

Modellering morfodynamisch gedrag van de Drempel van Hansweert

Fase 1: Modelbouw en simulatie huidige situatie

November 1997

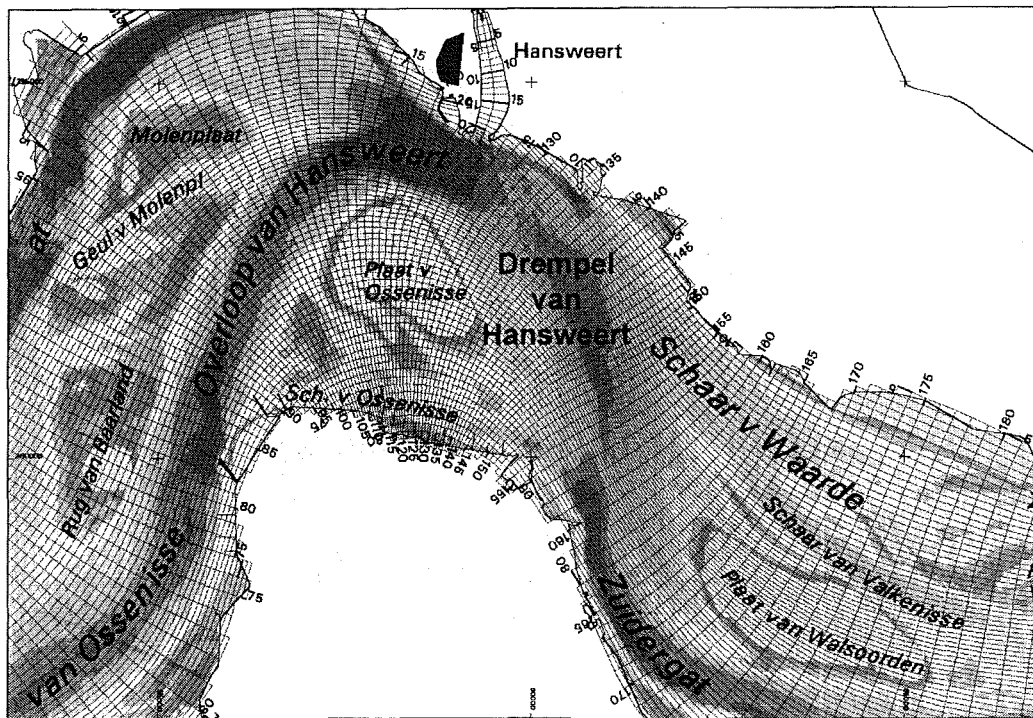
M.D. Groenewoud

AI-AFS

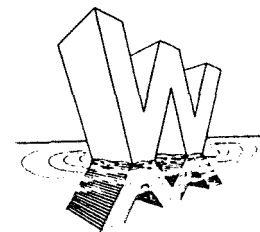
3997

Groenewoud

1997



Uitgevoerd in opdracht van het
Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ



Voorwoord

Tijdens het uitvoeren van mijn studie naar het modelleren van het morfodynamisch gedrag van de Drempel van Hansweert heb ik op prettige wijze samengewerkt met diverse personen van het Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ) en de Universiteit Utrecht (UU). Mijn dank gaat met name uit naar drs. H. Verbeek (RIKZ), drs. F.T.G. Tank (UU), ir. A. Langerak (RIKZ), ing. C. van der Male (RIKZ), drs. M.C.J.L. Jeuken (UU) en dr. J.H. van den Berg (UU). Tevens wil ik mijn begeleiders op de TU Delft, dr. ir. J. van de Graaff en dr. ir. J.A. Roelvink, bedanken voor hun adviezen en de plezierige samenwerking.

Tijdens deze studie heb ik gebruik gemaakt van het door het Waterloopkundig Laboratorium ontwikkelde morfologische computermodel DELFT2D-MOR. Het Waterloopkundig Laboratorium heeft dit model beschikbaar gesteld voor deze studie.

Martin Groenewoud
Delft, november 1997

Samenvatting

Drempels, lokale ondieptes in de vaarweg, vormen een belemmering voor de scheepvaart in de Westerschelde. Om een goede bereikbaarheid van de haven van Antwerpen te waarborgen wordt er gebaggerd op de drempels. Momenteel wordt er in de Westerschelde gemiddeld $8 \cdot 10^6$ m³/jaar gebaggerd. Het grootste deel van het gebaggerde materiaal (ongeveer 80 %) wordt elders binnen de Westerschelde teruggestort. De doorlopende cyclus van baggeren en storten heeft de hydro- en morfodynamica van het estuarium sterk beïnvloed. Het getijvolume is toegenomen en de geulen zijn gefixeerd. De gemiddelde hoogte van de platen is toegenomen, schorren- en slikkengebieden zijn kleiner geworden en er komen geen nieuwe schorren- en slikkengebieden bij. Dit alles kan gezien worden als een afname van de dynamiek van het ecologisch systeem.

In 1995 zijn de Nederlandse en Belgische regering overeengekomen dat de vaargeul met nog eens 1,5 m zal worden verdiept. Gezien de ervaring met voorgaande verdiepingen wordt verwacht dat deze nieuwe verdieping aanzienlijke gevolgen zal hebben voor de morfologie en ecologie van het estuarium. Inmiddels (medio 1997) is men begonnen met het uitvoeren van deze nieuwe verdieping.

Om het natuurlijke karakter van de Westerschelde zo goed mogelijk te behouden heeft de Directie Zeeland in samenwerking met het RIKZ een meerjarig onderzoeksprogramma opgestart binnen het project VERDIEPING (RIKZ) naar het gedrag van drempels in de Westerschelde. De doelstelling van dit project, genaamd DREMPELS, luidt als volgt:

Het verkrijgen van inzicht in de processen die de geometrie van een drempel bepalen, zodanig dat met de verkregen kennis de gevolgen van beheersalternatieven voldoende nauwkeurig afgeschat kunnen worden en nieuwe beheersalternatieven kunnen worden gegenereerd.

Onderdeel van dit project is het simuleren van het morfologisch gedrag van één van de drempels, de Drempel van Hansweert, met een morfologisch computermodel.

Dit verslag beschrijft de eerste van twee fasen van dit project waarin de modelbouw en de simulatie van de huidige situatie wordt beschreven. In de tweede fase zullen diverse beheersalternatieven met elkaar vergeleken worden.

Met behulp van het computermodel DELFT2D-MOR van het Waterloopkundig Laboratorium is er een model van de Westerschelde gemaakt. DELFT2D-MOR is een 2DH-morfologisch model (2DH = 2 dimensionaal horizontaal). Met behulp van dit model zijn de waterbeweging, het sedimenttransport en de bodemontwikkeling op en rondom de Drempel van Hansweert gesimuleerd. Het model is gecalibreerd en geverifieerd met behulp van meetgegevens. De berekende debieten en waterstanden komen goed overeen met gemeten waarden. Berekeningen van het initiële sedimenttransport laten een netto sedimenttransport richting de drempel zien hetgeen overeenkomt met de praktijk.

Een tweetal morfologische berekeningen zijn in deze eerste fase gemaakt, namelijk een berekening van de autonome ontwikkeling (geen menselijke ingrepen) en een simulatie van de huidige baggerstrategie. Er is hierbij gebruik gemaakt van een morfologisch getij om de rekentijd van het model te beperken.

Berekende en gemeten erosie- en sedimentatiegebieden komen in het algemeen redelijk goed overeen. De berekeningen blijken minder aanzanding te geven op de drempel dan mocht worden verwacht op basis van meetgegevens. Een vergelijking tussen de simulatie van de autonome ontwikkeling en de simulatie van de huidige baggerstrategie laat zien dat er netto meer aanzanding op de drempel optreedt als er gebaggerd wordt. Door het baggerwerk wordt de drempel meer op overdiepte gehouden en zal sneller aanzanden.

Vanwege de complexiteit van dit soort berekeningen mogen de resultaten als goed worden beschouwd.

Inhoudsopgave

VOORWOORD

SAMENVATTING

INHOUDSOPGAVE

1. INLEIDING	1
1.1 BESCHRIJVING PROBLEMATIEK WESTERSCHELDE	1
1.2 PROJECT DREMPELS	2
1.3 OPBOUW VERSLAG	3
2. DE DREMPEL VAN HANSWEERT	5
2.1 LOKATIE DREMPEL VAN HANSWEERT	5
2.2 ONTWIKKELING BODEMLIGGING	5
2.3 MEETCAMPAGNE	6
2.4 OORZAKEN DREMPELVORMING	8
3. DELFT2D-MOR	10
3.1 INLEIDING	10
3.2 OPBOUW DELFT2D-MOR	10
3.2.1 Sturingsmodule	10
3.2.2 WAVES	11
3.2.3 FLOW	11
3.2.4 SEDIMENT TRANSPORT	11
3.2.5 BOTTOM CHANGE	11
4. OPZET WATERBEWEGINGSMODEL	12
4.1 INLEIDING	12
4.2 RUIMTELIJKE SCHEMATISATIE	12
4.2.1 Grid	12
4.2.2 Bodemschematisatie	12
4.3 RANDVOORWAARDEN	13
4.4 CALIBRATIE	14
4.5 VERIFICATIE	15
5. OPZET SEDIMENTTRANSPORTMODEL	17
5.1 INLEIDING	17
5.2 SEDIMENTTRANSPORTFORMULERING	17
5.3 BEREKENINGSRESULTATEN	19
6. OPZET BODEMONTWIKKELINGSMODEL	22
6.1 INLEIDING	22
6.2 SCHEMA MORFOLOGISCHE BEREKENINGEN	22
6.3 MORFOLOGISCH GETIJ	23
6.3.1 Inleiding morfologisch getij	23
6.3.2 Methode Latteux	23
6.3.3 Bepaling morfologisch getij	24
7. SIMULATIE AUTONOME ONTWIKKELING	27
7.1 INLEIDING	27

7.2 AUTONOME ONTWIKKELING: METINGEN.....	27
7.2.1 Periode 1990-1996	27
7.2.2 Periode 29 september 1995- 26 oktober 1995.....	30
7.3 AUTONOME ONTWIKKELING: BEREKENINGEN	31
7.4 CONCLUSIES.....	35
8. SIMULATIE HUIDIGE BAGGERSTRATEGIE.....	37
8.1 INLEIDING	37
8.2 SIMULATIE HUIDIGE BAGGERSTRATEGIE	37
8.3 RESULTATEN SIMULATIE	37
8.4 CONCLUSIES.....	42
9. CONCLUSIES	44

REFERENTIES

Bijlage A	Rekengrid en bodem 1996
Bijlage B	Gemeten en berekende waterstanden van de verschillende waterstandsstations
Bijlage C	Vergelijking gemeten en berekende snelheden in Raai B en C

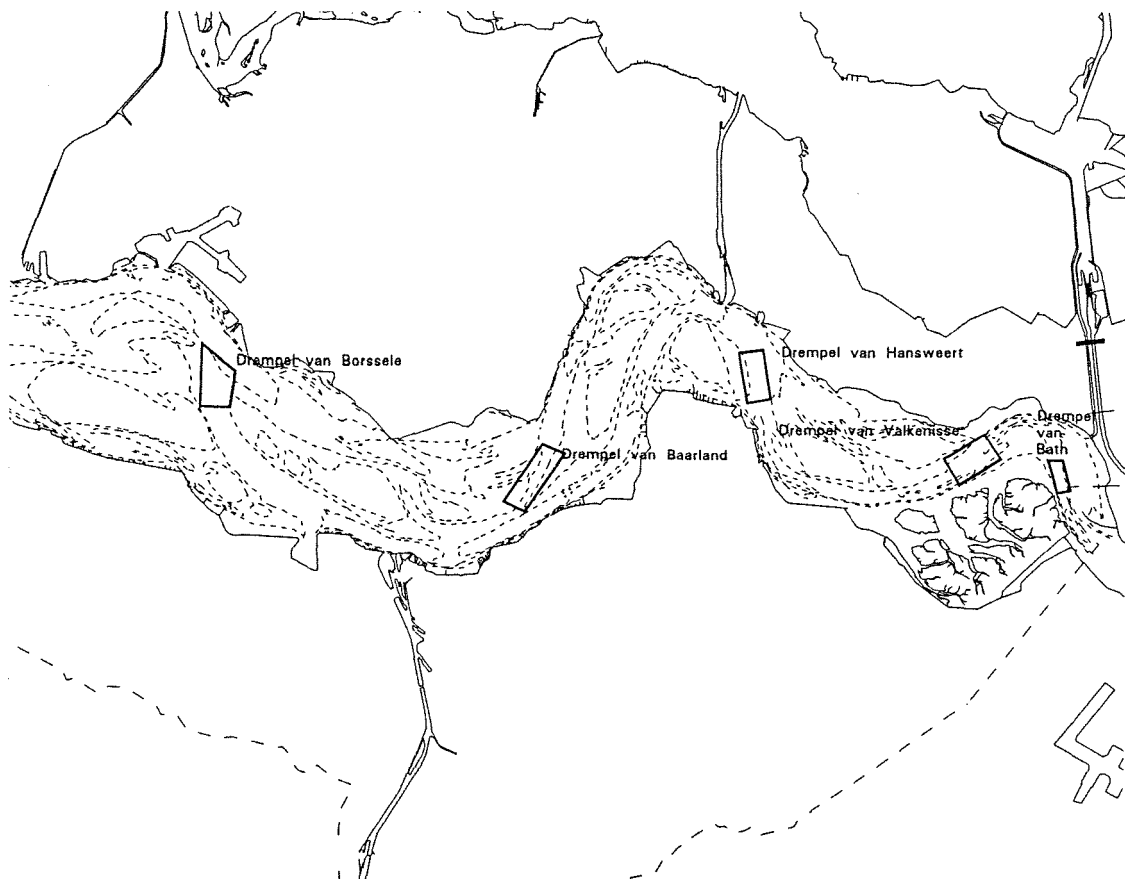
1. Inleiding

1.1 Beschrijving problematiek Westerschelde

De Westerschelde fungeert o.a. als een belangrijke vaargeul naar de haven van Antwerpen in België. Om de scheepvaart een goede doorgang te verlenen wordt er intensief gebaggerd in de Westerschelde. De baggerwerkzaamheden hebben de morfologie van het estuarium sterk beïnvloed. In de jaren '50 werd er reeds ongeveer $5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ /jaar gebaggerd. In de zeventiger jaren is de vaargeul verder verdiept. Per jaar werd er tot medio 1997 ongeveer $8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ gebaggerd in de Westerschelde. Het baggerwerk vindt hoofdzakelijk plaats op de ondiepe gedeeltes van de vaargeul, de zogenaamde drempels. Figuur 1.1 laat zien waar deze drempels zich in de Westerschelde bevinden. Het grootste gedeelte van het gebaggerde materiaal wordt teruggestort in de Westerschelde.

De doorlopende cyclus van baggeren en storten heeft de hydro- en morfodynamica van het estuarium sterk beïnvloed. Het getijvolume is toegenomen, met als consequentie hogere extreme waterstanden bij Antwerpen. De geulen zijn gefixeerd, de gemiddelde hoogte van de platen is toegenomen, de schorren- en slikkengebieden zijn kleiner geworden en er komen geen nieuwe schorren- en slikkengebieden bij. De dynamiek van het ecologisch systeem is daarmee afgenomen.

In 1995 zijn de Nederlandse en Belgische regering overeengekomen dat de vaargeul met nog eens 1,5 m zal worden verdiept. Gezien de ervaringen met voorgaande verdiepingen wordt



Figuur 1.1 Lokaties drempels in de Westerschelde.

verwacht dat deze nieuwe verdieping, de zogenaamde 48'/43'-verdieping¹, aanzienlijke gevolgen zal hebben voor de morfologie en ecologie van het estuarium. Medio 1997 is begonnen aan deze nieuwe verdieping.

1.2 Project DREMPELS

In het Beleidsplan Westerschelde (Bestuurlijk Klankbordforum Westerschelde, 1991) is een lange termijn visie opgesteld waarin men het natuurlijke karakter van de Westerschelde zo veel mogelijk wil behouden zonder dat daarbij maatschappelijke functies verloren gaan. Om het natuurlijke karakter van de Westerschelde te waarborgen, worden door de Directie Zeeland beheersalternatieven onderzocht die de diepte van de drempel op min of meer natuurlijke wijze verlagen. Hierbij wordt bijvoorbeeld gedacht aan morfologisch baggeren en storten, kombergingsvergroting door ontpolderen, beïnvloeding lokale debietverdeling (stromingsconcentratie over drempel) e.d.

In het voorjaar van 1995 heeft de Directie Zeeland in samenwerking met het RIKZ een meerjarig onderzoeksprogramma opgestart binnen het project VERDIEPING (RIKZ) naar het gedrag van drempels in de Westerschelde. Binnen het project wordt tevens samengewerkt met de Universiteit Utrecht (UU) en de Technische Universiteit Delft (TUD). Dit project, genaamd DREMPELS, heeft de volgende doelstelling:

Het verkrijgen van inzicht in de processen die de geometrie van een drempel bepalen, zodanig dat met de verkregen kennis de gevolgen van beheersalternatieven voldoende nauwkeurig afgeschat kunnen worden en nieuwe beheersalternatieven kunnen worden gegenereerd.

Vanuit drie verschillende invalshoeken werd getracht de kennis omtrent het gedrag van drempels te vergroten:

1. literatuurstudie van de huidige kennis omtrent het gedrag van drempels + analyse historische meetgegevens
2. meetcampagne op één van de drempels (Drempel van Hansweert)
3. modellering van het gedrag van de Drempel van Hansweert met behulp van een 2DH morfologisch model

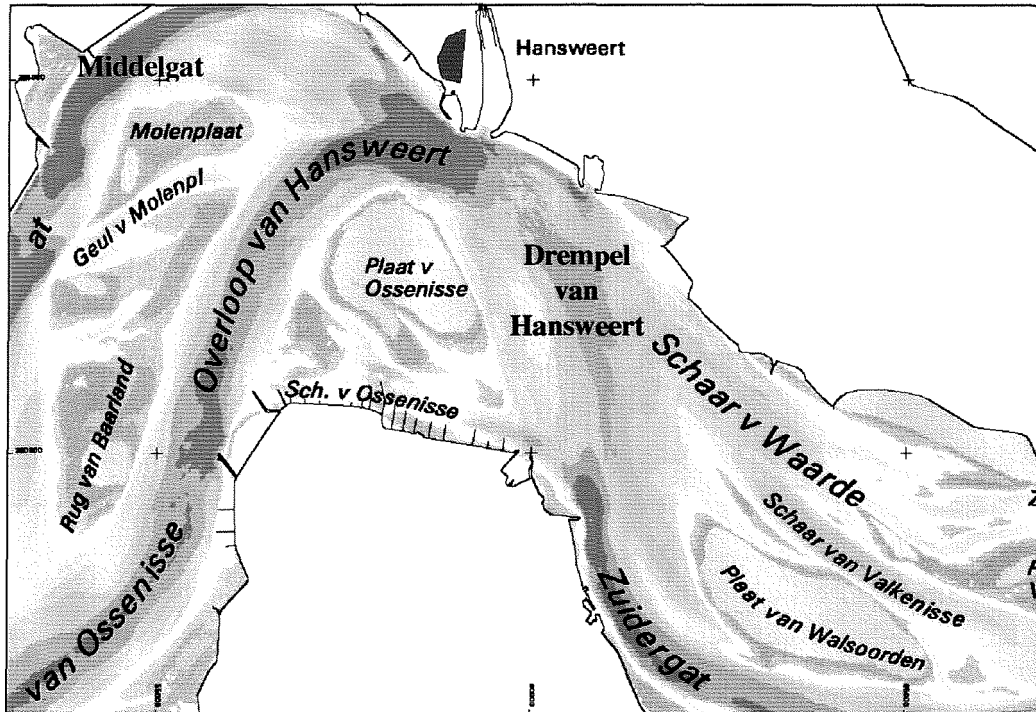
ad. 1 Literatuurstudie + analyse historische meetgegevens

In het kader van dit onderzoek zijn er door de Universiteit Utrecht verschillende studies verricht naar het gedrag van drempels in de Westerschelde (Tank, 1995; Tank, 1996a; Tank, 1996b).

ad. 2 Meetcampagne

In het najaar van 1995 en het voorjaar van 1996 is er een uitvoerige meetcampagne uitgevoerd op één van de drempels, namelijk de Drempel van Hansweert. De Drempel van Hansweert is gelegen in het oostelijk deel van de Westerschelde (zie Figuur 1.1 en 1.2). In verschillende dwars- en langsraaien zijn stroomsnelheden, waterstanden, sedimentconcentraties en bodemligging gemeten. In Hoofdstuk 2 wordt hier nader op ingegaan. Uitvoerig verslag

¹ De 48'/43' verdieping houdt in dat schepen met een diepgang van 48 voet (bijna 15 m) in één getij vanuit de Noordzee naar Antwerpen kunnen varen. Deze schepen zullen de afvaart naar de Noordzee niet in één getij kunnen voltooien. Schepen met een diepgang van 43 voet (ruim 13 m) moeten de afvaart wel in één getij kunnen volbrengen. Schepen met een diepgang van 38 voet (ruim 11 m) kunnen de Westerschelde onafhankelijk van het getij bevaren.



Figuur 1.2 Lokatie Drenpel van Hansweert.

van de metingen en van de interpretatie van de resultaten wordt gedaan in Tank, 1997a; Tank, 1997b en Tank, 1997c.

ad. 3 Modelling van het gedrag van de drempel

Het gedrag van de Drenpel van Hansweert wordt gesimuleerd met behulp van een 2DH morfologisch model (2DH = 2 dimensionaal horizontaal). Hierbij wordt gebruik gemaakt van DELFT2D-MOR, een computermodel van het Waterloopkundig Laboratorium (WL). In eerste instantie wordt het model gebruikt om de huidige situatie te simuleren. De uitkomsten van het model worden vergeleken met resultaten van de meetcampagne. In tweede instantie zal het model ook gebruikt worden om diverse beheersalternatieven met elkaar te vergelijken.

1.3 Opbouw verslag

Dit rapport doet verslag van de derde methode van aanpak, namelijk het simuleren van het gedrag van de Drenpel van Hansweert met het 2DH morfologische model DELFT2D-MOR. Het onderzoek bestaat uit twee fasen. Dit rapport doet verslag van de eerste fase waarin de modelbouw en de simulatie van de huidige situatie besproken worden.

In de tweede fase zullen met het model diverse beheersalternatieven gesimuleerd en met elkaar vergeleken worden. Over de tweede fase wordt apart gerapporteerd.

In Hoofdstuk 2 wordt eerst een beknopte omschrijving gegeven van de omstandigheden die het ontstaan van een drempel veroorzaken. Tevens wordt de situatie rondom de Drenpel van Hansweert besproken.

In Hoofdstuk 3 wordt de opbouw en de onderliggende theorie van het numerieke model DELFT2D-MOR behandeld.

De opbouw van het model wordt gekenmerkt door drie verschillende stadia. Allereerst moet de waterbeweging zo goed mogelijk worden gesimuleerd (Hoofdstuk 4). Vervolgens kunnen berekeningen van initieel sediment transport gemaakt worden (Hoofdstuk 5). Uiteindelijk

kunnen ook morfologische berekeningen (berekeningen van de bodemontwikkeling) gemaakt worden (Hoofdstuk 6). In Hoofdstuk 7 wordt de simulatie van de autonome ontwikkeling van de Drempel van Hansweert besproken. Onder 'autonome ontwikkeling' wordt de ontwikkeling verstaan die zou voorkomen als er geen menselijke ingrepen (lees: baggeren en storten) zouden plaatsvinden. In Hoofdstuk 8 worden de resultaten gepresenteerd van de simulatie van de huidige baggerpraktijk. Hoofdstuk 9 bevat de conclusies.

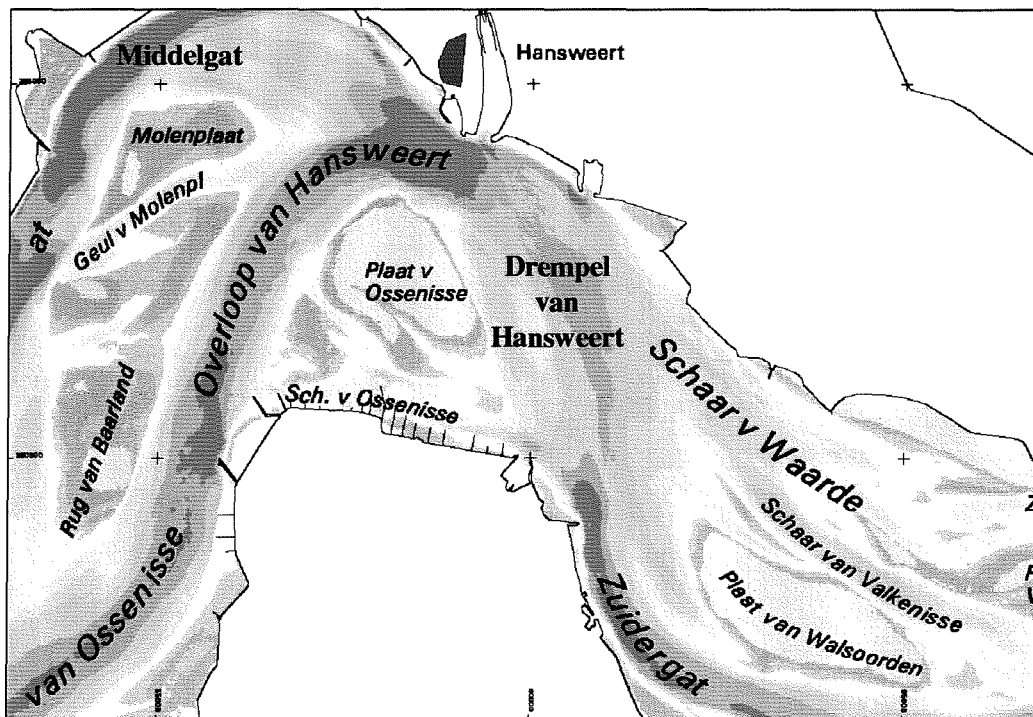
2. De Drempel van Hansweert

2.1 Lokatie Drempel van Hansweert

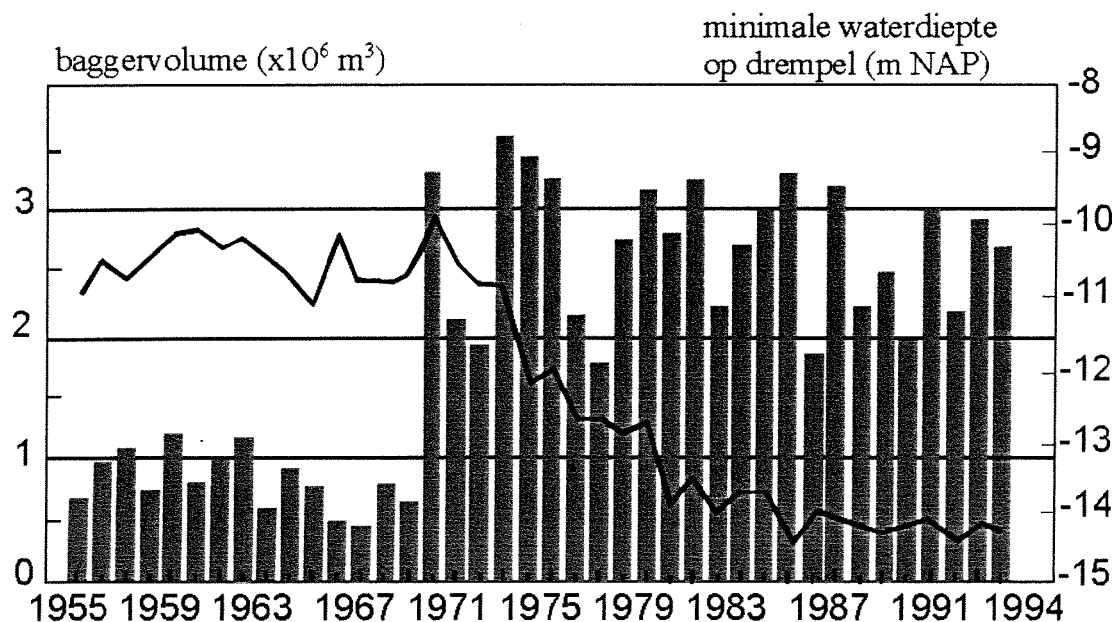
De Drempel van Hansweert is gelegen in het oostelijk deel van de Westerschelde (zie Figuur 2.1). Ten westen van de drempel ligt de Plaat van Ossenisse. Ten noorden van deze plaat bevindt zich een scherpe bocht waarna de hoofdgeul zich splitst in het ebgedomineerde Middelgat en de vloedgedomineerde Overloop van Hansweert. Ten zuiden van de Drempel bevindt zich het ebgedomineerde Zuidergat. Oostelijk van de drempel ligt een grote vloodschaar, genaamd de Schaar van Waarde. Het debiet door deze vloodschaar reduceert het debiet door het Zuidergat. De natuurlijke diepteligging van de Drempel van Hansweert is mede afhankelijk van de grootte van het debiet door het Zuidergat.

2.2 Ontwikkeling bodemligging

Sinds het begin van deze eeuw wordt er gebaggerd in de Westerschelde. De baggerwerkzaamheden vinden voornamelijk plaats in het oostelijk deel van de Westerschelde. In de jaren vijftig bedroeg het baggervolume zo'n $5 \cdot 10^6$ m³/jaar. Na een verdere verdieping van de vaargeul in de jaren zeventig is dit volume toegenomen. Aanvankelijk werd er per jaar $12 \cdot 10^6$ tot $14 \cdot 10^6$ m³ gebaggerd. Pas toen er nieuw evenwicht was ontstaan tussen het toegenomen getijvolume en het geulprofiel, stabiliseerde de hoeveelheid baggerwerk zich rond de huidige $8 \cdot 10^6$ m³/jaar (Vroon *et al.*, 1997).



Figuur 2.1 Lokatie Drempel van Hansweert.



Figuur 2.2 Ontwikkeling van de hoeveelheden baggerwerk en de minimale waterdiepte op de Drempel van Hansweert.

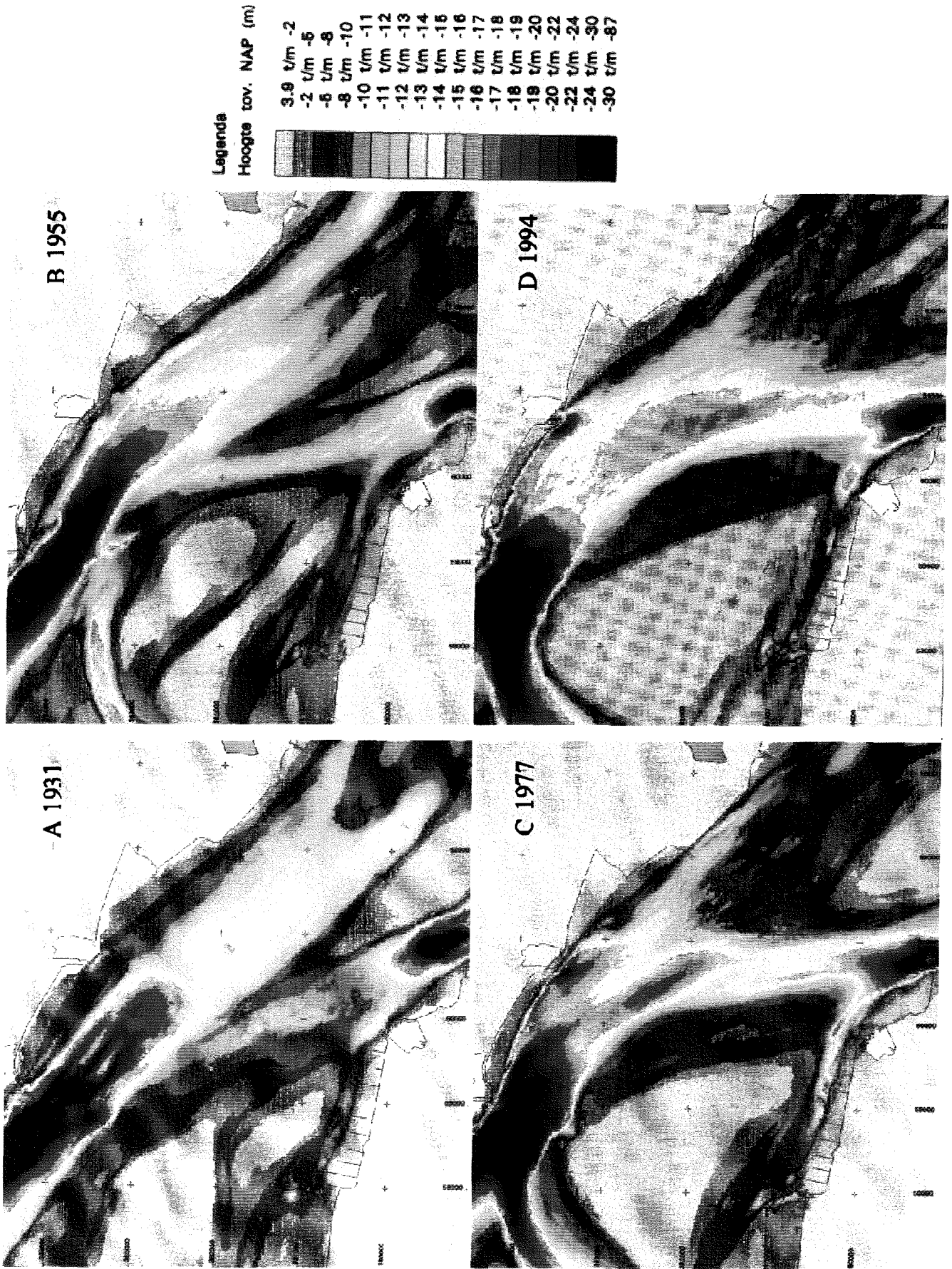
Op de Drempel van Hansweert wordt er momenteel per jaar ongeveer $2 \cdot 10^6$ tot $3 \cdot 10^6$ m³/jaar gebaggerd. Het baggerwerk heeft in de loop der tijd de ligging van de Drempel van Hansweert sterk beïnvloed. In Figuur 2.2 staat het verloop in de tijd uitgezet van de hoeveelheid baggerwerk op de drempel. Duidelijk is te zien dat na de verdieping in de jaren zeventig de hoeveelheid baggerwerk sterk is toegenomen. In Figuur 2.2 staat ook de minimale waterdiepte op de drempel weergegeven. De minimale waterdiepte is van ongeveer NAP -10,5 m toegenomen tot ongeveer NAP -14,5 m.

In Figuur 2.3a is de bodemligging van de drempel in 1931 afgebeeld. Kenmerkend voor de situatie toendertijd is het elkaar ontwijken van de eb- enloedstroming. De Schaar van Waarde is vloedgedomineerd; het Zuidergat is ebgedomineerd. In 1955 (Figuur 2.3b) is de diepte op de Drempel van Hansweert toegenomen t.o.v. 1931; grotendeels ten gevolge van het baggerwerk. Als gevolg hiervan is bij vloed de hoeveelheid water die over de drempel stroomt, toegenomen. De bodemligging van 1977 (Figuur 2.3c) laat zien dat deze ontwikkeling zich verder heeft doorgezet. De bodem van 1996 (Figuur 2.3d) geeft aan dat de diepte van de drempel verder is toegenomen. Het baggerwerk heeft daar een sturende rol in gehad. Als gevolg van de toegenomen diepte op de drempel stroomt er meer water over de drempel en minder water door de Schaar van Waarde. De gemiddelde dieptes in de Schaar van Waarde zijn ten gevolge van de verminderde debieten afgenomen; er is verzanding opgetreden.

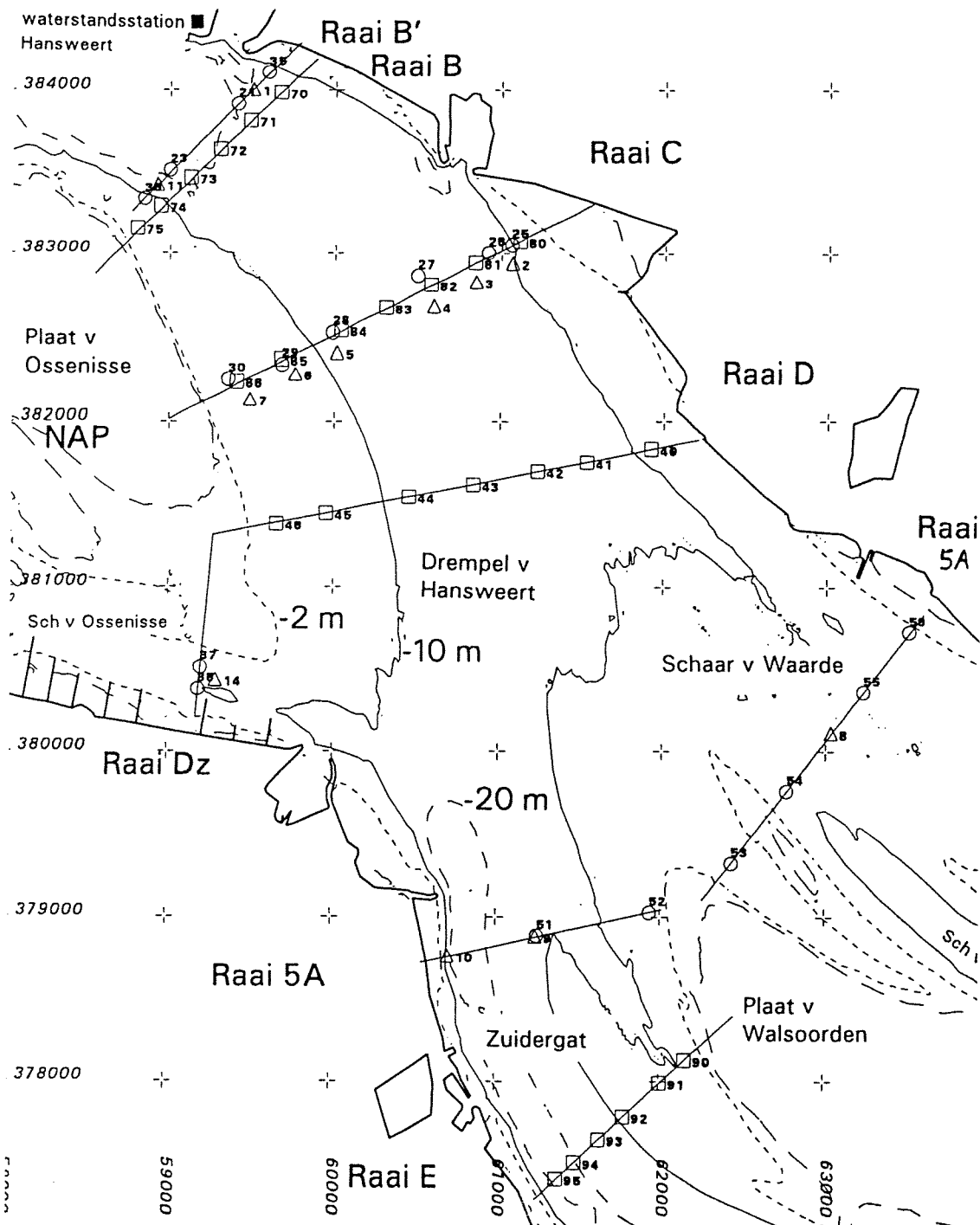
2.3 Meetcampagne

In 1995 en 1996 is er een uitgebreide meetcampagne uitgevoerd op de Drempel van Hansweert. In verschillende dwars- en langsraaien zijn waterstanden, stroomsnelheden en sedimentconcentraties gemeten. Ook zijn er verschillende extra lodingen uitgevoerd om de bodemligging te bepalen. In Tank, 1997a, 1997b en 1997c wordt uitvoerig verslag gedaan van de metingen en van de interpretatie van de resultaten.

Om een indruk te geven van de schaal van deze meetcampagne staan in Figuur 2.4 een aantal dwarsraaien en meetpunten afgebeeld. De resultaten van deze metingen zullen gebruikt worden bij de calibratie en verificatie van het model.



Figuur 2.3 Bodemligging Drempel van Hansweert in de jaren 1931 (a), 1955 (b), 1977 (c) en 1994 (d).



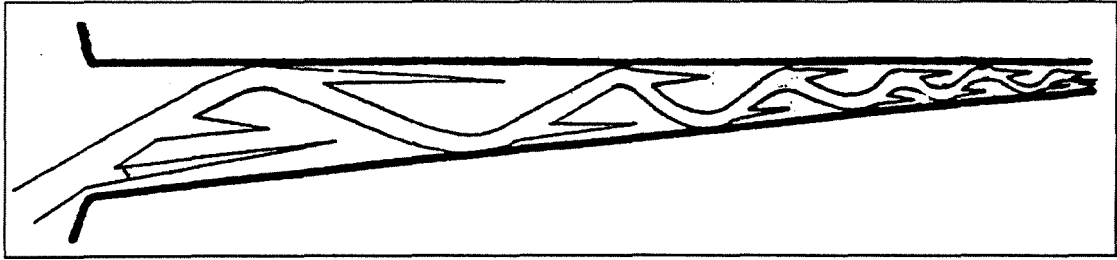
Figuur 2.4 Lokaties dwarsraaien en meetpunten van de meetcampagne.

2.4 Oorzaken drempelvorming

Een drietal oorzaken kunnen worden onderscheiden die tot drempelvorming leiden.

1. het elkaar ontwijken van eb- en vloedstroming
2. divergentie van stroming
3. vermindering secundaire stromingseffecten tussen opeenvolgende bochten

ad 1. De belangrijkste oorzaak voor drempelvorming is het feit dat eb- en vloedstroming vaak andere wegen kiezen. Als gevolg hiervan is het dwarsprofiel vaak relatief breed en



Figuur 2.5 Schema van een ideaal systeem van de Westerschelde met een ebgeul en vloedsharen (bron: Van Veen, 1950).

ondiep. Van Veen beschreef dit fenomeen reeds in de jaren '50 (Van Veen, 1950). In Figuur 2.5 staat één van zijn figuren afgebeeld. De Westerschelde wordt gekenmerkt door een ebgedomineerde hoofdgeul en vloedsharen. Dit patroon is duidelijk herkenbaar bij de Drempel van Hansweert met de Schaar van Waarde als vloedschaar en het Zuidergat als ebgedomineerde hoofdgeul (zie Figuur 2.3).

ad 2. Door de divergentie van de stroming t.g.v. het grotere dwarsoppervlak ter hoogte van de drempel, nemen de stroomsnelheden af en neemt de sedimenttransportcapaciteit af. Hierdoor zal een ondiepte ontstaan. Het baggeren van de drempel versterkt dit proces (zie Tank, 1997d).

ad 3. Tussen twee opeenvolgende bochten bevindt zich een relatief recht stuk waar minder secundaire stroming optreedt. In bochten zelf is er een naar de binnenbocht gericht sedimenttransport hetgeen veroorzaakt wordt door secundaire stroming. Hierdoor is het bochtprofiel vaak driehoekig en relatief diep. Door de vermindering van de secundaire stromingseffecten op relatief rechte stukken is het dwarsprofiel daar vaak meer rechthoekig en relatief ondiep.

3. DELFT2D-MOR

3.1 Inleiding

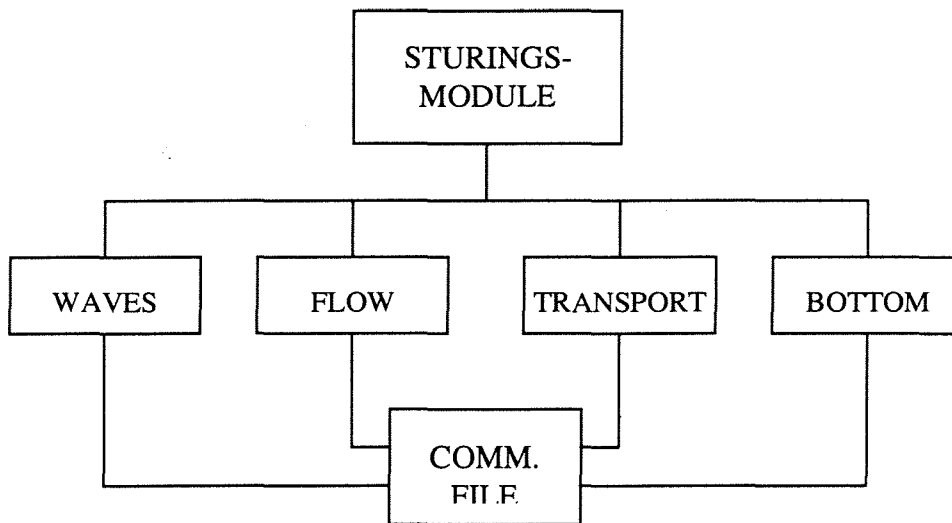
In deze studie wordt gebruik gemaakt van het door het Waterloopkundig Laboratorium ontwikkelde DELFT2D-MOR systeem. DELFT2D-MOR is een volledig geïntegreerd modellersysteem voor golven, stromingen, sedimenttransport en morfologische ontwikkeling.

3.2 Opbouw DELFT2D-MOR

DELFT2D-MOR is opgebouwd uit een aantal modules die ieder een specifiek fysisch proces modelleren. Deze modules zijn:

- WAVES (= HISWA): berekening golfvelden
- FLOW (= TRISULA): berekening stroomsnelheidsvelden
- SEDIMENT TRANSPORT: berekening sedimenttransport
- BOTTOM CHANGE: berekening bodemontwikkeling

Verder is er een sturingsmodule (MAIN) waarin de gebruiker specificeert welke modules wanneer aangeroepen worden en hoe de onderlinge communicatie tussen de verschillende modules verloopt. Een centrale communicatiefile zorgt voor de uitwisseling van de data tussen de modules. Het proces staat schematisch weergegeven in Figuur 3.1.



Figuur 3.1 Opbouw DELFT2D-MOR.

3.2.1 Sturingsmodule

De gebruiker bepaalt via deze module hoe de verschillende processen onderling gekoppeld zijn. De wijze van simulatie van het morfologische proces kan worden geschematiseerd als een boomstructuur. Tijdsintervallen voor elementaire subprocessen moeten worden gedefinieerd. Bepaalde processen kunnen een vast aantal malen uitgevoerd worden, voor een bepaald tijdsinterval of tot dat aan een bepaalde conditie voldaan wordt. Vele variaties zijn mogelijk voor het doorlopen van het proces in de tijd. (In Hoofdstuk 6 wordt nader ingegaan op de processchematisatie die in dit specifieke geval is gebruikt).

4. Opzet waterbewegingsmodel

4.1 Inleiding

Met behulp van het DELFT2D-MOR systeem is een toepassing gemaakt die gericht is op het modelleren van de hydro- en morfodynamica in en nabij het gebied van interesse: de Drempel van Hansweert. Dit hoofdstuk behandelt de opzet van het waterbewegingsmodel voor de Westerschelde. Hiervoor is het allereerst nodig een ruimtelijke schematisatie van het gebied te maken; dit wordt behandeld in paragraaf 4.2. Vervolgens moeten randvoorwaarden aan het model opgelegd worden (paragraaf 4.3). Na oplegging van de randvoorden volgt de calibratie van het model (paragraaf 4.4). De verificatie van het model wordt besproken in paragraaf 4.5.

4.2 Ruimtelijke schematisatie

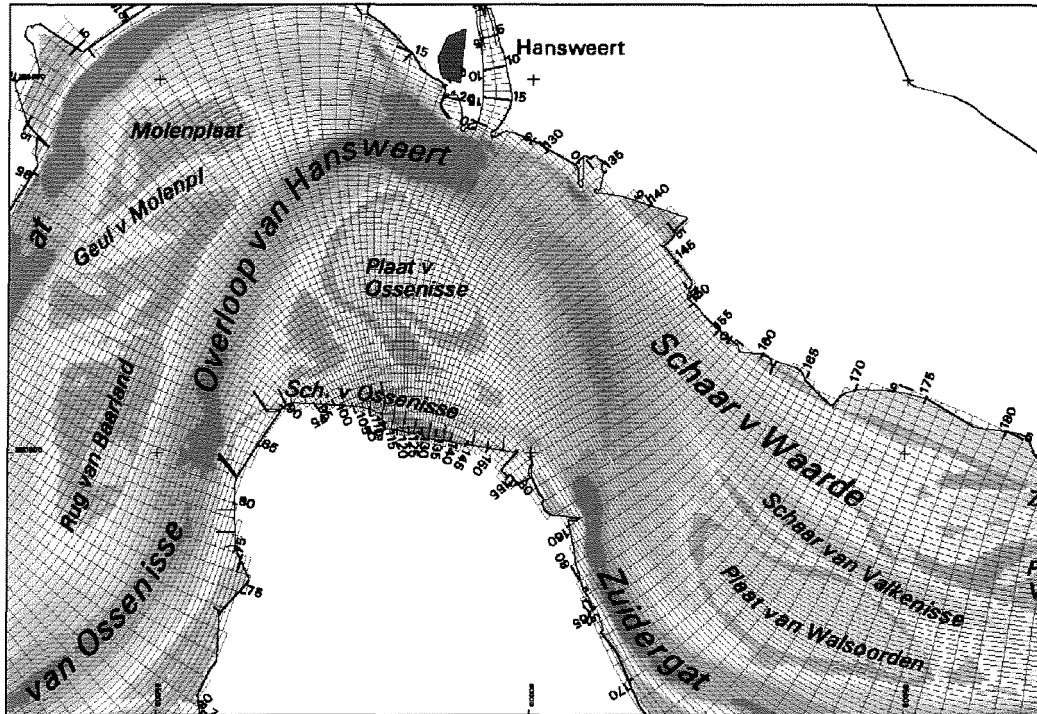
4.2.1 Grid

De waterbewegingsmodule FLOW (=TRISULA) vormt het hart van DELFT2D-MOR. Voor het gebruik van FLOW (en dus voor DELFT2D-MOR) is het allereerst nodig een ruimtelijke schematisatie te maken van het te modelleren gebied. FLOW is in staat gebruik te maken van een kromlijng rekengrid. Het ontwerp van dit grid is een cruciaal punt in het modelleerproces. Het ontwerp van het grid moet dermate fijnmazig zijn dat alle fysische processen op een goede wijze gesimuleerd kunnen worden. Een te fijnmazig grid zal echter leiden tot een (te) grote rekentijd.

Er is een grid gemaakt van de Westerschelde (zie Figuur 4.1 en Bijlage A) met behulp van een gridgeneratorprogramma van het Waterloopkundig Laboratorium, genaamd RGFGRID. Het gebied waarvan een grid is gemaakt loopt van Vlissingen-Breskens tot aan Prosperpolder (grens Nederland - België). In het gebied van interesse, rondom de Drempel van Hansweert, is het grid fijnmaziger dan bij de randen van het model; een grote(re) nauwkeurigheid in de berekeningen bij de drempel is immers gewenst. Het grid bestaat uit ongeveer 14.500 gridpunten.

4.2.2 Bodemschematisatie

Een volgende stap in het gereed maken van het model is het maken van een bodemschematisatie. Hiervoor is gebruik gemaakt van het programma QUICKIN van het Waterloopkundig Laboratorium. Met QUICKIN kan een bodemschematisatie gemaakt worden die aansluit op de gridpunten. Gebruik is gemaakt van de dieptegegevens van 1996 (zie Bijlage A). Deze dieptegegevens zijn verkregen via het RIKZ. Door het ontbreken van recentelijke meetgegevens zijn bepaalde stukken aangevuld met meetgegevens die dateren van uiterlijk 1989. Met QUICKIN zijn eveneens gebieden waarvan geen digitale data beschikbaar was, voorzien van een passende diepte (havens e.d.). Dit laatste is met name van belang voor de berging van water in het model.



Figuur 4.1 Detail kromlijinig grid bij Drempel van Hansweert.

4.3 Randvoorwaarden

De twee randen van het model bevinden zich respectievelijk bij Vlissingen-Breskens en Prosperpolder. De randen zijn zodanig gekozen dat ze ver genoeg van de Drempel van Hansweert afliggen om geen extra verstoringen ter plekke te geven. De keuze van de positie van de randen is tevens gebaseerd op het feit dat er zich waterstandsstations bij beide randen bevinden (Vlissingen en Prosperpolder), waarvan de meetgegevens gebruikt worden om het model te calibreren.

Aan beide randen van het model worden astronomische componenten van waterstanden als randvoorwaarden opgelegd. Het gebruik van astronomische componenten heeft een aantal voordelen:

- Door gebruik te maken van astronomische componenten is het mogelijk voor elke willekeurige datum het dan (theoretisch) optredende getij te simuleren.
- Een voordeel ten opzichte van het gebruik van tijdseries is dat er geen perioden zijn waarvan meetdata ontbreken. Beschikbare tijdseries zijn vaak onvolledig over een langere periode.
- Eén van de belangrijkste voordelen van het gebruik van astronomische componenten doet zich voor in een latere fase van het project. Op basis van de astronomische componenten kan dan een doottij-springtij cyclus relatief eenvoudig doorgerekend worden. M.b.v. de optredende *sediment*transporten kan dan het zogenaamde morfologische getij berekend worden, hetgeen de rekentijden aanzienlijk kan bekorten. Dit komt aan de orde in Hoofdstuk 6.

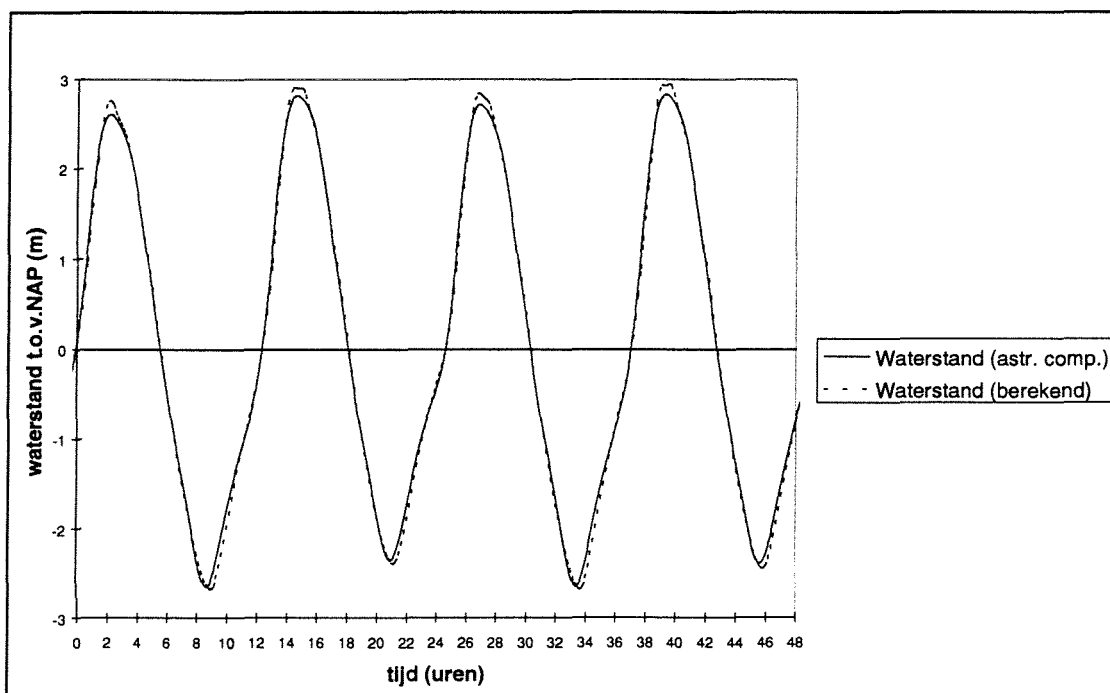
Op de randen van het model wordt gebruik gemaakt van waterstanden op basis van 95 astronomische componenten. Deze gegevens zijn verkregen via het RIKZ. De astronomische componenten zijn gebaseerd op een harmonische analyse van de gemeten waterstanden in de periode 1991-1994.

De waterstanden bij Breskens zijn niet precies bekend omdat zich daar geen meetstation meer bevindt. Op basis van havengetallen van Vlissingen en Breskens uit 1961 (toen er zich in Breskens nog wel een meetstation bevond) is er een correctie op de fases en amplitudes van de astronomische componenten van Vlissingen toegepast, zodanig dat deze gebruikt kunnen worden als randvoorwaarde bij Breskens. Op de rand tussen Vlissingen en Breskens worden de waterstanden lineair geïnterpoleerd. Vlissingen en Breskens liggen geometrisch gezien dicht bij elkaar en daarom verschillen de waterstanden slechts in geringe mate van elkaar.

4.4 Calibratie

Bij de calibratie van het model is de mate van overeenkomst tussen astronomische en berekende waterstanden op tussengelegen waterstandsstations (Terneuzen, Hansweert, Baalhoek en Bath) als criterium genomen. In het model zijn waterstandsstations gedefinieerd waarvoor de berekende waterstanden worden opgeslagen. Gemeten en berekende waterstanden kunnen met elkaar vergeleken worden. De berekende waterstanden zijn vergeleken met de waterstanden op basis van astronomische componenten.

Als kalibratie-parameter is de ruwheid gebruikt. De ruwheid kan op verschillende wijzen in DELFT2D-MOR ingevoerd worden. Er is voor gekozen de ruwheid op te geven via de Manning-waarde. De gekozen Manning-waarde bedraagt $0.026 \text{ s/m}^{1/3}$. In het model wordt een tijdstap van één minuut gebruikt. Figuur 4.2 laat het verloop zien van de astronomische en de berekende waterstanden bij het waterstandsstation van Hansweert. Bijlage B bevat een overzicht van berekende en astronomische waterstanden van alle stations in de Westerschelde. De berekeningen hebben betrekking op een periode met een getij tussen gemiddeld en springtij in (datum: 17-19 april 1996). Uit de vergelijking van de berekende en astronomische waterstanden blijkt dat die goed overeenkomen. Het model overschat de hoogwaterstanden enigszins. Rondom kentering van het getij vindt echter nauwelijks sedimenttransport plaats; de geringe afwijking zal dus nauwelijks of geen gevolgen zal hebben voor de uitkomsten van de sedimenttransport berekeningen in een later stadium.



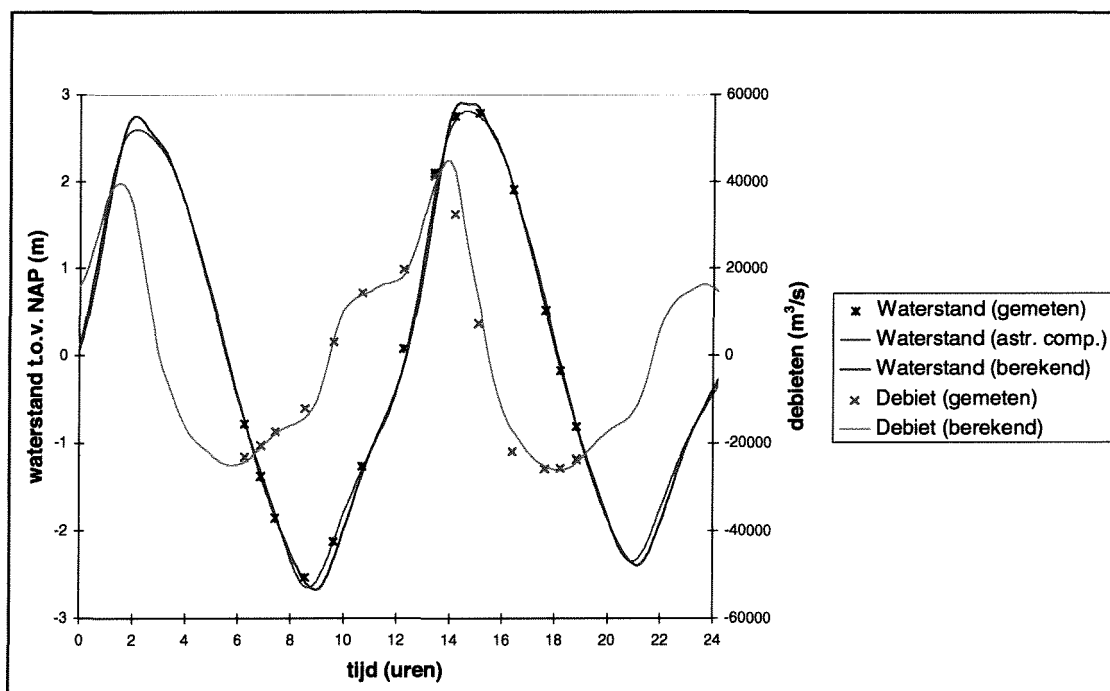
Figuur 4.2 Astronomische en berekende waterstanden bij Hansweert.

4.5 Verificatie

Het model is geverifieerd door berekende debieten te vergelijken met gemeten debieten. Hiervoor zijn gegevens gebruikt uit de meetcampagne op de Drempel van Hansweert. In een aantal dwarsraaien zijn snelheidsmetingen uitgevoerd (zie Figuur 2.4 op blz. 8). Op 17 april 1996 zijn snelheidsmetingen verricht met behulp van ADCP-meetapparatuur² in de raaien B en C. In het model zijn soortgelijke raaien gedefinieerd. Hierbij moet worden opgemerkt dat vanwege het kromlijnjige grid deze raaien niet geheel samen vallen met de raaien die in werkelijkheid gemeten zijn. De hierdoor gemaakte fout is echter klein omdat de hoeveelheid berging in het verschilgebied tussen de theoretische en werkelijke raaien verwaarloosbaar klein is t.o.v. de debieten die de beide raaien passeren. Ook de faseverschillen tussen de theoretische en werkelijke raaien zijn klein.

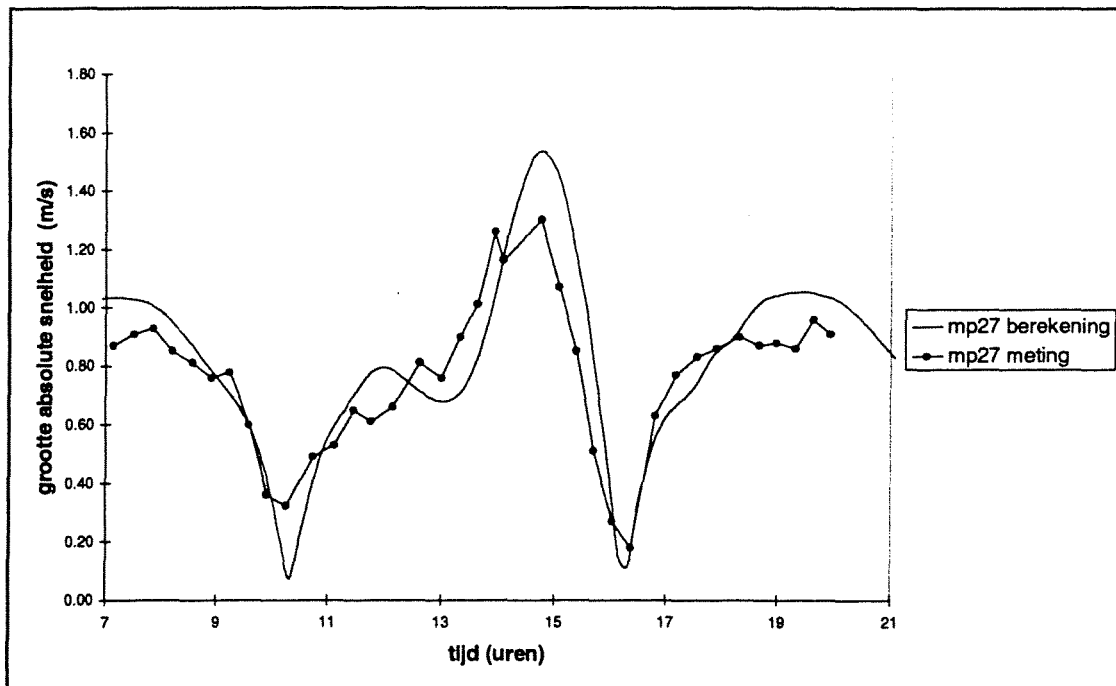
Figuur 4.3 presenteert respectievelijk de waterstanden en debieten in Raai B. Geconcludeerd kan worden dat de berekende debieten goed overeenkomen met de gemeten debieten. Een goede overeenkomst tussen gemeten en berekende debieten is juist gewenst i.v.m. de sedimenttransport berekeningen. De debieten zijn direct gekoppeld aan de stroomsnelheden, die in grote mate bepalend zijn voor de grootte van het sedimenttransport ($Q = u \cdot A$ en $S \sim u^5$).

Ook is gecontroleerd hoe goed de berekende snelheden overeenkomen met de gemeten snelheden. Als voorbeeld staan in Figuur 4.4 de gemeten versus berekende snelheden in meetpunt 27 van Raai C afgebeeld. Grafieken van de overige meetpunten van Raai C en Raai B staan afgebeeld in Bijlage C. Als randvoorwaarden zijn astronomische componenten van



Figuur 4.3 Gemeten en berekende waterstanden en debieten bij Hansweert (Raai B) op 17 april 1996.

² ADCP staat voor Acoustic Doppler Current Profiler. De ADCP werkt volgens een akoestisch principe en maakt gebruik van de reflectie van geluid op deeltjes die in het water zweven. De daarbij optredende Dopplerverschuiving is een maat voor de stroomsnelheid van het water. Voor de metingen in de Westerschelde is de ADCP onder aan een schip gemonteerd. Voor een uitgebreide beschrijving van het meetprincipe en de metingen wordt verwezen naar Tank 1997a.



Figuur 4.4 Gemeten en berekende snelheden in meetpunt 27 van Raai C op 25 oktober 1995.

waterstanden gebruikt. De overeenkomst tussen gemeten en berekende snelheden in de meetpunten is in het algemeen wat minder goed dan het geval is bij de vergelijking tussen de debieten. Hier zijn een aantal logische verklaringen voor. Ten eerste komt de ligging van de meetpunten in de werkelijkheid en de 'meetpunten' in het model nooit helemaal precies overeen. De lokatie van het dichtstbijzijnde gridpunt verschilt altijd enigszins van de daadwerkelijke ligging van het meetpunt. De lokale geometrie rondom het meetpunt is van grote invloed op de stroomsnelheden. Een tweede oorzaak voor de verschillen is dat de bodem die in het model geïmplementeerd is altijd wat verschilt van de actuele bodem zoals die tijdens de metingen aanwezig is.

5. Opzet sedimenttransportmodel

5.1 Inleiding

Na het afregelen van de waterbeweging is de volgende stap het opzetten van het sedimenttransportmodel. Met sedimenttransport wordt in eerste instantie *initieel* sedimenttransport bedoeld. Dit houdt in dat veranderingen in de bodemligging t.g.v. dit sedimenttransport nog niet aan de orde komen. Er wordt als het ware uitgegaan van een vaste bodem. De bodemontwikkeling wordt in Hoofdstuk 6 besproken.

In paragraaf 5.2 wordt ingegaan op de gekozen sedimenttransportformulering. In paragraaf 5.3 worden de resultaten van de berekeningen behandeld.

5.2 Sedimenttransportformulering

Binnen DELFT2D-MOR is het mogelijk te kiezen uit een variëteit van sedimenttransportformuleringen. Er is voor de Van Rijn-1984 formulering gekozen (Van Rijn, 1984a, 1984b en 1984c). Deze formulering gaat uit van een gescheiden benadering van bodemtransport en suspensietransport en is gecalibreerd aan een groot aantal datasets. Deze formulering geldt alléén voor zandtransport.

De huidige berekeningen zijn uitgevoerd op basis van evenwichtstransport. Dit houdt in dat effecten als onder- en oververzadiging niet in rekening zijn gebracht. Als calibratiefactor is de Nikuradse bodemruwheid k_s genomen. Met behulp van een spreadsheet programma zijn berekende en "gemeten" transporten met elkaar vergeleken. De berekende transporten zijn op basis van *gemeten* snelheden. Figuur 5.1 en Figuur 5.2 laten de resultaten zien voor twee verschillende meetpunten. De waarden van de parameters die voorkomen in de Van Rijn-formulering staan vermeld in Tabel 5.1. Hierbij moet opgemerkt worden dat er is uitgegaan van de absolute grootte van de gemeten stroomsnelheden en de gemeten zandtransporten.

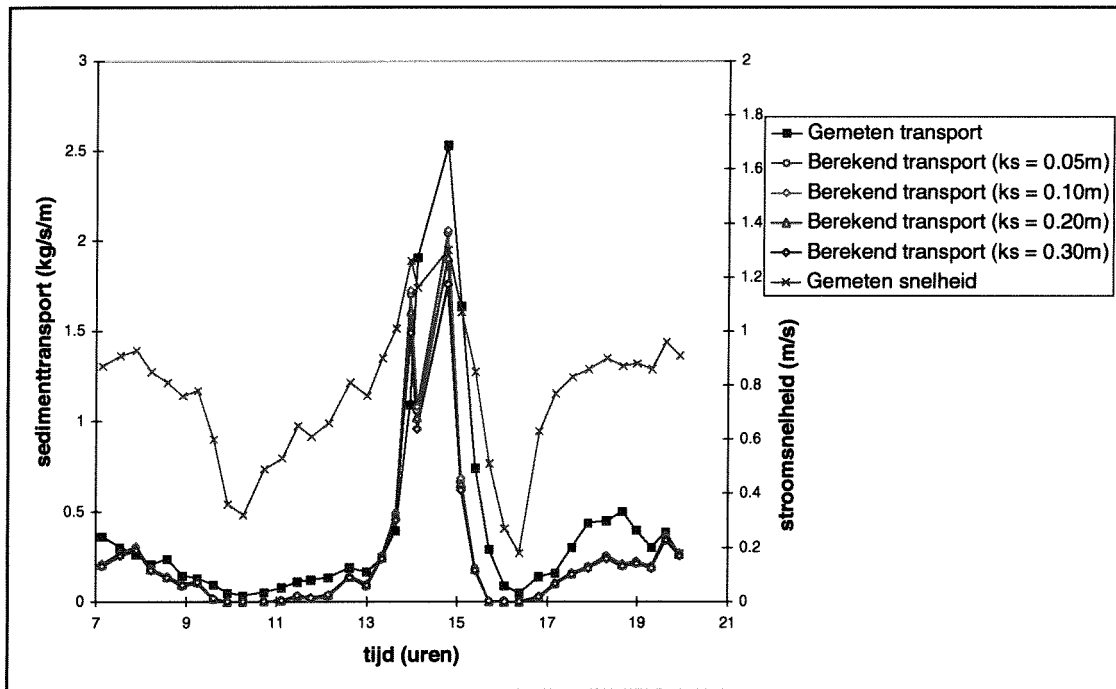
Parameter	Omschrijving	Waarde
ρ_w	soortelijk gewicht water	1000 kg/m ³
ρ_s	soortelijk gewicht sediment	2650 kg/m ³
k_s	effectieve bodemruwheid	0.2 m
D_{50}	korrelgrootte (50% is kleiner)	240*10 ⁻⁶ m
D_{90}	korrelgrootte (90% is kleiner)	350*10 ⁻⁶ m
g	zwaartekrachtsversnelling	9.81 m/s ²
ν	viscositeit water	1*10 ⁻⁶ (m ² /s)
u	dieptegemiddelde stroomsnelheid	variërend (m/s)
κ	Von Karman constante	0.4 (-)
h	waterdiepte	mp 27: 14.8 m mp 29: 7.5 m

Tabel 5.1 Gekozen waarden parameters die voorkomen in de Van Rijn-formulering.

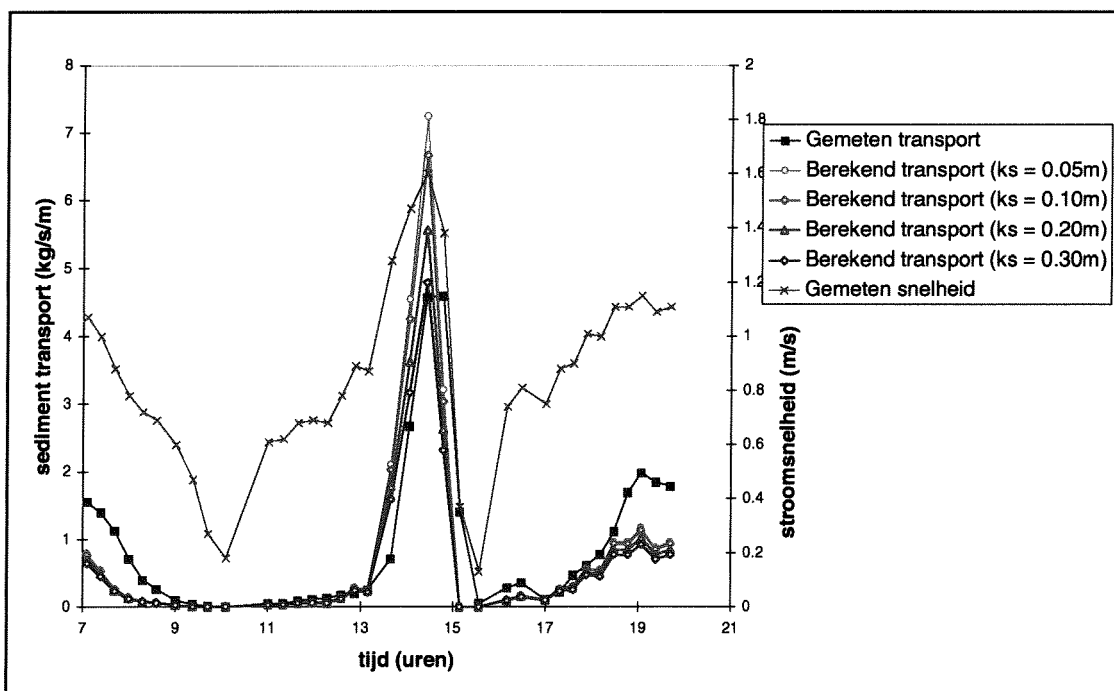
In meetpunt 27 van Raai C (Figuur 5.1) liggen de berekende maximale waarden allemaal onder de gemeten waarden. Berekende en gemeten sedimenttransporten hebben wel dezelfde orde van grootte, hetgeen, gezien de nauwkeurigheid van sedimenttransportformules in het algemeen, als een goed resultaat mag worden beschouwd. In meetpunt 29 van Raai C (Figuur 5.2) liggen de berekende waarden alle iets boven de gemeten waarden. Uit de figuren blijkt dus dat het moeilijk is op basis van deze grafieken een k_s waarde te kiezen.

Tevens blijkt dat de berekende sedimenttransporten voor de verschillende k_s waarden relatief dicht bij elkaar liggen, hetgeen het gevolg van de Van Rijn formulering is. Er is uiteindelijk gekozen om verdere berekeningen uit te voeren met een k_s waarde van 0,2 m. In het gebied

rondom de drempel van Hansweert komen bodemvormen voor met een gemiddelde hoogte van ongeveer 0,45 m (Tank, 1997b). In het algemeen wordt een k_s waarde die ongeveer de helft van de hoogte van de bodemvormen bedraagt, als reëel beschouwd. Uit Figuur 5.1 en Figuur 5.2 blijkt ook dat de gemeten transporten iets nauwer in de tijd in vergelijking met de berekende transporten.



Figuur 5.1 Gemeten en berekende transporten op basis van gemeten snelheden; sedimenttransportformule Van Rijn-1984 (meetpunt 27, Raai C, 25 oktober 1995).

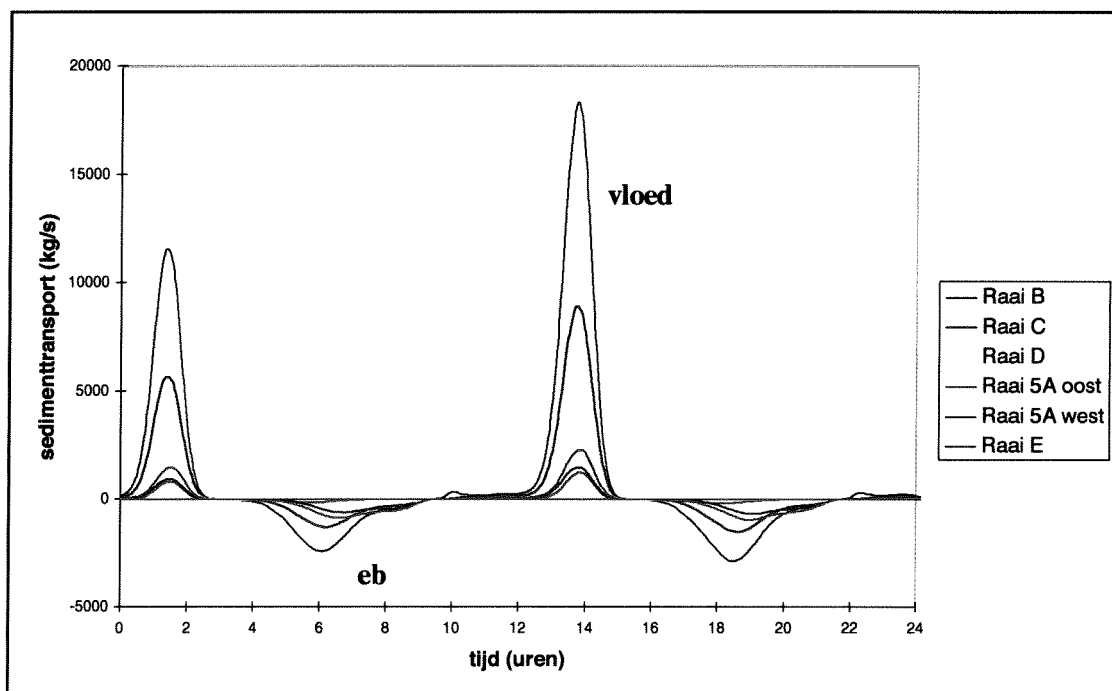


Figuur 5.2 Gemeten en berekende transporten op basis van gemeten snelheden; sedimenttransportformule Van Rijn-1984 (meetpunt 29, Raai C, 25 oktober 1995).

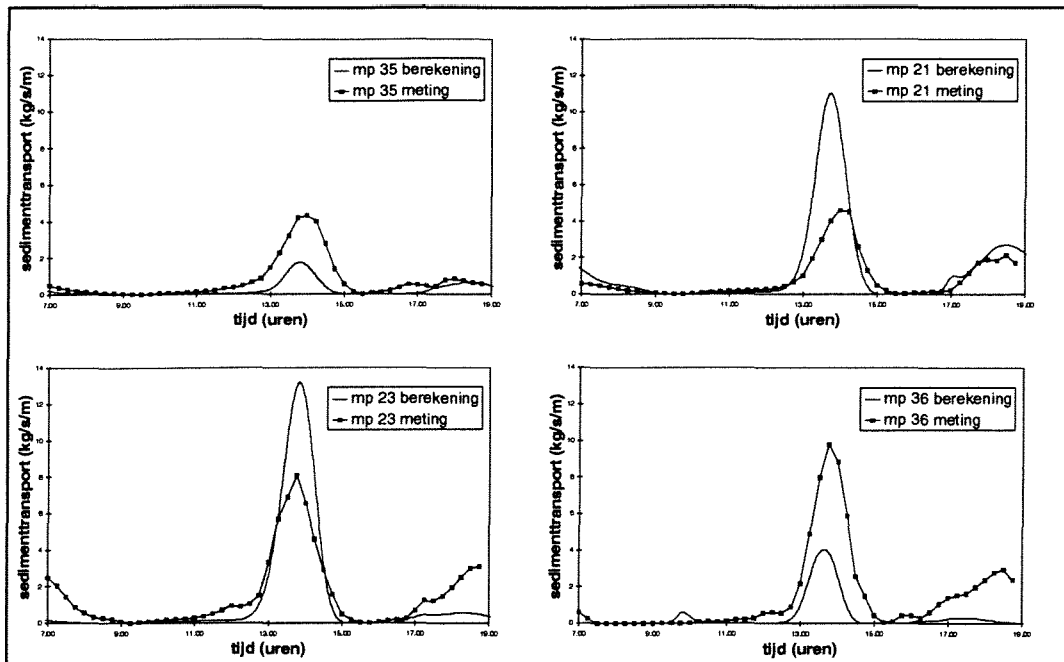
Opmerking: In DELFT2D-MOR is het mogelijk om voor het sedimenttransport en voor de waterbeweging uit te gaan van verschillende ruwheden. In de werkelijkheid is dit fysisch gezien uiteraard niet mogelijk. De ruwheid voor de waterbeweging wordt opgegeven via de Manning waarde. De gebruikte Manning waarde ($0,026 \text{ s/m}^{1/3}$) komt overeen met een ruwheid van $k_s = 0,08 \text{ m}$ bij een waterdiepte $h = 15 \text{ m}$. Bij een waterdiepte van $7,5 \text{ m}$ bedraagt de k_s $0,09 \text{ m}$. Deze waarden zijn kleiner dan de k_s die gebruikt is bij de sedimenttransportberekeningen ($k_s = 0,20 \text{ m}$).

5.3 Berekeningsresultaten

De sedimenttransportberekeningen zijn uitgevoerd met de totaal transport module (TRSTOT). Het berekende suspensietransport is dus op basis van het evenwichts-suspensietransport bepaald. Secundaire stromingseffecten zijn wel in rekening gebracht. Het model berekent hiervoor een parameter genaamd *secundaire stromingsintensiteit* op basis van de centrifugaal kracht door gekromde stroomlijnen en op basis van Coriolis krachten. Deze parameter wordt gebruikt voor het aanpassen van de richting van het sedimenttransport; de grootte blijft onveranderd. Voor een uitgebreide beschrijving wordt verwezen naar de gebruikershandleidingen van DELFT3D (Delft Hydraulics, 1996a; Delft Hydraulics 1996b). Met DELFT2D-MOR zijn berekeningen gemaakt van het sedimenttransport door dwarsraaien die overeenkomen met de dwarsraaien uit de meetcampagne. Figuur 5.3 laat voor een willekeurig springtij het verloop in de tijd van de transporten door de verschillende dwarsraaien zien. Het belangrijkste dat opvalt, is dat gaand van Raai B via Raai C naar Raai D de grootte van het sedimenttransport tijdens zowel eb en vloed steeds verder afneemt. De transporten tijdens vloed zijn groter dan tijdens eb en netto zou het gebied tussen Raai B en Raai D bij deze transporten aanzanden. De Drempel van Hansweert ligt in dit gebied. Om dit te verduidelijken is in Figuur 5.5 (blz. 21) een vectorplot van het residuele (netto) zandtransport over een getij weergegeven. Duidelijk is te zien dat volgens het model de netto zandtransporten uit noordelijke en uit zuidelijke richting naar de drempel zijn toegericht. Op de drempel neemt de transportgrootte weer af. Volgens het model zal er dus aanzanding op de Drempel van Hansweert plaatsvinden hetgeen overeen komt met de werkelijkheid. Deze overeenkomst is van groot belang voor verdere berekeningen, met name in Fase 2 (evaluatie beheersalternatieven).



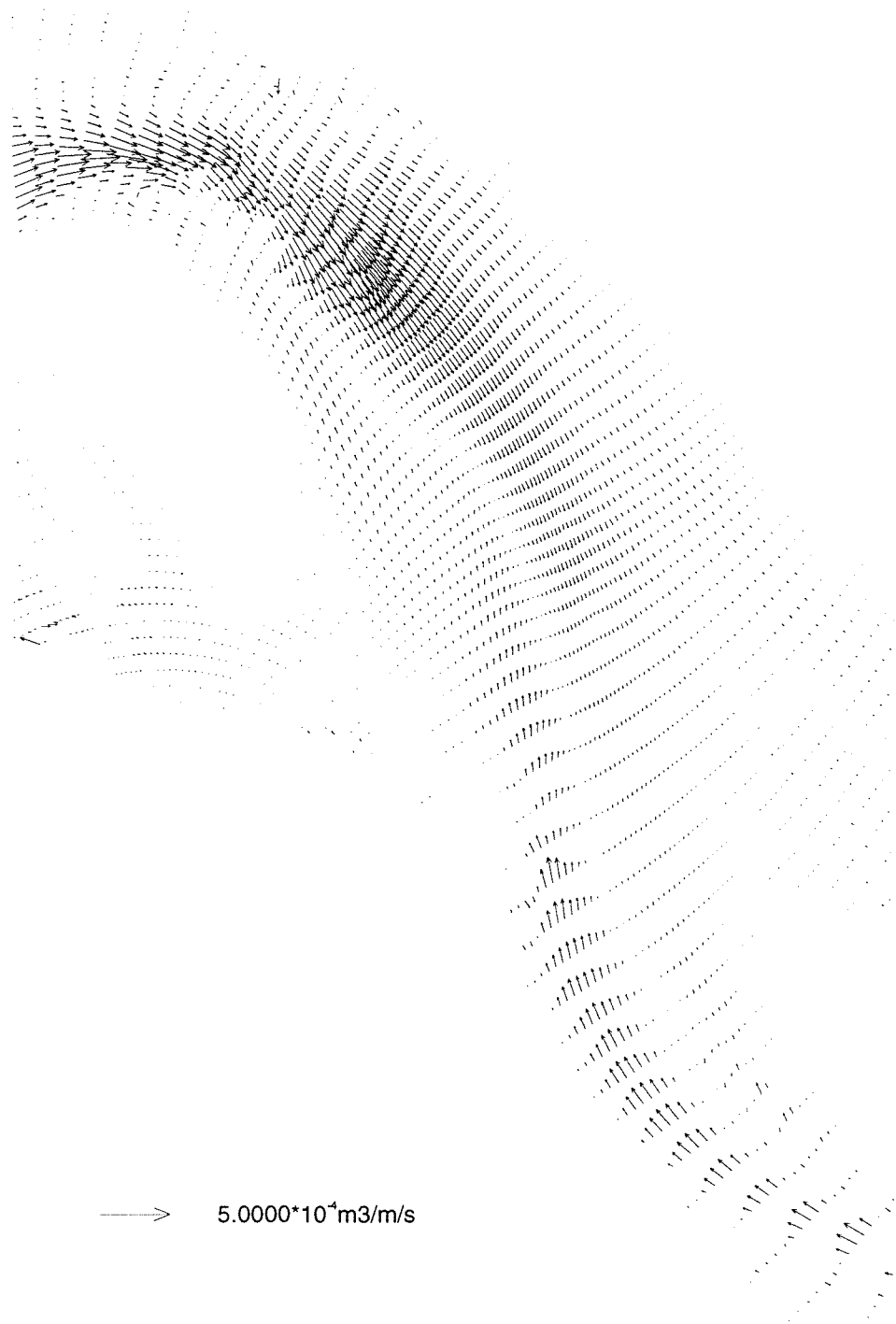
Figuur 5.3 Berekende dwarstransporten door de verschillende raaien ($k_s = 0.20 \text{ m}$).



Figuur 5.4 Absolute grootte berekend en gemeten sedimenttransport in meetpunten Raai B (17 april 1996, $k_s = 0.20$ m).

Het model moet in staat zijn de huidige situatie op behoorlijke wijze te simuleren wil het enige zin hebben de gevolgen van verschillende baggeralternatieven door te rekenen. Verder valt in Figuur 5.3 op dat de vloedtransporten rondom 1 uur aanzienlijk kleiner zijn dan rondom 14 uur.

In Figuur 5.4 zijn gemeten sedimenttransporten vergeleken met sedimenttransporten berekend met DELFT2D-MOR. De verschillen tussen metingen en berekeningen lopen ten tijde van de maximale sedimenttransporten (vloed) wel op tot een factor 3. In meetpunt 23 en meetpunt 21 zijn de berekende maximale transporten groter dan de gemeten maximale transporten, terwijl in meetpunt 35 en meetpunt 36 dit juist andersom is. Een aantal verklaringen zijn hiervoor te geven. Ten eerste komen de daadwerkelijke meetpunten nooit precies overeen met de meetpunten in het model. Ook zal de lokale geometrie tijdens de meting verschillen van de geometrie zoals die is geïmplementeerd in het model. Daardoor ontstaan er verschillen tussen gemeten en berekende stroomsnelheden die weer doorwerken op de berekende sedimenttransporten (zie ook Bijlage C). Uiteraard is het model een vereenvoudiging van de werkelijkheid waardoor er verschillen tussen meetresultaten en berekeningen kunnen zijn. De zandtransportformule die is gebruikt bij de berekeningen heeft ook zijn onnauwkeurigheden.



Figuur 5.4 Residuele sedimenttransporten optredend bij morfologisch getij (voor betekenis morfologisch getij zie paragraaf 6.3).

6. Opzet bodemontwikkelingsmodel

6.1 Inleiding

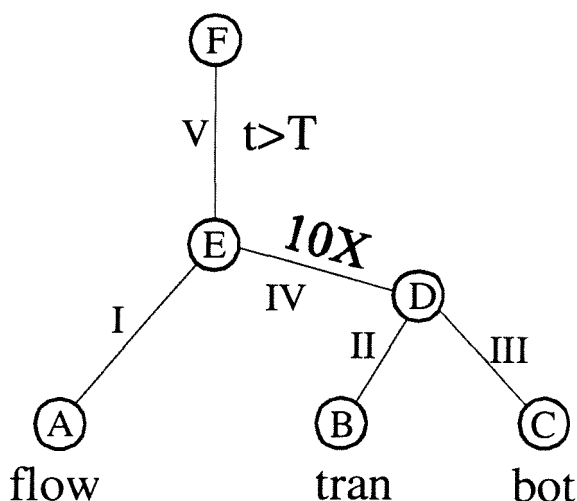
DELFT2D-MOR is een *morfologisch* model, d.w.z. dat het model in staat is veranderingen in de bodemligging over een bepaalde termijn te berekenen. Echter hoe langer deze termijn is, des te onnauwkeuriger zullen de resultaten zijn. De huidige *proces*modellen zijn niet geschikt om een periode van enkele decennia door te rekenen, enerzijds vanwege de nauwkeurigheid van de resultaten, anderzijds vanwege de rekentijd die onaanvaardbaar groot wordt.

In het kader van het drempelonderzoek is er voor gekozen om de bodemontwikkeling gedurende 1 jaar te berekenen. Om een dergelijke berekening te kunnen maken is er een schema nodig dat de onderlinge uitwisseling tussen de verschillende modules regelt. Dit wordt behandeld in paragraaf 6.2. In paragraaf 6.3 wordt de bepaling van het *morfologisch getij* behandeld. Dit morfologische getij dient om de rekentijden aanzienlijk te verkorten.

6.2 Schema morfologische berekeningen

DELFT2D-MOR maakt gebruik van een boomstructuur om de verschillende fysische processen onderling te koppelen. Het schema dat gebruikt is voor de toepassing van het Westerschelde model is gebruikt staat afgebeeld in Figuur 6.1. Deze boomstructuur bestaat uit *knopen* en *controllers*. De controllers, aangegeven met Romeinse cijfers, vormen de verbinding tussen de knopen en kunnen eventueel bepalen tot wanneer de functie van een bepaalde knoop moet worden uitgevoerd of wanneer deze knoop gepasseerd mag worden. De *eindknopen* (A, B en C) vertegenwoordigen elk een of meerdere subprocessen. De overige knopen zijn verbindingsknopen (D, E en F). In dit specifieke geval bestaat elke eindknoop uit een subproces (A = FLOW, B = TRAN, C = BOTT). DELFT2D-MOR doorloopt deze boomstructuur *van boven naar onderen* en *van links naar rechts*.

Om dit systeem enigszins te verduidelijken zal in deze alinea het schema uit Figuur 6.1 doorlopen worden. Het programma begint in *knoop F* en gaat dan via controller V naar knoop E. Knoop E vertegenwoordigt geen fysisch subproces (het is geen eindknoop). Via controller I wordt knoop A bereikt. De module FLOW wordt vervolgens 1 maal uitgevoerd; de waterbeweging wordt berekend. Vervolgens wordt via controller I, knoop E en controller IV, knoop D bereikt. Via controller II wordt eindknoop B bereikt: een sedimenttransport-



Figuur 6.1 Boomstructuur morfologische berekeningen DELFT2D-MOR.

berekening wordt uitgevoerd (op basis van de eerder berekende waterbeweging). De residuele transporten in elk roosterpunt worden vervolgens berekend. Via controller II, knoop D en controller III wordt eindknoop C bereikt. Op basis van de berekende residuele transporten wordt nu de bodemontwikkeling na één tijdstap bepaald. De morfologische tijdstap wordt automatisch bepaald aan de hand van het Courant-getal. Na het berekenen van de nieuwe bodemligging wordt via controller III en knoop D controller IV bereikt. Bij controller IV staat aangegeven dat deze 10 maal moet worden uitgevoerd. Dit heeft te maken met de zogenaamde *continuïteitscorrectie*. In plaats van opnieuw de gehele waterbeweging met FLOW door te rekenen (de bodemligging is namelijk veranderd) wordt de zogenaamde continuïteitscorrectie toegepast. Dit houdt in dat verondersteld wordt dat de debieten door alle celranden constant blijven, maar dat ten gevolge van de veranderde bodemligging de stroomsnelheden wel veranderen. Op basis van de veranderde stroomsnelheden kan de grootte van het sedimenttransport in elk punt opnieuw bepaald worden. Vervolgens kan weer een nieuwe bodem worden berekend, enz. Op deze wijze wordt vermeden dat telkens weer opnieuw de volledige waterbeweging moet worden doorgerekend. Bij dit specifieke schema wordt deze continuïteitscorrectie 10 maal toegepast. Eindknoop B en C worden dus achtereenvolgens 10 maal doorlopen voordat via controller IV knoop E wordt bereikt. Er wordt nu gecontroleerd of al aan de voorwaarde van controller V is voldaan. Als de lopende tijd (t) in het model groter is dan de van te voren opgegeven eindtijd (T) dan stopt de berekening. Zo niet, dan wordt de boom weer van voren af aan doorlopen. Dit proces gaat door totdat aan de voorwaarde $t > T$ is voldaan. Omdat controller IV altijd 10 maal doorlopen wordt, komt het vaak voor dat de lopende tijd (t) de eindtijd (T) overschrijdt. De simulatietijd is dan meer dan een jaar.

6.3 Morfologisch getij

6.3.1 Inleiding morfologisch getij

Om niet elke keer de waterbeweging gedurende een gehele doortij-springtij cyclus van 14 dagen door te hoeven te rekenen wordt er gebruik gemaakt van een zogenaamd *morfologisch getij*. Normaliter kunnen over een volledige doortij-springtij cyclus van een maand, op basis van de snelheidsvelden, de residuele transporten in elk punt berekend worden. Deze berekening kost echter bijzonder veel rekentijd bij toepassing voor grote modellen zoals dit Westerschelde model. Om de rekentijd te bekorten wordt gezocht naar een getij welk, als het gedurende twee weken herhaald zou worden, residuele transporten geeft die vergelijkbaar zijn met de berekende residuele transporten over een volledige doortij-springtij cyclus van een maand. Het getij dat daaraan voldoet wordt morfologisch getij genoemd. Het rekenen met een morfologisch getij levert een grote besparing van de rekentijd op omdat nu slechts één getij hoeft te worden doorgerekend in plaats van een gehele doortij-springtij cyclus.

6.3.2 Methode Latteux

Ter bepaling van het morfologisch getij wordt gebruik gemaakt van de methode Latteux (Latteux, 1995). Deze methode werkt als volgt:

- Bepaal in ieder rooster punt (x,y) het residueel transport over de doortij-springtij cyclus:

$$T_{ref}(x,y) \text{ (uiteindelijk in m}^3\text{/m/s)} \quad (6.1)$$

- Bepaal voor ieder getij (i) binnen de doortij-springtij cyclus het residueel transport in elk roosterpunt $T_i(x,y)$ en de verhouding:

$$\lambda_i(x,y) = \frac{T_i(x,y)}{T_{ref}(x,y)} \quad (6.2)$$

- Voor elk van de i getijden kan een over de n roosterpunten gemiddelde λ_i waarde worden bepaald.
- Bepaal variatiecoëfficiënt (σ_i) van de verhoudingen (λ_i) tussen de willekeurige transporten in de roosterpunten en de referentietransporten in de roosterpunten:

$$\sigma_i = \frac{1}{\lambda_i} \sqrt{\frac{\sum_{x,y} (\lambda_i(x,y) - \bar{\lambda}_i)^2}{n}} \quad (6.3)$$

Het getij dat de kleinste waarde geeft voor de variatiecoëfficiënt, benadert het referentietransport in het totale gebied het beste. Dat getij wordt in de berekeningen gebruikt. Er moet echter nog wel gecorrigeerd worden voor het verschil in gemiddelde transportgrootte tussen willekeurig en referentie getij.

$$\text{Correctiefactor} = \frac{1}{\bar{\lambda}_i} \quad (6.4)$$

Ter verduidelijking wordt een hypothetisch voorbeeld gegeven worden dat de laatste twee stappen verduidelijkt. Stel een willekeurig getij i geeft in alle roosterpunten (x,y) een sedimenttransport dat exact 2 maal zo groot is als het referentietransport in die betreffende punten. Alle waarden $\lambda_i(x,y)$ bedragen dan 2. De gemiddelde λ_i bedraagt dan ook 2. De variatiecoëfficiënt (Formule 6.3) wordt in dat geval 0. De fout is dus minimaal, echter de transporten zijn in elk punt twee maal zo groot als het referentietransport. Via de correctiefactor (Formule 6.4) wordt dit gecorrigeerd.

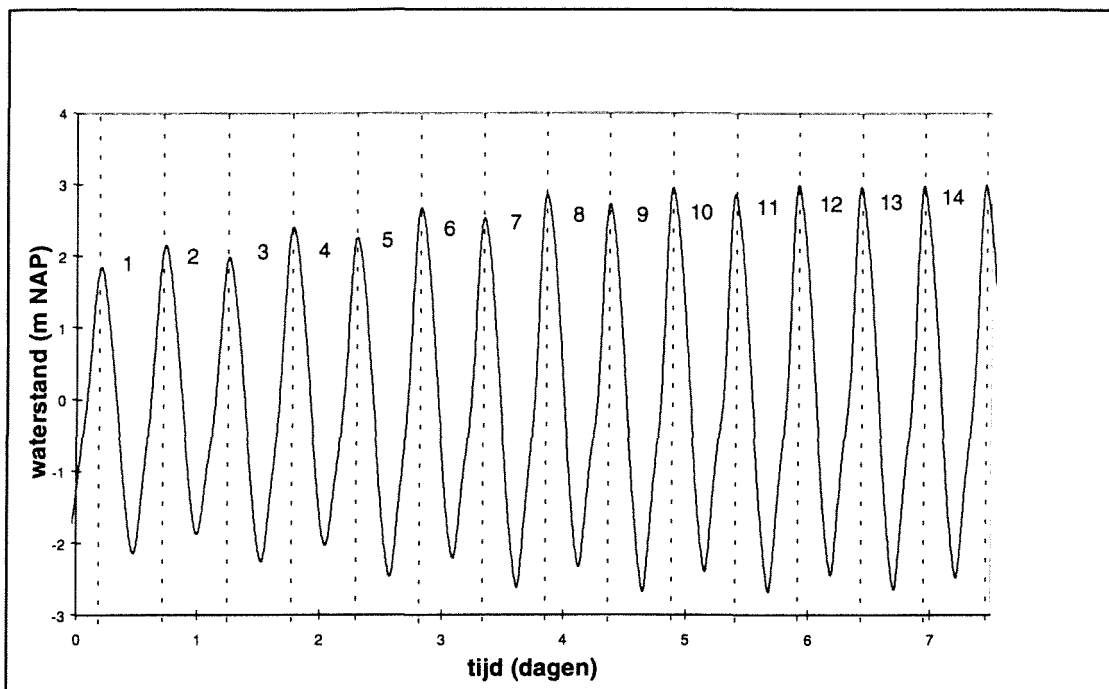
6.3.3 Bepaling morfologisch getij

Met behulp van de methode Latteux is een morfologisch getij bepaald voor de Westerschelde. Alleen de transporten in het gebied van interesse, rondom de Drempel van Hansweert, zijn in de berekening meegenomen. Vanwege de benodigde rekestijd en schijfruimte is voor bepaling van de referentietransporten niet een gehele doottij-springtij cyclus van een maand doorgerekend, maar een periode van 14 getijden (ongeveer 7 dagen), van doottij naar springtij. Dit is uiteraard iets onnauwkeuriger dan een volledige doottij-springtij cyclus van 14 dagen. De onnauwkeurigheid van de sedimenttransportformulering op zich is relatief dermate groot dat deze vereenvoudiging van de berekening geoorloofd is.

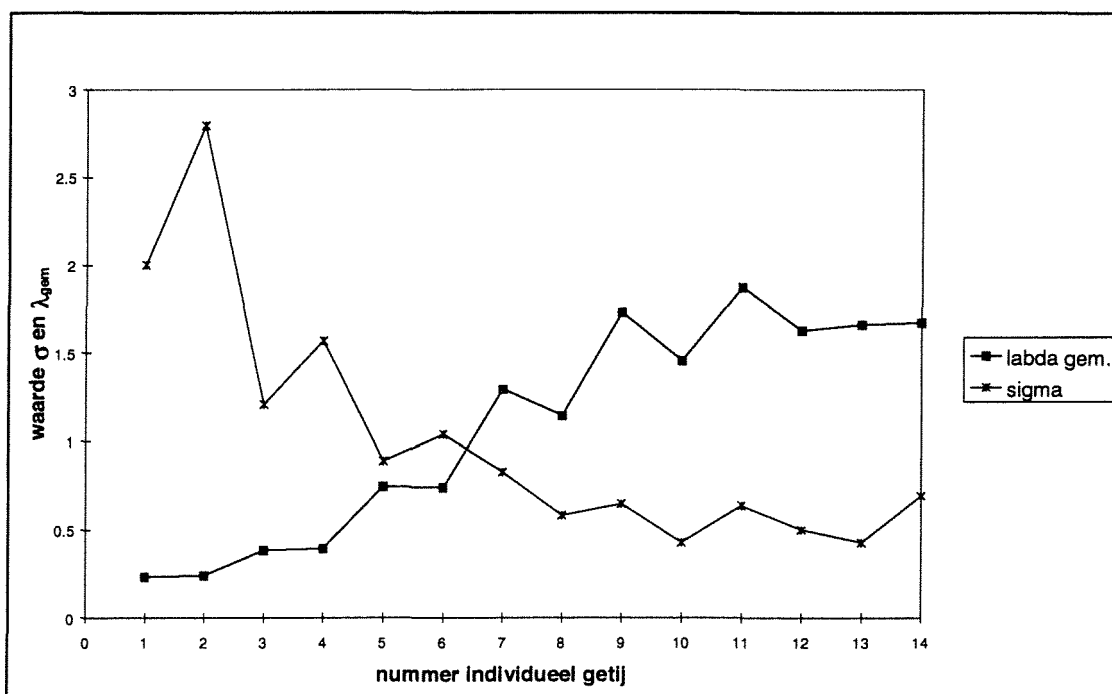
In Figuur 6.2 staat het verloop van de waterstanden bij Hansweert in de gekozen periode van 7 dagen weergegeven. De verschillende individuele getijden zijn genummerd van 1 t/m 14. Elk individueel getij begint en eindigt bij hoogwater.

In Figuur 6.3 staat voor ieder individueel getij uitgezet hoe groot de variatiecoëfficiënt en de gemiddelde λ_i zijn. Uit Figuur 6.3 blijkt dat voor getij nr.10 de variatiecoëfficiënt minimaal is ($\sigma = 0,42$). Dit getij wordt in verdere berekeningen als morfologisch getij gebruikt. De gemiddelde λ_i bedraagt 1,46.

De gemiddelde getijslag van de halve doottij-springtij cyclus op basis van de berekeningen bedraagt 4,98 m. De getijslag van het gekozen morfologisch getij bedraagt 5,29 m, dat is



Figuur 6.2 Waterstanden berekend bij Hansweert; van doottij naar springtij.



Figuur 6.3 Waarden variatiecoëfficiënt (σ) en λ_{gem} voor de verschillende individuele getijden.

ongeveer 1,06 maal zo groot als de gemiddelde getijslag op basis van de berekeningen. Getij nr. 10 overschat het gemiddelde transport met een factor 1,46. In het verleden werd vaak als morfologisch getij $1,1 \cdot$ gemiddeld getij genomen, echter zonder enige correctiefactor.

Doordat de residuele transporten van het morfologisch getij gemiddeld 1,46 maal zo groot zijn als het referentietransport, moet ook de simulatietijd aangepast worden. Wil men de

bodemontwikkeling gedurende 1 jaar simuleren, dan kan men volstaan met een simulatieperiode van $1/1,46 \approx 0.68$ jaar.

Aan de hand van het schema behandeld in paragraaf 6.2 en gebruik makend van het morfologische getij zijn berekeningen gemaakt van de bodemontwikkeling. Deze berekeningen worden behandeld in Hoofdstuk 7 en 8.

7. Simulatie autonome ontwikkeling

7.1 Inleiding

In de eerste fase van dit project worden twee situaties onderzocht; ten eerste de autonome ontwikkeling (hoe ziet de bodemontwikkeling eruit als er niet wordt gebaggerd?) en ten tweede de ontwikkeling als gevolg van het huidige baggerbeleid (T0 situatie). De autonome ontwikkeling wordt in dit hoofdstuk besproken; het huidige baggerbeleid in het volgende hoofdstuk. Allereerst zal in paragraaf 7.2 de "gemeten" autonome ontwikkeling van het gebied besproken worden. Deze gemeten ontwikkeling zal vergeleken worden met de resultaten van de berekeningen. De berekeningsresultaten staan in paragraaf 7.3.

7.2 Autonome ontwikkeling: metingen

7.2.1 Periode 1990-1996

De ontwikkeling van de morfologie rondom de Drempel van Hansweert wordt uitvoerig behandeld in Tank (1997c). Relevante resultaten uit Tank (1997c) met betrekking tot de berekeningen worden in deze paragraaf weergegeven.

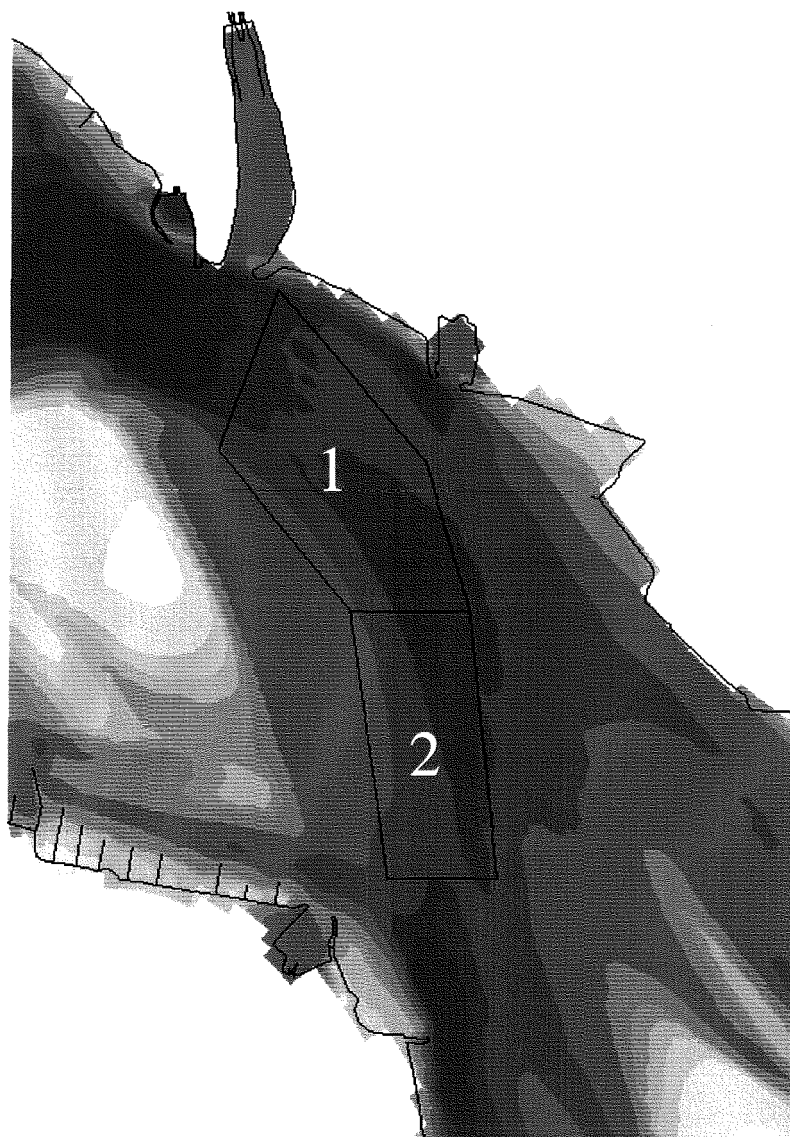
Om een beeld te krijgen van de ontwikkeling van de Drempel van Hansweert over een periode van meerdere jaren zijn de lodingsgegevens van de periode 1990-1996 onderzocht. Gebruik is gemaakt van de driemaandelijke lodingen van de Westerschelde die digitaal beschikbaar zijn. Er zijn twee vakken gedefinieerd (zie Figuur 7.1) waarvoor de ontwikkelingen van de gemiddelde bodemdieptes zijn berekend. Er is gekozen voor twee vakken omdat er aanwijzingen zijn dat de Drempel van Hansweert zich enigszins lijkt te splitsen in een noordelijk en zuidelijk deel (Tank, 1997c). De oppervlaktes van de vakken staan vermeld in Tabel 7.1.

Vak	Oppervlakte (m ²)
1	1,87*10 ⁶
2	1,38*10 ⁶
1&2	3,25*10 ⁶

Tabel 7.1 Oppervlaktes gedefinieerde vakken.

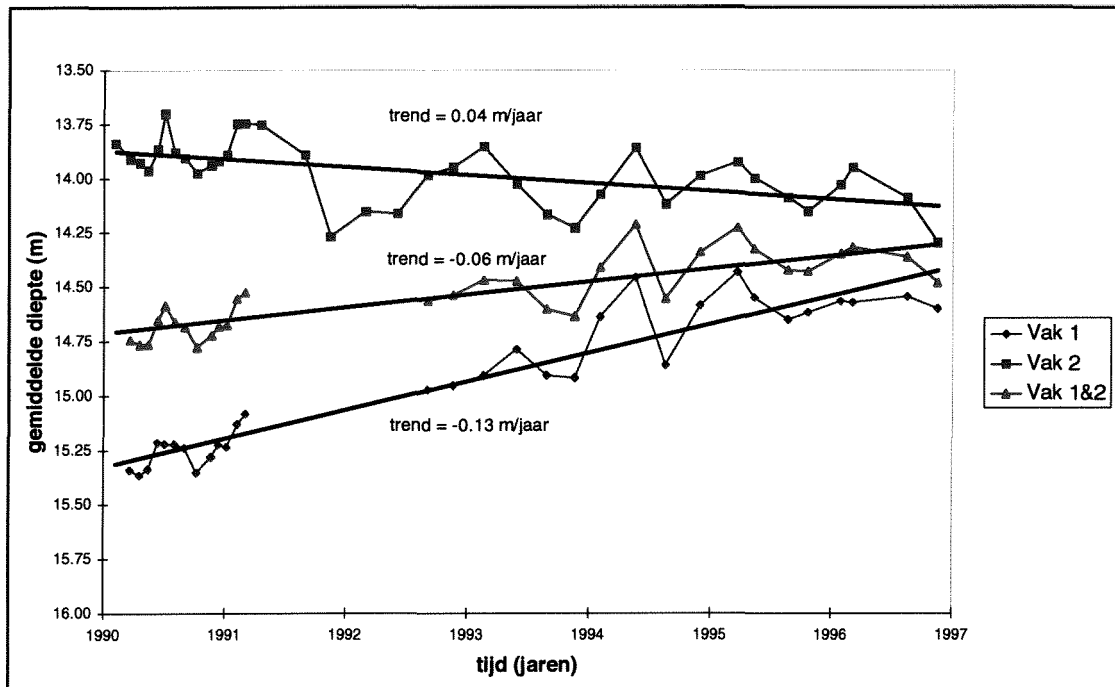
In Figuur 7.2 staat de ontwikkeling aangegeven van de gemiddelde dieptes van Vak 1, Vak 2, en Vak 1 en 2 samen (=Vak 1&2). Deze berekeningen zijn gebaseerd op de lodingsgegevens en zijn *niet gecorrigeerd* voor de hoeveelheden gebaggerd materiaal in het gebied. Te zien is dat Vak 1 (het noordelijke gebied) verondiept met een gemiddelde trend van 0,13 m/jaar. Het zuidelijke gebied verdiept met een trend van 0,04 m/jaar. Vak 1&2 vertoont een verondieping van gemiddeld 0,06 m/jaar (st.dev = 0,09 m).

Om een indruk te krijgen van de autonome ontwikkeling moeten deze cijfers gecorrigeerd worden voor de gebaggerde hoeveelheden sediment in het gebied. Figuur 7.3 vertoont de toename van de gemiddelde bodemdiepte in Vak 1&2 ten gevolge van *alleen* de gebaggerde hoeveelheden materiaal. Deze toename in bodemdiepte is berekend door de cumulatieve gebaggerde hoeveelheden sediment (in m³) te delen door het oppervlak van Vak 1&2. (Vanwege de variatie in plaats waar maandelijks gebaggerd werd en het ontbreken van nauwkeurige gegevens daaromtrent, is er geen verdeling gemaakt tussen Vak 1 en Vak 2). De trendlijn van de toename van de gemiddelde diepte ten gevolge van het baggerwerk alleen

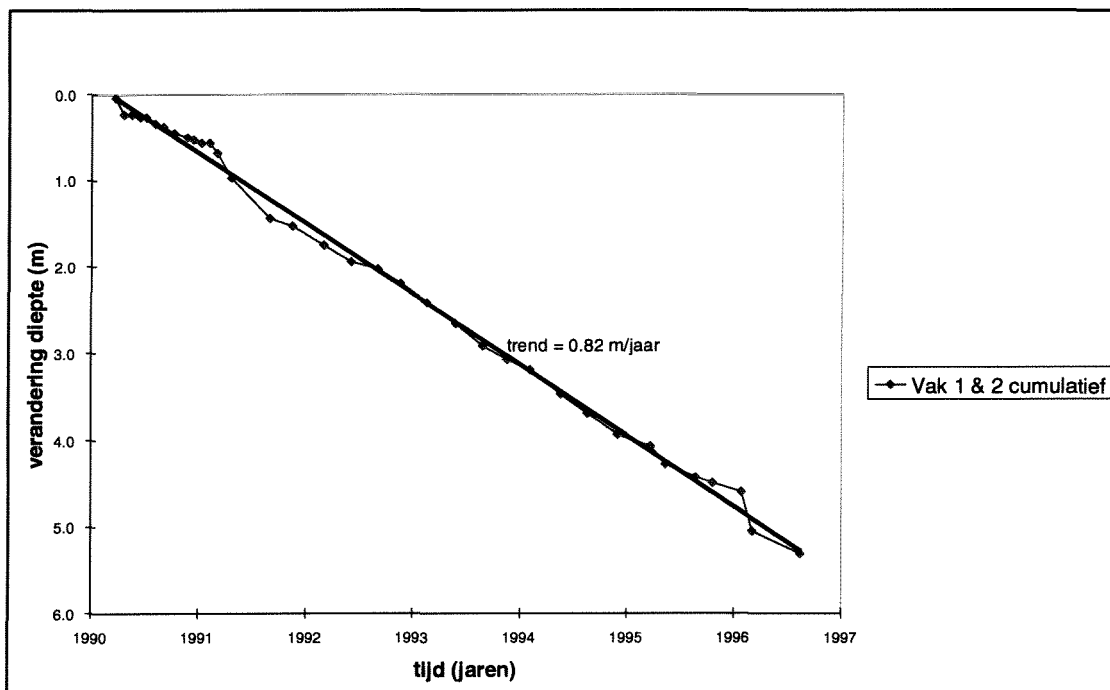


Diepte (m) +↓

Figuur 7.1 Lokatie Vak 1 en Vak 2 op de Drempel van Hansweert.



Figuur 7.2 Ontwikkeling gemiddelde dieptes Vak 1, Vak 2 en Vak 1&2 in de periode 1990 - 1996.



Figuur 7.3 Toename gemiddelde diepte Vak 1&2 t.g.v. alléén de baggeractiviteiten in de periode 1990-1996.

geeft aan dat deze diepte gemiddeld met 0,82 m/jaar (st.dev. = 0,10 m) toeneemt. Gemiddeld over de laatste 6 jaar zandt Vak1&2 met 0,06 m/jaar aan, terwijl de gemiddelde bodemverdieping in Vak1&2 ten gevolge van de baggerwerkzaamheden 0,82 m/jaar bedraagt. Onder de aanname dat de baggerwerkzaamheden de autonome ontwikkeling niet al te zeer verstoren, kan dus gesteld worden dat de trend van de autonome ontwikkeling het verschil

bedraagt tussen de daadwerkelijk gemeten aanzanding (= 0,06 m/jaar) en de verdieping ten gevolge van het baggerwerk (= 0,82 m/jaar):

De trend in de autonome ontwikkeling van het drempelvak in de periode 1990-1996 wordt dan:

$$0,06 + 0,82 = 0,88 \text{ m/jaar aanzanding (st.dev. = 0,13 m).}$$

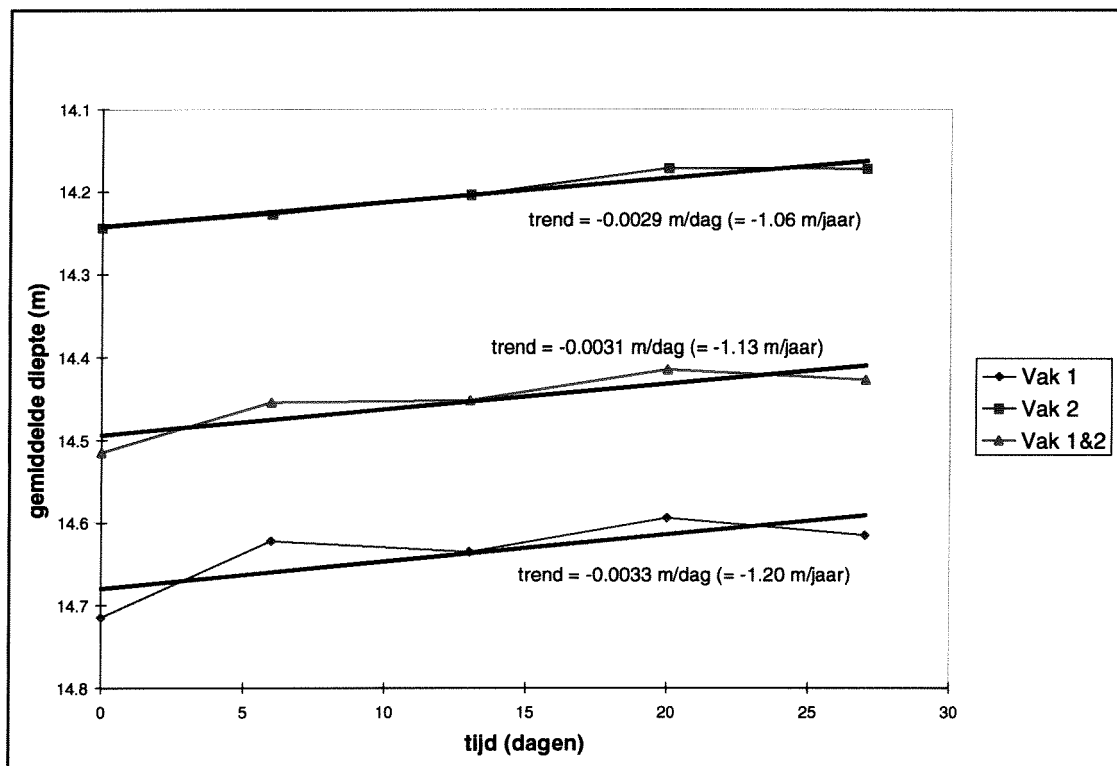
De aanname dat de baggerwerkzaamheden de trend van de autonome ontwikkeling niet al te zeer beïnvloeden is weliswaar enigszins twijfelachtig, maar met het gebruik van deze aanname wordt wel een goede indruk van de orde van grootte van de autonome ontwikkeling in het gebied verkregen. (Er is recentelijk geen langdurige periode geweest waarin niet werd gebaggerd zodat de aanname niet direct kan worden geverifieerd).

Deze resultaten zullen gebruikt worden voor een vergelijking met de berekeningen.

7.2.2 Periode 29 september 1995- 26 oktober 1995

Gedurende een maand zijn in september en oktober 1995 een vijftal detaillodungen verricht op de Drempel van Hansweert. De resultaten van deze lodungen worden uitvoerig besproken in Tank, 1997c.

Tijdens deze maand zijn er geen baggerwerkzaamheden verricht. In de maand ervoor is er meer gebaggerd dan normaal. Het verloop in de tijd van de gemiddelde dieptes in de diverse vakken is uitgezet in Figuur 7.4. Zowel Vak 1 als Vak 2 zanden sterk aan. De gemiddelde trend in Vak1&2 bedraagt (omgerekend naar jaren) 1,13 m/jaar (st.dev.= 0,02 m). Dit is in dezelfde orde van grootte als de trend van de autonome ontwikkeling in de periode 1990-1996, die 0,88 m aanzanding per jaar bedroeg. Geconcludeerd mag worden dat beide waarden goed in overstemming zijn met elkaar en bruikbaar zijn voor validatie van de berekeningsresultaten. De trend van 1990 - 1996 zal verder als uitgangspunt genomen worden.



Figuur 7.4 Ontwikkeling gemiddelde dieptes Vak 1, Vak 2 en Vak 1&2 in de periode 29 september tot 26 oktober 1995 (geen baggeractiviteiten in deze periode).

7.3 Autonome ontwikkeling: berekeningen

De autonome ontwikkeling van het gebied rondom de Drempel van Hansweert is gesimuleerd met DELFT2D-MOR. De berekening van de autonome ontwikkeling geeft een beeld van hoe de sedimentatie-erosie patronen bij de huidige bodemligging zouden zijn als er verder geen menselijke ingrepen (baggeren e.d.) zouden plaatsvinden.

Als basis voor de berekeningen is de bodem van 1996 genomen zoals verstrekt door het RIKZ. De bodemontwikkeling gedurende 1 jaar is berekend³.

De berekeningen zijn uitgevoerd volgens het rekenschema dat is uitgewerkt in Hoofdstuk 6. In Figuur 7.5 is de bodemontwikkeling na 1 jaar tijd afgebeeld. Duidelijk is te zien hoe zich een soort onderwaterspit heeft uitgebouwd vanaf de Plaat van Ossenisse richting de drempel. De diepte bedraagt plaatselijk minder dan 5 m. De aanzanding in dat gebied is groot.

Om een beter beeld te krijgen van de berekende bodemontwikkeling staan in Figuur 7.6 de sedimentatie- en erosiepatronen na één jaar tijd afgebeeld. In Figuur 7.6 staan ook de baggervakken aangegeven. Deze gebieden zijn gebaseerd op gegevens uit de periode 1991-1994. De baggervakken geven de uiterste begrenzingen aan van de baggergebieden in die periode. In Figuur 7.7 staan dezelfde sedimentatie-erosiepatronen afgebeeld, nu echter met de lokaties van de evaluatievakken Vak 1 en Vak 2.

De binnenbocht boven de Plaat van Ossenisse zandt sterk aan, deels ten gevolge van de secundaire stroming die sedimenttransport genereert van de buitenbocht naar de binnenbocht. In de Overloop van Hansweert treedt erosie op. Te zien is dat de erosiekuil zich ten dele uitstrekt tot binnen het baggervak op de Drempel van Hansweert. Binnen dit baggervak gaat de erosie over in sedimentatie. Plaatselijk komt sedimentatie van meer dan 5 m voor. De sterke aanzanding die heeft geleid tot de vorming van een soort onderwaterspit was ook al duidelijk herkenbaar in Figuur 7.5.

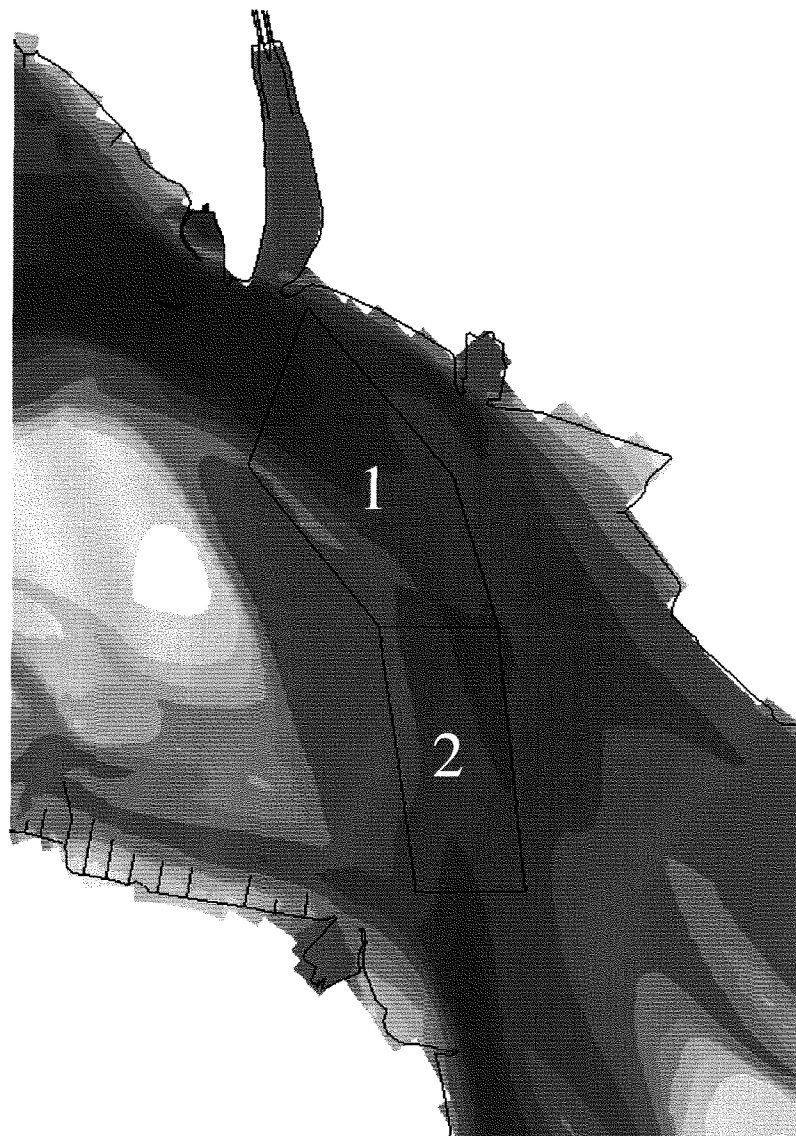
Ook in de binnenbocht van het Zuidergat vindt sedimentatie plaats. In deze binnenbocht bevindt zich in werkelijkheid ook een baggerlokatie. De lokaties waar volgens de berekeningen aanzanding plaatsvindt, komen in grote lijnen overeen met de gebieden waar in werkelijkheid ook aanzanding plaatsvindt.

Om nu ook kwantitatief een uitspraak te doen, is het verloop van de gemiddelde dieptes in de vakken, zoals gedefinieerd in paragraaf 7.2 (zie ook Figuur 7.7), bepaald (zie Figuur 7.8 en Tabel 7.2). Te zien is dat de hoeveelheid aanzanding van Vak 1 en Vak 2 na 1 jaar tijd verschillend is (Vak 1: 0,48 m; Vak 2: 0,68 m. De aanzanding van Vak 1&2 bedraagt 0,57 m in één jaar tijd. Deze aanzanding komt qua grootte redelijk goed overeen met de langjarige trend op basis van de metingen (= 0,88 m/jaar). Het model berekent een kleinere aanzanding in het geëvalueerde gebied. Een oorzaak voor het verschil ligt in het feit dat de erosiekuil boven de plaat van Ossenisse zich uitstrekt tot in Vak 1 en daarmee de aanzanding in het overige gedeelte van Vak 1 voor een deel te niet doet in de volumeberekening. Een soortgelijk effect treedt op in Vak 2, waar in de overgang van het Zuidergat naar de Drempel van Hansweert ook een erosiekuil ontstaat. Deze effecten beïnvloeden de vergelijking. Ook

Vak	Aanzanding na 1 jaar
Vak 1	0,48 m
Vak 2	0,68 m
Vak 1&2	0,57 m

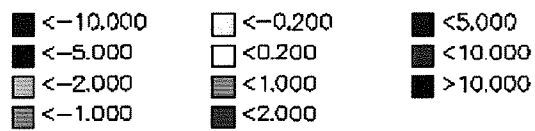
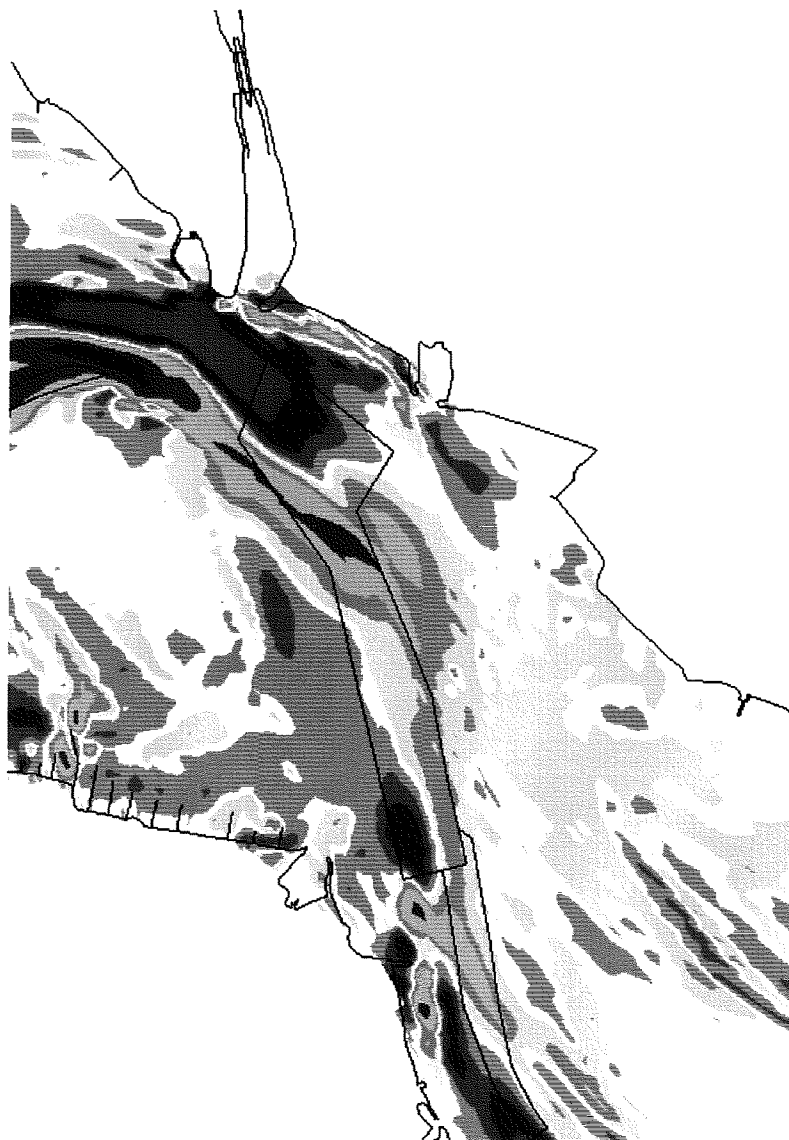
Tabel 7.2 Hoeveelheid aanzanding in de verschillende vakken (simulatie autonome ontwikkeling).

³ Vanwege het feit dat er gebruik gemaakt is van een morfologisch getij, is de daadwerkelijke simulatieperiode een factor 1.46 kleiner dan 1 jaar. Dit is uitgelegd in paragraaf 6.3.3 (blz. 24).



Diepte (m) +↓

Figuur 7.5 Berekende bodemligging na 1 jaar simulatietijd; lokaties Vak 1 en Vak 2.



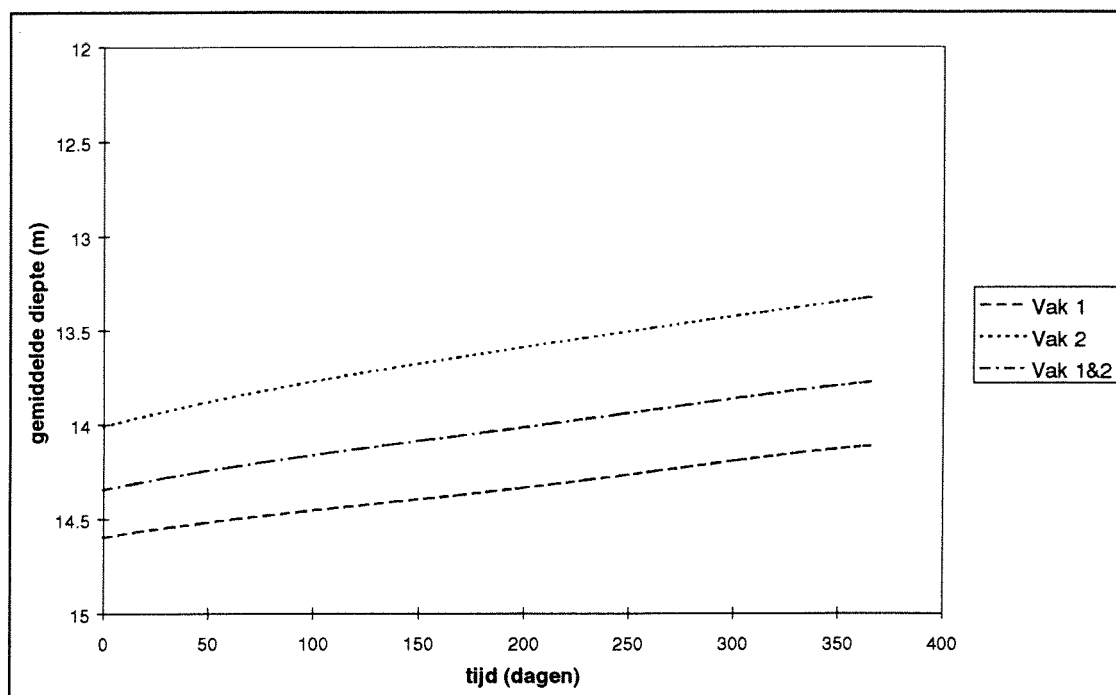
Erosie (m) positief Sedimentatie (m) negatief

Figuur 7.6 Sedimentatie- en erosiepatronen na 1 jaar bodemontwikkeling; lokaties baggervakken periode 1991-1994.



Erosie (m) positief Sedimentatie (m) negatief

Figuur 7.7 Sedimentatie- en erosiepatronen na 1 jaar bodemontwikkeling: lokaties Vak 1 en Vak 2.



Figuur 7.8 Verandering gemiddelde dieptes in Vak 1, Vak 2 en Vak 1&2 volgens de berekeningen.

de ligging van Vak 1 en Vak 2 beïnvloedt uiteraard de vergelijking tussen gemeten en berekende ontwikkelingen, zeker vanwege de plaatselijk grootte verschillen in erosie en sedimentatie. Een andere ligging van de vakken zou weer andere resultaten tot gevolg kunnen hebben.

Uit Figuur 7.8 blijkt ook dat de gesimuleerde ontwikkeling in de tijd nagenoeg lineair is. Mogelijkerwijs is de drempel dermate ver uit evenwicht (voor zover er evenwicht bestaat) dat de ontwikkelingen lineair in de tijd lijken op een tijdschaal van één jaar.

7.4 Conclusies

De vergelijking van de berekeningsresultaten met de analyse van de meetresultaten laat zien dat in grote lijnen de lokaties van de gemeten en berekende sedimentatiegebieden met elkaar overeenkomen. Er vindt aanzanding plaats in het drempelgebied en ook in de binnenbocht boven de Plaat van Ossensisse en in de binnenbocht naar het Zuidergat.

De berekende erosie in het gebied noordelijk van de Plaat van Ossensisse is echter erg groot. De erosiekuil strekt zich uit tot in het baggergebied (tot in Vak 1). Ook de aanzanding in de binnenbocht boven de Plaat van Ossensisse is erg groot. Het model lijkt de secundaire stromingseffecten (= aanzanding binnenbocht) te overdrijven.

De berekende aanzanding in Vak 1&2 (= 0,57 m) komt redelijk goed overeen met de gemiddelde trend op basis van metingen over de laatste jaren (= 0,88 m/jaar).

Gezien de onnauwkeurigheden van dit soort berekeningen mogen de resultaten relatief goed worden genoemd. Het model blijft een sterke vereenvoudiging van de werkelijkheid, waar lang niet alle relevante fysische processen in gemodelleerd zijn, of op de juiste wijze gemodelleerd zijn. De kennis omtrent morfologische ontwikkelingen op langere termijn is beperkt vanwege de complexiteit van het geheel.

Afgezien van de tekortkomingen van de schematisatie van de fysische processen door het model, zijn er ook een aantal andere oorzaken die voor verschillen tussen berekende en gemeten ontwikkeling kunnen zorgen. Het gebruik van een morfologisch getij om de berekeningstijd te verkorten zal de werkelijkheid minder goed nabootsen dan het telkens weer doorrekenen van een volledige doodtij-springtij cyclus. Als randvoorwaarde wordt er gewerkt met harmonische

componenten van waterstanden. In werkelijkheid komen er bijvoorbeeld op willekeurige tijdstippen stormen voor die grote morfologische gevolgen kunnen hebben. Theoretisch zou het gebruik van volledige tijdseries van gemeten waterstanden de werkelijkheid op de beste wijze nabootsen. Dit is echter ondoenlijk qua rekentijd, vandaar het gebruik van een morfologisch getij.

Bij de huidige berekeningen is uitgegaan van de bodemgegevens van 1996. De bodemligging verandert continu. Het gebruik van een andere bodemligging (uit bijvoorbeeld een ander jaar) zou weer iets andere resultaten tot gevolg kunnen hebben.

8. Simulatie huidige baggerstrategie

8.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de simulatie van de huidige baggerstrategie besproken. In paragraaf 8.2 wordt uitgelegd op welke wijze deze simulatie is uitgevoerd. In paragraaf 8.3 worden de resultaten besproken en vergeleken met meetgegevens. De conclusies volgen in paragraaf 8.4.

8.2 Simulatie huidige baggerstrategie

In het huidige vaarwegbeleid wordt er min of meer continu gebaggerd op de Westerschelde. Op de Drempel van Hansweert werd er gedurende de laatste jaren (1990-1996) gemiddeld ongeveer $2,65 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ /jaar gebaggerd. In Figuur 8.1 staat het gebied afgebeeld waarbinnen in de periode 1991-1994 is gebaggerd. Dit baggerwerk is uiteraard niet geheel evenredig over het gehele gebied verdeeld.

Bij de simulatie met DELFT2D-MOR is aangenomen dat het baggerwerk wel evenredig over dit gebied is verdeeld, omdat preciezere gegevens wat betreft de baggerlocaties en hoeveelheden ontbreken. De huidige DELFT2D-MOR versie heeft (nog) niet de mogelijkheden om tijdens een morfologische berekening baggerwerkzaamheden binnen een bepaald gebied te simuleren. Met andere woorden, tijdens een morfologische berekening is het niet mogelijk de diepte in een bepaald gebied te verlagen. Om nu toch een simulatie van de huidige baggerstrategie te kunnen doen, is besloten om 12 maal per jaar een gelijke hoeveelheid zand te baggeren in een bepaald gebied (de gebaggerde hoeveelheid zand wordt dus niet teruggestort bij deze berekeningen).

Hiervoor is het nodig dat de berekening na een maand onderbroken wordt, waarna m.b.v een hiervoor geschreven programma in het aangegeven gebied de bodem wordt verlaagd.

Er is voor gekozen om binnen een gebied te baggeren dat grotendeels overeenkomt met het baggergebied, maar dat binnen de grenzen ligt van de reeds eerder gedefinieerde Vak 1 en Vak 2. Dit gebied staat afgebeeld in Figuur 8.2, samen met Vak 1 en Vak 2.

Het baggergebied in Figuur 8.2 heeft een oppervlakte van $2,07 \cdot 10^6 \text{ m}^2$. Per jaar wordt er $2,65 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ gebaggerd. Per maand zal de bodem dan met $2,65 \cdot 10^6 / 2,07 \cdot 10^6 / 12 \approx 0,11 \text{ m}$ verlaagd moeten worden.

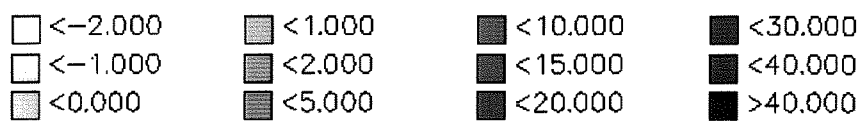
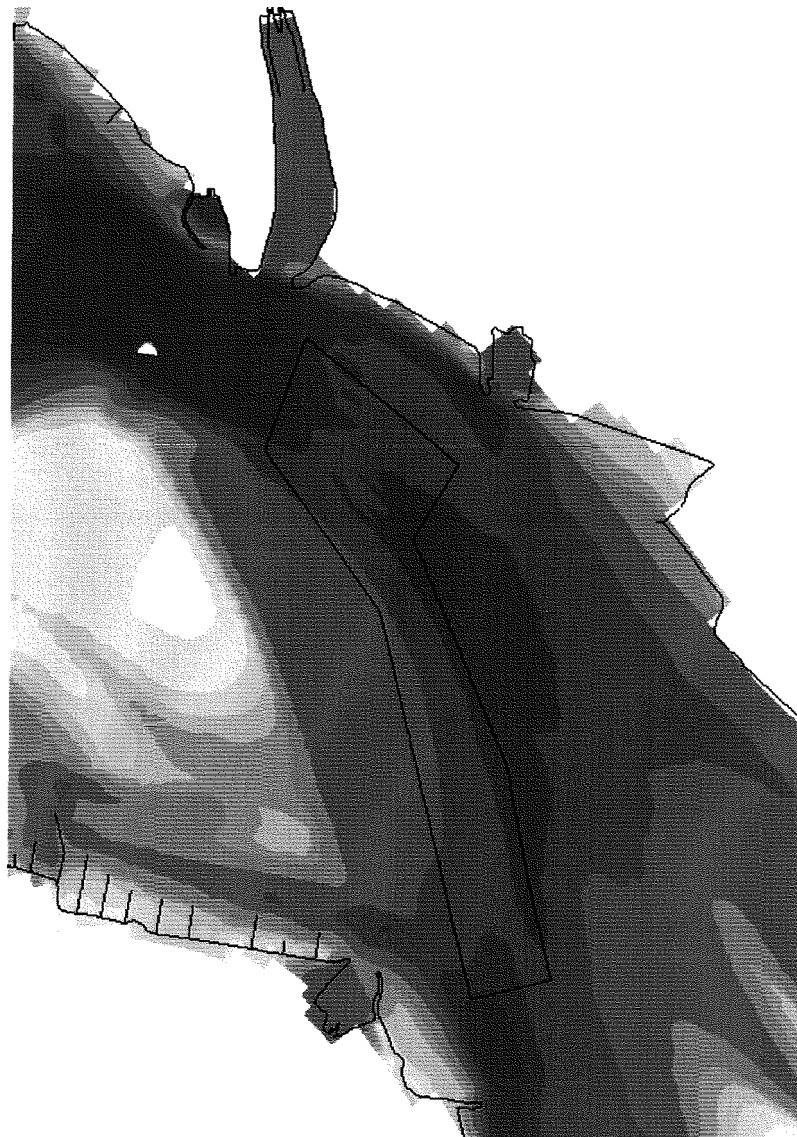
Bij de simulatie van de huidige baggerstrategie wordt dus maandelijks in het baggergebied, aangegeven in Figuur 8.2, de bodem verlaagd met ongeveer 0,11 m.

8.3 Resultaten simulatie

Met DELFT2D-MOR is een periode van een jaar gesimuleerd. In dat jaar is dus 12 maal gebaggerd. De bodem van 1996 is genomen als uitgangspunt, net zoals bij de berekening van de autonome ontwikkeling in Hoofdstuk 7.

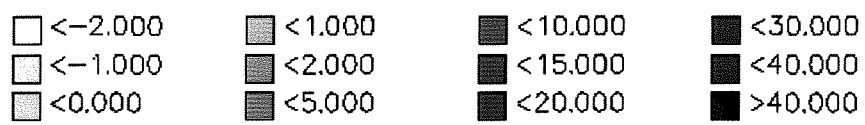
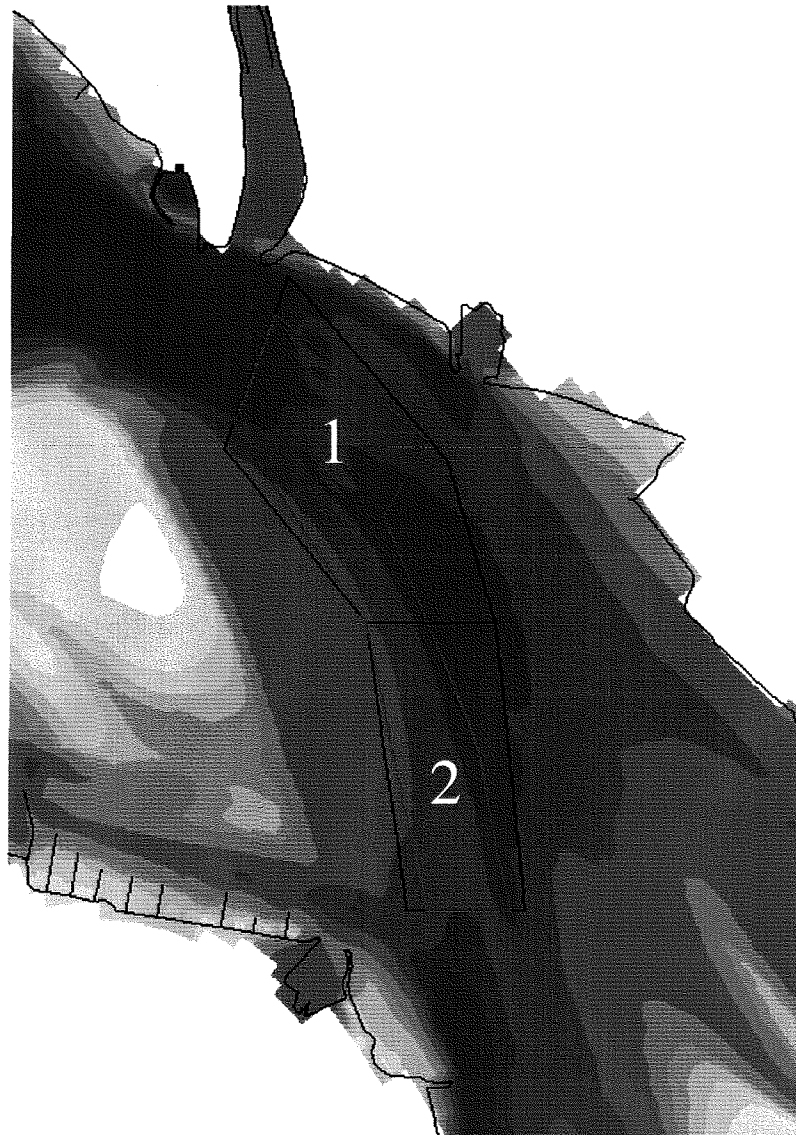
In Figuur 8.3 staat de berekende bodemligging na 1 jaar simulatietijd afgebeeld. Net zoals bij de berekeningen van de autonome ontwikkelingen is te zien dat er zich een onderwaterspit heeft uitgebouwd vanaf de Plaat van Ossensisse.

Figuur 8.4 laat zien hoe de sedimentatie-erosie patronen zijn na 1 jaar tijd. In Figuur 8.4 staan ook de gedefinieerde evaluatievakken Vak 1 en Vak 2 en het baggervak weergegeven. De effecten van het baggerwerk zijn duidelijk zichtbaar. Vooral in het zuidelijke deel van de Drempel van Hansweert is de diepte hoofdzakelijk toegenomen. De toename van de



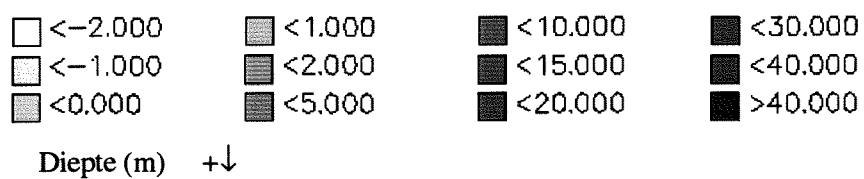
Diepte (m) +↓

Figuur 8.1 Lokatie baggervak gebaseerd op gegevens 1991-1994.

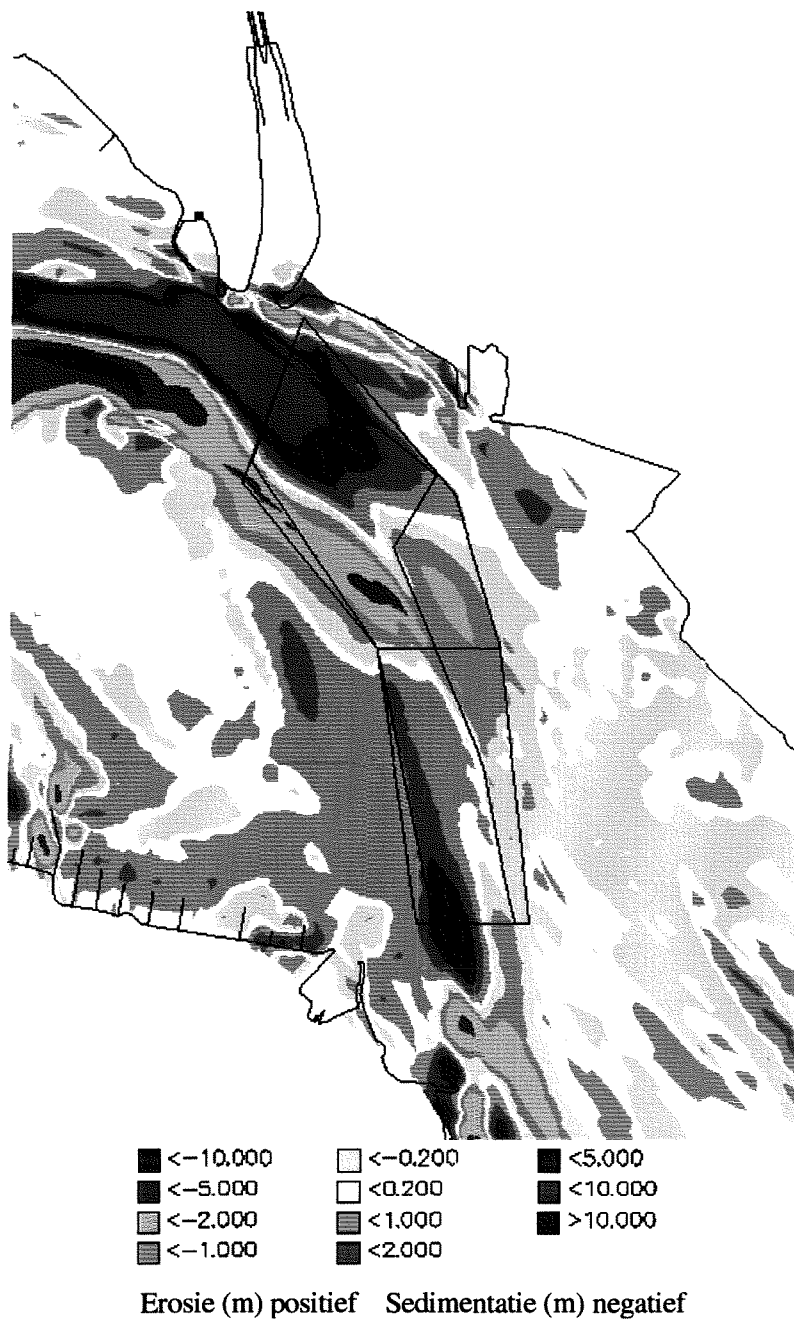


Diepte (m) +↓

Figuur 8.2 Lokaties Vak 1, Vak 2 en het baggervak (rood aangegeven) toegepast in het model.



Figuur 8.3 Berekende bodemligging na 1 jaar simulatietijd.



Figuur 8.4 Sedimentatie- en erosiepatronen na 1 jaar bodemontwikkeling; lokaties Vak 1, Vak 2 en baggervak.

bodemdiepte loopt plaatselijk op tot meer dan 5 m. In de gebieden van Vak 2 waar niet gebaggerd wordt, het noordoostelijke deel, vindt wel sedimentatie plaats.

In het noordelijk deel van de drempel (Vak 1) neemt de bodemdiepte plaatselijk af, ook in het gebied waar de bodem wordt verlaagd. In het noordelijke deel van Vak 1 is er veel erosie, net zoals ook bij de berekeningen van de autonome ontwikkeling in het vorige hoofdstuk al was geconstateerd. Plaatselijk is er erosie tot meer dan 5 m.

In de binnenbocht noordelijk van de Plaat van Ossenisse vindt ook weer veel sedimentatie plaats. Plaatselijk neemt de bodemdiepte af met meer dan 10 m. De secundaire stromingseffecten lijken erg groot.

Net zoals voor de autonome ontwikkeling is van Vak 1, Vak 2 en Vak 1&2 is het verloop van de gemiddelde diepte bepaald (Figuur 8.5). Het verloop van de gemiddelde diepte in het baggervak zelf staat ook in Figuur 8.5 afgebeeld. Na elke maand is er een sprong in de gemiddelde bodemdiepte ten gevolge van het baggeren.

De gemiddelde bodemdiepte neemt het sterkste toe in het baggervak zelf, na één jaar tijd ongeveer 0,77 m. Vak 1 vertoont na één jaar een toename van de bodemdiepte van 0,28 m, Vak 2 een toename van 0,09 m. De bodemdiepte van Vak 1&2 is gemiddeld met 0,20 m gedaald.

Om de aanzandingstrend te bestuderen en te vergelijken met de autonome ontwikkeling is de bodemontwikkeling gecorrigeerd voor het baggerwerk. In Figuur 8.6 is de gecorrigeerde bodemontwikkeling in de verschillende vakken weergegeven. In Vak 1&2 is een gemiddelde aanzanding van 0,62 m na 1 jaar te zien. De berekening van de autonome ontwikkeling liet een aanzanding van 0,57 m na 1 jaar zien. De aanzanding in Vak 1&2 is bij de simulatie van de huidige baggerstrategie ongeveer 8 % groter dan bij de simulatie van de autonome ontwikkeling. Een logische verklaring hiervoor is dat door het baggeren de drempel op overdiepte wordt gehouden en dat daardoor het gebied ook sneller aanzandt. Deze constatering is van belang voor het evalueren van de baggeralternatieven in de tweede fase, waar ook de frequentie van het baggeren zal worden gevarieerd.

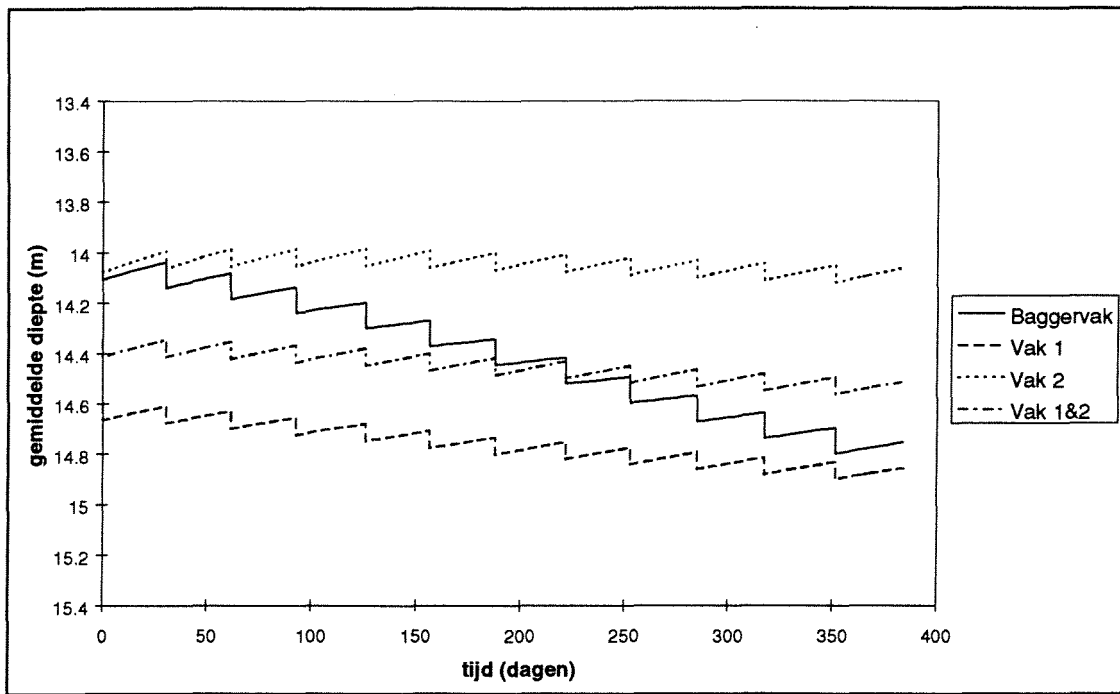
Vak	Aanzanding na 1 jaar (gecorrigeerd voor baggerwerk)
Vak 1	0,53 m
Vak 2	0,73 m
Vak 1&2	0,62 m
Baggervak	0,45 m

Tabel 8.1 Aanzanding in de verschillende vakken na 1 jaar tijd (gecorrigeerd voor hoeveelheid baggerwerk).

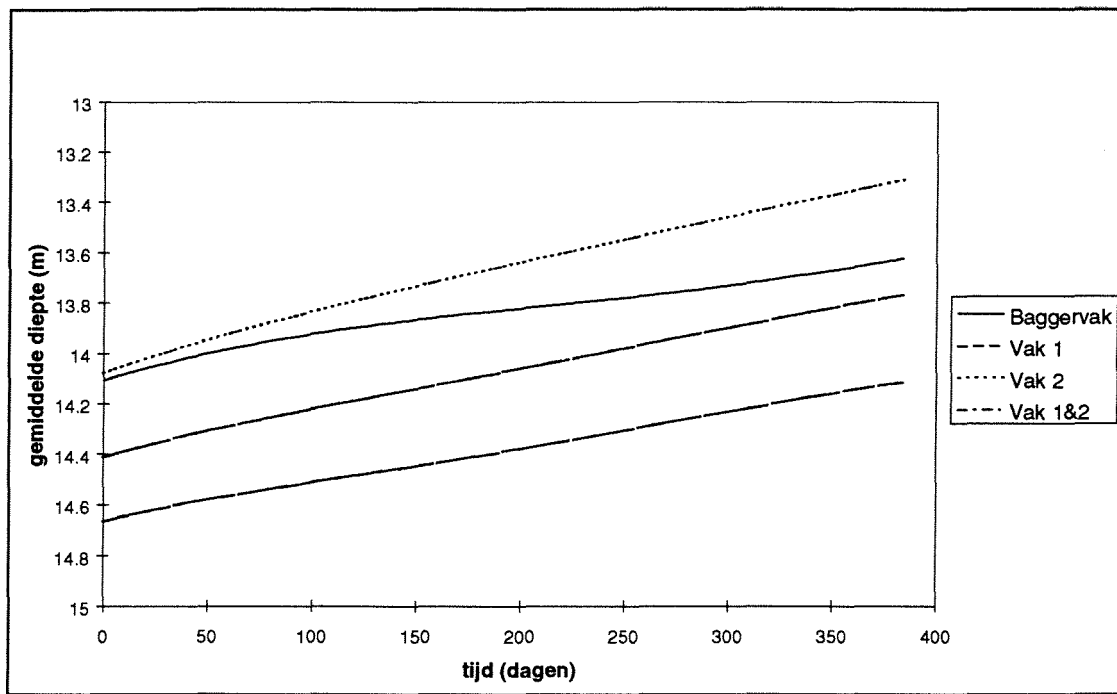
8.4 Conclusies

De simulatie van de huidige baggerstrategie laat ten eerste zien dat de aanzanding na 1 jaar in het drempelgebied (Vak 1&2: 0,62 m) groter is dan bij de simulatie van de autonome ontwikkeling (0,57 m). Een diepere ligging van de drempel lijkt daardoor meer aanzanding te geven. Deze constatering is van belang voor de tweede fase van het project, waar ook de baggerfrequentie zal worden gevarieerd.

De sedimentatie- en erosiepatronen komen in het algemeen sterk overeen met de simulatie van de autonome ontwikkeling (zie Hoofdstuk 7).



Figuur 8.5 Ontwikkeling gemiddelde bodemdieptes in de verschillende vakken.



Figuur 8.6 Ontwikkeling gemiddelde bodemdieptes in de verschillende vakken, gecorrigeerd voor hoeveelheid baggerwerk.

9. Conclusies

Met behulp van het numerieke model DELFT2D-MOR zijn de hydro- en morfodynamica rondom de Drempel van Hansweert gesimuleerd. Het belangrijkste doel van deze eerste fase van het onderzoek is na te gaan hoe goed DELFT2D-MOR in staat is bepaalde fysische processen weer te geven. De vraag is hoe goed de overeenkomsten tussen de werkelijkheid en de modelresultaten zijn. Het model van de Westerschelde is hiervoor in stappen opgebouwd. Allereerst is waterbeweging zo goed mogelijk afgeregeld. Een vergelijking tussen gemeten en berekende waterstanden en debieten laat goede overeenkomsten zien (zie Hoofdstuk 4). Een volgende stap was het berekenen van initieel sediment transport. Aan de hand van meetgegevens is de formulering zo goed mogelijk afgeregeld (zie Hoofdstuk 5). Vervolgens zijn berekeningen van de bodemontwikkeling gemaakt.

Morfologische procesmodellen zoals DELFT2D-MOR zijn in de huidige vorm geschikt om een bepaalde beperkte tijd door te rekenen. Voor de berekeningen rondom de Drempel van Hansweert is voor een simulatieperiode van 1 jaar gekozen. Hoe langer de gesimuleerde periode, des te groter de afwijkingen van de realiteit zullen zijn.

De simulatie van de autonome ontwikkeling van het gebied op en rondom de Drempel van Hansweert laat zien dat er sedimentatie op de Drempel van Hansweert optreedt. De grootte van de sedimentatie is binnen het gedefinieerde drempelgebied, genaamd Vak 1&2 (zie Hoofdstuk 7), een factor 1,5 kleiner dan op basis van de metingen zou mogen worden verwacht (0,57 m na 1 jaar i.p.v. ongeveer 0,88 m/jaar). Dit komt deels doordat het model aan de noordelijke en zuidelijke kant van de drempel erosie voorspelt (zie Figuur 7.7, blz 34). De grootte en de ligging van het gekozen evaluatievak heeft ook invloed op deze vergelijking. Het model berekent erg veel aanzanding in de binnenbocht boven de Plaat van Ossensisse. Tevens is de erosie in de buitenbocht boven de Plaat van Ossensisse erg groot. Het model lijkt de secundaire stromingseffecten te overdrijven.

De huidige baggerstrategie is gesimuleerd door in het model 12 maal per jaar binnen een bepaald gebied de bodem gelijkmatig te verlagen (zie Hoofdstuk 8). Wanneer de resultaten van de berekeningen gecorrigeerd worden voor de hoeveelheid baggerwerk blijkt dat de aanzanding van Vak 1&2 na één jaar tijd 0,62 m bedraagt. Dit is ongeveer 8 % groter dan de aanzanding die was berekend bij de simulatie van de autonome ontwikkeling (0,57 m/jaar). Door het baggeren wordt het drempelgebied op een grotere overdiepte gebracht en zal daardoor sterker aanzanden.

Gezien de onnauwkeurigheden van dit soort berekeningen mogen de resultaten relatief goed worden genoemd. Elk model blijft een vereenvoudiging van de werkelijkheid, waar lang niet alle relevante fysische processen in gemodelleerd zijn, of op de juiste wijze gemodelleerd zijn. De kennis omtrent morfologische ontwikkelingen op langere termijn is beperkt vanwege de complexiteit van het geheel. Er moet met nadruk worden gesteld dat op basis van de *berekende* hoeveelheid aanzanding op de drempel, niet kan worden gesteld dat er ook *daadwerkelijk* zoveel aanzanding optreedt; het model blijft een vereenvoudiging van de werkelijkheid.

Afgezien van de tekortkomingen van de schematisatie van de fysische processen door het model, zijn er ook een aantal andere oorzaken die voor verschillen tussen berekende en gemeten ontwikkeling kunnen zorgen. Het gebruik van een morfologisch getij om de berekeningstijd te verkorten zal de werkelijkheid minder goed nabootsen dan het telkens weer doorrekenen van een volledige dootij-springtij cyclus.

Als randvoorwaarde wordt er gewerkt met astronomische componenten van waterstanden. In werkelijkheid komen er op willekeurige tijdstippen sterk afwijkende (weers)condities voor die grote morfologische gevolgen kunnen hebben (stormen e.d.). Theoretisch zou het gebruik van volledige tijdseries van gemeten waterstanden de werkelijkheid op de beste wijze nabootsen. Dit is echter ondoenlijk qua rekentijd, vandaar het gebruik van een morfologisch getij.

Bij de huidige berekeningen is uitgegaan van de bodemgegevens van 1996. De bodemligging verandert continu. Het gebruik van een andere bodemligging (uit bijvoorbeeld een ander jaar) zou weer iets andere resultaten tot gevolg kunnen hebben.

De modelberekeningen zijn uitgevoerd op basis van evenwichtstransporten (het effect van secundaire stroming is schematisch verdisconteerd). Over- en onderverzadigingseffecten zijn *niet* meegenomen. Hoewel het model dit in principe moet kunnen is het niet gelukt deze optie aan de praat te krijgen.

Gezien de huidige resultaten lijkt het zeker zinvol het model in de tweede fase van dit project te gebruiken. In die tweede fase van het onderzoek zullen diverse baggeralternatieven doorgerekend en met elkaar vergeleken worden. De vergelijking van de onderlinge resultaten van deze alternatieven kan een goede indruk geven over welke alternatieven de meest hoopvolle resultaten kunnen geven. Met DELFT2D-MOR kunnen deze alternatieven op snelle en relatief goedkope wijze onderling worden vergeleken.

Referenties

- Bestuurlijk Klankbordforum Westerschelde, 1991
Beleidsplan Westerschelde
Rijkswaterstaat, Directie Zeeland
- Delft Hydraulics, 1996a
Delft 3D-flow manual
Delft Hydraulics, augustus 1996
- Delft Hydraulics, 1996b
An introduction to DELFT2D-MOR
Delft Hydraulics, november 1996
- Latteux, B., 1995
Techniques for long-term morphological simulation under tidal action.
Marine Geology, Vol. 126, pp. 129-141
- Rijn, L.C. van, 1984a
Sediment Transport, Part I: Bed Load Transport
Journal of Hydraulic Engineering, no. 10
- Rijn, L.C. van, 1984b
Sediment Transport, Part II: Suspended Load Transport
Journal of Hydraulic Engineering, no. 11
- Rijn, L.C. van, 1984c
Sediment Transport, Part III: Bed Forms and Alluvial Roughness
Journal of Hydraulic Engineering, no. 12
- Tank, F.T.G., 1995
Het gedrag van drempels in de Westerschelde: Een verkennende studie.
Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, Vakgroep Fysische Geografie, Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek (IMAU)
IMAU Rapport R 95-18
- Tank, F.T.G., 1996a
Het gedrag van drempels in de Westerschelde: Literatuurstudie en hypothesen.
Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, Vakgroep Fysische Geografie, Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek (IMAU)
IMAU Rapport R 96-07
- Tank, F.T.G., 1996b
Het gedrag van drempels in de Westerschelde: Parameterisatie.
Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, Vakgroep Fysische Geografie, Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek (IMAU)
IMAU Rapport R 96-08

- Tank, F.T.G., 1997a
 Het gedrag van drempels in de Westerschelde: Beschrijving en analyse van metingen van de waterbeweging op en rondom de Drempel van Hansweert.
 Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, Vakgroep Fysische Geografie, Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek (IMAU)
 IMAU Rapport R 97-01

- Tank, F.T.G., 1997b
 Het gedrag van drempels in de Westerschelde: Beschrijving en analyse van zandtransportmetingen op en rondom de Drempel van Hansweert.
 Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, Vakgroep Fysische Geografie, Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek (IMAU)
 IMAU Rapport R 97-08

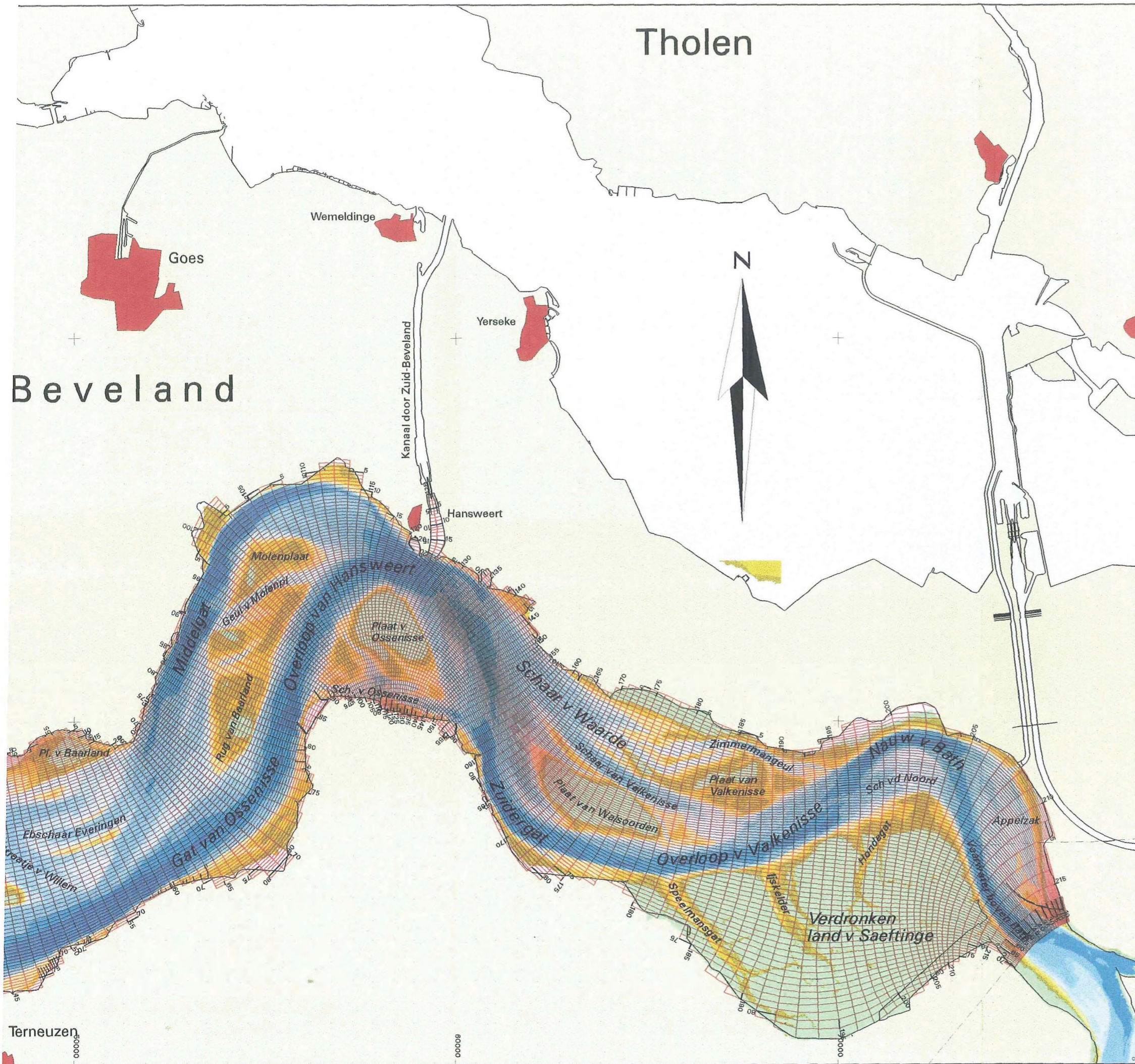
- Tank, F.T.G., 1997c
 Het gedrag van drempels in de Westerschelde: Beschrijving en analyse van metingen van de morfologie op en rondom de Drempel van Hansweert.
 Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, Vakgroep Fysische Geografie, Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek (IMAU)
 IMAU Rapport R 97-09

- Tank, F.T.G., 1997d
 Een conceptueel morfodynamisch model - Toetsing hypothesen
 Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, Vakgroep Fysische Geografie, Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek (IMAU)
 IMAU Rapport R 97-14

- Veen, J. van, 1950
 Eb- en vloed-schaar systemen in de Nederlandse getijwateren.
 Journal K.N.A.G., 2nd series, 67, pp. 303-325

- Vroon, J., Storm, C. en Coosen, 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.
 Rapport RIKZ-97.023, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee, Middelburg

Bijlage A Rekengrid en bodem 1996



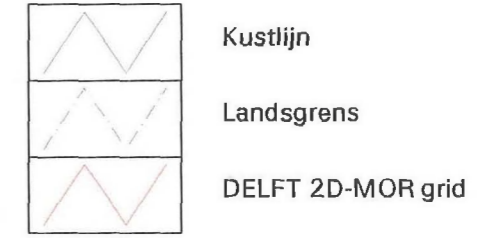
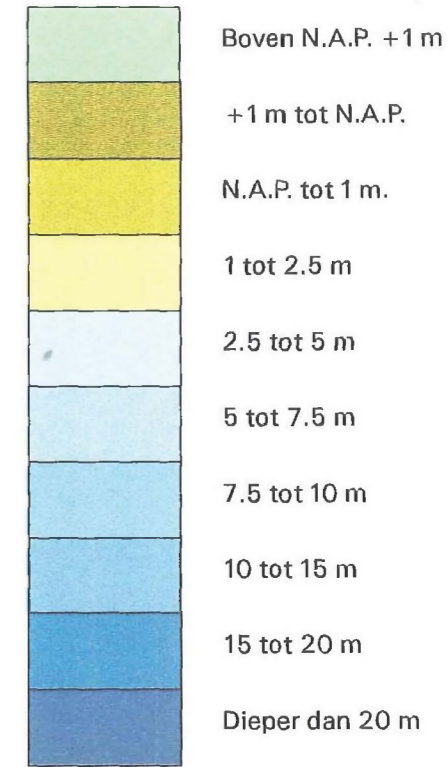
Tholen

Beveland

Terneuzen

Legenda

Diepte in m tov N.A.P.



Schaal:100000

Rijksinstituut voor Kust en Zee

Westerschelde 1996: DELFT 2D-MOR grid

Tholen

chere

Middelburg

Goes

Wemeldinge

Yerseke

Zuid Beveland

N

390000

ingen

Vlissingen - Oost

Hansweert

Honte

Spijkerplaat

Borssele

Molenplaat

Schaar van Spijkerplaat

De Bol

Hooge Platen

Hoge Springer

Everingen

Pl. v Baarland

Gat v Molengat

Overloop van Hansweert

Schaar v Ossenisse

Schaar v Waarde

Schaar van Valkenisse

Plaat van Walsorden

Zuiderget

Overloop v V

Vaanwater langs Hoofdplaat

Lage Springer

Suikerplaat

Middelplaat

Straatje v Willem

Rug van Baarland

Gat van Ossenisse

Ebschaar Everingen

Plaat van Valkenisse

Plaat van Walsorden

Overloop v V

Speelmansgat

Pas van Terneuzen

Braakmanhaven

Terneuzen

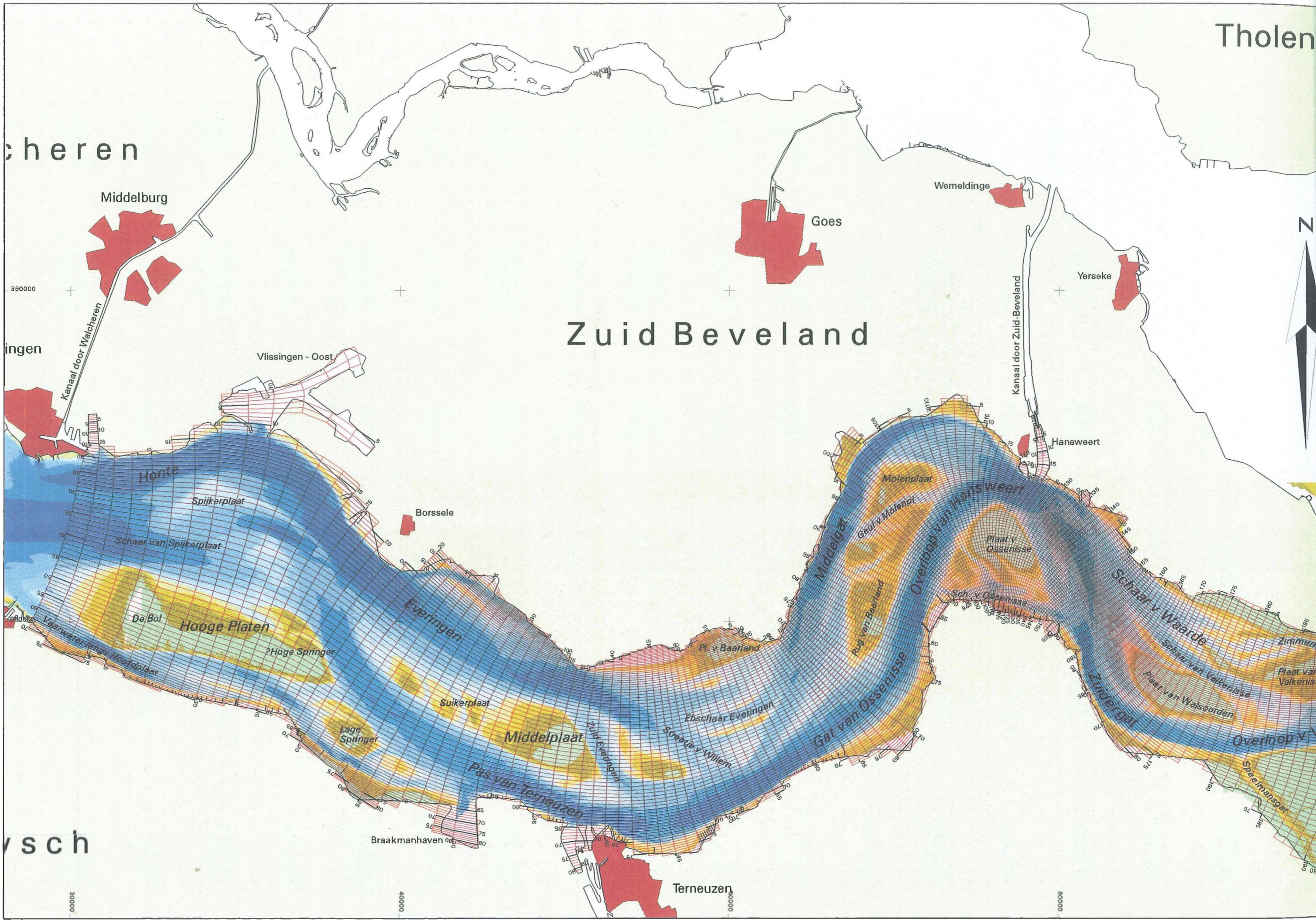
ysch

300000

400000

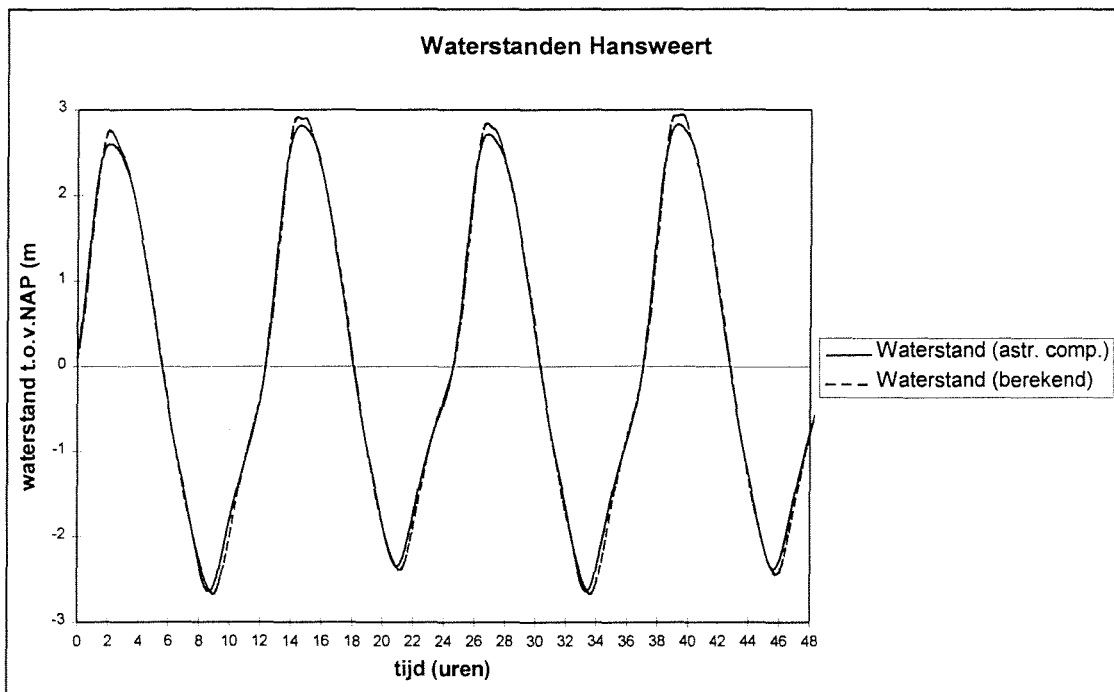
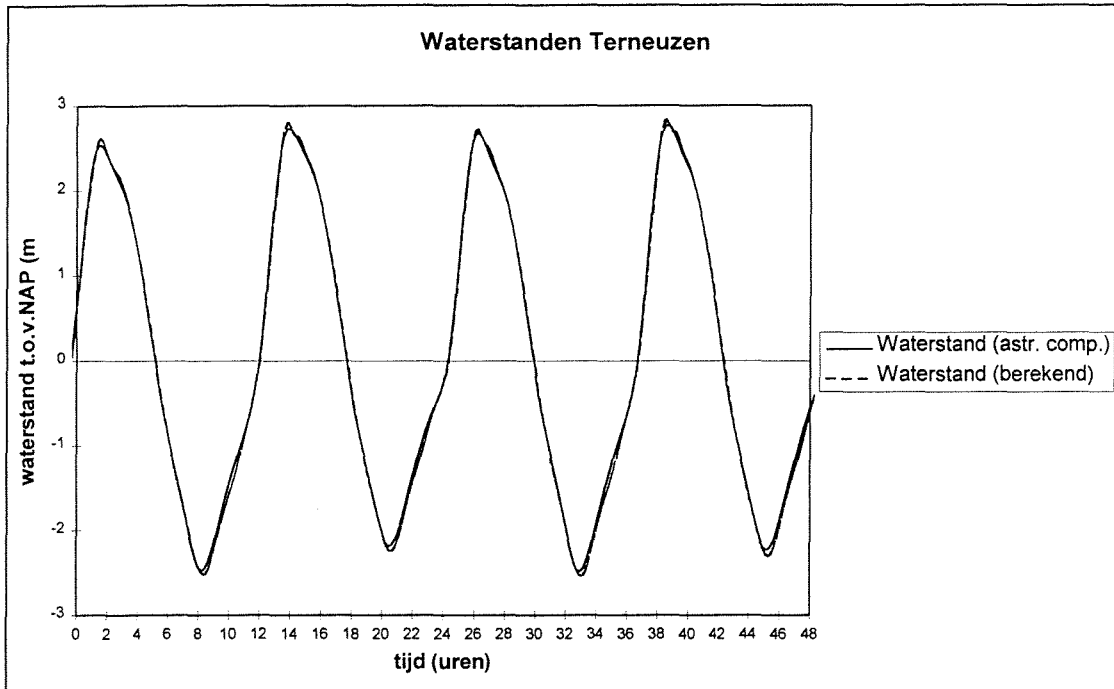
500000

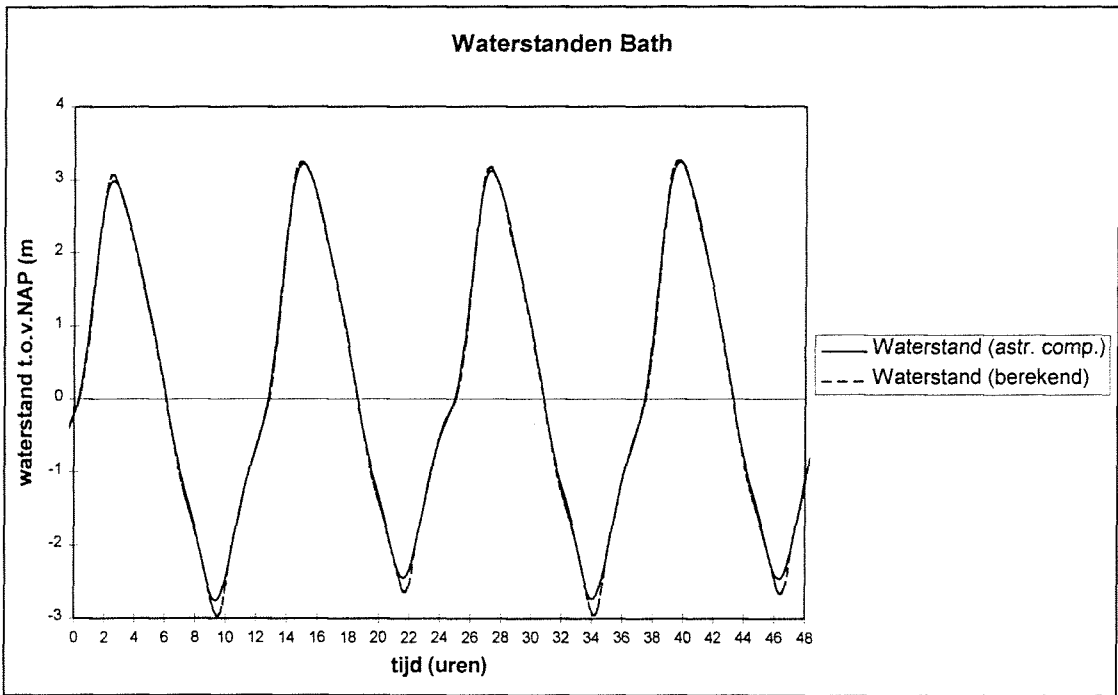
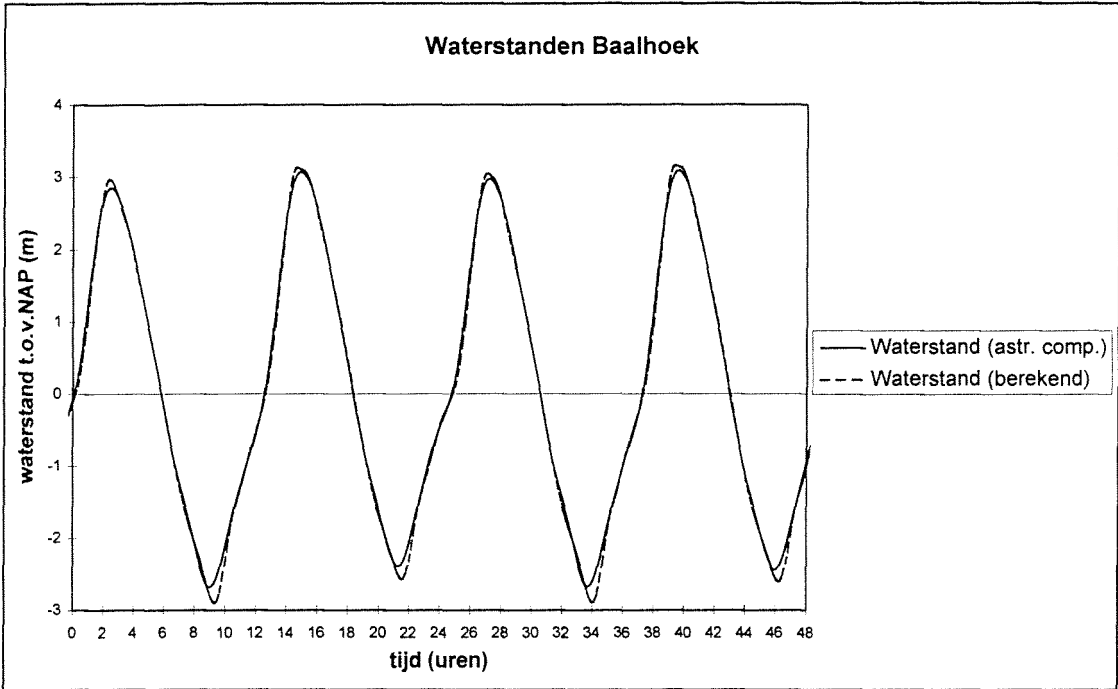
600000



Bijlage B Gemeten en berekende waterstanden van de verschillende waterstandsstations

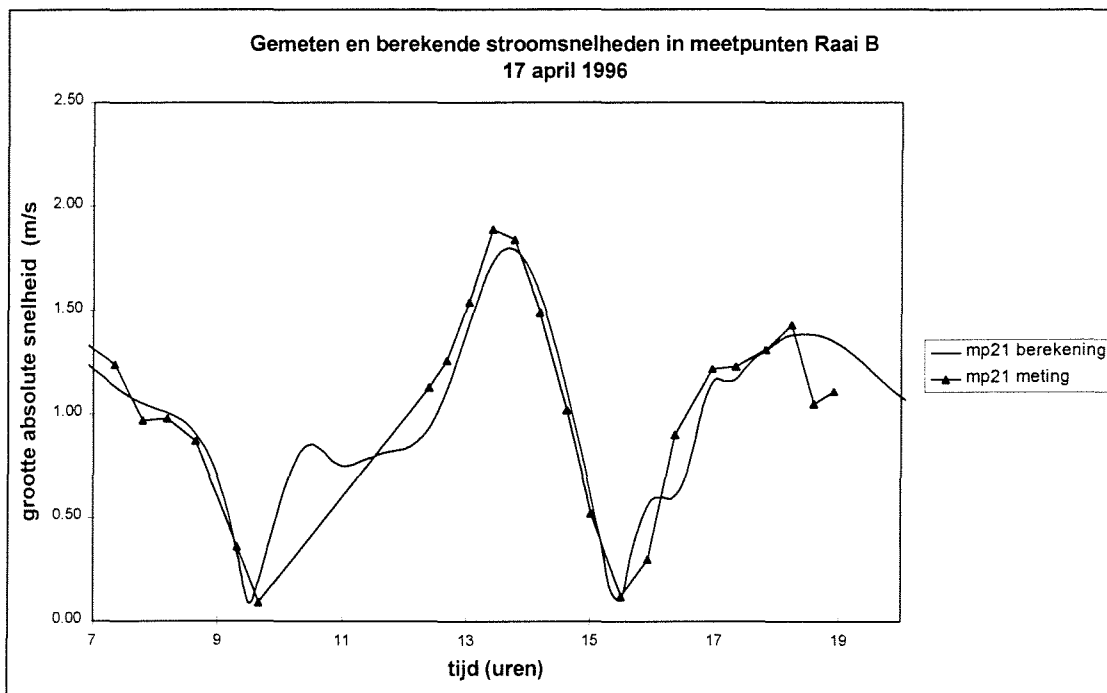
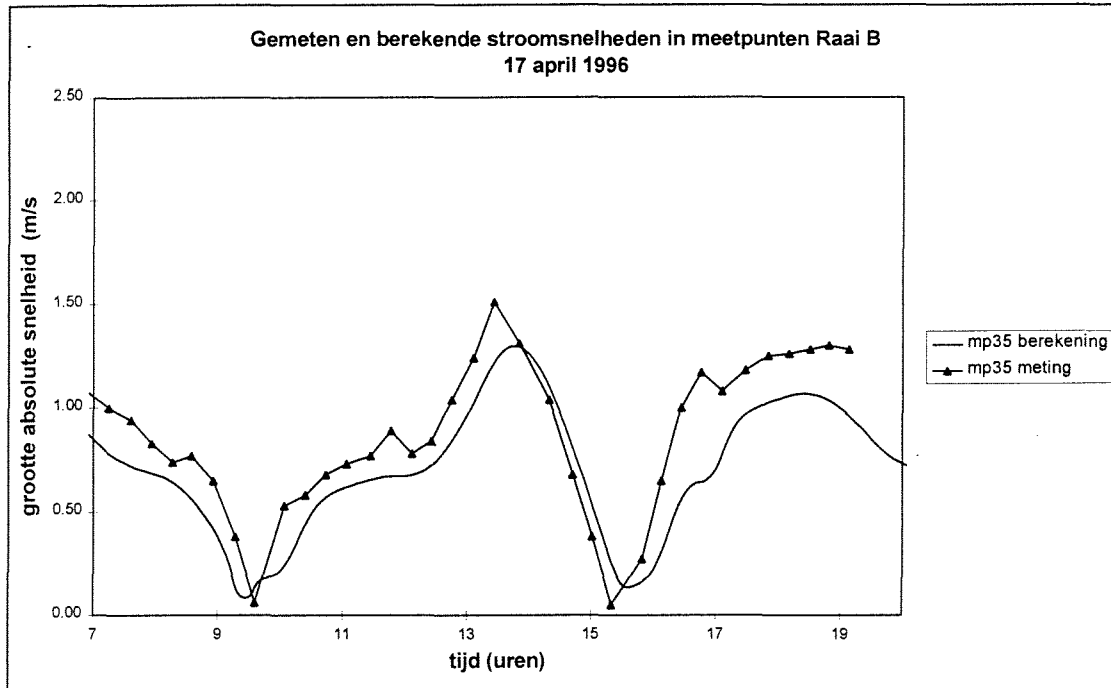
Datum: 17 en 18 april 1997

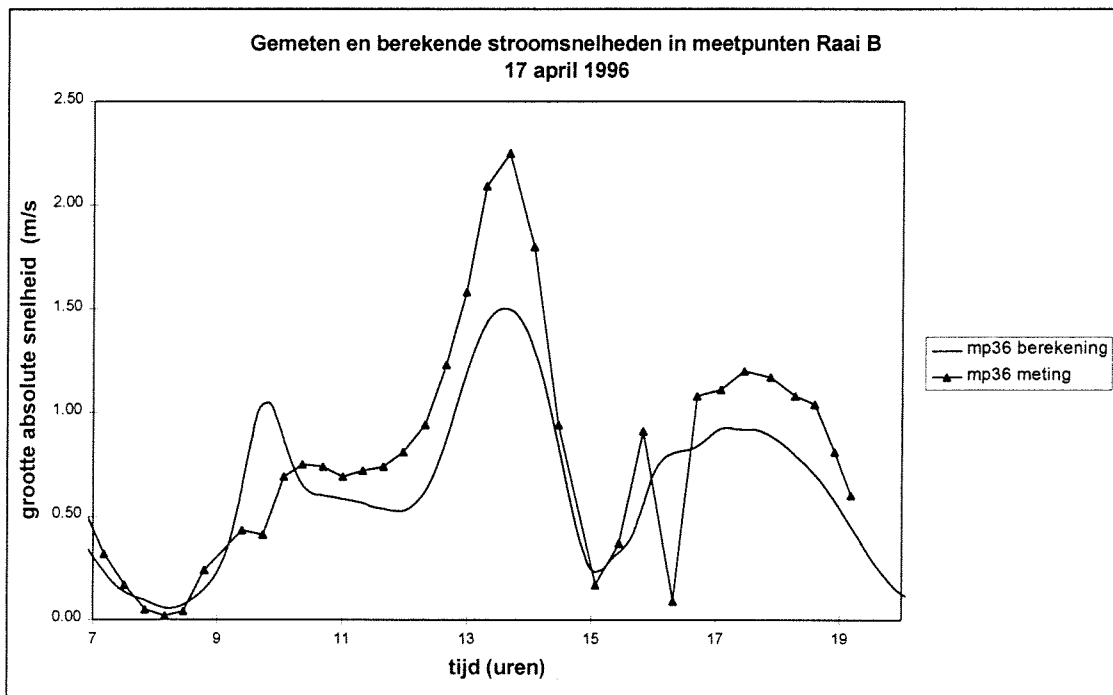
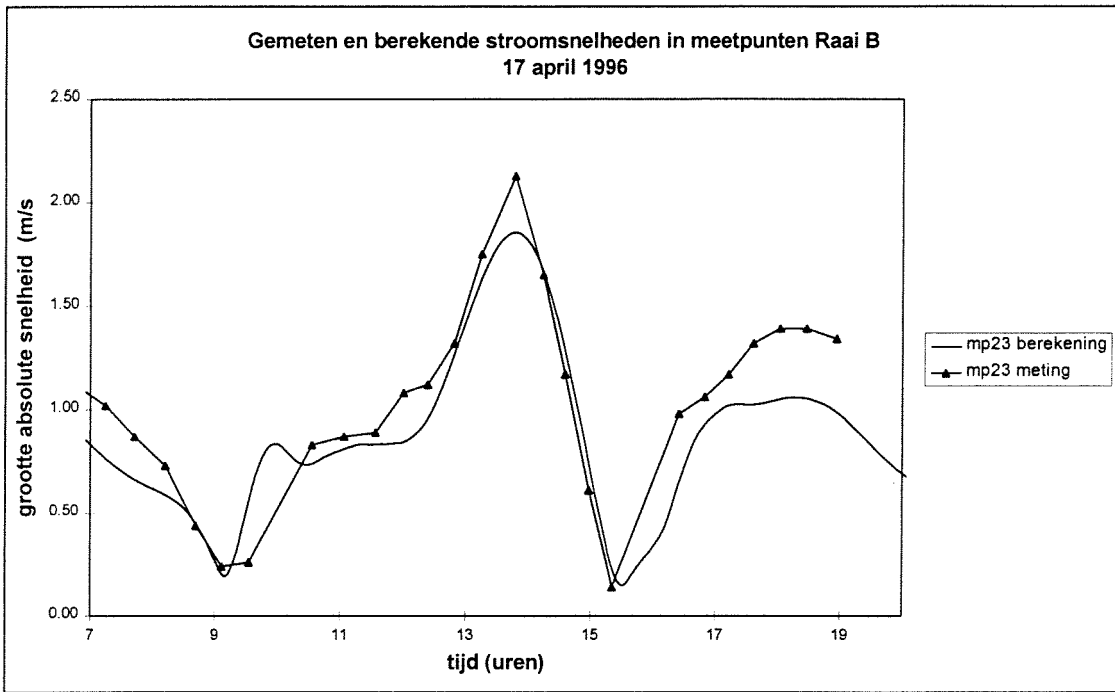




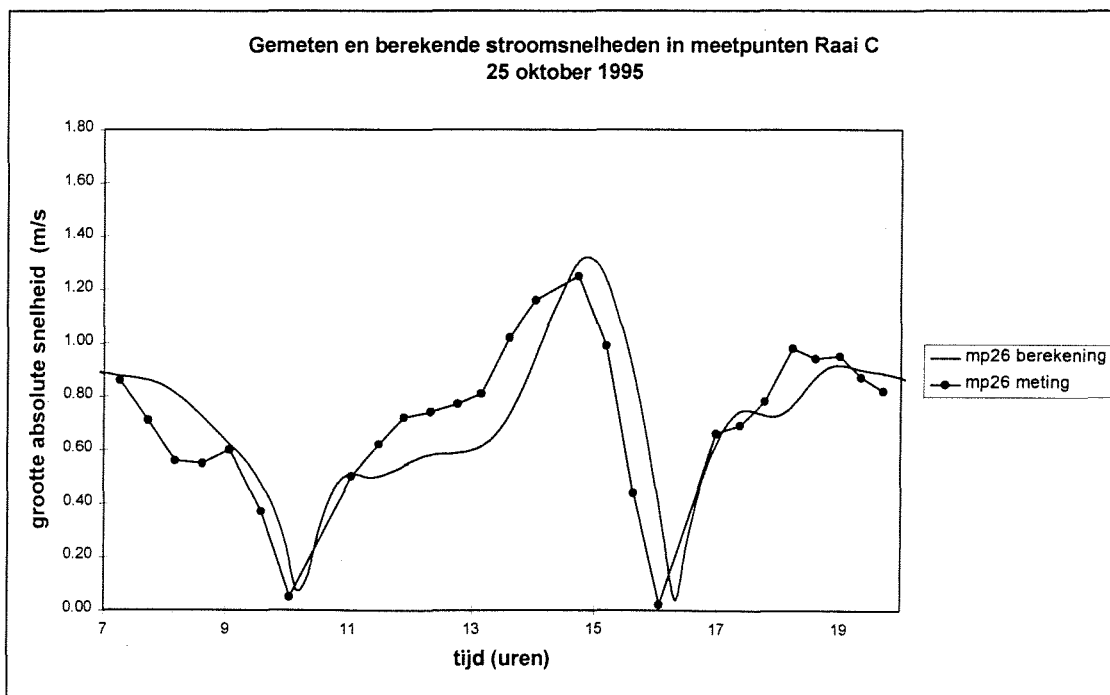
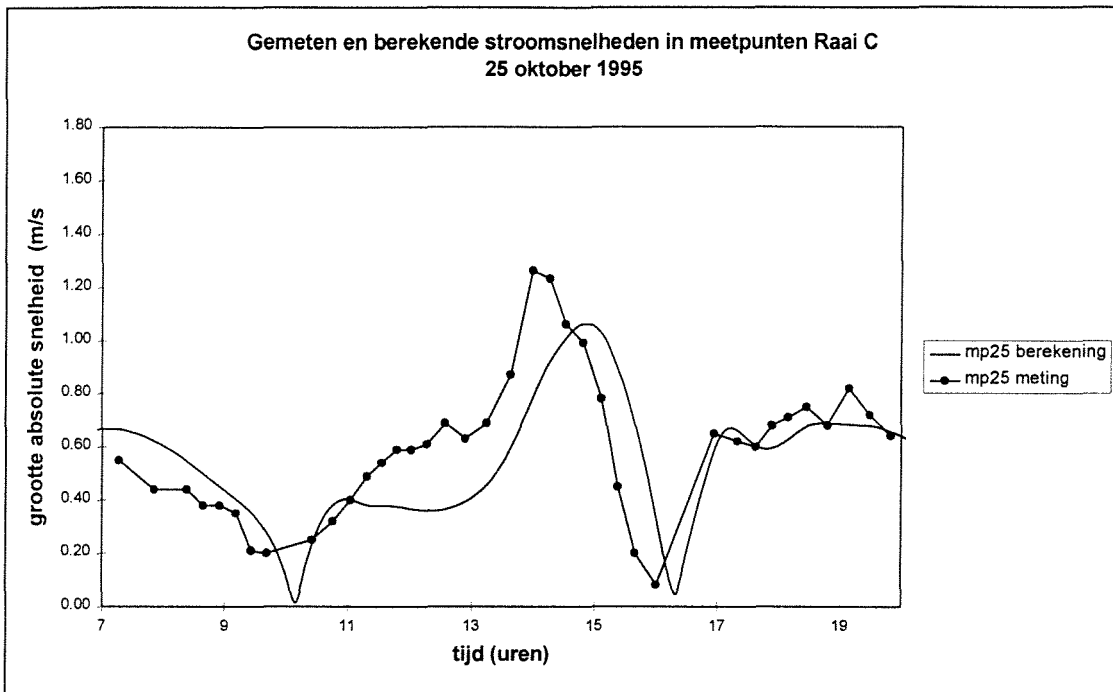
Bijlage C Vergelijking gemeten en berekende snelheden in Raai B en C

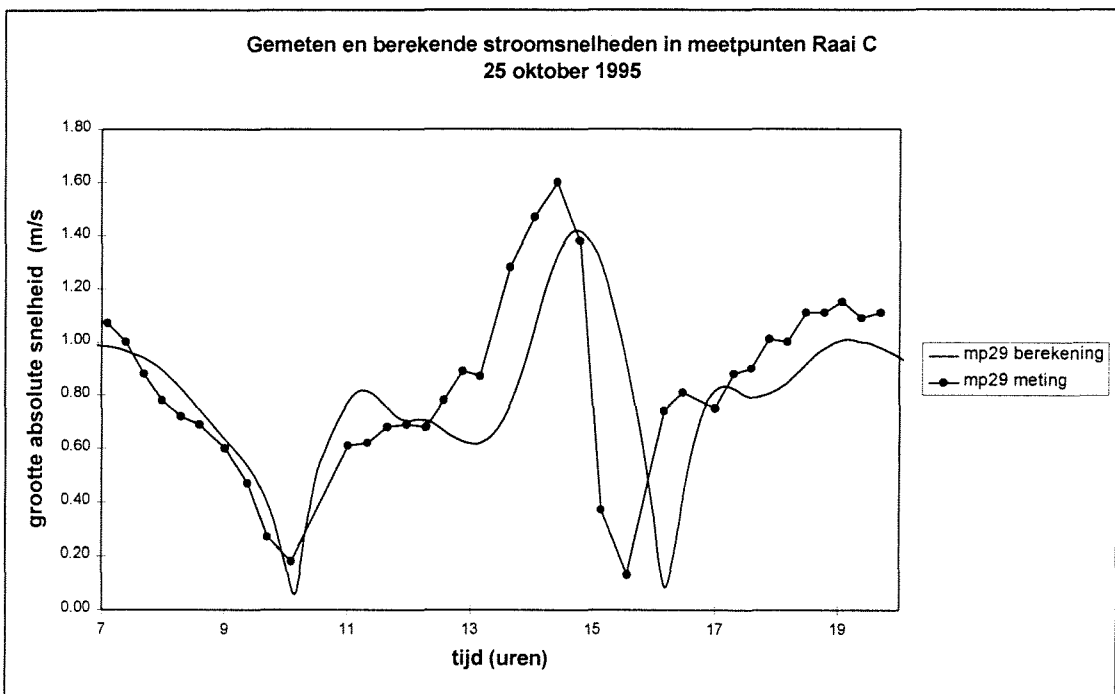
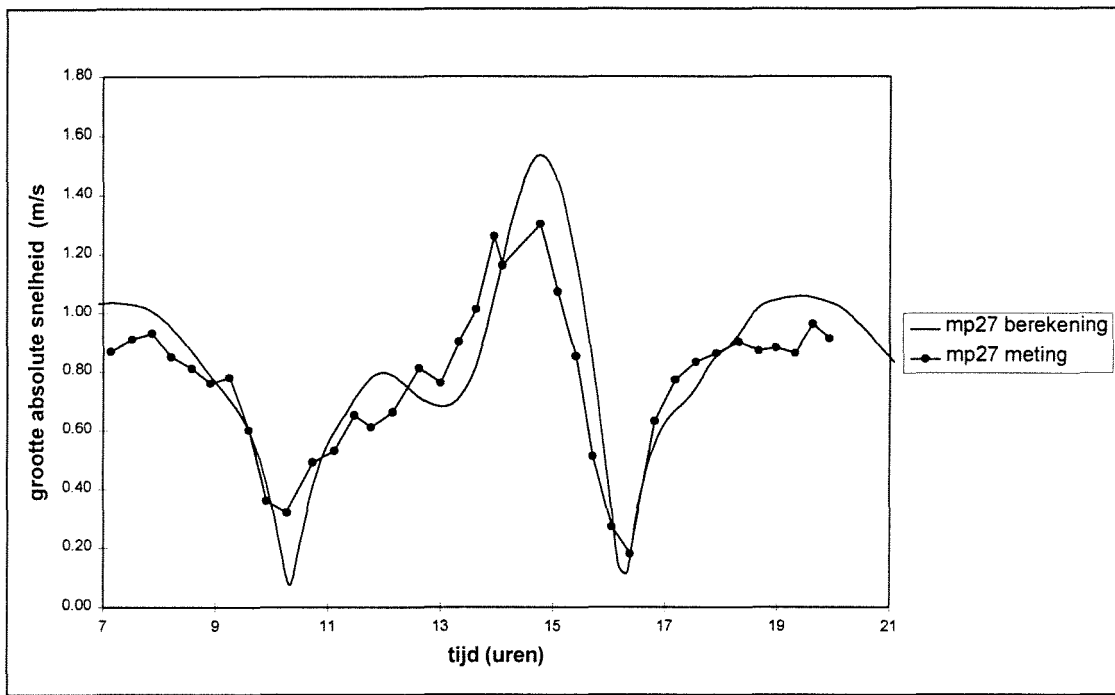
Snelheden Raai B



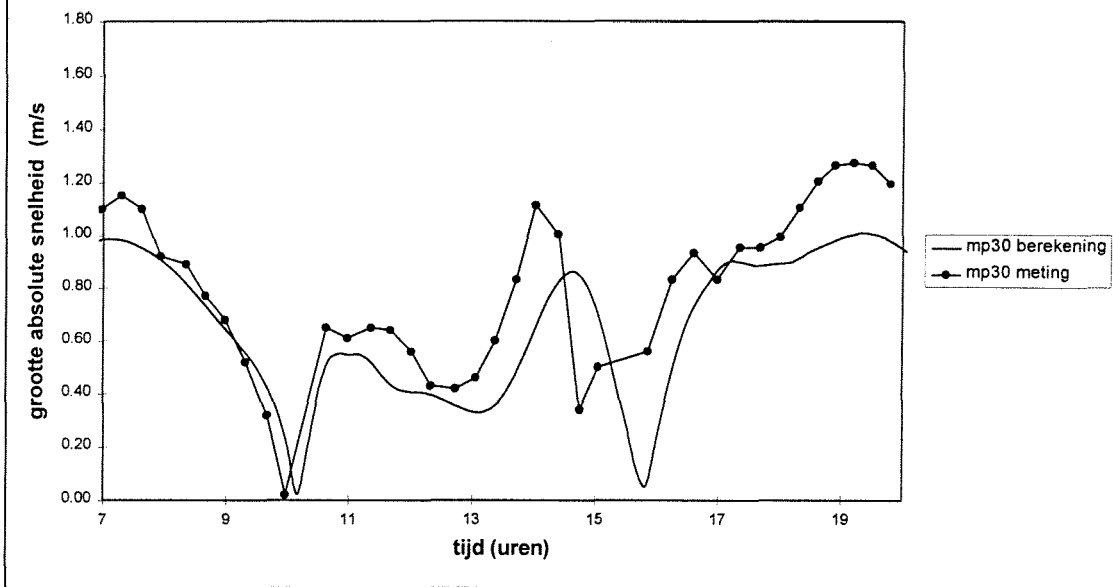


Snelheden Raai C





Gemeten en berekende stroomsnelheden in meetpunten Raai C
25 oktober 1995



Modellering morfodynamisch gedrag van de Drempel van Hansweert

Fase 2: Berekening alternatieven baggerwerk

November 1997

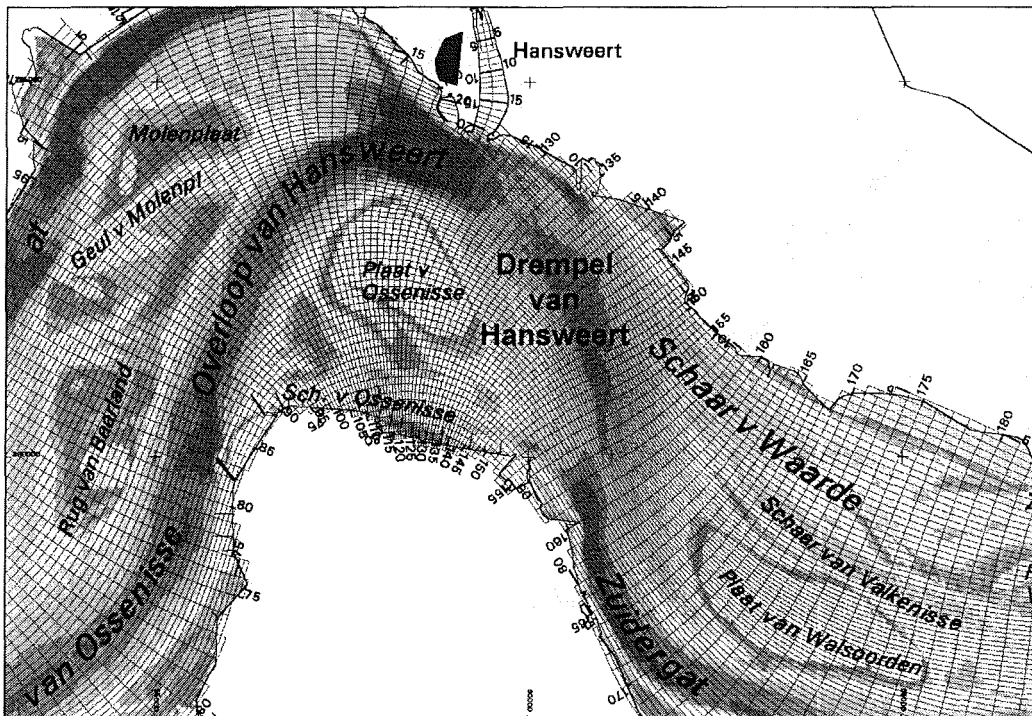
M.D. Groenewoud (TU Delft)
F.T.G. Tank (IMAU)

AI-AFS

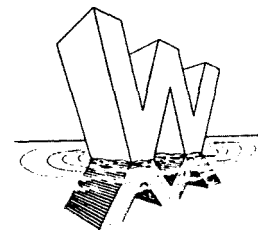
3997

Groenewoud

1997



Uitgevoerd in opdracht van het
Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ



Voorwoord

Tijdens het uitvoeren van onze studie naar het bestuderen van alternatieven voor het baggerwerk op de Drempel van Hansweert hebben we op prettige wijze samengewerkt met diverse personen van het Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ) en de Universiteit Utrecht (UU). Onze dank gaat met name uit naar drs. H. Verbeek (RIKZ), ir. A. Langerak (RIKZ), ing. C. van der Male (RIKZ) en drs. M.C.J.L. Jeuken (UU).

Tevens willen wij onze begeleiders op de TU Delft en de Universiteit Utrecht, dr. ir. J. van de Graaff (TUD), dr. ir. J.A. Roelvink (TUD) en dr. J.H. van den Berg (UU) bedanken voor hun adviezen en de plezierige samenwerking.

Tijdens deze studie is gebruik gemaakt van het door het Waterloopkundig Laboratorium ontwikkelde morfologische computermodel DELFT2D-MOR. Het Waterloopkundig Laboratorium heeft dit model beschikbaar gesteld voor deze studie.

Martin Groenewoud
Fred Tank

Middelburg, november 1997

Samenvatting

Drempels, lokale ondieptes in de vaarweg, vormen een belemmering voor de scheepvaart in de Westerschelde. Om een goede bereikbaarheid van de haven van Antwerpen te waarborgen wordt er gebaggerd op de drempels. Momenteel wordt er in de Westerschelde gemiddeld $8 \cdot 10^6$ m³/jaar gebaggerd. Het grootste deel van het gebaggerde materiaal (ongeveer 80 %) wordt elders binnen de Westerschelde teruggestort. De doorlopende cyclus van baggeren en storten heeft de hydro- en morfodynamica van het estuarium sterk beïnvloed. Het getijvolume is toegenomen en de geulen zijn gefixeerd. De gemiddelde hoogte van de platen is toegenomen, schorren- en slikkengebieden zijn kleiner geworden en er komen geen nieuwe schorren- en slikkengebieden bij. Dit alles kan gezien worden als een afname van de dynamiek van het ecologisch systeem.

In 1995 zijn de Nederlandse en Belgische regering overeengekomen dat de vaargeul met nog eens 1,5 m zal worden verdiept. Gezien de ervaring met voorgaande verdiepingen wordt verwacht dat deze nieuwe verdieping aanzienlijke gevolgen zal hebben voor de morfologie en ecologie van het estuarium. Inmiddels (medio 1997) is men begonnen met het uitvoeren van deze nieuwe verdieping.

Om het natuurlijke karakter van de Westerschelde zo goed mogelijk te behouden heeft de Directie Zeeland in samenwerking met het RIKZ een meerjarig onderzoeksprogramma opgestart binnen het project VERDIEPING (RIKZ) naar het gedrag van drempels in de Westerschelde. De doelstelling van dit project, genaamd DREMPELS, luidt als volgt:

Het verkrijgen van inzicht in de processen die de geometrie van een drempel bepalen, zodanig dat met de verkregen kennis de gevolgen van beheersalternatieven voldoende nauwkeurig afgeschat kunnen worden en nieuwe beheersalternatieven kunnen worden gegenereerd.

Onderdeel van dit project is het simuleren van het morfologisch gedrag van één van de drempels, de Drempel van Hansweert, met een morfologisch computermodel.

Dit verslag beschrijft de tweede van twee fasen van dit project waarin de simulatie van alternatieven voor het baggerwerk wordt beschreven.

Met behulp van het computermodel DELFT2D-MOR van het Waterloopkundig Laboratorium is er een model van de Westerschelde gemaakt. DELFT2D-MOR is een 2DH-morfologisch model (2DH = 2 dimensionaal horizontaal). Met behulp van dit model zijn de waterbeweging, het sedimenttransport en de bodemontwikkeling op en rondom de Drempel van Hansweert gesimuleerd. De modelbouw en de simulatie van de autonome ontwikkeling (geen menselijke ingrepen) en de huidige baggerstrategie zijn beschreven in het rapport van Fase 1 (Groenewoud, 1997).

Dit rapport doet verslag van de berekeningen van de effecten van verschillende beheersalternatieven met DELFT2D-MOR. Er zijn een aantal berekeningen uitgevoerd waarbij een drietal kenmerken werd gevarieerd, namelijk de baggerlokatie, de stortlokatie en de frequentie van het bagger- en/of stortwerk.

De berekeningen laten zien dat als de drempel op overdiepte gebaggerd wordt, er meer aanzanding op de drempel zal optreden. In het gedefinieerde drempelvak is deze toename in de aanzanding minder dan 10%.

Beïnvloeding van de lokale debietverdeling door het gedeeltelijk blokkeren van een nevengeul en het daardoor forceren van de stroming over de drempel, leidt volgens de berekeningen niet in alle gevallen tot een reductie van de aanzanding van de drempel.

In het algemeen kan gesteld worden dat de variatie van baggerlokatie, stortlokatie en frequentie op de wijze zoals uitgevoerd bij de berekeningen, relatief weinig effect had op de aanzanding van de drempel.

Inhoudsopgave

VOORWOORD

SAMENVATTING

INHOUDSOPGAVE

1. INLEIDING	1
1.1 BESCHRIJVING PROBLEMATIEK WESTERSCHELDE	1
1.2 PROJECT DREMPELS.....	2
1.3 OPBOUW VERSLAG.....	3
2. DE DREMPEL VAN HANSWEERT	5
2.1 LOKATIE DREMPEL VAN HANSWEERT	5
2.2 ONTWIKKELING BODEMLIGGING	5
2.3 MEETCAMPAGNE.....	6
2.4 OORZAKEN DREMPELVORMING	8
3. BEHEERSALTERNATIEVEN VOOR VERMINDERING EFFECTEN BAGGERINSPANNING.....	10
3.1 INLEIDING.....	10
3.2 ALTERNATIEVEN BAGGERWERKZAAMHEDEN	10
4. BEREKENINGEN DELFT2D-MOR	13
4.1 INLEIDING.....	13
4.2 OPZET BEREKENINGEN.....	13
4.3 RESULTATEN BEREKENINGEN	16
4.4 VERGELIJKING RESULTATEN.....	40
5. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN.....	45

REFERENTIES

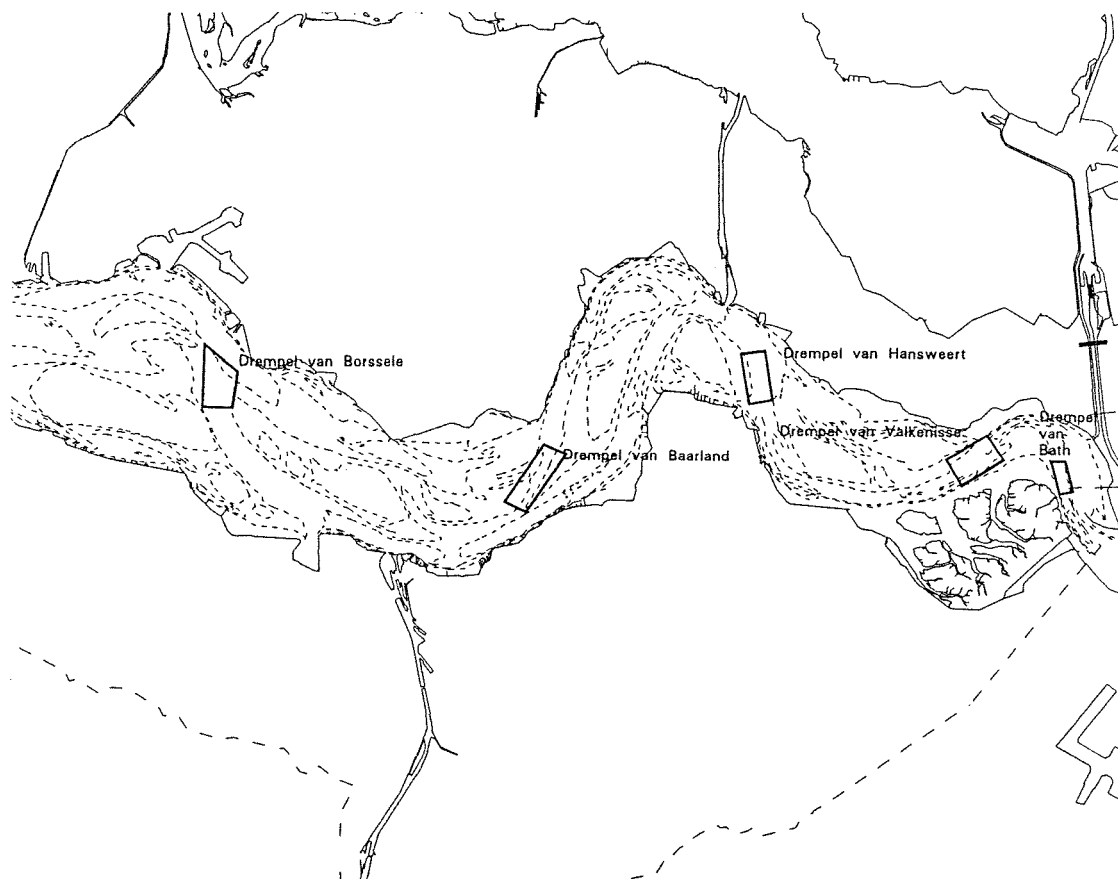
1. Inleiding

1.1 Beschrijving problematiek Westerschelde

De Westerschelde fungeert o.a. als een belangrijke vaargeul naar de haven van Antwerpen in België. Om de scheepvaart een goede doorgang te verlenen wordt er intensief gebaggerd in de Westerschelde. De baggerwerkzaamheden hebben de morfologie van het estuarium sterk beïnvloed. In de jaren '50 werd er reeds ongeveer $5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ /jaar gebaggerd. In de zeventiger jaren is de vaargeul verder verdiept. Per jaar werd er tot medio 1997 ongeveer $8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ gebaggerd in de Westerschelde. Het baggerwerk vindt hoofdzakelijk plaats op de ondiepe gedeeltes van de vaargeul, de zogenaamde drempels. Figuur 1.1 laat zien waar deze drempels zich in de Westerschelde bevinden. Het grootste gedeelte van het gebaggerde materiaal wordt teruggestort in de Westerschelde.

De doorlopende cyclus van baggeren en storten heeft de hydro- en morfodynamica van het estuarium sterk beïnvloed. Het getijvolume is toegenomen, met als consequentie hogere extreme waterstanden bij Antwerpen. De geulen zijn gefixeerd, de gemiddelde hoogte van de platen is toegenomen, de schorren- en slikkengebieden zijn kleiner geworden en er komen geen nieuwe schorren- en slikkengebieden bij. De dynamiek van het ecologisch systeem is daarmee afgenomen.

In 1995 zijn de Nederlandse en Belgische regering overeengekomen dat de vaargeul met nog eens 1,5 m zal worden verdiept. Gezien de ervaringen met voorgaande verdiepingen wordt



Figuur 1.1 Lokaties drempels in de Westerschelde.

verwacht dat deze nieuwe verdieping, de zogenaamde 48'/43'-verdieping¹, aanzienlijke gevolgen zal hebben voor de morfologie en ecologie van het estuarium.

1.2 Project DREMPELS

In het Beleidsplan Westerschelde (Bestuurlijk Klankbordforum Westerschelde, 1991) is een lange termijn visie opgesteld waarin men het natuurlijke karakter van de Westerschelde zo veel mogelijk wil behouden zonder dat daarbij maatschappelijke functies verloren gaan. Om het natuurlijke karakter van de Westerschelde te waarborgen, worden door de Directie Zeeland beheersalternatieven onderzocht die de diepte van de drempel op min of meer natuurlijke wijze vergroten. Hierbij wordt bijvoorbeeld gedacht aan morfologisch baggeren en storten, kombergingsvergroting door ontpolderen, beïnvloeding lokale debietverdeling (stromingsconcentratie over drempel) e.d.

In het voorjaar van 1995 heeft de Directie Zeeland in samenwerking met het RIKZ een meerjarig onderzoeksprogramma opgestart binnen het project VERDIEPING (RIKZ) naar het gedrag van drempels in de Westerschelde. Binnen het project wordt tevens samengewerkt met de Universiteit Utrecht (UU) en de Technische Universiteit Delft (TUD). Dit project, genaamd DREMPELS, heeft de volgende doelstelling:

Het verkrijgen van inzicht in de processen die de geometrie van een drempel bepalen, zodanig dat met de verkregen kennis de gevolgen van beheersalternatieven voldoende nauwkeurig afgeschat kunnen worden en nieuwe beheersalternatieven kunnen worden gegenereerd.

Vanuit drie verschillende invalshoeken werd getracht de kennis omtrent het gedrag van drempels te vergroten:

1. literatuurstudie van de huidige kennis omtrent het gedrag van drempels + analyse historische meetgegevens
2. meetcampagne op één van de drempels (Drempel van Hansweert)
3. modellering van het gedrag van de Drempel van Hansweert met behulp van een 2DH morfologisch model

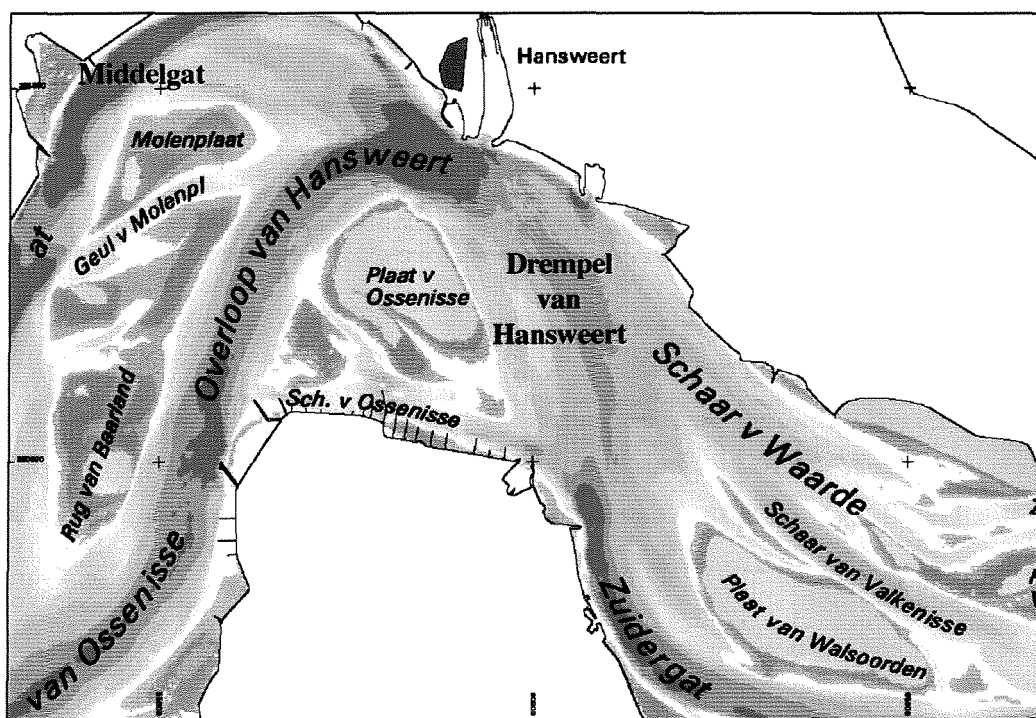
ad. 1 Literatuurstudie + analyse historische meetgegevens

In het kader van dit onderzoek zijn er door de Universiteit Utrecht verschillende studies verricht naar het gedrag van drempels in de Westerschelde (Tank, 1995; Tank, 1996a; Tank, 1996b).

ad. 2 Meetcampagne

In het najaar van 1995 en het voorjaar van 1996 is er een uitvoerige meetcampagne uitgevoerd op één van de drempels, namelijk de Drempel van Hansweert. De Drempel van Hansweert is gelegen in het oostelijk deel van de Westerschelde (zie Figuur 1.1 en 1.2). In verschillende dwars- en langsraaien zijn stroomsnelheden, waterstanden, sedimentconcentraties en bodemligging gemeten. In Hoofdstuk 2 wordt hier nader op ingegaan. Uitvoerig

¹ De 48'/43' verdieping houdt in dat schepen met een diepgang van 48 voet (bijna 15 m) in één getij vanuit de Noordzee naar Antwerpen kunnen varen. Deze schepen zullen de afvaart naar de Noordzee niet in één getij kunnen voltooien. Schepen met een diepgang van 43 voet (ruim 13 m) moeten de afvaart wel in één getij kunnen volbrengen. Schepen met een diepgang van 38 voet (ruim 11 m) kunnen de Westerschelde onafhankelijk van het getij bevaren.



Figuur 1.2 Lokatie Drempeel van Hansweert.

verslag van de metingen en van de interpretatie van de resultaten wordt gedaan in Tank, 1997a; Tank, 1997b en Tank, 1997c.

ad. 3 Modelling van het gedrag van de drempel

Het gedrag van de Drempeel van Hansweert is gesimuleerd met behulp van een 2DH morfologisch model (2DH = 2 dimensionaal horizontaal). Hierbij wordt gebruik gemaakt van DELFT2D-MOR, een computermodel van het Waterloopkundig Laboratorium (WL). In eerste instantie is het model gebruikt om de huidige situatie te simuleren. De uitkomsten van het model zijn vergeleken met resultaten van de meetcampagne. In tweede instantie is het model ook gebruikt om diverse beheersalternatieven met elkaar te vergelijken.

1.3 Opbouw verslag

Dit rapport doet verslag van de derde methode van aanpak, namelijk het simuleren van het gedrag van de Drempeel van Hansweert met het 2DH morfologische model DELFT2D-MOR. Het onderzoek bestaat uit twee fasen.

De resultaten van de eerste fase (modelbouw en simulatie huidige situatie) staan beschreven in Groenewoud, 1997.

Dit rapport doet verslag van de tweede fase waarin de verschillende beheersalternatieven worden beschreven en de resultaten van de simulatie van verschillende baggeralternatieven worden besproken.

In Hoofdstuk 2 wordt eerst een beknopte omschrijving gegeven van de omstandigheden die het ontstaan van een drempel veroorzaken. Tevens wordt de situatie rondom de Drempeel van Hansweert besproken.

Een aantal beheersalternatieven die moeten leiden tot een verminderde baggeringspanning wordt kwalitatief beschreven in Hoofdstuk 3. Er zijn uiteraard ook andere alternatieven mogelijk. De

alternatieven beschreven in Hoofdstuk 3 behoren tot de alternatieven die in de algemene discussie rondom de huidige baggerpraktijk als kansrijk worden omschreven. Met behulp van het DELFT2D-MOR systeem zijn berekeningen uitgevoerd die zowel een kwalitatief als een kwantitatief beeld moeten geven van de effecten van de verschillende baggeralternatieven. Hierbij is de situatie rondom de Drempel van Hansweert als uitgangspunt genomen. De resultaten van de verschillende berekeningen worden in Hoofdstuk 4 beschreven. Conclusies en aanbevelingen volgen in Hoofdstuk 5.

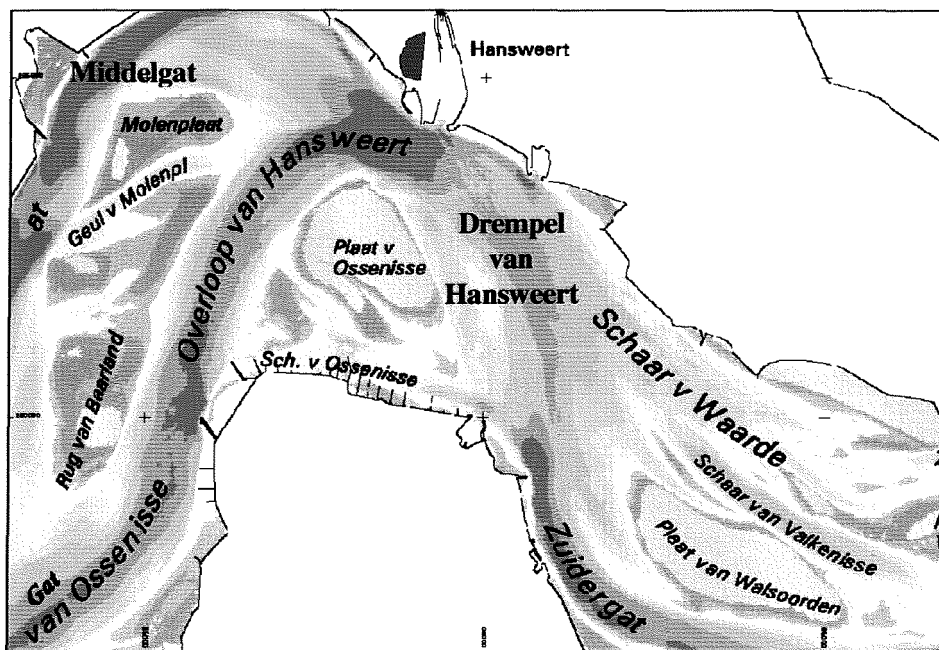
2. De Drempel van Hansweert

2.1 Lokatie Drempel van Hansweert

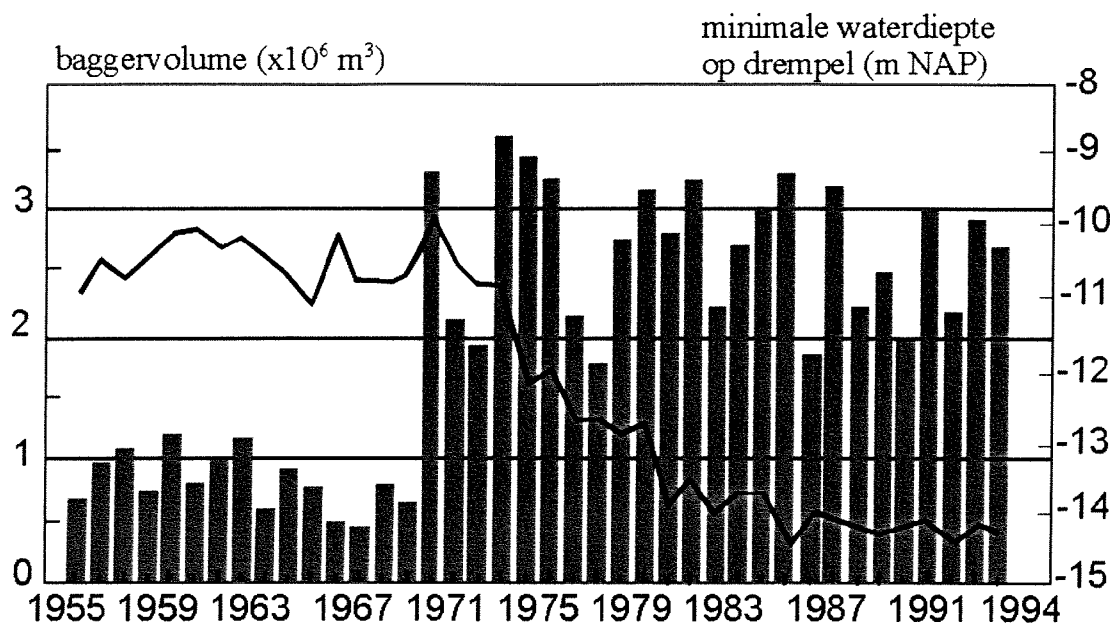
De Drempel van Hansweert is gelegen in het oostelijk deel van de Westerschelde (zie Figuur 2.1). Ten westen van de drempel ligt de Plaat van Ossenisse. Ten noorden van deze plaat bevindt zich een scherpe bocht waarna de hoofdgeul zich splitst in het ebgedomineerde Middelgat en de vloedgedomineerde Overloop van Hansweert. Ten zuiden van de Drempel bevindt zich het ebgedomineerde Zuidergat. Oostelijk van de drempel ligt een grote vloodschaar, genaamd de Schaar van Waarde. Het debiet door deze vloodschaar reduceert het debiet door het Zuidergat. De natuurlijke diepteligging van de Drempel van Hansweert is mede afhankelijk van de grootte van het debiet door het Zuidergat.

2.2 Ontwikkeling bodemligging

Sinds het begin van deze eeuw wordt er gebaggerd in de Westerschelde. De baggerwerkzaamheden vinden voornamelijk plaats in het oostelijk deel van de Westerschelde. In de jaren vijftig bedroeg het baggervolume ongeveer $5 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$. Na een verdere verdieping van de vaargeul in de jaren zeventig is dit volume toegenomen. Aanvankelijk werd er per jaar $12 \cdot 10^6$ tot $14 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ gebaggerd. Pas toen er nieuw evenwicht was ontstaan tussen het toegenomen getijvolume en het geulprofiel, stabiliseerde de hoeveelheid baggerwerk zich rond de huidige $8 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$ (Vroon *et al.*, 1997).



Figuur 2.1 Lokatie Drempel van Hansweert.



Figuur 2.2 Ontwikkeling van de hoeveelheden baggerwerk en de minimale waterdiepte op de Drempel van Hansweert.

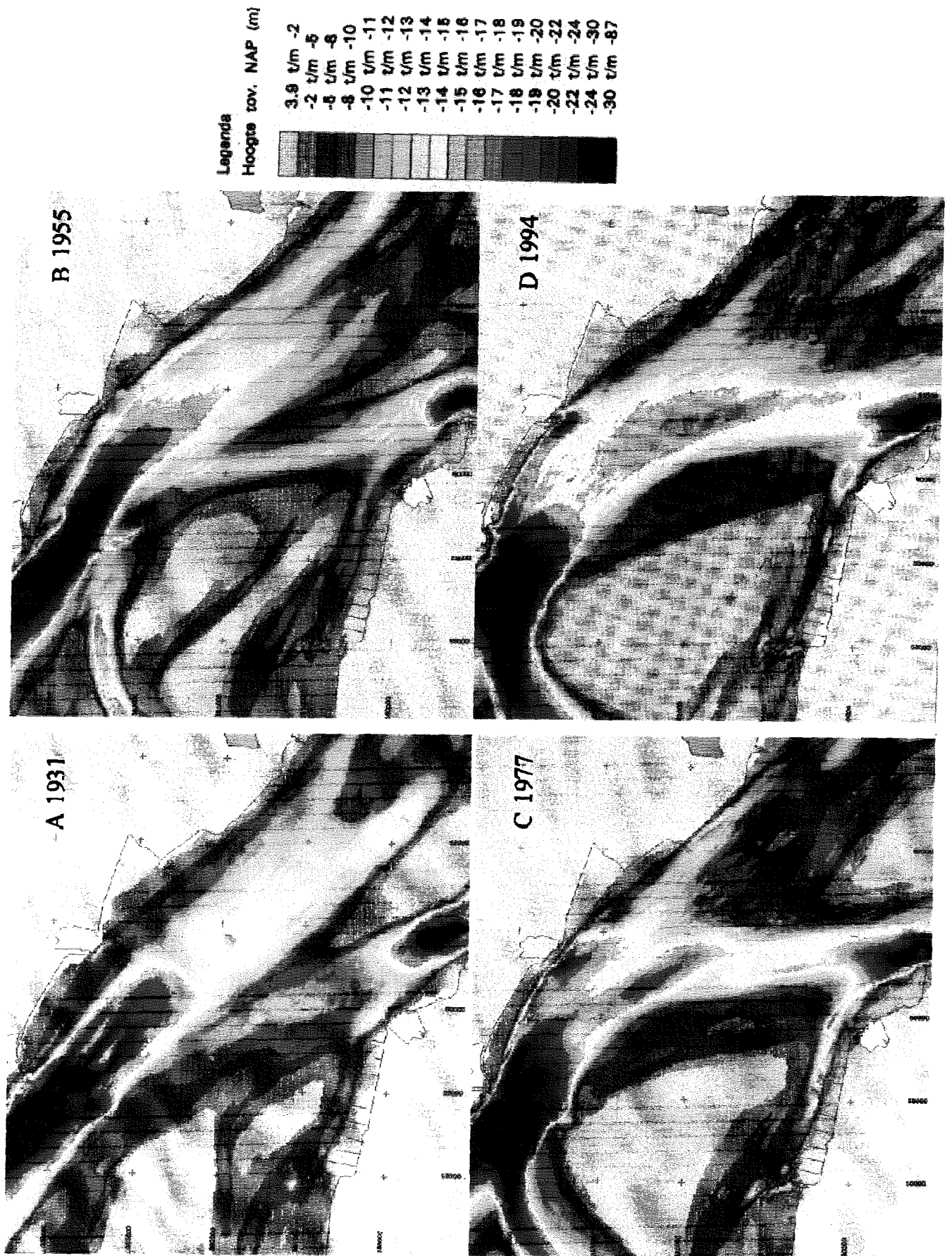
Op de Drempel van Hansweert wordt er momenteel per jaar ongeveer $2 \cdot 10^6$ tot $3 \cdot 10^6$ m³/jaar gebaggerd. Het baggerwerk heeft in de loop der tijd de ligging van de Drempel van Hansweert sterk beïnvloed. In Figuur 2.2 staat het verloop in de tijd uitgezet van de hoeveelheid baggerwerk op de drempel. Duidelijk is te zien dat na de verdieping in de jaren zeventig de hoeveelheid baggerwerk sterk is toegenomen. In Figuur 2.2 staat ook de minimale waterdiepte op de drempel weergegeven. De minimale waterdiepte is van circa NAP -10,5 m toegenomen tot ongeveer NAP -14,5 m.

In Figuur 2.3a is de bodemligging van de drempel in 1931 afgebeeld. Kenmerkend voor de situatie toendertijd is het elkaar ontwijken van de eb- en vloedstroming. De Schaar van Waarde is vloedgedomineerd; het Zuidergat is ebgedomineerd. In 1955 (Figuur 2.3b) is de diepte op de Drempel van Hansweert toegenomen t.o.v. 1931; grotendeels ten gevolge van het baggerwerk. Als gevolg hiervan is de hoeveelheid water die bij vloed over de drempel stroomt, toegenomen. De bodemligging van 1977 (Figuur 2.3c) laat zien dat deze ontwikkeling zich verder heeft doorgezet. De bodem van 1994 (Figuur 2.3d) geeft aan dat de diepte van de drempel verder is toegenomen. Het baggerwerk heeft daar een sturende rol in gehad. Als gevolg van de toegenomen diepte op de drempel stroomt er meer water over de drempel en minder water door de Schaar van Waarde. De gemiddelde dieptes in de Schaar van Waarde zijn ten gevolge van de verminderde debieten afgenomen; er is verzanding opgetreden.

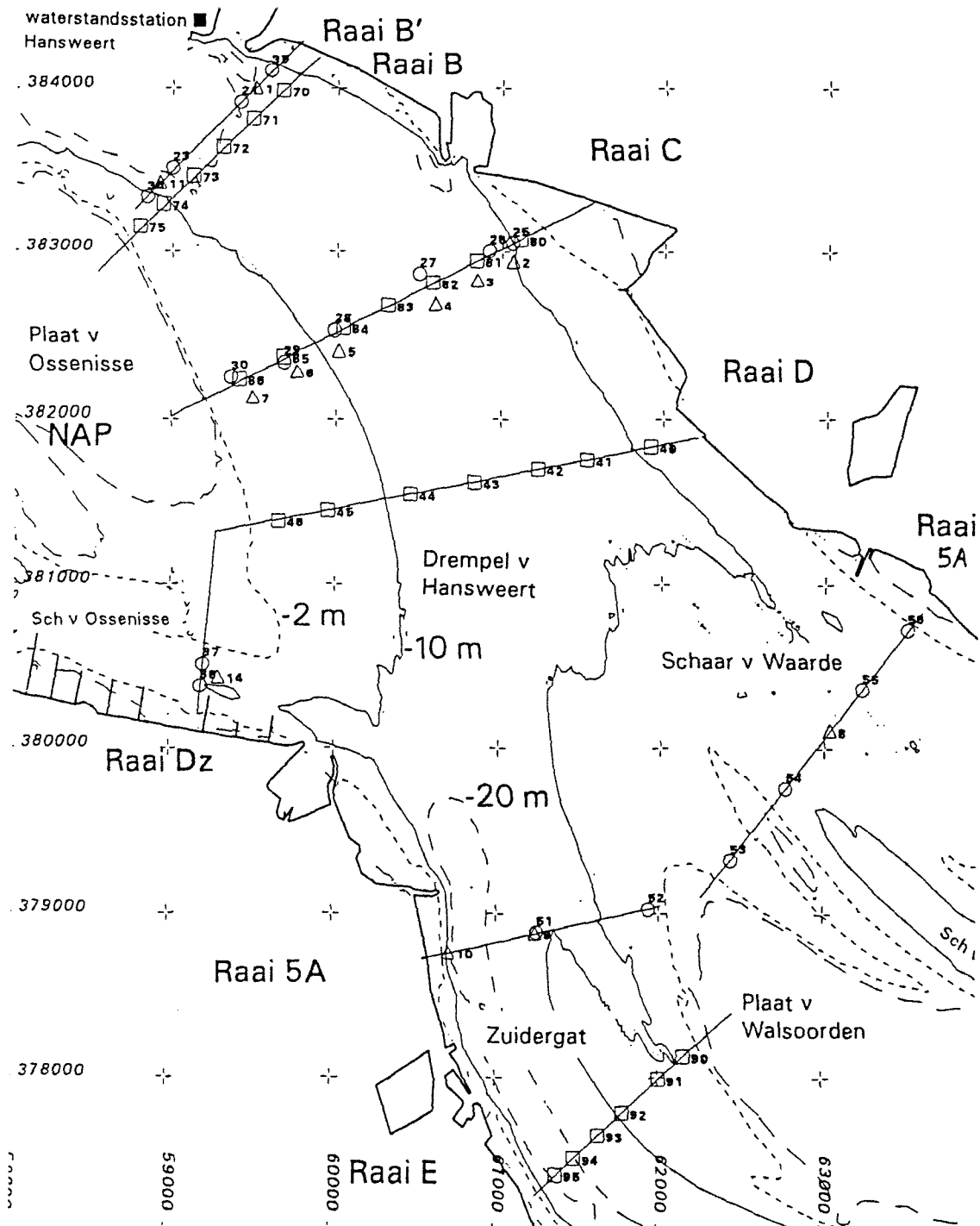
2.3 Meetcampagne

In 1995 en 1996 is er een uitgebreide meetcampagne uitgevoerd op de Drempel van Hansweert. In verschillende dwars- en langsgaaien zijn waterstanden, stroomsnelheden en sedimentconcentraties gemeten. Ook zijn er verschillende extra lodingen uitgevoerd om de bodemligging te bepalen. Door Tank, 1997a, 1997b en 1997c wordt uitvoerig verslag gedaan van de metingen en van de interpretatie van de resultaten.

Om een indruk te geven van de schaal van deze meetcampagne staan in Figuur 2.4 een aantal dwarsgaaien en meetpunten afgebeeld. De resultaten van deze metingen zullen gebruikt worden bij de calibratie en verificatie van het model.



Figuur 2.3 Bodemligging Drempel van Hansweert in de jaren 1931 (a), 1955 (b), 1977 (c) en 1994 (d).



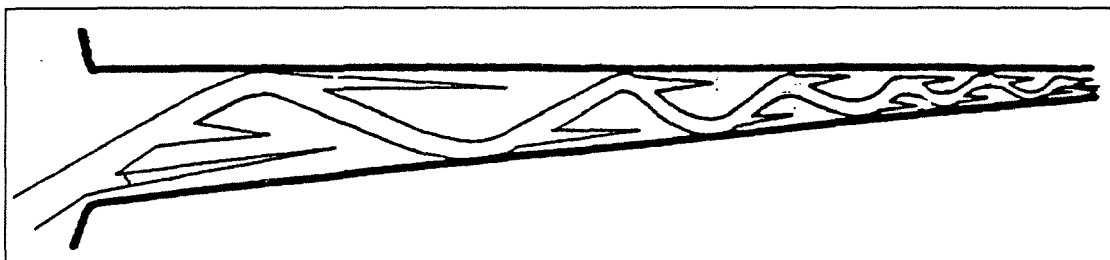
Figuur 2.4 Lokaties dwarsraaien en meetpunten van de meetcampagne.

2.4 Oorzaken drempelvorming

Een drietal oorzaken kunnen worden onderscheiden die tot drempelvorming leiden.

1. het elkaar ontwijken van eb- en vloedstroming
2. divergentie van stroming
3. vermindering secundaire stromingseffecten tussen opeenvolgende bochten

ad 1. De belangrijkste oorzaak voor drempelvorming is het feit dat eb- en vloedstroming vaak andere wegen kiezen. Als gevolg hiervan is het dwarsprofiel vaak relatief breed en



Figuur 2.5 Schema van een ideaal systeem van de Westerschelde met een ebgeul en vloedscharen (bron: Van Veen, 1950).

ondiep. Van Veen beschreef dit fenomeen reeds in de jaren '50 (Van Veen, 1950). In Figuur 2.5 staat één van zijn figuren afgebeeld. De Westerschelde wordt gekenmerkt door een ebgedomineerde hoofdgeul en vloedscharen. Dit patroon is duidelijk herkenbaar bij de Drempel van Hansweert met de Schaar van Waarde als vloedschaar en het Zuidergat als ebgedomineerde hoofdgeul (zie Figuur 2.3).

ad 2. Door de divergentie van de stroming t.g.v. het grotere dwarsoppervlak ter hoogte van de drempel, nemen de stroomsnelheden af en neemt de sedimenttransportcapaciteit af. Hierdoor zal een ondiepte ontstaan. Het baggeren van de drempel versterkt dit proces (zie Tank, 1997d).

ad 3. Tussen twee opeenvolgende bochten bevindt zich een relatief recht stuk waar minder secundaire stroming optreedt. In bochten zelf is er een naar de binnenbocht gericht sedimenttransport hetgeen veroorzaakt wordt door secundaire stroming. Hierdoor is het bochtprofiel vaak driehoekig en relatief diep. Door de vermindering van de secundaire stromingseffecten op relatief rechte stukken is het dwarsprofiel daar vaak meer rechthoekig en relatief ondiep.

3. Beheersalternatieven voor vermindering effecten baggerinspanning

3.1 Inleiding

Op de Drempel van Hansweert wordt in de jaren '90 gemiddeld $2,65 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ per jaar gebaggerd. De baggerwerkzaamheden vinden regelmatig over het jaar plaats. Het merendeel, naar schatting 65 % (Tank, 1997c), wordt uitgevoerd in het zuidelijk deel van het baggervak. De drempel wordt op een minimale diepte van NAP -14,5 m gehouden. Het gebaggerde materiaal wordt grotendeels westwaarts van de Drempel van Hansweert in het Gat van Ossensisse gestort (zie Figuur 2.1, blz. 5) (Van Dam en Quartel, 1992). Af en toe wordt een zeer gering deel van het materiaal van de Drempel van Hansweert in de Schaar van Waarde gestort. De stortingen nabij de Drempel van Hansweert die van belang zijn, zijn die in de Schaar van Waarde en op het plateau ten oosten van de Plaat van Ossensisse. In de Schaar van Waarde wordt in de jaren '90 gemiddeld $0,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ per jaar gestort. Dit gebeurt echter erg onregelmatig. Het materiaal is afkomstig van de randen van de Plaat van Walsoorden en de Plaat van Valkenisse. Op het plateau ten oosten van de Plaat van Ossensisse wordt jaarlijks gemiddeld $0,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ gestort. Dit materiaal is afkomstig van de rand van de Plaat van Valkenisse.

Het is gebleken dat de bagger- en stortactiviteiten in de afgelopen 40 jaar tot een verhoging van de platen hebben geleid (Pieters *et al.*, 1991; Huijs, 1996). Een ander nadeel van het bagger- en stortwerk is verstoring van de bodemfauna van onder meer de intergetijdegebieden.

Om de negatieve gevolgen van het huidige bagger- en stortbeleid te verminderen zijn er verschillende alternatieve wijzen van vaargeulbeheer onderzocht. Deze alternatieven worden in paragraaf 3.2 beschreven.

3.2 Alternatieven baggerwerkzaamheden

Variatie frequentie uitvoering baggerwerk

Momenteel wordt er min of meer continu gebaggerd in de Westerschelde. Het bagger- en stortwerk verstoort de natuur daardoor ook continu. Een mogelijkheid om de negatieve effecten van het baggerwerk te verminderen zou een verlaging van de frequentie van het uitvoeren van het baggerwerk kunnen zijn. Een consequentie van het verlagen van de frequentie is, dat telkens als er gebaggerd wordt, er een grotere hoeveelheid gebaggerd zal moeten worden.

Frequentieverlaging zal leiden tot een toename van het baggerwerk per keer (dus ook meer stortwerk per keer). De vraag is echter of de totale jaarlijkse hoeveelheid zand die gebaggerd zal moeten worden, sterk zal veranderen (of niet) als de baggerfrequentie wordt gevarieerd. Verlaging van de bagger- en stortfrequentie zou de ecologie van het gebied ten goede kunnen komen. Als voorbeeld van dit uitgangspunt kan gedacht worden aan seizoensbaggeren. Door te baggeren in seizoenen van lage(re) ecologische activiteit zouden de negatieve effecten van het baggerwerk verminderd kunnen worden. Er moet met nadruk worden gesteld dat het effect van variatie van de bagger- en stortfrequentie op de ecologie nog nader onderzocht zal moeten worden.

Beïnvloeding lokale debietverdeling

Eén van de mechanismen van aanzanding op de drempel is de verlaging van de stroomsnelheid ter plaatse van de (gebaggerde) drempel. Door de lagere stroomsnelheden nemen de sedimenttransporten op de drempel af en zal de drempel aanzanden. Een mogelijkheid om de hoeveelheid baggerwerk te verminderen is er voor te zorgen dat de stroomsnelheid minder

afneemt ter hoogte van de drempel dan in de huidige situatie het geval is. De drempel zal in dat geval naar verwachting minder aanzanden. De lokale debietverdeling kan op verschillende wijzen worden beïnvloed. Er kan gebruik gemaakt worden van 'zachte' maatregelen of van 'harde' maatregelen.

- **Zachte maatregelen**

Door het gebaggerde materiaal te storten in een nevengeul zal de stroming door de nevengeul enigszins verminderen. Daardoor zal de stroming over de drempel relatief groter worden. In het geval van de Drempel van Hansweert kan gedacht worden aan storten in de Schaar van Waarde. Het materiaal kan eventueel afkomstig zijn van de drempel zelf (werk met werk maken).

- **Harde maatregelen**

Om de stroming meer over de drempel te leiden kan ook gebruik gemaakt worden van harde constructies. Leidammen en kribben kunnen de stroming meer over de drempel leiden en daardoor zal de natuurlijk evenwichtsdiepte wellicht toenemen en het baggerwerk afnemen. Het grote nadeel van deze harde constructies is dat de natuurlijke dynamiek van het estuarium afneemt. De stroming wordt blijvend gefixeerd en dat wordt gezien als een reductie van de dynamiek, hetgeen vaak beschouwd wordt als een ongewenst effect.

Vergroting transportafstand

In de huidige baggerpraktijk wordt de baggerspecie op een afstand van slechts enkele kilometers van de winplaats teruggestort. Uit onderzoek is gebleken dat dit materiaal mogelijk snel weer op de oude plaats terug is (Pieters *et al.*, 1991; Storm, 1996). Een vergroting van de transportafstand zal er toe leiden dat het veel langer duurt voordat het materiaal weer op de oude plaats is teruggekeerd, of dat het gebaggerde materiaal de oude plaats helemaal niet meer bereikt. Door een vergroting van de transportafstand kan de hoeveelheid baggerwerk dus misschien worden beperkt.

Het baggerwerk vindt hoofdzakelijk plaats in het oostelijk deel van de Westerschelde. Bij een vergroting van de transportafstand wordt met name gedacht aan baggeren in het oostelijk deel en storten in het westelijk deel van de Westerschelde. Dit zal gevolgen hebben voor de morfologie en ecologie. De gevolgen van het verder weg storten zullen pas op de langere termijn zichtbaar zijn; dit alternatief is daarom niet gesimuleerd met DELFT2D-MOR.

Grootschalige kombergingsvergroting

Grootschalige kombergingsvergroting zou kunnen leiden tot een diepere ligging van de drempel. De gedachte hierachter is dat door een vergroting van de komberging landinwaarts van de drempel (bijvoorbeeld door ontpoldering) het getijvolume over de drempel zal toenemen. Dit zal leiden tot een vergroot doorstroomoppervlak, waardoor de hoeveelheid baggerwerk af zou kunnen nemen. De omvang van de vergroting van de komberging bepaalt het effect. De huidige plannen voor kombergingsvergroting zullen nauwelijks effect hebben op de debieten bij de Drempel van Hansweert. Ook vanwege het feit dat ontpoldering maatschappelijk controversieel is en effecten pas op de langere termijn zichtbaar zullen zijn, zal dit alternatief niet met DELFT2D-MOR worden doorgerekend.

Baggeren midden in de vaargeul

In de huidige baggerstrategie is het gebruikelijk om langs de rand van de vaargeul te baggeren. Als in het midden van de vaargeul wordt gebaggerd, worden eb- en vloedstroom op de drempel meer naar elkaar toe getrokken. Dit kan een diepere evenwichtsligging van de drempel tot gevolg hebben. Het verschil met de huidige baggerstrategie is echter zo klein dat met inachtneming van de afstand van de roosterpunten in het modelgrid dit alternatief nauwelijks verschil op zal leveren met de simulatie van de huidige baggerstrategie. De vaargeul ter hoogte

van de Drempe van Hansweert is ongeveer 300 m breed. De afstand van de roosterpunten in het model ter plaatse is ongeveer 50 m. Dit alternatief zal daarom ook niet worden gesimuleerd met DELFT2D-MOR.

Met DELFT2D-MOR worden de volgende cases onderzocht:

- Variatie frequentie uitvoering baggerwerk
- Beïnvloeding lokale debietverdeling

In Hoofdstuk 4 worden de berekeningen die gedaan zijn nader uitgewerkt. (Een overzicht van de berekeningen wordt in Tabel 4.2 op blz. 15 gegeven).

4. Berekeningen DELFT2D-MOR

4.1 Inleiding

Er zijn een aantal berekeningen uitgevoerd om na te gaan wat de effecten van diverse ingrepen zijn op de Drempel van Hansweert. Deze berekeningen zijn op vergelijkbare wijze uitgevoerd als de berekeningen van de autonome ontwikkeling en de huidige baggerstrategie. Voor een beschrijving van de systematiek van de berekeningen wordt verwezen naar het deelrapport van Fase 1: Modelbouw en simulatie huidige situatie (Groenewoud, 1997). In dit hoofdstuk worden alleen de opzet en de resultaten van de verschillende berekeningen behandeld.

De opzet van deze berekeningen zal in paragraaf 4.2 worden behandeld. De resultaten van de verschillende berekeningen worden besproken in paragraaf 4.3. In paragraaf 4.4 worden de resultaten van de berekeningen onderling vergeleken.

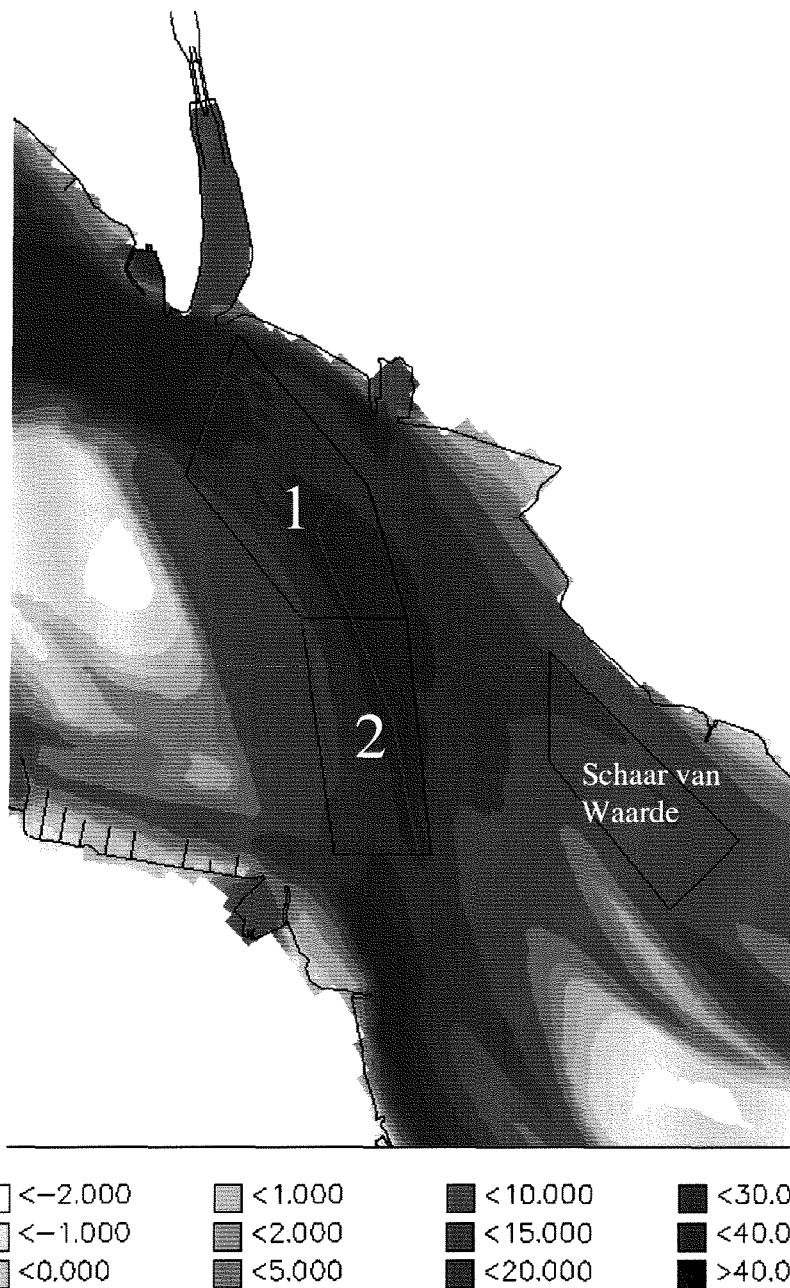
4.2 Opzet berekeningen

Op vergelijkbare wijze als de berekeningen van de autonome ontwikkeling en de huidige baggerstrategie (zie rapport Fase 1) zijn er een aantal berekeningen uitgevoerd met een simulatieperiode van één jaar. Bij alle simulaties is in principe de bodemligging van 1996 als uitgangspunt genomen. Bij de berekeningen zijn een drietal kenmerken gevarieerd.

1. de lokatie van het baggergebied
2. de lokatie van het stortgebied
3. de frequentie van het baggeren c.q. storten

De verschillende lokaties van de bagger- en stortgebieden staan afgebeeld in Figuur 1.1. De oppervlaktes van de verschillende gedefinieerde gebieden staan in Tabel 4.1 weergegeven. Tabel 4.2 laat zien welke berekeningen zijn uitgevoerd. Ter verduidelijking zijn in Tabel 4.2 ook de simulatie van de autonome ontwikkeling en de simulatie van de huidige baggerstrategie aangegeven. Vak 1&2 is gedefinieerd als het *drempelvak*. De ligging van het daarbinnen gelegen *baggervak* is gebaseerd op de baggerlokatie van de periode 1991-1994. Het Schaar van Waarde Vak is een stortvak. De ontwikkeling van de gemiddelde bodemdiepte in de verschillende vakken is bij de diverse berekeningen bepaald. De jaarlijkse totale hoeveelheid baggerwerk en/of stortwerk is bij de diverse alternatieven constant gehouden (2,65 miljoen m³ per jaar). Dit is gedaan om de resultaten onderling vergelijkbaar te maken.

Bij de bespreking van de resultaten in paragraaf 4.3 zal met name de ontwikkeling in Vak 1&2 besproken worden. Bij de onderlinge vergelijking van de verschillende berekeningen (paragraaf 4.4) komen ook de ontwikkelingen in het Schaar van Waarde Vak en het baggervak nader aan bod.



Diepte (m) +↓

Figuur 4.1 Lokatie Vak 1, Vak 2, baggervak (rood aangegeven) en Vak Schaar van Waarde.

Vak	Oppervlakte (m ²)
1	1,87*10 ⁶
2	1,38*10 ⁶
1&2	3,25*10 ⁶
Baggervak	2,07*10 ⁶
Sch.v.W.	1,15*10 ⁶

Tabel 4.1 Oppervlaktes gedefinieerde vakken.

Berekening	Omschrijving	Baggergebied	Stortgebied	Frequentie baggeren+storten (per jaar)
0	Autonome ontwikkeling	-	-	-
1a	Huidige baggerstrategie: maandelijks baggeren	baggervak	-	12
1b	Variatie frequentie: jaarlijks baggeren	baggervak	-	1
2a	Maandelijks baggeren en storten	baggervak	Sch.v. Waarde	12
2b	Jaarlijks baggeren en storten	baggervak	Sch.v. Waarde	1
3a	Maandelijks baggeren in gehele drempelvak	drempelvak	-	12
3b	Jaarlijks baggeren in gehele drempelvak	drempelvak	-	1
4a	Maandelijks storten in de Schaar v. Waarde	-	Sch.v. Waarde	12
4b	Jaarlijks storten in de Schaar v. Waarde	-	Sch.v. Waarde	1
5	Leidam in de Schaar van Waarde	-	-	-

Tabel 4.2 Overzicht berekeningen met DELFT2D-MOR.

0 Autonome ontwikkeling: geen bagger- en stortwerk

De simulatie van de autonome ontwikkeling is reeds beschreven in het rapport van Fase 1. Onder autonome ontwikkeling wordt de ontwikkeling zonder verdere menselijke ingrepen verstaan.

1a Huidige baggerstrategie: maandelijks baggeren

De huidige baggerstrategie is gesimuleerd door 12 maal per jaar in het gedefinieerde baggervak de bodem met ongeveer 0,11 m te verdiepen² (jaarlijks totaal 1,28 m). Totaal komt de verdieping overeen met een jaarlijkse gebaggerde hoeveelheid van 2,65 miljoen m³. De simulatie van de huidige baggerstrategie is reeds beschreven in het rapport van Fase 1.

1b Variatie frequentie baggerwerk: jaarlijks baggeren

Bij deze berekening wordt er in plaats van 12 maal per jaar, 1 maal per jaar gebaggerd. Vóór aanvang van de berekening wordt in het baggervak 2,65 miljoen m³ gebaggerd. Dit komt overeen met een verdieping van het baggervak met 1,28 m en een gemiddelde verdieping van het omhullende drempelvak (Vak 1&2) van 0,82 m.

Een verlaging van de frequentie van het baggerwerk zou positieve gevolgen kunnen hebben voor de ecologie.

2a Maandelijks baggeren en storten

Het verschil tussen deze berekening en de simulatie van de huidige baggerstrategie (berekening 1a) is dat er nu wel gestort wordt, namelijk in de Schaar van Waarde (zie Figuur 4.1). Het gebied in de Schaar van Waarde heeft een oppervlak van 1,15 miljoen m². Maandelijks zal in dit gebied dan $2,65 \cdot 10^6 / 12 = 0,22 \cdot 10^6$ m³ gestort worden. Dit komt overeen met een

² De grootte van de verdieping van de diverse vakken is in de tekst met afgeronde getallen weergegeven. In het computerprogramma wordt met een grotere nauwkeurigheid gewerkt.

verondieping van $0,22 \cdot 10^6 / 1,15 \cdot 10^6 = 0,19$ m. Met het storten in de Schaar van Waarde wordt beoogd de lokale debietverdeling te beïnvloeden. De debieten over de drempel zullen toenemen en daardoor zal de evenwichtsdiepte toenemen (uitschuringseffect). Het gevolg hiervan zou zijn dat er minder gebaggerd hoeft te worden.

2b Jaarlijks baggeren en storten

Berekening 2b vertoont overeenkomsten met berekening 2a, met dit verschil dat nu de jaarlijkse hoeveelheid in één keer gebaggerd en gestort wordt. De bodemdiepte in het bagger- en het stortvak wordt vóór aanvang van de berekening aangepast. De bodemdiepte in het stortvak in de Schaar van Waarde zal hierdoor met $2,65 \cdot 10^6 / 1,15 \cdot 10^6 = 2,30$ m afnemen.

3a Vergroot baggervak: maandelijks baggeren

Bij deze berekening wordt het effect van de grootte van het baggervak onderzocht door met een vergroot baggervak te rekenen. Het vergrote baggervak is gelijk aan het gedefinieerde drempelvak (Vak 1&2). De bodem wordt maandelijks met 0,07 m verlaagd en het "gebaggerde" zand wordt niet teruggestort.

3b Vergroot baggervak: jaarlijks baggeren

Deze berekening lijkt op berekening 3a, met dit verschil dat de jaarlijkse hoeveelheid in één keer wordt gebaggerd. Dit geeft een bodemverlaging in Vak 1&2 van 0,82 m.

4a Storten Schaar van Waarde: maandelijks storten

Bij deze berekening wordt het effect van alleen het maandelijks storten in de Schaar van Waarde onderzocht. De bodem in de Schaar van Waarde wordt elke maand met 0,19 m opgehoogd.

4b Storten Schaar van Waarde: jaarlijks storten

Bij deze berekening wordt het effect van alleen het jaarlijks storten in de Schaar van Waarde onderzocht. De bodem in het vak van de Schaar van Waarde wordt voor aanvang van de berekening met 2,30 m opgehoogd.

5 Leidam in de Schaar van Waarde

Een leidam in de Schaar van Waarde blokkeert in zekere mate de eb- en vloedstroming door de Schaar van Waarde. De gedachte is dat de debieten door het Zuidergat en over de drempel hierdoor zullen toenemen. Bij dit alternatief is een leidam aangelegd in de Schaar van Waarde met een kruinhoogte van NAP -2 m.

4.3 Resultaten berekeningen

De resultaten van berekening 0 (autonome ontwikkeling) en berekening 1a (huidige baggerstrategie: maandelijks baggeren) staan uitvoerig besproken in het Fase 1 Rapport: Modelbouw en simulatie huidige situatie (Groenewoud, 1997). De resultaten van berekening 0 en berekening 1a zullen in deze paragraaf gedeeltelijk worden weergegeven.

Berekening 0 Simulatie autonome ontwikkeling

De autonome ontwikkeling van het gebied rondom de Drempel van Hansweert is gesimuleerd met DELFT2D-MOR. De berekening van de autonome ontwikkeling geeft een beeld van hoe de sedimentatie-erosie patronen bij de huidige bodemligging zouden zijn als er verder geen menselijke ingrepen (baggeren e.d.) zouden plaatsvinden.

Als basis voor de berekeningen is de bodem van 1996 genomen zoals verstrekt door het RIKZ. De bodemontwikkeling gedurende 1 jaar is berekend.

In Figuur 4.2 staan de sedimentatie- en erosiepatronen na 1 jaar tijd afgebeeld. In Figuur 4.2 zijn ook de lokaties van de evaluatievakken Vak 1 en Vak 2 afgebeeld.

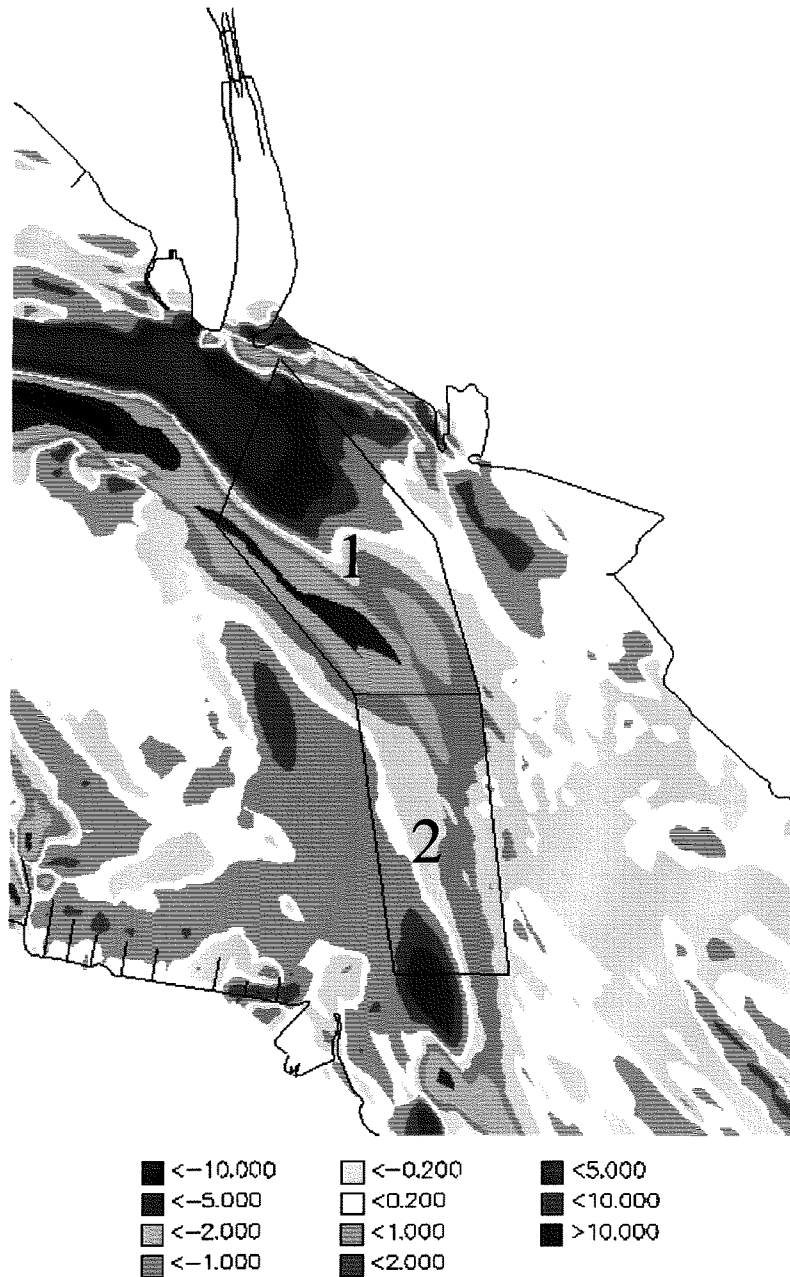
De binnenbocht noordelijk van de Plaat van Ossensisse zandt sterk aan, deels ten gevolge van de secundaire stroming die sedimenttransport genereert van de buitenbocht naar de binnenbocht.

In de Overloop van Hansweert treedt erosie op. Te zien is dat de erosiekuil zich ten dele uitstrekt tot binnen het baggervak op de Drempel van Hansweert. Binnen dit baggervak gaat de erosie over in sedimentatie. Plaatselijk komt sedimentatie van meer dan 5 m voor. De sterke aanzanding heeft geleid tot de vorming van een soort onderwaterspit.

Ook in de binnenbocht van het Zuidergat vindt sedimentatie plaats. In deze binnenbocht bevindt zich in werkelijkheid ook een baggerlokatie. De lokaties waar volgens de berekeningen aanzanding plaatsvindt, komen in grote lijnen overeen met de gebieden waar in werkelijkheid ook aanzanding plaatsvindt.

Om nu ook kwantitatief een uitspraak te doen, is het verloop van de gemiddelde dieptes in de vakken, zoals gedefinieerd in paragraaf 4.2 (zie ook Figuur 4.1), bepaald (zie Figuur 4.3 en Tabel 4.3). Te zien is dat de hoeveelheid aanzanding van Vak 1 en Vak 2 na 1 jaar tijd verschillend is (Vak 1: 0,48 m; Vak 2: 0,68 m. De aanzanding van Vak 1&2 bedraagt 0,57 m in één jaar tijd. Deze aanzanding komt qua grootte redelijk goed overeen met de langjarige trend op basis van de metingen (= 0,88 m/jaar, zie Groenewoud, 1997). Het model berekent een kleinere aanzanding in het geëvalueerde gebied. Een oorzaak voor het verschil ligt in het feit dat de erosiekuil noordelijk van de plaat van Ossensisse zich uitstrekt tot in Vak 1 en daarmee de aanzanding in het overige gedeelte van Vak 1 voor een deel te niet doet in de volumina berekening. Een soortgelijk effect treedt op in Vak 2, waar in de overgang van het Zuidergat naar de Drempel van Hansweert ook een erosiekuil ontstaat. Deze effecten beïnvloeden de vergelijking. Ook de ligging van Vak 1 en Vak 2 beïnvloedt uiteraard de vergelijking tussen gemeten en berekende ontwikkelingen, zeker vanwege de plaatselijk grootte verschillen in erosie en sedimentatie. Een andere ligging van de vakken zou weer andere resultaten tot gevolg kunnen hebben.

Uit Figuur 4.3 blijkt ook dat de gesimuleerde ontwikkeling in de tijd nagenoeg lineair is. Mogelijkerwijs is de drempel dermate ver uit evenwicht (voor zover er evenwicht bestaat) dat de ontwikkelingen lineair lijken op een tijdschaal van één jaar. De ontwikkeling in het baggervak is echter veel minder lineair.

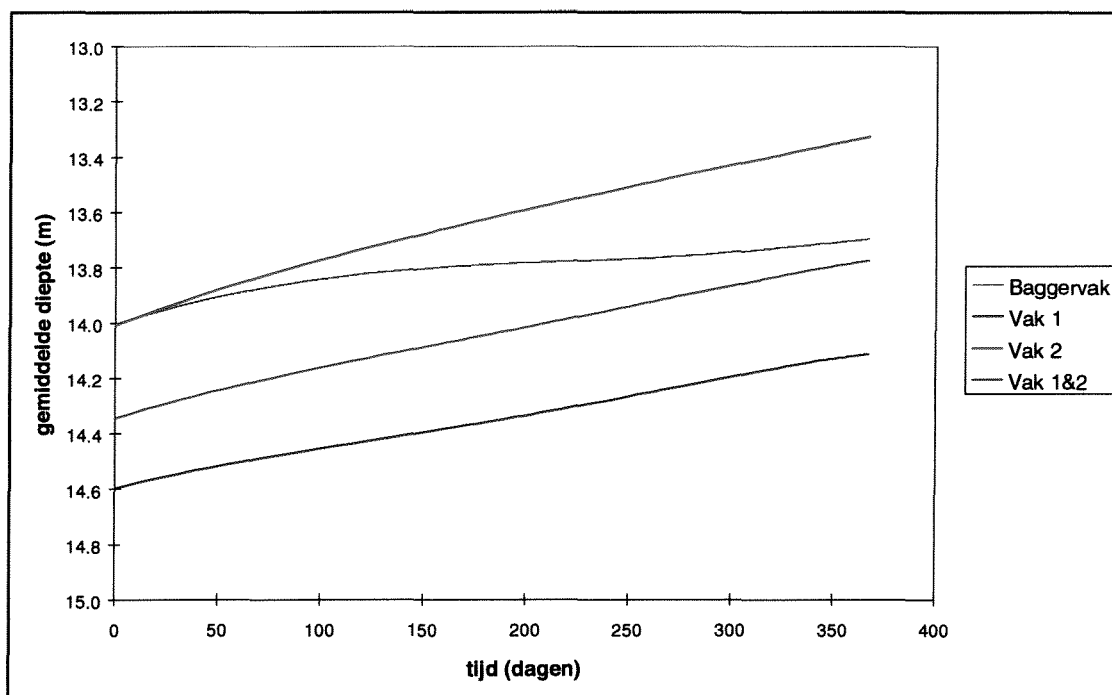


Erosie (m) positief Sedimentatie (m) negatief

Figuur 4.2 Sedimentatie- en erosiepatronen na 1 jaar bodemontwikkeling: lokaties Vak 1 en Vak 2 (autonome ontwikkeling).

Vak	Aanzanding na 1 jaar
Vak 1	0,48 m
Vak 2	0,68 m
Vak 1&2	0,57 m
Baggervak	0,31 m
Sch.v.W.	0,27 m

Tabel 4.3 Hoeveelheid aanzanding in de verschillende vakken (simulatie autonome ontwikkeling).



Figuur 4.3 Ontwikkeling gemiddelde bodemdieptes in de verschillende vakken (autonome ontwikkeling).

Berekening 1a Huidige baggerstrategie: maandelijks baggeren

De huidige baggerstrategie is gesimuleerd door 12 maal per jaar in het gedefinieerde baggervak de bodem met ongeveer 0,11 m te verdiepen (jaarlijks totaal 1,28 m). Totaal komt de verdieping overeen met een jaarlijkse gebaggerde hoeveelheid van 2,65 miljoen m³.

Figuur 4.4 laat zien hoe de sedimentatie-erosie patronen zijn na 1 jaar tijd. In Figuur 4.4 staan ook de gedefinieerde evaluatievakken Vak 1 en Vak 2 en het baggervak weergegeven.

De effecten van het baggerwerk zijn duidelijk zichtbaar. Vooral in het zuidelijke deel van de Drempel van Hansweert is de diepte hoofdzakelijk toegenomen. De toename van de bodemdiepte loopt plaatselijk op tot meer dan 5 m. In de gebieden van Vak 2 waar niet gebaggerd wordt, het noordoostelijke deel, vindt wel sedimentatie plaats.

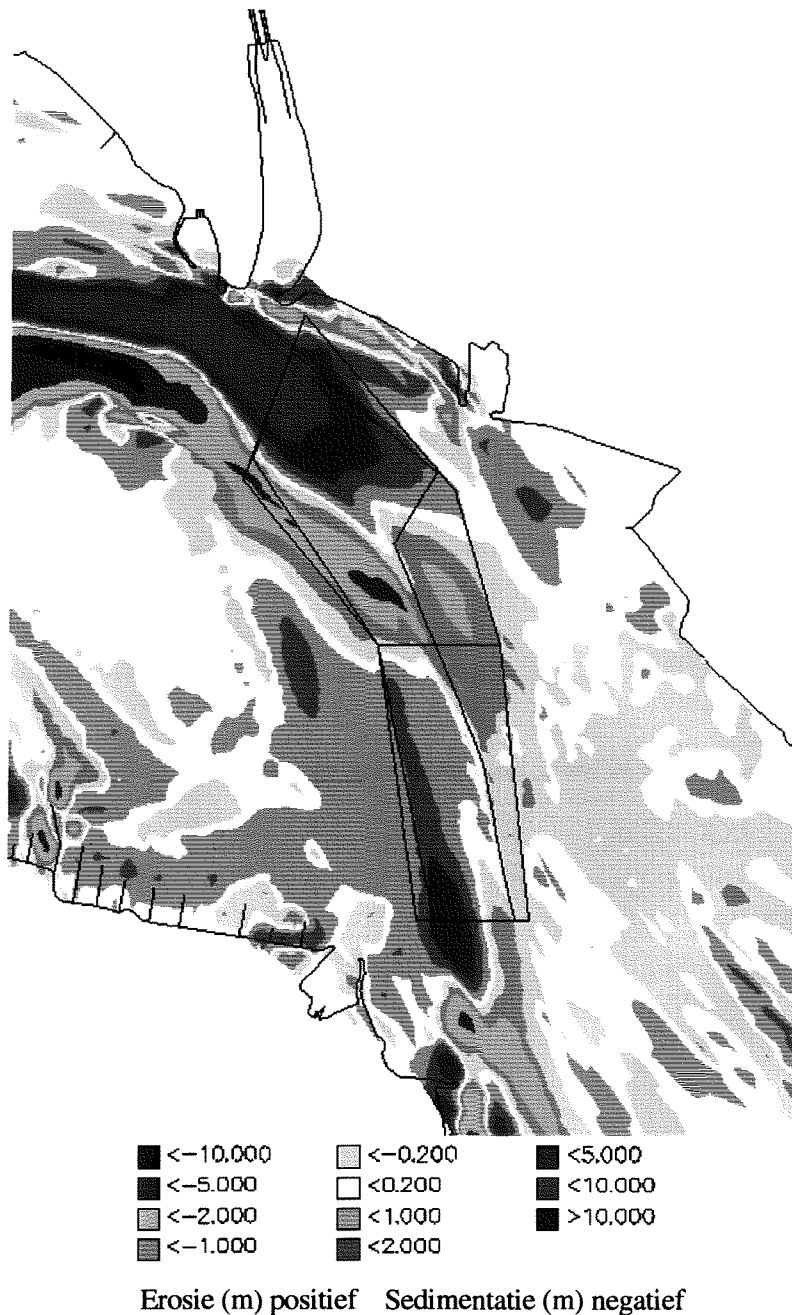
In het noordelijk deel van de drempel (Vak 1) neemt de bodemdiepte plaatselijk af, ook in het gebied waar de bodem wordt verlaagd. In het noordelijke deel van Vak 1 is er veel erosie, net zoals ook bij de berekeningen van de autonome ontwikkeling in het vorige hoofdstuk al was geconstateerd. Plaatselijk is er erosie tot meer dan 5 m.

In de binnenbocht noordelijk van de Plaat van Ossensisse vindt ook weer veel sedimentatie plaats. Plaatselijk neem de bodemdiepte af met meer dan 10 m. De secundaire stromingseffecten lijken erg groot.

Net zoals voor de autonome ontwikkeling is van Vak 1, Vak 2 en Vak 1&2 is het verloop van de gemiddelde diepte bepaald (Figuur 4.5). Het verloop van de gemiddelde diepte in het baggervak zelf staat ook in Figuur 4.5 afgebeeld. Na elke maand is er een sprong in de gemiddelde bodemdiepte ten gevolge van het baggeren.

De gemiddelde bodemdiepte neemt het sterkste toe in het baggervak zelf, na één jaar tijd ongeveer 0,77 m. Vak 1 vertoont na één jaar een toename van de bodemdiepte van 0,28 m, Vak 2 een toename van 0,09 m. De bodemdiepte van Vak 1&2 is gemiddeld met 0,20 m gedaald.

Om de aanzanding te bestuderen en te vergelijken met de autonome ontwikkeling is de bodemontwikkeling gecorrigeerd voor het baggerwerk. In Figuur 4.6 is de gecorrigeerde

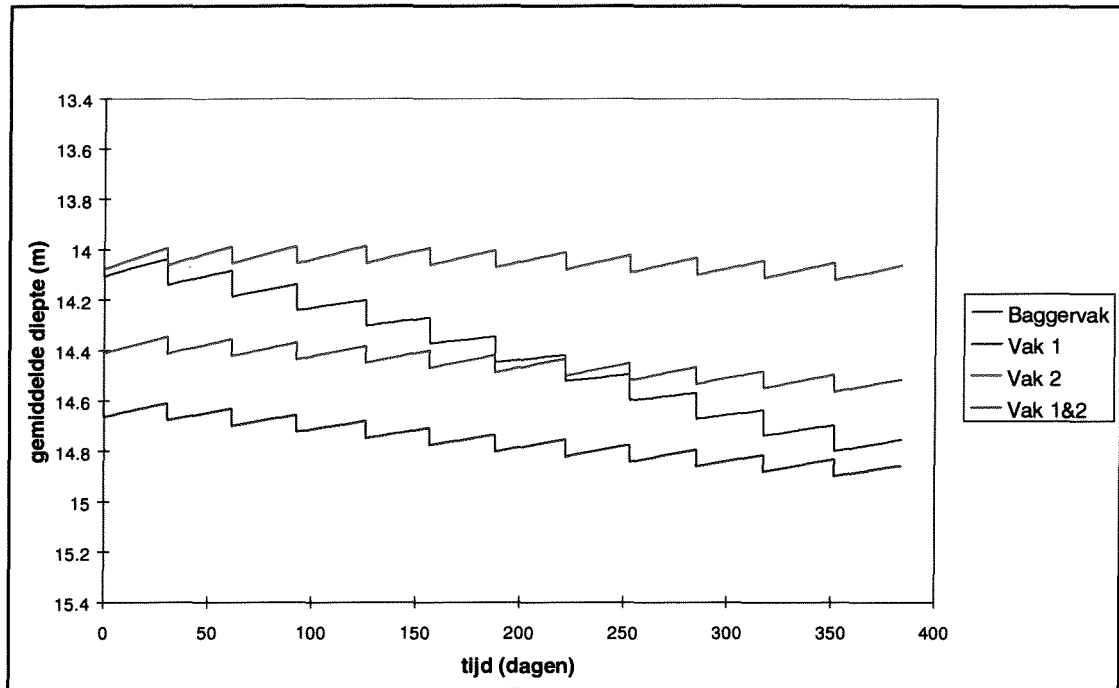


Figuur 4.4 Sedimentatie- en erosiepatronen na 1 jaar bodemontwikkeling; lokaties Vak 1, Vak 2 en baggervak (huidige baggerstrategie, maandelijks baggeren).

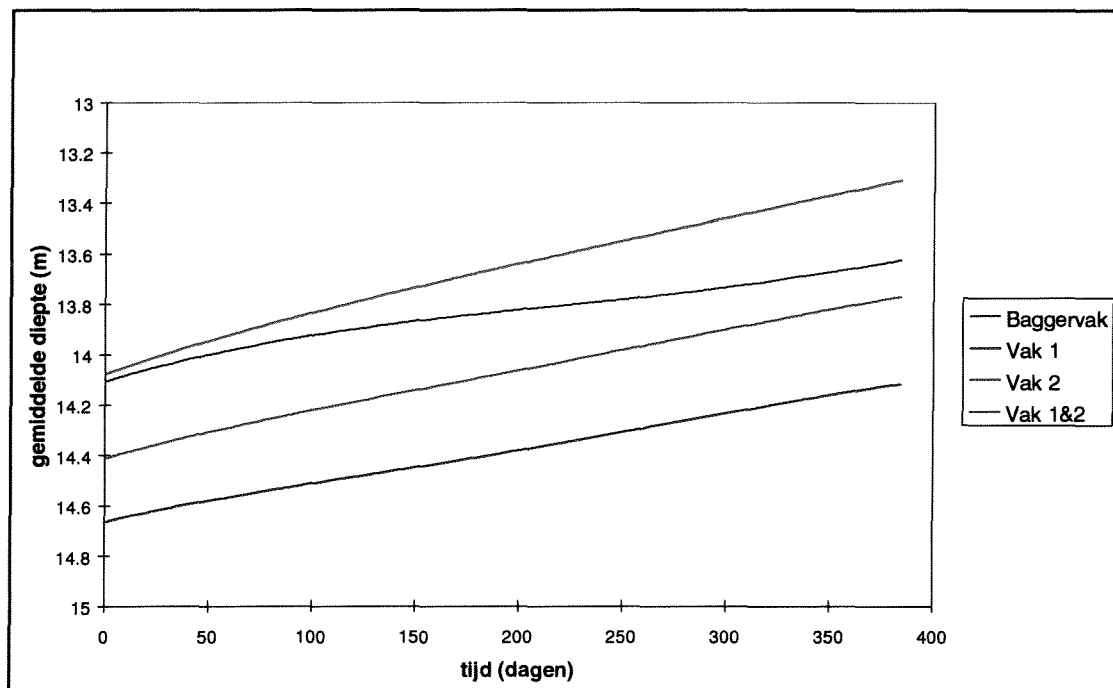
Vak	Aanzanding na 1 jaar (gecorrigeerd voor baggerwerk)
Vak 1	0,53 m
Vak 2	0,73 m
Vak 1&2	0,62 m
Baggervak	0,46 m
Sch.v.W.	0,24 m

Tabel 4.4 Aanzanding in de verschillende vakken na 1 jaar tijd (gecorrigeerd voor hoeveelheid baggerwerk).

bodemontwikkeling in de verschillende vakken weergegeven. In Vak 1&2 is een gemiddelde aanzanding van 0,62 m na 1 jaar. De berekening van de autonome ontwikkeling liet een aanzanding van 0,57 m na 1 jaar zien. De aanzanding in Vak 1&2 is bij de simulatie van de huidige baggerstrategie ongeveer 8% groter dan bij de simulatie van de autonome ontwikkeling. Een logische verklaring hiervoor is dat door het baggeren de drempel op overdiepte wordt gehouden en dat daardoor het gebied ook sneller aanzandt.



Figuur 4.5 Ontwikkeling gemiddelde bodemdieptes in de verschillende vakken (maandelijks baggeren).



Figuur 4.6 Ontwikkeling gemiddelde bodemdieptes in de verschillende vakken (gecorrigeerd voor hoeveelheid baggerwerk, maandelijks baggeren).

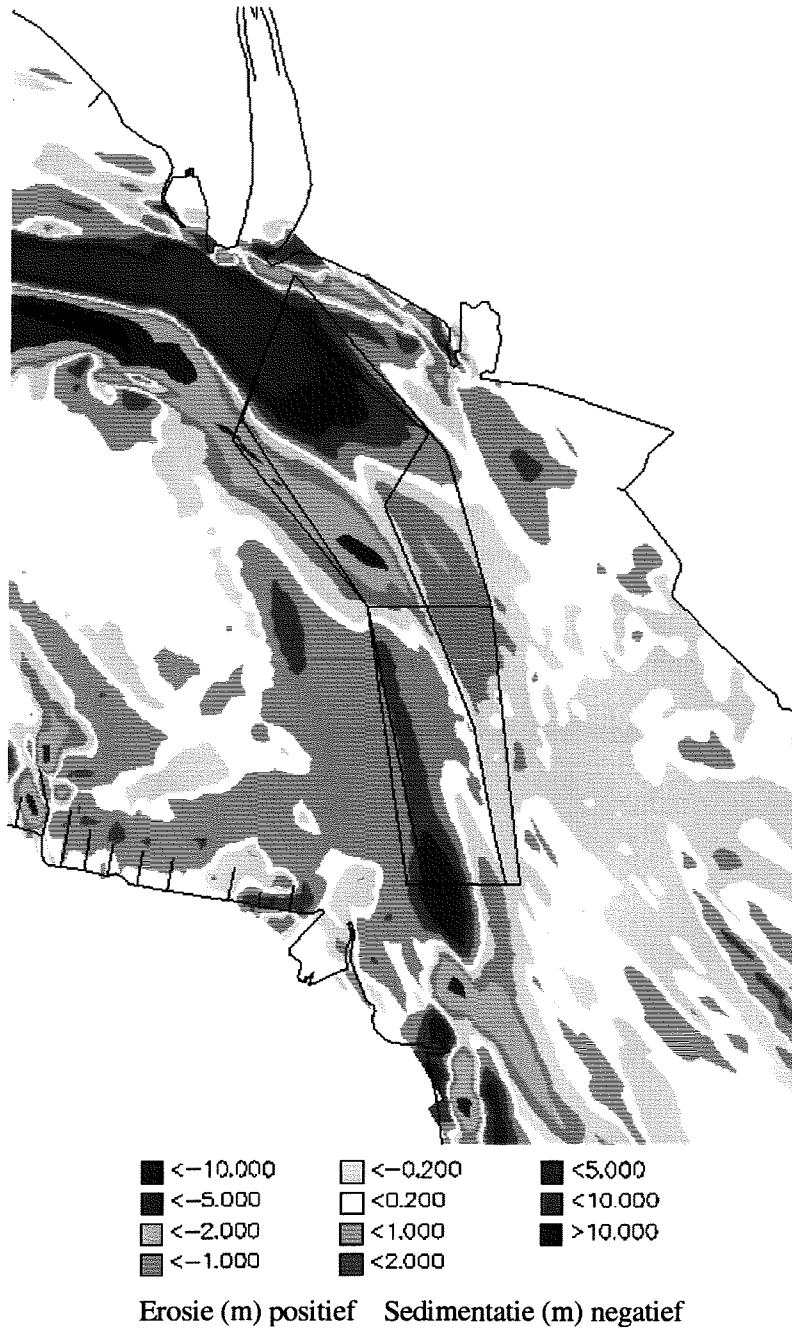
Berekening 1b Variatie frequentie baggerwerk: jaarlijks baggeren

Bij deze berekening is de bodem in het baggervak met 1,28 m verlaagd, hetgeen overeenkomt met een gebaggerde hoeveelheid sediment van $2,65 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. In het model wordt deze hoeveelheid niet "teruggestort".

De bodemontwikkeling gedurende 1 jaar tijd is berekend. Figuur 4.7 vertoont de sedimentatie- en erosiepatronen na 1 jaar tijd. In Figuur 4.7 zijn het gedefinieerde baggervak en drempelvak weergegeven. De sedimentatie- en erosiepatronen komen sterk overeen met die van berekening 1a (maandelijks baggeren, zie Figuur 4.4).

De binnenbocht boven de Plaat van Ossenisse zandt sterk aan, deels ten gevolge van de secundaire stroming die sedimenttransport genereert van de buitenbocht naar de binnenbocht. De secundaire stromingseffecten lijken overdreven te worden door het model; dit vraagt om nader onderzoek. In de Overloop van Hansweert treedt sterke erosie op, tot meer dan 5 m/jaar. Te zien is dat de erosiekuil zich ten dele uitstrekt tot binnen het baggervak op de Drempel van Hansweert. Binnen dit baggervak gaat de erosie over in sedimentatie. Aan de westelijke zijde van Vak 1 komt plaatselijk sedimentatie van meer dan 5 m voor. Er lijkt zich een soort onderwaterspit uit te bouwen vanaf de Plaat van Ossenisse tot op de Drempel van Hansweert. Ook in de binnenbocht van het Zuidergat vindt sedimentatie plaats. In deze binnenbocht bevindt zich in werkelijkheid ook een baggerlokatie. De lokaties waar volgens de berekeningen aanzanding plaatsvindt, komen in grote lijnen overeen met de gebieden waar in werkelijkheid ook aanzanding plaatsvindt.

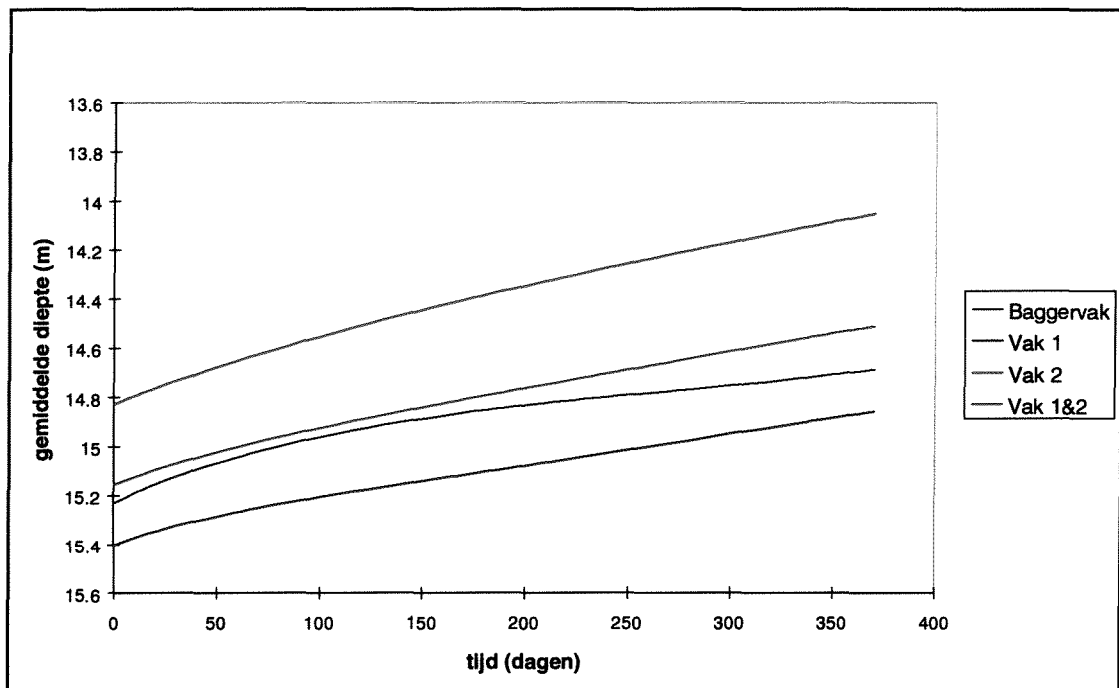
Om ook kwantitatief een uitspraak te doen, is het verloop van de gemiddelde dieptes bepaald (zie Figuur 4.8 en Tabel 4.5) in de vakken, zoals die eerder in deze paragraaf zijn gedefinieerd (zie ook Figuur 4.1). Vak 1 en Vak 2 zanden verschillend aan (Vak 1: 0,54 m na 1 jaar; Vak 2: 0,77 m na 1 jaar). De aanzanding van Vak 1&2 bedraagt 0,64 m na 1 jaar tijd. De ontwikkeling van de gemiddelde bodemdiepte in Vak 1, Vak 2 en Vak 1&2 is nagenoeg lineair. De ontwikkeling van de gemiddelde bodemdiepte in het baggervak is minder lineair. In de eerste helft van het jaar neemt de bodemdiepte veel sterker af dan in de tweede helft van het jaar. Na 1 jaar blijkt uit de berekeningen het baggervak 0,54 m ondieper geworden te zijn.



Figuur 4.7 Sedimentatie- en erosiepatronen na 1 jaar bodemontwikkeling; lokaties Vak 1, Vak 2 en baggervak (jaarlijks baggeren).

Vak	Aanzanding na 1 jaar (gecorrigeerd voor baggerwerk)
Vak 1	0,54 m
Vak 2	0,77 m
Vak 1&2	0,64 m
Baggervak	0,54 m
Sch.v.W.	0,23 m

Tabel 4.5 Hoeveelheid aanzanding in de verschillende vakken (jaarlijks baggeren).



Figuur 4.8 Ontwikkeling gemiddelde bodemdieptes in de verschillende vakken (jaarlijks baggeren).

Berekening 2a Maandelijks baggeren en storten

Het verschil tussen deze berekening en de simulatie van de huidige baggerstrategie is dat er nu wel gestort wordt, namelijk in de Schaar van Waarde. Het gekozen stortgebied in de Schaar van Waarde heeft een oppervlak van 1,15 miljoen m². Maandelijks zal in dit gebied dan $2,65 \cdot 10^6 / 12 = 0,22 \cdot 10^6$ m³ gestort worden. Dit komt overeen met een verondieping van $0,22 \cdot 10^6 / 1,15 \cdot 10^6 = 0,19$ m.

Figuur 4.9 vertoont de sedimentatie- en erosiepatronen na 1 jaar tijd. In Figuur 4.9 zijn het gedefinieerde baggervak en drempelvak weergegeven, alsmede het stortvak in de Schaar van Waarde. De erosie- en sedimentatiepatronen rond de drempel verschillen nauwelijks met die van berekening 1a (maandelijks baggeren). Te zien is ook dat het grootste gedeelte van het 'gestorte' zand in de Schaar van Waarde op zijn plaats blijft. Jaarlijks wordt dit gedeelte met in totaal 2,30 m opgehoogd (maandelijks $\approx 0,19$ m). Figuur 4.4 laat zien dat t.o.v. de situatie vóór het storten, aan de randen van het stortvak minder dan 2 m sedimentatie voorkomt. Het materiaal aan de randen van het stortvak heeft zich dus enigszins verspreid.

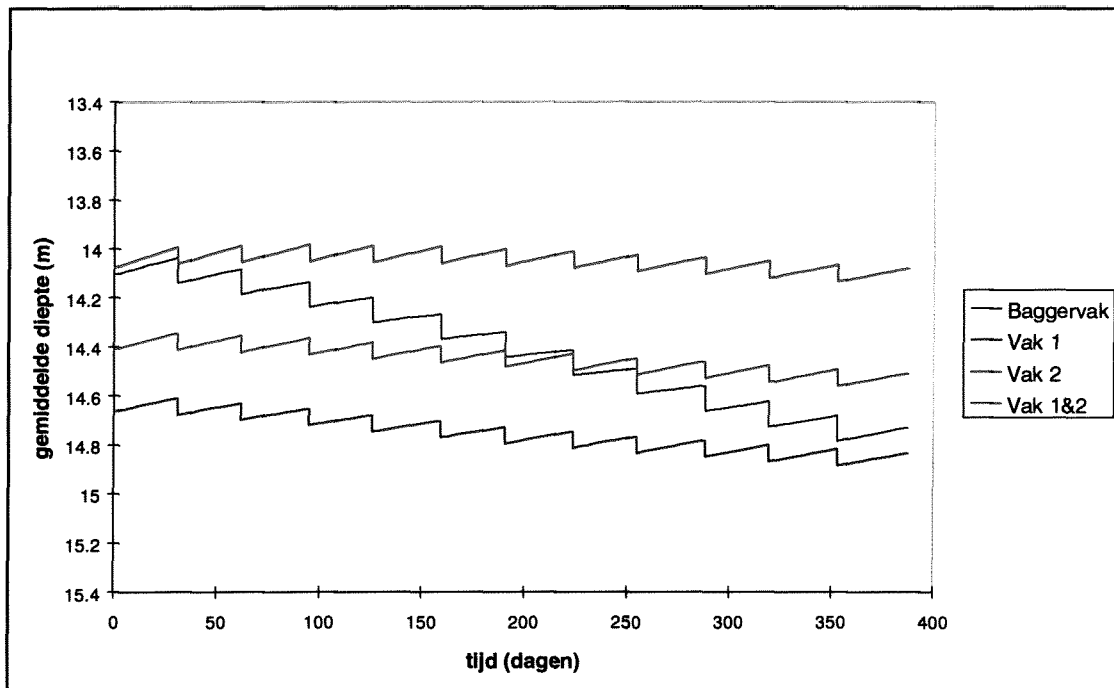
In het eerste half jaar is de afname van de bodemdiepte veel sterker dan in de tweede helft van het jaar. Het baggervak vertoont een aanzanding van 0,47 m na 1 jaar tijd. De aanzanding van het vak in de Schaar van Waarde (niet afgebeeld) bedraagt na 1 jaar tijd 0,10 m. De verschillen met berekening 1a (huidige baggerstrategie) zijn klein.



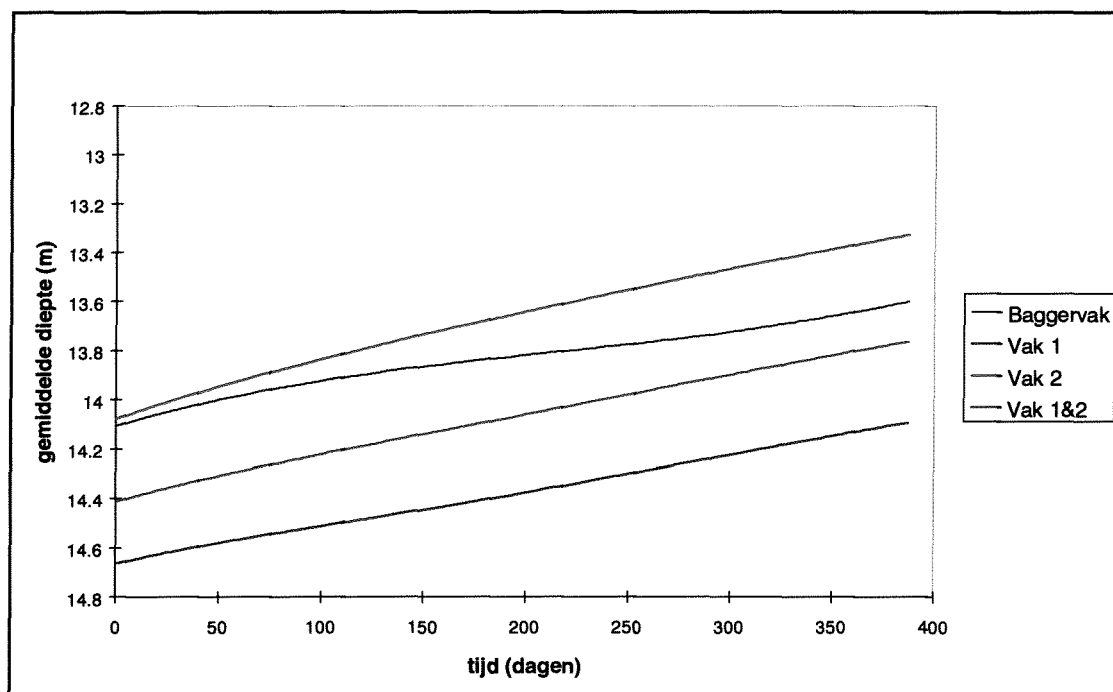
Figuur 4.9 Sedimentatie- en erosiepatronen na 1 jaar bodemontwikkeling; lokaties Vak 1, Vak 2, baggervak en Vak Schaar van Waarde (maandelijks baggeren en storten).

Vak	Aanzanding na 1 jaar (gecorrigeerd voor baggerwerk)
Vak 1	0,54 m
Vak 2	0,72 m
Vak 1&2	0,62 m
Baggervak	0,47 m
Sch.v.W.	0,10 m

Tabel 4.6 Hoeveelheid aanzanding in de verschillende vakken (gecorrigeerd voor de hoeveelheid baggerwerk, maandelijks baggeren en storten).



Figuur 4.10 Ontwikkeling gemiddelde bodemdieptes in de verschillende vakken (maandelijks baggeren en storten).



Figuur 4.11 Ontwikkeling gemiddelde bodemdieptes in de verschillende vakken (gecorrigeerd voor hoeveelheid baggerwerk, maandelijks baggeren en storten).

2b Jaarlijks baggeren en storten

Bij berekening 2b wordt er jaarlijks gebaggerd en gestort. Voor aanvang van de simulatie wordt de bodem in het baggervak met 1,28 m verlaagd en de bodem in de Schaar van Waarde met 2,30 m opgehoogd.

De bodemontwikkeling na 1 jaar tijd is afgebeeld in Figuur 4.12. In grote lijnen zijn weer dezelfde sedimentatie- en erosiepatronen waarneembaar als bij de andere berekeningen. De binnenbocht noordelijk van de Plaat van Ossensisse zandt sterk aan, deels ten gevolge van de secundaire stroming die sedimenttransport genereert van de buitenbocht naar de binnenbocht. In de Overloop van Hansweert treedt erosie op. Te zien is dat de erosiekuil zich ten dele uitstrekt tot binnen het baggervak op de Drempel van Hansweert. Binnen dit baggervak gaat de erosie over in sedimentatie. Aan de westelijke zijde van Vak 1 vindt veel sedimentatie plaats. Vanaf de Plaat van Ossensisse bouwt zich een soort onderwaterspit uit tot op de drempel. De bodemdiepte in de Schaar van Waarde is door het storten sterk toegenomen.

De resultaten van het verloop van de gemiddelde dieptes in de verschillende vakken staan afgebeeld in Figuur 4.13. De aanzanding in Vak 1 bedraagt 0,57 m na 1 jaar; de aanzanding in Vak 2 bedraagt 0,72 m na 1 jaar. De gemiddelde aanzanding in Vak 1&2 bedraagt 0,64 m na 1 jaar. Wederom is de ontwikkeling van de gemiddelde bodemdiepte in Vak 1, Vak 2 en Vak 1&2 is nagenoeg lineair.

De ontwikkeling van de gemiddelde bodemdiepte in het baggervak is minder lineair. In de eerste helft van het jaar neemt de bodemdiepte veel sterker af dan in de tweede helft van het jaar. Na 1 jaar vertoont het baggervak een aanzanding van 0,58 m.

De gemiddelde diepte in het vak van de Schaar van Waarde is na een jaar nagenoeg gelijk aan de beginsituatie; 0,01 m verdieping (de ontwikkeling van de bodemdiepte in de Schaar van Waarde is niet afgebeeld).

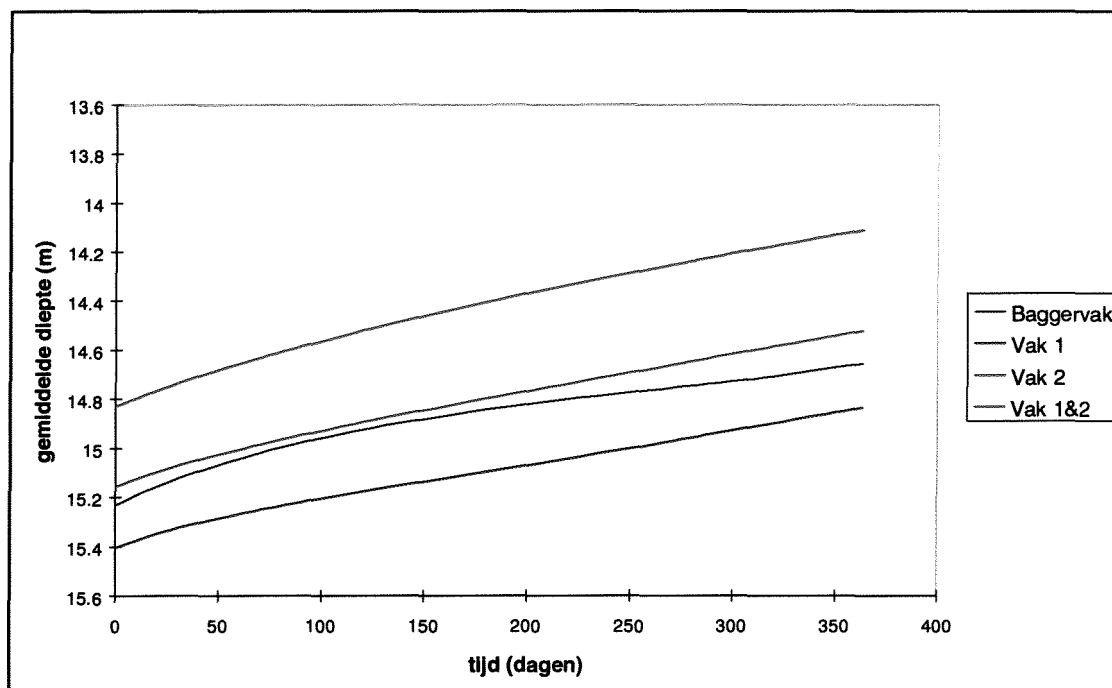


Erosie (m) positief Sedimentatie (m) negatief

Figuur 4.12 Sedimentatie- en erosiepatronen na 1 jaar bodemontwikkeling; lokaties Vak 1, Vak 2, baggervak en Vak Schaar van Waarde (jaarlijks baggeren en storten).

Vak	Aanzanding na 1 jaar (gecorrigeerd voor baggerwerk)
Vak 1	0,57 m
Vak 2	0,72 m
Vak 1&2	0,64 m
Baggervak	0,58 m
Sch.v.W.	-0.01 m

Tabel 4.7 Hoeveelheid aanzanding in de verschillende vakken (gecorrigeerd voor de hoeveelheid baggerwerk, jaarlijks baggeren en storten).



Figuur 4.13 Ontwikkeling gemiddelde bodemdieptes in de verschillende vakken (jaarlijks baggeren en storten).

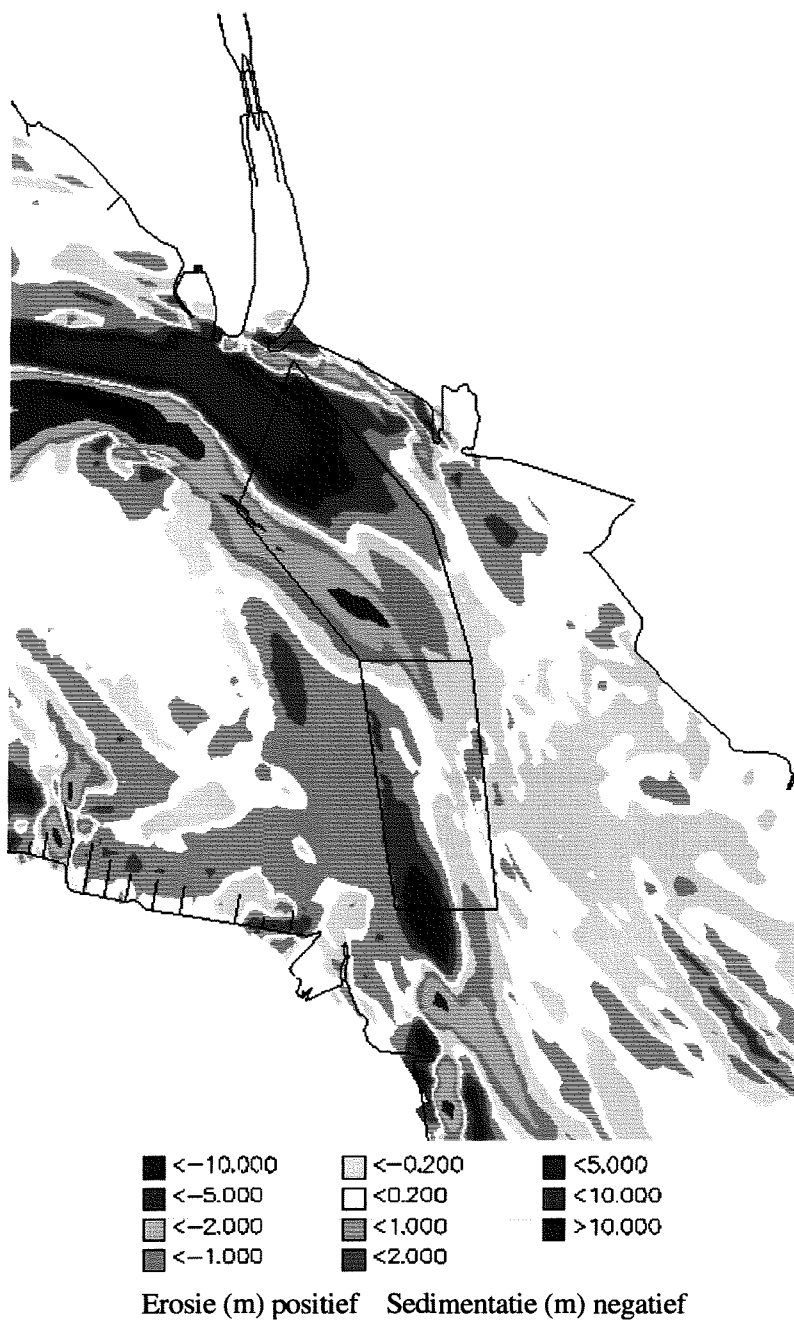
3a Vergroot baggervak: maandelijks baggeren

Bij deze berekening wordt het effect van de grootte van het baggervak onderzocht door met een vergroot baggervak te rekenen. Het vergrote baggervak is gelijk aan het gedefinieerde drempelvak (Vak 1&2). De bodem wordt maandelijks met 0,07 m verlaagd en het “gebaggerde” zand wordt niet teruggestort.

De bodemontwikkeling gedurende 1 jaar tijd is berekend. Figuur 4.14 vertoont de sedimentatie- en erosiepatronen na 1 jaar tijd. In Figuur 4.14 is ook het gedefinieerde drempelvak weergegeven.

De sedimentatie- en erosiepatronen komen sterk overeen met de vorige alternatieven. In de Overloop van Hansweert vindt sterke erosie plaats die zich uitstrekt tot in het drempelvak. De binnenbocht noordelijk van de Plaat van Ossensisse zandt sterk aan. De drempel zandt vooral sterk aan de westelijke zijde van Vak 1 aan.

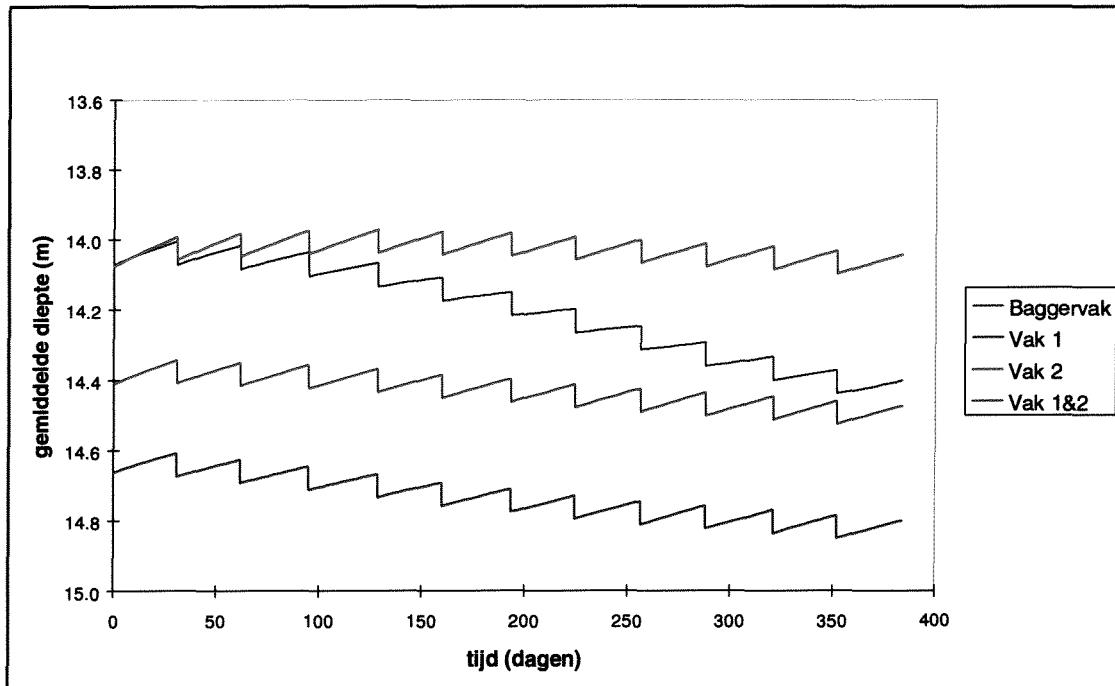
De ontwikkeling van de gemiddelde dieptes in de diverse vakken staat weergegeven in Figuur 4.15. De voor het baggerwerk gecorrigeerde ontwikkeling van de gemiddelde dieptes in de diverse vakken staat weergegeven in Figuur 4.16 (zie ook Tabel 4.8). Vak 1 zandt gemiddeld 0,56 m in 1 jaar aan. Vak 2 zandt gemiddeld iets meer aan: 0,72 m in 1 jaar. Vak 1&2 zandt 0,63 m aan in 1 jaar tijd. Bij deze berekening zandt het drempelvak dus iets harder aan dan bij de simulatie van de huidige baggerstrategie (0,62 m in 1 jaar). Het verschil is echter minimaal.



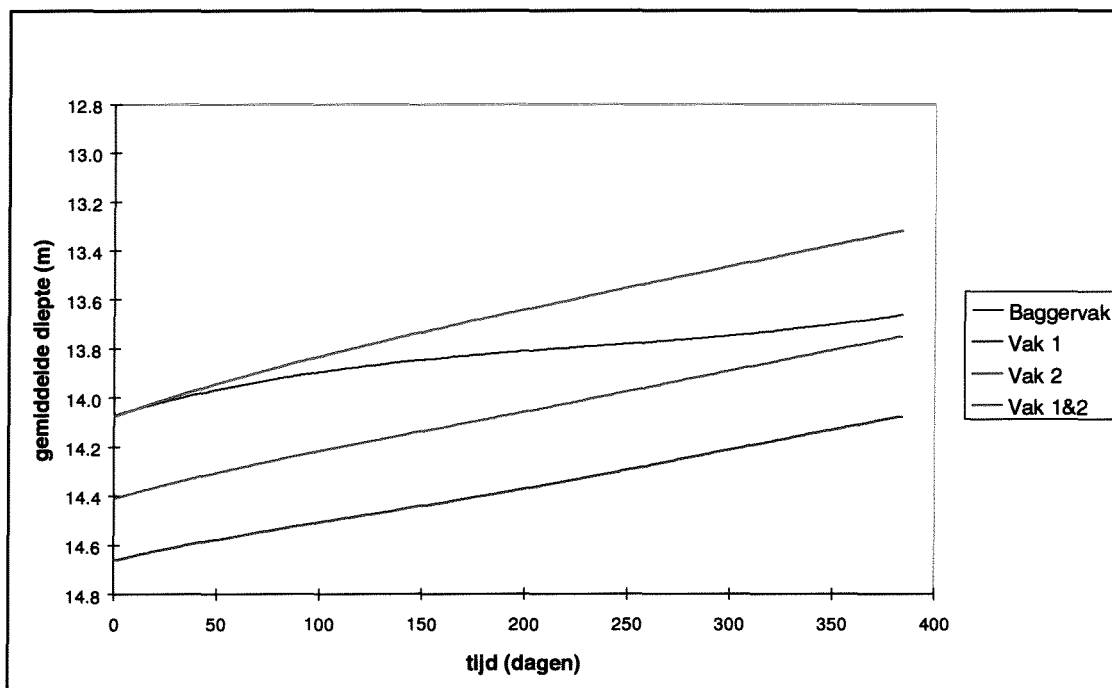
Figuur 4.14 Sedimentatie- en erosiepatronen na 1 jaar bodemontwikkeling; lokaties Vak 1 en Vak 2 (maandelijks baggeren vergroot baggervak).

Vak	Aanzanding na 1 jaar (gecorrigeerd voor baggerwerk)
Vak 1	0,56 m
Vak 2	0,72 m
Vak 1&2	0,63 m
Baggervak	0,39 m
Sch.v.W.	0,24 m

Tabel 4.8 Hoeveelheid aanzanding in de verschillende vakken (gecorrigeerd voor de hoeveelheid baggerwerk); vergroot baggervak, maandelijks baggeren.



Figuur 4.15 Ontwikkeling gemiddelde bodemdieptes in de verschillende vakken (maandelijks baggeren vergroot baggervak).

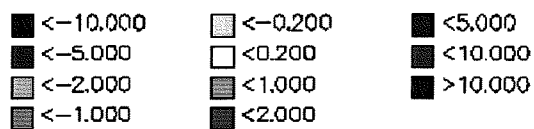
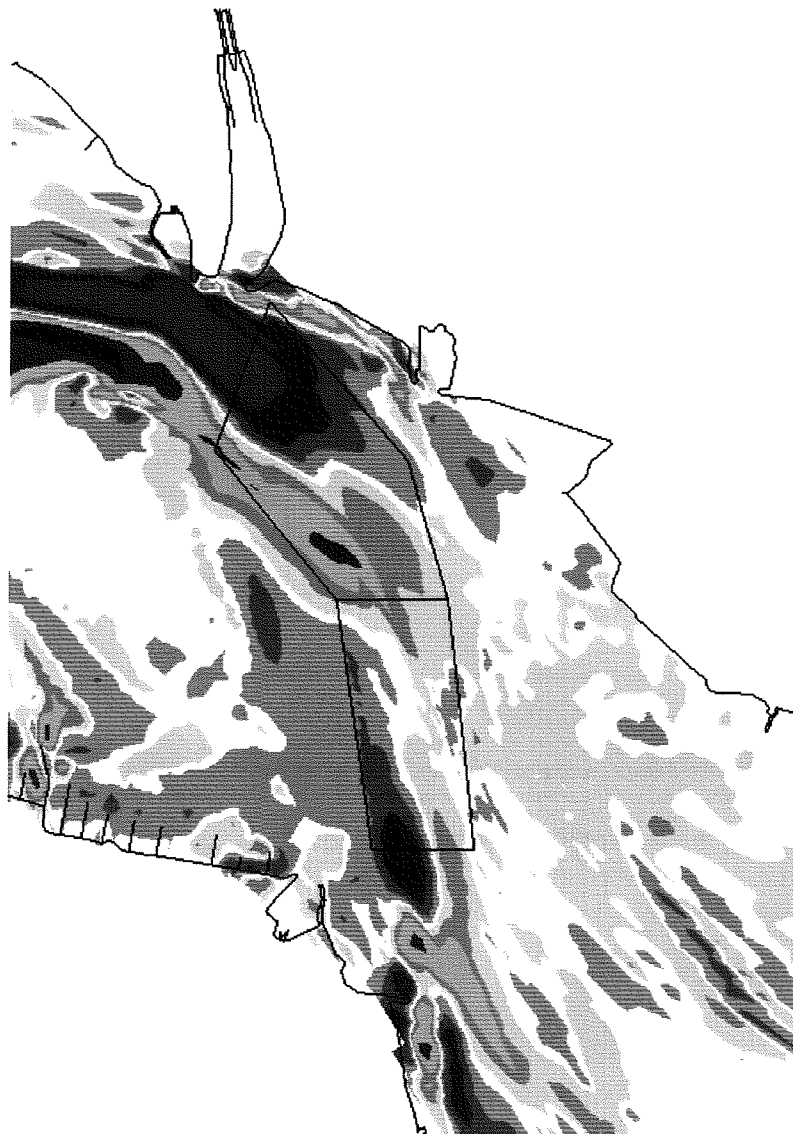


Figuur 4.16 Ontwikkeling gemiddelde bodemdieptes in de verschillende vakken (gecorrigeerd voor hoeveelheid baggerwerk, maandelijks baggeren vergroot baggervak).

3b Vergroot baggervak: jaarlijks baggeren

Deze berekening is overeenkomstig het vorige alternatief, maar met dit verschil dat de jaarlijkse hoeveelheid in één keer wordt gebaggerd.

De bodemontwikkeling na 1 jaar tijd is afgebeeld in Figuur 4.17. In grote lijnen zijn weer

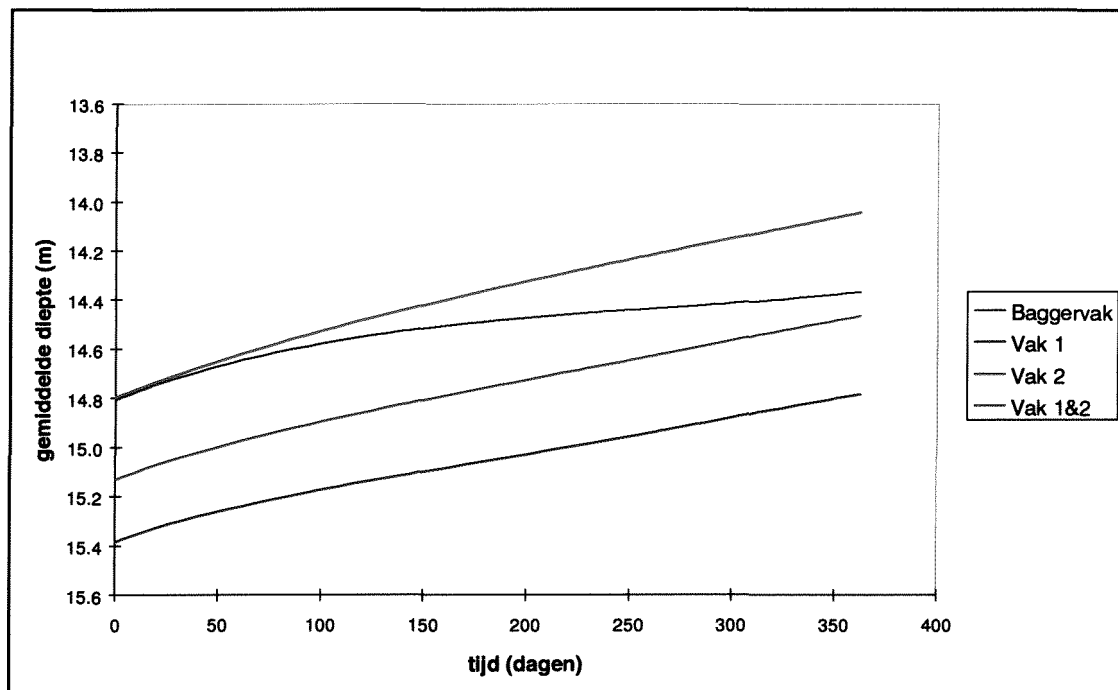


Erosie (m) positief Sedimentatie (m) negatief

Figuur 4.17 Sedimentatie- en erosiepatronen na 1 jaar bodemontwikkeling; lokaties Vak 1 en Vak 2 (jaarlijks baggeren vergroot baggervak).

Vak	Aanzanding na 1 jaar (gecorrigeerd voor baggerwerk)
Vak 1	0,60 m
Vak 2	0,76 m
Vak 1&2	0,67 m
Baggervak	0,44 m
Sch.v.W.	0,23 m

Tabel 4.9 Hoeveelheid aanzanding in de verschillende vakken (gecorrigeerd voor de hoeveelheid baggerwerk, jaarlijks baggeren vergroot baggervak).



Figuur 4.18 Ontwikkeling gemiddelde bodemdieptes in de verschillende vakken (jaarlijks baggeren vergroot baggervak).

dezelfde sedimentatie- en erosiepatronen waarneembaar als bij de andere berekeningen. De binnenbocht noordelijk van de Plaat van Ossenisse zandt sterk aan, deels ten gevolge van de secundaire stroming die sedimenttransport genereert van de buitenbocht naar de binnenbocht.

In de Overloop van Hansweert treedt erosie op. Te zien is dat de erosiekuil zich ten dele uitstrekt tot binnen het baggervak op de Drempel van Hansweert. Binnen dit baggervak gaat zuidwaarts de erosie over in sedimentatie.

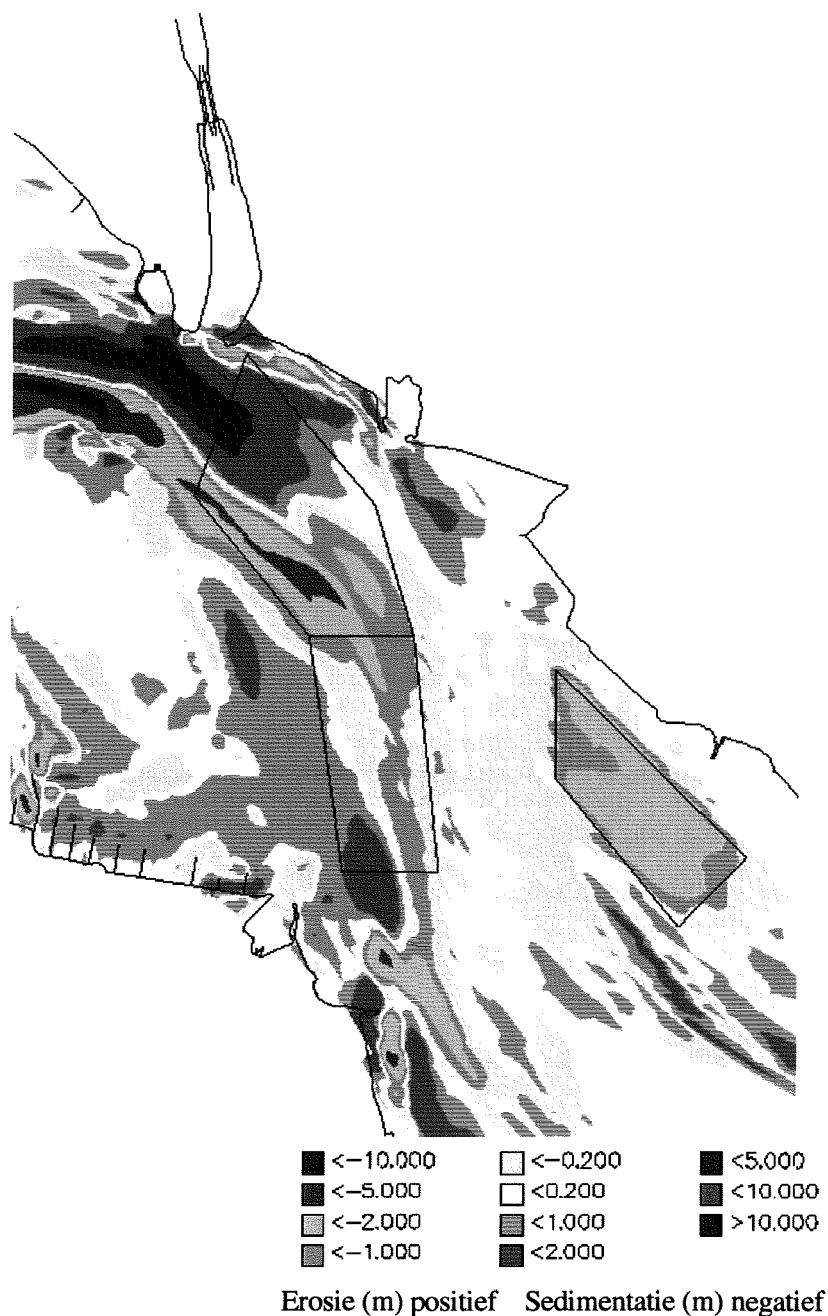
Ook in de binnenbocht van het Zuidergat vindt sedimentatie plaats. In deze binnenbocht bevindt zich in werkelijkheid ook een baggerlokatie.

De ontwikkeling van de gemiddelde dieptes in de diverse vakken staat weergegeven in Figuur 4.18. Vak 1 zandt 0,60 m aan in 1 jaar tijd. Vak 2 zandt iets meer aan: 0,76 m. Vak 1&2 zandt in 1 jaar tijd 0,67 m aan. In vergelijking met het maandelijks baggeren blijkt dus dat het drempelvak bij jaarlijks baggeren sneller aanzandt (0,67 m in 1 jaar i.p.v. 0,63 m in 1 jaar).

4a Storten Schaar van Waarde: maandelijks storten

Bij deze berekening wordt het effect van alleen het maandelijks storten in de Schaar van Waarde onderzocht.

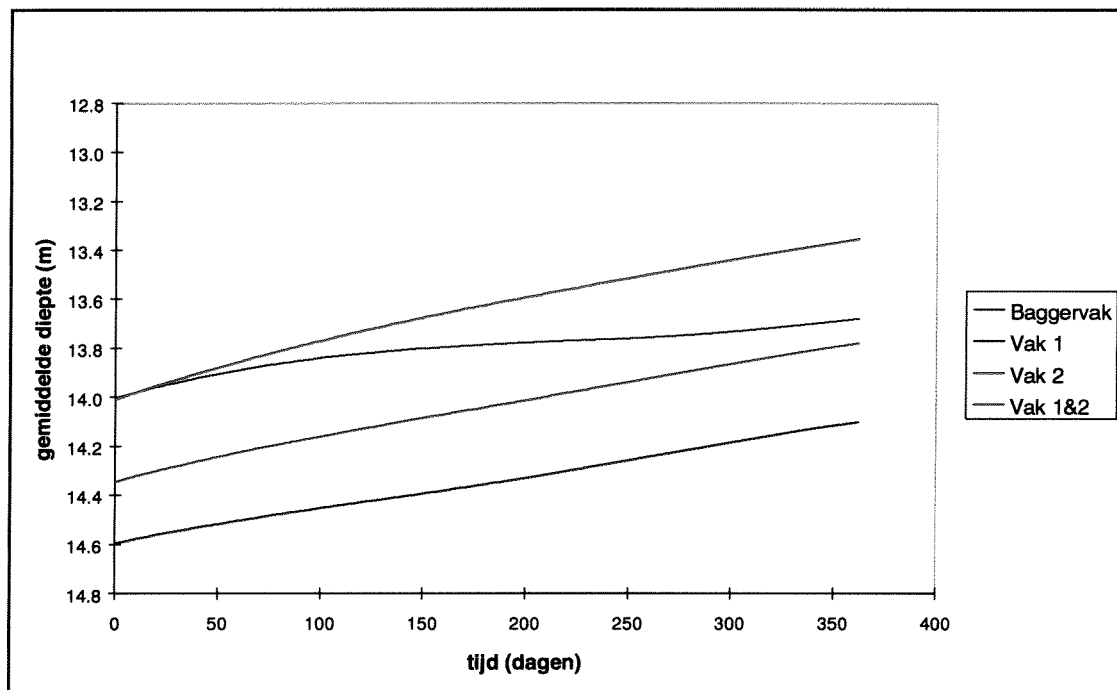
Figuur 4.19 vertoont de sedimentatie- en erosiepatronen na 1 jaar tijd. De erosie-sedimentatiepatronen rond de drempel komen sterk overeen met die van berekening 0 (autonome ontwikkeling; zie Rapport Fase 1). Te zien is ook dat het grootste gedeelte van het 'gestorte' zand in de Schaar van Waarde op zijn plek blijft. Jaarlijks wordt dit gedeelte met totaal 2,30 m opgehoogd (maandelijks \approx 0,19 m).



Figuur 4.19 Sedimentatie- en erosiepatronen na 1 jaar bodemontwikkeling; lokaties Vak 1, Vak 2 en Vak Schaar van Waarde (maandelijks storten in Schaar van Waarde).

Vak	Aanzanding na 1 jaar
Vak 1	0,50 m
Vak 2	0,66 m
Vak 1&2	0,57 m
Baggervak	0,33 m
Sch.v.W.	0,11 m

Tabel 4.10 Hoeveelheid aanzanding in de verschillende vakken; maandelijks storten in de Schaar van Waarde.



Figuur 4.20 Ontwikkeling gemiddelde bodemdieptes in de verschillende vakken (maandelijks storten in de Schaar van Waarde).

De ontwikkeling van de gemiddelde dieptes in de diverse vakken staat weergegeven in Figuur 4.20. Vak 1 zandt 0,50 m aan in 1 jaar; Vak 2 zandt iets meer aan: 0,66 m in 1 jaar. Vak 1&2 vertoont een berekende aanzanding van 0,57 m in 1 jaar. In vergelijking tot de berekening van de autonome ontwikkeling (berekening 0) heeft het maandelijks storten in de Schaar van Waarde nauwelijks effect. De aanzanding in het drempelvak blijft onveranderd (0,57 m in 1 jaar). De voor baggerwerk gecorrigeerde trend in het Schaar van Waarde vak (niet afgebeeld) bedraagt 0,11 m aanzanding na 1 jaar. Ondanks de suppletie blijft dat vak volgens het model aanzanden, hetgeen enigszins onwaarschijnlijk is.

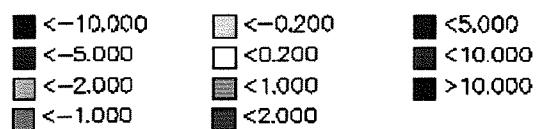
4b Storten Schaar van Waarde: jaarlijks storten

Bij de berekening wordt het effect van alleen het jaarlijks storten in de Schaar van Waarde onderzocht.

Figuur 4.21 vertoont de sedimentatie- en erosiepatronen na 1 jaar tijd. In Figuur 4.21 zijn het drempelvak en het stortvak in de Schaar van Waarde weergegeven. Zoals bij alle berekeningen is er in grote lijnen weinig verschil in de sedimentatie- en erosiepatronen. Duidelijk is de verondieping in het stortvak in de Schaar van Waarde te zien t.g.v. het storten.

In Figuur 4.22 staat het verloop van de gemiddelde dieptes in de verschillende vakken aangegeven. Vak 1 is na 1 jaar 0,51 m aangezand. Vak 2 is na 1 jaar 0,62 m aangezand. Vak 1&2 is na 1 jaar 0,56 m aangezand. Bij deze berekening blijkt het drempelvak het minst aan te zanden. Storten in de Schaar van Waarde lijkt dus wel degelijk een positief effect op de hoeveelheid baggerwerk te kunnen hebben.

De gemiddelde diepte in het vak van de Schaar van Waarde blijft ongeveer gelijk.

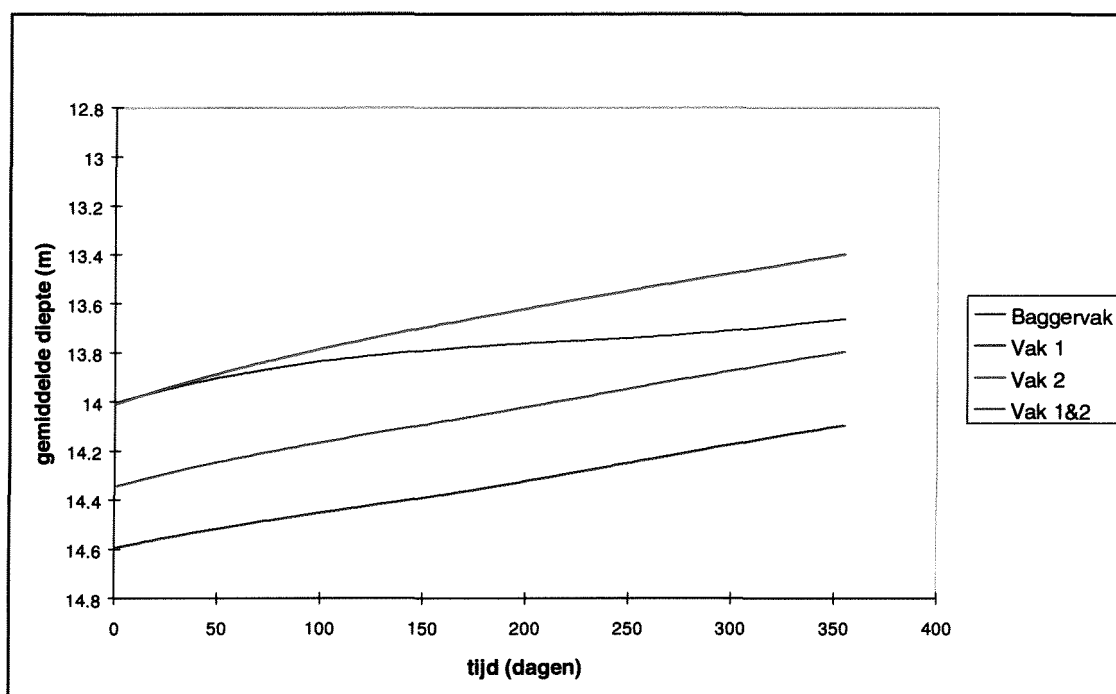


Erosie (m) positief Sedimentatie (m) negatief

Figuur 4.21 Sedimentatie- en erosiepatronen na 1 jaar bodemontwikkeling; lokaties Vak 1, Vak 2 en Vak Schaar van Waarde (jaarlijks storten in de Schaar van Waarde).

Vak	Aanzanding na 1 jaar
Vak 1	0,51 m
Vak 2	0,62 m
Vak 1&2	0,56 m
Baggervak	0,35 m
Sch.v.W.	0,01 m

Tabel 4.11 Hoeveelheid aanzanding in de verschillende vakken; jaarlijks storten in de Schaar van Waarde.



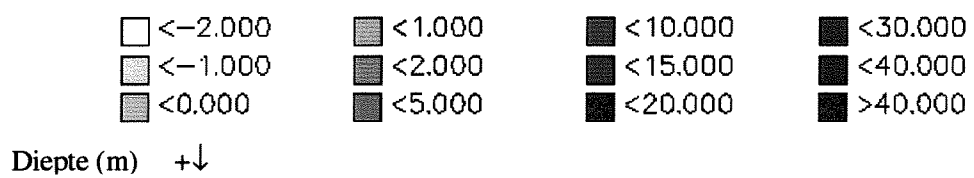
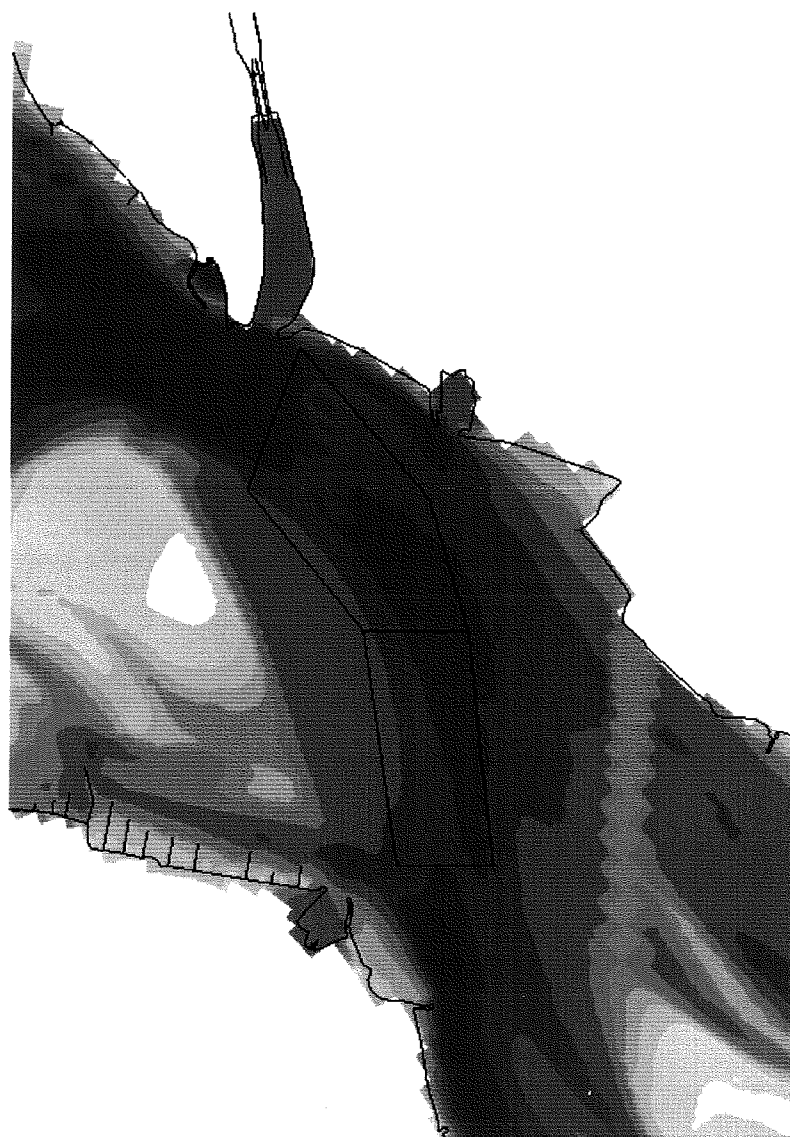
Figuur 4.22 Ontwikkeling gemiddelde bodemieptes in de verschillende vakken; jaarlijks storten in de Schaar van Waarde.

5 *Leidam in de Schaar van Waarde*

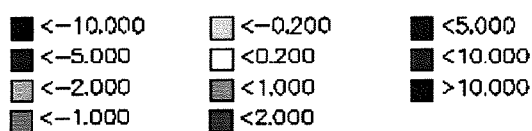
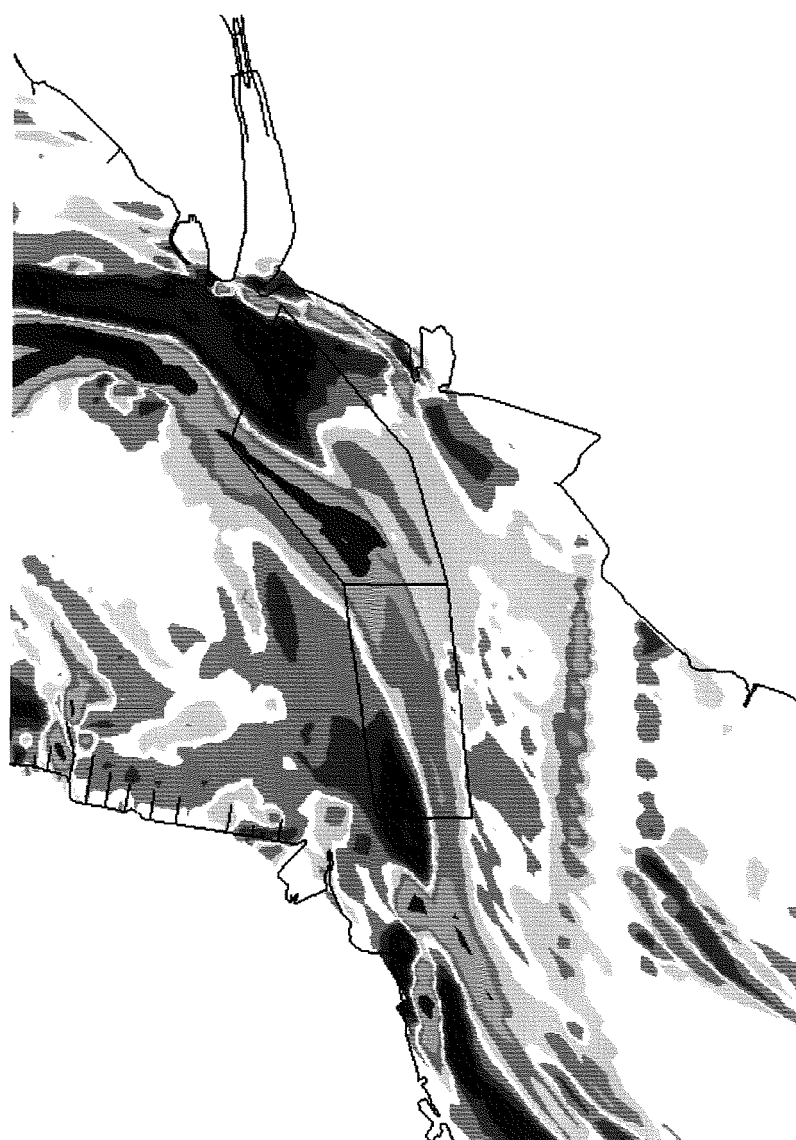
Een leidam in de Schaar van Waarde blokkeert in zekere mate de eb- en vloedstroming door de Schaar van Waarde. De gedachte is dat de debieten door het Zuidergat en over de drempel hierdoor zullen toenemen. Bij dit alternatief is een leidam aangelegd in de Schaar van Waarde met een kruinhoogte van NAP -2 m. De leidam is in het model geschematiseerd als een zgn. *fixed bottom*, d.w.z. dat ter plaatse van de leidam de bodem een maximale diepte heeft. Dit houdt in dat er wel sedimentatie op de leidam kan optreden, maar dat de bodem ter plaatse van de leidam nooit dieper kan worden dan de opgegeven waarde van NAP -2 m. De aangepaste bodem staat weergegeven in Figuur 4.23.

Figuur 4.24 vertoont de sedimentatie- en erosiepatronen na 1 jaar bodemontwikkeling. Net ten westen van de leidam vindt sedimentatie plaats. Er vindt meer aanzanding op de drempel plaats (zie Tabel 4.12 en Figuur 4.25). Vak 1 en Vak 2 zijn na 1 jaar respectievelijk met 0,77 m en 0,63 m aanzand. De aanzanding in Vak 1&2 bedraagt 0,71 m, hetgeen meer is dan bij elke andere berekening. Uit Figuur 4.24 blijkt dat de erosiekuil in het noorden van Vak 1 zich minder ver in het drempelgebied uitstrekt dan bij de andere berekeningen. Het resultaat is enigszins anders dan van tevoren werd verwacht. De drempel zandt namelijk meer aan i.p.v. minder. De oorzaak hier voor ligt mogelijk in het feit dat een deel van het sediment dat eerst in de Schaar van Waarde terecht kwam, nu op de drempel terechtkomt. De residuele sedimenttransporten zijn nog meer naar de drempel toegericht door de verandering van de stroombanen.

Tevens moet gesteld worden dat de leidam een dermate rigoreuze ingreep is, dat de bovenstroomse randvoorwaarde beïnvloed wordt. Dit is verder niet in de modelberekening meegenomen. Eigenlijk zou de bovenstroomse randvoorwaarde moeten worden aangepast.



Figuur 4.23 **Aangepaste bodemligging: leidam in de Schaar van Waarde, kruin op NAP -2 m.**

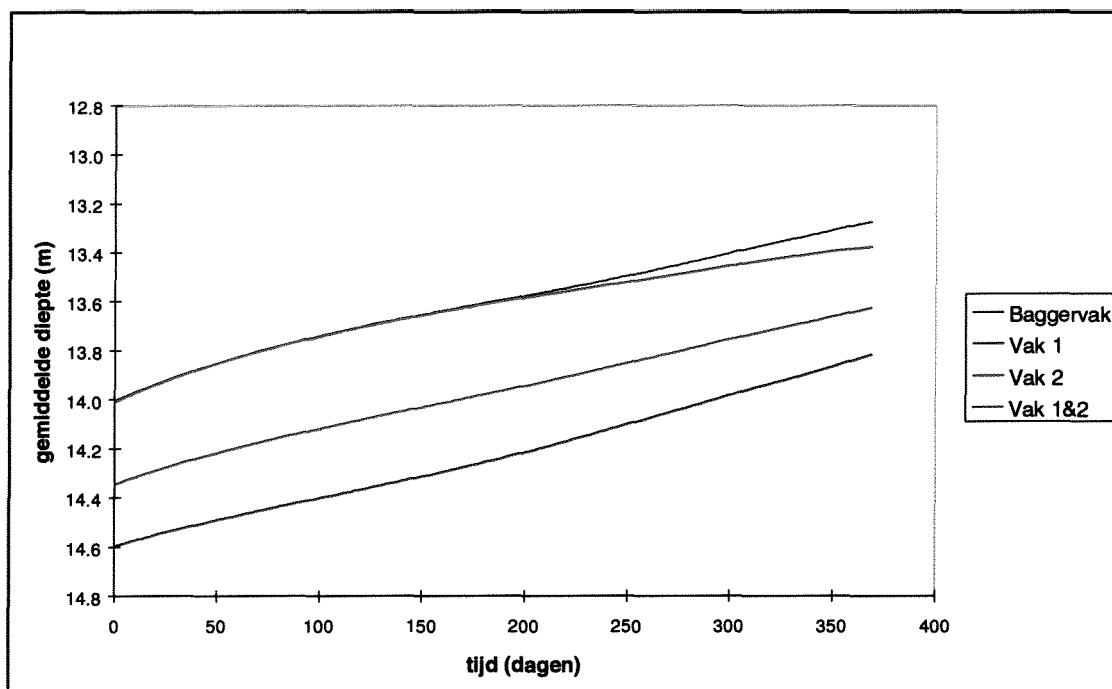


Erosie (m) positief Sedimentatie (m) negatief

Figuur 4.24 Sedimentatie- en erosiepatronen na 1 jaar bodemontwikkeling; lokaties Vak 1, Vak 2 en Vak Schaar van Waarde (leidam in de Schaar van Waarde).

Vak	Aanzanding na 1 jaar
Vak 1	0,77 m
Vak 2	0,63 m
Vak 1&2	0,71 m
Baggervak	0,72 m
Sch.v.W.	n.v.t.

Tabel 4.12 Hoeveelheid aanzanding in de verschillende vakken; leidam in de Schaar van Waarde.



Figuur 4.25 Ontwikkeling gemiddelde bodemdieptes in de verschillende vakken (leidam in de Schaar van Waarde).

4.4 Vergelijking resultaten

Vak 1&2

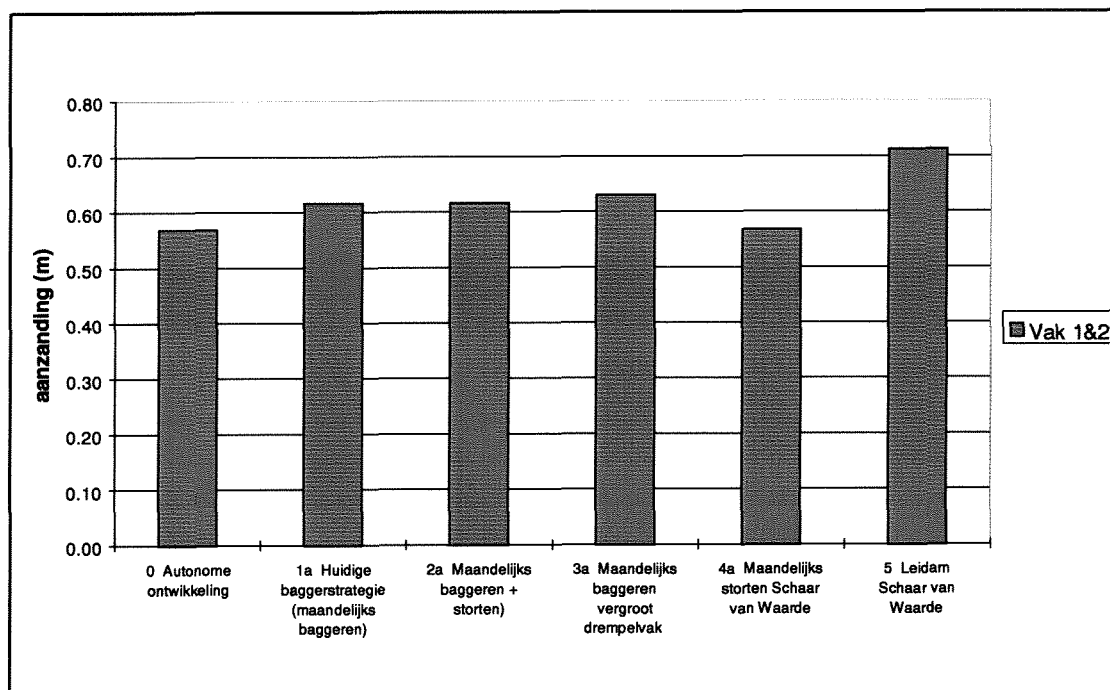
Om de resultaten van de verschillende berekeningen met elkaar te vergelijken zijn de hoeveelheden aanzanding in het drempelvak (Vak 1&2) met elkaar vergeleken. De berekeningen waarbij gebaggerd werd, zijn gecorrigeerd voor de hoeveelheden baggerwerk. Er wordt alleen maar nagegaan hoeveel de drempel aanzandt tussen de 'baggerwerkzaamheden' door. De hoeveelheden aanzanding die in deze paragraaf genoemd worden hebben alle betrekking op de situatie na 1 jaar tijd.

Figuur 4.26 vergelijkt de autonome ontwikkeling met de ontwikkelingen t.g.v. van het maandelijks baggeren en/of storten. Bij de simulatie van de autonome ontwikkeling zandt het drempelvak 0,57 m aan. Als er alleen maandelijks gebaggerd wordt, zandt de drempel meer aan: 0,62 m. Dit lijkt een logisch effect omdat door het baggeren de bodem ter plaatse van de drempel verdiept en de stroomsnelheden daardoor afnemen. Deze afname in snelheid zal leiden tot een toename van de sedimentatie.

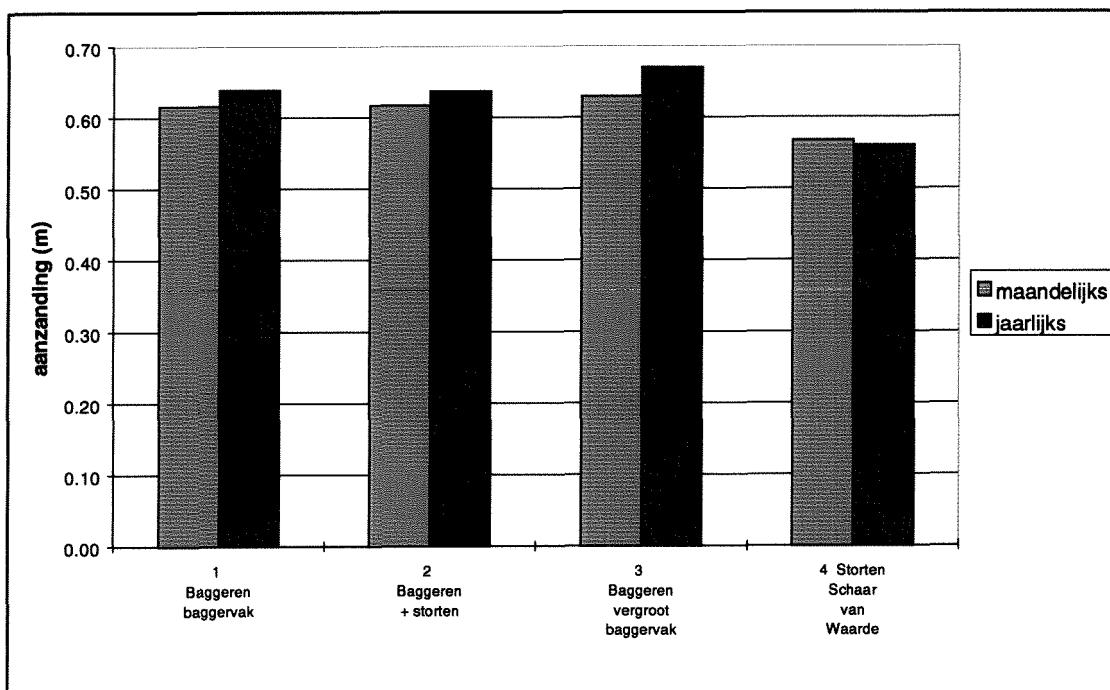
Als er gebaggerd wordt in het vergrote baggervak, zandt de drempel iets meer aan (0,63 m). Wanneer er maandelijks gebaggerd en gestort wordt, zandt de drempel evenveel aan als in het geval waarin alleen gebaggerd wordt (0,62 m). Wanneer er niet gebaggerd wordt en alleen gestort wordt in de Schaar van Waarde, zandt de drempel aan met 0,57 m. Dit is gelijk aan de aanzanding bij de berekeningen van de autonome ontwikkelingen (0,57 m). Storten in de Schaar van Waarde lijkt voornamelijk weinig effect te hebben op de drempel.

In Figuur 4.27 wordt de vergelijking tussen maandelijks en jaarlijks baggeren en/of storten gemaakt. De trends in het drempelvak zijn gecorrigeerd voor de hoeveelheid baggerwerk. Er wordt dus gekeken hoe snel het drempelvak weer aanzandt. Te zien is dat in de eerste drie gevallen jaarlijks baggeren iets meer aanzanding in het baggervak geeft dan maandelijks baggeren. Bij de berekeningen van het jaarlijks baggeren wordt de drempel eerst op overdiepte gebracht en zandt daardoor sneller aan. Als er maandelijks gebaggerd wordt op de drempel bedraagt de aanzanding 0,62 m; bij jaarlijks baggeren is dat 0,64 m. Het verschil is dus erg

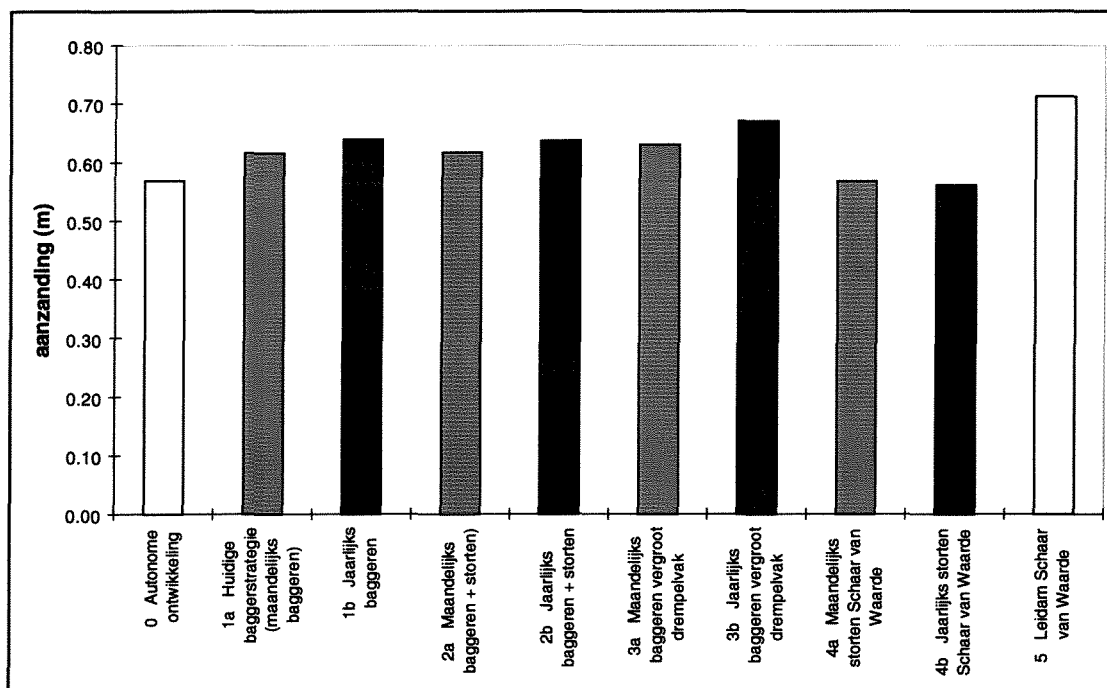
klein. Als er gebaggerd en gestort wordt, bedraagt de aanzanding bij maandelijks baggeren en storten 0,62 m en bij jaarlijks baggeren en storten 0,64 m.
 Als er gebaggerd wordt in het vergrote drempelvak bedraagt de aanzanding bij maandelijks baggeren 0,63 m en bij jaarlijks baggeren 0,67 m.



Figuur 4.26 Vergelijking berekende hoeveelheid aanzanding na 1 jaar in Vak 1&2: autonome ontwikkeling versus maandelijks baggeren en/of storten.



Figuur 4.27 Vergelijking berekende hoeveelheid aanzanding in Vak 1&2 na 1 jaar: maandelijks versus jaarlijks baggeren.



Figuur 4.28 Vergelijking berekende hoeveelheid aanzanding in Vak 1&2 na 1 jaar.

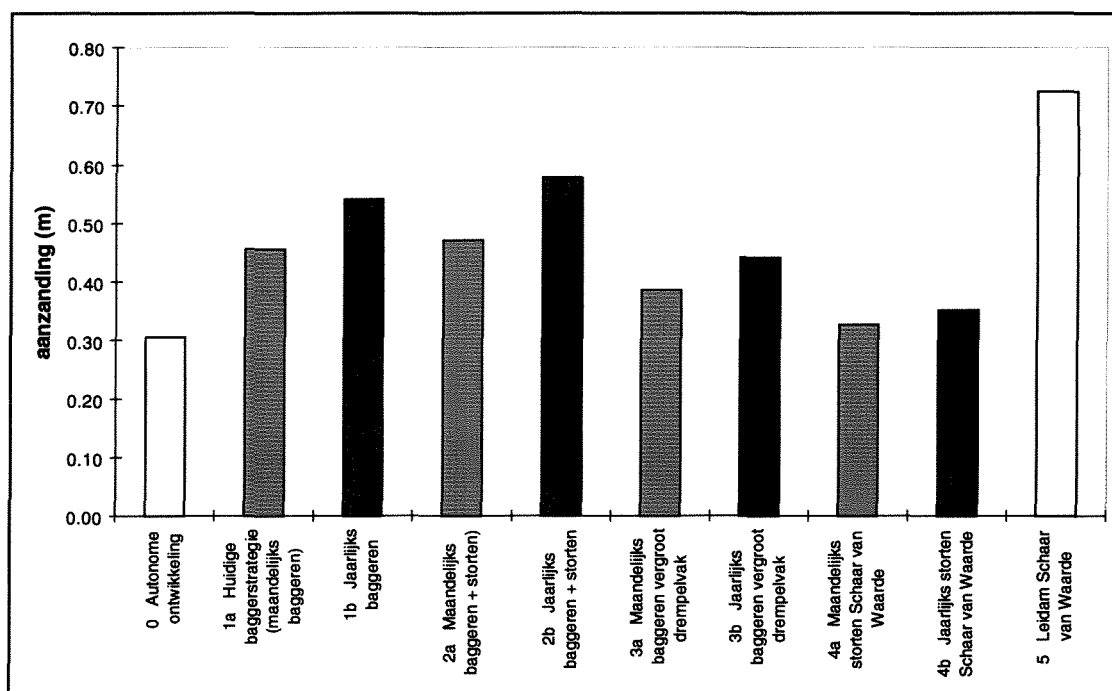
Wanneer er alleen gestort wordt in de Schaar van Waarde blijkt uit de berekening dat als de jaarlijkse hoeveelheid stortmateriaal in één keer in de Schaar van Waarde wordt gestort, de drempel iets langzamer aanzandt (0,56 m) dan in het geval van maandelijks storten. Storten in de Schaar van Waarde lijkt in dit geval de aanzanding dus enigszins te verminderen. Het verschil is echter miniem.

Ter volledigheid is de aanzanding van Vak 1&2 na 1 jaar tijd voor alle berekeningen afgebeeld in Figuur 4.28.

Baggervak

In Figuur 4.29 staat de aanzanding na 1 jaar tijd van het baggervak weergegeven. De verschillen in hoeveelheid aanzanding tussen de verschillende berekeningen onderling zijn nu groter. Bij de berekening van de autonome ontwikkeling zandt het baggervak het minst snel aan (0,31 m). Zodra er gebaggerd wordt, blijkt er in het baggervak veel meer aanzanding op te treden (maandelijks baggeren: 0,46 m; jaarlijks baggeren 0,54 m). Wanneer er gebaggerd en gestort wordt, is de aanzanding in het baggervak nog iets groter (maandelijks baggeren en storten: 0,47 m; jaarlijks baggeren en storten: 0,57 m). Het verschil tussen berekening 1a,b en 2a,b bestaat uit het wel of niet storten in de Schaar van Waarde. Storten in de Schaar van Waarde lijkt op basis van deze resultaten niet een reductie van de aanzanding te geven (althans in het baggervak); er vindt integendeel juist meer sedimentatie plaats in het baggervak. Dit blijkt ook uit de berekeningen waarbij alleen gestort wordt in de Schaar van Waarde. De aanzanding in het baggervak is dan iets groter dan in het geval van de autonome ontwikkeling (maandelijks storten: 0,33 m; jaarlijks storten: 0,35 m; autonome ontwikkeling: 0,31 m).

Verder is te zien in Figuur 4.29 dat jaarlijks baggeren veel meer aanzanding tot gevolg heeft dan maandelijks baggeren. De verschillen zijn groter dan bij Vak 1&2. De leidam heeft de meeste aanzanding tot gevolg (0,72 m).



Figuur 4.29 Vergelijking berekende hoeveelheid aanzanding in het baggervak na 1 jaar.

Vak Schaar van Waarde

In Figuur 4.30 staat de aanzanding na 1 jaar tijd van het Vak Schaar van Waarde weergegeven. De Schaar van Waarde zandt het meest aan in geval van de simulatie van de autonome ontwikkeling (0,27 m). Volgens het model is de huidige bodemligging in dat vak dus te diep. Bij maandelijks en jaarlijks baggeren zandt dit vak iets minder aan, respectievelijk 0,24 m en 0,23 m. Bij maandelijks baggeren en storten in de Schaar van Waarde zandt het vak nog minder aan: 0,10 m. Door het storten wordt de 'zandhonger' van het vak gedeeltelijk bevredigd. Als de jaarlijkse hoeveelheid in één keer in de Schaar van Waarde gestort wordt, is de netto aanzanding licht negatief (-0,01 m). Feitelijk komt dit er op neer dat de hoeveelheid zand die in de Schaar van Waarde gestort wordt (2,30 m/jaar), vrijwel op zijn plaats blijft liggen volgens de modelberekeningen. Wanneer er alleen maandelijks gestort wordt in de Schaar van Waarde zien we dat de aanzanding iets meer bedraagt dan wanneer er maandelijks gebaggerd en gestort wordt. Hetzelfde blijkt uit een vergelijking van jaarlijks storten met jaarlijks baggeren en storten.

Geconcludeerd mag worden dat door het baggeren op de drempel de aanzanding in de Schaar van Waarde ook vermindert.

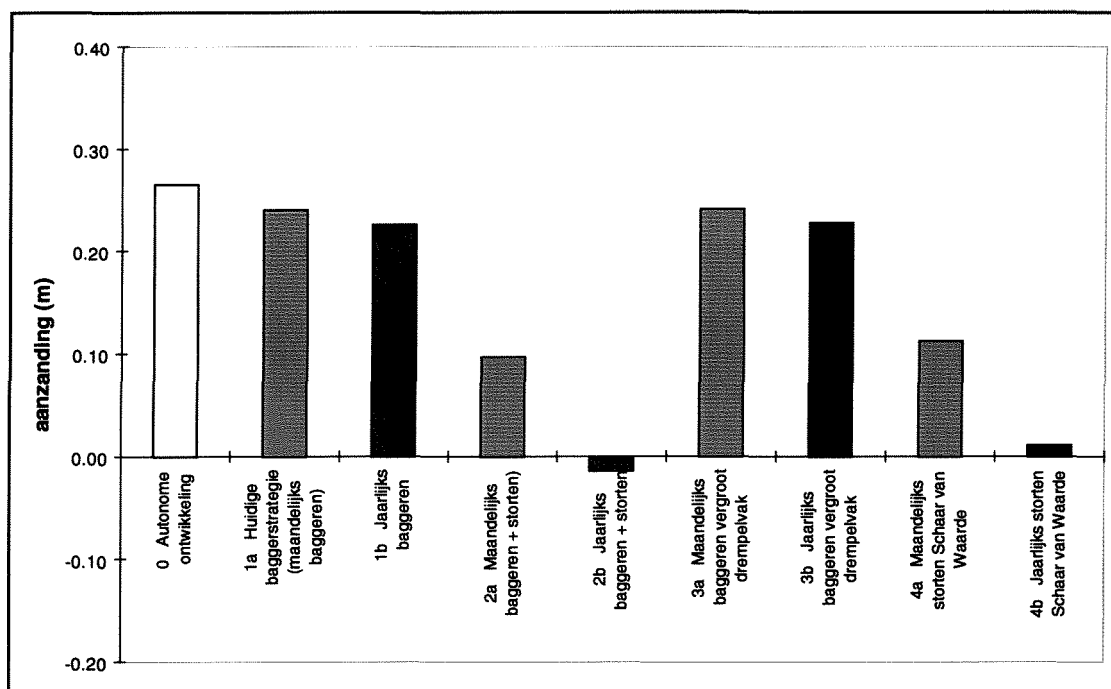
Een volledig overzicht van de hoeveelheid aanzanding na 1 jaar tijd in de verschillende vakken staat weergegeven in Tabel 4.13.

Algemeen

Bij alle berekeningen bleek de gemiddelde bodemontwikkeling van Vak 1&2 bij benadering lineair in de tijd te verlopen. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de drempel dermate ver uit evenwicht is (vanwege het baggerwerk door de jaren heen), dat het 'lijkt' of de respons bijna lineair is. Met andere woorden, het tijdsdomein dat onderzocht is, is relatief kort t.o.v. de morfologische tijdschaal.

Het verloop van de aanzanding van het baggervak is veel minder lineair te noemen. In het eerste halfjaar is de aanzanding sterker dan in het tweede halfjaar. Dit is opvallend omdat het

baggervak zich binnen Vak 1&2 bevindt. Blijkbaar compenseren de delen van Vak 1&2 die buiten het baggervak liggen, de afwijkingen van de lineaire trend binnen het baggervak.



Figuur 4.30 Vergelijking berekende hoeveelheid aanzanding in Vak Schaar van Waarde na 1 jaar.

	Vak 1	Vak 2	Vak 1&2	Bag.vak	Sch.v.W
Autonome ontwikkeling	0.48	0.68	0.57	0.31	0.27
Huidige baggerstrategie (maandelijks baggeren)	0.53	0.73	0.62	0.46	0.24
Jaarlijks baggeren	0.54	0.77	0.64	0.54	0.23
Maandelijks baggeren + storten	0.54	0.72	0.62	0.47	0.10
Jaarlijks baggeren + storten	0.57	0.72	0.64	0.58	-0.01
Maandelijks baggeren vergroot drempelvak	0.56	0.72	0.63	0.39	0.24
Jaarlijks baggeren vergroot drempelvak	0.60	0.76	0.67	0.44	0.23
Maandelijks storten Schaar van Waarde	0.50	0.66	0.57	0.33	0.11
Jaarlijks storten Schaar van Waarde	0.51	0.62	0.56	0.35	0.01
Leidam Schaar van Waarde	0.77	0.63	0.71	0.72	n.v.t

Tabel 4.13 Hoeveelheid aanzanding (m) in de verschillende vakken na 1 jaar bodemontwikkeling.

5. Conclusies en aanbevelingen

Uit de berekeningen met het morfologische model DELFT2D-MOR blijkt als eerste dat de effecten van de variatie van baggerlokatie, stortlokatie en baggerfrequentie op de mate van aanzanding van de drempel relatief klein zijn. De (voor baggerwerk gecorrigeerde) mate van aanzanding in het drempelvak schommelt bij de berekeningen rond de 0,6 à 0,7 m/jaar. Als er jaarlijks wordt gebaggerd in plaats van maandelijks neemt de aanzanding toe, echter in relatief geringe mate (minder dan 10%). Een verlaging van de frequentie van het baggerwerk behoort dus op basis van de berekeningen tot de mogelijkheden om de negatieve gevolgen van het baggerwerk te verminderen.

Eén van de voorgestelde methoden om het baggerwerk op de drempel te verlagen is de beïnvloeding van de lokale debietverdeling. Dit alternatief is gesimuleerd met een vijftal berekeningen, namelijk:

- het storten in de Schaar van Waarde, al of niet met baggeren op de drempel (berekeningen 2a, 2b, 4a, 4b)
- het bouwen van een leidam in de Schaar van Waarde (berekening 5)

Storten in de Schaar van Waarde kan het baggerwerk op de drempel verminderen. De berekening waarbij alleen de jaarlijkse hoeveelheid in één keer in de Schaar van Waarde werd gestort had een iets kleinere aanzanding in het *drempelvak* (Vak 1&2) tot gevolg dan in het geval van de autonome ontwikkeling.

Uit de analyse van de ontwikkeling van de gemiddelde bodemdiepte in het *baggervak* leek storten in de Schaar van Waarde een tegenovergesteld effect te hebben: de aanzanding in het baggervak was sterker.

De berekening met de leidam gaf als resultaat dat de drempel het meest aanzandde van alle berekeningen, hetgeen van tevoren niet was verwacht. De berekeningen laten zien dat de beïnvloeding van de lokale debietverdeling door het blokkeren van een nevengeul (de Schaar van Waarde) niet onvoorwaardelijk tot een vermindering van de aanzanding van de drempel zal leiden.

Er moeten enige kanttekeningen gezet worden bij de modelresultaten. Het model blijft een vereenvoudiging van de werkelijkheid, waar lang niet alle relevante fysische processen in gemodelleerd zijn, of op de juiste wijze gemodelleerd zijn. De kennis omtrent morfologische ontwikkelingen op langere termijn is beperkt vanwege de complexiteit van het geheel. Er moet met nadruk worden gesteld dat op basis van de *berekende* hoeveelheid aanzanding op de drempel, niet kan worden gesteld dat er ook *daadwerkelijk* zoveel aanzanding optreedt. Nogmaals: het model blijft een vereenvoudiging van de werkelijkheid.

Bij de evaluatie van de resultaten is er gekeken naar de hoeveelheid aanzanding; de hoeveelheid baggerwerk is constant gehouden. Momenteel worden er additionele berekeningen gemaakt waarbij een minimale waarde voor de bodemdiepte wordt opgelegd en de hoeveelheid baggerwerk dus variabel is.

Afgezien van de tekortkomingen van de schematisatie van de fysische processen door het model, zijn er ook een aantal andere oorzaken die voor verschillen tussen berekende en gemeten ontwikkeling kunnen zorgen. Het gebruik van een morfologisch getij om de berekeningstijd te verkorten zal de werkelijkheid minder goed nabootsen dan het telkens weer doorrekenen van een volledige doottij-springtij cyclus.

Als randvoorwaarden wordt er gewerkt met harmonische componenten van waterstanden. In werkelijkheid komen er op willekeurige tijdstippen sterk afwijkende (weers)condities voor die

grote morfologische gevolgen kunnen hebben (stormen e.d.). Theoretisch zou het gebruik van volledige tijdseries van gemeten waterstanden de werkelijkheid op de beste wijze nabootsen. Dit is echter ondoenlijk qua rekentijd, vandaar het gebruik van een morfologisch getij. Bij de huidige berekeningen is uitgegaan van de bodemgegevens van 1996. De bodemligging verandert continu. Het gebruik van een andere bodemligging (uit bijvoorbeeld een ander jaar) zou weer iets andere resultaten tot gevolg kunnen hebben.

Het wordt aanbevolen de huidige berekeningen verder te analyseren en een gevoeligheidsanalyse uit te voeren met betrekking tot de verschillende parameters in het model. Met name secundaire stromingseffecten en de invloed van onder- en oververzadiging moeten nader bestudeerd worden.

Op deze wijze kunnen de modelresultaten verder verbeterd worden en wordt meer inzicht verkregen in het effect van de diverse parameters.

Referenties

- Bestuurlijk Klankbordforum Westerschelde, 1991
Beleidsplan Westerschelde
Rijkswaterstaat, Directie Zeeland
- Groenewoud, M.D., 1997
Modellering morfodynamisch gedrag van de Drempel van Hansweert. Fase 1:
Modelbouw en simulatie huidige situatie
Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, Vakgroep
Waterbouwkunde en Geotechniek
- Pieters, T., C. Storm, T. Walhout en T. Ysebaert, 1991
Het Schelde-estuarium. Meer dan een vaarweg.
Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, Nota GWWS-91.081, 135 p.
- Huijs, S.W.E., 1996
De ontwikkeling van de morfologie in de Westerschelde in relatie tot menselijke
ingrepen.
Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, Vakgroep Fysische
Geografie, Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek (IMAU),
IMAU Rapport R 96-17.
- Storm, C., 1996
Residuele zandtransporten in de Westerschelde
Rijkswaterstaat, RIKZ Werkdocument OS-96.837X
- Tank, F.T.G., 1995
Het gedrag van drempels in de Westerschelde: Een verkennende studie.
Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, Vakgroep Fysische
Geografie, Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek (IMAU)
IMAU Rapport R 95-18
- Tank, F.T.G., 1996a
Het gedrag van drempels in de Westerschelde: Literatuurstudie en hypothesen.
Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, Vakgroep Fysische
Geografie, Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek (IMAU)
IMAU Rapport R 96-07
- Tank, F.T.G., 1996b
Het gedrag van drempels in de Westerschelde: Parameterisatie.
Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, Vakgroep Fysische
Geografie, Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek (IMAU)
IMAU Rapport R 96-08
- Tank, F.T.G., 1997a
Het gedrag van drempels in de Westerschelde: Beschrijving en analyse van metingen
van de waterbeweging op en rondom de Drempel van Hansweert.
Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, Vakgroep Fysische
Geografie, Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek (IMAU)
IMAU Rapport R 97-01

- Tank, F.T.G., 1997b
 Het gedrag van drempels in de Westerschelde: Beschrijving en analyse van zandtransportmetingen op en rondom de Drempel van Hansweert.
 Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, Vakgroep Fysische Geografie, Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek (IMAU)
 IMAU Rapport R 97-08

- Tank, F.T.G., 1997c
 Het gedrag van drempels in de Westerschelde: Beschrijving en analyse van metingen van de morfologie op en rondom de Drempel van Hansweert.
 Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, Vakgroep Fysische Geografie, Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek (IMAU)
 IMAU Rapport R 97-09

- Tank, F.T.G., 1997d
 Een conceptueel morfodynamisch model - Toetsing hypothesen
 Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, Vakgroep Fysische Geografie, Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek (IMAU)
 IMAU Rapport R 97-14

- Van Dam, D. en C.J. Quartel, 1992
 Zandhuishouding en drempeldiepten in de Westerschelde. 1985 t/m 1990.
 Rijkswaterstaat, Directie Zeeland, Notitie NWL-92.19.

- Veen, J. van, 1950
 Eb- en vloed-schaar systemen in de Nederlandse getijwateren.
 Journal K.N.A.G., 2nd series, 67, pp. 303-325

- Vroon, J., Storm, C. en Coosen, 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.
 Rapport RIKZ-97.023, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee, Middelburg