediment komt uit de geulen en de platen van het buitengebied. Een deel van de vergroting van het natte volume aldaar is het directe gevolg van de zeespiegelstijging en heeft niet zo zeer te maken met erosie. De verruiming in de Westerschelde treedt vooral op in het westelijk deel.

Scenario 3: Getijslagreductie (ref. scenario 1)
Scenario 1 t.o.v. scenario 3 geeft aan dat een vergroting van de getijslag de import van sediment reduceert. Dit wordt veroorzaakt door een groter evenwichtsvolume bij een grotere getijslag, waardoor de zandvraag afneemt. Het geïmporteerde zand is grotendeels afkomstig uit de ondiepe delen van het buitengebied en komt vooral ten goede aan het westelijk deel van de Westerschelde.

Voor scenario's 1, 2 en 3 geldt dat de aanpassingstijd van het systeem aan een (versnelde) zeespiegelstijging erg lang duur, veel langer dan de simulatieperiode. De consequenties zijn:

- een verruiming van het estuarium;
- mogelijke vermindering van het onderhoudsbaggerwerk van de vaargeulen, één en ander afhankelijk van de plaat-geul uitwisseling en van lokale verschijnselen als drempelvorming;
- mogelijke negatieve milieueffecten t.g.v. vermindering van het platenareaal.

Scenario 4: verdieping en onderhoud vaargeul met zandwinning (ref. scenario 1)
Door de grotere baggerhoeveelheden m.n. in het oosten, en de grotere storthoeveelheden in het westen slaat de import van sediment na 15 jaar om in een export. Een deel van het gestorte materiaal gaat naar het mondingsgebied hetgeen leidt tot een verondieping aldaar (geulen en platen). Het merendeel van het gestorte sediment gaat weer terug naar het oostelijk deel van de Westerschelde. Desondanks neemt het natte volume in het oostelijk deel t.g.v. het voortdurend baggeren sterk toe. De baggerbehoefte is niet geheel duidelijk, omdat dit afhangt van de plaat-geul uitwisseling, drempelvorming etc. Een deel van de verruiming zal ten koste van de platen gaan wat een negatief effect heeft op het ecologisch systeem. In het westelijk deel neemt het natte volume af, waardoor platen kunnen uitbouwen.

Scenario 5: verdieping en geen onderhoud vaargeul met zandwinning (ref. scenario 1)
Als na de verdieping geen onderhoud meer wordt gepleegd, gaat het systeem geleidelijk terug naar de situatie die niet veel verschilt van scenario 1, zowel in het binnen- als buitengebied.

Scenario 6: verdieping en onderhoud vaargeul zonder zandwinning (ref. scenario 4)
De kleine verschillen tussen scenario's 4 en 6 geven aan dat zandwinning een relatief kleine ingreep is t.o.v. het verdiepen en onderhoudsbaggerwerk. T.g.v. de zandwinning verruimt het profiel in het oostelijk deel van de Westerschelde (dus afname natte volume voor scenario 6 t.o.v. scenario 4), wat op de lange termijn ten koste kan gaan van de platen.

Scenario 7: verdieping en onderhoudszand onttrokken aan systeem; geen zandwinning (ref. scenario 4)
Onttrekken uit het systeem van het vrijgekomen zand bij het onderhoudsbaggeren heeft grote invloed op het systeem. Het effect neemt toe op lange termijn en zou dus blijvend zijn. De zandonttrekking beïnvloedt alle gebieden maar is het grootst in het midden- en westelijk deel van het estuarium (waar het zand anders zou worden gestort). Erosie treedt ook op in het buitengebied. De extra import van sediment t.p.v. de mond neemt toe maar kan de extra onttrekking niet compenseren.

Scenario 8: Zandwinning middels minder storten in westen i.p.v. meer baggeren in oosten (ref. scenario 4)
Door minder te storten in het westen wordt de sedimentexport met ongeveer 1 miljoen m^3 gereduceerd t.o.v. scenario 4. Omdat volgens dit scenario minder wordt gebaggerd in het oosten komt dit zand vooral ten goede aan het oostelijk gebied (afname van het natte volume). In het westelijk deel neemt het natte volume toe, omdat het zandaanbod afneemt t.g.v. de gereduceerde storting. In het buitengebied krijgen zowel de geulen als de platen minder zand vergeleken met scenario 4 als gevolg van de verkleinde zandexport.

I.3 Samenvatting en conclusies

De buitendelta van de Westerschelde wordt aan de oostzijde begrensd door de lijn Vlissingen-Breskens, aan de westzijde globaal door de NAP-20 m dieptecontour en verder door de oevers van Walcheren en Zeeuws-Vlaanderen. De belangrijkste geulen in de buitendelta zijn het Oostgat onder de oever van Walcheren en de Wielingen/Scheur ongeveer in het verlengde van de Westerschelde. Tussen beide geulsystemen ligt de Raan met hoogtes variërend tussen NAP-20 m en NAP-2 m. De Vlakte van de Raan is het ondiepe deel van de Raan met een bodemniveau globaal tussen NAP-10 m en NAP-2 m. Op het zuidwestelijk deel van de Vlakte ligt de Droogte van Schooneveld, welke wordt gebruikt als stortlokatie.

Het geulenstelsel in het mondingsgebied is over de laatste eeuwen veelvuldig veranderd. Aan het eind van de 16e eeuw was een radiaal-georiënteerd patroon aanwezig met vijf geulen die door de buitendelta liepen, waarvan de Wielingen de belangrijkste. Vervolgens ontwikkelde de Deurloo zich in de 17e en 18e eeuw tot de belangrijkste vaargeul. Na 1800 nam de Deurloo in betekenis weer af en die van de Wielingen en het Oostgat toe. Gedurende genoemde periode tot op heden is de Vlakte van de Raan vrij stabiel geweest (van der Slikke, 1999) al wordt ook genoemd dat sinds 1800 sprake is van een verondieping van de Vlakte (van der Spek). Veranderingen in de morfologie van de buitendelta zijn waarschijnlijk gestuurd door veranderingen in de hydraulische condities in het gebied, zoals de vervroeging van de getijstroming in het zeegat na de 17^e eeuw als gevolg van de verlanding van het estuarium.

Beheersaspecten m.b.t. te verwachten morfologische veranderingen van het Schelde estuarium zijn actueel i.v.m. veranderingen in de exogene condities (zeespiegelstijging), de verdieping en onderhoud van de vaargeul met bijbehorende stortingen van gebaggerd sediment en evt. te nemen maatregelen zoals ontpoldering.

Door het grote zandvolume dat kan worden geborgen op de Vlakte van de Raan en de uitwisseling tussen de buitendelta en de Westerschelde o.i.v. de getijstroming dienen de morfologische ontwikkelingen van het estuarium in samenhang met die in de Voordelta te worden beschouwd. Vragen die hierbij centraal staan zijn: (i) onder welke omstandigheden wordt sediment gebufferd en weer vrijgegeven, (ii) wat is de transportcapaciteit van de geulen tussen de kust en het estuarium en (iii) welke zijn de tijdschalen waarop veranderingen zich voltrekken?

Voor de beantwoording van bovenstaande vragen zijn eerder uitgevoerde simulaties met het gedragsgeoriënteerde model ASMITA geanalyseerd. Op basis van deze simulaties zijn de volgende conclusies te trekken.

1. Voor de huidige situatie, d.w.z. na de laatste verdieping, leidt de zeespiegelstijging tot een verruiming van m.n. het westelijk en oostelijk deel van het estuarium. Zand, afkomstig van de Voordelta, kan deze verruiming op een termijn van 100 jaar niet compenseren.
2. Na de laatste verdieping zal het estuarium, door de grotere baggerhoeveelheden in het oosten en de grotere storthoeveelheden in het westen, na enkele decennia netto zand gaan exporteren, hetgeen leidt tot een verondieping van de geulen en de platen in het buitengebied.
3. Onttrekking van het vrijgekomen zand bij het onderhoudsbaggeren van de vaargeul, zoals verdiept in 1997/1998, heeft grote invloed op het systeem.Het effect neemt op lange termijn toe en is blijvend. De import van sediment t.p.v. de mond neemt toe maar de capaciteit is onvoldoende om de extra onttrekking te compenseren. Zowel de geulen als de platen in het buitengebied eroderen.

Resumerend geldt dat de voordelta zand tijdelijk zowel kan opnemen als afgeven. In het eerste geval zal een deel in ieder geval tijdelijk beschikbaar blijven voor de Westerschelde. Welk deel van het zandvolume zand verloren gaat door export naar de Noordzee en op welke termijn dit gebeurt is echter onbekend. De transportcapaciteit in de mond is onvoldoende om de zandvraag van de Westerschelde, bijv. t.g.v. een zeespiegelstijging, te compenseren. Tijdschalen voor aanpassingen aan gewijzigde omstandigheden zijn in het algemeen groot, d.w.z. 100 jaar of meer.

Referenties

Slikke, M.J. van der, 1999, *Morfologische ontwikkeling Westerscheldemonding tot 2020. Een fenomenologische visie.* Institute for Marine and Atmospheric Research. Utrecht. Rapport R99-16.

Winterwerp, J.C., 2000, *Lange Termijn Visie Schelde-estuarium. Cluster Morfologie. Plan van aanpak uitvoeringsfase (fase 2).* Z2858.

Wang, Z.B., 1997a, *Morfologische Interactie Westerschelde Estuarium en het Mondingsgebied. ASMITA-Westerschelde. Een gedragsgeoriënteerde modellering.* Z2253.

Wang, Z.B., 1997b, *Studie naar morfologische effecten van storten en baggeren in de Westerschelde. Ten behoeve van MER storten gebaggerd materiaal.* Z2310.

Appendix J
Aanbevelingen voor verder onderzoek

Z2878

J Aanbevelingen voor verder onderzoek

1. Grootschalige uitwisseling met voordelta/Noordzee

- Hoe ontwikkelt de voordelta zich, wat zijn de karakteristiek morfologische tijdschalen en de sedimenthuishouding - wat zijn de autonome ontwikkelingen en welke invloed hebben de ingrepen in de Wielingen en de uitbreiding van de haven van Zeebrugge,
- Bestudeer de uitwisseling voordelta met aanliggende kustwatergebieden,
- Bestudeer de uitwisseling voordelta met de Westerschelde en de invloed van baggeren/storten daarop,
- Integreer voordelta in de diverse rekenmodellen, zoals ESTMORF, WAQUA, enz.

2. Autonome ontwikkeling Schelde-estuarium

- Bestudeer de autonome ontwikkeling van de Westerschelde, bijv. over de periode 1931-1968 toen er weinig in het systeem gebaggerd werd, en gebruik hierbij ESTMORF, mede om meer vertrouwen in dit model te krijgen,
- Bepaal de grootschalige zandbalans en de netto en bruto sedimenttransporten in het systeem en de veranderingen daarin t.g.v. menselijk ingrijpen
- Welke eb-/vloedgeulsystemen "kantelen" reeds van nature, en hoe beïnvloedt dat de toepasbaarheid van het "cellenconcept" (zie 4.),
- Voeg een verlandingsterm toe aan ESTMORF om de lange-termijneffecten van schorvorming te kunnen bestuderen,
- Bestudeer het gedrag van de hoog-dynamische gebieden, inclusief de kortsluitgeulen, hun karakteristieke tijdschalen en hun rol op de morfologische ontwikkeling op meso-/macro-schaal.
- In hoeverre wordt het huidig dynamisch evenwicht in stand gehouden door menselijke ingrepen (verdiepingen).

3. Calibratie ESTMORF

- Calibreer ESTMORF a.d.h.v. de autonome ontwikkeling van het Schelde-estuarium, bijvoorbeeld over de periode 1931-1968 (zie ook 2.; de nu uitgevoerde calibratie in de periode 1968-1994 is inclusief baggerwerk),
- Bestudeer de oorzaak van de gevonden verschillen tussen de met ESTMORF berekende baggerhoeveelheden voor de huidige situatie en de actuele cijfers

4. Stabiliteitsanalyse

- Valideer de nu toegepaste stabiliteitsanalyse met een numeriek model,
- In de nu toegepaste stabiliteitsanalyse is de plaat-geulinteractie empirisch meegenomen. Breidt de stabiliteitsanalyse uit met een minder empirische beschrijving in de vorm van een extra vergelijking voor de plaatontwikkeling,
- Bestudeer de interactie tussen de cellen en de stabiliteit van de geschakelde cellen,
- In hoeverre beïnvloeden natuurlijke ontwikkelingen de stabiliteit van de cellen?

5. Plaat- en schorontwikkeling

- Kwantificeer de te verwachten erosie van de platen en de versteiling van de plaatoevers als functie van geulverdieping,

- Bestudeer de snelle plaatrespons in de Oosterschelde op veranderingen in de hydrodynamische omstandigheden, deze data helpen bij het vergroten van het begrip in plaatontwikkeling in het algemeen en eventueel bij de calibratie van ESTMORF (de in ESTMORF gebruikte empirische relaties voor de geulen is betrouwbaarder dan die voor de platen),
- Bestudeer de ontwikkeling en stabiliteit van het huidige schorrenareaal en identificeer potentiële lokaties voor nieuwe schorontwikkeling

6. Regenererend vermogen

- Het is van groot belang gevoel te krijgen voor het zelfherstellend vermogen (veerkracht) van het meergeulensysteem in het Schelde-estuarium. Bestudeer daarom het nu optredende herstel van de Schaar van Waarde en haar omgeving, en poog dit gedrag met numerieke modellen te simuleren,
- Definieer goed wat de zogenaamde aandrijvende krachten in het systeem zijn die voor bovengenoemde regeneratie verantwoordelijk zijn, en op welke schalen deze werken.

7. Slibhuishouding

- De slibhuishouding in het systeem kan beïnvloed worden door de diverse beheersingrepen, en omgekeerd kan een verandering in slibhuishouding het ecologische gedrag, en op lange termijn zelfs de morfologische ontwikkeling via schorvorming/ verlanding beïnvloeden. Aanbevolen wordt ook de effecten van menselijk ingrijpen op de slibhuishouding te bestuderen

8. Baggerstrategie

- In de huidige analyses is op tamelijk rudimentaire wijze een baggerstrategie opgezet. Aanbevolen wordt deze te optimaliseren - hiervoor zal één of ander optimalisatie-algoritme opgezet dienen te worden.

9. Monitoring

- Geadviseerd wordt een toegesneden Monitoringsprogramma op te stellen en uit te voeren op basis van relevante tijdschalen en kennis van het morfologisch systeem; maak hierbij bijvoorbeeld gebruik van de gevonden veranderingen in getij-asymmetrie, het cellenconcept en/of numerieke morfologische modellen.