



coastal & harbour
engineering consultants



Analyse morfologisch model Westerschelde

Analyse morfologisch model Westerschelde

Afstudeerrapport

mei 2001

Marieke van Nood

Afstudeercommissie

Prof.dr.ir. M.J.F. Stive (TU Delft)

Dr.ir. Z.B. Wang (TU Delft)

Ir. A.J. Bliet (Svašek)

Drs. B.A. Kornman (RIKZ)

Dr.ir. J.C. Winterwerp (TU Delft)



Ingenieursbureau Svašek bv
Heer Bokelweg 145
3032 AD Rotterdam



Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen
Sectie Waterbouwkunde
Stevinweg 1
2628 CN Delft

Voorwoord

Dit rapport is geschreven in het kader van mijn afstudeeronderzoek bij de sectie Waterbouwkunde aan de subfaculteit Civiele Techniek van de Technische Universiteit Delft. Het onderzoek is uitgevoerd bij ingenieursbureau Svašek bv in Rotterdam.

Met veel plezier heb ik de afgelopen acht maanden gewerkt aan dit onderzoek. Daarbij heb ik de begeleiding van Gerard Dam en Bram Blik, beiden van Svašek, zeer gewaardeerd. Ook het meedenken van Robert-Jan Labeur stelde ik op prijs. Marcel Stive en Wang wil ik bedanken voor hun begeleiding vanuit de TU Delft. Tot slot dank aan Bart Kornman en Harm Verbeek voor het meedenken en beschikbaar stellen van gegevens van het Rijksinstituut voor Kust en Zee in Middelburg.

Marieke van Nood
Rotterdam, 8 mei 2001

Samenvatting

De morfologie van de Westerschelde, een estuarium in het zuidwesten van Nederland, is dynamisch. De wisselwerking tussen waterbeweging, sedimenttransport en bodemveranderingen veroorzaakt veranderingen in plaats en tijd van geulen en platen.

De Westerschelde is de belangrijkste scheepvaartroute naar de havens van Antwerpen, Vlissingen, Terneuzen en Gent en heeft daarnaast een grote ecologische waarde. Veranderingen in de morfologie beïnvloeden deze functies. Daarom is het zeer gewenst het morfologische gedrag zowel na ingrepen als door natuurlijke ontwikkelingen te kunnen voorspellen. Hiervoor wordt veelvuldig gebruik gemaakt van numerieke modellen, die verschillende tijd- en ruimteschalen hebben.

Ingenieursbureau Svašek bv heeft in 2000 een tweedimensionaal, semi-empirisch morfologisch model voor de Westerschelde ontwikkeld. Dit model koppelt de bodemdiepte aan de waterbeweging via een empirische evenwichtsrelatie tussen het dominant volume en de diepte. Het dominant volume is het getijvolume dat in de dominante getijfase door een geuldoorsnede stroomt per meter breedte. De empirische evenwichtsrelatie wordt toegepast per roosterpunt van een tweedimensionaal waterbewegingsmodel.

Het morfologische model voor de Westerschelde kan mogelijk als instrument dienen om, met name in de geulen, de morfologische ontwikkelingen op lange termijn te voorspellen. De uitkomsten van het model na tien iteraties zijn kwalitatief verklaarbaar, maar kwantitatief onzeker. Een evenwichtsbodemligging wordt niet bereikt.

In deze studie is het modelprincipe en de evenwichtsrelatie onderzocht, om meer inzicht te verkrijgen in de werking van het morfologische model van de Westerschelde.

Modelprincipe

Het modelprincipe, de koppeling van de bodemveranderingen aan de waterbeweging via een empirische evenwichtsrelatie, is onderzocht met behulp van een vereenvoudigd morfologisch model. Drie vereenvoudigde geometrische situaties zijn bekeken: een rechte geul, een bocht en een twee-geulensysteem. Daarbij is de invloed van de randvoorwaarden, de stroming in bochten en debietherverdeling in een twee-geulensysteem bekeken. Ook is onderzocht of een stabiele evenwichtsbodemligging wordt bereikt met het vereenvoudigde geval.

Het toepassen van het modelprincipe blijkt bij iteratieve toepassing een versterking te betekenen van optredende hydraulische processen in de morfologie. De randvoorwaarden bepalen de verandering van het dominant volume na een ingreep en dus de bodemveranderingen. In de bocht verdiept de binnenbocht na enkele iteraties, omdat driedimensionale stromingseffecten niet worden meegenomen door het waterbewegingsmodel. Na een ingreep in het twee-geulensysteem treedt herverdeling van debiet op, waardoor een diepteverschil ontstaat tussen de twee geulen.

In het vereenvoudigde morfologische model wordt geen realistische stabiele evenwichtsbodemligging bereikt. Dit hangt samen met de modelvergelijkingen. Deze zijn onderzocht voor een eendimensionaal twee-geulensysteem met stationaire stroming. De modelvergelijkingen van dit systeem hebben drie fysisch realistische oplossingen: één waarbij beide takken open blijven op de basiswaarde en twee waarbij één van de takken dichtgaat. Een stabiliteitsanalyse van deze modelvergelijkingen laat zien dat de oplossing waarbij beide takken open blijven niet stabiel is.

De resultaten van het vereenvoudigde morfologische model en enkele verschijnselen in de resultaten van het morfologische model van de Westerschelde komen overeen met de resultaten van deze stabiliteitsanalyse.

Er zijn geen oplossingen gevonden waarmee wel een realistische stabiele evenwichtsbodemligging kan worden bereikt in het morfologische model van de Westerschelde. Vergroten van de dwarsuitwisseling van water door het verhogen van de turbulente viscositeit is een manier om verstoringen in het rooster op kleine schaal uit te vlakken, maar draagt niet bij aan een stabiele bodemligging in een meer-geulensysteem met meerdere takken open. Door het opleggen van de debietverdeling via twee zwakreflecterende randvoorwaarden in een eendimensionaal twee-geulensysteem met stationaire stroming en in een tweedimensionaal twee-geulensysteem met een zeer eenvoudig rooster kan wel een stabiele evenwichtsbodemligging met beide takken open worden bereikt. In het morfologische model van de Westerschelde is het niet mogelijk de waterbeweging in het gehele gebied te sturen met de randvoorwaarden. Het overheersen van andere termen in de waterbewegingsvergelijking dan het verhang en de weerstand heeft invloed op de stabiliteit van het systeem, maar het is niet duidelijk hoe groot de invloed is van deze andere termen in het morfologisch model van de Westerschelde. Nader onderzoek hiernaar is wenselijk.

Het morfologische model van de Westerschelde in de huidige vorm kan niet worden gebruikt om iteratieve morfologische voorspellingen te doen, omdat het modelprincipe voor vereenvoudigde situaties laat zien dat geen realistische stabiele evenwichtsrelatie bestaat en de uitkomsten van het morfologische model van de Westerschelde hiermee overeenkomen. Wel kan het model worden gebruikt om na één berekeningsstap een eerste voorspelling van de consequenties van ingrepen aan te geven.

Empirische evenwichtsrelatie

De empirische evenwichtsrelatie is onderzocht door oorzaken van de spreiding rond de lineaire evenwichtslijn te bekijken. Deze evenwichtslijn is verkregen door een lijn te trekken door de puntenwolk die is ontstaan door van alle punten van het model van de Westerschelde het dominant volume tegen de diepte uit te zetten.

Een duidelijke afwijking van de evenwichtslijn voor de gebieden waar ingrepen plaatsvinden of hebben plaatsgevonden is niet te onderscheiden. Dit geldt ook voor gebieden met afwijkende sedimenteigenschappen.

In bochten en op diepe punten treden processen op die het waterbewegingsmodel niet goed kan weergeven. Deze beperkingen van het waterbewegingsmodel zijn van invloed op de lineaire evenwichtsrelatie. Binnenbochten hebben een andere ligging ten opzichte van de lineaire evenwichtslijn dan buitenbochten, omdat het waterbewegingsmodel grotere stroomsnelheden in de binnenbocht berekent dan in de buitenbocht. Verschillen tussen metingen en uitkomsten van het waterbewegingsmodel in diepe punten komen ook overeen met een grotere spreiding rond de evenwichtslijn.

Tussen het restdebiet en de afwijking van de lineaire evenwichtslijn is een goede correlatie gevonden. Het restdebiet is het verschil tussen dominant volume en het volume in de niet-dominante fase. De stroming in de niet-dominante fase is dus een proces dat de evenwichtsrelatie tussen dominant volume en diepte beïnvloedt. Een aangepaste evenwichtsrelatie voor het getijvolume in de niet-dominante fase is dan ook een verbetering voor het beschrijven van de evenwichtssituatie in de geulen van de Westerschelde. Dit kan worden geverifieerd door het toepassen van de aangepaste evenwichtsrelatie in een bestaand eendimensionaal semi-empirisch model.

Summary

The morphology of the Western Scheldt, an estuary located in the south-west of the Netherlands, is highly dynamic. The interaction between water movement, sediment transport and bed level changes causes changes of channels and shoals in time and space. The Western Scheldt is the main navigation entrance to the Antwerp harbour as well as an highly valuable ecosystem. Changes in the morphology, due to human interference and changes in natural processes, influence these functions of the Western Scheldt. It is therefore important to be able to predict the impact of interventions on the morphological behaviour. Numerical models, with different space and time scales, are often used for this.

In 2000, Svašek coastal and harbour engineering consultants bv in Rotterdam developed a two-dimensional, semi-empirical morphological model of the Western Scheldt. This model connects bed level changes to water movement via an empirical equilibrium relation between dominant tidal volume and depth. Dominant volume is the tidal volume in the dominant tide phase through a cross-section per meter width. The empirical relation is applied on each grid point of a two-dimensional hydraulic model.

The morphological model can serve as an instrument to predict long-term morphological developments, particularly in channels. The results of the model after ten iterations are qualitatively good, but quantitatively uncertain. An equilibrium state of the bed is not reached.

In this study the principle of the model and its empirical equilibrium relation are investigated in order to attain more insight in the functioning of the model.

Model principle

The model principle, i.e. the connection of bed level changes and water movement via the empirical relationship, is investigated using a simplified morphological model. Three geometric situations are considered: a straight channel, a bend and a two-channel system.

Application of the model principle implies amplification of hydraulic processes in the morphology. This appeared by observing the influence of boundary conditions, curvature flow and discharge distribution in the two-channel system. In all cases the boundary conditions determine the changes of the dominant volume and, consequently, the bed level changes. In an axial-symmetric bend the inner bend deepens due to the hydraulic model, which doesn't take curvature-induced secondary flow into account. In a two-channel system, the discharge is redistributed after an intervention in one of the two branches. This causes a deepening of one channel and a shallowing of the other channel.

In the simplified morphological model no realistic equilibrium bed level is reached. This is caused by the model equations. A stability analysis of these equations in a one-dimensional two-channel system with stationary flow shows that no stable solution exists with two branches open. The results of the simplified model and some phenomena of the model of the Western Scheldt correspond with these results.

No solutions to reach a realistic equilibrium bed level are found. Enlargement of the cross exchange of water due to an enlargement of the turbulent viscosity can erase local disturbances in the bed level. However, this is not a solution for the stability problem on a larger scale. Both branches of a one-dimensional two-channel system with stationary flow do remain open when the discharge is distributed by Riemann-boundary conditions. A simulation with a simple grid in the simplified model confirms this. Other terms in the hydraulic equations than the shear stress and gradient terms therefore influence the stability of the model. In the morphological model of the Western Scheldt, the influence of these other terms aren't clear. This should be further investigated.

Due to the results of the analysis of the model principle and the corresponding results of the morphological model of the Western Scheldt, this model in its present form cannot be used to predict morphological changes in the long term. However, the model can be used to give a first prediction after one calculation step of morphological changes due to interventions.

Empirical equilibrium relation

The empirical equilibrium relation is investigated by considering causes for deviation of the equilibrium line. This line is a best fit of the relation of the dominant volume and depth of all the points in the Western Scheldt deeper than 5 meter.

A clear deviation of the equilibrium line for areas where human interference takes place and for areas with divergent sediment properties isn't distinguished.

In bends and in deep areas processes occur which can't be taken into account by the two-dimensional hydraulic model. These restrictions of the hydraulic model influence the empirical equilibrium relation. Inner bends have a different position compared to the equilibrium line than outer bends, because the hydraulic model computes higher dominant volumes in the inner bends. Differences between measurements and results of the hydraulic model in deep areas are also reflected in deviations of the equilibrium line.

The volume in the subordinate tide phase influences the equilibrium equation between dominant tidal volume and depth as well. An adjusted empirical equilibrium relation with the volume in the subordinate tide phase describes the equilibrium state in the channels of the Western Scheldt more accurate. This can be verified by implementing the adjusted equilibrium relation in an existing one-dimensional model.

INHOUDSOPGAVE

Voorwoord	iii
Samenvatting	v
Summary	vii
1. Inleiding	1
1.1 Aanleiding	1
1.2 Doel onderzoek	1
1.3 Leeswijzer	1
2. Probleemanalyse	3
2.1 Inleiding	3
2.2 Westerschelde	3
2.2.1 Geometrische eigenschappen	3
2.2.2 Historische ontwikkeling	4
2.2.3 Functies	5
2.3 Numeriek modelleren	6
2.3.1 Belangrijke processen	6
2.3.2 Modelaspecten	7
2.3.3 Overzicht bestaande modellen	8
2.4 Probleemdefinitie	9
2.4.1 Aanleiding	10
2.4.2 Doelstelling	10
2.4.3 Onderzoeksvragen	10
3. Evenwichtsrelaties	11
3.1 Inleiding	11
3.2 Empirische relaties voor zeegaten	11
3.3 Empirische relaties voor geulen zonder dominantie	12
3.3.1 Doorstroomprofiel en getijkarakteristieken	12
3.3.2 Aanpassingen op evenwichtsrelaties	13
3.4 Empirische relaties voor geulen met dominantie	15
3.4.1 Definities betreffende dominantie	15
3.4.3 Beschrijving relatie	15
3.4.2 Voordeel dominant volume boven getijvolume	16
3.5 Mathematisch-fysische evenwichtsrelaties	17
3.5.1 Op basis van eenparige stroming	17
3.5.2 Op basis van evenwichtssedimentconcentratie	18
3.5.3 Op basis van constante getijsnelheid	19
3.6 Empirische relatie in het morfologische model	21
3.6.1 Beschrijving relatie	21
3.6.2 Gevolgen tweedimensionaal toepassen	22
3.7 Samenvatting	23

4. Het morfologische model van de Westerschelde	25
4.1 Inleiding	25
4.2 Modelprincipe	25
4.2.1 <i>Uitgangspunten</i>	25
4.2.2 <i>Iteratieproces</i>	26
4.3 Waterbewegingsmodule	26
4.3.1 <i>SCALWEST</i>	27
4.3.2 <i>Toepassing morfologisch model</i>	28
4.4 Resultaten Svašek 2000	29
4.4.1 <i>Uitgevoerde simulaties</i>	29
4.4.2 <i>Uitkomsten simulaties</i>	29
4.5 Waarde morfologisch model	30
4.5.1 <i>Beperkingen</i>	30
4.5.2 <i>Mogelijkheden</i>	31
5. Het vereenvoudigde morfologische model	33
5.1 Inleiding	33
5.2 Modelbeschrijving	33
5.2.1 <i>Waterbewegingsmodule</i>	33
5.2.2 <i>Morfologische module</i>	34
5.3 Simulatie rechte geul	34
5.3.1 <i>Modelinvoer</i>	35
5.3.2 <i>Randvoorwaarden</i>	35
5.3.3 <i>Modelresultaten</i>	36
5.4 Simulatie bocht	38
5.4.1 <i>Modelinvoer</i>	38
5.4.2 <i>Bochtwerking</i>	38
5.4.3 <i>Modelresultaten</i>	39
5.5 Simulatie twee-geulensysteem	40
5.5.1 <i>Modelinvoer</i>	40
5.5.2 <i>Modelresultaten</i>	40
5.6 Vergelijking met het morfologische model van de Westerschelde	41
5.6.1 <i>Randvoorwaarden</i>	41
5.6.2 <i>Bochteffecten</i>	41
5.6.3 <i>Twee-geulensystemen</i>	41
5.7 Conclusies	42
6. Stabiliteit van de evenwichtsbodem	43
6.1 Inleiding	43
6.2 Stabiliteitsgedrag in vereenvoudigde situaties	43
6.2.1 <i>Rechte geul</i>	43
6.2.2 <i>Bocht</i>	44
6.2.3 <i>Twee-geulensysteem</i>	44
6.3 Mogelijke oorzaken ongewenste bodemontwikkeling	45
6.3.1 <i>Numerieke modeleigenschappen</i>	45
6.3.2 <i>Modelvergelijkingen</i>	46
6.4 Stabiliteitsanalyse	49
6.4.1 <i>Grafische uitwerking</i>	49
6.4.2 <i>Mathematische uitwerking</i>	49
6.5 Vergelijking stabiliteitsanalyse met modelresultaten	52
6.5.1 <i>Vereenvoudigde morfologische model</i>	52
6.5.2 <i>Morfologische model van de Westerschelde</i>	53
6.6 Mogelijke oplossingen stabiliteitsproblemen	53
6.6.1 <i>Opgelegde debietverdeling</i>	53

6.6.2 <i>Dwarsuitwisseling van water</i>	57
6.6 Conclusies	57
7. Oorzaken spreiding rond evenwichtsrelatie	59
7.1 Inleiding	59
7.2 Menselijke ingrepen	60
7.2.1 <i>Baggergebieden</i>	60
7.2.2 <i>Stortgebieden</i>	61
7.2.3 <i>Geulwandverdedigingen</i>	61
7.3 Sedimenteigenschappen	62
7.3.1 <i>Klei</i>	62
7.3.2 <i>Grof sediment</i>	62
7.4 Volume in de niet-dominante fase	63
7.4.1 <i>Invloed per geuldeel</i>	63
7.4.2 <i>Algemene relatie</i>	64
7.5 Geometrie	65
7.5.1 <i>Diepe delen</i>	65
7.5.2 <i>Bochten</i>	67
7.5.3 <i>Breedte/diepteverhouding</i>	67
7.6 Conclusies	68
8. Aanpassingen evenwichtsrelatie	69
8.1 Inleiding	69
8.2 Opstellen aangepaste evenwichtsrelaties	69
8.2.1 <i>Getijvolume</i>	69
8.2.2 <i>Dominant volume plus niet-dominant volume</i>	70
8.2.3 <i>Getijvolume plus restdebiet</i>	70
8.3 Waarde aangepaste evenwichtsrelatie	70
8.3.1 <i>Vergelijking relaties</i>	70
8.3.2 <i>Toepassing in model</i>	71
8.4 Conclusies	71
9. Conclusies en aanbevelingen	73
9.1 Conclusies	73
9.2 Aanbevelingen	74
Literatuur	75
Bijlagen	77

Lijst met symbolen

A_c	doorstroomoppervlak onder NAP	$[m^2]$
A'	geuldoorsnede, die optreedt bij maximaal debiet	$[m^2]$
afw	afwijking van de evenwichtslijn	$[-]$
B	breedte	$[m]$
b_s	stroomvoerende breedte	$[m]$
b_k	kombergende breedte	$[m]$
C	Chézy-coëfficiënt	$[m^{1/2}/s]$
c	voortplantingssnelheid van de verstoring	$[m/s]$
DV	dominant volume	$[m^3/\text{getij}]$
D_{nieuw}	nieuwe bodemdiepte	$[m]$
D_{basis}	bodemdiepte in de basissituatie	$[m]$
d_{50}	korreldiameter (50% van het gewicht is fijner dan deze maat)	$[m]$
dv	dominant volume per meter breedte	$[m^2/\text{getij}]$
D	diepte	$[m]$
dV_{basis}	dominant volume in de basissituatie	$[m^2/\text{getij}]$
dV_{nieuw}	dominant volume na de ingreep	$[m^2/\text{getij}]$
EV	ebvolume	$[m^3/\text{getij}]$
f_c	Coriolis coëfficiënt	$[s^{-1}]$
f_w	bodemwrijvingsfactor	$[s^{-1}]$
g	zwaartekrachtsversnelling	$[m/s^2]$
h	waterdiepte	$[m]$
h_{basis}	waterdiepte in de basissituatie	$[m]$
h_e	waterdiepte in de evenwichtssituatie	$[m]$
i	verhang	$[-]$
i_δ	verhang ten gevolge van verstoring	$[-]$
i_o	initiële verhang	$[-]$
k	Nikuradse-waarde	$[m]$
L	geullengte	$[m]$
n	coëfficiënt van Manning	$[s/m^{1/3}]$
ndv	niet-dominant volume	$[m^2/\text{getij}]$
netto	restdebiet	$[m^2/\text{getij}]$
O	natte omtrek van een geul	$[m]$
P	getijprisma	$[m^3]$
Q	debiet	$[m^3/s]$
Q_{max}	maximale debiet	$[m^3/s]$
Q_{min}	minimale debiet	$[m^3/s]$
Q_R	debiet van de reststroom	$[m^3/s]$
q	debiet per meter breedte	$[m^2/s]$
q_{basis}	debiet in de basissituatie	$[m^2/s]$
Δq	debietverschil tussen beginsituatie en na verstoring	$[m^2/s]$
R	hydraulische straal	$[m]$
r	straal van de geulbocht	$[m]$
S	getijgemiddelde sedimenttransport	$[m^3/s]$
T	getijperiode	$[s]$
TV	getijvolume	$[m^3/\text{getij}]$
TV	hoeveelheid water die in een getijperiode door het profiel stroomt	$[m^3/\text{getij}]$
tv	getijvolume per meter breedte	$[m^2/\text{getij}]$
u	verticaal geïntegreerde snelheid in x-richting	$[m/s]$
u	getijgemiddelde snelheid	$[m/s]$
u	dieptegemiddelde stromingscomponent in richting van de geulas	$[m/s]$
U_{max}	maximale getijsnelheid	$[m/s]$
VV	vloedvolume	$[m^3/\text{getij}]$
v	verticaal geïntegreerde snelheid in y-richting	$[m/s]$
v	getijgemiddelde snelheid	$[m/s]$
v	snelheid in de richting van de bochtstraal	$[m/s]$

ν_t	turbulentieviscositeit	[m ² /s]
W	stroomvoerend vermogen	[m ^{8/3} /s]
w	valsnelheid sediment	[m/s]
z	bodemniveau	[m]
z	verticale coördinaat	[m]
δ	hoogte van de verstoring	[m]
δ_{bov}	hoogte van de verstoring aan de bovenstroomse zijde	[m]
δ_{ben}	hoogte van de verstoring aan de benedenstroomse zijde	[m]
ζ	waterspiegelniveau	[m]
φ	geografische breedtegraad	[-]
ρ	dichtheid van water	[kg/m ³]
τ	schuifspanning	[N/m ²]
τ_s	stabiliteitsschuifspanning	[N/m ²]
τ_{wx}	windschuifspanning in x-richting	[N/m ²]
τ_{wy}	windschuifspanning in y-richting	[N/m ²]
ω	hoeksnelheid van de draaiing van de aarde	[rad/s]

Lijst met figuren

- Figuur 2.1: Overzicht Westerschelde met bodemgegevens uit 1996
- Figuur 2.2: Westerschelde omstreeks 1650, reconstructie naar Van der Spek (1994)
- Figuur 2.3: Verschil in principes tussen een procesgebaseerd en een semi-empirisch model
- Figuur 3.1: Dominantie in twee-geulensysteem
- Figuur 3.2: Relatie tussen dominant volume en geuldoorsnede volgens Svašek (1994)
- Figuur 3.3: Puntenwolk en evenwichtsrelatie voor punten dieper dan 5 meter
- Figuur 4.1: Schema modelprincipe
- Figuur 4.2: Gebieden met verschillende ruwheid
- Figuur 5.1: Rechte geul
- Figuur 5.2: Lokale verdieping in rechte geul
- Figuur 5.3: Bocht
- Figuur 5.4: Twee-geulensysteem
- Figuur 6.1: Ontwikkeling diepte en dominant volume van een element rond de evenwichtslijn, rechte geul
- Figuur 6.2: Ontwikkeling diepte en dominant volume met verschillende stapgroottes
- Figuur 6.3: Schematisatie splitsing met twee takken
- Figuur 6.4: Iteraties volgens waterbewegingsvergelijking en evenwichtsrelatie
- Figuur 6.5: Fasediagram van de differentiaalvergelijkingen (6.16) en (6.17) met $m > 1$
- Figuur 6.6: Stabiliteit in geul met twee roosterbanen
- Figuur 6.7: Iteraties volgens Riemann-vergelijking en evenwichtsrelatie
- Figuur 6.8: Stabiliteit in geul met twee roosterbanen en twee Riemann-randvoorwaarden
- Figuur 7.1: Punten met afwijkingen ten opzichte van de evenwichtslijn
- Figuur 7.2: Overzicht eenheden in de Westerschelde
- Figuur 7.3: Algemeen verband tussen restdebiet en afwijking evenwichtslijn
- Figuur 7.4: Overzicht meetraaien in de Westerschelde
- Figuur 7.5: Onderzochte binnen- en buitenbochten in de Westerschelde

Lijst met tabellen

Tabel 4.1	Overzicht simulaties Svašek 2000
Tabel 5.1	Opgelegde randvoorwaarden bij de rechte geul
Tabel 7.1	Relaties tussen afwijking evenwichtslijn en restdebiet/diepte
Tabel 8.1	Overzicht evenwichtsrelaties

1. Inleiding

1.1 Aanleiding

De morfologie van de Westerschelde, een estuarium in het zuidwesten van Nederland, wordt gekarakteriseerd door dynamisch gedrag in zowel plaats als tijd van geulen en platen. Dat wordt veroorzaakt door de wisselwerking tussen waterbeweging, sedimenttransport en bodemveranderingen.

Vanwege de grote economische en ecologische waarde van de Westerschelde en de veiligheid van het omliggende land is het zeer gewenst om het morfologische gedrag na veranderende externe omstandigheden te kunnen voorspellen. Hiervoor wordt veelvuldig gebruik gemaakt van numerieke modellen. Deze modellen beschrijven een gelimiteerde hoeveelheid aan processen, waarvan zowel de tijdschalen als de ruimtelijke schalen beperkt zijn.

Ingenieursbureau Svašek bv heeft een tweedimensionaal, semi-empirisch morfologisch model voor de Westerschelde ontwikkeld. Het morfologische model is gebaseerd op een empirische evenwichtsrelatie tussen het dominant getijvolume en de diepte. Deze relatie wordt toegepast per roosterpunt van een tweedimensionaal waterbewegingsmodel. Met het morfologische model zijn verschillende simulaties uitgevoerd tot tien iteraties.

Het morfologische model voor de Westerschelde kan mogelijk als instrument dienen om, met name in de geulen, de morfologische ontwikkelingen op lange termijn te voorspellen.

De uitkomsten van het model zijn fysisch verklaarbaar, maar kwantitatief onzeker en na de uitgevoerde tien iteraties wordt nog geen evenwicht bereikt door het model.

1.2 Doel onderzoek

Het doel van dit afstudeeronderzoek is meer inzicht verkrijgen in de werking van het door Svašek ontwikkelde morfologische model van de Westerschelde, zodat beoordeeld kan worden of dit model als instrument kan dienen om bodemveranderingen in de Westerschelde te kunnen voorspellen.

Daarvoor is onderzoek gedaan naar het modelprincipe en naar de empirische evenwichtsrelatie. Het modelprincipe is onderzocht met behulp van een vereenvoudigd morfologisch model. De evenwichtsrelatie is onderzocht door oorzaken van de spreiding rond de lineaire evenwichtsrelatie te bekijken.

1.3 Leeswijzer

Om meer informatie te krijgen over het belang van een goedwerkend morfologisch model, worden in hoofdstuk 2 eigenschappen van de Westerschelde en verschillende modellen beschreven. Ook wordt de doelstelling toegelicht. Hoofdstuk 3 beschrijft bestaande evenwichtsrelaties, zodat duidelijk wordt waarom de evenwichtsrelatie tussen dominant volume en diepte in het morfologisch model van de Westerschelde gekozen is.

In hoofdstuk 4 wordt het morfologische model van de Westerschelde beschreven, omdat de resultaten van dit model de aanleiding zijn voor dit afstudeeronderzoek.

Van dit model is een vereenvoudigde versie gemaakt. Om het modelprincipe te onderzoeken worden met het vereenvoudigde morfologische model in hoofdstuk 5 enkele eenvoudige geometrische situaties gesimuleerd. In hoofdstuk 6 wordt onderzocht of in het vereenvoudigde model een stabiele bodemligging wordt bereikt. Ook wordt gekeken of verklaringen voor stabiliteitsverschijnselen in een vereenvoudigde situatie van toepassing zijn op het morfologische model van de Westerschelde.

Om meer inzicht te krijgen in de evenwichtsrelatie zijn in hoofdstuk 7 oorzaken voor de spreiding rond deze evenwichtsrelatie onderzocht. In hoofdstuk 8 wordt gekeken naar de mogelijkheid tot aanpassen van de evenwichtsrelatie met de gevonden oorzaken uit hoofdstuk 7. Tot slot worden in hoofdstuk 9 de conclusies besproken en aanbevelingen gedaan.

2. Probleemanalyse

2.1 Inleiding

De Westerschelde is een estuarium in het zuidwesten van Nederland. Een estuarium is een watermassa met een open verbinding met de zee, waarin zeewater wordt gemengd met zoetwaterafvoer van een rivier.

De morfologie, de vormleer, van de Westerschelde heeft een dynamisch gedrag van geulen en platen in zowel plaats als tijd. Dit gedrag wordt veroorzaakt door de wisselwerking tussen waterbeweging, sedimenttransport en bodemveranderingen.

De huidige vorm van de Westerschelde is voornamelijk bepaald door een rijke historie aan menselijke ingrepen. De belangrijkste functie van de huidige Westerschelde is het dienen als scheepvaartroute. Daarnaast heeft het estuarium een grote ecologische waarde en is de veiligheid van het achterliggende land een belangrijk aspect.

In dit hoofdstuk wordt het belang van een goedwerkend, lange-termijnmodel van de Westerschelde toegelicht. Daarvoor wordt in paragraaf 2.2 de Westerschelde nader beschreven. Paragraaf 2.3 beschrijft de mogelijkheid tot modelleren van de Westerschelde. Tot slot wordt in paragraaf 2.4 de aanleiding voor dit afstudeeronderzoek kort beschreven, alsmede de geformuleerde doelstelling en onderzoeksvragen.

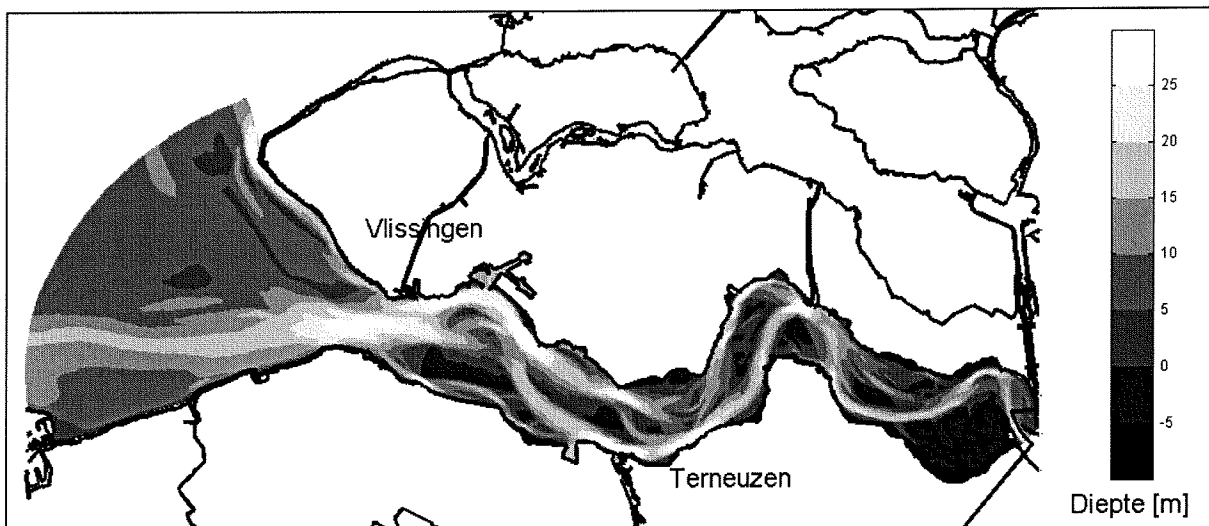
2.2 Westerschelde

Deze paragraaf schetst een beeld van de huidige Westerschelde. Eerst wordt de huidige vorm van de Westerschelde beschreven, daarna volgt de historische ontwikkeling van de Westerschelde gedurende de afgelopen eeuwen. Als laatste worden de belangrijkste functies toegelicht.

2.2.1 Geometrische eigenschappen

De Westerschelde is het Nederlandse deel van het Schelde-estuarium en is ongeveer 60 kilometer lang. De morfologie van de Westerschelde wordt gekenmerkt door een aantal hoofdgeulen, waarvan het aantal afneemt van drie aan de zeewaartse zijde tot één dieper in het bekken, zie figuur 2.1.

Ten oosten van Vlissingen wordt plaatselijk een bodemdpte van meer dan 50 meter bereikt, maar de meeste geulen zijn tussen de 15 en 30 meter diep. In bijlage 2.1 is een geometrische overzichtskaart van de Westerschelde opgenomen en in bijlage 2.2 een nauwkeurige dieptekaart.



Figuur 2.1: Overzicht Westerschelde met bodemgegevens uit 1996

In het estuarium zijn vloedgeulen en ebgeulen te onderscheiden. Vloedgeulen hebben een getijgemiddeld transport van water landinwaarts gericht en in ebgeulen is de getijgemiddelde waterbeweging zeewaarts. In de geulen bevinden zich verscheidene bochten. Op de overgang tussen twee bochten bevinden zich vaak drempels. Dit zijn natuurlijke, door de stroming veroorzaakte, lokale ondiepten.

Tussen de ebgeulen en vloedgeulen bevinden zich platen. Platen zijn volledig door het geulensysteem omringde gebieden, die regelmatig droog vallen.

In de Westerschelde bevinden zich tevens slikken en schorren, die aan één zijde door een dijk begrensd zijn. Slikken overstromen evenals platen regelmatig, terwijl schorren begroeid zijn en slechts bij hoge waterstanden overstromen.

2.2.2 Historische ontwikkeling

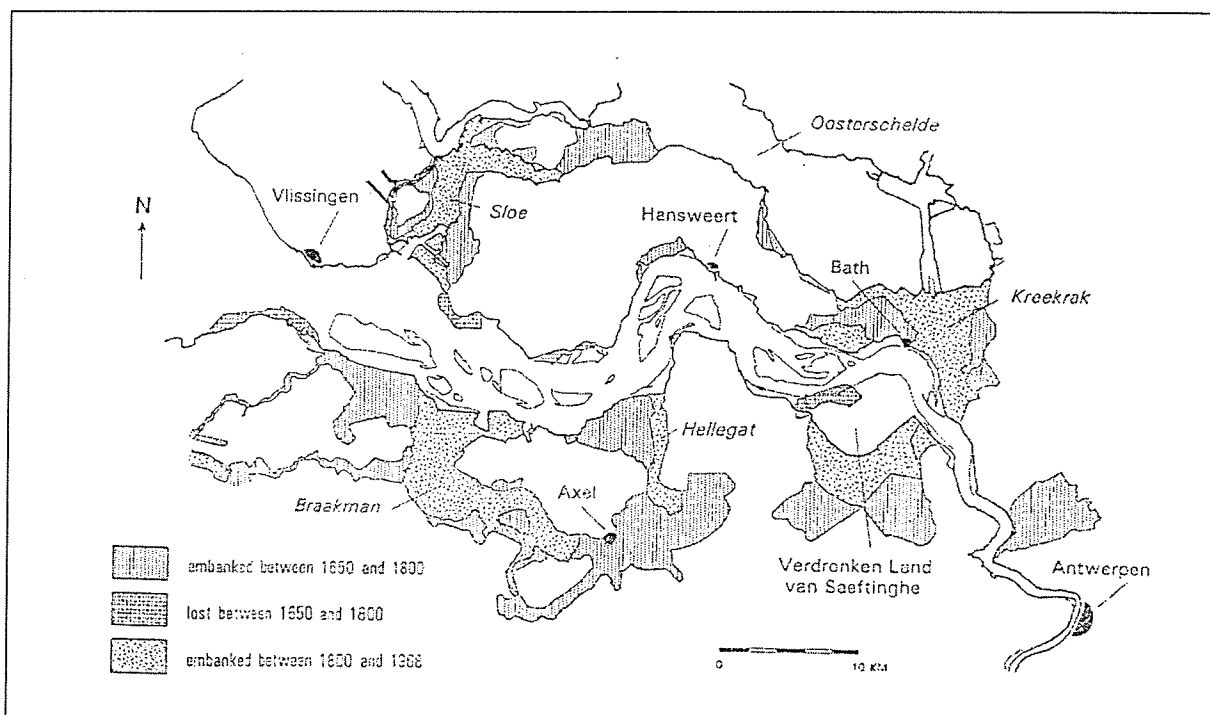
Tussen 800 en 1100 na Christus is een verbinding ontstaan tussen de Schelde-rivier en de toenmalige Honte. Daarvoor gingen de meeste schepen van zee naar Antwerpen over de Oosterschelde, maar in 14^{de} eeuw was de Westerschelde diep genoeg om als belangrijkste scheepvaartroute te dienen. De Oosterschelde en Westerschelde waren toen nog met elkaar verbonden.

De huidige vorm van de Westerschelde is voornamelijk bepaald door een rijke historie aan menselijke ingrepen. Deze ingrepen kunnen worden ingedeeld in inpolderingen en baggerwerkzaamheden.

Inpolderingen

Vanaf de elfde eeuw werden gebieden rond de Westerschelde bewoonbaar gemaakt. De eerste inpolderingen betroffen voornamelijk relatief hooggelegen land en gemakkelijk af te dammen kreken (Coosen et al 1997). Vooral na 1600 zijn gebieden permanent ingepolderd door kreken af te dammen en ringdijken aan te leggen.

Een reconstructie van de afname van het bergend volume van het Schelde-estuarium in de afgelopen 350 jaar is in figuur 2.2 weergegeven.



Figuur 2.2: Historische afname komberging Westerschelde, reconstructie naar Van der Spek (1994)

Vanaf 1800 werden ook verschillende oevers met stortsteen verdedigd. In totaal is sinds de elfde eeuw 125.000 hectare ingepolderd, waarvan 4000 hectare na 1930. In 1980 bedroeg de oppervlakte van de Westerschelde ongeveer 30.000 hectare. Door de inpolderingen zijn schor- en slijkgebieden in grote mate verdwenen. Het Verdrunken land van Saeftinghe, dat een oppervlakte heeft van ongeveer 2500 hectare, is het grootste overgebleven schorregebied. Inpolderingen hebben geleid tot verlies aan ruimte in het estuarium. Het getij kon niet meer worden geborgen in de ingepolderde gebieden, waardoor de getijdoordringing is veranderd. De getijgolf is zich sneller gaan voortplanten en het getijverschil en de hoogwaterstanden zijn toegenomen. De hoofdgeul kon zich steeds minder vrij gaan bewegen en is steeds verder uitgebocht tot aan de vastgelegde oevers van het estuarium. Platen kregen zo de tijd en de ruimte om zich te ontwikkelen.

Baggerwerkzaamheden

Vanaf 1900 is begonnen met baggeren van drempels in de Westerschelde (Groenewoud 1998). Eerst waren de baggerwerkzaamheden weinig frequent en van kleine omvang, maar vanaf 1950 werd jaarlijks gebaggerd. De gebaggerde hoeveelheden werden voor het grootste gedeelte teruggestort op andere plaatsen in de Westerschelde.

Tussen 1970 en 1975 is een grootscheepse verdieping uitgevoerd om de haven van Antwerpen bereikbaar te maken voor de grotere schepen. Alle drempels werden tot 14 meter beneden NAP verdiept. Daarna heeft voortdurend onderhoudsbaggerwerk plaatsgevonden.

In 1996 is begonnen met een nieuwe verdiepingronde, de 48'/43'-verdieping. De gehele hoofdgeul van de Westerschelde kreeg hierbij een permanente waterdiepte van 43 ft, ongeveer 13 meter beneden LLW (laag laag water). Daarnaast werden de meeste wrakken gelicht. Door het baggeren van de hoofdgeul is, vooral in het oostelijk deel, het patroon van een meergeulensysteem minder zichtbaar geworden (Coosen et al 1997).

2.2.3 Functies

De Westerschelde kent verschillende functies. De belangrijkste zijn scheepvaart doorlaten, ecologie herbergen, veiligheid bieden door water af te voeren en te bergen en plaats bieden aan visserij, recreatie en zandwinning. De functies waarvoor veranderingen in de morfologie het

meest van belang zijn worden hieronder besproken. Dit zijn functies op het gebied van de scheepvaart, de ecologie en de veiligheid.

Scheepvaart

De Westerschelde is een drukke scheepvaartverbinding tussen de Noordzee en de Belgische havenstad Antwerpen. Daarnaast geeft de Westerschelde ook toegang tot de havens van Vlissingen, Terneuzen en Gent. Het economische belang van een goed bevaarbare Westerschelde is dus groot.

Baggerwerkzaamheden om de vaargeulen op diepte te houden zijn dan ook regelmatig uitgevoerd, zie paragraaf 2.2.2 voor een beschrijving hiervan. Ook zijn de geulen op verschillende plaatsen verdedigd.

De laatste grote verdieping had als doel een permanente vaardiepte van ongeveer 13 meter te garanderen. De nieuwe generatie containerschepen kan de haven van Antwerpen alleen nog maar bereiken als de vaargeul in de Westerschelde op een diepte van 15,75 meter benden LLW wordt gebracht. Eind 2001 komt de Belgische regering met een voorstel voor verdere baggerwerken (Volkskrant, 8 september 2000). Ondertussen worden onderzoeken uitgevoerd naar de langetermijngevolgen van een dergelijke ingreep op de ecologie en de veiligheid.

Ecologie

Naast de economische functie vervult het estuarium ook een belangrijke ecologische functie. In estuaria vindt menging van zoet rivierwater en zeewater plaats. Deze menging is voor het ecosysteem van grote betekenis, omdat zich in de mengzone veel organisch materiaal ophoopt, dat verschillende organismen aantrekt. De Westerschelde is een kraamkamer voor veel vissoorten. Daarnaast komen er verschillende soorten schaal- en schelpdieren voor en vele andere bodemdieren. Vooral op de hoger gelegen delen, met name de platen en schorren, is de biodiversiteit groot. Een belangrijk ecologisch gebied is het Verdronken land van Saeftinge, het grootste brakwaterschor van Europa. Naast vissen en bodemdieren is de Westerschelde rijk aan vogels.

Veiligheid

Bij extreme hoogwaterstanden in de Westerschelde moet de veiligheid in het achterliggende land gehandhaafd blijven. De geometrie van de Westerschelde heeft invloed op de voortplanting van de getijgolf in het estuarium en daarom op de veiligheid. Het plegen van ingrepen beïnvloedt ook de veiligheid.

Door inpolderingen en sedimentatie in het intergetijdengebied is het kombergingsgebied afgenomen. Maar door het baggeren van de hoofdgeul neemt de getij-indringing toe. Tezamen met het stijgen van de zeespiegel is het bepalen van de optredende hoogwaterstanden in de toekomst een complex proces.

2.3 Numeriek modelleren

Om de Westerschelde als een multifunctioneel estuarien watersysteem te handhaven, bestaat de noodzaak tot het voorspellen van de lange-termijn consequenties van ingrepen en van autonome geometrische ontwikkelingen van de Westerschelde. Ook lokale, initiële effecten van ingrepen moeten worden voorspeld. Numerieke modellen zijn hierbij het belangrijkste hulpmiddel.

Om inzicht te krijgen in de modelmogelijkheden wordt in paragraaf 2.3.1 eerst een kort overzicht gegeven van optredende processen in de Westerschelde. Daarna worden verschillende modelaspecten besproken en tot slot worden twee soorten modellen beschreven.

2.3.1 Belangrijke processen

Morfologische ontwikkeling is een gevolg van de interactie tussen waterbeweging en bodemtopografie. Veranderingen in de waterbeweging leiden tot morfologische ontwikkelingen en evenzo leiden veranderingen in de bodemtopografie tot veranderingen in de waterbeweging.

Hieronder worden de belangrijkste factoren besproken die de waterbeweging en de morfologische processen beïnvloeden.

Getij

Getijden worden veroorzaakt door variaties in tijd en plaats van de zwaartekracht uitgeoefend door zon en maan, in combinatie met aardrotatie.

De getijgolf die zich voortplant langs de Nederlandse kust in noordelijke richting, is in de Westerschelde de drijvende kracht van de waterbeweging. De getij-indringing is merkbaar tot aan Gent, bijna 160 km stroomopwaarts van de Westerscheldemonding.

In de Westerschelde is het halfdaagse maangetij M2 dominant, waarvan de periode 12 uur en 24 minuten bedraagt. Daarnaast zijn er nog vele andere componenten met kleinere amplitudes en uiteenlopende faseverschillen, die door het vervormen van de getijgolf in ondiep water een belangrijkere invloed krijgen.

De getijslag, het verschil tussen hoog en laag water, is niet constant over de Westerschelde. Aan de mond bij Vlissingen is de getijslag bij een gemiddeld springtij 4,4 meter. Meer landinwaarts, bij Bath, is de getijslag voor een gemiddeld springtij ongeveer 5,2 meter. Deze variatie wordt veroorzaakt door opslingering van de getijgolf en reflectie. Ook wordt getij-energie gedissipeerd door bodemwrijving.

Rivierafvoer

Aan de landzijde stroomt de Schelde vanuit Frankrijk, via België, het estuarium in. De gemiddelde rivierafvoer van de Schelde is 120 m³/s (Jeuken 2000).

De combinatie van getij-indringing met zout water en zoetwaterafvoer van de rivier veroorzaakt dichtheidsverschillen. De dichtheid van zout water is immers hoger dan die van zoet water. Door deze dichtheidsverschillen heeft zout water de neiging om het estuarium in te bewegen in het onderste gedeelte van de waterkolom en zoet water het estuarium uit in de bovenste laag van de waterkolom. Afhankelijk van de invloed van het getij en de zoetwaterafvoer zal een gelaagd systeem, een gedeeltelijk gemengd systeem of een volledig gemengd systeem optreden.

In de Westerschelde is de afvoer van zoet water klein. Het is dus een goed gemengd estuarium en dichtheidsverschillen zijn geen drijvende kracht voor de waterbeweging.

Wind en windgolven

In de Westerschelde heeft de wind weinig kans om stroming te veroorzaken die aanzienlijk bijdraagt aan de waterbeweging. De waterstanden die optreden worden wel mede veroorzaakt door de wind.

Golven hebben vooral in de mond van het estuarium invloed op de waterbeweging. Op platen hebben de golven meer invloed dan in de diepere geulen; golven zijn deels verantwoordelijk voor de morfologische ontwikkeling van platen.

Sedimenttransport

Het sediment in de Westerschelde bestaat voornamelijk uit zand met een gemiddelde korreldiameter van 0,2 mm. Over de lengte van de Westerschelde varieert deze korreldiameter enigszins, zie bijlage 7.2 voor een overzichtskaart van de gemiddelde korreldiameters. Het sedimenttransport hangt af van de beschikbaarheid van sediment. Langstransport langs de kust is één van de belangrijkste sedimentbronnen. Andere bronnen zijn sedimenttransport door golven, zandverlies van aangrenzende stranden en zandverlies van de buitendelta.

Naast sedimentbeschikbaarheid wordt sedimenttransport bepaald door sedimenteigenschappen, zoals sedimentgrootte, -vorm, -dichtheid en valsnelheid.

In de Westerschelde vindt meer sedimenttransport in suspensie plaats dan bodemtransport.

2.3.2 Modelaspecten

Om ontwikkelingen in estuaria te voorspellen, wordt gebruik gemaakt van numerieke modellen. De complexiteit van processen in een hoog dynamisch gebied als de Westerschelde en de verscheidenheid in tijd- en ruimteschalen maakt het modelleren van estuaria niet eenvoudig. De

bestaande modellen beschrijven maar een gelimiteerde hoeveelheid aan processen met beperkte tijd- en ruimteschalen. Eén morfologisch model voor alle praktische problemen bestaat dus niet. Onderstaand worden enkele aspecten van modellen besproken.

Geometrische dimensies

Mathematisch-fysische modellen kunnen onderscheiden worden naar het aantal geometrische dimensies die bij de berekening expliciet worden meegenomen. Eindimensionale modellen hebben meestal een geometrische dimensie in de lengterichting. Tweedimensionale modellen berekenen de processen niet alleen in de lengterichting, maar ook in de breedterichting (2DH-modellen) of in de diepterichting (2DV-modellen). In driedimensionale modellen wordt in zowel de lengte-, de breedte- als de diepterichting gerekend.

Morfologische tijd- en ruimteschalen

Ook kan onderscheid worden gemaakt naar de morfologische tijd- en ruimteschaal, waarop de gemodelleerde processen zich afspelen. Dit is een nuttige indeling, omdat op deze manier de beperkte voorspelbaarheid van modellen wordt benadrukt.

Onderscheid wordt gemaakt in microschaal, mesoschaal, macroschaal en megaschaal. Processen op microschaal beslaan een korte termijn (enkele dagen) op een kleine ruimtelijke schaal (tot enkele honderden meters) (Winterwerp 2000). Het primaire morfodynamische gedrag speelt zich af op mesoschaal, dus op middellange termijn (enkele jaren) en op een ruimteschaal van enkele honderden meters tot kilometers. Het macroschaal-gedrag geeft langzame trends in de morfologie weer, die op lange termijn spelen (decennia) over tientallen kilometers. Tot slot vindt op megaschaal een dynamiek plaats, die het hele estuarium of grote compartimenten beslaat. De bijbehorende tijdschaal is in de ordegrootte van eeuwen.

Fysische onderbouwing

Tot slot is een indeling van modellen mogelijk naar de fysische onderbouwing (Stive 1999). Dit levert een indeling in procesgebaseerde modellen, semi-empirische modellen en empirische modellen. Deze laatste zijn compleet gebaseerd op empirische relaties en vooral nuttig om een snelle beschouwing te maken van een mogelijke ingreep. De andere twee, procesgebaseerde modellen en semi-empirische modellen, geven tot nu toe de meest gedetailleerde uitkomsten. Deze worden in de volgende paragraaf nader beschreven.

2.3.3 Overzicht bestaande modellen

De bruikbare mathematische modellen die in de afgelopen jaren ontwikkeld zijn, worden onderverdeeld in procesgebaseerde modellen en semi-empirische modellen.

Procesgebaseerde modellen

Procesgebaseerde modellen zijn gebaseerd op mathematische beschrijvingen van de relevante processen. De hydrodynamische vergelijkingen en sedimenttransportvergelijkingen worden gebruikt om veranderingen in het morfologisch gedrag te voorspellen. Dit kan zowel een-, twee- als driedimensionaal worden toegepast. De bodemverandering wordt met een morfologische tijdstap aangepast, bijvoorbeeld een getijperiode. De tijdschaal waarvoor procesgebaseerde modellen gelden, is een doortij-springtijscyclus, een stormcyclus of een seizoenscyclus. De sedimenttransportmodule kan met totaal transport, met bodemtransport of met suspensietransport rekenen. Bodemtransport wordt berekend met een transportformulering op basis van de stromingscondities en suspensietransport met een advectie-diffusie model. Het effect van de zwaartekracht op het bodemtransport is belangrijk voor de stabiliteit.

Door de kleine tijdstappen en de lange tijdschalen waarop de morfologische processen spelen, kunnen verstoringen sterk doorspelen in het eindresultaat. Onnauwkeurigheden in de stroomsnelheid komen versterkt terug in het sedimenttransport. Dit soort modellen is dus vooral geschikt voor het berekenen van initiële morfologische veranderingen in estuaria en niet voor het bedekken van tijdschalen die veel groter zijn dan de morfologische tijdschalen die bij de maatgevende processen horen (Stive 1999).

Semi-empirische modellen

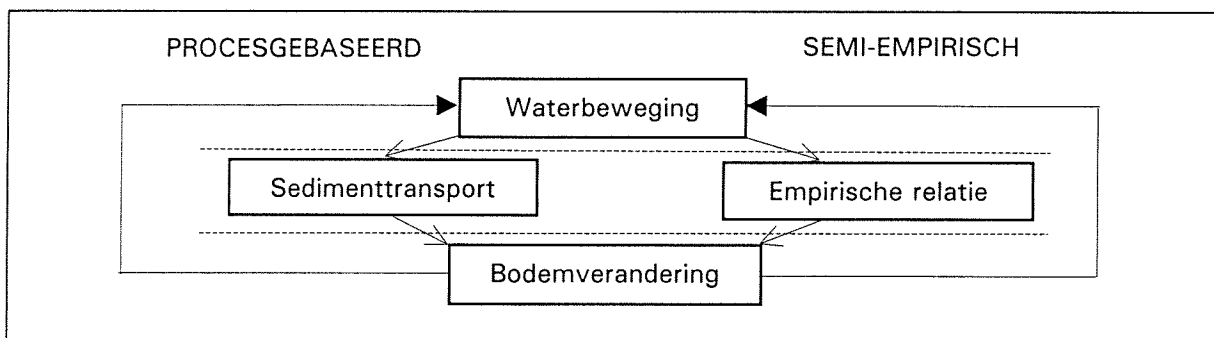
Semi-empirische modellen zijn gedrags-gerelateerde modellen die hydrodynamische modellen gebruiken om de waterbeweging te simuleren. Empirische relaties worden toegepast om morfologische veranderingen te voorspellen. Deze empirische relaties beschrijven de (dynamische) evenwichtstoestand van het estuarium. Hoofdstuk 3 geeft een overzicht van verschillende empirische relaties.

Bij een afwijking van deze evenwichtstoestand, wordt het systeem aangepast. Dit kan direct gebeuren via de empirische evenwichtsrelatie of via het meenemen van een evenwichtsconcentratie. De morfologische verandering wordt in het laatste geval bepaald door het verschil tussen de lokale concentratie en de evenwichtsconcentratie.

Tot nu toe zijn alleen eendimensionale semi-empirische modellen beschikbaar, bijvoorbeeld ESTMORF, ontwikkeld door het Waterloopkundig Laboratorium en Rijkswaterstaat. De belangrijkste hypothese in ESTMORF is dat voor elk morfologisch element een evenwichtstoestand kan worden gedefinieerd. Morfologische veranderingen treden op als de sedimentconcentratie in een element afwijkt van het lokale evenwicht. ESTMORF wordt onder andere gebruikt voor de Westerschelde.

Bij gedragsmodellen is kennis nodig van de dominante generieke fysische processen op grote schaal. Deze kennis is nog niet altijd toereikend (Van Rijn 1998). Ook de schematisatie van de in de tijd variërende randvoorwaarden is een probleem. Het optreden van milde of extreme omstandigheden maakt een groot verschil in het gedrag van de morfologie. In de Westerschelde vinden bovendien voortdurend grote ingrepen plaats, waardoor nauwelijks sprake kan zijn van een natuurlijk systeem in evenwicht.

In figuur 2.3 is het verschil weergegeven tussen de werking van de principes van een procesgebaseerd model en een semi-empirisch model.



Figuur 2.3: Verschil in principes tussen een procesgebaseerd en een semi-empirisch model

2.4 Probleemdefinitie

Het voorspellen van morfologische veranderingen in de Westerschelde is voor de scheepvaart, de ecologie en de veiligheid van groot belang. Numerieke modellen zijn hierbij het belangrijkste hulpmiddel. Er bestaan reeds modellen op verschillende tijd- en ruimteschalen. Het lange-termijngedrag wordt momenteel voorspeld door het eendimensionale model ESTMORF. Daarnaast blijft er behoefte bestaan aan een model voor de Westerschelde, dat lange-termijn processen in meerdere geometrische dimensies beschrijft.

In paragraaf 2.4.1 wordt de aanleiding voor dit afstudeeronderzoek besproken. Paragraaf 2.4.2 beschrijft de doelstelling en paragraaf 2.4.3 de onderzoeksvragen, aan de hand waarvan dit onderzoek is uitgevoerd.

2.4.1 Aanleiding

In de eerste helft van 2000 heeft Ingenieursbureau Svašek bv in opdracht van het Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ) onderzoek uitgevoerd naar de haalbaarheid van het gebruik van een tweedimensionaal, semi-empirisch morfologisch model voor de Westerschelde. Dit model kan als instrument dienen om, met name in de geulen, de morfologische ontwikkelingen op lange termijn te voorspellen.

Het morfologische model is gebaseerd op een empirische evenwichtsrelatie tussen het dominant getijvolume en de geuldoorsnede. Deze relatie is gevonden door de het berekende dominante volume uit te zetten tegen de diepte voor alle roosterpunten van het model. De relatie wordt toegepast per roosterpunt van het tweedimensionale waterbewegingsmodel SCALWEST. Door de verhouding tussen dominant volume en waterdiepte per roosterpunt constant te veronderstellen, kan de relatieve diepteverandering na een ingreep worden bepaald.

De bodemveranderingen die met het morfologisch model van de Westerschelde zijn berekend, zijn fysisch verklaarbaar. De uitkomsten zijn echter kwantitatief onzeker en er wordt nog geen evenwicht bereikt door het model. Meer inzicht is nodig in de werking van het model om te beoordelen of het een nuttig instrument is voor het voorspellen van de morfologie van de Westerschelde.

2.4.2 Doelstelling

Het doel van dit afstudeeronderzoek is:

Meer inzicht verkrijgen in de werking van het tweedimensionale, semi-empirische morfologische model van de Westerschelde, zodat beoordeeld kan worden of dit model als instrument kan dienen om bodemveranderingen in de Westerschelde te kunnen begrijpen en voorspellen.

Dit wordt verkregen door zowel het modelprincipe als de evenwichtsrelatie te onderzoeken. Het modelprincipe wordt nader onderzocht met behulp van een vereenvoudigd morfologisch model. De evenwichtsrelatie wordt onderzocht door oorzaken van de afwijking van deze relatie te bekijken.

2.4.3 Onderzoeksvragen

Om bovenstaande doelstelling te bereiken zijn de onderstaande onderzoeksvragen geformuleerd, die als leidraad hebben gediend voor het uitvoeren van het afstudeeronderzoek.

1. Hoe werkt het modelprincipe voor eenvoudige geometrische situaties?
 - a) Welke resultaten worden verkregen als een rechte geul, een axiaalsymmetrische bocht en een twee-geulensysteem worden gesimuleerd?
 - b) Gaat de bodem in de vereenvoudigde situaties naar een evenwichtsligging toe? Zo niet, kan dit worden verklaard en zijn daar oplossingen voor te vinden?
 - c) Geven de resultaten van het vereenvoudigde model verklaringen voor verschijnselen die optreden in het morfologische model van de Westerschelde?
2. Hoe goed beschrijft de evenwichtsrelatie de evenwichtstoestand in de Westerschelde?
 - a) Zijn er processen te vinden die de evenwichtsrelatie tussen dominant volume en diepte beïnvloeden?
 - b) Kunnen deze processen worden meegenomen in een aangepaste evenwichtsrelatie, zodat de evenwichtstoestand beter kan worden beschreven?

Bijlage 2.3 geeft een overzicht van de uitgevoerde simulaties en analyses om de onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden.

3. Evenwichtsrelaties

3.1 Inleiding

Sinds 1931 is een aantal verschillende relaties afgeleid voor de stabiliteit van zowel zeegaten als geulen in een estuarium. De belangrijkste hiervan zullen in dit hoofdstuk worden besproken.

Opgemerkt moet worden dat geulen twee soorten stabiliteiten hebben, namelijk de stabiliteit van de doorsnede en de stabiliteit van de geulligging. Beide stabiliteiten zijn niet onafhankelijk van elkaar te beschouwen. Toch wordt in deze paragraaf met stabiliteit van de geul de stabiliteit van de doorsnede bedoeld en niet de stabiliteit van de ligging. Dit gebeurt omdat in de meeste gevallen eendimensionale situaties zijn beschouwd, waarvoor het niet mogelijk is migratie van geulen mee te nemen.

In paragraaf 3.2 komen relaties aan de orde die het evenwicht van zeegaten in het algemeen beschrijven. Paragraaf 3.3 beschrijft verschillende relaties, die gevonden zijn voor geulen in de Westerschelde. Het dominant getijvolume als maatgevende parameter voor een stabiliteitsrelatie wordt in paragraaf 3.4 besproken, omdat in het morfologisch model een relatie wordt gebruikt op basis van dominant getijvolume. Paragraaf 3.5 bespreekt mathematisch-fysische relaties, die afgeleid kunnen worden voor geulen in het algemeen. Tot slot wordt in paragraaf 3.6 de tweedimensionale relatie in het morfologische model voor de Westerschelde toegelicht.

3.2 Empirische relaties voor zeegaten

O'Brien was in 1931 de eerste die een empirische relatie opstelde voor getijprisma en het doorstroomoppervlak van zeegaten aan de Amerikaanse oost- en westkust. Deze relatie heeft de volgende algemene vorm:

$$A_c = c_1 * P^{c_2} \quad (3.1)$$

waarin:

- A_c = doorstroomoppervlak [m^2]. Dit is de doorsnede van een zeegat onder gemiddeld zeeniveau.
- P = getijprisma [m^3]. Dit is het bergingsvolume van een estuarium tussen hoogwaterniveau en laagwaterniveau gedurende springtij. Meestal wordt het getijprisma benaderd door het oppervlaktegebied van het estuarium te vermenigvuldigen met de gemiddelde getijslag. De getijslag is hierbij het verschil tussen hoog- en laagwater.
- c_1, c_2 = constanten. Deze zijn niet universeel, maar afhankelijk van de lokale morfologische condities. Door O'Brien is voor c_2 een waarde gevonden gelijk aan 1, zodat een lineaire vergelijking wordt verkregen. Latere onderzoekers hebben voor c_2 waarden gevonden variërend tussen 0,8 en 1.

Haring deed in 1967 als eerste Nederlander onderzoek naar de relatie tussen het getijvolume en de geuldoorsnede voor de Nederlandse zeegaten. Hij vond de volgende relatie:

$$A_c = 4,068 * 10^{-5} * TV \quad (3.2)$$

waarin:

- A_c = doorstroomoppervlak onder NAP [m^2].
- TV = getijvolume [m^3 /getij], geeft de hoeveelheid water aan die bij gemiddeld getij in één getijperiode door een bepaalde doorsnede stroomt. Het getijvolume houdt rekening met de golfbeweging van het getij in een lang bekken, zoals de Westerschelde. Dit is niet het geval bij het getijprisma.

3.3 Empirische relaties voor geulen zonder dominantie

Naast relaties voor zeegaten zijn ook verbanden afgeleid specifiek voor geulen in de Westerschelde. Deze worden in onderstaande paragraaf toegelicht. Gerritsen en De Jong (1983) hebben onderzoek gedaan naar evenwichtsrelaties voor de geulen in de Westerschelde. Zij legden een verband tussen het doorstroomprofiel en een aantal getijkarakteristieke grootheden met behulp van gegevens van elf verschillende geuldoorsneden. Drie van deze verbanden worden in paragraaf 3.3.1 besproken. Op de gevonden verbanden is commentaar geleverd en zijn aanpassingen gemaakt, die worden besproken in paragraaf 3.3.2.

3.3.1 Doorstroomprofiel en getijkarakteristieken

Gerritsen en De Jong (1983) hebben verschillende getijkarakteristieken onderzocht. Dit zijn getijvolume, vloedvolume en ebvolume, maximaal getijdebiet en maatgevende schuifspanning. Relaties tussen het doorstroomprofiel en deze getijkarakteristieken worden hieronder besproken.

Relatie tussen getij-, eb- en vloedvolume en geuldoorsnede

In 1983 hebben Gerritsen en De Jong een relatie afgeleid tussen het doorstroomoppervlak en het gemiddelde getijvolume. Deze relatie kwam goed overeen met de relatie voor zeegaten, gevonden door Haring (vergelijking (3.2)) en luidt als volgt:

$$TV = 25712,8 * A_c + 14310117 \quad (3.3)$$

Ook definieerden zij een vloedvolume voor vloedgeulen en een ebvolume voor ebgeulen als volgt:

EV = ebvolume [m³/getij] door een dwarsdoorsnede. Dit is de totale hoeveelheid water die door die doorsnede stroomt gedurende de periode van ebstroming. De periode van ebstroming is de periode, waarin de stroming in een estuarium naar zee toe is gericht.

VV = vloedvolume [m³/getij] door een dwarsdoorsnede. Dit wordt op dezelfde wijze gedefinieerd, dus als de totale hoeveelheid water die door een doorsnede stroomt gedurende de periode van vloedstroming.

Zij vonden de volgende relaties tussen deze volumes en geuldoorsneden in de Westerschelde:

$$EV = 12994 * A_c + 21,2 * 10^6 \quad (3.4)$$

$$VV = 13000 * A_c + 23,3 * 10^6 \quad (3.5)$$

Relatie tussen maximaal getijdebiet en geuldoorsnede

Ook hebben Gerritsen en De Jong (1983) een relatie onderzocht tussen het maximale debiet Q_{max} [m³/s] tijdens eb en vloed en de dan optredende geuldoorsnede A' [m²]. Voor eb bestaat nauwelijks verschil tussen A_c en A'_{eb} , omdat het maximale debiet bij eb optreedt (en dus gemeten is) bij een waterstand van \pm NAP. Het maximale vloeddebiet treedt op wanneer de waterstand ongeveer 2 meter + NAP bedraagt. De volgende relaties zijn gevonden:

$$Q_{max,eb} = 0,957 * A_{eb} - 4118 \quad (3.6)$$

$$Q_{max,vloed} = 1,081 * A_{vloed} - 1330 \quad (3.7)$$

Deze relaties hebben een kleinere correlatie dan het verband tussen eb- of vloedvolume en de geuldoorsnede.

Relatie tussen maatgevende schuifspanning, geuldoorsnede en maximaal getijdebiet

Het zandtransport in stroomgeulen is in grote mate afhankelijk van de door de stroom veroorzaakte schuifspanning aan de bodem. Daardoor kan verondersteld worden dat een maatgevende bodemschuifspanning bestaat die de stabiliteit van een geul bepaalt. Deze schuifspanning is groter dan de kritieke schuifspanning, die kenmerkend is voor begin van beweging.

Gerritsen en De Jong (1983) zijn voor het bepalen van de gemiddelde schuifspanning uitgegaan van de volgende relatie:

$$\tau = \rho * g * \frac{Q^2}{A_c^2 * C^2} \quad (3.8)$$

met:

- τ = schuifspanning [N/m²]
- ρ = dichtheid van water [kg/m³]
- g = zwaartekrachtsversnelling [m/s²]
- Q = debiet [m³/s]
- C = Chézy-coëfficiënt [m^{1/2}/s]

Deze relatie geldt voor uniforme stroming, maar wordt hier gebruikt voor getijstroming.

De stabiliteitsschuifspanning τ_s [N/m²] wordt gedefinieerd als de gemiddelde schuifspanning langs de bodem bij maximaal debiet, waarbij het doorstroomprofiel van een zeegat stabiel is. Dat levert het volgende verband tussen A_c en de schuifspanning:

$$A_c = \frac{Q_{\max}}{C \sqrt{\tau_s / \rho g}} \quad (3.9)$$

De waarde van τ_s en C zijn afhankelijk van het debiet. De waarde van de Chézy-coëfficiënt moet van tevoren bekend zijn. Vervolgens wordt τ_s zodanig bepaald dat de linkerterm en de rechterterm in vergelijking (3.9) aan elkaar gelijk zijn. Deze relatie heeft geen meerwaarde boven de relatie tussen Q_{\max} en A_c (vergelijking (3.6) en (3.7)), omdat τ_s wordt bepaald aan de hand van deze waarden.

3.3.2 Aanpassingen op evenwichtsrelaties

Naast het afleiden van de bovenstaande relaties is ook onderzoek gedaan naar de afwijkingen van gevonden evenwichtsrelaties. Hieronder wordt de invloed van de hydraulische straal, golfwerking en rivierafvoer besproken op de lineaire relatie tussen een getijkarakteristiek en de doorsnede.

Hydraulische straal

In Gerritsen et al (1990) is beschreven dat een relatie bestaat tussen het vloedvolume en de hydraulische straal. De vorm van het dwarsprofiel speelt een rol en heeft (via de hydraulische straal) een significante invloed op de in de geul optredende gemiddelde snelheid.

Voor een empirische relatie tussen een stroomparameter en de dwarsdoorsnede moet een aanpassing worden aangebracht om de hydraulische straal in rekening te brengen.

De volgende empirische relatie tussen de hydraulische straal en de getijgemiddelde snelheid in verschillende Nederlandse zeegaten is gevonden:

$$u = \alpha * R^\beta \quad (3.10)$$

met:

- u = getijgemiddelde snelheid [m/s]
- R = hydraulische straal [m], gedefinieerd als het doorstroomoppervlak (A_c [m²]) gedeeld door de natte omtrek van een geul (O [m]).
- α, β = coëfficiënten, $\alpha = 0,353$ en $\beta = 0,25$.

De gemiddelde snelheid tijdens vloed kan worden geschreven als functie van het vloedvolume:

$$u_{vf} = \frac{VV}{A_c * 1/2 * T} \quad (3.11)$$

waarin:

$T =$ getijperiode (s)

Na samenvoegen van vergelijking (3.10) en (3.11) en invullen van de gevonden coëfficiënten en een getijperiode van 44700 seconden, wordt de volgende vergelijking verkregen, die algemeen geldig is voor Nederlandse zeegaten:

$$A_c = 1,269 * 10^{-4} * \frac{VV}{R^{0,25}} \quad (3.12)$$

Omdat in de Westerschelde de meeste geulen een min of meer zelfde breedte/diepteverhouding hebben, verwachten Gerritsen et al (1990) geen opvallende afwijkingen van de eerder gevonden relaties tussen vloedvolume en geuldoorsnede (vergelijking 3.5).

Vergelijking (3.12) is door Gerritsen et al (1990) alleen afgeleid voor het vloedvolume. Een vergelijking voor de invloed van de hydraulische straal op de relatie tussen het ebvolume en de geuldoorsnede kan op dezelfde manier worden afgeleid.

Golven

Doorsneden waar de invloed van golfwerking niet verwaarloosbaar is, voldoen meestal niet aan de gevonden empirische relaties. De aanwezigheid van golven beïnvloedt immers de bodemschuifspanning, dus de snelheid en daardoor de evenwichtsrelatie. Gerritsen en De Jong (1983), Gerritsen et al (1990) en Gerritsen (1999) hebben alleen in de buitendelta afwijkingen van de evenwichtsrelaties gevonden die door golfwerking kunnen zijn veroorzaakt, en niet in de geulen van de Westerschelde. De invloed van golven wordt dus niet meegenomen in dit onderzoek.

Rivierafvoer

De gemiddelde rivierafvoer van de Schelde, gemiddeld 120 m³/s, is klein ten opzichte van de maximale getijdebieten die optreden in het estuarium. Hoewel de Schelde-afvoer klein is, ontstaat een dichtheidsgradiënt over het estuarium. De invloed hiervan op de verticale snelheidsverdeling is gering. In de bovengenoemde stabiliteitsanalyses is geen significante invloed ontdekt van gradiënten in de dichtheid.

In 1988 heeft Allersma onderzoek gedaan naar de morfologische modellering van het Noordelijk Deltabekken, een deel van de delta van de Rijn en de Maas. Voor rivieren is hij daarbij uitgegaan van een empirische relatie van de volgende vorm:

$$A_c = N * TV^n \quad (3.13)$$

waarin:

$A_c =$ doorstroomoppervlak onder NAP [m²]

$TV =$ hoeveelheid water die in een getijperiode door het profiel stroomt [m³/getij]

$N, n =$ constanten bepaald uit waarnemingen

Voor getijgebieden gebruikte hij de vorm van de empirische relatie, die eerder door Haring en andere onderzoekers was gevonden:

$$A_c = M * TV \quad (3.14)$$

Uit deze twee heeft hij een empirische relatie afgeleid die zowel geldig is voor het getijgebied als voor het rivierengebied als voor het overgangsgebied:

$$A_c = \alpha * M * TV + (1 - \alpha) * N * TV^n \quad (3.15)$$

met:

$$\alpha = \frac{\frac{1}{2}(Q_{\max} - Q_{\min})}{\frac{1}{2}(Q_{\max} - Q_{\min}) + Q_R} \quad (3.16)$$

waarin:

Q_{\max} = maximale waarde van het debiet gedurende de getijperiode [m^3/s]

Q_{\min} = minimale waarde van het debiet gedurende de getijperiode [m^3/s]

Q_R = debiet van de reststroom door het profiel in de getijperiode [m^3/s]

De waarde van α varieert dus tussen 0 in een rivier en 1 in een situatie met zuiver getij.

Als het debiet van de reststroom groot is, is volgens (3.16) dus sprake van een riviergebied. Een debiet van de reststroom gelijk aan nul impliceert een gebied met alleen een cyclisch getij.

3.4 Empirische relaties voor geulen met dominantie

In het morfologische model van de Westerschelde wordt als maatgevende getijkarakteristiek het dominante volume gebruikt. In paragraaf 3.4.1 worden enkele definities betreffende dominantie gegeven. Paragraaf 3.4.2 leidt een evenwichtsrelatie af op basis van dominant volume en in paragraaf 3.4.3 wordt de meerwaarde van dominant volume boven getijvolume besproken.

3.4.1 Definities betreffende dominantie

Dominantie heeft betrekking op het maatgevende getijvolume, dus de verdeling van water over de geulen. In de literatuur wordt dominantie ook genoemd in verband met de maatgevende snelheden of de maatgevende zandtransporten, maar in dit onderzoek wordt dominantie alleen bedoeld met betrekking tot het getijvolume.

Onderscheid kan worden gemaakt tussen interne en externe dominantie. Externe dominantie is de mate waarin de vloed- en ebstroom elk gebruik maken van een aparte geul. De mate van (externe) getijdinantie wordt door Van Kleef (1995) gedefinieerd als het dominante getijvolume gedeeld door het ondergeschikte volume (het volume in de niet-dominante fase). Deze waarde is altijd 1 of hoger.

Interne dominantie is de mate waarin de vloed- en ebstroom elk gebruik maken van een apart deel binnen een geul. Van Kleef (1995) definieert de mate van interne dominantie als het totale getijvolume gedeeld door het gemiddelde van ebvolume en vloedvolume. Deze waarde is ook altijd 1 of hoger.

Beide soorten dominantie komen voor in de Westerschelde. Indien de vloed- en ebstroom geheel van elkaar gescheiden in twee aparte geulen stromen (dit is fysisch niet mogelijk), dan heeft de totale doorsnede het grootst mogelijke doorstroomoppervlak. Er is dan sprake van een grote mate van externe dominantie.

Indien de vloed- en ebstroom precies door één geul stromen, dan heeft de geul het kleinst mogelijke doorstroomoppervlak en de geul is dus zeer efficiënt. Er is dan geen sprake van interne en externe dominantie.

Het dominant getijvolume (DV [m^3/getij]) wordt gedefinieerd als het volume dat gedurende de dominante fase van het getij door een bepaalde geul stroomt. Voor ebgeulen is het dominant volume het ebvolume, voor vloedgeulen het vloedvolume.

3.4.3 Beschrijving relatie

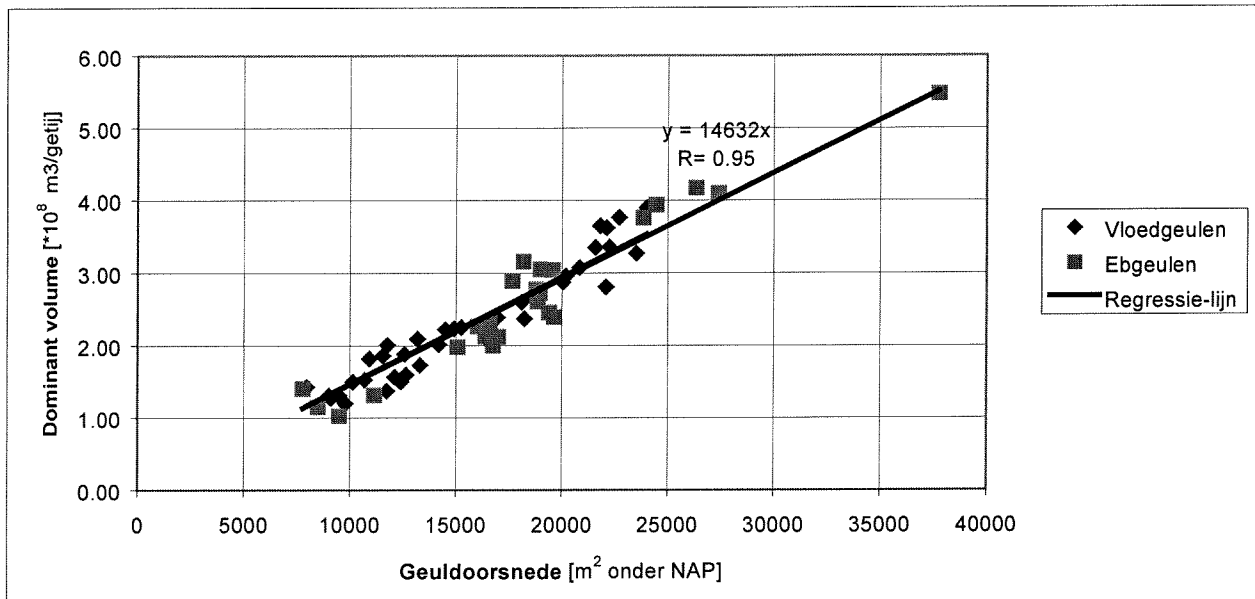
Volgens Svašek (1994) is het dominant volume een betere getijkarakteristiek voor een empirische relatie dan het getijvolume. Door verschillende geuldoorsneden en afvoeren te analyseren van de Westerschelde van 1932 tot 1991, is door Svašek (1994) de volgende relatie gevonden tussen dominant volume en geuldoorsnede:

$$DV = 14632 * A \quad (3.17)$$

met:

DV = dominant getijvolume [$\text{m}^3/\text{getijfase}$]

In figuur 3.1 zijn de geanalyseerde doorsneden weergegeven met bijbehorend dominant volume. Deze relatie is gelijk voor vloedgeulen en ebgeulen en alleen geldig voor geulen met een eb- of vloeddominantie over de gehele doorsnede, dus geulen zonder interne dominantie.



Figuur 3.1: Relatie tussen dominant volume en geuldoorsnede volgens Svašek (1994)

In 1994 is door Termaat onderzoek gedaan naar de relatie tussen dominant volume en stroomvoerend vermogen voor geulen in de Westerschelde. Stroomvoerend vermogen (W [$\text{m}^{8/3}/\text{s}$]) is gedefinieerd als een maat voor het vermogen van een geul om een bepaald volume water per tijdseenheid door te laten. Het is dus een morfologische parameter waarbij de vorm van het profiel tot uiting komt (via de ruwheid) in tegenstelling tot bij het doorstroomoppervlak. Hoe groter de ruwheid (bijvoorbeeld bij een brede, ondiepe geul), hoe kleiner het stroomvoerend vermogen. De vorm van het dwarsprofiel is op deze manier meegenomen.

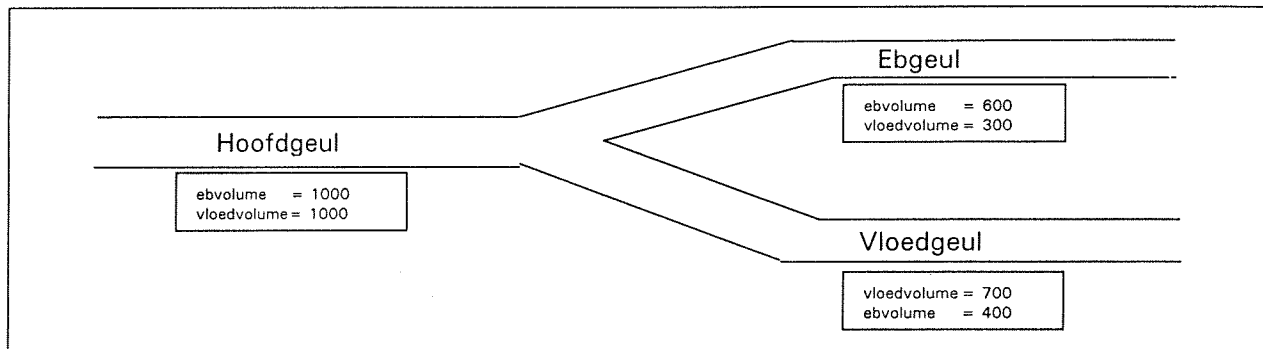
In Gerritsen et al (1990) werd ook verondersteld dat de vorm van het doorstroomoppervlak van invloed is op de stabiliteitsrelatie (zie paragraaf 3.3.2), maar er zijn geen betere resultaten gevonden met het stroomvoerend vermogen als morfologische parameter.

3.4.2 Voordeel dominant volume boven getijvolume

Door met dominant volume te werken in plaats van met getijvolume wordt onderscheid gemaakt tussen vloedgeulen en ebgeulen en wordt externe dominantie meegenomen.

Dat dit dominant volume een goede parameter is voor meer-geulensystemen, blijkt uit onderstaand theoretisch voorbeeld van een geul die overgaat in een tweegeulensysteem. In figuur 3.2 is een

ebgeul te onderscheiden en een vloedgeul. In de enkele geul wordt zowel tijdens eb als vloed een maximaal debiet afgevoerd van $1000 \text{ m}^3/\text{s}$. De geuldoorsnede wordt dus bepaald door dit debiet van 1000.



Figuur 3.2: Dominantie in twee-geulensysteem

Nu wordt in de ebdominante geul 60% van het ebdebiet afgevoerd en in de vloeddominante geul 70% van het vloeddebiet. Volgens het concept dat dominant volume de geuldoorsnede bepaalt, wordt de grootte van de ebgeul bepaald door een debiet van 600 en de grootte van de vloedgeul door een debiet van 700. De doorsnede van de ebgeul en de vloedgeul samen is dus groter dan de doorsnede van de enkele geul.

Stel dat de vloedgeul minder vloeddominant wordt en dat deze nog maar 60% van het vloeddebiet verwerkt, dan wordt de doorsnede van de vloedgeul kleiner terwijl de watertransportcapaciteit van het geulstelsel niet afneemt. De ebgeul blijft dezelfde afmetingen houden. Het getijvolume door het systeem verandert niet, terwijl wel sedimentatie zal optreden in de vloedgeul.

Dit theoretische voorbeeld is in de Westerschelde waargenomen. Van Kleef (1994) constateerde dat de externe dominantie van het Middelgat en het Gat van Ossensisse veranderde met als gevolg een sterke aanzanding in het Middelgat, maar dat het totale getijvolume niet veranderde. Vanuit de stabiliteitsbeschouwing met getijvolume en geuldoorsnede is sprake van evenwicht, terwijl dit in tegenspraak is met de opgetreden sedimentatie. Een stabiliteitsrelatie tussen dominant getijvolume en doorsnede verklaart de waargenomen sedimentatie wel.

Veranderingen in de efficiëntie van transport van water hebben dus invloed op de morfologie (en vice versa). Deze veranderingen worden niet weergegeven met het getijvolume als stroomparameter in een evenwichtsrelatie, maar wel met het dominant volume.

3.5 Mathematisch-fysische evenwichtsrelaties

In het morfologische model wordt een lineaire relatie gebruikt tussen het dominant volume en de diepte. Een lineaire relatie tussen een stroomparameter en de diepte die door de oorsprong gaat, wordt echter niet altijd bevestigd door theoretische verklaringen. In deze paragraaf worden enkele theoretische evenwichtsrelaties tussen stroomparameters en morfologische parameters besproken. Gekeken wordt in hoeverre deze relaties lineair zijn.

In paragraaf 3.5.1 wordt op basis van eenparige stroming een relatie afgeleid en in paragraaf 3.5.2 gebeurt dit op basis van evenwicht in de sedimentconcentratie. Paragraaf 3.5.3 bespreekt een relatie, waarbij de getijstroomsnelheid constant is.

3.5.1 Op basis van eenparige stroming

Als sprake is van een eendimensionale situatie met eenparige stroming, kunnen de volgende formules worden opgesteld:

$$u = C\sqrt{h \cdot i} \quad (3.18)$$

$$Q = A \cdot u = B \cdot q = B \cdot h \cdot u \quad (3.19)$$

met:

h = waterdiepte [m]
 i = verhang [-]
 q = debiet per meter breedte [m²/s]
 B = breedte [m]

Samenvoegen van vergelijking (3.18) en (3.19) levert:

$$Q = B * C * i^{1/2} * h^{3/2} \quad (3.20)$$

De Chézy-waarde wordt uitgedrukt met behulp van een constante Manning-waarde:

$$C = \frac{h^{1/6}}{n} \quad (3.21)$$

met:

n = coëfficiënt van Manning [s/m^{1/3}]

De volgende relatie wordt dan verkregen:

$$Q = B * n^{-1} * i^{1/2} * h^{5/3} \quad (3.22)$$

Als voor een tweedimensionaal geval ook wordt uitgegaan van eenparige stroming, wordt op dezelfde manier de volgende vergelijking verkregen:

$$q = C * i^{1/2} * h^{3/2} \quad (3.23)$$

Als verondersteld wordt dat de Chézy-coëfficiënt en het verhang constant zijn, dan heeft de relatie tussen q en h dus een macht 3/2. Bij een constante waarde van het verhang en de coëfficiënt van Manning wordt een macht van 5/3 verkregen.

Vergelijking (3.22) en (3.23) nemen het effect van de vorm van een geul mee via de ruwheidscoëfficiënt. Een diepe, smalle geul heeft dan immers een groter stroomvoerend vermogen en een grotere doorsnede dan een brede, ondiepe geul. Een dergelijke relatie brengt echter niet de invloed van traagheid in rekening. Voor getijden in ondiepere wateren is, naast de aandrijving en de wrijving, de traagheid van groot belang (Battjes 1997). Dit geldt dus ook voor de Westerschelde.

3.5.2 Op basis van evenwichtssedimentconcentratie

Di Silvio stelt in 1989 dat een morfologisch systeem in een dynamische evenwichtstoestand verkeert, indien sprake is van een ruimtelijk constante sedimentconcentratie.

Het morfologisch systeem streeft naar het behouden van deze evenwichtskoncentratie. Als ergens een sedimentconcentratie heerst die lager is dan de evenwichtskoncentratie, dan zal erosie optreden. Als ergens de sedimentconcentratie hoger is dan de evenwichtswaarde, dan vindt sedimentatie plaats.

Afhankelijk van of met bodemtransport, met suspensietransport of met allebei wordt gerekend, worden verschillende relaties verkregen, die de evenwichtstoestand beschrijven.

Gerritsen (1999) heeft dit concept verder uitgewerkt voor de transportformule van Bagnold en Engelund-Hansen.

De formule van Bagnold is in deze uitwerking alleen geldig voor zwevend transport en de formule van Engelund-Hansen voor zowel zwevend transport als bodemtransport.

Als aangenomen wordt dat de dichtheden van water en zand constant zijn, worden de volgende vereenvoudigde vergelijkingen verkregen.

Bagnold:

$$\frac{v^3}{C^2 * h * w} = K_1 \quad (3.24)$$

Engelund-Hansen:

$$\frac{v^4}{C^3 * h * g^{0,5} * d_{50}} = K_2 \quad (3.25)$$

waarin:

v =	getijgemiddelde snelheid [m/s]
w =	valsnelheid sediment [m/s]
d ₅₀ =	diameter waarbij 50% van het gewicht fijner is dan die maat [m]
K ₁ , K ₂ =	constanten

Met een constante valsnelheid en een constante waarde voor de Chézy-coëfficiënt wordt vergelijking (3.24) respectievelijk (3.25):

$$q = h^{4/3} \approx h^{1,33} \quad (3.26)$$

en

$$q = h^{5/4} = h^{1,25} \quad (3.27)$$

Als aangenomen wordt dat de valsnelheid constant is en dat $C = h^{1/6}/n$ (met een constante Manningscoëfficiënt (n [s/m^{1/3}]), wordt vergelijking (3.25):

$$q = h^{13/9} \approx h^{1,44} \quad (3.28)$$

Vergelijking (3.26) krijgt dan de volgende vorm:

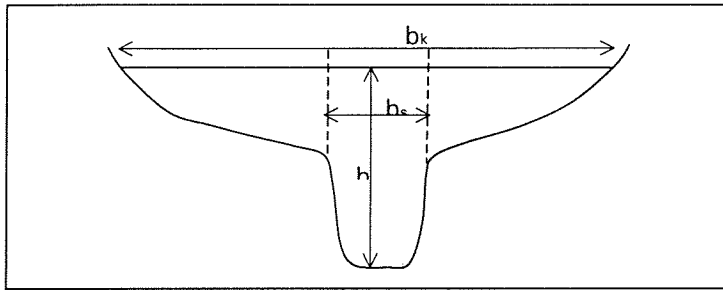
$$q = h^{11/8} \approx h^{1,63} \quad (3.29)$$

De afgeleide relatie op basis van evenwichtssedimentconcentratie geeft in alle gevallen dus een relatie tussen q en h met een macht groter dan 1. Dit komt niet overeen met de lineaire relatie tussen een getijkarakteristiek en de diepte, zoals gebruikt in het morfologisch model van de Westerschelde.

3.5.3 Op basis van constante getijsnelheid

Dronkers (2001) beredeneert dat een karakteristieke waarde voor de getijstroming bestaat, waarbij plaatopbouw en plaatafbraak met elkaar in evenwicht zijn. Als in een getijdebekken ten gevolge van veranderende externe omstandigheden de getijstromingssnelheid groter of kleiner wordt dan de karakteristieke waarde, dan treden corrigerende mechanismen op om de getijstromingssnelheid terug te brengen naar deze karakteristieke waarde. Dit kan door een interne herverdeling van sediment in de dwarsdoorsnede zijn of sedimentimport en -export in longitudinale richting.

Een constante karakteristieke waarde van de stroomsnelheid hangt dus samen met een relatie tussen sedimenttransport en geulparameters op hoog- en laagwater. Dit wordt hieronder uitgewerkt voor een uniform bekken met een lengte veel kleiner dan de getijgolf lengte en een dwarsdoorsnede volgens figuur 3.3.



Figuur 3.3: Geuldoorsnede met geulparameters

De relatie tussen sedimenttransport en geulparameters op hoog- en laagwater, die geldig is voor lange, wrijvingsgedomineerde bekkens, luidt als volgt (Stive 1999):

$$\delta(S) = \delta \left[(h^+)^2 \frac{b_s^+}{b_k^+} - (h^-)^2 \frac{b_s^-}{b_k^-} \right] \quad (3.30)$$

waarin:

- δ = verandering
- S = getijgemiddelde sedimenttransport [m^3/s]
- h^+ = waterdiepte bij hoog water [m]
- h^- = waterdiepte bij laag water [m]
- b_s^+ = stroomvoerende breedte bij hoog water [m]
- b_s^- = stroomvoerende breedte bij laag water [m]
- b_k^+ = kombergende breedte bij hoog water [m]
- b_k^- = kombergende breedte bij laag water [m]

Als de maximale getijstroomsnelheid groter is dan een bepaalde kritische waarde, dan treedt een verandering van de dwarsdoorsnede op, waarbij de geul verdiept en de intergetijdengebieden verondiepen. Daardoor neemt de maximale getijstroomsnelheid af.

Een toename van de geuldiepte en een afname van de stroomvoerende breedte op hoog water betekent dat de tweede rechterterm van vergelijking (3.30) meer toeneemt dan de eerste rechterterm. Dit betekent dat $\delta[S] < 0$, dus export van sediment. Het geulprofiel verruimt zich totdat de karakteristieke maximale getijstroomsnelheid weer wordt bereikt.

Het omgekeerde gebeurt als de maximale getijstroomsnelheid kleiner is dan een bepaalde kritische waarde. Er treedt plaaterosie op en aanzanding in de geul op, totdat de getijstroomsnelheid de karakteristieke waarde bereikt.

Voor de maximale snelheid in het bekken heeft Dronkers (2001) het volgende afgeleid:

$$u_{\max} \approx \frac{\pi * P}{T * h * b_s} \quad (3.31)$$

met:

- u_{\max} = maximale getijsnelheid [m/s]
- b_s = stroomvoerende breedte [m]

Een constante maximale getijsnelheid treedt op bij een constante verhouding tussen getijprisma en geuldoorsnede, dus bij een lineair verband tussen getijprisma en geuldoorsnede.

Het is echter beter om van een constante gemiddelde stroomsnelheid uit te gaan dan van een maximale stroomsnelheid; in de Westerschelde is de maximale snelheid bij vloed groter dan bij eb, terwijl in een lineair verband tussen een stroomparameter en een morfologische parameter nauwelijks verschil bestaat voor eb- en vloedgeulen, zie bijvoorbeeld figuur 3.1. De gemiddelde stroomsnelheid kent minder verschil voor eb- en vloedgeulen en komt dus beter overeen met gemeten resultaten. Ook voor het bepalen van andere bekkenkarakteristieken, zoals de

getijexcursie (de lengte die waterpakketjes bij vloed of eb afleggen) kan beter met de gemiddelde getijsnelheid worden gerekend. Een aanzienlijke fout in de waarde van de maximale getijsnelheid treedt immers eerder op dan een aanzienlijke fout in de getijsnelheden gemiddeld over de getijperiode, zowel in metingen als numerieke modellen. Als aangenomen wordt dat bij de bepaling van de maximale stroomsnelheid uitgegaan is van een sinusvormig snelheidsprofiel, dan kan de getijgemiddelde snelheid als volgt worden gedefinieerd:

$$u_{gem} \approx \frac{2P}{T * h * b_s} \quad (3.32)$$

Als een karakteristieke waarde van de getijstroomsnelheid dus bepalend is voor evenwicht in een bekken, dan bestaat een lineaire relatie tussen een stroomparameter en een morfologische parameter.

3.6 Empirische relatie in het morfologische model

Uit paragraaf 3.5 blijkt dat veranderingen in de dominantie van een systeem invloed hebben op de morfologische ontwikkeling. Daarom is in het morfologische model van de Westerschelde een evenwichtsrelatie gebruikt op basis van het dominant volume. Paragraaf 3.6.1 beschrijft de relatie en de afleiding ervan. In paragraaf 3.6.2 komen enkele consequenties van het tweedimensionaal toepassen van de evenwichtsrelatie aan de orde.

3.6.1 Beschrijving relatie

Om een empirische relatie te verkrijgen voor het tweedimensionale morfologische model, is het concept dominant volume gebruikt. De snelheden in meer dan 50.000 punten in de Westerschelde zijn berekend met behulp van het numerieke waterbewegingsmodel SCALWEST. Voor elk punt is daarna het dominant volume per eenheid van breedte [$m^3/s/m$] uitgerekend, zodat deze tegen de bijbehorende diepte kan worden uitgezet.

Een lineaire relatie tussen het dominant volume en de diepte is gevonden door voor punten dieper dan 5 meter om de 10 cm een gemiddelde waarde voor het dominant volume te berekenen. Door deze gemiddelde waarden is vervolgens een lijn getrokken. Zo wegen de punten in de diepere gedeeltes net zo zwaar mee als de punten op veelvoorkomende dieptes. De relatie is identiek voor vloed- en ebgeulen:

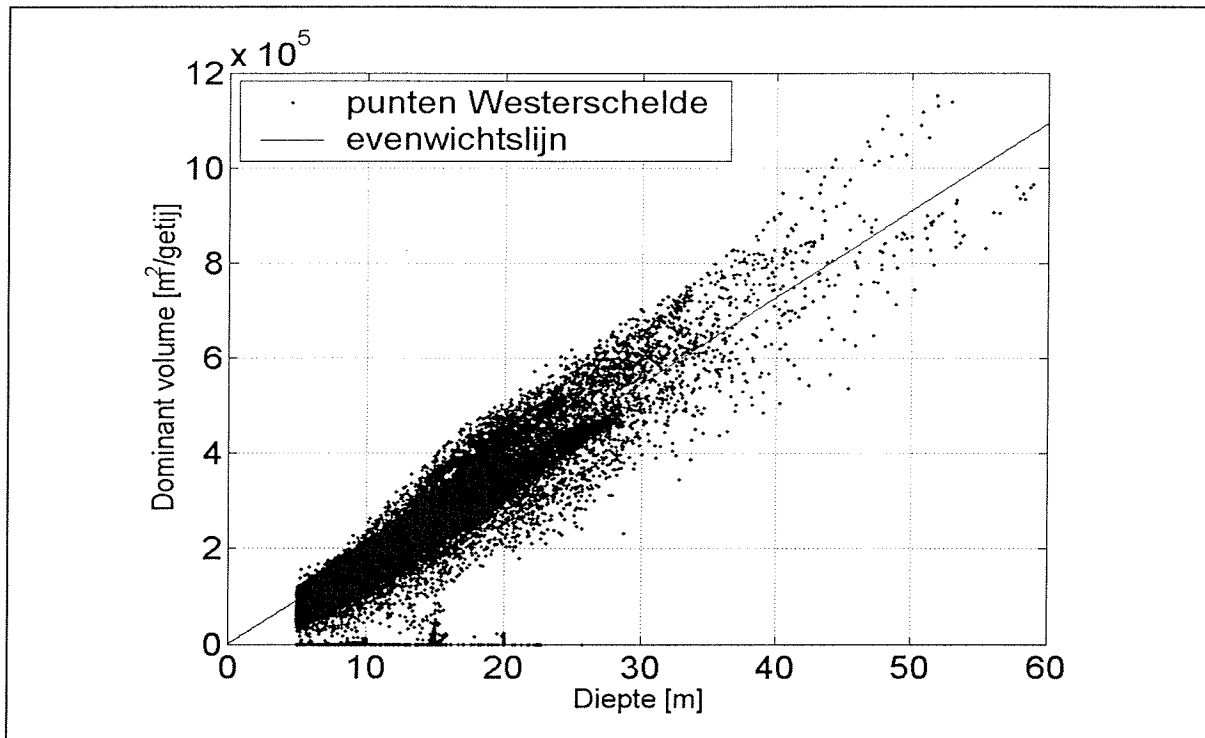
$$dv = 18216 * D \quad (3.33)$$

met:

dv = dominant volume per meter breedte [$m^2/getij$]

D = diepte [m]

De puntenwolk en de bijbehorende lineaire relatie zijn weergegeven in figuur 3.4 en in bijlage 3.1.



Figuur 3.4: Puntenwolk en evenwichtsrelatie voor punten dieper dan 5 meter

De evenwichtsrelatie voor punten ondieper dan 5 meter – NAP is niet lineair. Punten die in gebieden liggen waar nauwelijks stroming plaatsvindt, maar die wel een redelijke diepte hebben, zoals in havens, hebben een duidelijke afwijkende ligging van de rest van de punten in de wolk. Als deze worden verwijderd, heeft vergelijking (3.33) een correlatiecoëfficiënt van 0,953.

De constante 18216 in vergelijking (3.33) ligt hoger dan de constante (14632, zie vergelijking 3.17) zoals gevonden door Svašek (1994). Een oorzaak hiervoor is dat het getij waarbij de SCALWEST berekening gedaan is geen gemiddeld getij is, maar een getij met een coëfficiënt van 1,08. Deze getijcoëfficiënt is de optredende getijslag gedeeld door de gemiddelde getijslag. Een andere reden is dat in vergelijking (3.33) ook ebgedomineerde delen in een (overall) vloedgedomineerde geul en vice versa worden meegeteld bij het totale dominant volume door die geuldoorsnede. Interne dominantie wordt dus meegenomen.

De exacte waarde van de coëfficiënt 18216 [m/getij] in vergelijking (3.33) is overigens niet van wezenlijk belang voor het morfologische model van de Westerschelde, omdat daarin wordt gewerkt met de aanname dat de verhouding tussen dominant volume en diepte constant blijft per roosterpunt.

3.6.2 Gevolgen tweedimensionaal toepassen

Het tweedimensionaal toepassen van de evenwichtsrelatie heeft enkele consequenties. Deze worden hieronder genoemd:

- Interne dominantie wordt meegenomen. Bij de relatie voor de gehele geuldoorsnede was het niet mogelijk onderscheid te maken tussen eb- en vloeddominantie binnen een geul. Elke geul werd immers of geheel als vloeddominant beschouwd of geheel als ebdominant. Nu kunnen ebdominante delen in een overwegend vloeddominante geul worden meegenomen en vice versa. Als de evenwichtsrelatie overigens daadwerkelijk per roosterpunt van een tweedimensionaal waterbewegingsmodel wordt toegepast, wordt interne dominantie ook meegenomen als een relatie tussen getijvolume en diepte wordt gebruikt.
- In het tweedimensionale geval zou het effect van migrerende geulen kunnen worden meegenomen, mits de migratie niet wordt veroorzaakt door driedimensionale effecten als

spiraalstroming. De vorming en migratie van kortsluitgeulen kan alleen worden meegenomen, als het model ook goede resultaten geeft in de ondiepere gebieden. Dat is tot dusver niet het geval (Svašek 1999).

- Een eendimensionale relatie tussen dominant volume (DV) en geuldoorsnede (D) die door de oorsprong gaat, betekent dat in de dominante getijfase een over de doorsnede gemiddelde constante snelheid bestaat.

In het tweedimensionale geval betekent een lineaire relatie tussen dominant volume (dv) en diepte (d) door de oorsprong dat de dieptegemiddelde stroomsnelheid in de dominante fase constant is voor alle punten in één doorsnede. Het toepassen van één evenwichtsrelatie tussen het dominant volume en de diepte door de oorsprong voor alle punten in de Westerschelde is dus aanvechtbaar. Immers, in één doorsnede heeft een punt aan de rand dan dezelfde stroomsnelheid als een punt in het midden van de doorsnede. In het morfologisch model wordt dit echter niet gedaan. In het model heeft elk roosterpunt namelijk een eigen constante verhouding tussen het dominant volume en de diepte (zie paragraaf 4.2.1). Daarom geldt in het model niet dat een constante dieptegemiddelde snelheid optreedt in een doorsnede.

3.7 Samenvatting

Evenwichtsrelaties voor zeegaten in de gehele wereld zijn door verschillende onderzoekers afgeleid. Ook voor de geulen in de Westerschelde bestaan verschillende empirische evenwichtsrelaties.

Omdat veranderingen in de efficiëntie van watertransport, en dus in de dominantie, invloed hebben op de morfologie, is het dominant volume een betere stroomparameter in een evenwichtsrelatie dan het getijvolume. In het morfologische model van de Westerschelde is dan ook een evenwichtsrelatie gebruikt tussen dominant volume en diepte. Tweedimensionaal toepassen van deze evenwichtsrelatie betekent dat interne dominantie wordt meegenomen.

Theoretisch afgeleide evenwichtsrelaties op basis van eenparige stroming en evenwichtssedimentconcentratie voor vereenvoudigde situaties leveren geen lineaire relatie tussen het debiet en de diepte, maar een relatie met een macht groter dan één. Als aangenomen wordt dat de getijstroomsnelheid constant is in een evenwichtssituatie, wordt wel een lineaire relatie verkregen. Een dergelijke lineaire relatie wordt bevestigd door metingen en tweedimensionale hydraulische berekeningen.

4. Het morfologische model van de Westerschelde

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt het tweedimensionale, semi-empirische morfologische model van de Westerschelde nader beschreven. De onzekere resultaten van dit model zijn namelijk de aanleiding voor dit afstudeeronderzoek.

Allereerst wordt in paragraaf 4.2 het modelprincipe beschreven. Paragraaf 4.3 geeft de werking van de waterbewegingsmodule weer. In paragraaf 4.4 worden de gevonden resultaten door Svašek (2000) besproken en tot slot wordt de waarde van het model beschreven, zoals bekend uit het onderzoek van Svašek (2000).

4.2 Modelprincipe

Het principe van het morfologische model van de Westerschelde is de koppeling van bodemdiepte aan de waterbeweging via een empirische relatie tussen dominant volume en diepte. Dit gebeurt per roosterpunt van een tweedimensionaal waterbewegingsmodel. In paragraaf 4.2.1 worden de uitgangspunten besproken, waarop het modelprincipe is gebaseerd. Paragraaf 4.2.2 geeft weer hoe het modelprincipe wordt toegepast per iteratie.

4.2.1 Uitgangspunten

Bij het toepassen van de evenwichtsrelatie wordt ervan uitgegaan dat het systeem in de referentiesituatie in evenwicht is en dat de verhouding tussen diepte en dominant volume constant blijft per roosterpunt gedurende de iteratiestappen.

Basisevenwichtssituatie

In elk punt van een bepaald rooster wordt de waterbeweging berekend, waaruit het dominant volume wordt bepaald. Dit rooster is opgenomen in bijlage 4.1. Zo is dus van een bepaalde basissituatie de verhouding tussen het dominant volume en de waterdiepte bekend. Omdat er van uit wordt gegaan dat het estuarium in de basissituatie in evenwicht is, kunnen alleen ingrepen worden doorgerekend.

Verhouding diepte-dominant volume

In paragraaf 3.6 is de evenwichtsrelatie, zoals toegepast in het morfologische model, beschreven. Deze kan ook worden weergegeven in de volgende vorm:

$$D = \frac{1}{18216} * dv = 5,490 * 10^{-5} * dv \quad (4.1)$$

Met een constante verhouding tussen de basisdiepte en het dominant volume in de basissituatie wordt deze relatie als volgt:

$$D_{nieuw} = \frac{D_{basis}}{dv_{basis}} * dv_{nieuw} \quad (4.2)$$

waarin:

D_{nieuw} =	nieuwe bodemdiepte [m]
D_{basis} =	bodemdiepte in de basissituatie [m]
dv_{basis} =	dominant volume in de basissituatie [m ² /getij]
dv_{nieuw} =	dominant volume na de ingreep [m ² /getij]

Elk roosterpunt heeft dus een andere constante coëfficiënt in vergelijking (4.1).

4.2.2 Iteratieproces

Omdat morfologische veranderingen met hydraulische veranderingen gepaard gaan, moet iteratief gerekend worden. Als immers een ingreep in de bodemdiepte wordt gedaan, zal tevens een verandering in het dominant volume per roosterpunt plaatsvinden, die de bodemligging weer beïnvloedt. In werkelijkheid is de bodemverandering door waterbewegingsveranderingen momentaan.

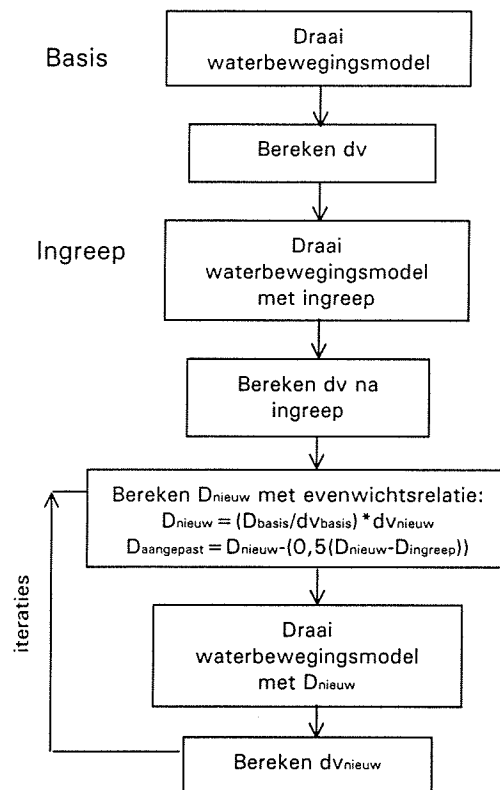
Om de invloed van een ingreep te onderzoeken wordt opnieuw de waterbeweging en het dominant volume berekend. Een verandering in het dominant volume heeft weer een verandering in de bodemdiepte tot gevolg. Deze bodemverandering wordt bepaald met behulp van vergelijking (4.2). Met de nieuwe bodem wordt het waterbewegingsmodel opnieuw gedraaid, waarna het dominant volume weer wordt berekend. Dit gebeurt een aantal maal.

Per iteratiestap wordt de bodem niet geheel aangepast aan de nieuwe bodem, maar slechts met 50%. De berekening verloopt op deze manier geleidelijker. Voor de bodemaanpassing na de ingreep betekent dit het volgende:

$$D_{aangepast} = D_{nieuw} - 0,5 * (D_{nieuw} - D_{ingreep}) \quad (4.3)$$

Voor de volgende iteratiestappen moet $D_{ingreep}$ vervangen worden door de diepte van de vorige iteratie.

In figuur 4.1 is het modelprincipe schematisch weergegeven.



Figuur 4.1: Schema modelprincipe

4.3 Waterbewegingsmodule

De waterbeweging wordt berekend met het numerieke model van de Westerschelde SCALWEST. Om dit model te gebruiken voor het morfologische model is een aantal aanpassingen gedaan. SCALWEST wordt beschreven in paragraaf 4.3.1 en de benodigde aanpassingen voor toepassing in het morfologische model in 4.3.2.

4.3.1 SCALWEST

Het SCALWEST-model is een numeriek waterbewegingsmodel van de Westerschelde dat gebaseerd is op het WAQUA-systeem.

SCALWEST rekt met de gediscrètiseerde ondiepwatervergelijkingen. Deze vergelijkingen beschrijven de samenhang van waterstanden en snelheden factoren die de waterbeweging beïnvloeden. De belangrijkste factoren in de Westerschelde zijn de waterdiepte, de zwaartekracht, de bodemwrijving, de Coriolis-kracht en het getij. De invloed van het getij wordt in de waterbeweging verwerkt via de randvoorwaarden. De ondiepwatervergelijkingen kunnen geschreven worden in de volgende vorm:

Continuïteitsvergelijking:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \frac{\partial u}{\partial x} + h \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (4.4)$$

Bewegingsvergelijking in de x-richting:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\tau_{wx}}{\rho h} - f_c v + f_w u = 0 \quad (4.5)$$

Bewegingsvergelijking in de y-richting:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{\tau_{wy}}{\rho h} + f_c u + f_w v = 0 \quad (4.6)$$

waarin:

- h = waterdiepte [m]
- u = verticaal geïntegreerde snelheid in x-richting (m/s)
- v = verticaal geïntegreerde snelheid in y-richting (m/s)
- g = zwaartekrachtsversnelling [m/s²]
- z = bodemniveau [m]
- τ_{wx} = windschuifspanning in x-richting [N/m²]
- τ_{wy} = windschuifspanning in y-richting [N/m²]
- f_c = Coriolis coëfficiënt [s⁻¹]
- f_w = bodemwrijvingsfactor [s⁻¹]

Het stelsel algebraïsche ondiepwatervergelijkingen wordt gediscrètiseerd tot een stelsel numerieke vergelijkingen om in SCALWEST te kunnen worden gebruikt. In de ruimtelijke discretisatie wordt bepaald in welke punten de snelheden en waterstanden bekend zijn en berekend moeten worden.

Bij de mathematische discretisatie worden de ondiepwatervergelijkingen herschreven tot vergelijkingen die de relatie aangeven tussen waterstanden en snelheden in de roosterpunten. In SCALWEST wordt dit gedaan met de eindige-differentie-methode.

Door een gebied te schematiseren tot een rekenrooster, kunnen waterstanden en snelheden in verschillende punten worden berekend. Het rekenrooster van SCALWEST strekt zich uit van het mondingsgebied van de Westerschelde tot en met de Zeeschelde in België. Het rooster omvat ongeveer 75.000 rekenpunten en is kromlijinig. De roosterafstand varieert in de breedterichting van 10 tot 40 meter en in lengterichting van 40 tot 700 meter. Het gebruikte rooster is opgenomen in bijlage 4.2.

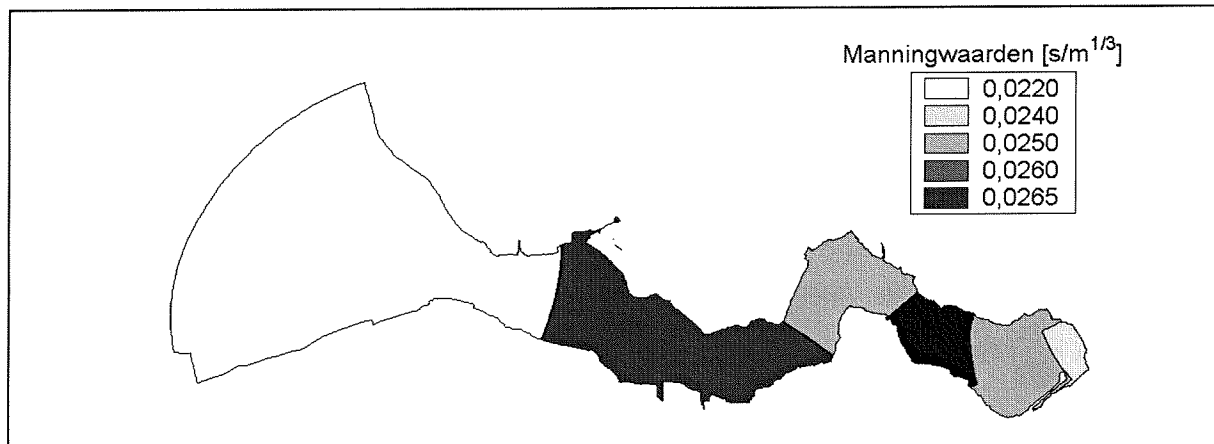
Het SCALWEST-model is afgeregeld op de waterstanden en debieten in bekende waterstandsstations tijdens dood- en springtij (Jansen 1997). Daarbij is een turbulente viscositeit aangehouden van 1 m²/s. De bodemruwheid is onder andere als regelparameter gebruikt. In de ondiepwatervergelijkingen wordt de bodemwrijving gerepresenteerd door de bodemwrijvingsfactor f_w (zie vergelijking (4.5) en (4.6)). Bij langzame stroomveranderingen is het volgende verband geldig tussen de bodemwrijvingsfactor en de Chézy-waarde:

$$f_w = \frac{g * u}{C^2 * h} \quad (4.7)$$

waarin volgens vergelijking (3.21):

$$C = \frac{h^{1/6}}{n}$$

In het modelgebied zijn acht gebieden onderscheiden met een verschillende Manningwaarde. In figuur 4.2 zijn deze waarden weergegeven voor de vijf gebieden die in de Westerschelde liggen.



Figuur 4.2: Gebieden met verschillende ruwheid

4.3.2 Toepassing morfologisch model

Om de resultaten van het waterbewegingsmodel te gebruiken voor het morfologische model zijn twee aanpassingen gedaan. Een cyclisch getij is opgelegd en uit de snelheden en waterstanden is het dominante volume berekend.

Voor een juiste bepaling van de dominante volumes is het noodzakelijk dat netto evenveel water het estuarium instroomt als er uitstroomt. Daarom is een cyclisch getij afgeleid. Het model wordt aan de zee kant aangedreven door de waterstanden van dit cyclische getij en op de Zeeschelde door een debiet.

Voor de afleiding van het cyclische getij is een getij gebruikt dat overeenkomt met het morfologisch getij en waarop de weersomstandigheden geen grote invloed hebben. Het morfologisch getij is het getij dat residuele zandtransporten geeft die vergelijkbaar zijn met de berekende residuele transporten over een volledige doodtij-springtij cyclus van een maand. Het morfologisch getij heeft meestal een getijslag tussen gemiddeld getij en springtij in. Volgens Groenewoud (1997) heeft het morfologisch getij in de Westerschelde een getijcoëfficiënt van 1,06. Dit betekent dat de verhouding tussen de getijslag van het morfologische getij en het gemiddelde getij 1,06 is. De getijcoëfficiënt van het gebruikte getij (van 17 oktober 1996) is 1,08.

Om het dominant volume te bepalen wordt voor elk roosterpunt eerst de dominante richting bepaald. In de sterk gekromde geulen van de Westerschelde is namelijk geen permanente hoofdstroomrichting aan te wijzen; soms is de hoofdstroom oost-west gericht en soms noord-zuid. De dominante richting is dus of oost-west gericht of noord-zuid, afhankelijk van de richting van de grootste waarde van de gesommeerde stroomsnelheden.

Vervolgens worden per roosterpunt het specifieke debiet bepaald. Dit is de berekende snelheid vermenigvuldigd met de waterdiepte en de tijdstap waarmee gegevens worden weggeschreven. De specifieke debieten worden gesommeerd over de gehele getijperiode, zodat de eb- en vloedvolumes worden verkregen. Dan wordt bepaald of het betreffende punt eb- of vloeddominant is door de eb- en vloedvolumes met elkaar te vergelijken. De grootste van de twee wordt het dominant volume.

4.4 Resultaten Svašek 2000

De belangrijkste resultaten die verkregen zijn uit het onderzoek gedaan door Svašek (2000), worden hieronder besproken. Paragraaf 4.4.1 licht de uitgevoerde simulaties toe en paragraaf 4.4.2 bespreekt de uitkomsten daarvan.

4.4.1 Uitgevoerde simulaties

Met het morfologisch model van de Westerschelde zijn enkele simulaties gedaan. Tabel 4.1 geeft hier een overzicht van.

Tabel 4.1: Overzicht simulaties Svašek 2000

Simulatie	Omschrijving	Platen	Toelichting
1	Verruiming Pas van Terneuzen	vaste diepte, ruw	10Mm ³ verwijderd
2	Stort Pas van Terneuzen	vaste diepte, ruw	10Mm ³ gestort
3	Verdieping gehele vaargeul	vaste diepte, ruw	Vaargeul op 17,5 –NAP
4	Verruiming Pas van Terneuzen	variërende diepte, glad	10Mm ³ verwijderd
5	Ontwikkeling naar evenwichtslijn	variërende diepte, glad	dv/D-verhouding voor alle punten gelijk

Omdat de berekeningen veel rekencapaciteit kosten, zijn alle ingrepen iteratief doorgerekend tot maar tien iteratiestappen. Daarbij wordt de bodem per iteratiestap aangepast aan de nieuw berekende bodem met 50% volgens vergelijking (4.3). Alleen bij simulatie 5 is de bodem direct aangepast aan de berekende diepte.

In de eerste drie simulaties is de bodem boven 2 m – NAP niet aangepast, omdat de snelheden in het intergetijdengebied, en dus de dominante volumes, niet goed worden weergegeven door het waterbewegingsmodel (Svašek 1999).

Een lagere waarde voor de ruwheid op de platen dan in de geulen geeft de waterbeweging op de platen beter weer. Simulaties 4 en 5 zijn gedaan met een lagere waarde voor de ruwheid op de platen. In dit geval wordt de bodemdiepte van de platen aangepast.

4.4.2 Uitkomsten simulaties

In hoofdstuk 2 werd reeds gesteld dat de uitkomsten fysisch verklaarbaar zijn en kwalitatief goed lijken, maar kwantitatief onzeker. Dit wordt hieronder uitgelegd.

Kwalitatief

De resultaten stemmen kwalitatief overeen met verwachte fysische processen in de Westerschelde.

Na een verdieping van de Pas van Terneuzen (simulatie 1) kan deze meer debiet trekken en verdiept verder. Geulen in het verlengde ervan schuren ook uit. De Everingen en het Vaarwater langs de Hoofdplaat, die evenwijdig liggen aan de Pas van Terneuzen, zanden aan na de verdieping van de Pas van Terneuzen.

Na een stort in de Pas van Terneuzen (simulatie 2) gebeurt het omgekeerde: de Pas van Terneuzen zelf verondiept verder en de Everingen schuurt uit. De bodemveranderingen na één iteratie en tien iteraties bij deze simulatie zijn weergegeven in bijlage 4.2.

Na een verdieping van de gehele vaargeul volgens simulatie 3 verdiept deze zich verder. Alleen de drempels in de geul worden snel ondieper.

Een verruiming van de Pas van Terneuzen met gladdere, meebewegende platen volgens simulatie 4 geeft hetzelfde beeld als een verruiming met platen die niet meeveranderen: de Pas van Terneuzen en de Overloop van Hansweert worden dieper en het Middelgat en de Everingen zanden aan. De toename van getijvolume als gevolg van de verruiming zijn minder groot dan bij simulatie 1.

De bodemontwikkeling op basis van de evenwichtslijn (simulatie 5) geeft na tien iteraties een diepere Pas van Terneuzen, Everingen en Zuidergat weer. Het Middelgat en de drempels van Borssele en Hansweert zanden aan. Dit laatste treedt nu ook op in de Westerschelde.

De stapgrootte van de bodemaanpassing heeft geen invloed op de uiteindelijke bodemligging, maar alleen op de snelheid van deze ontwikkeling.

Kwantitatief

De uitkomsten van de simulaties na tien iteraties zijn kwantitatief onzeker. Bij geen enkele simulatie wordt na tien iteraties een evenwichtsbodemligging bereikt. De snelheid waarmee bodemveranderingen plaatsvinden is niet bekend. Of de sedimentbeschikbaarheid zodanig is dat alle veranderingen daadwerkelijk kunnen optreden, is niet bekend. De simulatie met meebewegende, gladdere platen geeft na tien iteraties een grillig patroon weer in de bodem en aan de geulranden komt plaatselijk zeer veel erosie voor. Kleine veranderingen in de geulen hebben te veel invloed op de intergetijdengebieden. Deze kunnen dus beter niet worden meegenomen in de berekeningen.

4.5 Waarde morfologisch model

Het morfologisch model van de Westerschelde geeft resultaten die fysisch verklaarbaar zijn, maar kwantitatief onzeker. Daarom is de waarde van het morfologisch model van de Westerschelde nog niet duidelijk. In de volgende hoofdstukken wordt onderzoek gedaan naar verklaringen van de resultaten. Enkele beperkingen en mogelijkheden van het model zijn al wel te noemen naar aanleiding van het onderzoek van Svašek in 2000. In paragraaf 4.5.1 worden de beperkingen besproken en in paragraaf 4.5.2 de mogelijkheden.

4.5.1 Beperkingen

Beperkingen van het model liggen op het gebied van de intergetijdengebieden, de sedimentbalans, driedimensionale effecten en de basisevenwichtssituatie. Hieronder worden deze beperkingen nader toegelicht.

Intergetijdengebieden

Het intergetijdengebied wordt niet meegenomen in het morfologisch model van de Westerschelde, omdat voor punten boven NAP -2 m te grillige bodemveranderingen worden verkregen. Het is wel wenselijk deze gebieden mee te kunnen nemen, omdat ingrepen in de geulen de platen ook aanzienlijk beïnvloeden en vice versa. De morfologie van de Westerschelde hangt samen met interactie tussen geulen en platen.

Sedimentbalans

De stap van waterbeweging naar bodemveranderingen wordt in het model gedaan zonder sedimenttransport. In werkelijkheid wordt het sedimenttransport bepaald door de beschikbaarheid van sediment. Met het morfologische model van de Westerschelde worden bodemveranderingen berekend, waarbij geen rekening is gehouden met deze beschikbaarheid van sediment; de zandbalans wordt dus niet gegarandeerd. In werkelijkheid kunnen veranderingen, die op basis van de evenwichtsrelatie worden verwacht, worden tegengehouden door de beschikbaarheid of afwezigheid van sediment. Een tijdschaal voor de verwachte ontwikkelingen met het model is ook niet aan te geven. Deze moet alsnog met een sedimenttransportformule worden afgeschat. Overigens kan in een empirisch model wel een sedimentbalans worden ingebouwd. In dit model wordt dat vooralsnog niet gedaan, zodat het eenvoudige modelprincipe van de directe koppeling van waterbeweging aan bodemdpte via een empirische relatie behouden blijft.

Driedimensionale effecten

Het model is een tweedimensionaal model, met als geometrische dimensies de lengte- en de breedteschaal. Driedimensionale processen worden dus niet weergegeven, terwijl die wel van invloed zijn op de morfologie van het estuarium.

Basisevenwichtssituatie

In Svašek (2000) wordt zowel gerekend met een constante verhouding tussen dominant volume en diepte per roosterelement van het model als met één vaste verhouding voor het gehele model. Beide zijn fysisch niet juist. Een constante verhouding tussen het dominant volume en de diepte is niet correct omdat de Westerschelde in een dynamisch evenwicht verkeert en niet in een statisch evenwicht. Punten zouden dus een andere verhouding tussen diepte en dominant volume moeten kunnen krijgen. In de Westerschelde vinden bovendien voortdurend grote ingrepen plaats, waardoor nauwelijks sprake kan zijn van een natuurlijk systeem in evenwicht. Eén waarde voor alle punten voor de verhouding tussen diepte en dominant volume is ook niet correct, omdat deze verhouding ook afhankelijk is van bijvoorbeeld de korreldiameter en bochteffecten.

4.5.2 Mogelijkheden

Mogelijkheden van het morfologische model van de Westerschelde worden bekeken in vergelijking met reeds bestaande modellen. Twee mogelijkheden, dus kansen voor het model, worden hieronder besproken. Dit zijn het tweedimensionaal berekenen in plaats van eendimensionaal en het omzeilen van sedimenttransport.

Tweedimensionaal rekenen

Met het morfologische model kunnen bodemveranderingen nauwkeuriger worden beschreven, omdat in twee geometrische dimensies wordt gerekend, namelijk in de breedte- en in de lengterichting. De waterbeweging wordt beter weergegeven in twee dimensies. Interne dominantie kan worden meegenomen en migratie van geulen kan in de toekomst mogelijk worden meegenomen.

Omzeilen sedimenttransport

In procesgebaseerde modellen kunnen, door de kleine tijdstappen en de lange tijdschalen waarop de morfologische processen spelen, verstoringen sterk doorspelen in het eindresultaat. Kleine afwijkingen in de hydraulische resultaten komen immers tot een hogere macht terug in het sedimenttransport. Dit is niet het geval in een semi-empirisch model als het morfologische model van de Westerschelde.

In dit model kan een sedimentbalans worden toegevoegd. Hoewel dan wordt afgestapt van het eenvoudige modelprincipe, blijft het model een lange termijn gedragsmodel en heeft het dus voordelen boven een procesgebaseerd model.

5. Het vereenvoudigde morfologische model

5.1 Inleiding

Om meer inzicht te krijgen in de werking van het morfologische model van de Westerschelde wordt het modelprincipe nader onderzocht. Het modelprincipe koppelt bodemveranderingen aan veranderingen in de waterbeweging. In dit hoofdstuk wordt de vraag onderzocht welke resultaten worden verkregen als eenvoudige geometrische situaties worden gemodelleerd. Daartoe is een vereenvoudigde versie geschreven van het morfologische model van de Westerschelde. Of met het vereenvoudigde model een stabiele evenwichtsbodemligging wordt bereikt, komt aan de orde in hoofdstuk 6.

De gesimuleerde eenvoudige situaties zijn een rechte geul, een axiaalsymmetrische bocht en een twee-geulensysteem. Bij een rechte geul wordt de stroming bepaald door de opgelegde randvoorwaarden. In de tweedimensionale bocht ondervindt de waterbeweging invloed van het optreden van potentiaalstroming; driedimensionale bochteffecten worden niet weergegeven. In een twee-geulensysteem wordt het debiet in de twee takken herverdeeld na een ingreep in één van de twee takken. Voor alledrie de gevallen wordt onderzocht hoe deze processen de bodemveranderingen beïnvloeden.

Het vereenvoudigde model wordt beschreven in paragraaf 5.2. In paragraaf 5.3 wordt een simulatie gedaan met een rechte geul. De bocht wordt besproken in paragraaf 5.4 en het twee-geulensysteem in paragraaf 5.5. Elke situatie wordt beschouwd tot ongeveer tien iteraties zijn gedaan na de ingreep. Met het morfologisch model van de Westerschelde zijn ook tien iteratiestappen uitgevoerd. Paragraaf 5.6 vergelijkt de resultaten van de uitgevoerde simulaties in paragraaf 5.3 tot en met 5.5 met de resultaten van het morfologische model van de Westerschelde.

5.2 Modelbeschrijving

Het vereenvoudigde morfologische model werkt volgens hetzelfde principe als het morfologische model voor de Westerschelde. Het vereenvoudigde model gebruikt echter een ander waterbewegingsmodel en de morfologische module is vereenvoudigd. Het waterbewegingsmodel is FINEL2D, een door Svašek ontwikkeld tweedimensionaal model. In deze paragraaf worden het waterbewegingsmodel en de morfologische module kort besproken.

5.2.1 Waterbewegingsmodule

FINEL2D is, net zoals SCALWEST, gebaseerd op de ondiepwatervergelijkingen zoals beschreven in vergelijkingen (4.4) t/m (4.6) in paragraaf 4.3.1.

De mathematische discretisatie is gedaan volgens de eindige-elementenmethode. Het gebied waarvoor het model geldt, is daarbij verdeeld in een aantal elementen. De variabele eigenschappen h (waterdiepte), u (snelheid in x-richting) en v (snelheid in y-richting) worden in elk element gerepresenteerd door discrete waarden. FINEL2D is geschreven in de programmeertaal Fortran.

De ruwheid kan in FINEL2D gevarieerd worden via de Nikuradse-waarde. Het volgende verband is geldig tussen de Chézy-waarde en de Nikuradse-waarde:

$$C = 18 \log \left(\frac{12 * h}{k} \right) \quad (5.1)$$

waarin:

k = Nikuradse-waarde [m]

De invoer van FINEL2D moet bestaan uit een elementenrooster met een diepte-schematisatie en een specificatie van de randvoorwaarden.

De simulaties gedaan met het vereenvoudigde morfologische model betreffen hypothetische situaties. Daarvoor wordt het model aan de zee kant aangedreven door een cyclisch getij, gevormd door een sinus met een periode van 45000 seconden (12,5 uur). De waterstandsamplitude is gekozen op twee meter. De zijwanden zijn in de eenvoudige simulaties dichte randen, waarvoor wandwrijving niet wordt meegenomen. In de eenvoudige simulaties is een ruwheidswaarde k (Nikuradse-waarde) van 0,10 m ingevoerd. Voor een diepte van 15 meter betekent dat een Chézy-waarde van $59 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$.

Na twee getijperiodes (25 uur) is het model voldoende ingespeeld; fouten door het opleggen van beginvoorwaarden zijn dan voldoende uitgedempt. De resultaten van de derde getijperiode worden gebruikt als invoer voor de morfologische module. Om de 900 seconden (15 minuten) worden de waterdiepte, het debiet in de x-richting, het debiet in de y-richting en de bodemdiepte weggeschreven.

Het dominant volume wordt berekend uit de resultaten van de waterbewegingsberekening. In het morfologische model voor de Westerschelde werden daartoe eerst de dominante richtingen bepaald. In het vereenvoudigde morfologische model zijn de vloed- en ebrichtingen voor de eenvoudige geometrische situaties eenduidig. Het bepalen van de dominante richtingen is daarom veel eenvoudiger.

Uit de snelheden wordt het specifiek debiet berekend voor elk element. Sommatie van dit specifieke debiet voor alle tijdstappen geeft het eb- en vloedvolume. Per element wordt bepaald welke van deze het grootste is, dat is het dominante volume. De bepaling van het dominant volume per roosterelement wordt uitgevoerd in een functie, die geprogrammeerd is in Matlab. De bijbehorende programmacode is opgenomen in bijlage 5.1.

5.2.2 Morfologische module

De morfologische module van het vereenvoudigde morfologische model laadt eerst de basisbodem en het bijbehorende dominante volume voor de roosterelementen. Zo kan de verhouding tussen diepte en dominant volume worden berekend, die constant blijft na een ingreep. Vervolgens wordt het waterbewegingsmodel aangestuurd met de bodem, waarin een ingreep is gepleegd. Het nieuwe dominant volume wordt berekend volgens de daarvoor bestemde functie. De nieuwe bodem wordt dan berekend met vergelijking (4.1).

De nieuwe waarde voor de bodemdiepte wordt vergeleken met de waarde van de ingreep. 50% van het verschil tussen deze waarden wordt afgetrokken van de nieuwe waarde. Ook na alle iteraties wordt de diepte met 50% aangepast aan de berekende diepte, zodat bodemveranderingen niet met te grote stappen verlopen, zie vergelijking (4.2). In bijlage 5.2 is de programmacode opgenomen van de functie die de bodemveranderingen berekent in Matlab.

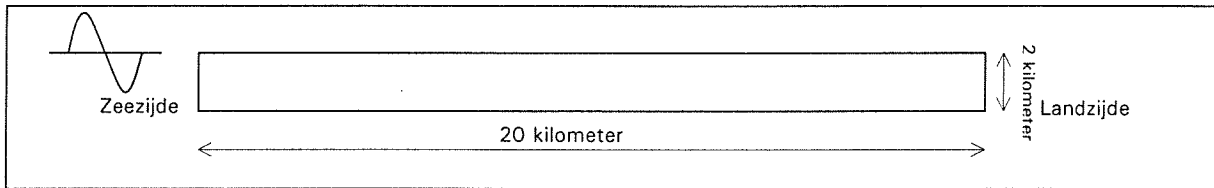
5.3 Simulatie rechte geul

In het vereenvoudigde model wordt de stroming bepaald door het getij, dat opgelegd wordt via de randvoorwaarden. De randvoorwaarden bepalen dus hoe het dominante volume verandert na een ingreep. In deze paragraaf wordt het modelprincipe voor een rechte geul onderzocht, dus hoe de bodem reageert op de veranderingen in het dominant volume en vice versa. Een rechte geul is gekozen om de invloed van de randvoorwaarden te onderzoeken, omdat dit de meest eenvoudige tweedimensionale geometrische situatie is.

Paragraaf 5.3.1 behandelt de modelinvoer, in paragraaf 5.3.2 worden verschillende randvoorwaarden beschreven en in 5.3.3 worden de modelresultaten met verschillende combinaties van randen.

5.3.1 Modelinvoer

Om een simpele geul te benaderen is een rechte bak gemodelleerd van twee kilometer breed en twintig kilometer lang. In de basissituatie heeft de bak een diepte van 15 meter. Dit zijn realistische waarden voor doorgaande geulen of geuldelen in de Westerschelde.



Figuur 5.1: Rechte geul

De Corioliskracht ten gevolge van de draaiing van de aarde is voor deze rechte geul niet meegenomen. De waterbeweging wordt namelijk zoveel mogelijk vereenvoudigd, opdat de invloed van de randvoorwaarden zo duidelijk mogelijk wordt.

5.3.2 Randvoorwaarden

Verschillende soorten randvoorwaarden kunnen worden opgelegd aan zowel zeezijde als landzijde. De volgende randvoorwaarden zijn bekeken:

- Waterstandsrandvoorwaarde: de waterstand van een cyclisch getij wordt opgelegd.
- Debietrandvoorwaarde: zowel een oscillerende snelheid van stroming loodrecht op rand als een oscillerende waterstand worden opgelegd.
- Dichte rand.
- Zwakreflecterende randvoorwaarde (Riemann-rand): het debiet door de rand gelijk blijft aan de voortplantingssnelheid van de verstoring maal de hoogte van de verstoring. Dit gebeurt volgens de volgende vergelijking:

$$q \pm c * \delta = constant \quad (5.2)$$

waarin:

c = voortplantingssnelheid van de verstoring [m/s]

δ = hoogte van de verstoring [m]

Goede randvoorwaarden moeten zelf niet beïnvloed worden door veranderingen in het fysische systeem en mogen op hun beurt niet de onbekende grootte in het interessegebied beïnvloeden (Stelling 1997).

Bij de gemodelleerde rechte geul van 20 kilometer lengte beïnvloeden de randvoorwaarden het dominante volume na een ingreep. Hoe dit weer de ontwikkeling van de bodem beïnvloedt, wordt onderzocht door verschillende simulaties te doen met de rechte geul.

Bij de eerste vier simulaties wordt steeds een verdieping aangebracht van de gehele bodem van 15 tot 18 meter. Daarbij worden verschillende combinaties van randen opgelegd.

In simulatie 5 wordt een lokale verdieping aangebracht in het midden van de bak, zodat de invloed van de randvoorwaarden bij een kleinere ingreep wordt bekeken.

In onderstaande tabel is een overzicht gemaakt van de uitgevoerde simulaties.

Tabel 5.1: Opgelegde randvoorwaarden bij de rechte geul

Simulatie	Ingreep verdieping	Randvoorwaarde zeezijde	Invoer ⁽¹⁾	Randvoorwaarde landzijde	Invoer
1	Gehele geul	Waterstand	$h_0 = 2\sin(\omega t)$	Zwakreflecterend	$h_0 = 0; u_n = 0$
2	Gehele geul	Waterstand	$h_0 = 2\sin(\omega t)$	Waterstand	$h_0 = 1,5\sin(\omega t - 0,0065 * \pi)^{(2)}$
3	Gehele geul	Waterstand	$h_0 = 2\sin(\omega t)$	Debiet	$h_0 = 1,5\sin(\omega t - 0,0065 * \pi)^{(2)}$
4	Gehele geul	Waterstand	$h_0 = 2\sin(\omega t)$	Dichte rand	$h_0 = 0; u_n = 0;$
5	Lokaal	Waterstand	$h_0 = 2\sin(\omega t)$	Zwakreflecterend	$h_0 = 0; u_n = 0$

(1): $\omega = 2 * \pi / T = 2 * \pi / (12,5 * 3600) = 1,396e^{-4}$ rad/s

(2): Deze amplitudes en fasen zijn verkregen door de waterstanden en snelheden te benaderen die optreden bij de betreffende rand, als een zwakreflecterende randvoorwaarde zou zijn opgelegd.

5.3.3 Modelresultaten

Hieronder volgt een korte beschrijving van de resultaten van de simulaties met het vereenvoudigde model na tien iteratiestappen. De tijdschaal van tien iteratiestappen is, net zoals in het morfologische model van de Westerschelde, niet bekend.

In bijlage 5.3 is voor één roosterelement in de rechte geul de diepte-ontwikkeling uitgezet tegen het aantal iteraties voor de verschillende randen. De ontwikkeling van de verhouding tussen het dominant volume en de bodemdiepte per iteratiestap voor dit element is te vinden in bijlage 5.3. Via deze ontwikkeling kan ook de verandering van het dominant volume ten gevolge van bodemveranderingen worden gevolgd.

Simulatie 1: Waterstandsrandvoorwaarde aan zeezijde, zwakreflecterende rand aan landzijde

Met een combinatie van een opgelegde waterstand en een Riemann-rand gaat de bodem na een aantal iteraties

terug naar de basiswaarde, zie bijlage 5.3, figuur 1.

Dit wordt veroorzaakt door de koppeling tussen waterbeweging en bodemdiepte volgens het modelprincipe. Door de verdieping ter plaatse van de waterstandsrand zal deze meer debiet gaan trekken. Bij de Riemann-rand kan het debiet zich aanpassen aan de bodemdiepte volgens vergelijking 5.2. Bij een constante hoogte van de verstoring en een constante valversnelling g , betekent dit: $q \cong \sqrt{D}$. Elk element heeft daardoor een te grote diepte in verhouding tot het dominante volume. Per iteratiestap wordt de bodemdiepte daarom minder. De verhouding tussen diepte en dominant volume gaat per iteratiestap steeds dichterbij de basiswaarde van de verhouding tussen diepte en dominant volume. Dit is te zien in figuur 1 van bijlage 5.4.

Deze combinatie van randvoorwaarden is een goede combinatie om het gedrag van een doorgaande geul te simuleren. Het debiet in de geul kan namelijk enigszins variëren; de geul kan meer debiet trekken. Dit is een wenselijke eigenschap van doorgaande geulen, die bijvoorbeeld een onderdeel vormen van een meer-geulensysteem.

De getijgolf in deze simulatie is een lopende golf. Omdat bij een lopende golf de waterstand en de snelheid in fase zijn, zal het debiet tijdens vloed (wanneer het ook hoog water is) groter zijn dan tijdens eb (als het laag water is). Elk element in de bak is dus vloedgedomineerd.

In de Westerschelde treedt een gedeeltelijke teruggekaatste golf op en zijn sommige geulen ebgedomineerd en andere vloedgedomineerd. In dit hoofdstuk wordt echter het modelprincipe onderzocht voor hypothetische situaties en niet voor de Westerschelde.

Simulatie 2: Waterstandsrandvoorwaarde aan zeezijde en aan landzijde

Aan de landzijde is een waterstand opgelegd in de vorm van een sinus met dezelfde periode als aan de zeezijde, maar met een kleinere amplitude (1,5 meter) en een faseverschuiving van $0,0065 \cdot \pi$. Deze waarden zijn verkregen door de uitvoer aan de landwaartse rand te nemen van de simulatie met een waterstandsrand en een zwakreflecterende rand (simulatie 1).

Bij deze combinatie van randen verdiept de bodem bij elke iteratiestap verder. Dit wordt veroorzaakt doordat het dominant volume relatief meer toeneemt dan de diepte, zie figuur 2 in bijlage 5.3 en 5.4 voor de resultaten.

De bodemligging zal met twee waterstandsrandvoorwaarden nooit naar een evenwicht toe gaan. Deze combinatie van randen zal dus niet verder worden gebruikt.

Simulatie 3: Waterstandsrandvoorwaarde aan zeezijde, debietrandvoorwaarde aan landzijde

Het opgelegde debiet aan de landzijde heeft eenzelfde periode als de waterstand aan de zeezijde, namelijk $2 \cdot \pi / 45000$. Verder is een amplitude van het debiet afgeleid uit simulatie 1 van $20 \text{ m}^2/\text{s}$, en een faseverschuiving van $0,0065 \cdot \pi$. Het debiet na de ingreep wordt bij deze rand dus vastgehouden en het dominant volume zal niet veranderen. Daardoor gaat de bodem van de bak binnen enkele iteratiestappen terug naar 15 meter, zie bijlage 5.3, figuur 3.

De dv/D -verhouding ontwikkelt zich vrijwel volgens een horizontale lijn (zie bijlage 5.4, figuur 3), omdat het dominant volume nauwelijks kan veranderen door de opgelegde debietrand.

Door de opgelegde debietrand is er in de basissituatie geen sprake van eb- of vloeddominantie. Het vloeddebiet is immers gelijk aan het ebdebiet. Na de ingreep wordt de bak aan de zeezijde,

waar de waterstandsrandvoorwaarde is opgelegd, enigszins vloeddominant. In het geplote roosterelement, dat in het midden van de bak ligt, neemt het debiet nog enigszins toe en ontwikkelt de dv/D -verhouding zich niet geheel horizontaal. De bodem van het beschouwde element lijkt naar een evenwichtstoestand met een iets grotere bodemdiepte te gaan. Aan de landzijde wordt het debiet vastgehouden en is het vloeddebiet nog steeds gelijk aan het ebdebiet. Voor een element aan de landzijde loopt de dv/D -verhouding geheel horizontaal (zie ook bijlage 5.4, figuur 3). Daar keert de bodemdiepte dus exact terug naar de basiswaarde. Deze combinatie van randvoorwaarden geeft realistische resultaten, maar in werkelijkheid zal het debiet door een geul of deel van de geul moeten kunnen veranderen. Dat is hier niet het geval.

Simulatie 4: Waterstandsrandvoorwaarde aan zeezijde, dichte rand aan landzijde

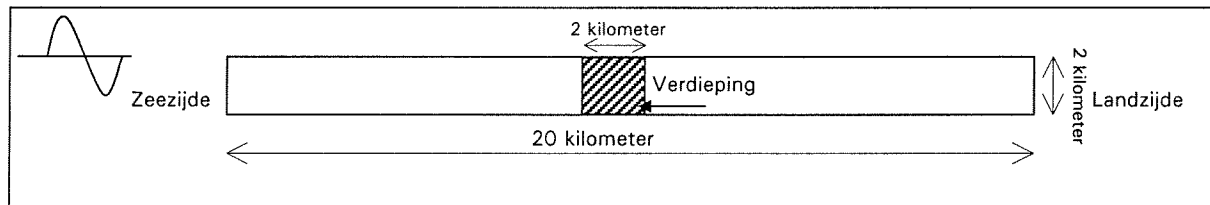
Een geul met een constante diepte van 15 meter en een dichte rand aan één zijde is geen reële situatie. De stroming ter plaatse van de dichte rand is immers ongeveer nul. De geul kan daar dus geen natuurlijke diepte hebben van 15 meter. Toch is deze situatie gesimuleerd om te kijken hoe het modelprincipe reageert.

De diepte van de bak gaat binnen enkele stappen terug naar de basisdiepte. In figuur 4 van bijlage 5.3 is waar te nemen dat dit exact gebeurt met de aangepaste stapgrootte van 50%.

Bij een bak met een dichte rand aan de landzijde ontstaat een staande golf. Bij een verdieping zal de hoeveelheid water die de bak instroomt niet toenemen. De komberging is immers bepalend voor de waterbeweging en deze verandert niet. Het dominant volume per roosterelement neemt dus niet toe. De ontwikkeling van de dv/D -verhouding loopt vrijwel horizontaal. De lichte toename van het dominant volume na iteratiestap 1 is te wijten aan instabiliteiten die veroorzaakt worden door de dichte rand.

Simulatie 5: Lokale ingreep

Over de gehele breedte is in het midden van de bak een verdieping aangebracht van 3 meter, zoals weergegeven in de onderstaande figuur.



Figuur 5.2: Lokale verdieping in rechte geul

Dit geval is doorgerekend met een waterstandsrandvoorwaarde aan de zeezijde en een zwakreflecterende randvoorwaarde aan de landzijde. Deze combinatie is tot nu toe de meest realistische combinatie van randen gebleken, omdat door het model meer debiet kan worden getrokken na een verdieping (zie simulatie 1).

Ook in dit geval keert de bodem ter plaatse van de verdieping weer terug naar de basiswaarde van 15 meter. De resultaten van deze berekening zijn weergegeven in bijlage 5.5.

Hoewel de bodem ter plaatse van de randen niet wordt verdiept, neemt het debiet initieel zowel ter plaatse van de verdieping als aan beide zijden van de verdieping enigszins toe. Deze toename is echter aanzienlijk kleiner dan bij een gehele verdieping van de bak. Weer geldt dat de dieptetoename groter is dan de debiettoename door de opgelegde Riemann-randvoorwaarde. Per iteratiestap keert de bodemdiepte dus steeds meer terug naar de basiswaarde.

Samenvatting

Toepassen van het modelprincipe op een rechte geul met zowel een globale als een lokale ingreep versterkt de invloed van de randvoorwaarden na elke iteratiestap. Als de randen dichtbij het interessegebied liggen, wordt de reactie van het model dus bepaald door deze randen.

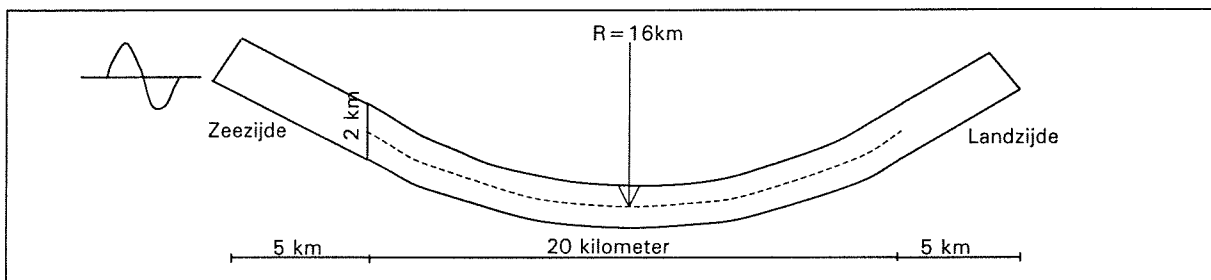
De combinatie van een waterstandsrandvoorwaarde en een zwakreflecterende randvoorwaarde benadert het beste het gedrag van een geul in de Westerschelde; de bodemdiepte kan daarmee enigszins veranderen.

5.4 Simulatie bocht

In de tweedimensionale bocht wordt de waterbeweging bepaald door het optreden van potentiaalstroming; driedimensionale bochteffecten worden niet weergegeven. In deze paragraaf wordt onderzocht wat koppeling van de waterbeweging aan de bodemdiepte in het geval van een axiaal-symmetrische bocht oplevert voor de bodemligging. In paragraaf 5.4.1 wordt de modelinvoer besproken, in paragraaf 5.4.2 theorie over bochtwerking en in paragraaf 5.4.3 komen de modelresultaten aan de orde.

5.4.1 Modelinvoer

Een cirkelvormige bocht wordt beschouwd, waarbij in de richting van de bochtas, in de tangentiële richting, niets verandert in het stroombeeld. Er is dan sprake van axiaalsymmetrie. De bochtstraal bedraagt 16 km en de breedte van de geul is ongeveer 2 km, zie figuur 5.3. Dergelijke afmetingen zijn reële waarden voor geulbochten in de Westerschelde. Deze bocht is verlengd met twee rechte stukken van ongeveer een halve kilometer lengte om eventuele verstoringen op de randen weg te houden uit het interessegebied.



Figuur 5.3: Bocht

De Corioliskracht kan bij bochtstroming een grotere rol spelen dan bij een rechte geul en wordt dus wel meegenomen. Hiervoor is een waarde van de Coriolis-coëfficiënt van $f = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ [s}^{-1}\text{]}$ genomen. Dit is berekend op basis van de volgende vergelijking:

$$f = 2 * \omega * \sin\varphi \quad (5.3)$$

met:

ω = hoeksnelheid van de draaiing van de aarde ($1,46 \cdot 10^{-4} \text{ rad/s}$)

φ = geografische breedtegraad (51,2 voor de Westerschelde)

De basiswaarde van de bodemdiepte wordt gekozen op 15 meter. Als ingreep wordt de gehele bocht over 20 kilometer verdiept tot 18 meter.

Bij de bocht simulatie is in het vereenvoudigde model een waterstandsrandvoorwaarde opgelegd aan de zeezijde en een zwakreflecterende randvoorwaarde aan de landzijde. Dit bleek de meest realistische combinatie te zijn bij het onderzoek naar de rechte geul (zie simulatie 1 in paragraaf 5.3.3).

5.4.2 Bochtwerking

Om het verschijnsel bochtwerking te verduidelijken, wordt een axiaalsymmetrische bocht beschouwd, waarbij in eerste instantie de wrijving wordt verwaarloosd en geen variaties in de verticale richting worden meegenomen. Er treedt dan potentiaalstroming op. Als over de gehele bocht een rechthoekig dwarsprofiel geldig is, kan de volgende vergelijking worden afgeleid (De Vriend 1998):

$$u = \frac{c}{r} \quad (5.4)$$

waarin:

u = over de diepte gemiddelde stromingscomponent in de richting van de geulas [m/s]

c = constante [m^2/s]

r = straal van de geulbocht [m]

De snelheid is omgekeerd evenredig met de afstand uit het kromtemiddelpunt van de bocht. De maximale stroomsnelheid treedt dus op in de binnenbocht. Hier hoort een waterspiegelniveau bij dat oploopt van de binnenbocht naar de buitenbocht.

Als echter de verticale structuur van het snelheidsveld en de wrijving worden meegenomen, dan ontstaan dwarscirculaties. De stroming past zich onder invloed van bodemwrijving en oppervlakteverhang aan de geulbocht aan, en de bewegingsvergelijking voor water in de dwarsrichting is als volgt:

$$-\frac{u^2}{r} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (5.5)$$

waarin:

v = snelheid in de richting van de bochtstraal [m/s]

z = verticale coördinaat [m]

ζ = waterspiegelniveau [m]

v_t = turbulentieviscositeit [m^2/s]

De linkerterm in vergelijking (5.5) is de centrifugaalkracht, de eerste term in het rechterlid representeert de verhangkracht en de tweede rechterterm geeft de turbulente viscositeit weer. Om het stroombeeld in dwarsrichting te krijgen kan de snelheid v uit vergelijking (5.5) opgelost worden. Daaruit volgt dat de dwarsnelheid in het bovenste deel van de vertikaal naar de buitenbocht is gericht en in het onderste deel naar de binnenbocht. De dwarscirculatie die daaruit ontstaat, wordt secundaire stroming genoemd.

De Coriolis-kracht kan de dwarscirculatie versterken of verzwakken, afhankelijk van de ligging van de geul. Op het noordelijk halfrond wordt de dwarscirculatie versterkt wanneer vanuit de hoofdstroom (eb of vloed) gezien de geulbocht tegen een rechteroever aanligt.

De combinatie van secundaire stroming en hoofdstroming in de langsrichting levert een spiraalvormig stroombeeld. Deze spiraalstroming zorgt voor een herverdeling van de stroomsnelheid over de dwarsdoorsnede van de rivier. De snelheidsverdeling wijkt gaande in de bocht steeds verder af van de potentiaalstroming zoals met vergelijking (5.4) is weergegeven, ook als de geulbodem horizontaal is. De maximale snelheid treedt op in de buitenbocht in plaats van in de binnenbocht.

Onder invloed van de secundaire stroming wordt sediment van de buitenbocht naar de binnenbocht getransporteerd. Dit leidt tot erosie in de buitenbocht en sedimentatie in de binnenbocht. Uiteindelijk ontstaat een evenwichtsdwarsprofiel met een diepere buitenbocht en een ondiepere binnenbocht. Het effect van bochtstroming is dus een belangrijk fenomeen voor de morfologie in bochten.

5.4.3 Modelresultaten

Bij een bocht met een horizontale bodem zijn de door FINEL2D berekende snelheden groter in de binnenbocht dan in de buitenbocht, volgens vergelijking (5.3). De resultaten van de bodemligging na tien iteraties zijn opgenomen in bijlage 5.6. De binnenbocht bereikt na tien iteraties een waarde op de evenwichtslijn, waarbij de bodemdiepte groter is dan de basisdiepte. De buitenbocht wordt sneller ondieper dan de binnenbocht. Dat de gehele bodem ondieper wordt na de verdieping, wordt weer veroorzaakt door de randvoorwaarden.

Op de randen van de bocht treden verstoringen op die zich verplaatsen richting het interessegebied. Na tien iteraties is dit gebied nog niet bereikt.

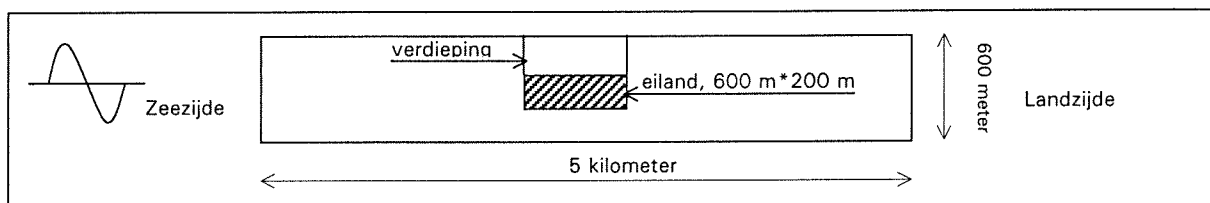
Ten gevolge van de potentiaalstroming is het dominant volume groter in de binnenbocht dan in de buitenbocht. Door de koppeling van de bodemveranderingen aan de waterbeweging, levert dit een verdieping van de binnenbocht op. Dit effect is goed waar te nemen, omdat een bocht met een vlakke bodem is gesimuleerd.

5.5 Simulatie twee-geulensysteem

In een twee-geulensysteem wordt het debiet in de twee takken herverdeeld na een ingreep in één van de twee takken. Hieronder wordt onderzocht hoe deze herverdeling de bodemveranderingen in het systeem beïnvloeden. Paragraaf 5.5.1 beschrijft de modelinvoer en paragraaf 5.5.2 geeft de modelresultaten weer.

5.5.1 Modelinvoer

Om op eenvoudige wijze een twee-geulensysteem te creëren is in een rechte geul van 5 kilometer lang en 600 meter breed een eiland aangebracht van 200 meter breed en 500 meter lang, zie figuur 5.4.



Figuur 5.4: Twee-geulensysteem

De Coriolis-kracht wordt, evenals bij de rechte geul, verwaarloosd. Zo wordt de invloed van de debietherverdeling op de bodemontwikkeling zo eenvoudig mogelijk inzichtelijk gemaakt.

In de basissituatie heeft de gehele bodem een diepte van 15 meter. Beschouwd is een ingreep, waarbij één van de twee geulen verdiept wordt van 15 meter tot 18 meter. Aan de zeezijde is weer een waterstandsrandvoorwaarde opgelegd en aan de landzijde een zwakreflecterende randvoorwaarde.

5.5.2 Modelresultaten

Direct na de verdieping van de ene geul neemt daar het dominant volume enigszins toe en in de andere geul neemt het evenredig af.

Na tien iteraties blijkt dat de geul die verdiept is tot 18 meter teruggaat naar een diepte van ongeveer 15,3 meter, zie bijlage 5.7. De andere geul krijgt een iets kleinere bodemdiepte ten opzichte van de basissituatie.

De randvoorwaarden hebben eenzelfde invloed als bij de rechte geul en de bocht. Onder invloed van deze randvoorwaarden gaat de bodemdiepte in de gehele bak terug naar een waarde in de buurt van de 15 meter. In het twee-geulensysteem bestaat echter na tien iteraties een verschil in bodemdiepte tussen de twee geulen.

De herverdeling van het debiet heeft dus invloed op de bodemontwikkeling van het twee-geulensysteem. Als de bodem bij de randen weer de basisdiepte heeft bereikt, blijft een diepteverschil bestaan tussen de twee geulen. De diepere geul trekt evenredig meer debiet dan de ondiepere geul.

5.6 Vergelijking met het morfologische model van de Westerschelde

De opgetreden bodemveranderingen in het vereenvoudigde morfologische model zijn versterkingen van veranderingen in de waterbeweging. Om te kijken of in het morfologisch model van de Westerschelde de bodemveranderingen ook bepaald zijn door bovengenoemde waterbewegingsverschijnselen, worden de resultaten van dit model beoordeeld op de invloed van de randvoorwaarden (paragraaf 5.6.1), bochteffecten (paragraaf 5.6.2) en debietverdeling in twee-geulensystemen (paragraaf 5.6.3).

5.6.1 Randvoorwaarden

In het vereenvoudigde model bepalen de randvoorwaarden de debietontwikkelingen en, volgens het modelprincipe, de bodemveranderingen.

In het morfologisch model van de Westerschelde wordt de debietontwikkeling niet eenduidig bepaald door de randvoorwaarden. De randen liggen namelijk op grote afstand. De waterstandsrand bevindt zich meer dan 20 kilometer zeewaarts van het interessegebied. Ook de rivierafvoeren die opgelegd zijn aan de landwaartse rand liggen ver weg. Of de randvoorwaarden ver genoeg liggen voor grote ingrepen in het morfologisch model is niet bekend. Ingrepen zoals geulverdiepingen van een halve meter (zoals gedaan met het morfologische model, zie hoofdstuk 4) beïnvloeden de waterbeweging op de randen waarschijnlijk niet.

5.6.2 Bochteffecten

De koppeling van de bodemveranderingen aan de waterbeweging levert in het vereenvoudigde morfologische model een diepere binnenbocht op en een ondiepere buitenbocht ten opzichte van een vlakke bochtdoorsnede in de basissituatie.

Het morfologische model voor de Westerschelde is ook een tweedimensionaal model waarin geen bochtstroming kan worden meegenomen. Maar omdat maar tien iteraties met dit model is doorgerekend, is niet waar te nemen dat binnenbochten zijn verdiept ten koste van buitenbochten. Dit kan zijn omdat de bodems van de bochten in de Westerschelde niet vlak zijn. De potentiaalstroming komt daardoor minder snel tot uiting. In paragraaf 7.5.2 wordt hier nader op ingegaan.

5.6.3 Twee-geulensystemen

Door toepassing van het modelprincipe heeft de herverdeling van het debiet na een ingreep invloed op de bodemontwikkeling van het twee-geulensysteem. Als de bodem bij de randen weer de basisdiepte heeft bereikt, blijft een diepteverschil bestaan tussen de twee geulen. De diepere geul trekt evenredig meer debiet dan de ondiepere geul.

In de Westerschelde zijn meerdere twee- of meer-geulensystemen te onderscheiden. Voorbeelden hiervan zijn de Pas van Terneuzen-Everingen en het Gat van Ossensisse-Middelgat. De modelresultaten van het morfologisch model van de Westerschelde laten zien, dat verdiepen van één geul van een dergelijk twee-geulensysteem gepaard gaat met aanzanden van de andere geul in het systeem.

Samenvatting

Het eerste verschijnsel, de invloed van de randvoorwaarden op de bodemveranderingen, is wel van belang voor het vereenvoudigde morfologische model maar niet voor het model van de Westerschelde.

Het niet meenemen van driedimensionale bochtstroming is waarschijnlijk in beide modellen van invloed op de bodemontwikkelingen. In het model van de Westerschelde is dit echter niet goed waar te nemen na tien iteraties.

De invloed van de debietverdeling op de bodemontwikkeling van twee-geulensystemen wordt in beide modellen goed weergegeven.

5.7 Conclusies

In de drie met het vereenvoudigde morfologische model gesimuleerde geometrische situaties, een rechte geul, een bocht en een twee-geulensysteem, is waargenomen dat het modelprincipe optredende hydraulische processen versterkt.

Bij een rechte geul is waargenomen dat de randvoorwaarden bepalen of het dominant volume na een ingreep meer kan toenemen dan de diepte of niet. Dit geldt ook voor de bocht en het twee-geulensysteem.

Als het dominant volume minder toeneemt dan de diepte bij een ingreep, gaat de bodem in de rechte geul terug naar de basisdiepte. In het morfologische model van de Westerschelde hebben de randvoorwaarden hoogstwaarschijnlijk geen invloed op het dominante volume in het interessegebied door hun ligging en de complexe geometrie van de geulstelsels.

Het vereenvoudigde morfologische model geeft typische driedimensionale bochteffecten niet goed weer. Het dominant volume is daardoor groter in de binnenbocht dan in de buitenbocht. Door de koppeling van de bodemveranderingen aan de waterbeweging levert dit een verdieping van de binnenbocht op. In het morfologisch model van de Westerschelde is dit niet waar te nemen na tien iteraties.

In een twee-geulensysteem heeft de herverdeling van het debiet na een ingreep invloed op de bodemontwikkeling. Een diepteverschil van enkele decimeters blijft bestaan tussen de twee geulen. De diepere geul trekt evenredig meer debiet dan de ondiepere geul. In het morfologische model van de Westerschelde heeft herverdeling van debiet tussen twee of meer geulen van een geulstelsel ook invloed op de bodemontwikkeling.

6. Stabiliteit van de evenwichtsbodem

6.1 Inleiding

De bodemligging, die berekend is met het morfologisch model voor de Westerschelde, bereikt geen evenwichtswaarde na tien iteratiestappen. De Westerschelde kent geen statische evenwichtsbodemligging door de invloed van een veelheid aan processen. Wel bestaat een min of meer dynamische evenwichtstoestand.

In Winterwerp (2000) wordt gesteld dat het meergeulensysteem van de Westerschelde zichzelf in stand houdt op een tijdschaal van decennia. Dit is geconcludeerd op basis van een analyse van de historische ontwikkelingen. Met dit gegeven als uitgangspunt wordt van het morfologisch model van de Westerschelde vereist dat het een evenwichtsbodem kan berekenen, waarbij het meergeulensysteem in stand wordt gehouden.

Om de vraag te kunnen beantwoorden waarom geen evenwichtsbodem wordt bereikt in het morfologische model van de Westerschelde, wordt eerst gekeken of in het vereenvoudigde morfologische model een evenwichtsbodemligging wordt bereikt. Voor de gemodelleerde eenvoudige geometrische situaties uit hoofdstuk 5 is in elk geval te verwachten dat de bodem na een ingreep naar een evenwicht convergeert. De processen in dit model zijn immers bekend.

In paragraaf 6.2 worden daartoe de uitgevoerde simulaties met het vereenvoudigde morfologische model besproken aangaande het gedrag rond de evenwichtslijn. Ook in het vereenvoudigde model blijkt geen realistische stabiele evenwichtsbodemligging te worden bereikt. Hiervoor worden verklaringen onderzocht in paragraaf 6.3 en 6.4 middels een mathematische stabiliteitsanalyse van de modelvergelijkingen van een eendimensionaal twee-geulensysteem met stationaire stroming. In paragraaf 6.5 wordt deze stabiliteitsanalyse geverifieerd voor het vereenvoudigde morfologische model en voor het model van de Westerschelde. Tot slot worden in paragraaf 6.6 oplossingen aangedragen voor de problemen die optreden.

6.2 Stabiliteitsgedrag in vereenvoudigde situaties

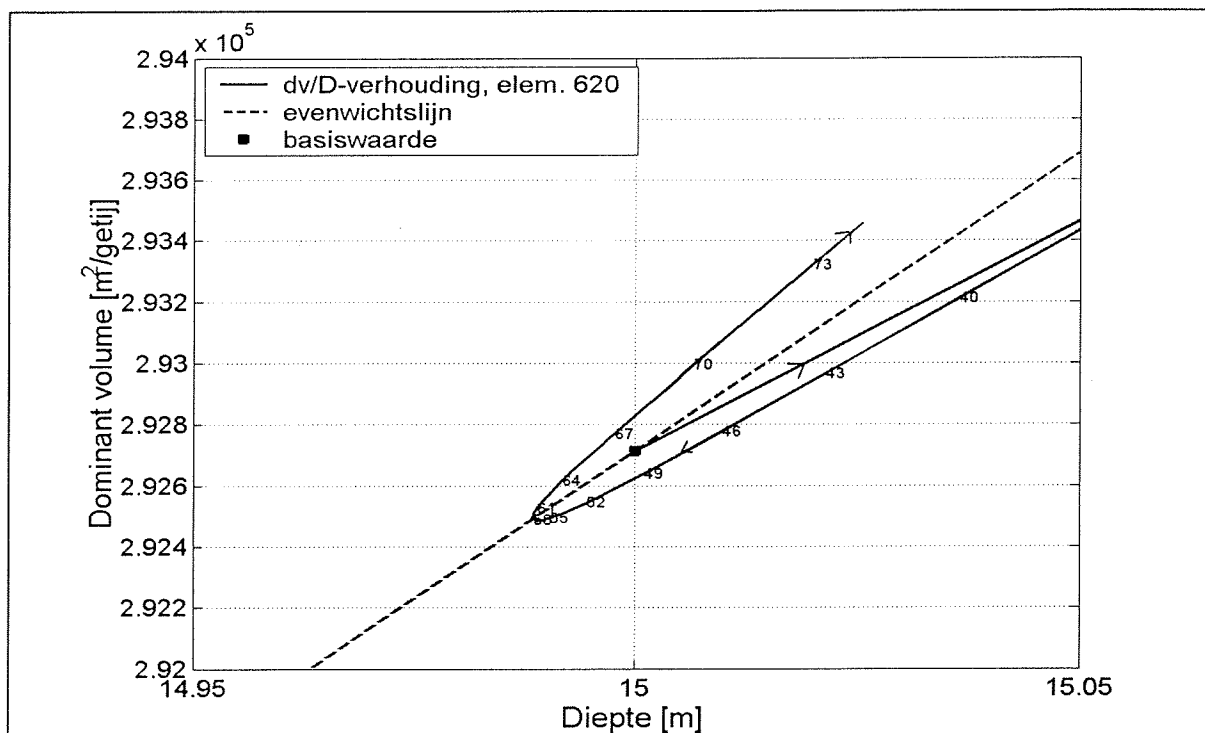
In hoofdstuk 5 lijkt de bodemligging in het vereenvoudigde model steeds een evenwichtswaarde te bereiken. Voor de rechte geul was deze waarde de basiswaarde voor de ingreep, bij de bocht was dit een bodemligging met een diepere binnenbocht dan in de basissituatie en voor het twee-geulensysteem was dit een bodemligging met een diepere geul naast een ondiepere geul dan in de basissituatie. In paragraaf 6.2.1 wordt onderzocht of de bodemligging in de rechte geul daadwerkelijk stabiel wordt. In paragraaf 6.2.2 wordt dit voor de bocht gedaan en in paragraaf 6.2.3 voor het twee-geulensysteem.

6.2.1 Rechte geul

Bij verschillende opgelegde randvoorwaarden lijkt de bodem van de rechte bak exact naar een evenwichtswaarde te gaan, namelijk de basisdiepte (zie bijlage 5.3). Alleen voor de situatie met twee waterstandsranden is dit niet het geval.

Hier wordt alleen nog maar de combinatie van een waterstandsrand aan de zeezijde en een zwakreflecterende rand aan de landzijde besproken, omdat dit de meest realistische combinatie van randvoorwaarden is.

Als verder wordt geïtereerd, dan blijkt dat de bodem niet op de waarde blijft waarbij de verhouding dominant volume-diepte (dv/D) de evenwichtslijn raakt. De dv/D -ontwikkeling van een element in de rechte geul rond de evenwichtslijn is weergegeven in figuur 6.1. Dit element bevindt zich in het midden van de geul. In bijlage 6.1 is de bodemligging weergegeven na 76 iteraties, samen met de dv/D -verhouding van twee elementen.



Figuur 6.1: Ontwikkeling diepte en dominant volume van een element rond de evenwichtslijn, rechte geul

Bodemveranderingen vinden plaats volgens banen in het rooster. De waarde van de dv/D -verhouding blijft niet op de evenwichtslijn, maar gaat daar steeds verder van afwijken. Uiteindelijk blijft één zeer diepe strook in het rooster open, terwijl de andere geheel dicht zijn. Dit is geen gewenste evenwichtsbodemligging.

6.2.2 Bocht

Ook voor de bocht blijkt na verder itereren dat de bereikte bodemdiepte geen evenwichtsbodemdiepte is. In paragraaf 4.3.3 was onderzocht dat na een ingreep de binnenbocht verdiept ten koste van de bodemdiepte in de buitenbocht. Dit proces zet zich in hoog tempo voort nadat de evenwichtslijn is bereikt, zie bijlage 6.2. De bodemveranderingen volgen sterk de roosterbanen en de dv/D -verhouding ligt niet meer op de evenwichtslijn, maar wijkt daar steeds meer van af. Een verstoring op de rand wordt steeds verder versterkt. Deze verstoring is het gevolg van een rand die niet loodrecht op de instroming staat. Ook deze verschijnselen, het verdiepen van de binnenste roosterbaan en het versterken van verstoringen op de randen, leiden tot een ongewenste evenwichtsbodemligging.

6.2.3 Twee-geulensysteem

Als de simulatie van een twee-geulensysteem verder wordt uitgevoerd nadat de evenwichtslijn is bereikt, blijkt dat de geul waar de verdieping was aangebracht zich verder gaat verdiepen. Dit gebeurt ten koste van de andere geul, die dus aanzandt. Dit zet zich voort totdat één geul geheel dicht is, zie bijlage 6.3.

De geul die open blijft zal niet in zijn geheel openblijven. Ook daar treden verstoringen volgens het rooster op, zoals reeds is waargenomen bij de rechte geul en de bocht. Hier wordt wederom geen realistische stabiele evenwichtsbodemligging bereikt.

6.3 Mogelijke oorzaken ongewenste bodemontwikkeling

In de simulaties met het vereenvoudigde morfologische model wordt geen realistische stabiele evenwichtsbodemligging bereikt. In paragraaf 6.3.1 wordt onderzocht of het niet convergeren van de bodemligging naar een realistische evenwichtswaarde een numerieke oorzaak heeft en in paragraaf 6.3.2 wordt gekeken in hoeverre dit samenhangt met de vergelijkingen van het model door deze te analyseren voor een eendimensionaal geval met stationaire stroming.

6.3.1 Numerieke modeleigenschappen

Als de verhouding tussen dominant volume en diepte steeds dichter de evenwichtslijn nadert, dan worden de veranderingen per iteratiestap steeds kleiner. Ook cirkelt de dv/D -verhouding soms om de evenwichtslijn. Het niet op één waarde blijven van de dv/D -verhouding kan met de nauwkeurigheid van de berekening te maken hebben. Numerieke modeleigenschappen betreffende de nauwkeurigheid die zijn onderzocht, zijn afbreekfouten en de stapgrootte van de bodemaanpassing aan de berekende nieuwe bodem.

Afbreekfouten

In FINEL2D wordt de bodem op 16 cijfers nauwkeurig ingelezen. De waterbewegingsberekening schrijft ook met deze nauwkeurigheid weg. De bodemberekening volgens de evenwichtsrelatie gebeurt vervolgens met deze waarden. Deze grote nauwkeurigheid is geen oorzaak voor de instabiliteiten die optreden.

Stapgrootte aanpassing nieuwe bodem

De bodemdiepte wordt berekend volgens vergelijking (4.2):

$$D_{nieuw} = \frac{D_{basis}}{dv_{basis}} * dv_{nieuw}$$

Vervolgens wordt de bodem aangepast volgens vergelijking (4.3):

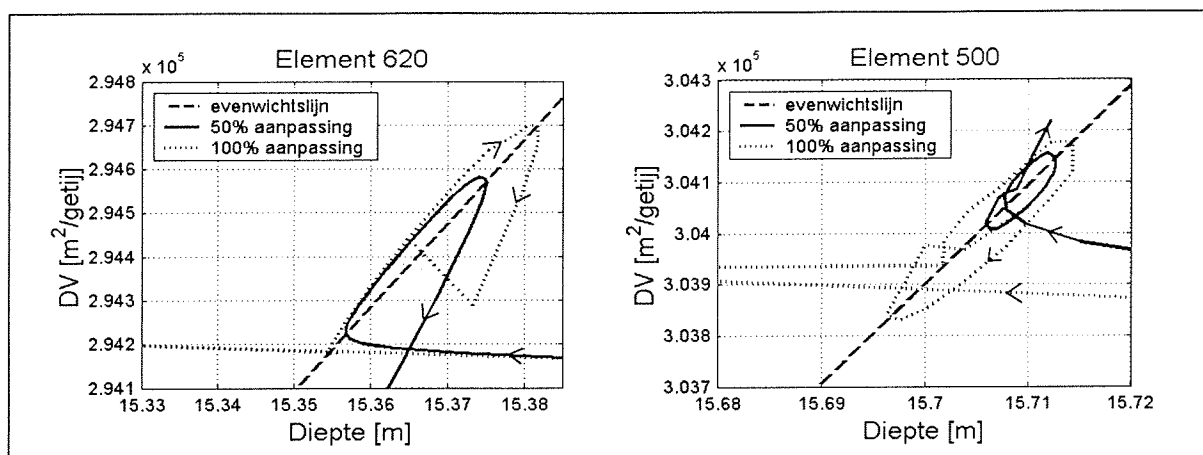
$$D_{nieuw} = D_{nieuw} - 0,5 * (D_{nieuw} - D_{ingreep})$$

Een aanpassing van de bodemdiepte van 100% aan de berekende bodemdiepte geeft andere resultaten dan een aanpassing van 50% aan de berekende bodemdiepte. Of dit effect heeft op het bereiken van een evenwicht, wordt onderzocht door de volgende relatie te gebruiken:

$$D_{nieuw} = 1,0 * D_{nieuw} = \frac{D_{basis}}{dv_{basis}} * dv_{basis} \quad (6.1)$$

Dit is gesimuleerd voor een situatie van een rechte bak met aan zeezijde een waterstandsrandvoorwaarde en aan de landzijde een debietrandvoorwaarde. Als ingreep is de gehele bodem verdiept van 15 meter naar 18 meter.

In figuur 6.2 is voor twee elementen in de rechte geul de dv/D -ontwikkeling weergegeven met zowel een diepteanpassing van 50% als met een diepteanpassing van 100%.



Figuur 6.2: Ontwikkeling diepte en dominant volume met verschillende stapgroottes

Element 620 bevindt zich in het midden van de bak en element 500 aan de zeezijde.

Met een aanpassing van de diepte van 100% vertoont de dv/D -verhouding ongeveer hetzelfde gedrag, met als verschil dat de evenwichtslijn eerder wordt bereikt.

Ook door Svašek (2000) is aangetoond dat de stapgrootte van aanpassing van de bodemdpte geen invloed heeft op de resultaten van het morfologische model.

Het niet-bereiken van een evenwichtsbodemligging wordt niet veroorzaakt door afbreekfouten en de stapgrootte van de bodemaanpassing.

6.3.2 Modelvergelijkingen

In deze paragraaf worden de modelvergelijkingen nader onderzocht.

De modelvergelijkingen bestaan uit de ondiepwatervergelijkingen, die gediscetiseerd worden gebruikt door zowel FINEL2D als SCALWEST, en de empirische evenwichtsvergelijking.

De volledige ondiepwatervergelijkingen, die na discretisatie gebruikt zijn in zowel FINEL2D als SCALWEST, zijn als volgt (zie ook paragraaf 4.3.1):

Continuïteitsvergelijking (vergelijking (4.4)):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \frac{\partial u}{\partial x} + h \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

Bewegingsvergelijking in de x-richting (vergelijking (4.5)):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\tau_{wx}}{\rho h} - f_c v + f_w u = 0$$

Bewegingsvergelijking in de y-richting (vergelijking (4.6)):

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{\tau_{wy}}{\rho h} + f_c u + f_w v = 0$$

In de morfologische module wordt vergelijking (4.2) opgelegd:

$$D_{nieuw} = \frac{D_{basis}}{dv_{basis}} * dv_{nieuw}$$

Om de modelvergelijkingen analytisch te bekijken, moeten deze vereenvoudigd worden. Daarvoor wordt uitgegaan van een eendimensionale situatie met stationaire stroming en twee naast elkaar gelegen geulen. De modelvergelijkingen worden toegepast op deze situatie, zodat oplossingen voor dit systeem kunnen worden bepaald.

Vereenvoudiging modelvergelijkingen

De volgende aannames ten aanzien van de modelvergelijkingen worden gedaan:

- Voor een eendimensionale situatie geldt alleen de bewegingsvergelijking in de x-richting en komt vergelijking (4.6) te vervallen, evenals de derde term in (4.4) en (4.5).
- Bij stationaire stroming vervallen de traagheidstermen in de ondiepwatervergelijkingen. Ook wordt in de evenwichtsrelatie het dominant volume vervangen door het debiet q . Verder wordt aangenomen dat de waterdiepte h gelijk is aan de bodemdiepte D .
- De Coriolis-kracht en de windwrijving worden niet meegenomen.

De volgende eenvoudige vergelijking voor de waterbeweging wordt dan verkregen:

$$g \frac{\partial h}{\partial x} + f_w u = 0 \quad (6.2)$$

Met vergelijking (4.7) voor de wrijvingsfactor, die geldig is bij langzame stroomveranderingen (zie paragraaf 4.3.3):

$$f_w = \frac{g * u}{C^2 * h}$$

wordt de volgende algemene vergelijking verkregen voor de waterbeweging:

$$q = C * h^{3/2} * i^{1/2} \quad (6.3)$$

met de formule van Manning (vergelijking (4.8), zie ook paragraaf 4.3.3):

$$C = \frac{h^{1/6}}{n}$$

wordt dit:

$$q = \frac{1}{n} * i^{1/2} * h^{5/3} \quad (6.4)$$

Wordt de bodemwrijving niet specifiek geformuleerd, maar met de Chézy-factor als functie van h^{m-1} , dan ontstaat de volgende vorm voor de waterbewegingsvergelijking:

$$q = \alpha * i^{1/2} * h^m \quad (6.5)$$

waarin:

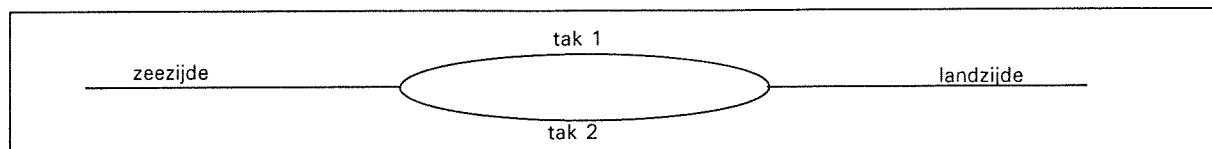
α , m = coëfficiënten, afhankelijk van de formulering voor de bodemwrijving en m altijd > 1 . Deze vorm van de waterbewegingsvergelijking wordt verder gebruikt in dit hoofdstuk.

De evenwichtsrelatie krijgt de volgende vorm:

$$h = q * \frac{h_{basis}}{q_{basis}} \quad (6.6)$$

Toepassing vereenvoudigde modelvergelijkingen

De afgeleide modelvergelijkingen zullen worden toegepast op een eendimensionaal tweegeulensysteem, zoals is weergegeven in figuur 6.3.



Figuur 6.3: Schematisatie splitsing met twee takken

Als aan één zijde een debietrand wordt opgelegd, zijn de volgende vergelijkingen geldig voor tak 1 en tak 2:

$$q_1 = \alpha * i_1^{1,2} * h_1^m \quad (6.7)$$

$$q_2 = \alpha * i_2^{1,2} * h_2^m \quad (6.8)$$

met:

q_1 = debiet in tak 1 [m^2/s]

q_2 = debiet in tak 2 [m^2/s]

h_1 = waterdiepte in tak 1 [m]

h_2 = waterdiepte in tak 2 [m]

i_1 = verhang in tak 1 [-]

i_2 = verhang in tak 2 [-]

Ook geldt voor beide geulen de evenwichtsrelatie:

$$h_1 = q_1 * \frac{h_{basis}}{q_{basis}} \quad (6.9)$$

$$h_2 = q_2 * \frac{h_{basis}}{q_{basis}} \quad (6.10)$$

met:

h_{basis} = waterdiepte in de basissituatie [m]

q_{basis} = debiet in de basissituatie [m^2/s]

Voor de splitsingspunten geldt de volgende vergelijking:

$$Q_0 = Q_1 + Q_2 \quad (6.11)$$

Symmetrische takken betekent een gelijke breedte, lengte en verhang in beide takken, dus $B_1 = B_2 = \frac{1}{2} B_0$, $L_1 = L_2$ en $i_1 = i_2$.

In dat geval zijn de oplossingen van de bovenstaande vergelijkingen als volgt:

- $h_1 = h_2 = h_{basis}$, $Q_1 = Q_2 = \frac{1}{2} Q_0$, beide takken blijven open.
- $h_1 = 0$, $h_2 = 2 * h_{basis}$, $Q_1 = 0$ en $Q_2 = Q_0$, tak 1 gaat dicht.
- $h_1 = 2 * h_{basis}$, $h_2 = 0$, $Q_1 = Q_0$ en $Q_2 = 0$, tak 2 gaat dicht.

Deze oplossingen representeren evenwichtstoestanden die fysisch realistisch zijn.

Een situatie met twee geulen op de basisdiepte is een realistische oplossing, maar in paragraaf 6.2.3 blijft de bodem van een twee-geulensysteem in het vereenvoudigde morfologische model na het bereiken van deze basiswaarde in geen geval stabiel. De stabiliteit van de oplossingen moet dus bekeken worden. Dit wordt in paragraaf 6.4 gedaan.

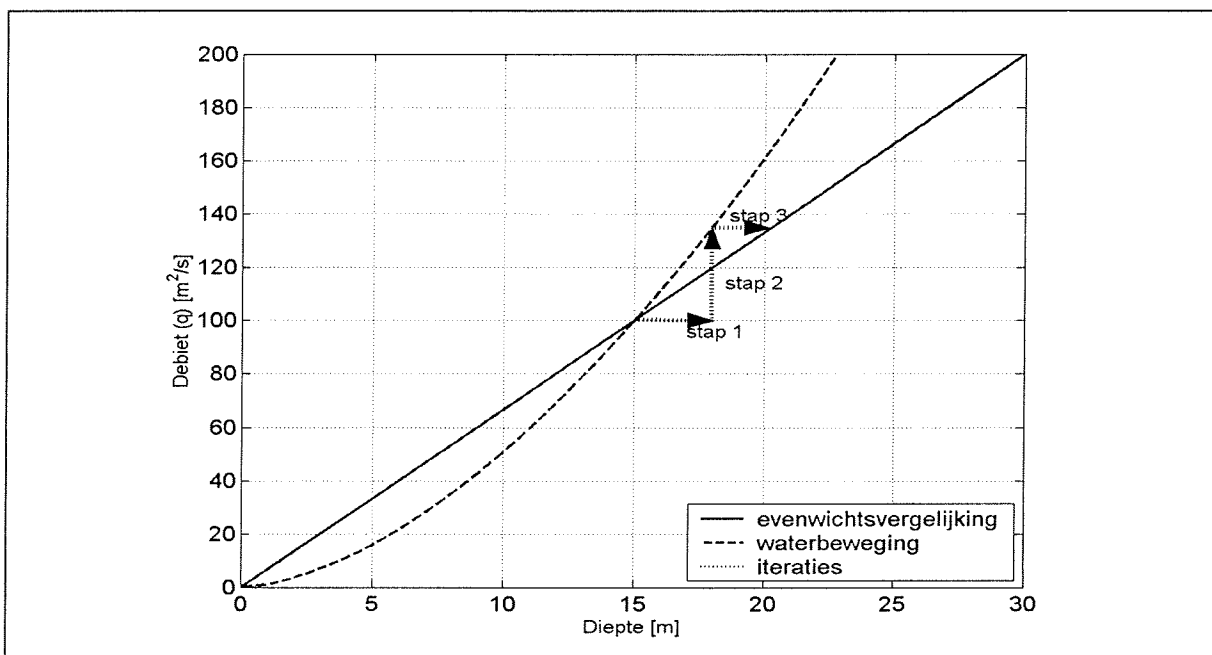
6.4 Stabiliteitsanalyse

De modelvergelijkingen voor een eendimensionaal twee-geulensysteem met stationaire stroming hebben drie fysisch realistische oplossingen: één waarbij beide takken open blijven op de basiswaarde en twee waarbij één van de takken dichtgaat.

In deze paragraaf wordt gekeken of de oplossingen van de modelvergelijkingen voor een eendimensionaal tweegeulensysteem met stationaire stroming stabiele oplossingen zijn. Dit wordt zowel grafisch gedaan (in paragraaf 6.4.1) als mathematisch (in paragraaf 6.4.2).

6.4.1 Grafische uitwerking

In figuur 6.4 zijn voor één van de twee takken de waterbewegingsvergelijking en de evenwichtsvergelijking weergegeven. De waterbeweging is uitgezet volgens vergelijking (6.5), waarbij $m = 5/3$ genomen is. De evenwichtslijn is uitgezet volgens vergelijking (6.6).



Figuur 6.4: Iteraties volgens waterbewegingsvergelijking en evenwichtsrelatie

Als een kleine verstoring wordt aangebracht in de bodemdiepte, dan zal de bodem niet teruggaan naar de oude evenwichtsdiepte. De iteratiestappen die in een dergelijk geval worden gedaan, zijn weergegeven met de gestippelde lijn in figuur 6.4. Bij een verdieping (stap 1) wordt een groter dominant volume berekend dan volgens de evenwichtsrelatie zou worden verwacht (stap 2). Bij dit nieuwe dominante volume wordt een grotere diepte berekend volgens de evenwichtsrelatie (stap 3). Dit gaat door totdat het debiet niet meer verder kan toenemen.

De oplossing waarbij $h_1 = h_2 = h_{\text{basis}}$ is dus geen stabiele oplossing. Na een ingreep gaat één van de twee takken altijd dicht en de ander verdiept zich, totdat de eerste tak dicht is.

6.4.2 Mathematische uitwerking

Uit een mathematische analyse van de modelvergelijkingen kan kwalitatieve informatie worden gekregen over de oplossingen. Hieronder wordt een dergelijke mathematische stabiliteitsanalyse uitgevoerd voor een twee-geulensysteem.

Voor dit systeem wordt per tak de bodemdiepte h per iteratiestap aangepast aan de evenwichtsdiepte h_e . De volgende vergelijkingen worden daarvoor opgeschreven:

$$\frac{\partial h_1}{\partial t} = (h_{e1} - h_1) \quad (6.12)$$

$$\frac{\partial h_2}{\partial t} = (h_{e2} - h_2) \quad (6.13)$$

Bij bovenstaande differentiaalvergelijkingen horen punten (h_1, h_2) , die de evenwichtstoestanden van het systeem representeren. Deze punten worden singuliere punten genoemd (Boyce et al 1992). Deze worden bepaald door bovenstaande vergelijkingen nul te stellen. De evenwichtstoestanden van het systeem zijn in het simpele geval van symmetrische takken $(h_1 = h_{basis}, h_2 = h_{basis})$, $(h_1 = 0, h_2 = 2h_{basis})$ en $(h_1 = 2h_{basis}, h_2 = 0)$.

De analyse wordt gedaan voor een eendimensionale situatie. Het stelsel partiële differentiaalvergelijkingen (6.12) en (6.13) kan dan worden geschreven als een stelsel gewone differentiaalvergelijkingen.

Om dit voor het twee-geulensysteem uit te werken, worden de evenwichtsdieptes geschreven als functie van de basisdiepte, waarbij voldaan wordt aan de evenwichtstoestanden.

$$h_{e1} = 2 \frac{Q_1}{Q_0} h_{basis} \quad (6.14)$$

$$h_{e2} = 2 \frac{Q_2}{Q_0} h_{basis} \quad (6.15)$$

Voor symmetrische takken levert dit het volgende stelsel vergelijkingen:

$$f(h_1, h_2) = \frac{dh_1}{dt} = \left(\frac{h_1^m}{h_1^m + h_2^m} * 2h_{basis} - h_1 \right) \quad (6.16)$$

$$g(h_1, h_2) = \frac{dh_2}{dt} = \left(\frac{h_2^m}{h_1^m + h_2^m} * 2h_{basis} - h_2 \right) \quad (6.17)$$

De parameter m is afhankelijk van de formulering van de bodemwrijving en altijd groter dan 1, zie vergelijking (6.5).

Om te onderzoeken of de evenwichtstoestanden stabiel zijn, wordt het stelsel vergelijkingen (6.16) en (6.17) gelineariseerd in de singuliere punten door de Jacobiaan te berekenen. Zo kan het gedrag van het systeem in de directe omgeving van dat evenwicht worden bekeken.

Het betreffende singuliere punt is stabiel als beide eigenwaarden van de Jacobiaan ($J(h_1, h_2)$) negatieve reële delen hebben (Boyce et al 1992). Kleine bodemverstoringen zullen dan afnemen in de tijd, dus de evenwichtstoestand is stabiel. Als één van de eigenwaarden een positief reëel deel bevat, dan is het evenwicht instabiel.

De Jacobiaan voor dit stelsel is als volgt gedefinieerd:

$$J(h_1, h_2) = \begin{pmatrix} \frac{df(h_1, h_2)}{dh_1} & \frac{df(h_1, h_2)}{dh_2} \\ \frac{dg(h_1, h_2)}{dh_1} & \frac{dg(h_1, h_2)}{dh_2} \end{pmatrix} \quad (6.18)$$

Wordt dit uitgewerkt, dan ontstaat het volgende stelsel vergelijkingen:

$$J(h_1, h_2) = \begin{pmatrix} \frac{2mh_{basis}h_2^m h_1^{m-1}}{h_1^{2m} + 2h_1^m h_2^m + h_2^{2m}} - 1 & \frac{-2mh_{basis}h_1^m h_2^{m-1}}{h_1^{2m} + 2h_1^m h_2^m + h_2^{2m}} \\ \frac{-2mh_{basis}h_1^m h_2^{m-1}}{h_1^{2m} + 2h_1^m h_2^m + h_2^{2m}} & \frac{2mh_{basis}h_2^m h_1^{m-1}}{h_1^{2m} + 2h_1^m h_2^m + h_2^{2m}} - 1 \end{pmatrix} \quad (6.19)$$

Als de drie evenwichtstoestanden worden ingevuld, ontstaan de volgende matrices:

$$J(2h_{basis}, 0) = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (6.20)$$

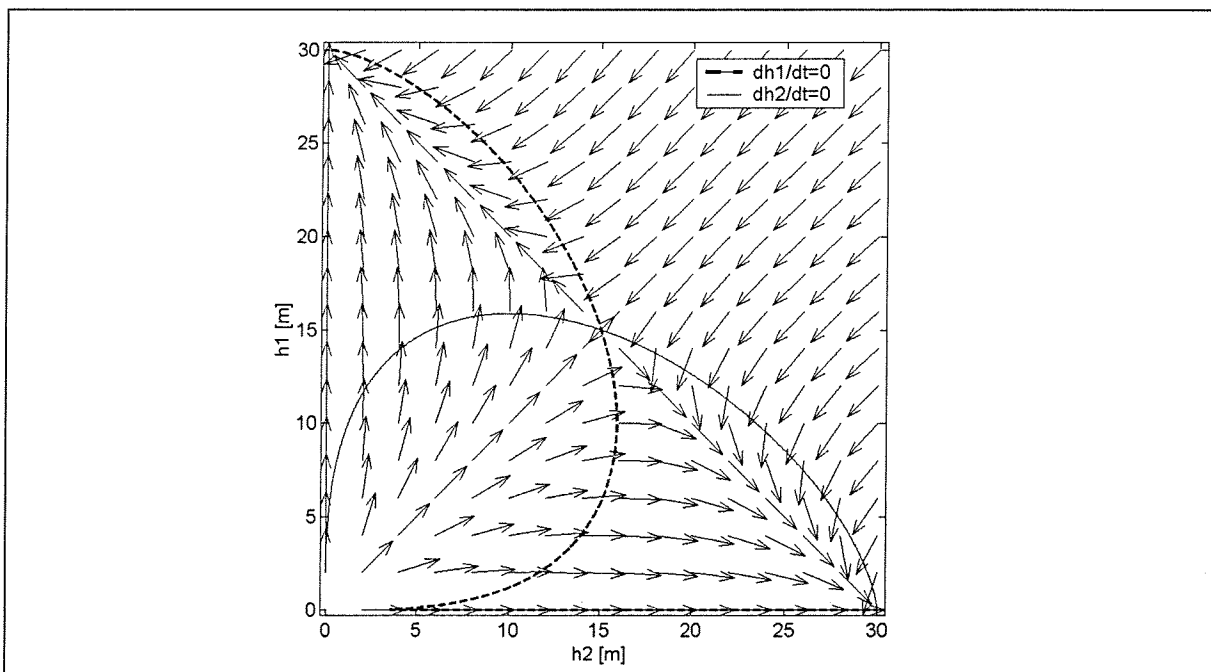
$$J(0, 2h_{basis}) = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (6.21)$$

$$J(h_{basis}, h_{basis}) = \begin{pmatrix} \frac{1}{2}m-1 & -\frac{1}{2}m \\ -\frac{1}{2}m & \frac{1}{2}m-1 \end{pmatrix} \quad (6.22)$$

Matrices (6.20) en (6.21) hebben negatieve eigenwaarden, namelijk $\lambda = -1$. Dit betekent dat zowel de evenwichtstoestand ($h_{e1} = 2h_{basis}$, $h_{e2} = 0$) als de evenwichtstoestand ($h_{e1} = 0$, $h_{e2} = h_{basis}$) stabiele oplossingen zijn.

De eigenwaarden van matrix (6.22) zijn $\lambda = -1$ en $\lambda = m-1$. Voor een stabiele oplossing geldt $\lambda > 0$, dus in dit geval $m < 1$. In bovenstaand vereenvoudigd geval is m altijd groter dan 1, afhankelijk van de formulering van de wrijvingsterm. De oplossing waarvoor geldt $h_{e1} = h_{e2} = h_{basis}$ is dus niet stabiel. Voor elke beginvoorwaarde (h_1, h_2) zal uiteindelijk één van de takken dichtgaan.

Het kwalitatieve gedrag van het systeem kan worden weergegeven in een fase-diagram van de differentiaalvergelijkingen (6.16) en (6.17), zie figuur 6.5. Het punt ($h_1 = h_{basis}$, $h_2 = h_{basis}$) is geen stabiel punt. Voor elke beginvoorwaarde (h_1, h_2) zal uiteindelijk één van de takken dichtgaan.



Figuur 6.5: Fase-diagram van de differentiaalvergelijkingen (6.16) en (6.17) met $m > 1$

De geometrie van de takken in het twee-geulensysteem is in het algemeen niet identiek. Maar de geometrie van de takken verandert niet het gedrag van de evenwichtstoestanden, alleen de ligging ervan.

De waarde van m in de waterbewegingsvergelijking beïnvloedt overigens niet de waarde van de evenwichtstoestanden, maar alleen het gedrag.

Zowel een grafische weergave als een wiskundige analyse van de modelvergelijkingen laten zien dat bij een eendimensionaal twee-geulensysteem met stationaire stroming altijd één van de twee takken dicht gaat. De oplossing van de modelvergelijkingen waarbij beide takken open blijven is geen stabiele oplossing.

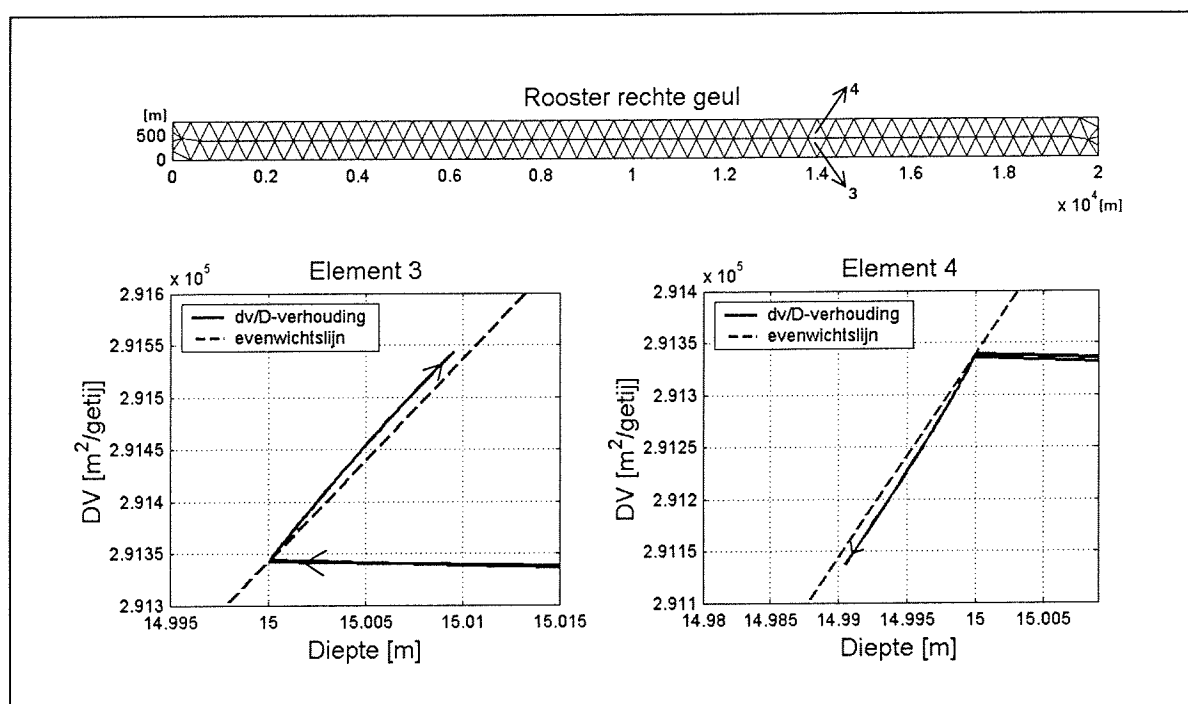
6.5 Vergelijking stabiliteitsanalyse met modelresultaten

In deze paragraaf wordt gekeken of de uitkomsten van de stabiliteitsanalyse voor een eendimensionale stationaire situatie overeenkomen met de modeluitkomsten van het vereenvoudigde tweedimensionale model en met het morfologische model van de Westerschelde.

6.5.1 Vereenvoudigde morfologische model

Paragraaf 6.2 laat zien dat roosterbanen in het vereenvoudigde morfologische model zich gaan verdiepen ten koste van andere banen. Bij een tweegeulensysteem gaat zelfs één van de takken geheel dicht en treden in de andere tak ook verdiepingen in het rooster op ten koste van andere roosterbanen in dezelfde tak. Het verdiepen van één roosterbaan ten koste van andere lijkt overeen te komen met de resultaten van de stabiliteitsanalyse in paragraaf 6.4.

Om de vergelijking met de stabiliteitsanalyse beter te kunnen maken is een rooster met twee elementen per breedterichting gemodelleerd, zie figuur 6.6.



Figuur 6.6: Stabiliteit in geul met twee roosterbanen, 70 iteraties

Aan de zeezijde wordt de waterstand opgelegd en aan de landzijde het debiet. Zo wordt de beschouwde situatie in paragraaf 6.4 goed benaderd. In de simulatie is wel sprake van een cyclisch getij, terwijl in de vereenvoudigde situatie gerekend is met stationaire stroming. De gehele bodem wordt tot 18 meter verdiept.

Eerst bereikt de bodem weer nagenoeg de basisdiepte van 15 meter. Daarna verdiept één van de twee stroken zich en de ander zandt aan totdat deze bijna geheel dicht is. De ontwikkeling van de verhouding tussen het dominant volume en de diepte verloopt niet volgens de evenwichtslijn. Een element met een kleine verdieping trekt debiet van een naastgelegen element, waardoor de verstoring zich versterkt.

De resultaten komen overeen met die resultaten gevonden volgens de stabiliteitsanalyse van een eendimensionaal tweegeulensysteem met stationaire stroming; de bodemdiepte in de ene strook gaat naar nul en in de andere naar twee keer de basisdiepte.

Het niet-bereiken van de evenwichtsbodemligging wordt in het vereenvoudigde morfologische model dus veroorzaakt door de modelvergelijkingen.

6.5.2 Morfologische model van de Westerschelde

Na tien iteraties met het morfologisch model van de Westerschelde zijn verschijnselen waar te nemen die ook optreden in het vereenvoudigde morfologische model.

Deze verschijnselen zijn verstoringen in het rooster en het dichtgaan van één tak van een twee-geulensysteem. In bijlage 4.1 zijn deze verschijnselen waar te nemen. Verstoringen in het rooster treden vooral op in de Everingen en het Middelgat. Omdat maar tien iteraties zijn gedaan, is niet met zekerheid te zeggen of daadwerkelijk één tak van een twee-geulensysteem dichtgaat. De ontwikkelingen duiden daar wel op.

Of bovenstaande verschijnselen verklaard kunnen worden met de stabiliteitsanalyse voor een eendimensionale, stationaire situatie is niet duidelijk. In de Westerschelde hebben de traagheidstermen in de ondiepwatervergelijkingen zeker invloed naast de wrijvings- en verhangstermen (Battjes 1997). Ook speelt dwarsuitwisseling van water door driedimensionale stroming een rol. Traagheidstermen en dwarsuitwisseling hebben waarschijnlijk invloed op de stabiliteit.

Opvallend is dat de puntenwolk tussen diepte en dominant volume, zoals verkregen met de SCALWEST-uitkomsten, een lineaire relatie laat zien (zie bijlage 3.1) en geen verband met een macht groter dan één, zoals verwacht wordt als de wrijvings- en verhangstermen overheersen in de waterbewegingsvergelijkingen. Het lineaire verband kan veroorzaakt zijn door de traagheidstermen en dwarsuitwisseling. Ondanks het lineaire verband tussen dominant volume en diepte, wordt het morfologische model van de Westerschelde niet stabiel. Kennelijk is de invloed van traagheidstermen en dwarsuitwisseling niet groot genoeg om een stabiele evenwichtsbodemligging te verkrijgen.

6.6 Mogelijke oplossingen stabiliteitsproblemen

Het is niet duidelijk of de stabiliteitsanalyse voor een eendimensionaal stationair geval geheel opgaat voor een tweedimensionale situatie met getijstroming. Om de invloed van de waterbewegingsvergelijking en dwarsuitwisseling te onderzoeken, worden aanpassingen gedaan op het vereenvoudigde model en het model van de Westerschelde. Deze aanpassingen zijn het opleggen van een debietverdeling en het vergroten van dwarsuitwisseling. Met het opleggen van een debietverdeling zullen de weerstands- en verhangterm niet overheersen in de waterbeweging. Paragraaf 6.6.1 beschrijft de resultaten van een opgelegde debietverdeling bij een eendimensionaal twee-geulensysteem met stationaire stroming en bij het vereenvoudigde morfologische model. Paragraaf 6.6.2 behandelt de invloed van meer dwarsuitwisseling van water op verstoringen in het rooster in het morfologische model van de Westerschelde.

6.6.1 Opgelegde debietverdeling

Als de debietverdeling over twee geulen wordt opgelegd, moeten deze twee geulen openblijven volgens het principe van het morfologisch model. Beide geulen blijven immers een debiet houden en kunnen dus niet dicht gaan.

De debietverdeling kan worden vastgelegd met de randvoorwaarden. Hoewel randvoorwaarden geen invloed behoren te hebben op de onbekende grootheden in het interessegebied, wordt hier toch onderzocht of randvoorwaarden het ontstaan van een evenwichtsbodemligging kunnen bewerkstelligen. Zo wordt in ieder geval meer inzicht verkregen in de mogelijkheden om een stabiele evenwichtsbodem te verkrijgen.

In paragraaf 6.2 en 6.5 bleek dat roosterbanen zich in het vereenvoudigde model kunnen verdiepen doordat ze meer debiet trekken dan andere banen. Een combinatie van randvoorwaarden die de debietverdeling corrigeert, kan hier een oplossing bieden. Een dergelijke combinatie bestaat uit twee zwakreflecterende randvoorwaarden (Riemann-randvoorwaarden).

Als een Riemann-randvoorwaarde wordt opgelegd, zal na een verstoring van de bodemdiepte ter plaatse van de rand het debiet zodanig worden aangepast dat de verstoring niet zal toenemen.

Analyse Riemann-vergelijkingen

Dit gebeurt volgens vergelijking (5.2), zie paragraaf 5.3.2:

$$q \pm c * \delta = \text{constant}$$

Als aan twee zijden van een eendimensionaal twee-geulensysteem bovenstaande zwakreflecterende randvoorwaarden worden opgelegd, dan wordt het volgende stelsel vergelijkingen gevormd, dat geldig is voor het gehele systeem:

$$q + c * \delta_{bov} = q_0 \quad (6.23)$$

$$q - c * \delta_{ben} = q_0 \quad (6.24)$$

waarin:

δ_{bov} = hoogte van de verstoring aan de bovenstroomse zijde [m]

δ_{ben} = hoogte van de verstoring aan de benedenstroomse zijde [m]

q_0 = debiet in beginsituatie [m^2/s]

Vergelijking (6.23) en (6.24) kunnen worden samengevoegd, zodat per tak geldt:

$$\Delta q = -\frac{1}{2} c (\delta_{bov} - \delta_{ben}) \quad (6.25)$$

waarin:

Δq = debietverschil tussen beginsituatie en na verstoring door Riemann-randvoorwaarde [m^2/s]

Bij twee symmetrische takken moet het verhang over beide takken gelijk zijn. Voor het verhang veroorzaakt door de Riemann-randvoorwaarde geldt voor beide takken het volgende:

$$i_{\delta} = \frac{-2\Delta q}{cL} - \frac{(\delta_{bov} - \delta_{ben})}{L} \quad (6.26)$$

waarin:

i_{δ} = verhang ten gevolge van verstoring [-]

L = lengte van tak 1 en 2 [m]

Voor het totale verhang over tak 1 en 2 geldt:

$$i = i_0 + i_{\delta} \quad (6.27)$$

waarin:

i_0 = initiële verhang in tak 1 en 2 [-]

De evenwichtsrelaties volgens vergelijking (6.9) en (6.10) uit paragraaf 6.3.2 gelden weer:

$$h_1 = q_1 * \frac{h_{basis}}{q_{basis}}$$

$$h_2 = q_2 * \frac{h_{basis}}{q_{basis}}$$

Ook moet weer gelden dat het debiet over de gehele breedte gelijk is aan de som van de debieten in de twee takken, volgens vergelijking (6.11):

$$Q_0 = Q_1 + Q_2$$

Het stelsel vergelijkingen (6.16) en (6.17) is niet meer geldig, omdat de hoogte van de verstoring mede het verhang bepaalt in de takken. In het geval van symmetrische takken is het verhang in deze takken dus niet per definitie gelijk. Dit levert het volgende stelsel vergelijkingen:

$$f(h_1, h_2) = \frac{dh_1}{dt} = \left(\frac{h_1^m * i_1^{1/2}}{h_1^m * i_1^{1/2} + h_2^m * i_2^{1/2}} \right) * 2h_{basis} - h_1 \quad (6.28)$$

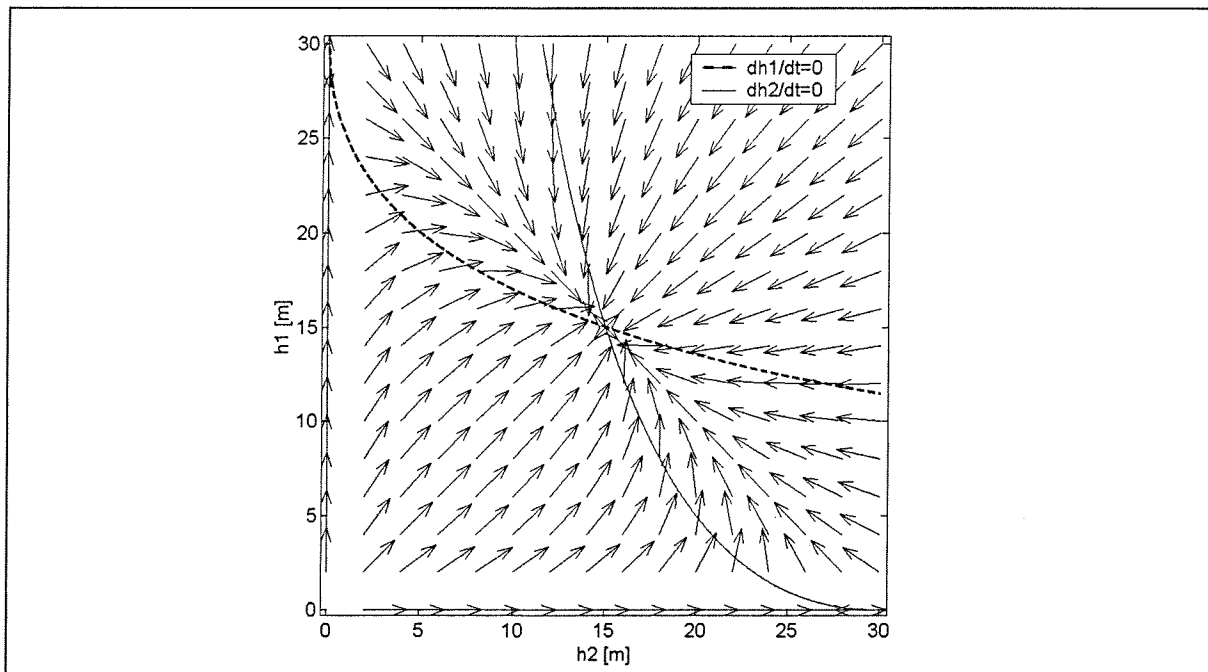
$$g(h_1, h_2) = \frac{dh_2}{dt} = \left(\frac{h_2^m * i_2^{1/2}}{h_1^m * i_1^{1/2} + h_2^m * i_2^{1/2}} \right) * 2h_{basis} - h_2 \quad (6.29)$$

Invullen van vergelijking (6.26) en (6.27) in bovenstaand stelsel levert het volgende:

$$f(h_1, h_2) = \frac{dh_1}{dt} = \left(\frac{h_1^m}{h_1^m + h_2^m} \right) * \left(1 - \frac{2\Delta q}{i_0 L c} \right)^{1/2} * 2h_{basis} - h_1 \quad (6.36)$$

$$g(h_1, h_2) = \frac{dh_2}{dt} = \left(\frac{h_2^m}{h_1^m + h_2^m} \right) * \left(1 - \frac{2\Delta q}{i_0 L c} \right)^{1/2} * 2h_{basis} - h_2 \quad (6.37)$$

Van dit stelsel zijn de oplossingen en de Jacobiaan niet eenvoudig te bepalen. Met behulp van Matlab is dit iteratief gedaan. In figuur 6.7 is het fase-diagram weergegeven, dat de oplossing en het gedrag van deze oplossing weergeeft.



Figuur 6.7: Fasediagram van de differentiaalvergelijkingen (6.36) en (6.37) met $m = 1/2$

Uit dit diagram blijkt dat alleen de situatie met twee takken op de basisdiepte een oplossing is en dat deze oplossing tevens stabiel is.

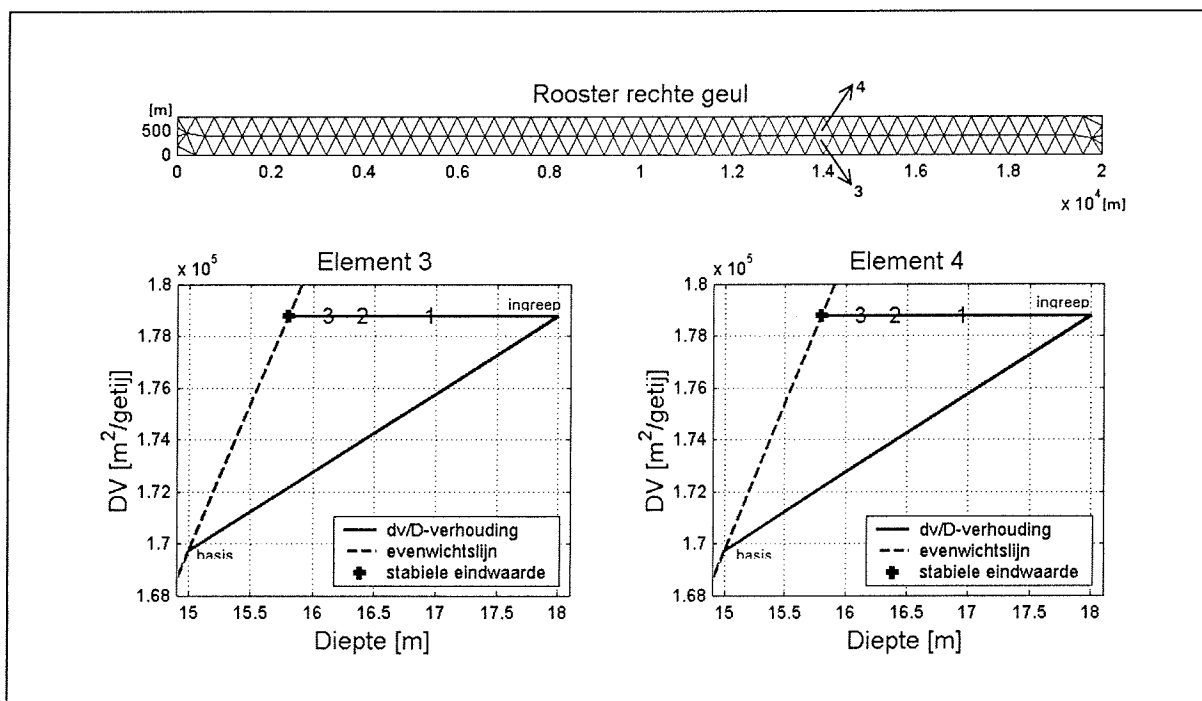
Voor een asymmetrische beginsituatie zal de ligging van het stabiele punt veranderen, maar het gedrag van de oplossing verandert niet.

Om te verifiëren of deze situatie daadwerkelijk op kan treden, wordt een situatie met twee Riemann-randvoorwaarden gesimuleerd in het vereenvoudigde morfologische model.

Toepassen Riemann-randvoorwaarde op eenvoudig rooster

Een geul met twee elementen per breedterichting is gemodelleerd. Dit is dezelfde situatie als in paragraaf 6.5.1, figuur 6.5. Nu worden er twee zwakreflecterende randvoorwaarden opgelegd met aan de zeezijde een cyclisch getij met een waterstandsamplitude van 2 meter en een snelheidsamplitude van 0,4 m/s. Aan de zeezijde wordt de bodemdiepte op de rand vastgehouden, zodat het gehele systeem zich niet eindeloos kan verdiepen. Wederom worden beide roosterbanen verdiept tot 18 meter.

De modelresultaten bevestigen bovenstaande analyse; met twee zwakreflecterende randvoorwaarden blijven beide geulen open. Dit is weergegeven in figuur 6.8.



Figuur 6.8: Stabiliteit in geul met twee roosterbanen en twee Riemann-randvoorwaarden, 35 iteraties

Toepassen Riemann-randvoorwaarde op fijn rooster

Bij een fijner en onregelmatiger rooster heeft de Riemann-rand geen invloed meer in de gehele bak. Dit wordt getoond aan de hand van het twee-geulensysteem, zoals besproken in paragraaf 5.4 en paragraaf 6.2.3. Hetzelfde rooster wordt gebruikt voor een simulatie waarbij aan weerszijde van de bak een zwakreflecterende randvoorwaarde is opgelegd, zie bijlage 6.4. De randvoorwaarden hebben dan geen invloed meer op de debietverdeling in de gehele bak en na 280 iteraties is één tak bijna geheel dicht. Hetzelfde beeld is dan te zien als bij de combinatie van een waterstandrandvoorwaarde en een zwakreflecterende rand; verstoringen in het rooster treden op en één van de twee geulen gaat dicht (zie bijlage 6.3).

Het toepassen van twee zwakreflecterende randvoorwaarden geeft bij een zeer eenvoudig rooster dus een realistische stabiele evenwichtsbodem. De Riemann-vergelijking heeft dan meer invloed dan de waterbewegingsvergelijking.

Het opleggen van een andere waterbewegingsvergelijking via de randvoorwaarden is echter geen oplossing voor het stabiliteitsprobleem, omdat in een goed werkend model de randvoorwaarden geen invloed behoren te hebben op de onbekende grootheden in het interessegebied. Wel maakt dit inzichtelijk dat een andere vorm van de waterbewegingsvergelijkingen dan die waarin weerstand en verhang overheersen invloed heeft op de stabiliteit van het systeem.

6.6.2 Dwarsuitwisseling van water

In de Westerschelde vindt in werkelijkheid dwarsuitwisseling van water plaats. De roosterverstoringen die in het morfologische model van de Westerschelde en in het vereenvoudigde morfologische model optreden, kunnen worden uitgevlakt met meer dwarsuitwisseling. Meer dwarsuitwisseling wordt verkregen door het verhogen van de turbulente viscositeit of door $2\frac{1}{2}D$ of $3D$ te rekenen.

Turbulente viscositeit

In tweedimensionale stroming wordt aangenomen dat de horizontale snelheidscomponenten niet teveel variëren over de vertikaal. Als dit niet meer verwaarloosbaar is, kan dit met een viscositeitscoëfficiënt (ook wel impuls-diffusiecoëfficiënt) ν enigszins in rekening worden gebracht (Rijkswaterstaat 1987). De turbulente viscositeitscoëfficiënt kan waarden hebben van $\nu \sim 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ in laminaire stroming tot $\nu \sim 10 \text{ m}^2/\text{s}$ in sterk dispersieve stroming, dus stroming waar ruimtelijke herverdeling van impuls plaatsvindt. Dit laatste kan optreden in bijvoorbeeld een rivierbocht of rond havendammen. Het meenemen van turbulente viscositeit heeft alleen effect als er sprake is van variatie in snelheidsgradiënten.

In het waterbewegingsmodel FINEL2D, dat gebruikt wordt in het vereenvoudigde morfologische model, kan een verandering in de turbulente viscositeit niet worden meegenomen. Daarom is deze invloed niet onderzocht met het vereenvoudigde morfologische model.

In SCALWEST, het waterbewegingsmodel van het morfologische model van de Westerschelde, is een simulatie gedaan, waarbij de viscositeit vergroot is van $1 \text{ m}^2/\text{s}$ tot $10 \text{ m}^2/\text{s}$. Verstoringen in het rooster die in de simulatie met een turbulente viscositeit van $1 \text{ m}^2/\text{s}$ nog voorkomen, zijn niet waargenomen bij de simulatie met een turbulente viscositeit van $10 \text{ m}^2/\text{s}$. De resultaten van deze simulatie zijn opgenomen in bijlage 6.5.

Te zien is dat het verhogen van de turbulente viscositeitscoëfficiënt de variatie in de waterbeweging en dus de bodemveranderingen enigszins uitsmeert en dat roosterverstoringen minder zichtbaar zijn. In hoeverre roosterverstoringen lokaal kunnen worden uitgevlakt is niet gekwantificeerd. Wel is duidelijk dat het dichtgaan van één geul van een twee-geulensysteem zonder onderlinge uitwisseling niet kan worden tegengegaan door het verhogen van de turbulente viscositeit.

Een vergroting van de turbulente viscositeit heeft invloed op de gehele waterbeweging, zoals berekend met SCALWEST. Dit resulteert in andere waterstanden dan met een lagere turbulente viscositeit, zodat het waterbewegingsmodel opnieuw afgeregeld moet worden. Hier is verder niet naar gekeken in dit onderzoek.

Driedimensionale stromingsverschijnselen

Driedimensionale stromingsverschijnselen in bochten en rond strekdammen of in diepe kuilen zorgen voor meer dwarsuitwisseling, waardoor de stroming minder specifieke banen in het rooster kan volgen. Driedimensionale stromingsverschijnselen kunnen niet worden gemodelleerd in een tweedimensionaal model, maar wel in een $2\frac{1}{2}$ dimensionaal of driedimensionaal stromingsmodel. Dergelijke modellen zijn zeer rekenintensief.

Deze stromingsverschijnselen zouden een oplossing kunnen bieden voor de stabiliteitsproblemen. Dit is niet verder uitgezocht in dit onderzoek.

6.6 Conclusies

In de simulaties met het vereenvoudigde morfologische model wordt geen realistische stabiele evenwichtsbodemligging bereikt.

Het niet-bereiken van de evenwichtsbodem in de gesimuleerde vereenvoudigde situaties hangt samen met de modelvergelijkingen. Dit is onderzocht met behulp van een eendimensionaal twee-geulensysteem met stationaire stroming. De modelvergelijkingen van dit systeem hebben drie fysisch realistische oplossingen: één waarbij beide takken open blijven op de basiswaarde en twee waarbij één van de takken dichtgaat.

Een wiskundige analyse van de modelvergelijkingen laat zien dat bij een eendimensionaal tweegeulensysteem met stationaire stroming altijd één van de twee takken dicht gaat. De oplossing van de modelvergelijkingen waarbij beide takken open blijven is geen stabiele oplossing.

De resultaten van het vereenvoudigde morfologische model en enkele verschijnselen in de resultaten van het morfologische model van de Westerschelde komen overeen met de resultaten van de stabiliteitsanalyse van een eendimensionaal tweegeulensysteem met stationaire stroming. Maar in het morfologische model van de Westerschelde zijn andere termen dan het verhang en de wrijving in de bewegingsvergelijking ook van belang, zoals de traagheidstermen en dwarsuitwisseling. De invloed van deze extra termen in de modelvergelijkingen van een tweedimensionaal model op de stabiliteit is niet precies duidelijk.

Mogelijke oplossingen om een realistische evenwichtsbodemligging te bereiken, een opgelegde debietverdeling en meer dwarsuitwisseling, zijn onderzocht. Bij een opgelegde debietverdeling in een eendimensionaal geval of in een tweedimensionaal geval met een zeer eenvoudig rooster overheersen de weerstands- en verhangtermen in de waterbewegingsvergelijkingen niet, waardoor een realistische stabiele evenwichtsbodemligging kan worden bereikt. In het morfologische model van de Westerschelde is het niet mogelijk de waterbeweging in het gehele systeem te sturen door de randvoorwaarden. Een andere vorm van de waterbewegingsvergelijkingen dan die waarin de weerstand en het verhang overheersen heeft wel invloed op de stabiliteit van het systeem, maar het is niet duidelijk hoe groot de invloed is van deze andere termen in het morfologisch model van de Westerschelde. Vergroten van de dwarsuitwisseling van water door het verhogen van de turbulente viscositeit is een manier om verstoringen in het rooster op kleine schaal uit te vlakken. Dit draagt niet bij aan een realistische stabiele bodemligging in meer-geulensystemen.

7. Oorzaken spreiding rond evenwichtsrelatie

7.1 Inleiding

In een gedragsmodel is een empirische evenwichtsrelatie die de evenwichtssituatie goed beschrijft van groot belang. Om meer inzicht te krijgen in hoe nauwkeurig de evenwichtstoestand in de Westerschelde wordt beschreven door de lineaire evenwichtsrelatie, worden in dit hoofdstuk oorzaken voor de spreiding rond de evenwichtsrelatie onderzocht. Eenduidige afwijkingen geven processen weer die de evenwichtsrelatie tussen diepte en dominant volume voor punten in de Westerschelde beïnvloeden. Met deze processen kan de evenwichtsrelatie worden aangepast. Hier wordt in hoofdstuk 8 nader op ingegaan.

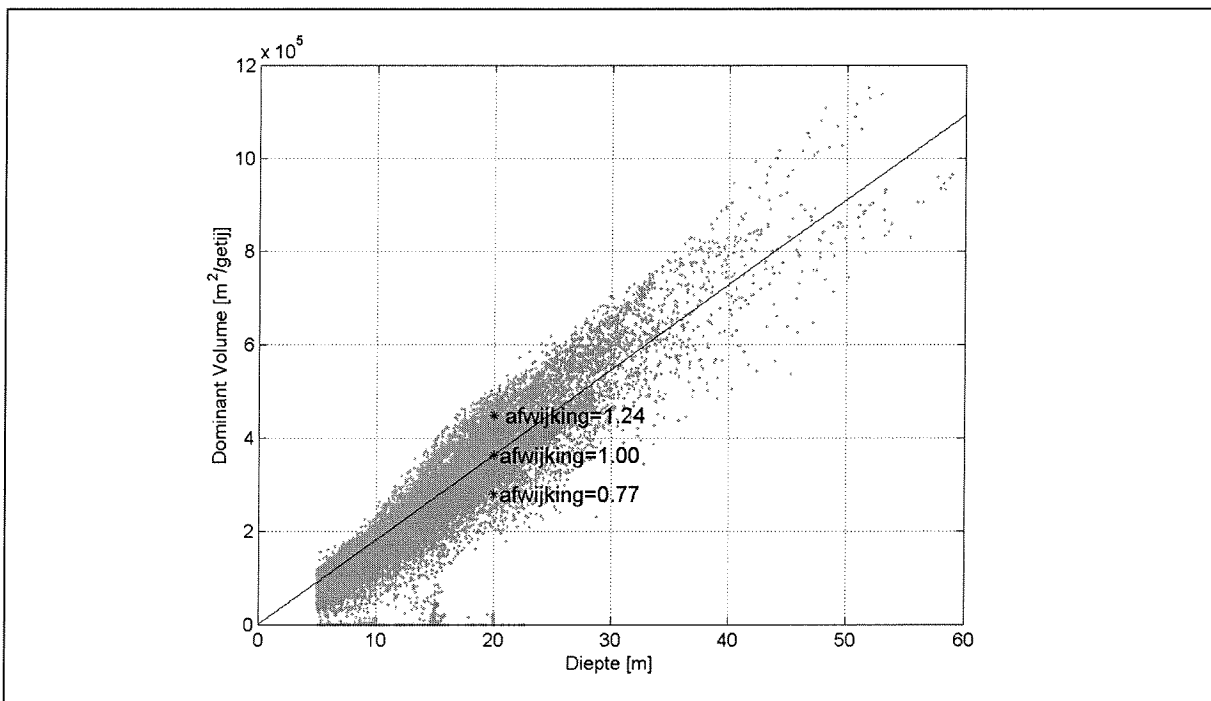
De afwijking van de lineaire evenwichtslijn is als volgt gedefinieerd:

$$afw = \frac{dv}{D * 18216} \quad (7.1)$$

waarin:

afw = afwijking van de evenwichtslijn [-]
18216 = constante, zie vergelijking (3.28) [m/getij]

In figuur 7.1 zijn drie punten weergegeven met de bijbehorende waarden voor de afwijking.



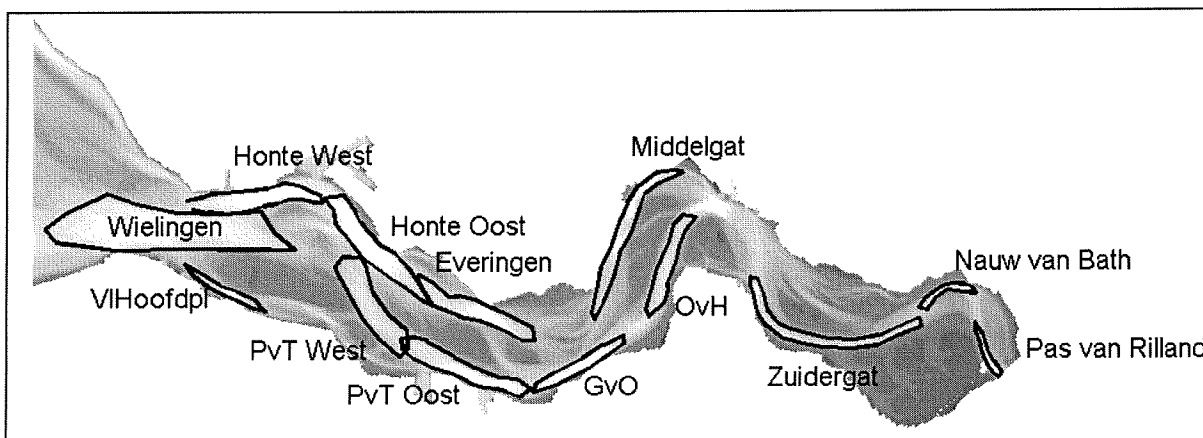
Figuur 7.1: Punten met afwijkingen ten opzichte van de evenwichtslijn

Het onderzoek in dit hoofdstuk wordt per geul of geuldeel uitgevoerd. Daarvoor zijn verschillende eenheden gedefinieerd in de Westerschelde. Dit zijn diepere geuldelen tussen twee drempelgebieden, die zo min mogelijk beïnvloed worden door kortsluitgeulen. Onderstaande eenheden zijn gedefinieerd:

- Wielingen
- Honte West
- Honte Oost
- Vaarwater langs Hoofdplaat (VIHoofpl)

- Pas van Terneuzen West (PvT West)
- Pas van Terneuzen Oost (PvT Oost)
- Everingen
- Gat van Ossensisse (GvO)
- Overloop van Hansweert (OvH)
- Middelgat
- Zuidergat
- Nauw van Bath
- Pas van Rilland

Deze zijn weergegeven in figuur 7.2 en in bijlage 7.1.



Figuur 7.2: Overzicht eenheden in de Westerschelde

Paragraaf 7.2 beschrijft menselijke ingrepen als oorzaak voor afwijkingen van de evenwichtsrelatie. Paragraaf 7.3 bekijkt afwijkingen ten gevolge van afwijkende sedimenteigenschappen. In paragraaf 7.4 wordt het volume in de niet-dominante fase bekeken. Tot slot komt in paragraaf 7.5 de geometrie aan de orde als oorzaak voor afwijkingen van de evenwichtsrelatie.

Golven hebben volgens Gerritsen en De Jong (1983) alleen een aanzienlijke invloed op de morfologie in de buitendelta. Het meest westelijk gedefinieerde geuldeel is de Wielingen. Gerritsen en De Jong constateerden dat een doorsnede ter plaatse van de Wielingen nauwelijks wordt beïnvloed door de golfwerking (zie paragraaf 3.3.2). Dit verschijnsel wordt dus niet meegenomen in dit onderzoek.

7.2 Menselijke ingrepen

Geulen die kunstmatig op een bepaalde diepte of breedte worden gehouden, wijken mogelijk af van de evenwichtsrelatie. Deze geulen bevinden zich namelijk niet in een natuurlijke evenwichtstoestand.

Dit wordt onderzocht met behulp van gegevens betreffende oeververdedigingen en geulbestortingen alsmede stort- en baggergebieden van het Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ) in Middelburg. In bijlage 7.1 zijn deze gebieden aangegeven. De gegevens zijn uit 1996 afkomstig, omdat de bodem die gebruikt is in het model ook uit 1996 komt.

Ingrepen worden onderverdeeld in baggergebieden, stortgebieden en gebieden waar de geulwand verdedigd is.

7.2.1 Baggergebieden

In de Westerschelde wordt gebaggerd, omdat de scheepvaart diepere en bredere doorvaartprofielen nodig heeft dan het estuarium zelf kan onderhouden. Voornamelijk ter plaatse

van drempels in de vaarroute wordt regelmatig gebaggerd. Gebieden waarvan in 1996 gedeelten werden gebaggerd zijn: de Honte West, de Honte Oost, de Pas van Terneuzen West, de Pas van Terneuzen Oost, het Gat van Ossensisse, de Overloop van Hansweert, het Zuidergat en de Pas van Rilland (zie bijlage 7.1). Sinds de grootschalige verdieping van 1970 tot 1975 bedraagt de totale baggeromvang ongeveer 10 miljoen m³ per jaar (Groenewoud 1998). Een tweede grootschalige verdieping, de 48'/43'-verdieping, is gestart in 1997 en valt dus buiten dit onderzoek.

In baggergebieden mag een lagere waarde voor de afwijking van de evenwichtslijn worden verwacht dan in gebieden waar niet wordt gebaggerd, omdat de diepte kunstmatig groter wordt gehouden dan de natuurlijke evenwichtsdiepte. Deze waarde is niet veel lager, omdat in de meeste baggergebieden niet meer dan een meter wordt gebaggerd.

Een afwijking is voor de meeste baggergebieden niet waar te nemen als de verhouding tussen dominant volume en diepte voor de gebaggerde punten wordt uitgezet in de puntenwolk van het betreffende geuldeel (zie bijlage 7.4 t/m 7.7, 7.9, 7.10 en 7.14).

Opgemerkt moet worden dat er baggergebieden zijn, waar geen geuldeel is gedefinieerd. Deze gebieden (bijvoorbeeld ter plaatse van de drempel van Hansweert en de drempel van Bath) beïnvloeden de nabijgelegen geuldelen wel, vooral als er aanzienlijk wordt gebaggerd. Dit is echter niet inzichtelijk te maken in de puntenwolk.

7.2.2 Stortgebieden

Ongeveer 1 à 2 miljoen m³ van het gebaggerde materiaal wordt jaarlijks onttrokken voor zandwinning, maar het grootste gedeelte wordt teruggestort in de Westerschelde. Het materiaal wordt voornamelijk in nevengeulen en langs eroderende geuloevers gestort. De stortgebieden maken onderdeel uit van de Honte Oost, de Everingen, de Overloop van Hansweert en het Middelgat (zie bijlage 7.1).

De diepte in deze gebieden is kleiner dan de natuurlijke diepte, waardoor punten in deze gebieden een grotere waarde voor de afwijking van de evenwichtslijn zouden moeten hebben. Dit is niet waarneembaar in bijlage 7.5, 7.8, 7.10 en 7.11.

7.2.3 Geulwandverdedigingen

Voor het oostelijke deel van de Westerschelde kent verschillende plaatsen waar de geulwanden verdedigd zijn. Enkele hiervan bevinden zich in de gedefinieerde geuldelen.

Geuldelen waarvan de wanden in 1996 gedeeltelijk bestort zijn volgens de gegevens van het RIKZ, zijn de Pas van Terneuzen Oost, de Overloop van Hansweert, het Middelgat en de Pas van Rilland (zie bijlage 7.1).

De meeste geulbestortingen zijn aangebracht om erosie tegen te gaan. Daarom kan worden verwacht dat punten die bestort zijn een kleinere diepte hebben dan de evenwichtsdiepte, waardoor een grotere waarde voor de afwijking van de evenwichtslijn zou moeten gelden. Deze afwijking is niet waar te nemen (zie bijlage 7.7, 7.10, 7.11 en 7.14).

Langs de oevers van de Westerschelde bevinden zich verschillende strekdammen, die niet zijn geschematiseerd in SCALWEST. In de nabijheid van deze strekdammen kunnen afwijkingen van de evenwichtslijn optreden in de puntenwolk. Gebieden die dit betreft, bevinden zich in de Honte West, het Vaarwater langs de Hoofdplaat en de Overloop van Hansweert. In bijlage 7.4, 7.10 en 7.15 is niet waar te nemen dat deze punten een grotere waarde voor de afwijking van de evenwichtslijn hebben. Wel liggen de verdedigde gebieden in de Honte West, het Gat van Ossensisse, het Nauw van Bath en de Pas van Rilland enigszins afwijkend ten opzichte van de rest van de puntenwolk van het betreffende geuldeel (zie bijlage 7.4, 7.9, 7.13, 7.14).

Gebieden waar ingrepen plaatsvinden vertonen dus geen duidelijk verband met de lineaire evenwichtslijn.

Om het morfologisch model te verfijnen, zouden punten met geulwandverdedigingen of punten waar continu gebaggerd of gestort wordt op diepte kunnen worden gehouden. De diepte van deze punten kan zich immers niet aanpassen richting de evenwichtsdiepte. Ook geuldelen in de nabijheid van gebieden waar menselijke ingrepen plaatsvinden, zouden op een aangepaste diepte

kunnen worden gehouden in het model. De diepte van punten waar eenmalig wordt gebaggerd en gestort kan zich juist wel weer naar de evenwichtsdiepte ontwikkelen.

7.3 Sedimenteigenschappen

Sedimentatie en erosie, en dus de morfologie van de geul, hangen samen met sedimenteigenschappen. Punten met afwijkende sedimenteigenschappen kunnen een andere evenwichtsdiepte hebben dan volgens de lineaire evenwichtsrelatie geldt.

In de ondergrond van de Westerschelde worden Tertiaire, Pleistocenen en Oud-Holocene lagen aangetroffen. In verreweg het grootste gedeelte van de geulen komt zand voor met een d_{50} (de diameter waarbij 50% van het gewicht fijner is dan die maat) van 200 μm . Volgens de sedimentclassificatie van American Geophysical Union is dit fijn zand (zie bijlage 7.18). Een kaart van de Westerschelde met daarop aangegeven de korreldiameters is opgenomen in bijlage 7.2. Op enkele plaatsen is verkitting van grof sediment opgetreden, waardoor schelpenrug is ontstaan. Ook bevindt zich op enkele plaatsen sterk geconsolideerde klei. In paragraaf 7.3.1 wordt gekeken naar plaatsen waar deze klei zich bevindt. Paragraaf 7.3.2 beschrijft gebieden met grof sediment, waarbij de nadruk wordt gelegd op schelpenrug.

7.3.1 Klei

Op enkele plaatsen in de Westerschelde bevindt zich overgeconsolideerde Boomse klei, een zeer erosiebestendige ondergrond. Deze Boomse klei wordt door de diepe ligging vooral aangesneden door de diepere geulen. Dit kan tot een belemmering van uitschuring leiden.

De punten in het morfologisch model waar zich Boomse klei bevindt, zouden gezien de slechte erodeerbaarheid een waarde voor de afwijking van de evenwichtslijn moeten hebben die groter is dan punten waar fijn zand voorkomt in dat geuldeel; bij een bepaald dominant volume hoort een kleinere bodemdiepte.

Volgens Winterwerp (2000) wordt in de Pas van Terneuzen een laag Boomse klei aangesneden. Dit gebied is terug te vinden in de sedimentgegevens van het Rijksinstituut voor Kust en Zee te Middelburg. Deze punten hebben echter geen hogere waarde voor de afwijking van de evenwichtslijn dan de overige punten in de Pas van Terneuzen Oost (zie bijlage 7.7).

Ook in het diepste gedeelte van de Wielingen wordt Boomse klei aangesneden (Winterwerp 2000). Van dit gebied zijn geen nauwkeurige sedimentgegevens bekend. De punten in de Wielingen vertonen geen opvallende afwijking van de evenwichtslijn (zie bijlage 7.3), zodat de invloed van de Boomse klei niet duidelijk is.

Volgens de sedimentgegevens van het RIKZ bevindt zich ook klei in de Honte Oost. Volgens de sedimentclassificatie (zie bijlage 7.18) heeft klei een korreldiameter van 2 μm of kleiner. Volgens Van Rijn (1983) is er sprake van cohesief gedrag als meer dan 10% van de massa van het monster een korreldiameter kleiner dan 2 μm heeft. De punten in de Honte Oost waar dit voor geldt zijn onderzocht. Deze punten vertonen geen duidelijke afwijking van de evenwichtslijn (zie bijlage 7.5).

In de geuldelen ten oosten van de Honte Oost komt geen noemenswaardige hoeveelheid klei voor.

7.3.2 Grof sediment

In de Honte komen plaatselijk metersdikke schelpenbanken voor. Dit is zeer grof sediment dat sterk verkit is. Het is niet exact bekend wat de sedimenteigenschappen van deze laag zijn, maar deze schelpenbanken zullen meer weerstand tegen erosie bieden dan het bodemmateriaal dat op overige plaatsen in de Honte voorkomt. Dit betekent een hogere waarde voor de afwijking van de evenwichtslijn voor deze punten. Dit is niet te zien in de puntenwolk van de Honte Oost (zie bijlage 7.5). Wel is te zien dat ter plaatse van de schelpenrug de diepte begrensd is. In de Honte West komt schelpenrug niet voor.

Overig grof sediment bevindt zich in de Pas van Terneuzen West en de Everingen. Volgens de sedimentclassificatie in bijlage 7.18 heeft grof sediment een korreldiameter tussen de 1 en 2 mm. Gekeken is naar punten waarvan meer dan 50% van het monster uit grof zand bestaat. Door de grotere korrels zijn deze gebieden moeilijker erodeerbaar, waardoor een hogere waarde voor de afwijking van de evenwichtslijn mag worden verwacht. In bijlage 7.6 en 7.8 is dit niet waar te nemen. De punten liggen zelfs zeer goed in de puntenwolk van het gedefinieerde geuldeel.

Afwijkende sedimenteigenschappen hebben geen eenduidig verband met afwijkingen van de evenwichtslijn. Wel hebben de kleigebieden en de punten in het gebied met schelpenrug een gespreide ligging ten opzichte van de puntenwolk van het betreffende geuldeel. Als deze gebieden zouden kunnen worden meegenomen in het morfologisch model, hebben ze wel invloed op de stabiliteit van het model. De diepteontwikkeling ter plaatse van slecht erodeerbare lagen wordt immers begrensd.

7.4 Volume in de niet-dominante fase

In deze paragraaf wordt de invloed van het volume in de niet-dominante fase op de morfologie van een geul en op de evenwichtsrelatie besproken. Meenemen van dit ondergeschikte volume doet afbreuk aan het idee dat het volume in de dominante fase van het getij de vorm van de geul bepaalt, zoals wordt toegepast in het morfologische model voor de Westerschelde.

In paragraaf 7.4.1 wordt een relatie per geuldeel besproken, die de invloed van het volume in de niet-dominante fase weergeeft. Paragraaf 7.4.2 beschrijft een algemene vorm van een relatie tussen het restdebiet en de afwijking van de lineaire evenwichtslijn.

7.4.1 Invloed per geuldeel

De invloed van het volume in de niet-dominante fase wordt onderzocht door het restdebiet te onderzoeken. Het restdebiet door een roosterpunt is het verschil tussen het dominante volume en het volume in de niet-dominante fase door dat roosterpunt in $[m^2/s]$. Het restdebiet representeert de mate van dominantie. Een roosterpunt met een grote dominantie, dus met een groot dominant volume en een klein niet-dominant volume, heeft ook een groot restdebiet.

Per geuldeel is een verband afgeleid tussen het restdebiet gedeeld door de diepte en de afwijking van de evenwichtslijn. Het restdebiet is gedeeld door de diepte om zeer diepe punten goed mee te kunnen nemen in een relatie. Gesteld is dat een verband een goede correlatie heeft, als de correlatiecoëfficiënt 0,75 of hoger is.

Voor geuldelen in het oostelijk deel blijkt in eerste instantie geen goede correlatie te bestaan. In dit gedeelte bevinden zich veel gebieden waar menselijke ingrepen zijn gepleegd (zie paragraaf 7.3.1 en bijlage 7.1). Als de gebieden met ingrepen worden geëlimineerd, wordt de correlatie beter voor de meeste oostelijke geuldelen. Ook verwijdering van gebieden waar de sedimentgegevens afwijken geeft een betere correlatie. Voor de meeste geuldelen bestaat alleen een goede correlatie voor dieptes groter dan 15 meter.

Uiteindelijk wordt voor 8 van de 13 gedefinieerde geuldelen een goede correlatie gevonden tussen de afwijking van de evenwichtslijn en het restdebiet gedeeld door de diepte. De uiteindelijk gevonden verbanden met bijbehorende correlatiecoëfficiënt zijn weergegeven in tabel 7.1.

Tabel 7.1: Relaties tussen afwijking evenwichtslijn en restdebiet/diepte

Geul	Dominantie	Verband $y = \text{afwijking evenwichtslijn [l]}$ $x = \text{restdebiet/diepte [m}^2/\text{s]}$	Correlatiecoëfficiënt tussen x en y
Wielingen	half vloed-, half ebdominant	$D > 20$: vl: $y = 9,91e-6 * x + 0,930$ eb: $y = -4,01e-5 * x + 0,884$	vl: 0,442 eb: 0,494
Honte West	ebdominant	$y = -3,45e-5 * x + 0,935$	0,857
Honte Oost	vloeddominant	$y = 4,40e-5 * x + 0,853$	0,781
Pas van Terneuzen West	ebdominant	$y = -3,27e-5 * x + 0,847$	0,887
Pas van Terneuzen Oost	ebdominant	$y = -6,51e-5 * x + 0,728$	0,760
Everingen	vloeddominant	$D > 20$: $y = 1,78e-5 * x + 1,05$	0,804
Gat van Ossensisse	half vloed-, half ebdominant	vl: $y = 2,37e-5 * x + 1,15$ eb: $y = -1,12e-5 * x + 1,06$	vl: 0,366 eb: 0,174
Overloop van Hansweert	vloeddominant	$y = 2,39e-5 * x + 1,18$	0,788
Middelgat	ebdominant	$y = -5,12e-5 * x + 0,809$	0,760
Zuidergat	half vloed-, half ebdominant	vl: $y = 3,45e-6 * x + 1,23$ eb: $y = -2,73e-5 * x + 1,28$	vl: 0,089 eb: 0,534
Nauw van Bath	ebdominant	$y = -2,38e-5 * x + 0,876$	0,859
Pas van Rilland	half vloed-, half ebdominant	vl: $y = 1,60e-5 * x + 0,933$ eb: $y = 1,40e-5 * x + 0,981$	vl: 0,470 eb: 0,423
Vaarwater langs Hoofdplaat	half vloed-, half ebdominant	$D > 5$: vl: $y = 5,35e-5 * x + 0,667$ eb: $y = -3,13e-5 * x + 0,766$	vl: 0,544 eb: 0,559

■ = correlatiecoëfficiënt > 0,75

Deze verbanden zijn dus alleen geldig voor punten dieper dan 15 meter. Alleen voor de Wielingen, de Everingen en het Vaarwater langs de Hoofdplaat is met een andere diepte een relatie bepaald. Voor de Wielingen en de Everingen is dit een diepte van 20 meter, omdat bij een diepte van 15 meter geen goed gecorreleerd verband werd gevonden. In het Vaarwater langs de Hoofdplaat is een diepte van 5 meter aangenomen. Deze geul bevat namelijk merendeels punten ondieper dan 15 meter.

De oorzaak voor het ontbreken van een goed gecorreleerd verband voor de vijf overige geuldelen is niet geheel duidelijk. Opvallend is dat binnen deze vijf geuldelen zowel ebdominante als vloeddominante delen bestaan. Mogelijk is de invloed van de dominantie op de evenwichtsrelatie niet zo groot als in dezelfde geul een ebdominant en een vloeddominant deel naast elkaar bestaan. Ook bevinden de geuldelen met een lage correlatiecoëfficiënt zich dichtbij bagger- en stortgebieden (zie bijlage 7.1). Deze bagger- en stortgebieden liggen niet in de geuldelen zelf, maar zullen de morfologie van de nabijgelegen geuldelen beïnvloeden. Dit geldt vooral voor het Zuidergat en de Pas van Rilland. De invloed van deze bagger- en stortgebieden is niet inzichtelijk te maken in de puntenwolk. Het niet duidelijk waarom de gevonden relaties niet goed gecorreleerd zijn voor punten ondieper dan 15 meter.

7.4.2 Algemene relatie

Uit de vergelijkingen per geuldeel in tabel 7.1 blijkt dat bij een restdebiet gelijk aan nul de waarde van de afwijking van de evenwichtslijn aanzienlijk kleiner is dan bij een grote absolute waarde van het restdebiet. Dit betekent dat bij een klein restdebiet de diepte te groot is in verhouding tot het dominant volume. Bij een grote absolute waarde van het restdebiet is de waarde van de afwijking van de evenwichtslijn maximaal, wat inhoudt dat de optredende diepte klein is ten opzichte van het optredende dominant volume.

Hier kan een algemene vergelijking voor worden afgeleid van de volgende vorm:

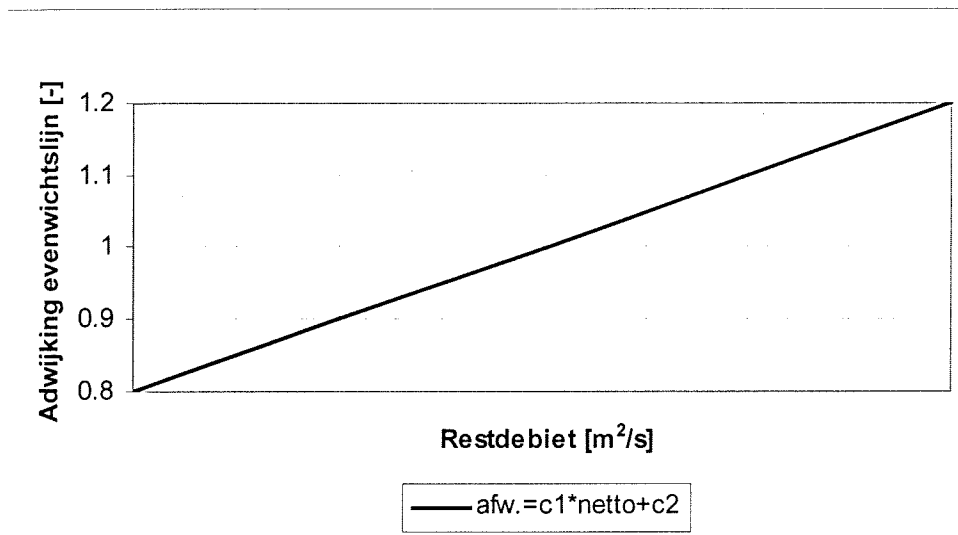
$$A_{fw} = c_1 * |\text{netto}| + c_2 \quad (7.2)$$

waarin:

netto = restdebiet [m²/getij]

c₁, c₂ = constanten, met c₂ kleiner dan 1 en c₁ positief, omdat de absolute waarde van het restdebiet wordt genomen.

In figuur 7.3 is vergelijking (7.2) uitgezet, waarbij voor c_2 een waarde van 0,8 is genomen.



Figuur 7.3: Algemeen verband tussen restdebiet en afwijking evenwichtslijn

Omdat een verband bestaat tussen het restdebiet en de afwijking van de lineaire evenwichtsrelatie, is het volume in de niet-dominante fase een oorzaak voor de spreiding van de puntenwolk. De stroming in de niet-dominante fase is dus een proces dat de lineaire evenwichtsrelatie beïnvloedt.

7.5 Geometrie

De geometrie van een geul is bepalend is voor de stroming in de geul en dus voor de evenwichtsrelatie tussen dominant volume en diepte. Afwijkingen van de evenwichtslijn kunnen worden veroorzaakt door afwijkingen in geometrische geuleigenschappen. Geometrische geuleigenschappen die in deze paragraaf aan de orde komen zijn de diepte, bochten en de breedte/diepteverhouding.

7.5.1 Diepe delen

Mogelijk treden eenduidige afwijkingen van de evenwichtslijn op in diepe delen, omdat vooral voor grotere dieptes de puntenwolk een grote spreiding vertoont.

In verdiepingen treden stromingseffecten op, die invloed hebben op de vorm van de geul. Deze stromingseffecten zijn driedimensionaal en kunnen niet worden meegenomen door het waterbewegingsmodel SCALWEST. In diepere punten wordt dan een afwijkend dominant volume berekend.

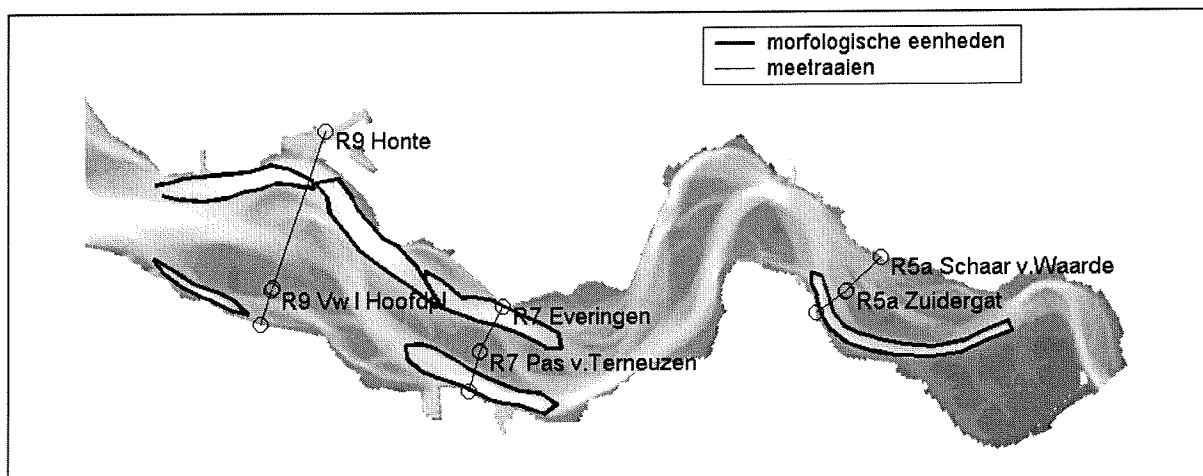
In Svašek (2000) is gezien dat de uitkomsten van SCALWEST afwijken van debietmetingen voor diepere delen. Dit lijkt overeen te komen met een grotere spreiding voor deze delen. Daarom wordt hieronder nader gekeken naar de SCALWEST-uitkomsten in relatie met de afwijkingen van de evenwichtslijn. Overigens kunnen de debietmetingen ook fouten bevatten.

In Svašek (2000) zijn in drie raaien metingen vergeleken met de modeluitkomsten. De metingen zijn uitgevoerd met een ACDP (Acoustic Doppler Current Profiler), die stroomsnelheden en -richtingen heeft gemeten.

De onderzochte raaien zijn de volgende:

- Raai 9: Over de Honte en het Vaarwater langs Hoofdplaat.
- Raai 7: Van Everingen naar Pas van Terneuzen Oost.
- Raai 5a: Van het Zuidergat naar de Schaar van Waarde.

Deze zijn weergegeven in figuur 7.4.



Figuur 7.4: Overzicht meetraaien in de Westerschelde

Raai 9

In raai 9, ter plaatse van de Honte, wordt door SCALWEST voor de punten dieper dan 25 meter zowel een te hoog vloeddebiet als een te hoog ebdebiet berekend. Dit is weergegeven in bijlage 7.17. Het verschil tussen de metingen en de modeluitkomsten ter plaatse van de Honte is ongeveer 10%. In de Honte West (zie bijlage 7.4) is waarneembaar dat de diepste punten een afwijking van de evenwichtslijn hebben van ongeveer 1,1 à 1,2. Dit is een te hoge waarde van 10 à 20%. Ook in de Honte Oost heeft een groot deel van de diepe punten een afwijking van de evenwichtslijn rond de 1,1.

In dezelfde raai, dichtbij het Vaarwater langs de Hoofdplaat, worden door SCALWEST voor punten dieper dan 20 meter te lage ebdebieten berekend (ongeveer 5%). In de puntenwolk is te zien dat de diepere punten alle een te laag ebdebiet hebben variërend van 5% tot 15%. Dit komt enigszins overeen met het verschil tussen de metingen en de modeluitkomsten.

Raai 7

In raai 7, ter plaatse van de Everingen, is voor punten dieper dan 15 meter het gemeten vloeddebiet kleiner dan het berekende vloeddebiet. Voor punten dieper dan 25 meter is dit verschil ongeveer 10%. Dit betekent dat de punten een hoge waarde hebben voor de afwijking van de evenwichtslijn. In bijlage 7.8 is goed waarneembaar dat deze afwijking rond de 1,1 à 1,2 ligt en groter wordt voor diepere punten.

In de Pas van Terneuzen Oost hebben punten dieper dan 30 meter in het model een 10% lager ebdebiet dan volgens de meting. In bijlage 7.7 is waar te nemen dat de diepste punten inderdaad een afwijking kleiner dan 1 hebben.

Raai 5a

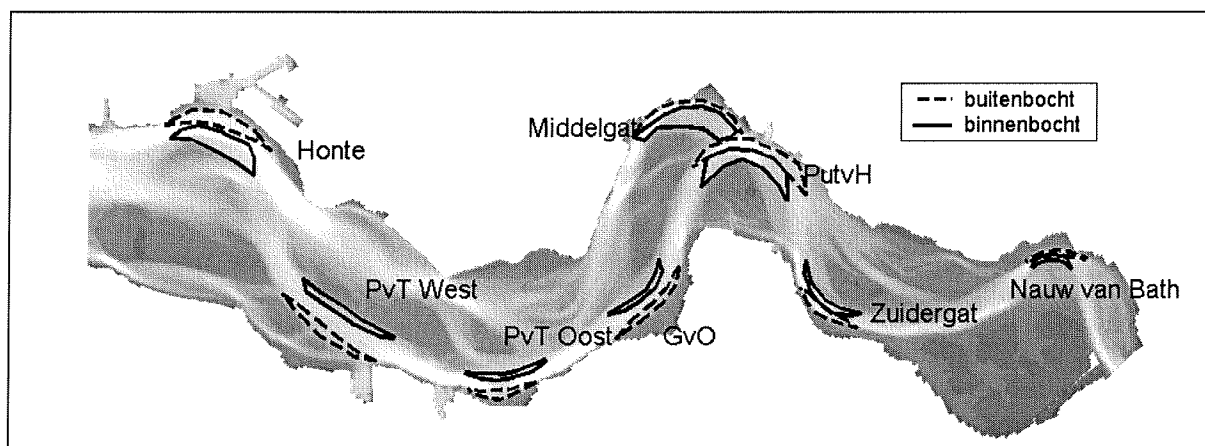
In raai 5a is alleen het Zuidergat gedefinieerd als morfologische eenheid. Voor de meeste punten dieper dan 10 meter geeft het model een groter ebdebiet dan de metingen. Het verschil tussen de metingen en de modelresultaten is ongeveer 15%. Bijlage 7.12 geeft inderdaad weer dat bijna de gehele puntenwolk van het Zuidergat een grote waarde voor de afwijking van de evenwichtslijn heeft.

Voor de diepere punten in de bekeken raaien zijn de verschillen in gemeten en berekende dominante volumes goed terug te vinden in de puntenwolk. De grotere spreiding rond de evenwichtsrelatie voor de diepste delen komt overeen met de SCALWEST-afwijkingen voor deze diepere delen en wordt veroorzaakt door beperkingen van het waterbewegingsmodel.

7.5.2 Bochten

De verhouding tussen dominant volume en diepte kan in bochten afwijken van de evenwichtslijn, omdat in een tweedimensionaal stromingsmodel de debieten in de binnen- en buitenbocht niet goed worden berekend. Het verhang overheerst en driedimensionale spiraalstroming wordt niet meegenomen. Dit was reeds waargenomen in het vereenvoudigde tweedimensionale morfologische model, zie paragraaf 5.4.3.

De invloed van bochteffecten op afwijkingen van de evenwichtsrelatie is onderzocht door binnen- en buitenbochten apart te bekijken. De bochten die zijn geanalyseerd, zijn weergegeven in onderstaande figuur 7.5.



Figuur 7.5: Onderzochte binnen- en buitenbochten in de Westerschelde

In bijlage 7.19 is de ligging van de binnen- en buitenbochten weergegeven rond de evenwichtslijn. Voor alle gedefinieerde bochten geldt dat de punten in de binnenbocht een hogere waarde voor de afwijking van de evenwichtslijn hebben dan punten in de buitenbocht. Punten in de binnenbocht hebben bij dezelfde diepte dus een groter dominant volume dan punten in de buitenbocht. Dit komt overeen met het optreden van potentiaalstroming in een tweedimensionaal stromingsmodel. Voor het Zuidergat en de Honte is in bijlage 7.17 ook waar te nemen dat de met SCALWEST berekende dominante volumes in de buitenbocht lager zijn dan de gemeten debieten in deze geulen. In de binnenbochten zijn de berekende debieten juist hoger dan de gemeten debieten.

In paragraaf 5.6.2 is besproken dat een verdieping in de binnenbocht in het morfologisch model van de Westerschelde na tien iteraties niet waar te nemen is. Gezien de verschillende ligging van de binnen- en buitenbochten in de puntenwolk, is het aannemelijk dat na verder itereren met dit model de binnenbocht zich zal gaan verdiepen ten koste van de buitenbocht.

7.5.3 Breedte/diepteverhouding

In voorgaande onderzoeken is aangetoond dat de breedte/diepteverhouding van de geul van invloed is op de relatie tussen dominant volume en doorsnede (zie paragraaf 3.2.2). Ook bij het toepassen van een lineaire evenwichtsrelatie in het tweedimensionale geval heeft de vorm van de geul invloed op deze relatie.

In de Westerschelde bevinden zich ebgeulen en vloedgeulen. Ebgeulen zijn over het algemeen smaller en dieper dan vloedgeulen. Ebgeulen hebben daarom een groter stroomvoerend vermogen dan vloedgeulen en zouden dus een relatief groot dominant volume moeten hebben en een hogere waarde voor de afwijking van de evenwichtslijn. Maar in de puntenwolken van de gedefinieerde eb- en vloedgeuldelen is geen eenduidig verschil te zien tussen de ligging van ebgeulen en vloedgeulen ten opzichte van de evenwichtslijn (zie bijlage 7.3 t/m 7.15).

Kennelijk is de variatie in de breedte/diepteverhouding van de eb- en vloedgeulen niet groot genoeg.

Ook de ondiepe, brede vloedscharen hebben geen afwijkende ligging in de puntenwolk ten opzichte van dichtbijgelegen eb- of vloedgeulen.

Hoewel theoretisch kan worden onderbouwd dat de breedte/diepteverhouding invloed heeft op evenwichtsrelaties voor geulen, is dat in dit onderzoek niet waargenomen.

7.6 Conclusies

De volgende oorzaken voor afwijkingen van de evenwichtslijn zijn onderzocht: menselijke ingrepen, sedimenteigenschappen, volume in de niet-dominante getijfase en afwijkingen in de geometrie.

Een duidelijke afwijking van de evenwichtslijn voor de gebieden waar ingrepen plaatsvinden of hebben plaatsgevonden is niet te onderscheiden. Dit geldt ook voor gebieden met afwijkende sedimenteigenschappen.

Tussen het restdebiet en de afwijking van de lineaire evenwichtsrelatie is een goede correlatie gevonden. De stroming in de niet-dominante fase is dus een proces dat de evenwichtsrelatie tussen dominant volume en diepte beïnvloedt.

In bochten en op diepe punten treden processen op die het waterbewegingsmodel niet goed kan weergeven. Binnenbochten hebben een andere ligging ten opzichte van de evenwichtslijn dan buitenbochten, omdat het waterbewegingsmodel een groter dominant volume in de binnenbocht berekent dan in de buitenbocht. Diepe delen hebben een grote spreiding rond de evenwichtslijn die overeenkomt met een verschil in debietmetingen en modelresultaten van SCALWEST. Beperkingen van het waterbewegingsmodel veroorzaken dus spreiding in de puntenwolk en zijn van invloed op de lineaire evenwichtsrelatie.

8. Aanpassingen evenwichtsrelatie

8.1 Inleiding

In hoofdstuk 7 is gebleken dat spreiding rond de evenwichtsrelatie onder andere wordt veroorzaakt door het volume in de niet-dominante fase en door beperkingen van het waterbewegingsmodel.

De evenwichtsrelatie kan worden aangepast voor de stroming in de niet-dominante fase. Het compenseren van beperkingen van het waterbewegingsmodel via de evenwichtsrelatie is niet objectief en wordt dus niet gedaan.

In paragraaf 8.2 worden aangepaste evenwichtsrelaties opgesteld. De waarde van een aangepaste evenwichtsrelatie wordt in paragraaf 8.3 besproken.

8.2 Opstellen aangepaste evenwichtsrelaties

Het volume in de niet-dominante fase kan op meerdere manieren worden meegenomen in de evenwichtsrelatie. In paragraaf 8.2.1 wordt dit gedaan via het getijvolume. Paragraaf 8.2.2 behandelt een relatie tussen de diepte en de som van het dominante volume en het niet-dominante volume en in paragraaf 8.2.3 wordt de som van het getijvolume en het restdebit gebruikt om stroming in de niet-dominante fase mee te nemen.

8.2.1 Getijvolume

De meest eenvoudige vorm om stroming in de niet-dominante fase mee te nemen in een evenwichtsrelatie is via het getijvolume. Dit volume is de hoeveelheid water per eenheid van breedte, die in één getijperiode door een bepaalde doorsnede stroomt.

Het getijvolume kan als volgt worden weergegeven:

$$tv = dv + ndv \quad (8.1)$$

waarin:

tv = getijvolume [m^2 /getij]

dv = dominant volume [m^2 /getijfase]

ndv = niet-dominant volume [m^2 /getijfase]

De evenwichtsrelatie met het getijvolume als stroomparameter krijgt dan de volgende algemene vorm:

$$D = c_1 * tv \quad (8.2)$$

waarin:

c_1 = constante

Voor de punten in de Westerschelde is met behulp van een regressie-analyse de waarde van de constante gevonden. De volgende vergelijking wordt dan verkregen:

$$D = 3,064 * 10^{-5} * tv \quad (8.3)$$

Hierbij hoort een correlatiecoëfficiënt van 0,954.

8.2.2 Dominant volume plus niet-dominant volume

De efficiëntie van de geul, dus de mate van getijdominantie, komt niet tot uiting in relatie (8.3). Om dominantie wel mee te kunnen nemen in een evenwichtsvergelijking, worden het dominant volume en het niet-dominant volume als volgt gecombineerd:

$$D = c_1 * dv + c_2 * ndv \quad (8.4)$$

waarin

$c_1, c_2 =$ constanten

Volgens de kleinste-kwadratenmethode is een regressievlak bepaald door de driedimensionale puntenwolk tussen diepte, dominant volume en niet-dominant volume. Dit vlak heeft de volgende vergelijking:

$$D = 4,571 * 10^{-5} * dv + 1,167 * 10^{-5} * ndv \quad (8.5)$$

De bijbehorende correlatiecoëfficiënt is 0,955.

Volgens deze vergelijking is het dominante volume dus voor ongeveer 80% verantwoordelijk voor de diepte en het niet-dominant volume voor ongeveer 20%.

8.2.3 Getijvolume plus restdebiet

Allersma (1988) besprak reeds de invloed van het debiet van de reststroming op de evenwichtsrelatie tussen getijvolume en geuldoorsnede (zie paragraaf 3.3.2). Een vergelijking volgens de vorm van Allersma (vergelijking (3.15)) heeft een term voor het getijvolume en een term voor het restdebiet. In de laatste term wordt de invloed van de rivierafvoer en de mate van dominantie vertegenwoordigd.

Voor de Westerschelde wordt een vergelijking van de volgende algemene vorm opgesteld:

$$D = c_1 * tv + c_2 * netto \quad (8.6)$$

waarin:

$netto =$ restdebiet [m^2 /getij]

$c_1, c_2 =$ constanten

Door de driedimensionale puntenwolk tussen diepte, getijvolume en restdebiet is weer een regressievlak bepaald. Dit vlak heeft de volgende vergelijking:

$$D = 2,869 * 10^{-5} * tv + 1,702 * 10^{-5} * netto \quad (8.7)$$

De correlatiecoëfficiënt van deze relatie is 0,955.

8.3 Waarde aangepaste evenwichtsrelatie

Om de waarde van de gevonden relaties te bepalen, worden deze met elkaar en met de relatie in het morfologische model (vergelijking (4.1)) vergeleken. Dit gebeurt in paragraaf 8.3.1.

In paragraaf 8.3.2 komt de toepassing van een aangepaste relatie in het morfologisch model aan de orde.

8.3.1 Vergelijking relaties

In tabel 8.1 wordt een overzicht gegeven van de gevonden vergelijkingen.

Tabel 8.1: Overzicht evenwichtsrelaties

Variabelen	Nummer	Vergelijking	Correlatiecoëfficiënt
D-dv	(4.1)	$D = 5,490 * 10^{-5} * dv$	0,953
D-tv	(8.3)	$D = 3,064 * 10^{-5} * tv$	0,954
D-dv-ndv	(8.5)	$D = 4,571 * 10^{-5} * dv + 1,167 * 10^{-5} * ndv$	0,955
D-tv-netto	(8.7)	$D = 2,869 * 10^{-5} * tv + 1,702 * 10^{-5} * netto$	0,955

Het verschil in correlatiecoëfficiënten van de verschillende vergelijkingen is zeer klein. Vergelijking (8.5) en (8.7) hebben een betere correlatie dan vergelijking (4.1) en (8.3). Dit is te verwachten, omdat vergelijking (8.5) en (8.7) twee coëfficiënten bevatten voor drie variabelen, terwijl vergelijking (4.1) en (8.3) maar één coëfficiënt hebben bij twee variabelen. Bij meer coëfficiënten kan een beter passende vergelijking worden gevonden voor de punten in de Westerschelde.

De efficiëntie van de geul, dus de mate van getijdinantie, komt niet tot uiting in vergelijking (8.3). Met het getijvolume als stroomparameter kunnen verschijnselen, zoals opgetreden in het Gat van Ossensisse en het Middelgat (zie paragraaf 3.4.2) niet worden verklaard. Vergelijking (8.3) is daarom niet waardevol als evenwichtsrelatie.

Vergelijking (8.5) en (8.7) bevatten dezelfde parameters, alleen in een andere vorm. Als vergelijking (8.7) wordt omgeschreven tot een vergelijking tussen diepte, dominant volume en niet-dominant volume, wordt exact vergelijking (8.5) verkregen.

Beide vergelijkingen geven een betere beschrijving van de evenwichtstoestand dan de diepte. Dit komt omdat de stroming in de niet-dominante fase invloed heeft op de veranderingen van de diepte en omdat een extra coëfficiënt en parameter worden meegenomen ten opzichte van vergelijking (4.1).

Vergelijking (8.7) geeft de invloed van de rivierafvoer beter weer. In de Westerschelde is deze afvoer verwaarloosbaar, maar voor andere estuaria kan deze wel van belang zijn. Een algemene vorm van de evenwichtsvergelijking (8.6) is dan inzichtelijker dan de algemene evenwichtsvergelijking (8.4). Ook voor de Westerschelde wordt de voorkeur gegeven aan een evenwichtsrelatie volgens vergelijking (8.7) boven vergelijking (8.5).

8.3.2 Toepassing in model

Een aangepaste evenwichtsrelatie kan worden gebruikt om morfologische veranderingen te berekenen in een semi-empirisch gedragsmodel.

Toepassen in het tweedimensionale morfologische model van de Westerschelde is niet zinvol, zolang geen stabiele evenwichtsbodemligging kan worden bereikt met dit model. Het stabiliteitsgedrag van het model wordt niet beter door een aangepaste evenwichtsvergelijking met het volume in de niet-dominante fase.

Wel kan de relatie worden toegepast in een semi-empirisch model, waarin wel een stabiele evenwichtsbodemligging kan worden bereikt, zoals ESTMORF. Dit model is nu gebaseerd is op een empirische relatie tussen getijvolume en doorsnede.

Een simulatie die reeds is uitgevoerd met dit model kan vergeleken worden met een simulatie met evenwichtsrelatie (8.7) om de meerwaarde van de aangepaste relatie te controleren.

8.4 Conclusies

Een aangepaste evenwichtsrelatie in de vorm van getijvolume plus restdebiet (vergelijking (8.7)) is een nauwkeurigere beschrijving van de evenwichtssituatie in een estuarium dan de evenwichtsrelatie op basis van dominant volume en diepte (vergelijking (4.1)). Toepassen van deze aangepaste evenwichtsrelatie in het tweedimensionale morfologische model van de

Westerschelde is niet zinvol, zolang daarmee geen stabiele evenwichtsbodemligging kan worden bereikt.

9. Conclusies en aanbevelingen

9.1 Conclusies

Meer inzicht is verkregen in de werking van een tweedimensionaal morfologisch model van de Westerschelde door het principe van dit semi-empirische model te onderzoeken. Het model koppelt de bodemdiepte aan de waterbeweging via een empirische evenwichtsrelatie tussen diepte en dominant volume, het volume dat in de dominante getijfase per meter breedte door een geuldoorsnede stroomt.

Tegelijkertijd is nadere studie verricht naar de empirische evenwichtsrelatie door afwijkingen van de lineaire evenwichtslijn te onderzoeken. Deze evenwichtslijn is getrokken door de puntenwolk die is ontstaan door van alle punten van het model van de Westerschelde het dominant volume tegen de diepte uit te zetten.

Uit dit afstudeeronderzoek worden de volgende conclusies getrokken.

Modelprincipe

1. De koppeling van de bodemdiepte aan de waterbeweging via de evenwichtsrelatie tussen diepte en dominant volume laat bij iteratieve toepassing een versterking van optredende hydraulische processen in de morfologie zien.
Dit blijkt uit simulaties met een vereenvoudigde versie van het morfologische model voor een rechte geul, een axiaalsymmetrische bocht en een twee-geulensysteem, waarbij gekeken is naar de invloed van de randvoorwaarden, bochtstroming en debietverdeling in een twee-geulensysteem. De randvoorwaarden bepalen de verandering van het dominant volume na een ingreep en dus de bodemveranderingen. In de bocht verdiept de binnenbocht na enkele iteraties, omdat driedimensionale stromingseffecten niet worden meegenomen door het waterbewegingsmodel. Na een ingreep in het twee-geulensysteem treedt herverdeling van debiet op, waardoor een diepteverschil ontstaat tussen de twee geulen.
2. Toepassen van de vergelijkingen van het model op een eendimensionaal twee-geulensysteem met stationaire stroming levert geen stabiele oplossing waarbij beide takken open blijven. De resultaten van het vereenvoudigde morfologische model voor een geul met twee roosterbanen bevestigen dit. In het morfologische model van de Westerschelde zijn ook verschijnselen waar te nemen die hiermee overeenkomen.
3. Mogelijke oplossingen om een stabiele evenwichtsbodemligging te bereiken, een opgelegde debietverdeling en meer dwarsuitwisseling, voldoen niet voor het morfologische model van de Westerschelde. Een eendimensionaal twee-geulensysteem met stationaire stroming kan een stabiele evenwichtsbodemligging bereiken met beide takken open door het opleggen van twee zwakreflecterende randvoorwaarden. Ook voor een geul met een zeer eenvoudig rooster in het vereenvoudigde morfologische model is dit een oplossing. Hieruit blijkt dat ook andere termen in de waterbewegingsvergelijking dan het verhang en de weerstand invloed hebben op de stabiliteit. De grootte van de invloed van deze andere termen op de stabiliteit van het morfologisch model van de Westerschelde is niet bekend.
Vergroten van de dwarsuitwisseling van water door het verhogen van de turbulente viscositeit is een manier om verstoringen in het rooster op kleine schaal uit te vlakken, maar draagt niet bij aan een realistische stabiele bodemligging in meer-geulensystemen.
4. Het morfologische model van de Westerschelde in de huidige vorm kan niet worden gebruikt om iteratieve morfologische voorspellingen te doen, omdat het modelprincipe voor vereenvoudigde situaties impliceert dat geen realistische stabiele evenwichtsrelatie bestaat en de uitkomsten van het morfologische model van de Westerschelde na tien iteraties ook geen stabiele evenwichtssituatie weergeven. Het model kan wel worden gebruikt om na één berekeningsstap een eerste voorspelling van de consequenties van ingrepen aan te geven.

Empirische evenwichtsrelatie

5. Een duidelijke afwijking van de evenwichtslijn voor de gebieden waar ingrepen plaatsvinden of hebben plaatsgevonden is niet te onderscheiden. Dit geldt ook voor gebieden met afwijkende sedimenteigenschappen.
6. Tussen het restdebiet en de afwijking van de lineaire evenwichtslijn is een goede correlatie gevonden. Het restdebiet is verschil tussen het volume in de dominante fase en het volume in de niet-dominante fase. Een aangepaste evenwichtsrelatie voor het volume in de niet-dominante fase in de vorm van getijvolume plus restdebiet beschrijft nauwkeuriger de evenwichtssituatie in de geulen van de Westerschelde dan de evenwichtsrelatie op basis van dominant volume.
7. Beperkingen van het tweedimensionale waterbewegingsmodel in bochten en op diepe punten veroorzaken afwijkingen van de lineaire evenwichtslijn. Binnenbochten hebben een andere ligging ten opzichte van de evenwichtsrelatie dan buitenbochten, omdat het waterbewegingsmodel grotere stroomsnelheden in de binnenbocht berekent dan in de buitenbocht. De grotere spreiding rond de evenwichtslijn voor diepe delen komt overeen met verschillen tussen metingen en uitkomsten van het waterbewegingsmodel in deze delen.

9.2 Aanbevelingen

1. Onderzoek naar een realistische stabiele evenwichtsbodemligging is gewenst. Daarvoor moet de invloed van andere termen in de waterbewegingsvergelijking dan het verhang en de weerstand op de stabiliteit in het morfologisch model van de Westerschelde worden onderzocht. Het toepassen van een 2½ dimensionaal of driedimensionaal waterbewegingsmodel kan hierbij helpen, omdat bochtstroming en driedimensionale processen daarin beter worden weergegeven.
Als geen realistische stabiele evenwichtsbodemligging wordt bereikt met een waterbewegingsmodel en een empirische evenwichtsrelatie, dan kan de invloed van het sedimenttransport op de stabiliteit worden meegenomen. Dan wordt dus afgestapt van het eenvoudige modelprincipe van het morfologisch model.
Overigens is een koppeling met sedimenttransport gewenst om de tijdschaal van de morfologische veranderingen te kunnen bepalen.
2. Het model kan worden verfijnd door in de evenwichtsrelatie een correctie toe te passen voor het getijvolume in de niet-dominante fase. Ook kan het model worden aangepast in gebieden met menselijke ingrepen en afwijkende sedimenteigenschappen. Dit is zinvol als het model een stabiele evenwichtsbodemligging kan bereiken of als het model gebruikt wordt om één iteratiestap mee uit te voeren.
3. De meerwaarde van een aangepaste evenwichtsrelatie voor de Westerschelde kan worden gecontroleerd door deze te gebruiken in een eendimensionaal, semi-empirisch model zoals ESTMORF. Een simulatie die reeds is uitgevoerd moet dan vergeleken worden met een simulatie met de aangepaste evenwichtsrelatie onder dezelfde omstandigheden.
4. Onderzoek naar de toepasbaarheid van een tweedimensionaal toegepaste evenwichtsrelatie in andere estuaria is gewenst, zodat meer inzicht wordt verkregen in de algemene geldigheid van een evenwichtsrelatie als beschrijving van de toestand in estuaria.
5. Nader onderzoek moet worden uitgevoerd naar de invloed van sedimenteigenschappen op de empirische evenwichtsrelatie, zowel in de Westerschelde als in andere estuaria.

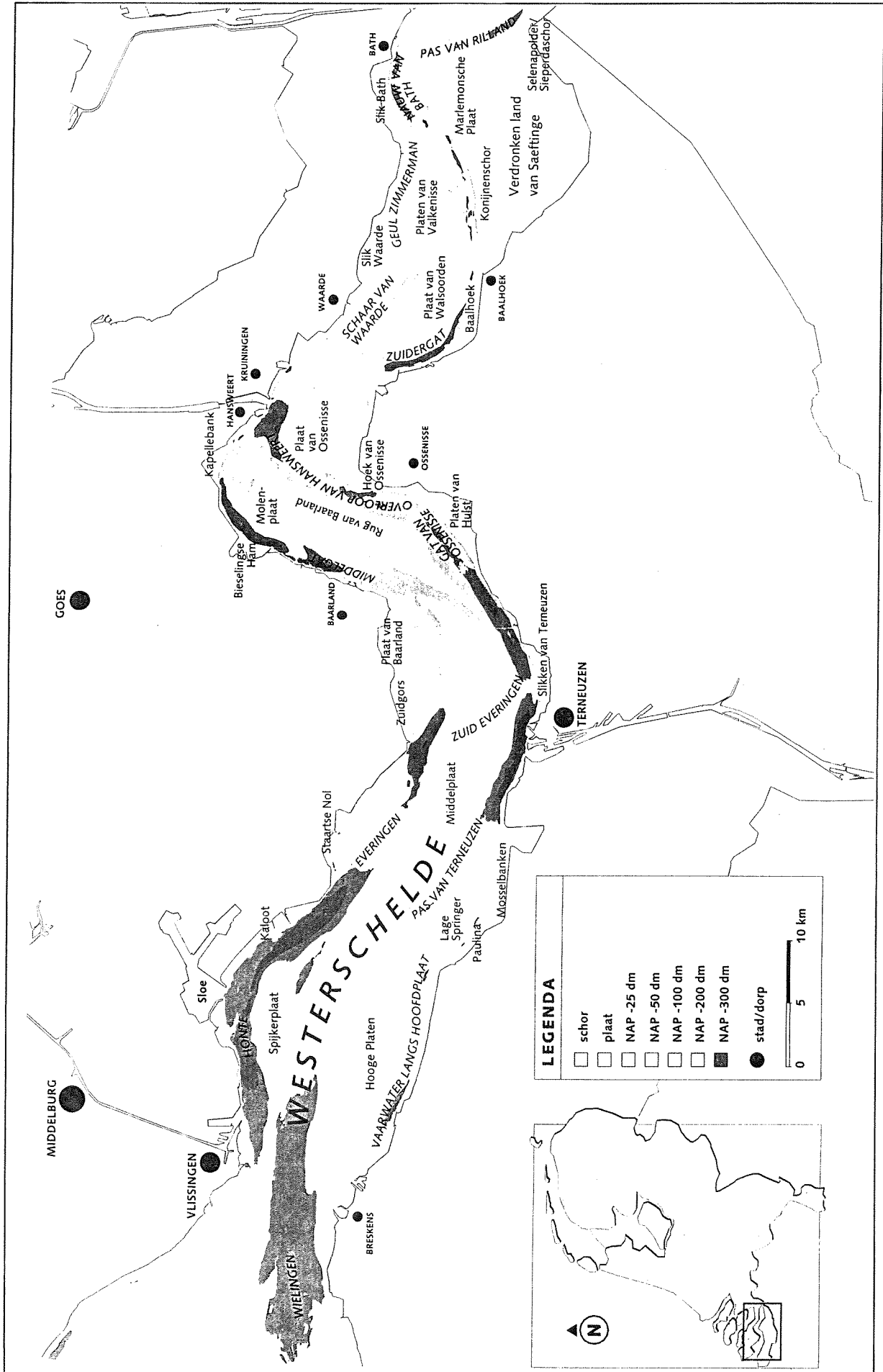
Literatuur

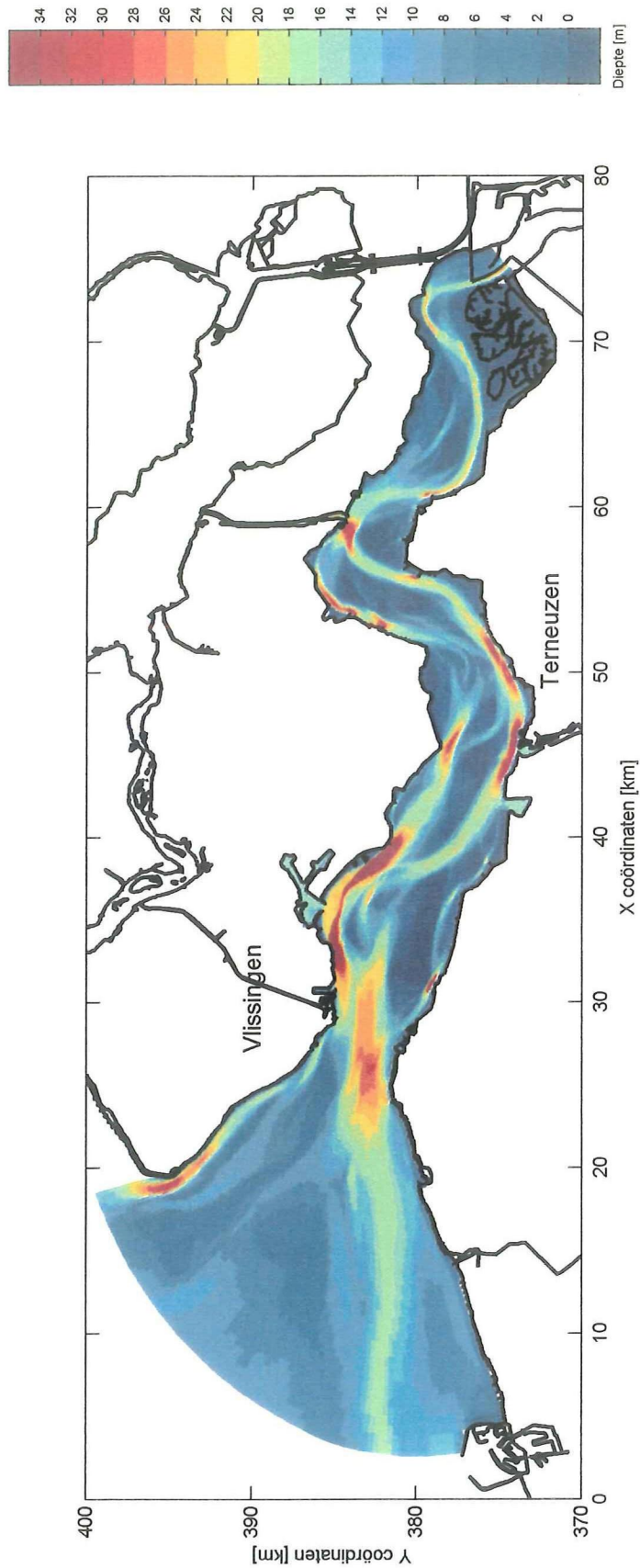
- Allersma, E. 1988, *Morfologisch onderzoek Noordelijk Deltabekken, dl. I, II en III*, WL Delft Hydraulics.
- Battjes, J.A., 1997, *Stroming in waterlopen*, collegedictaat CTwa3310, TU Delft.
- Boyce, W.E., R.C. DiPrima, 1992, *Elementary differential equations and boundary value problems*, 5th edition John Wiley & Sons, Inc.
- Chow, V.T., 1959, *Open-Channel Hydraulics*, McGraw-Hill Kogakusha, Tokyo.
- Coosen, J., C.Storm, J.Vroon, 1997, *Westerschelde, stram of struis?*, RIKZ rapport nr. 97.023.
- Dronkers, J., M.J.F. Stive, 2001, *Fysica van kustsystemen*, collegedictaat Universiteit Utrecht, Instituut van marien en atmosferische onderzoek Utrecht.
- Gelder, A. de, 1996, *Morfologie en modellering van de Westerschelde, dl I en II*, TU Delft.
- Gerritsen, F., H. de Jong, 1983, *Stabiliteit van doorstroomprofielen in de Westerschelde*, nota WWKZ-83.V008.
- Gerritsen, F., H. de Jong, A. Langerak, 1990, *Cross-sectional stability of Esuary Channels in The Netherlands*, 22nd Coastal Engineering Conference, Proceedings Volume 3, Ch. 221, Delft.
- Gerritsen, F., 1999, *The effect of wave action on the stability of channels in tidal entrances*, RIKZ.
- Groenewoud, M.D., 1997, *Modellering morfodynamisch gedrag op de Drempel van Hansweert*, TU Delft.
- Groenewoud, M.D., F.T.G. Tank, H. Verbeek, 1998, *Drempels in de Westerschelde, natuur en mens samen aan het werk*, RIKZ rapport nr. 98.011.
- Jansen, M., 1997, *Bouw, calibratie en verificatie van SCALWEST, t.b.v. Project Verdieping*, rapport A, Svašek bv, Rotterdam.
- Jeuken, M.C.J.L., 2000, *On the morphological behaviour of tidal channels in the Westerschelde estuary*, Universiteit Utrecht.
- Kleef, A.W. van, 1994, *Verklaring voor de veranderingen in de grootschalige zandbalans van het gebied rond het Middellgat, Westerschelde*, Notitie NWL-95.02-A.
- Rijkswaterstaat, diverse auteurs, 1987, *Syllabus bij de cursus gebruik en toepassing Waqua*.
- Rijn, L.C. van, 1993, *Principles of sediment transport in river, estuaries and coastal seas*, Amsterdam.
- Rijn, L.C. van, 1998, *Principles of coastal morphology*, Aqua publications, Amsterdam.
- Schuttelaars, H.M., 1999, *Modellering van geulen, platen en drempels in de Westerschelde*, Utrecht.
- Stelling, G.S., N. Booij, 1997, *Computational modelling in open channel hydraulics*, collegedictaat CTwa4340, TU Delft.

- Stive, M.J.F., A. van Dongeren, J. Dronkers, H.J. de Vriend, Z.B. Wang, 1999, *Coastal inlets and tidal basins*, collegedictaat CTwa5303, TU Delft.
- Svašek, 1994, *Verklarend onderzoek Drempels Westerschelde*, rapport nr. 940.
- Svašek, 1999, *Het SCALWEST-model in het intertijdengebied*, rapport nr. 1115.
- Svašek, 2000, *Morfologisch model Westerschelde op basis van SCALWEST*, rapport nr. 1152.
- Termaat, G.R., 1994, *Stabiliteitsparameter opgesteld voor geulen in de Westerschelde*, Rijkswaterstaat Directie Zeeland.
- Veen, J. van, 1950, *Eb- en vloodschaar systemen in de Nederlandse getijwateren*.
- Verbeek, H., K. van der Male, M. Jansen, 2000, *Het SCALWEST-model*, rapport nr. RIKZ/OS/2000.814.
- Vriend, H.J. de, F.J. Havinga, H. Havinga, P.J. Visser, Z.B. Wang, 1998, *Rivierwaterbouwkunde*, collegedictaat CTwa3340, TU Delft.
- Wang, Z.B., R. Fokkink, B. Karssen, 1993, *Theoretical analysis on nodal point relations in 1D network morphodynamic models, part II*, WL Delft Hydraulics.
- Winterwerp, J.C., M.A.G. van Helvert, M.C.J.L. Jeuken, C. Kuijper, A. van der Spek, M.J.F. Stive, P.M.C. Thoolen, Z.B. Wang, 2000, *Lange Termijnvisie Schelde-estuarium cluster morfologie-uitvoeringsfase, deel I en II*, WL Delft Hydraulics.

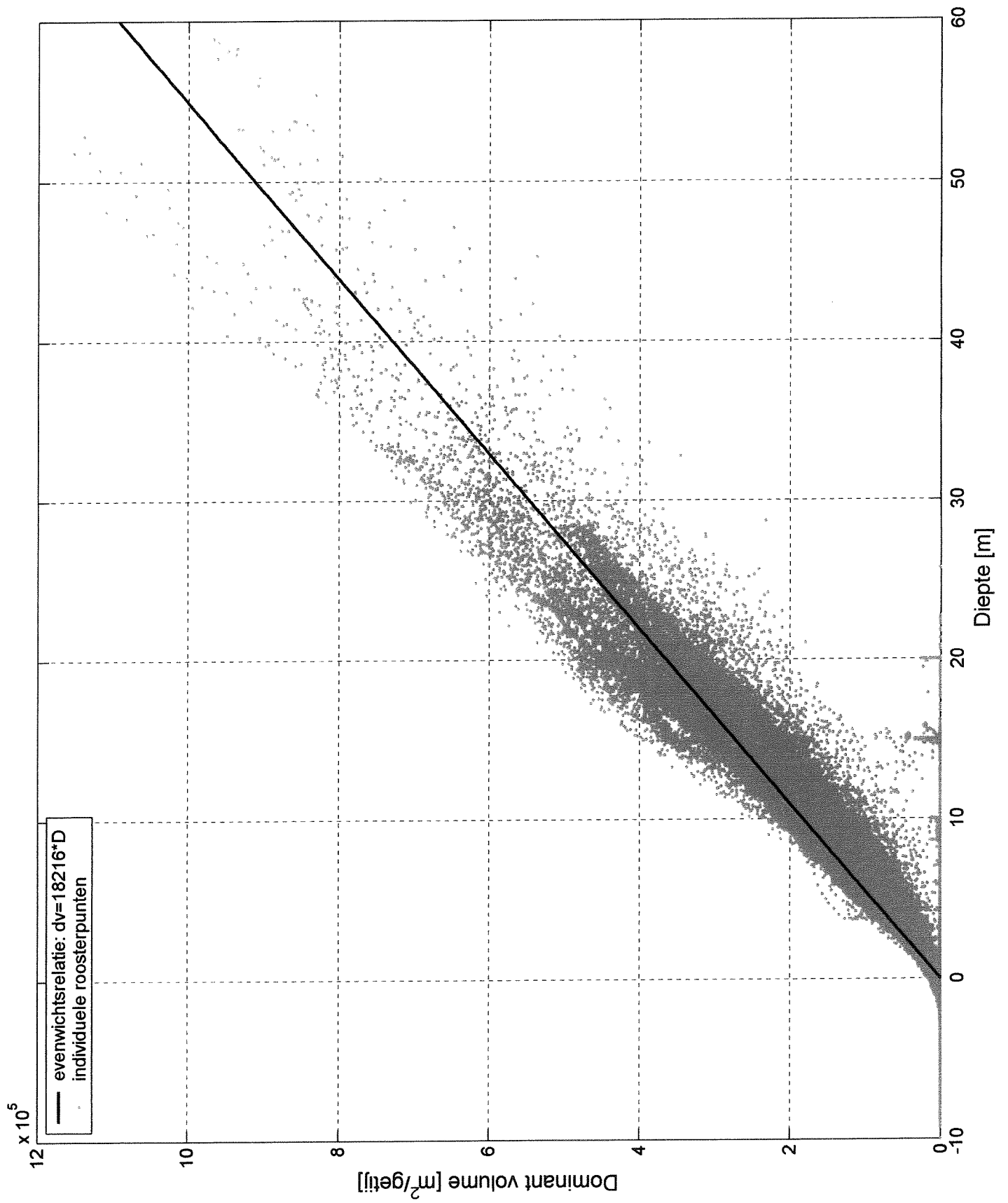
Bijlagen

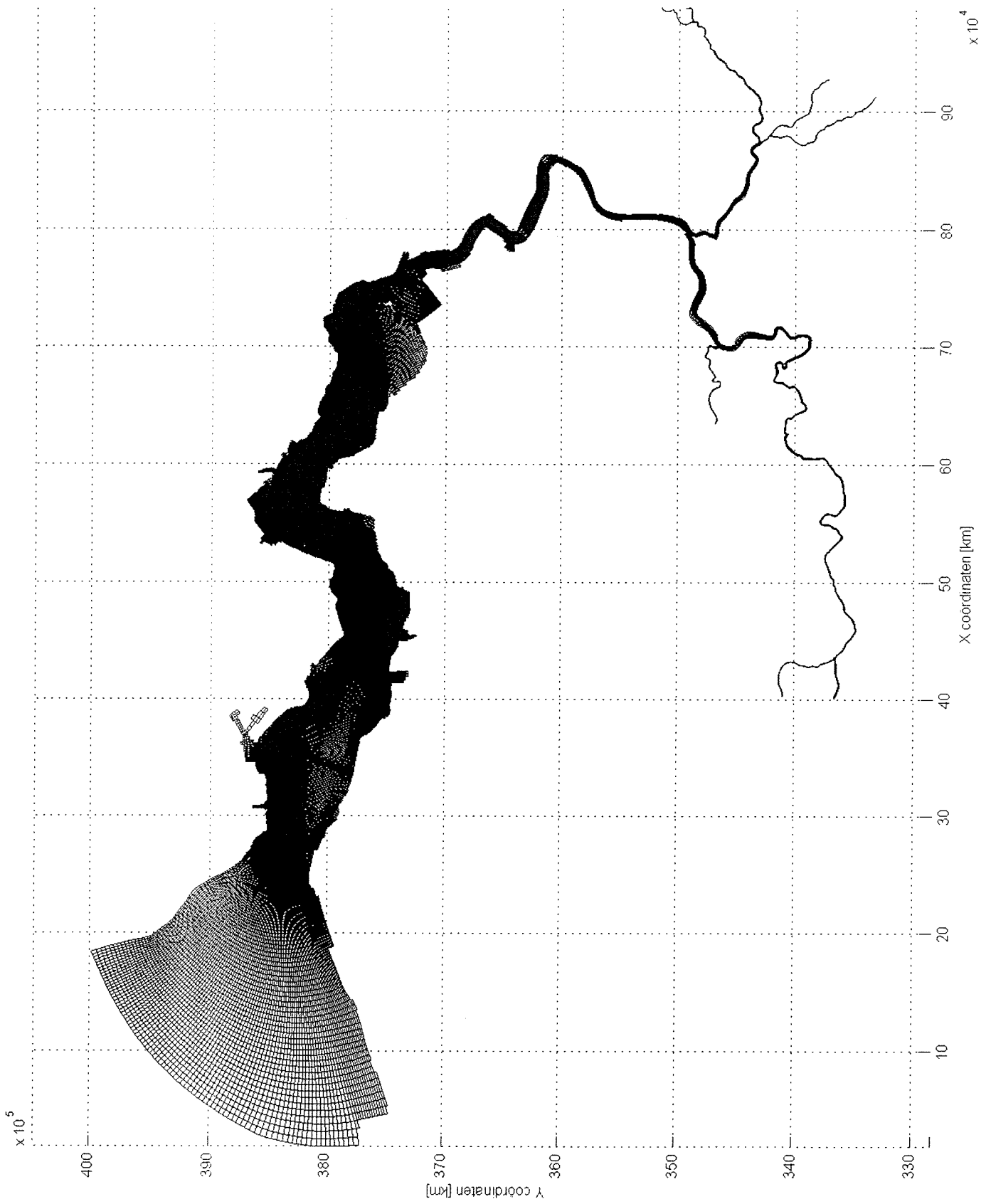
Bijlage 2.1	Geometrische overzichtskaart Westerschelde
Bijlage 2.2	Dieptekaart Westerschelde
Bijlage 3.1	Puntenwolk dominant volume vs diepte
Bijlage 4.1	Rooster SCALWEST model
Bijlage 4.2	Resultaten morfologisch model Westerschelde
Bijlage 5.1	Programmacode berekening dominant volume
Bijlage 5.2	Programmacode berekening bodemverandering
Bijlage 5.3	Diepteverandering rechte geul
Bijlage 5.4	Ontwikkeling dominant volume vs diepte rechte geul
Bijlage 5.5	Modelresultaten lokale ingreep rechte geul
Bijlage 5.6	Modelresultaten bocht
Bijlage 5.7	Modelresultaten twee-geulensysteem
Bijlage 6.1	Stabiliteit rechte geul
Bijlage 6.2	Stabiliteit bocht
Bijlage 6.3	Stabiliteit twee geulen
Bijlage 6.4	Stabiliteit twee geulen met twee Riemann-randen
Bijlage 6.5	Dwarsuitwisseling door turbulente viscositeit
Bijlage 7.1	Dieptekaart Westerschelde met gedefinieerde geuldelen
Bijlage 7.2	Kaart Westerschelde met korreldiameters (d50)
Bijlage 7.3	Onderzoek evenwichtsrelatie Wielingen
Bijlage 7.4	Onderzoek evenwichtsrelatie Honte West
Bijlage 7.5	Onderzoek evenwichtsrelatie Honte Oost
Bijlage 7.6	Onderzoek evenwichtsrelatie Pas van Terneuzen West
Bijlage 7.7	Onderzoek evenwichtsrelatie Pas van Terneuzen Oost
Bijlage 7.8	Onderzoek evenwichtsrelatie Everingen
Bijlage 7.9	Onderzoek evenwichtsrelatie Gat van Ossensisse
Bijlage 7.10	Onderzoek evenwichtsrelatie Overloop van Hansweert
Bijlage 7.11	Onderzoek evenwichtsrelatie Middelgat
Bijlage 7.12	Onderzoek evenwichtsrelatie Zuidergat
Bijlage 7.13	Onderzoek evenwichtsrelatie Nauw van Bath
Bijlage 7.14	Onderzoek evenwichtsrelatie Pas van Rilland
Bijlage 7.15	Onderzoek evenwichtsrelatie Vaarwater langs Hoofdplaat
Bijlage 7.16	Relaties tussen restdebiet/diepte en afwijking
Bijlage 7.17	Vergelijking ADCP-metingen en SCALWEST model
Bijlage 7.18	Tabel sedimentclassificaties
Bijlage 7.19	Binnen- en buitenbochten rond evenwichtsrelatie



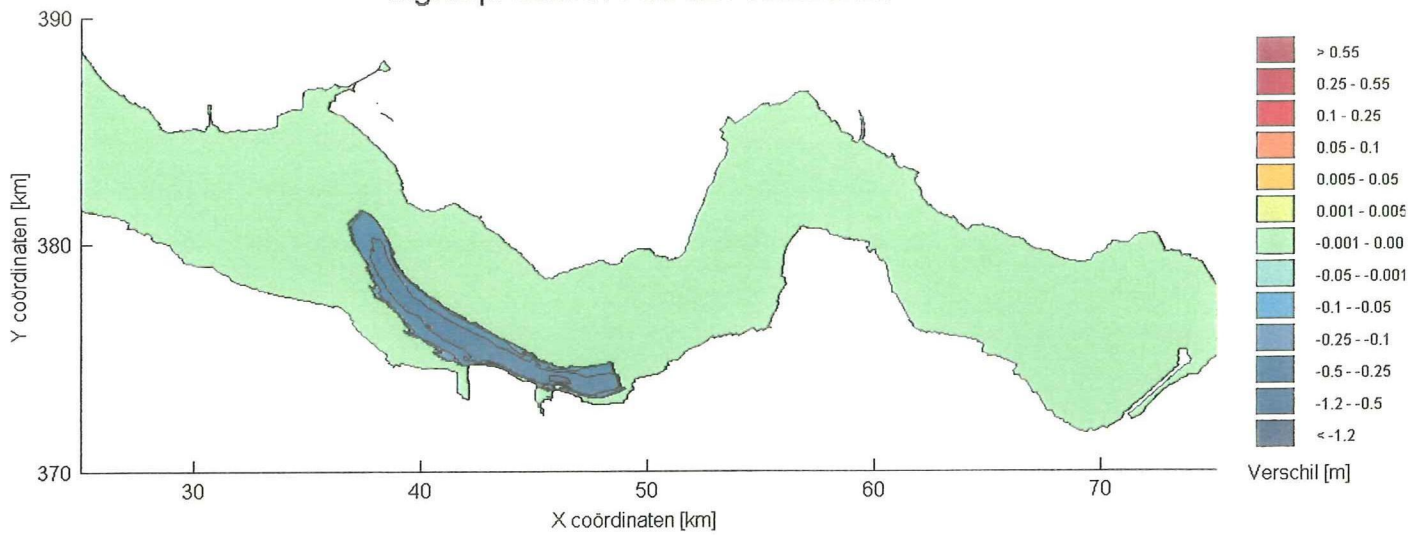


Onderzoeksvraag	Uitgevoerd met	Eigenschappen	Geometrie	Beschrijving simulaties	Para-Bijlage graaf
1a	Welke resultaten worden verkregen als een rechte geul, een bocht en een twee-geulensysteem worden gesimuleerd?	Simulatie met vereenvoudigde morfologische model	Rechte geul	4 simulaties met verschillende rww-en 10 iteraties	5.3.3 5.3 5.4
1b	Gaat de bodem in de vereenvoudigde situatie naar een evenwichtsligging toe? Kan worden verklaard dat de bodem niet naar een evenwichtsligging toe gaat? Geven de resultaten van de stabiliteitsanalyse verklaringen voor verschijnselen die optreden in het vereenvoudigde model? Zijn er oplossingen te vinden waarmee de bodem wel naar een evenwichtsligging gaat?	Simulatie met vereenvoudigde morfologische model Mathematische analyse van de modelvergelijkingen	Bocht Twee-geulensysteem Rechte geul Bocht Twee-geulensysteem Twee-geulensysteem	1 simulatie lokale ingreep 10 iteraties 10 iteraties 10 iteraties 76 iteraties 40 iteraties 167 iteraties	5.3.3 5.5 5.4.3 5.6 5.4.4 5.7 6.2.1 6.1 6.2.2 6.2 6.2.3 6.3 6.4.2 -
1c	Geven de resultaten van het vereenvoudigde model verklaringen voor verschijnselen die optreden in het morfologische model van de Westerschelde?	Simulatie met vereenvoudigde model van de Westerschelde met verhoogde turbulente viscositeit Kwalitatieve vergelijking resultaten mathematische stabiliteitsanalyse, vereenvoudigd morfologische model en morfologisch model van de Westerschelde	Twee-geulensysteem Twee-geulensysteem Twee-geulensysteem Westerschelde	twee roosterbanen 70 iteraties grof rooster 2 Riemann-randen 35 iteraties fijn rooster 2 Riemann-randen 280 iteraties verhoogde turb. visc. 5 iteraties	6.5.1 - 6.6.1 - 6.6.1 - 6.6.1 6.4 6.6.2 6.5
2a	Zijn er processen te vinden die de evenwichtsrelatie tussen diepte en dominant volume beïnvloeden?	Simulatie met morfologische model van de Westerschelde met verhoogde turbulente viscositeit	-	-	5.6 6.5
2b	Kunnen deze processen worden meegenomen in een aangepaste evenwichtsrelatie?	Kwalitatieve analyse aangepaste vergelijkingen	-	-	7.2 7.3 t/m t/m 7.19 7.5 8.2 t/m 8.3

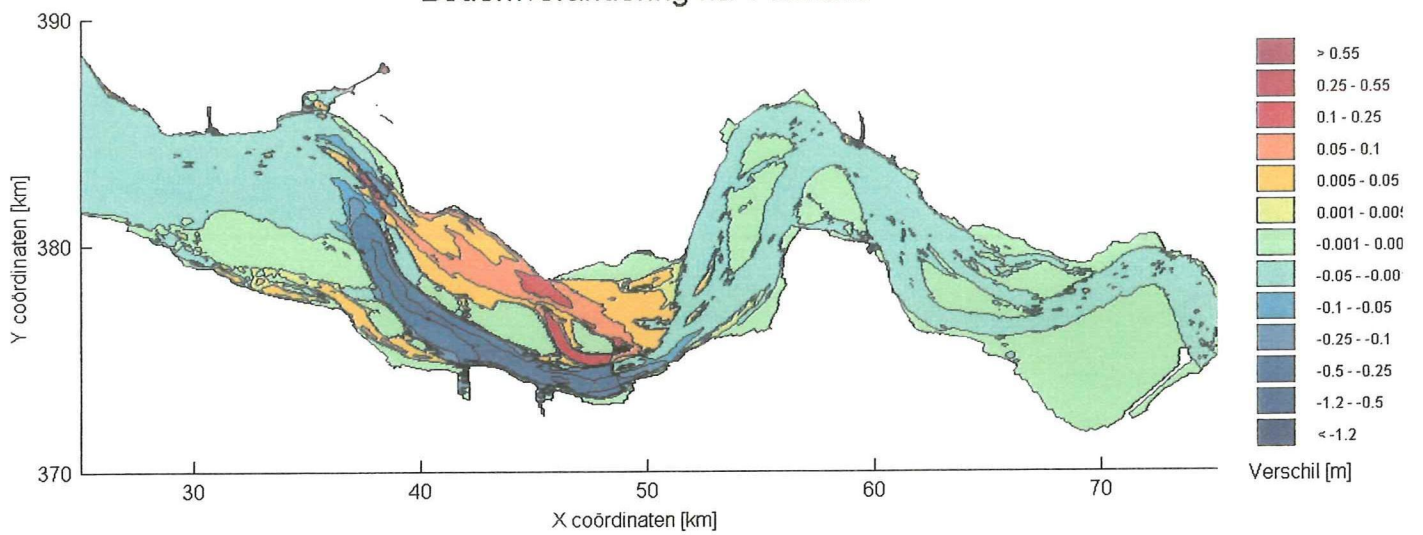




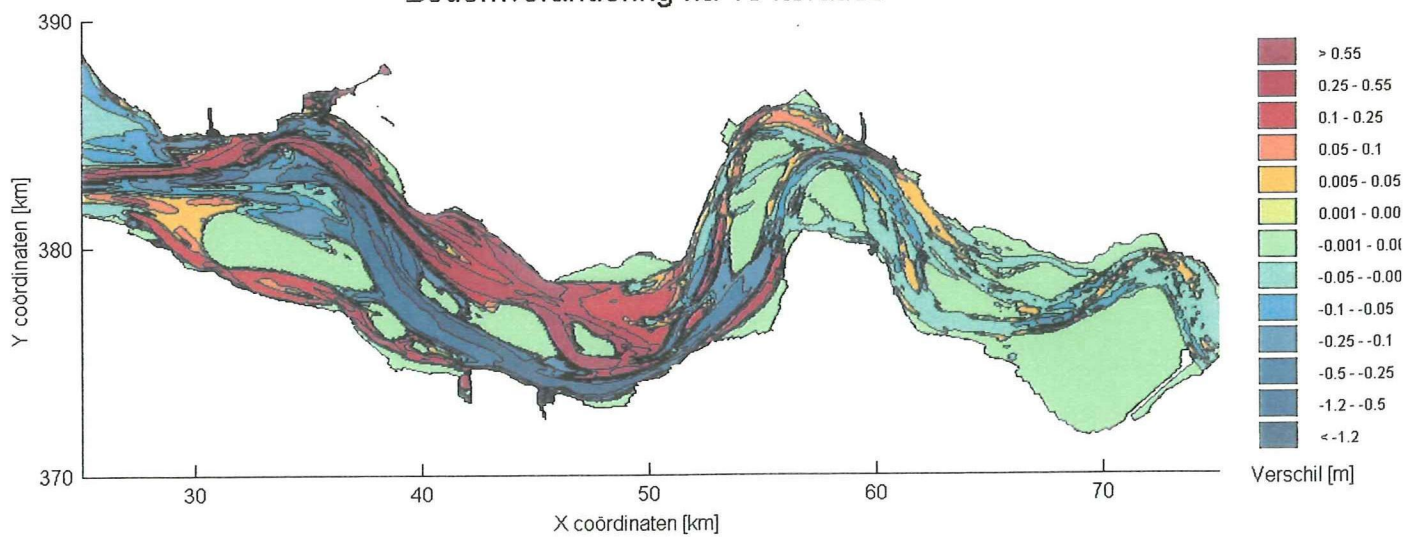
Ingreep: stort in Pas van Terneuzen



Bodemverandering na 1 iteratie



Bodemverandering na 10 iteraties



function Berekendv

```
%Deze functie berekent het dominant volume
%met als invoer de gegevens uit FINEL2D
%en wordt aangeroepen in functie bodemverandering

DeltaT=900; %tijdstap waarmee wordt weggeschreven
maxmaps=45000./DeltaT; %van een getijcyclus (45000s) wordt om de DeltaT weggeschreven

load uitvoer.out; %uitvoerfile uit Finel2D
load xyz.dat;
load tri.dat;

np=length(xyz); % aantal punten
ne=length(tri); % aantal elementen
x=xyz(:,1);
y=xyz(:,2);
z=xyz(:,3);
xe=sum(x(tri),2)/3; %x in het midden vd driehoek
ye=sum(y(tri),2)/3; %y " "

vlvol=zeros(size(tri(:,1)));
ebvol=zeros(size(tri(:,1)));
DV=zeros(size(tri(:,1)));

for i=1:maxmaps
    H=uitvoer((1+(i-1)*ne):i*ne,1); %waterdiepte
    QU=uitvoer((1+(i-1)*ne):i*ne,2); %snelheid*waterdiepte in oostwest-richting
    QV=uitvoer((1+(i-1)*ne):i*ne,3); %snelheid*waterdiepte in noordzuid-richting

    specQ=sqrt((QV.^2)+(QU.^2)).*DeltaT; %specifiek debiet
    i1=find(QV>0);
    i2=find(QV<=0);
    vlspecQ=zeros(size(specQ));
    ebspecQ=zeros(size(specQ));
    vlspecQ(i1)=specQ(i1);
    ebspecQ(i2)=specQ(i2);
    vlvol=vlvol+vlspecQ;
    ebvol=ebvol+ebspecQ;
end

netto=vlvol-ebvol; %resultante debiet doorgridcel
i=find(netto>0); %vloedgedomineerde cellen
DV(i)=abs(vlvol(i));
i=find(netto<0); %ebgedomineerde cellen
DV(i)=abs(ebvol(i));

save DV DV netto ebvol vlvol;
```

function bodemverandering

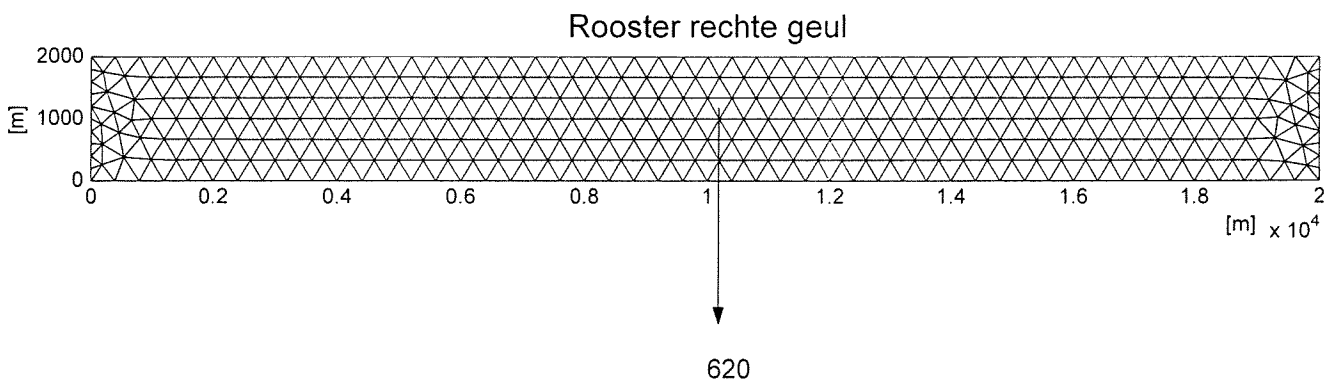
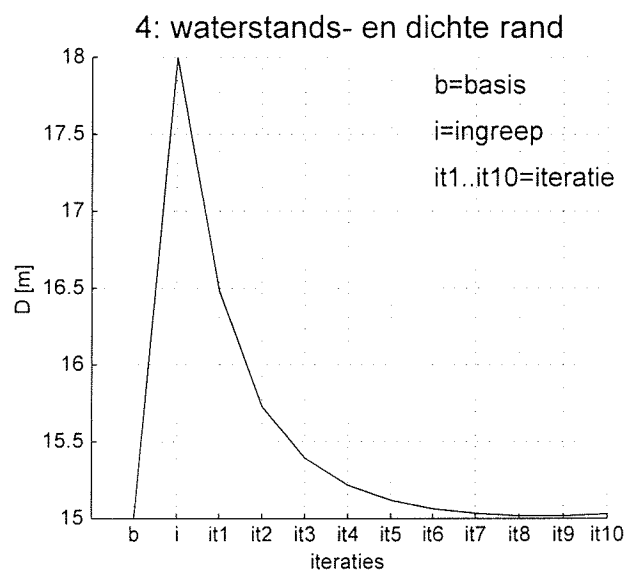
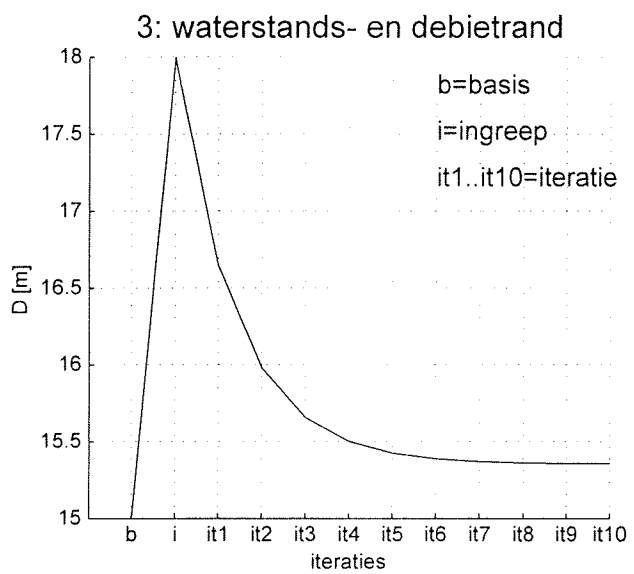
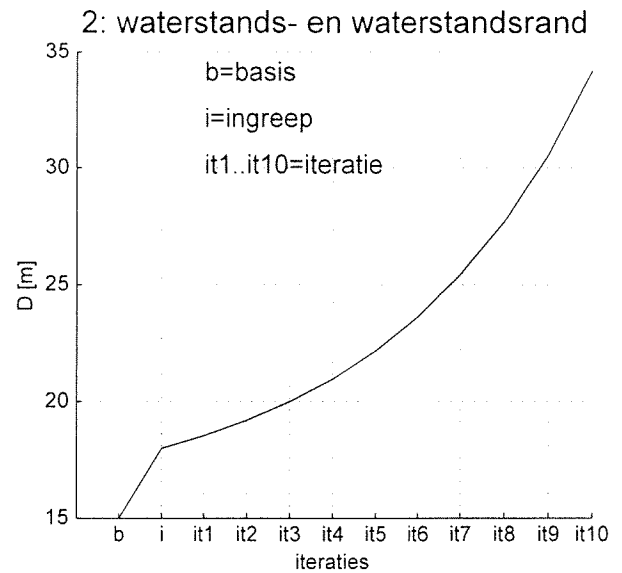
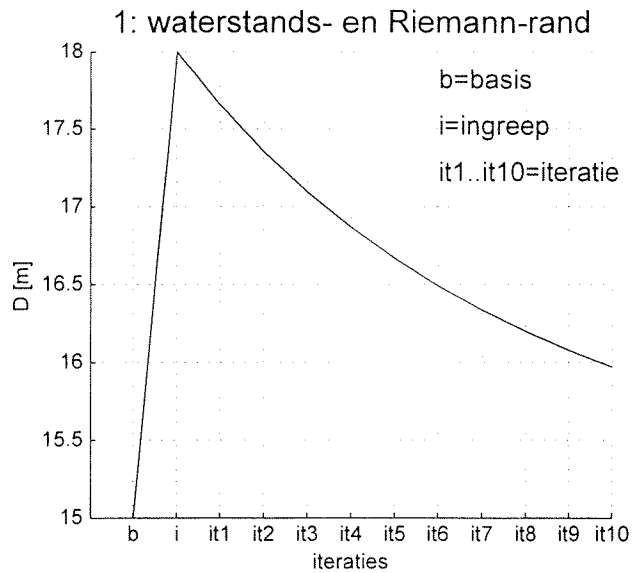
```
%Deze functie berekent mbv dominant volume (via function berekendv)
%de bodemverandering per element
%Voor een rechte geul/bocht/twee-geulensysteem

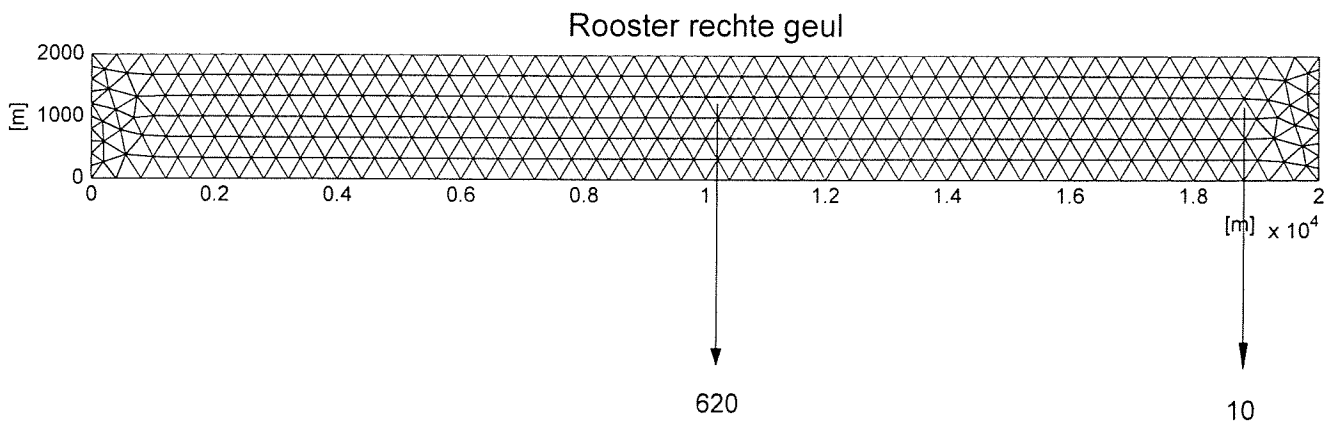
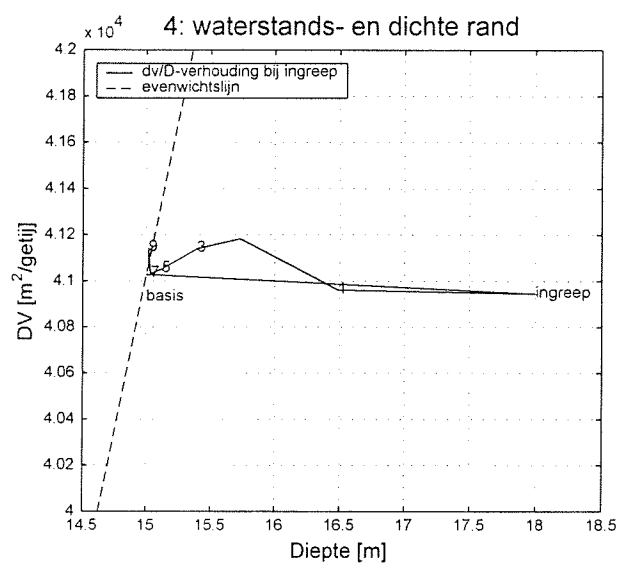
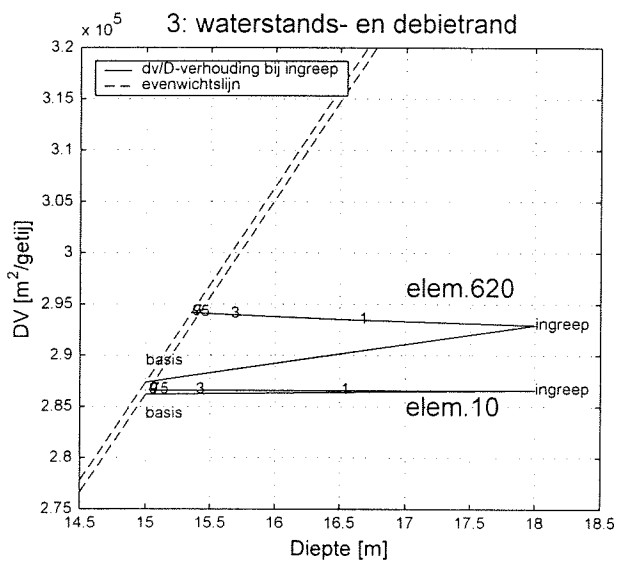
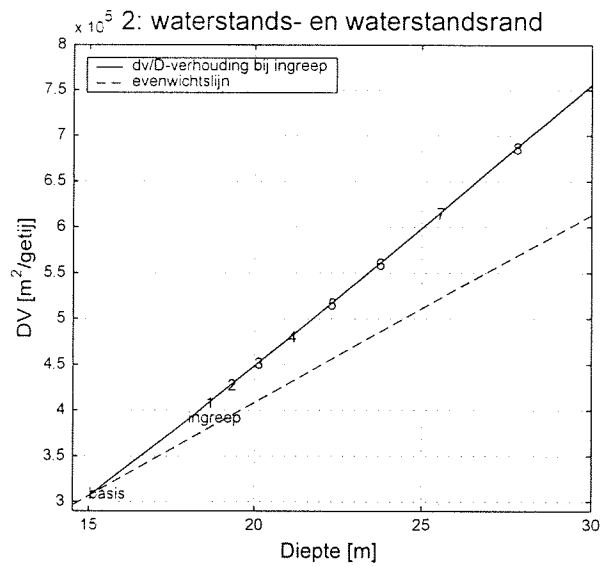
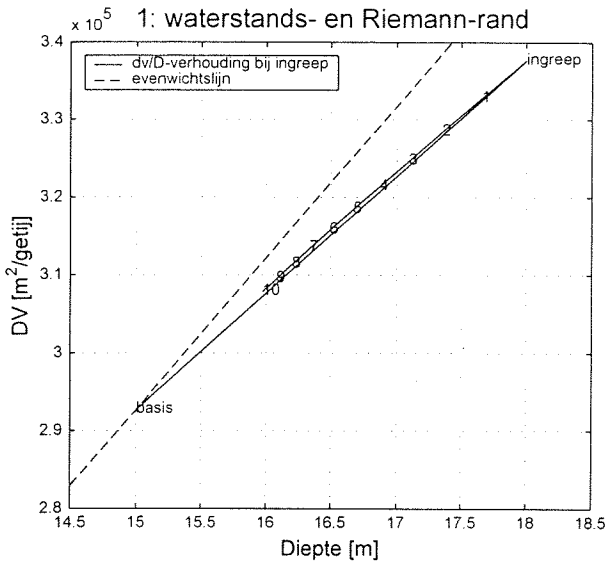
%Draai Finel2D met basisgrid voor betreffende geometrische situatie
%Laat het bijbehorende dominant volume berekenen en opslaan

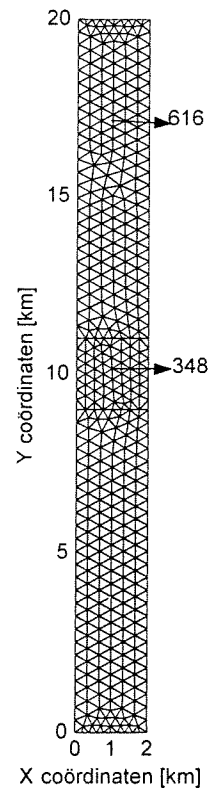
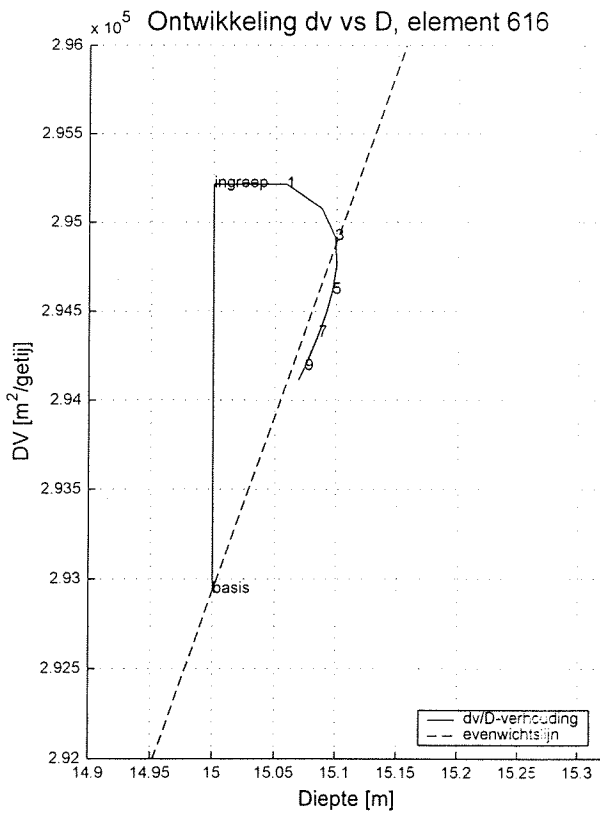
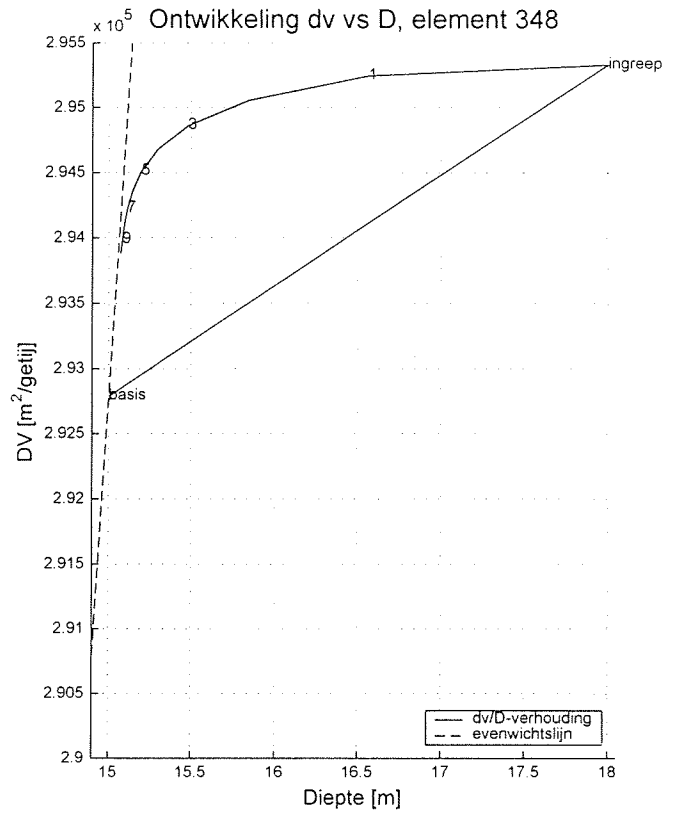
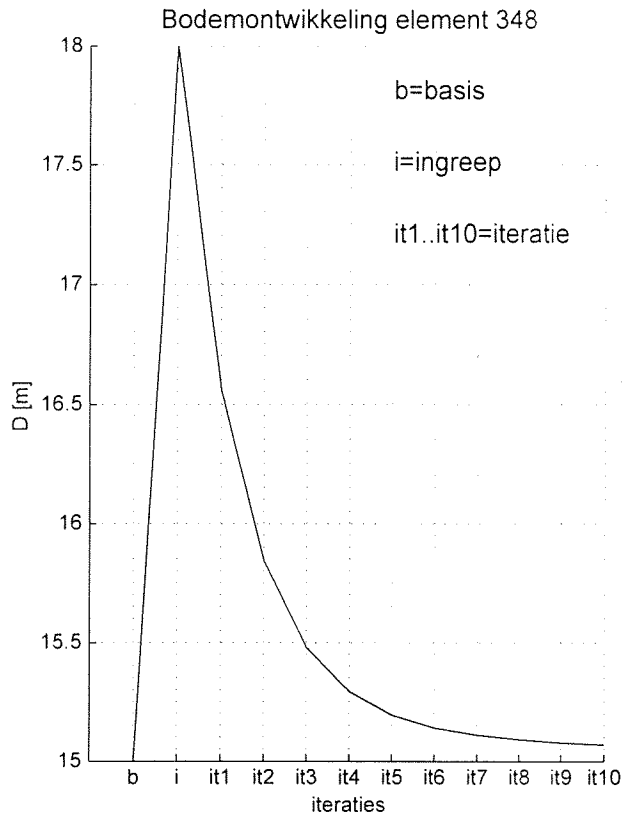
a=('diepte18'); %voer naam in: geeft geometrische vorm weer en randvoorwaarden
iteratie=500; %voer aantal iteraties in

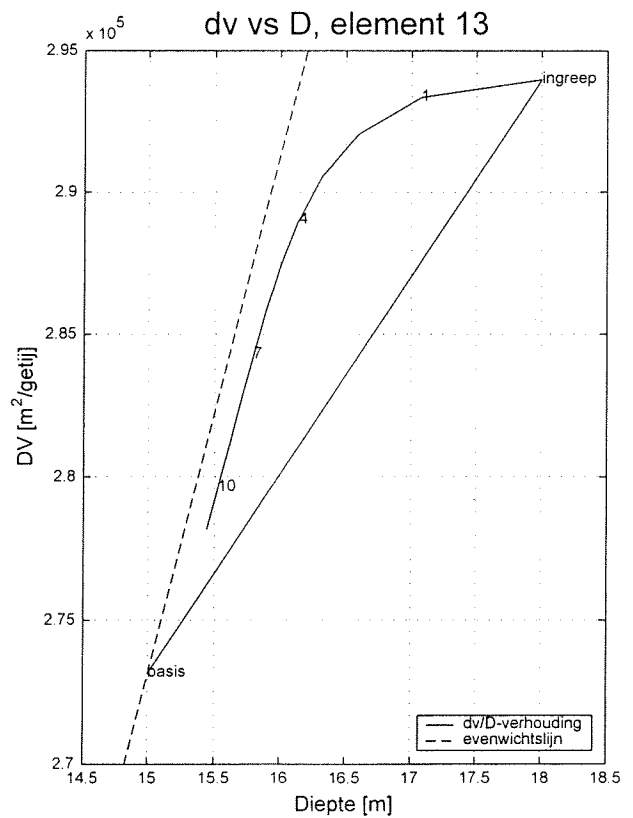
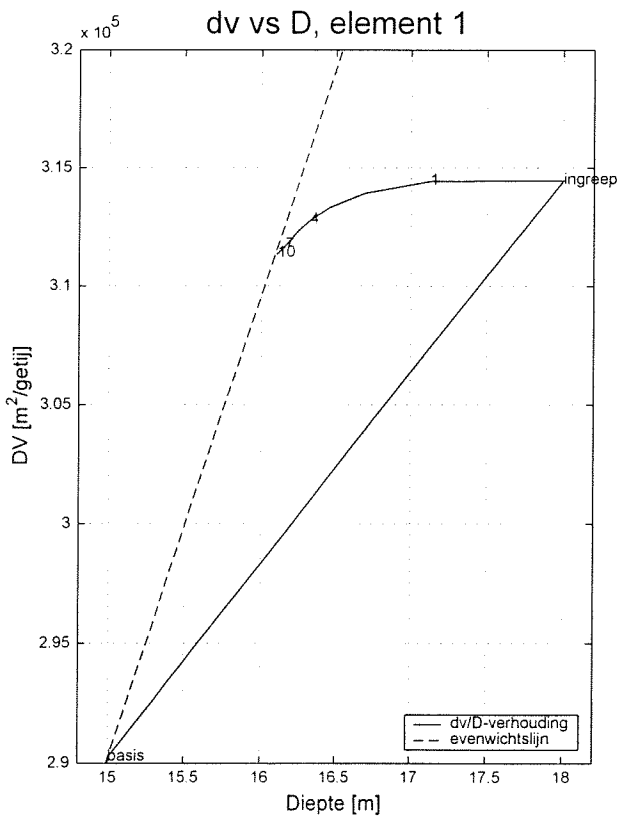
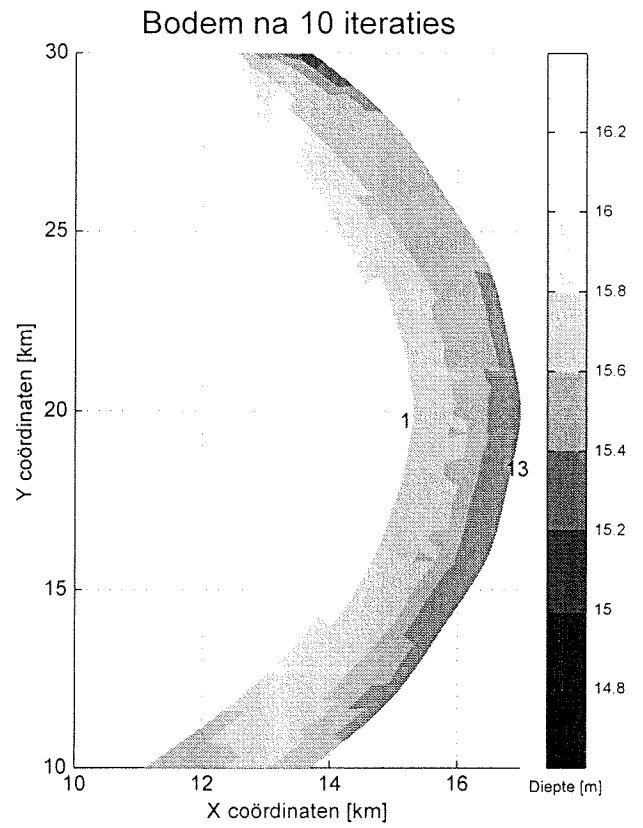
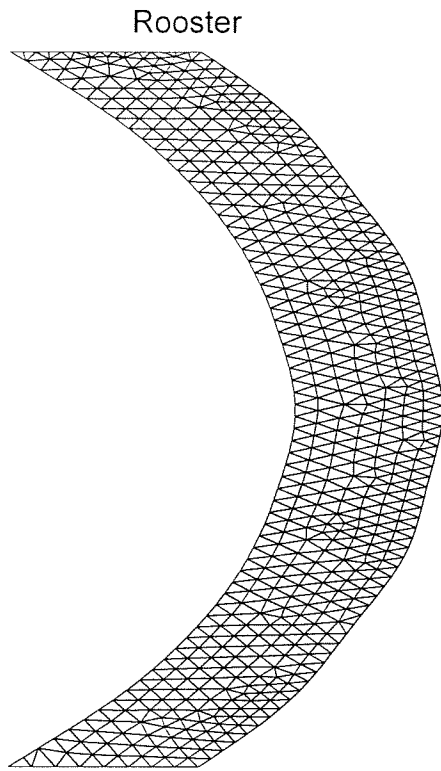
homedir='D:\morfologie\rechtebak\';
cd(homedir)
cd(a);
cd(basis);
load DV; %laad dominant volume berekend met berekendv_rechtebak
load bodem.bod %laad de basisbodem
cd..
DVbasis=DV;
Dbasis=bodem;

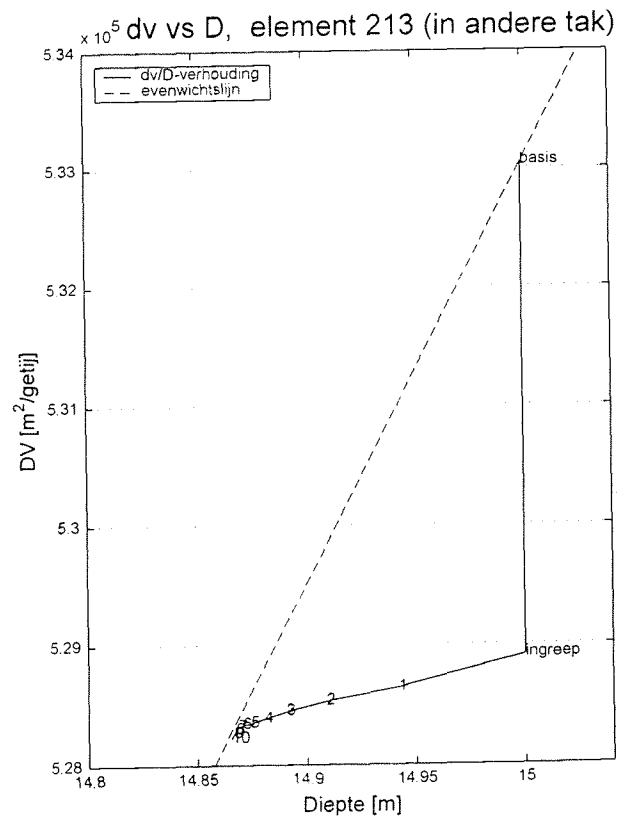
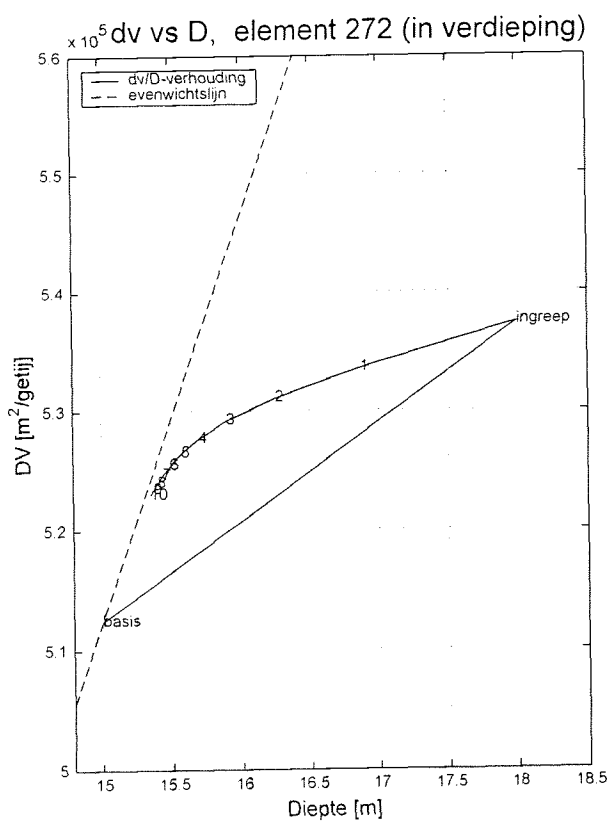
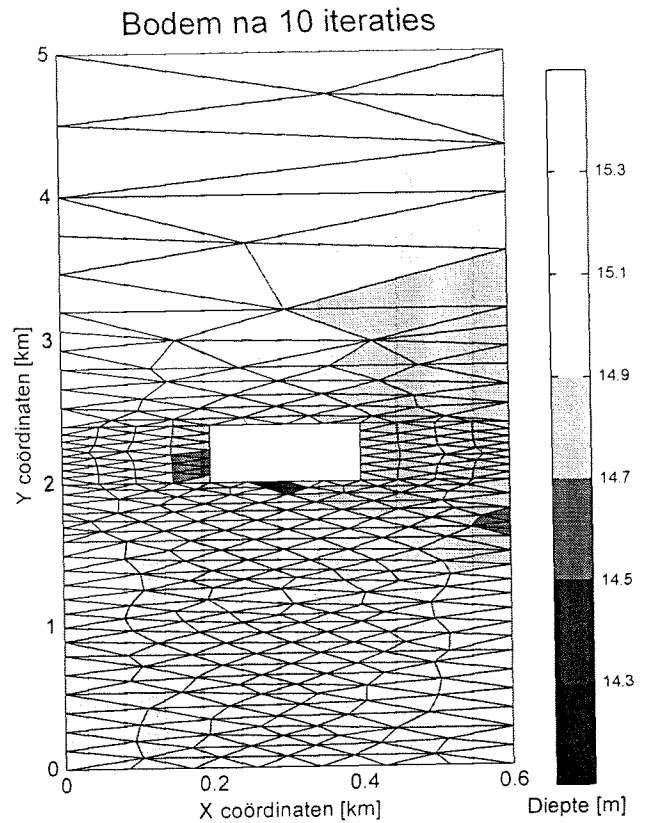
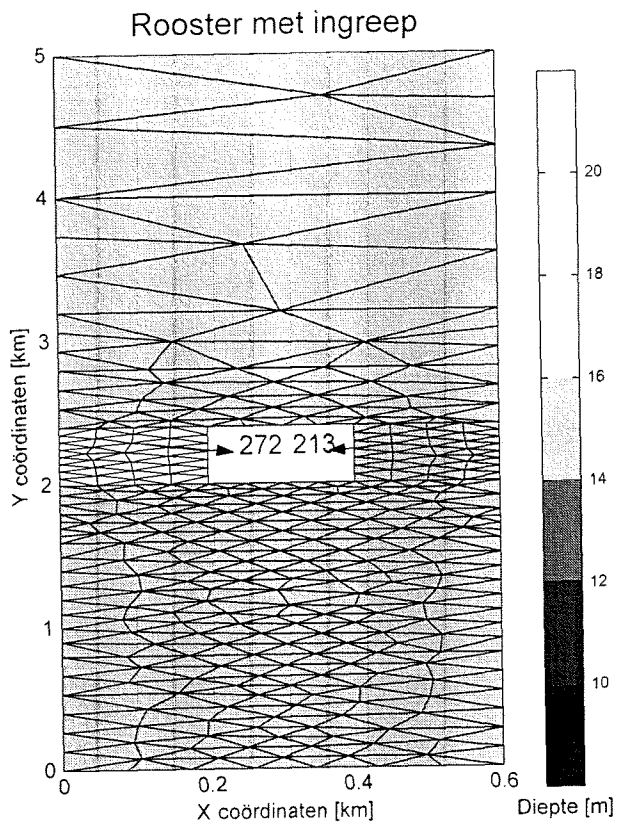
%Draai Finel2D met ingreep
disp('Berekening met ingreep gestart....');
if ~exist('ingreep','dir');
!mkdir ingreep
end
cd(['ingreep']);
load bodem.bod; %laad de bodem van de ingreep
Dingreep=bodem;
!copy D:\Test\Finel2geull8hr1rr3fijn\Debug\finel2geull8hr1rr3fijn.exe .
!finel2geull8hr1rr3fijn;
!del finel2geull8hr1rr3fijn.exe;
%Bereken DV behorend bij ingreep
berekendv_rechtebak
load DV
cd..;
DVit=DV;
%Bereken Dnew(1);
Dnew=(DVit.*(Dbasis./DVbasis));
dt=Dnew-Dingreep;
Dnew=Dnew-(0.5.*dt);
if ~exist('it1','dir');
!mkdir it1
end
cd it1
save bodem.bod Dnew -ascii;
%Laat Finel2D draaien met Dnew(i-1)
for i=1:iteratie;
disp(['Iteratie ' num2str(i) ' gestart....']);
!copy D:\Test\Finel\testFIN\Debug\testfin.exe .
!testfin;
!del testfin.exe;
%Bereken DV behorend bij de iteratiestap
berekendv_rechtebak
load DV
cd..;
DVit=DV;
Dit=Dnew;
%Bereken Dnew(i);
Dnew=(DVit.*(Dbasis./DVbasis));
dt=Dnew-Dit;
Dnew=Dnew-(0.5.*dt);
if ~exist(['it' num2str(i+1)],'dir');
eval(['!mkdir it' num2str(i+1)]);
end
cd(['it' num2str(i+1)]);
save bodem.bod Dnew -ascii;
end
```

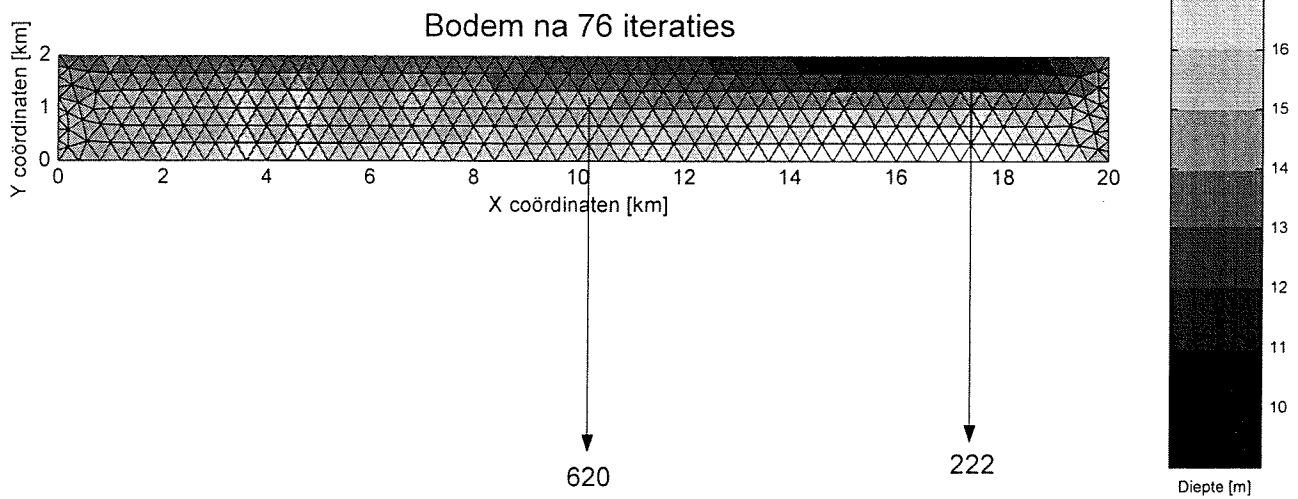
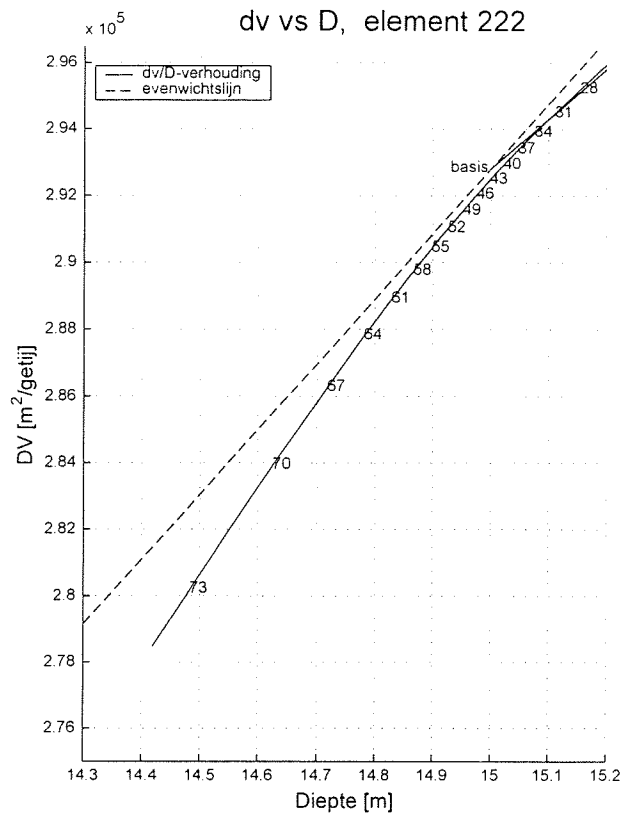
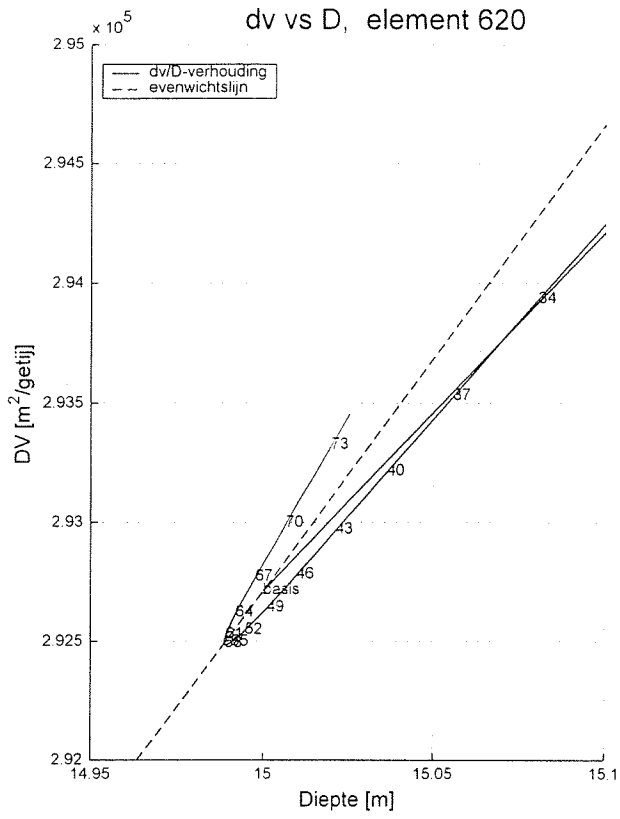




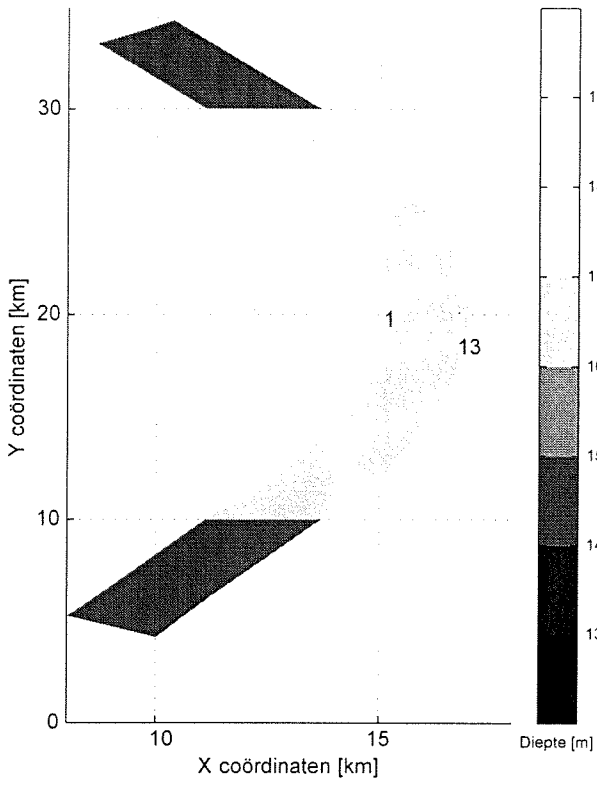




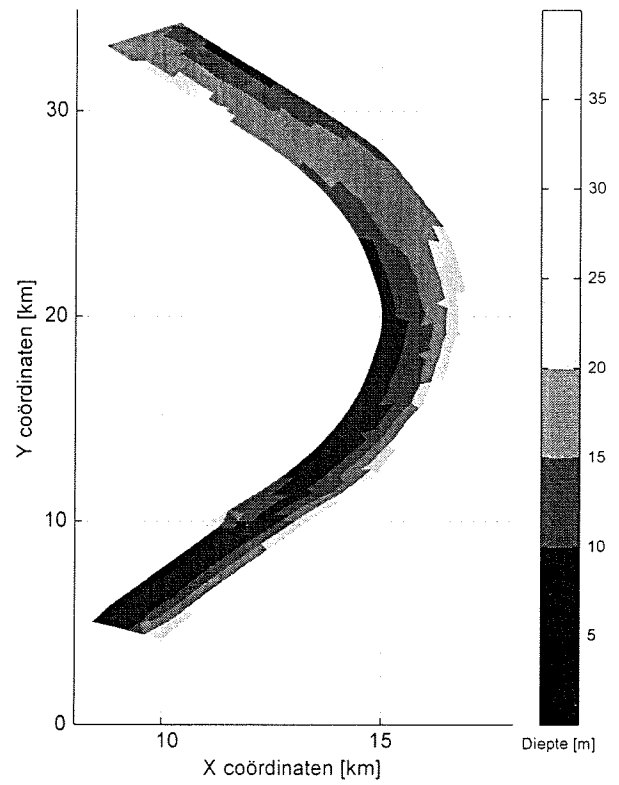




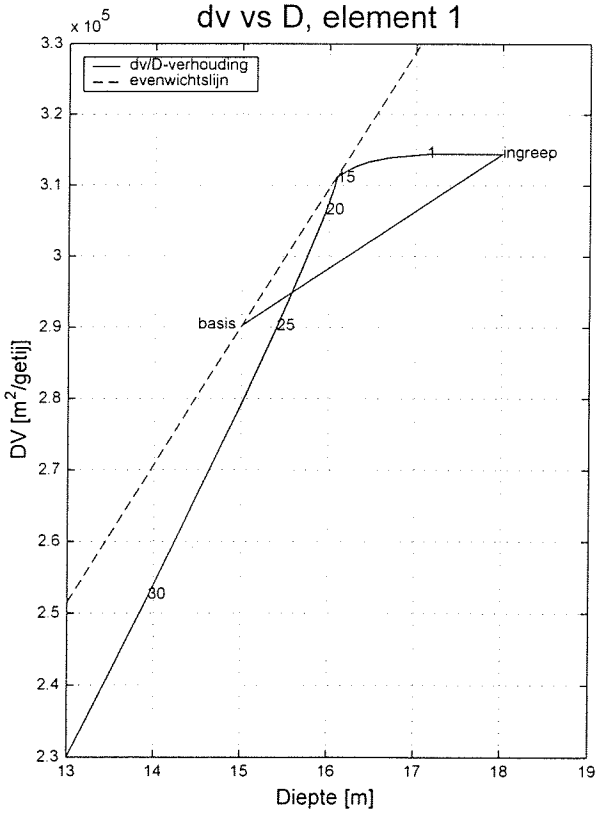
Bodem met ingreep



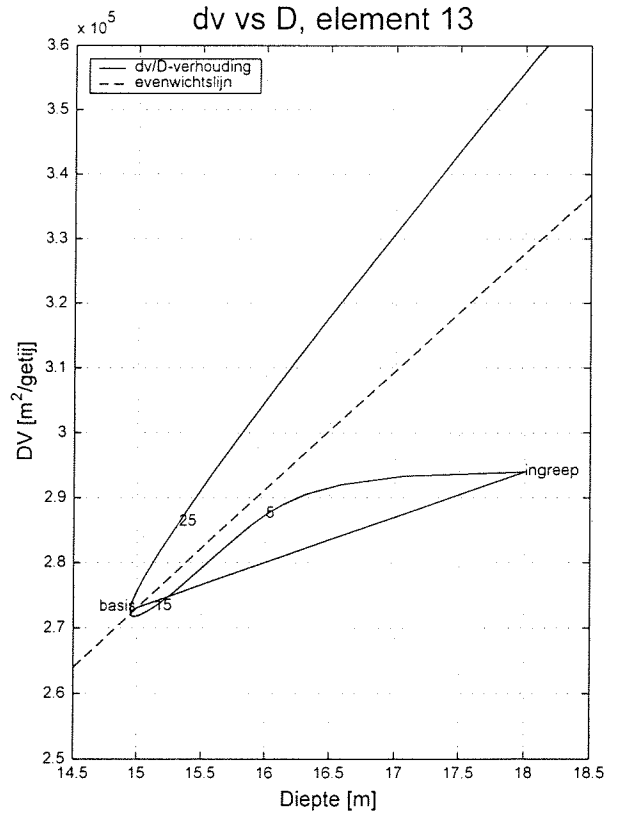
Bodem na 40 iteraties



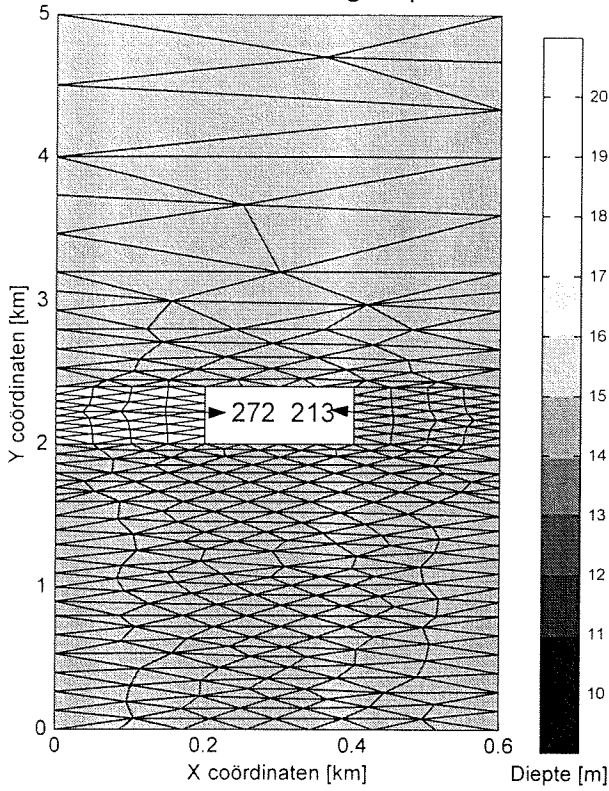
dv vs D, element 1



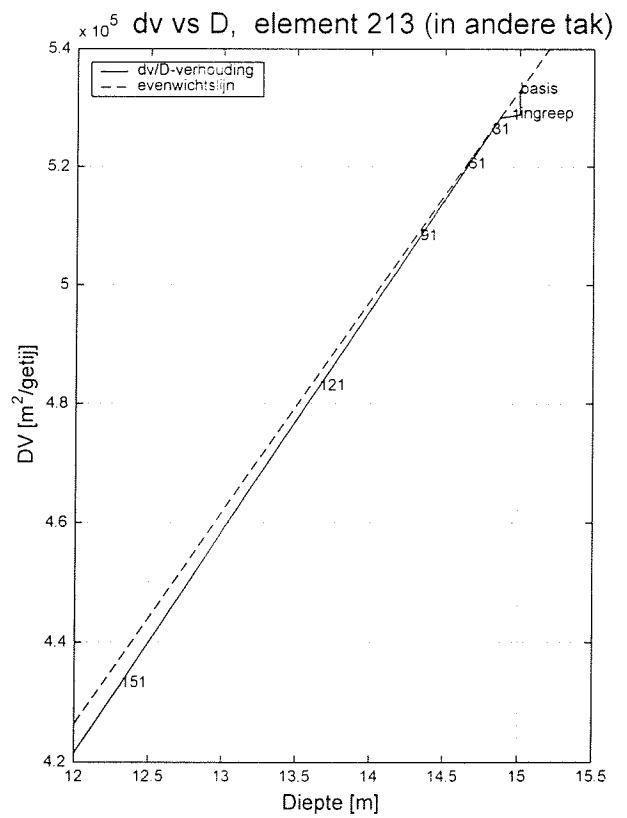
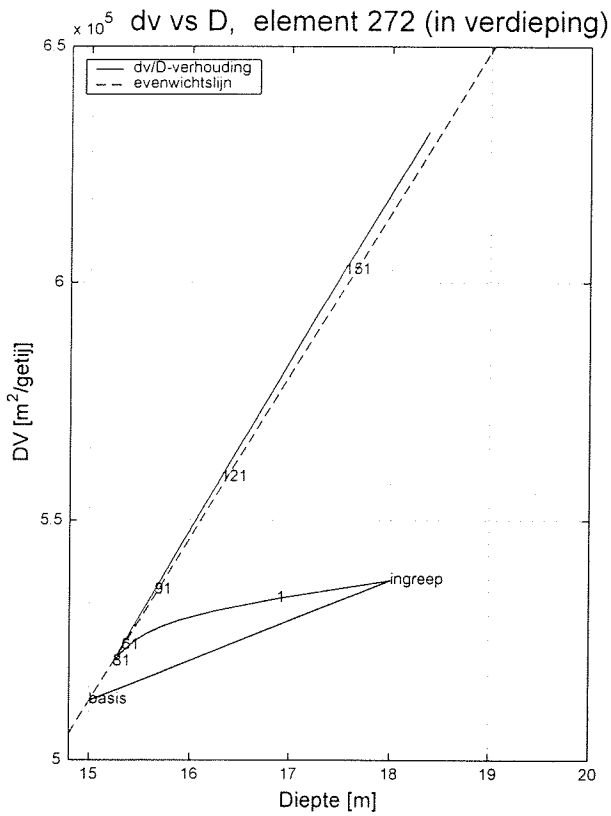
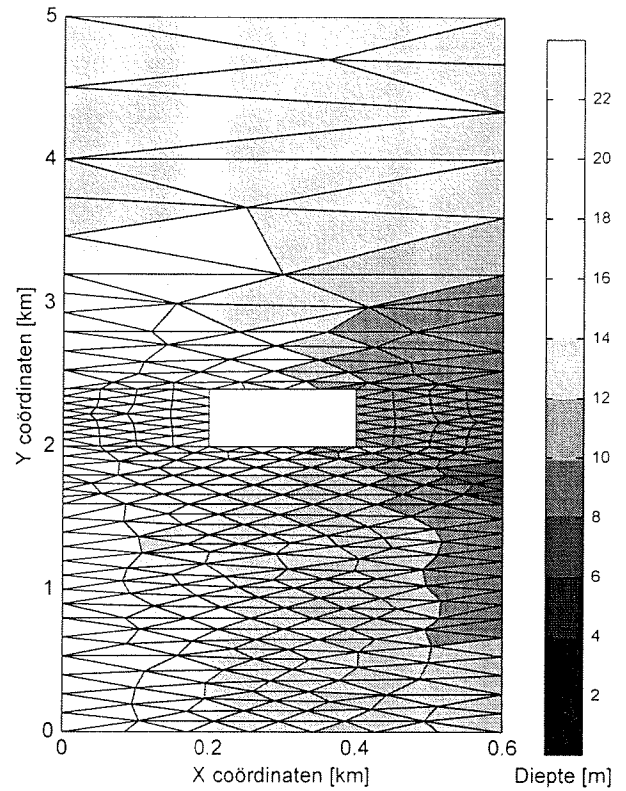
dv vs D, element 13



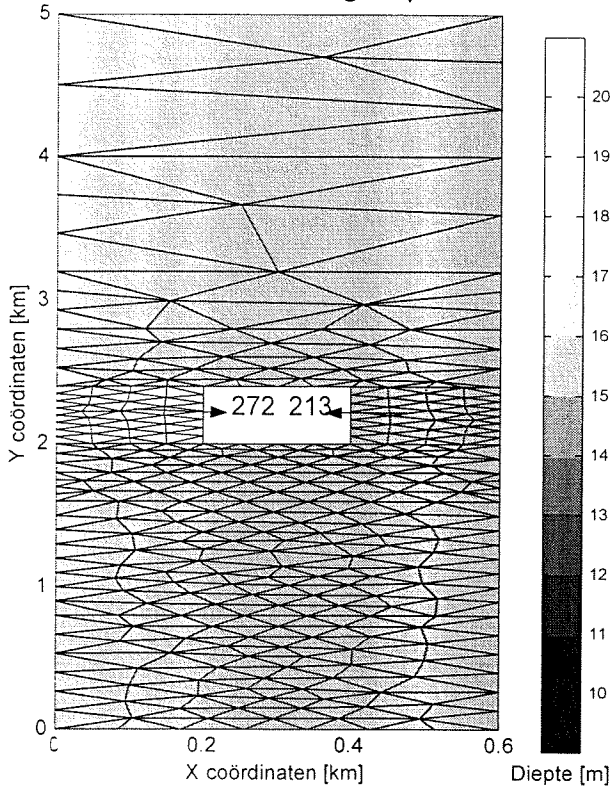
Rooster met ingreep



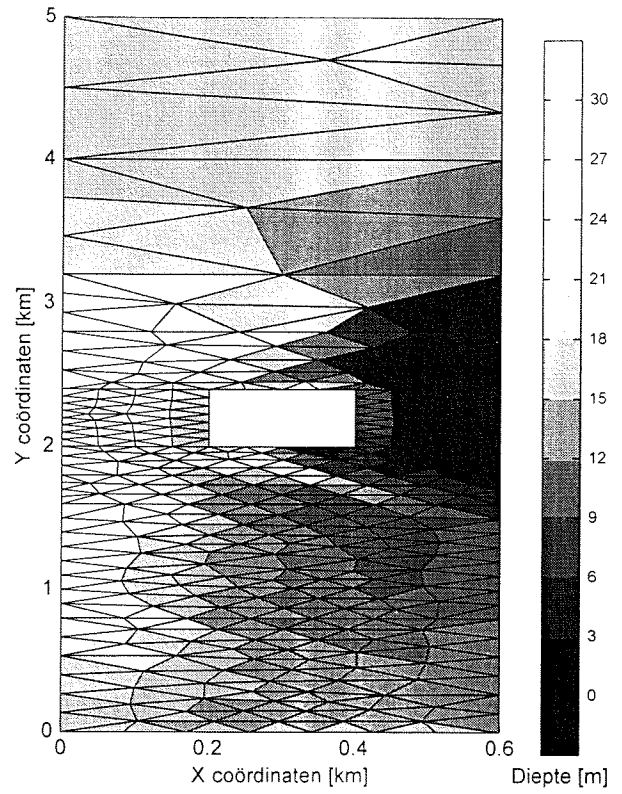
Bodem na 167 iteraties



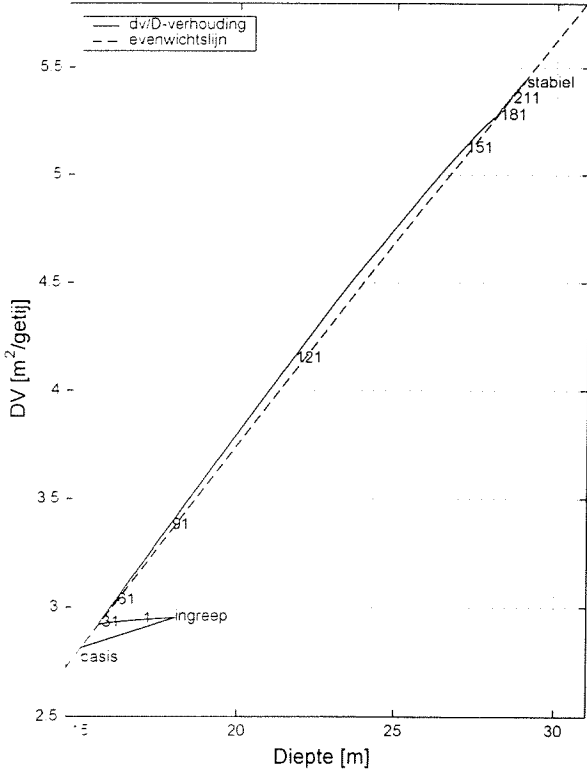
Rooster met ingreep



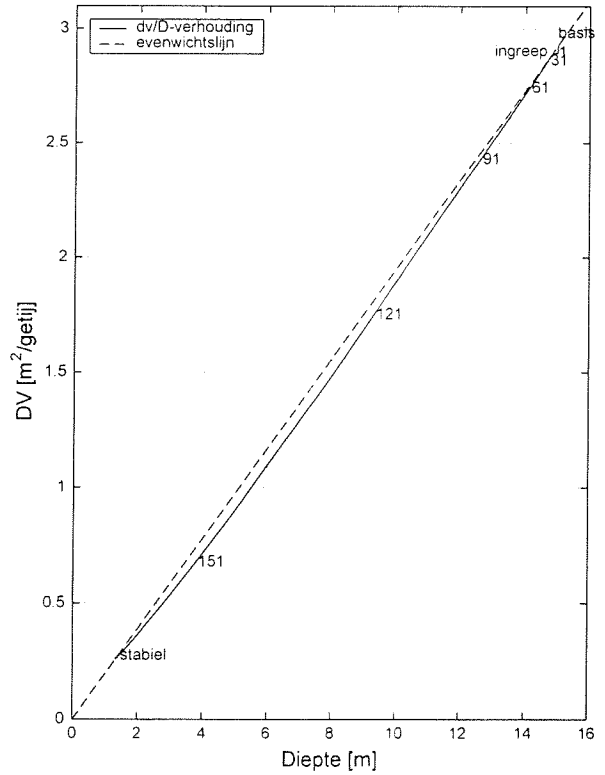
Bodem na 280 iteraties



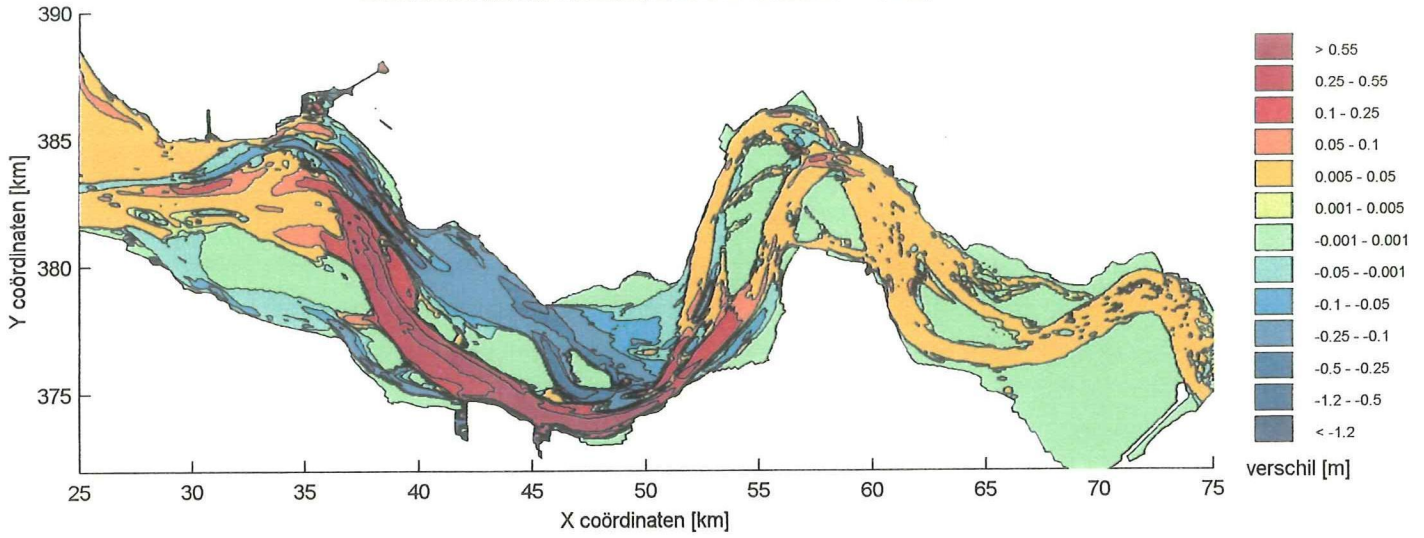
$\times 10^{-5}$ dv vs D, element 272 (in verdieping)



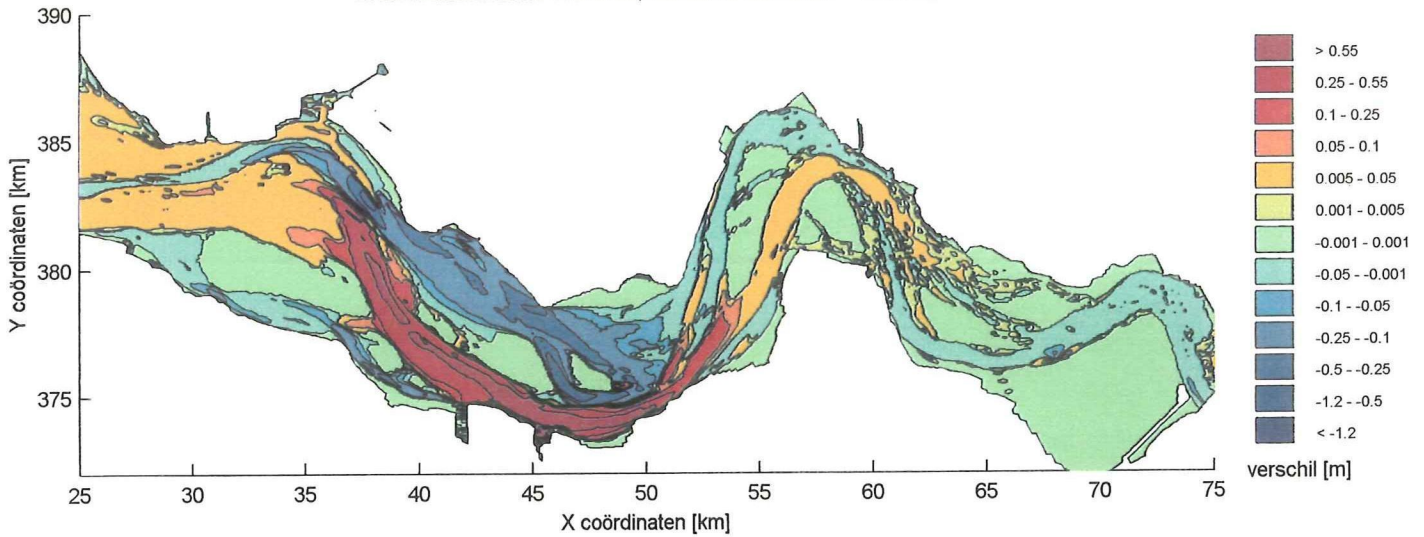
$\times 10^{-5}$ dv vs D, element 213 (in andere tak)



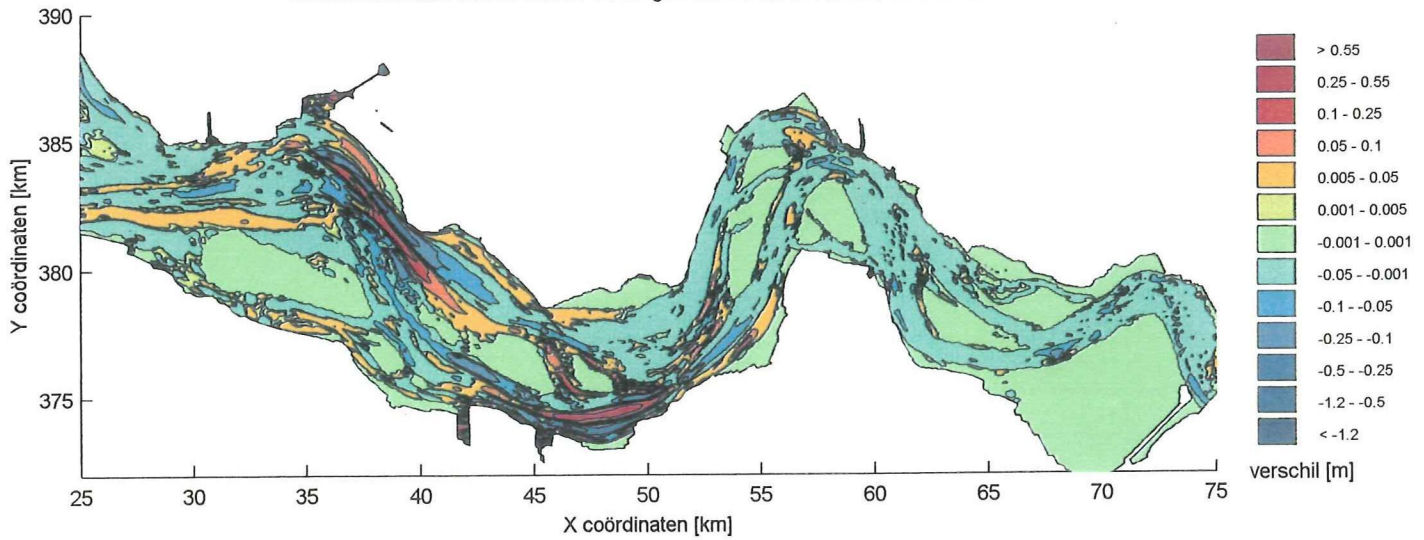
Bodemverschillen na 5 iteraties, turbulente viscositeit = 1 m²/s,



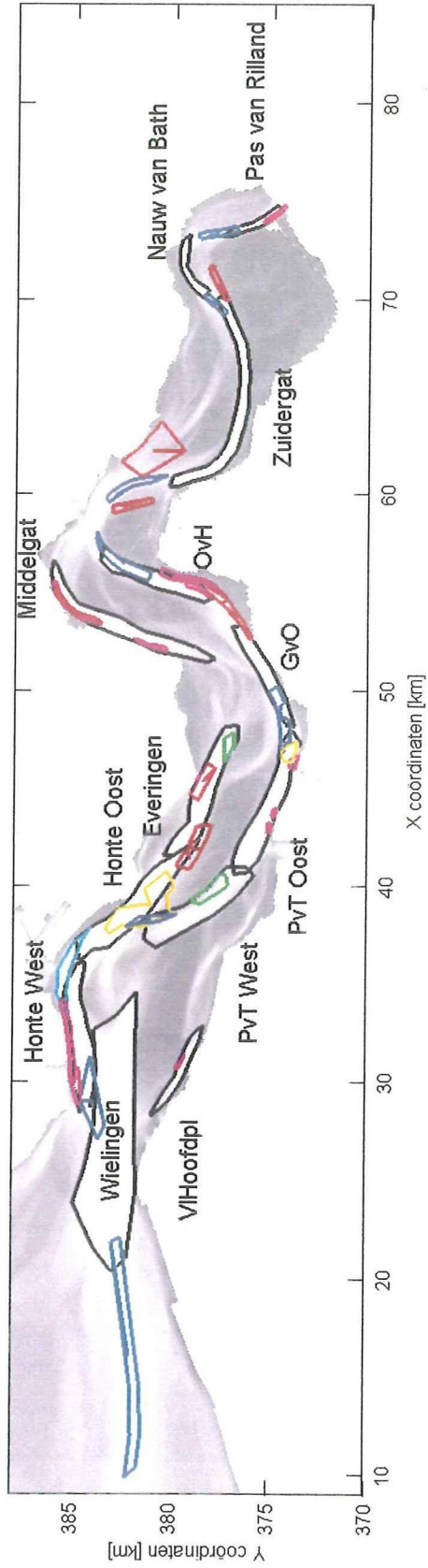
Bodemverschillen na 5 iteraties, turbulente viscositeit = 10 m²/s,



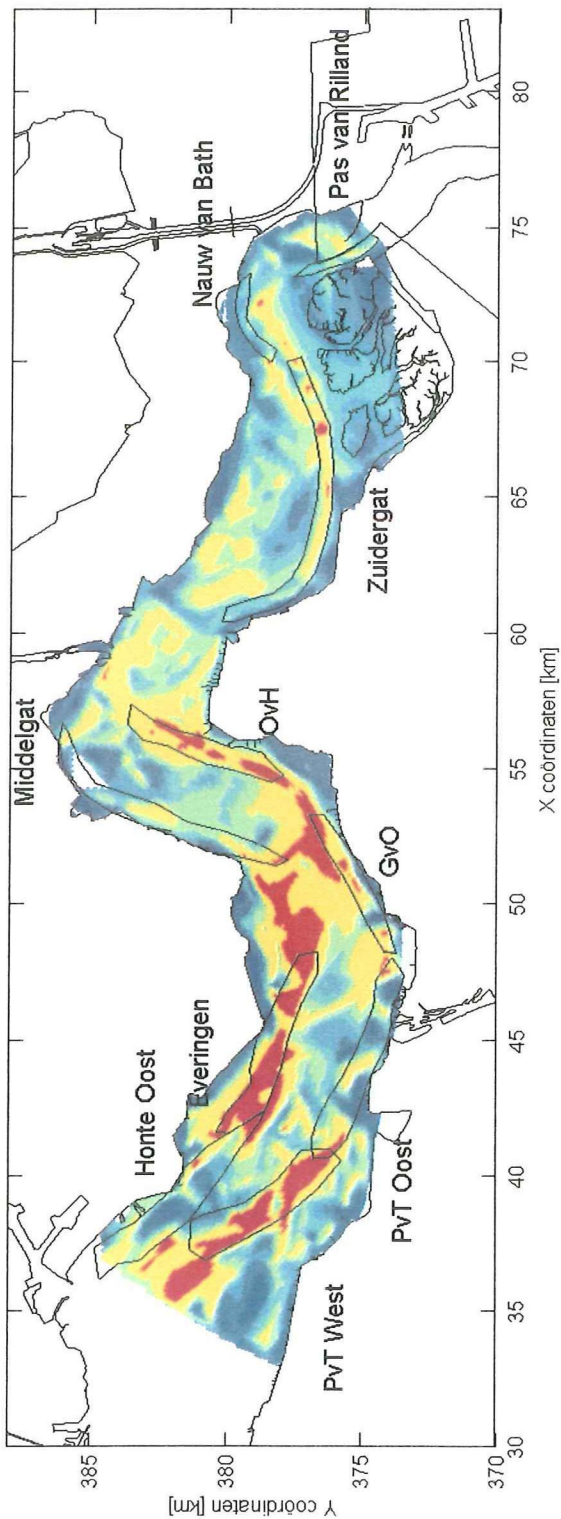
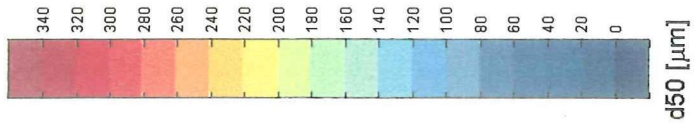
Bodemverschillen met en zonder verhoogde turbulente viscositeit, na 5 iteraties

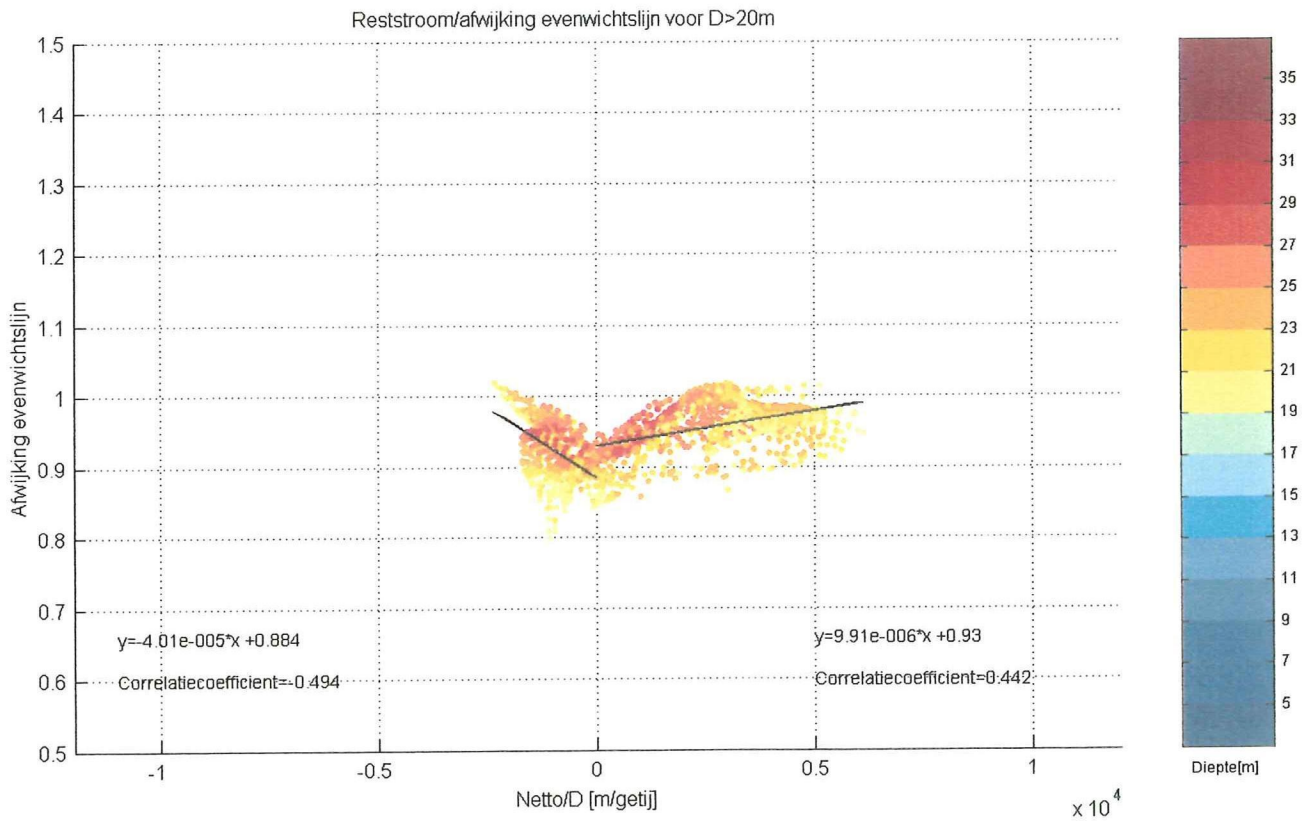
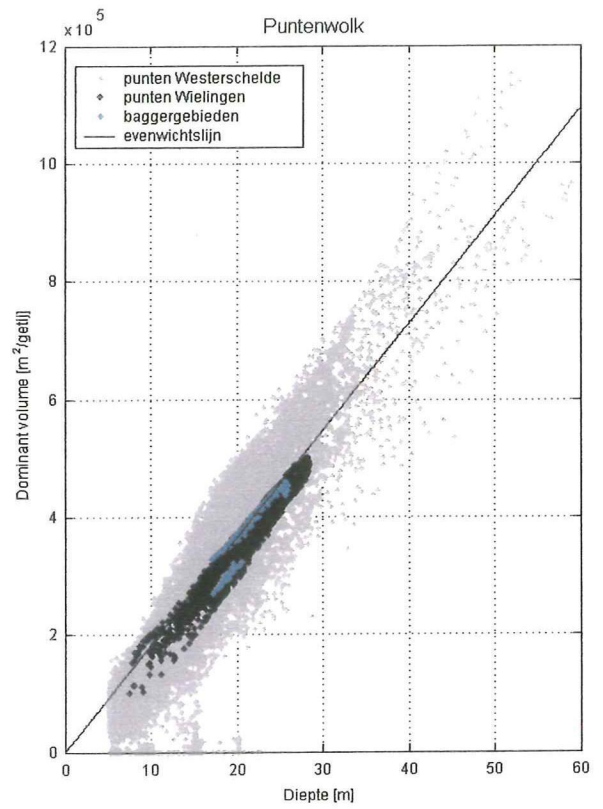
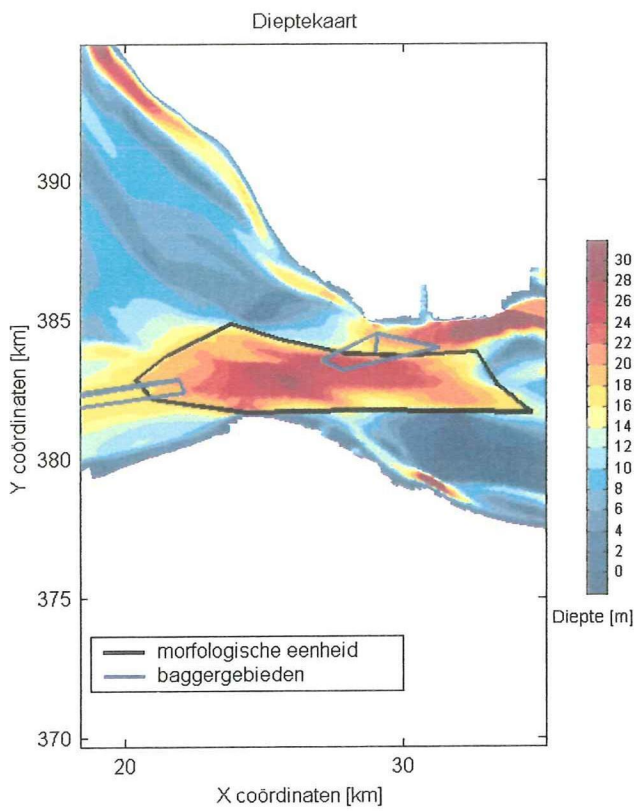


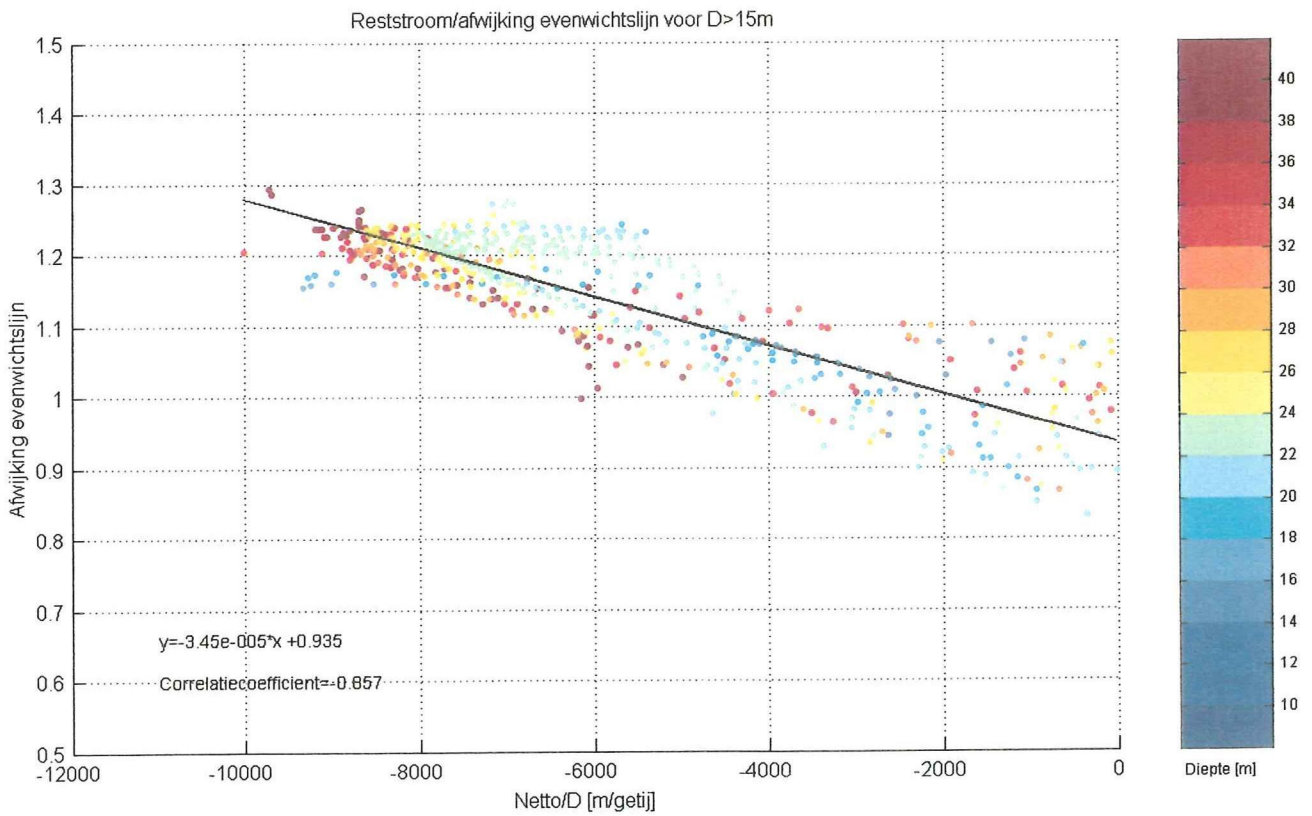
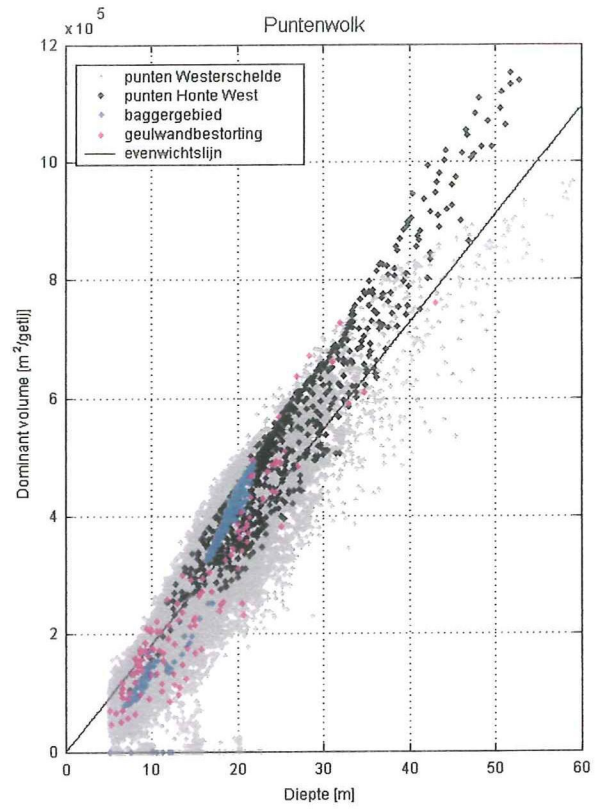
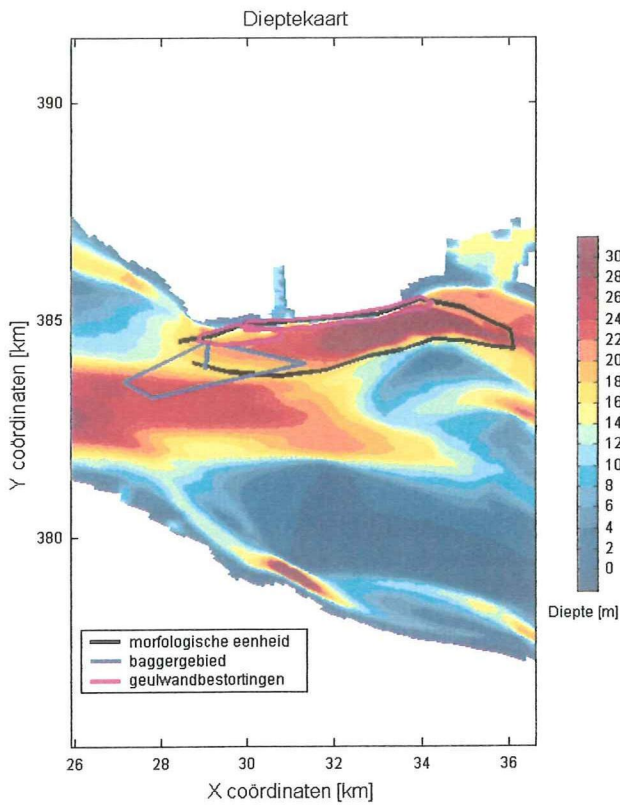
- morfologische eenheden
- baggergebieden
- stortgebieden
- geulwandbestortingen
- gebieden met grof sediment
- gebieden met fijn sediment
- gebied met schelpenrug

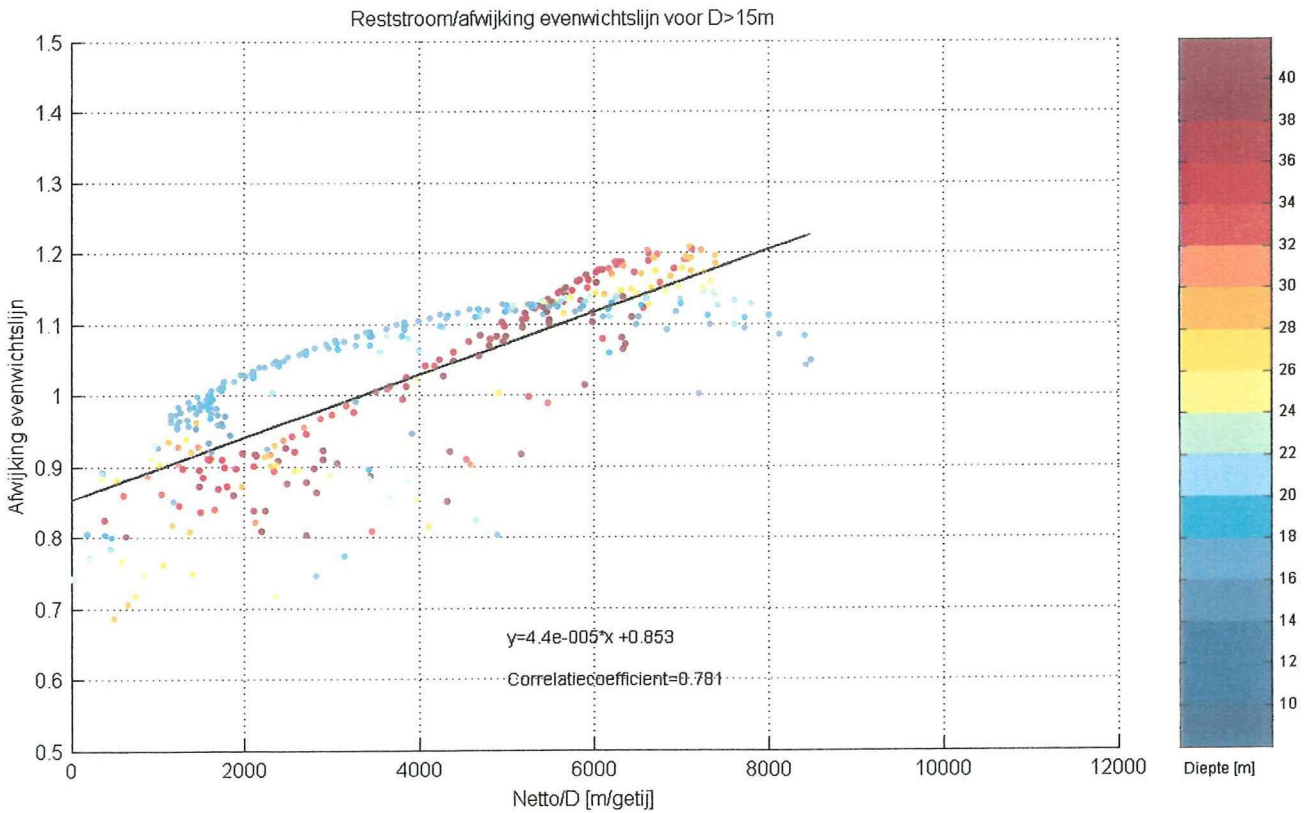
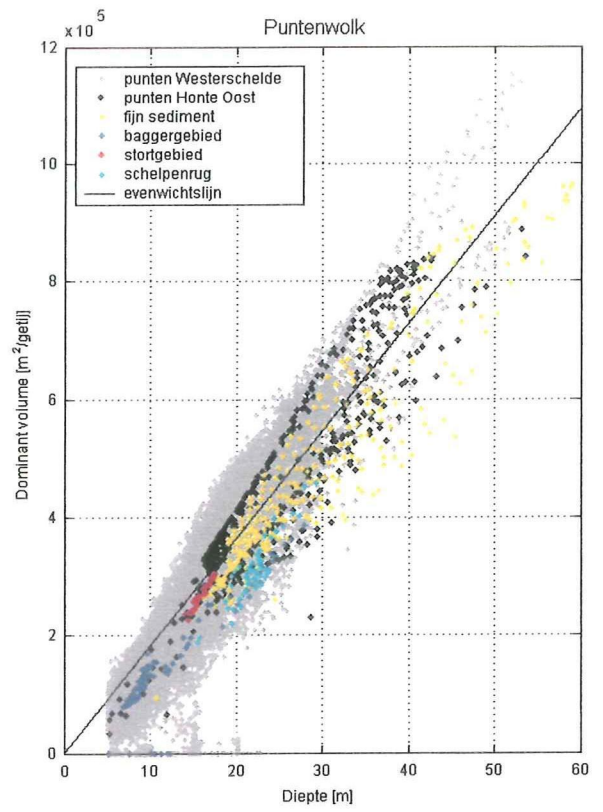
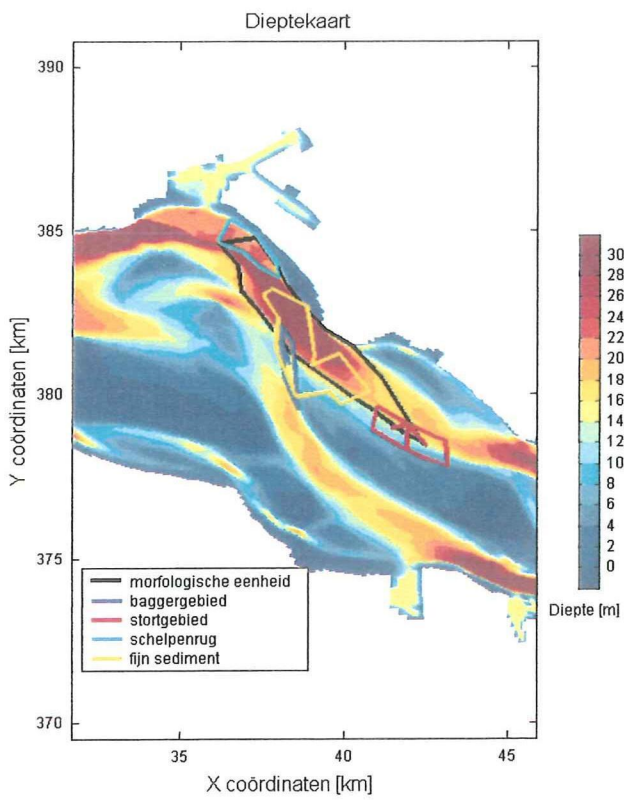


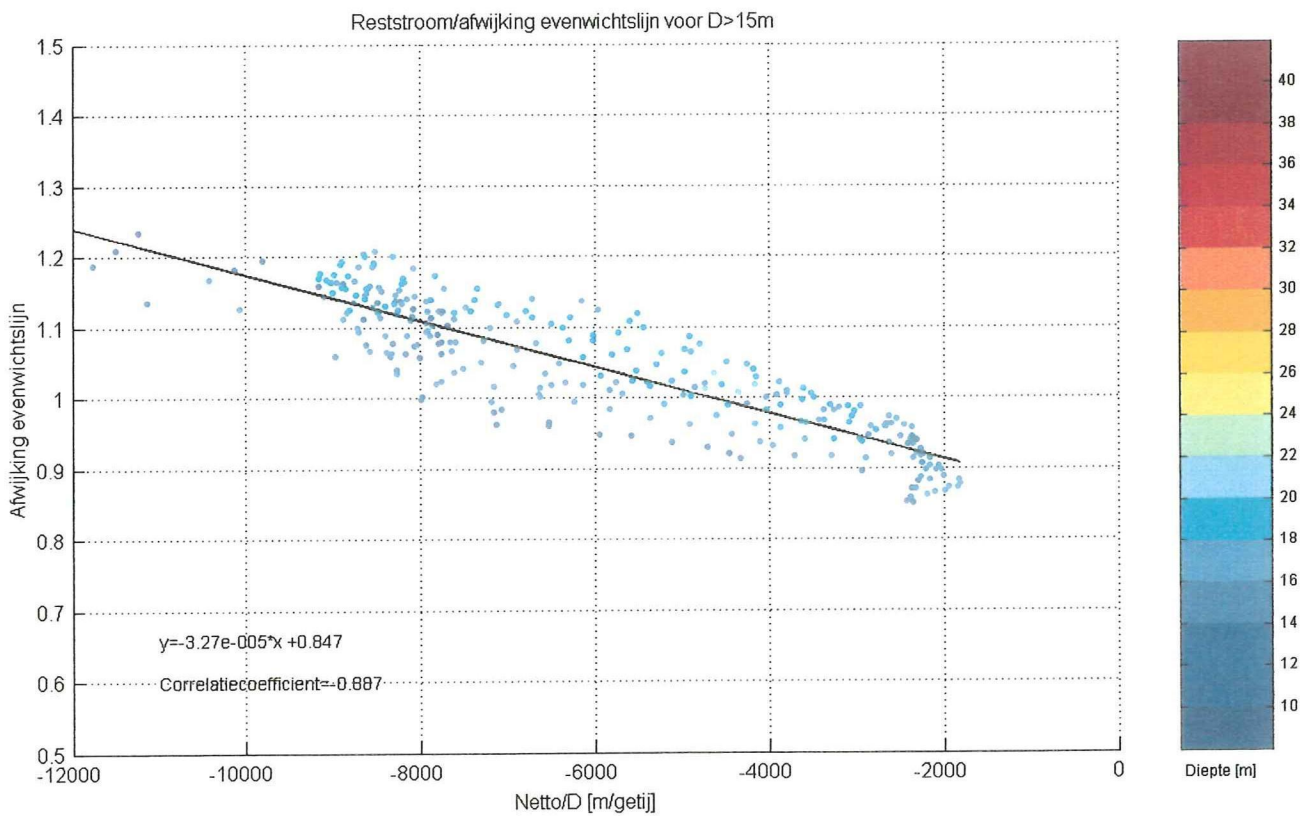
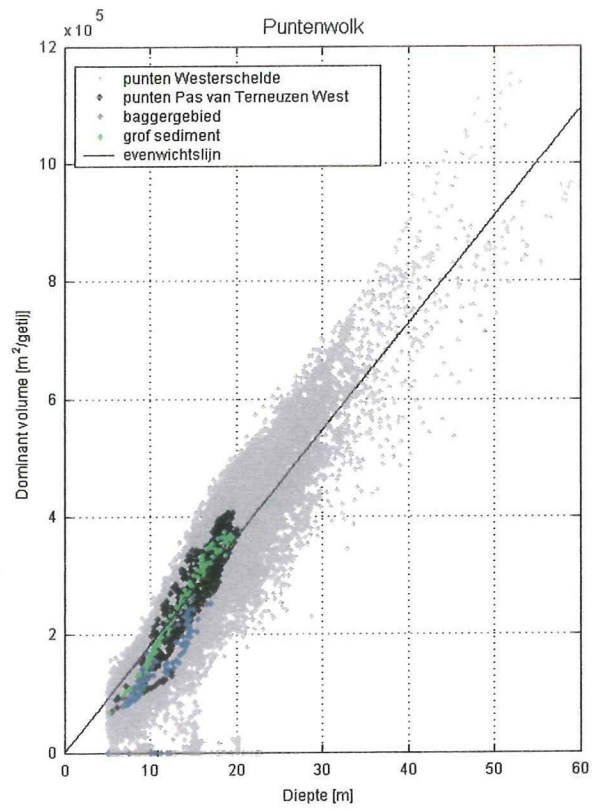
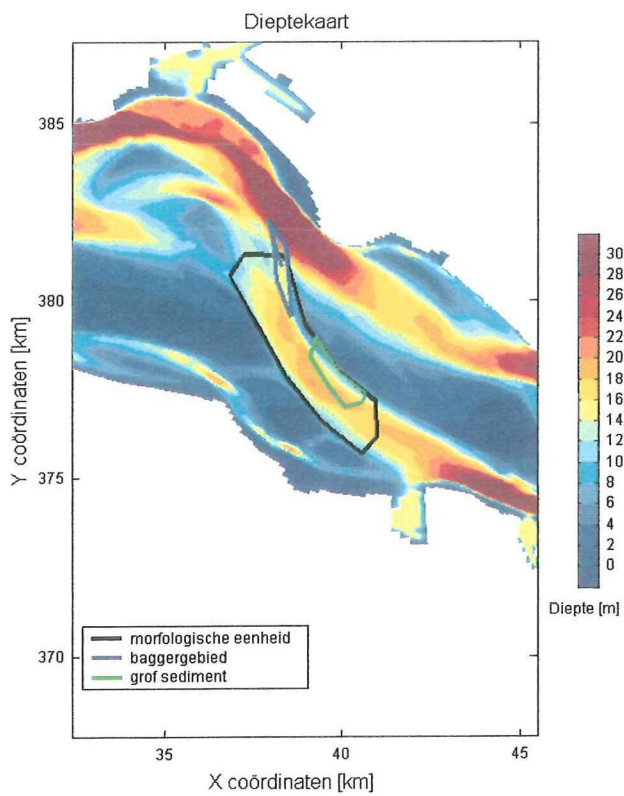
**Dieptekaart Westerschelde
met gedefinieerde geuldelen**

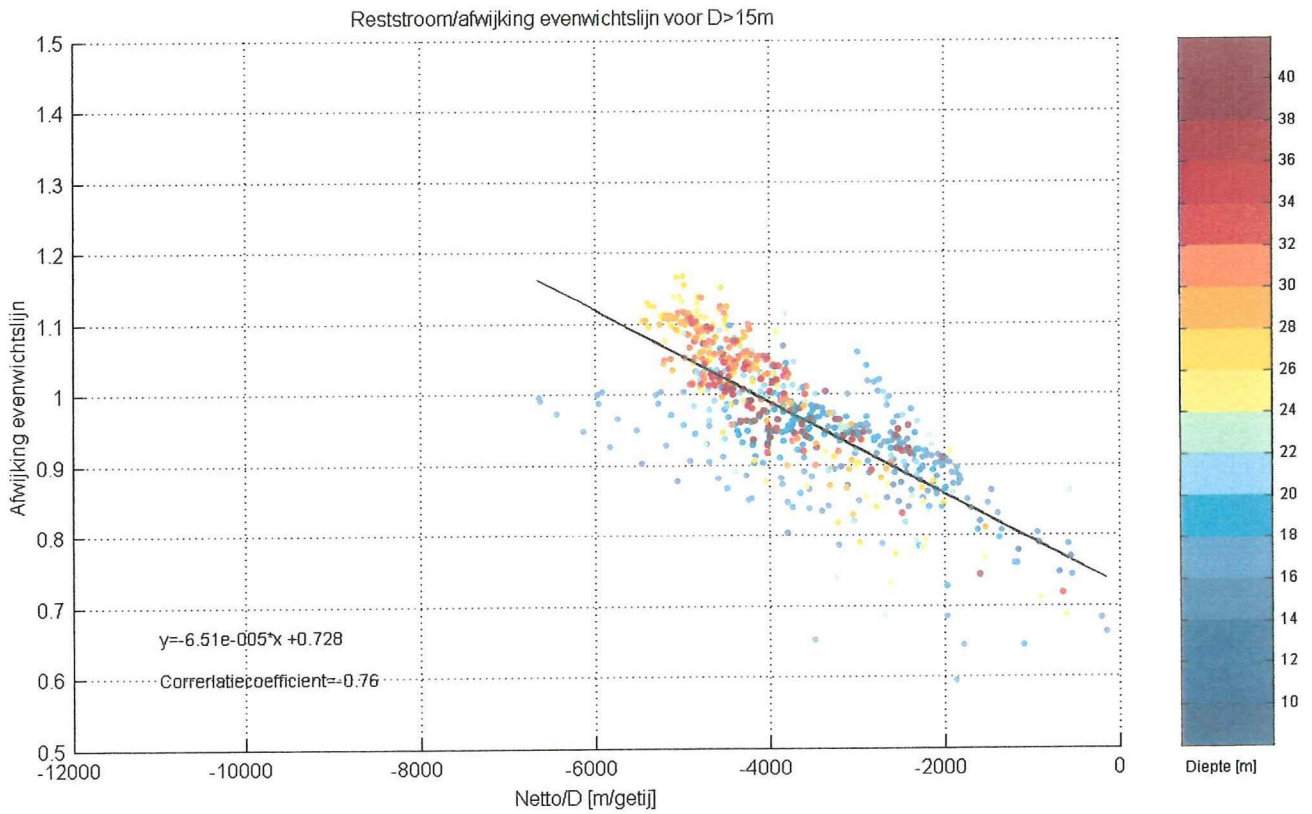
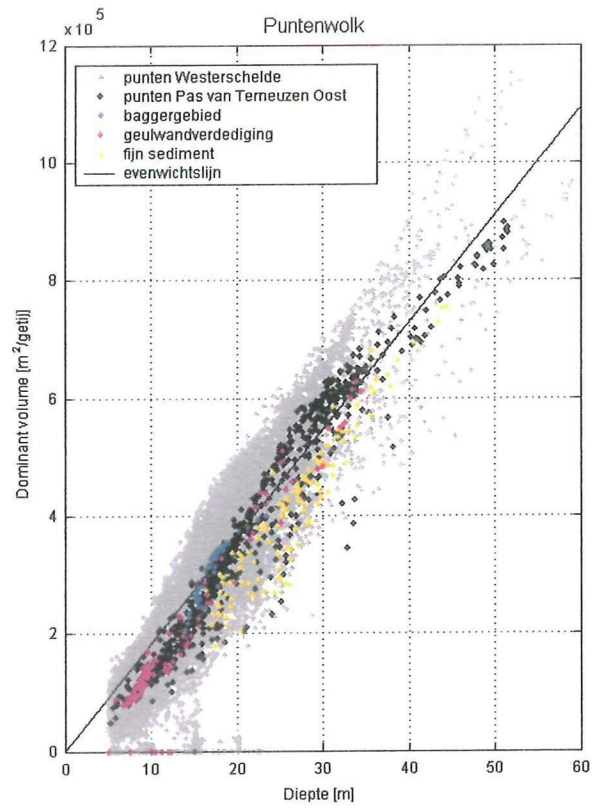
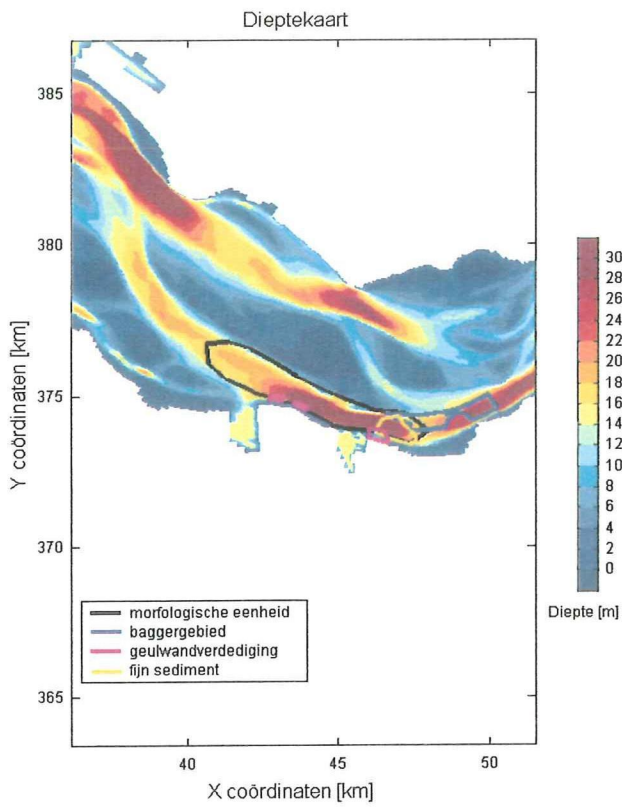


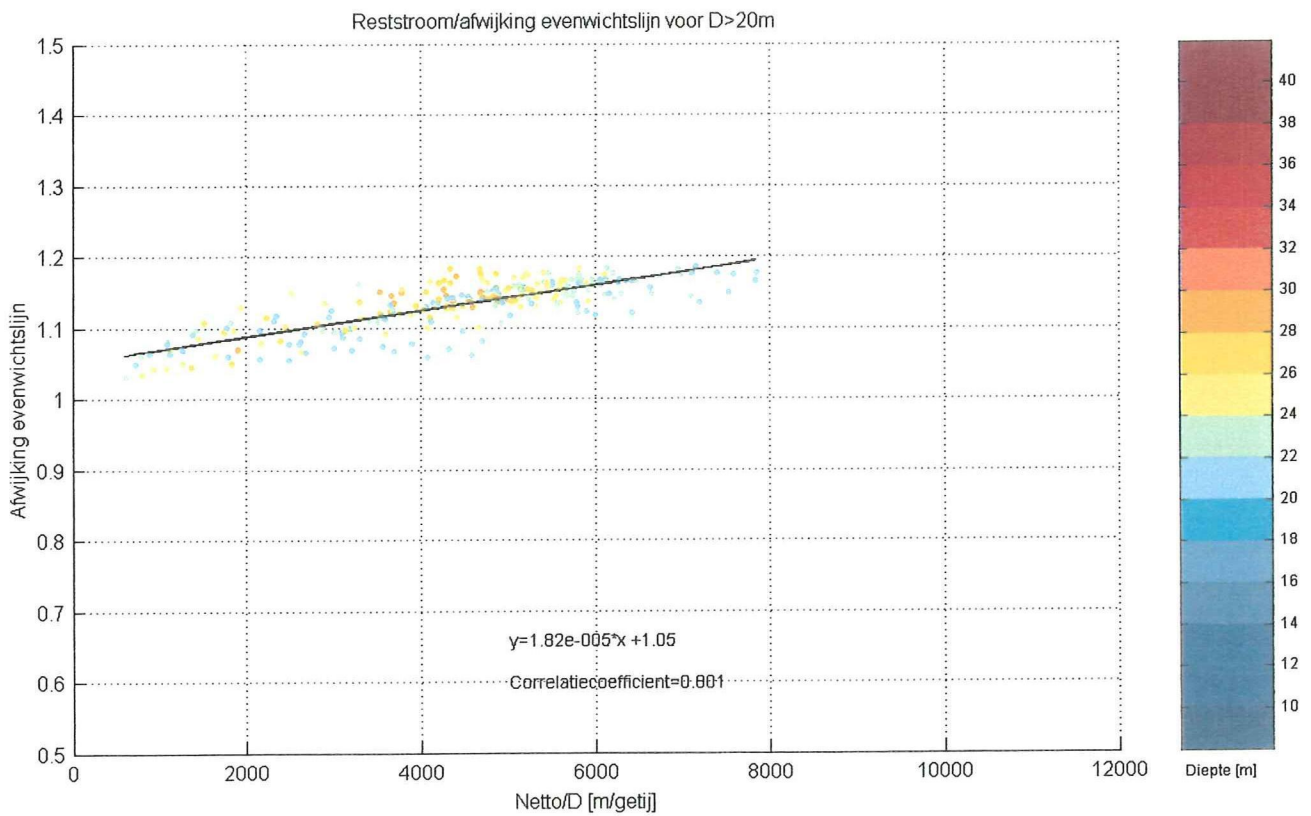
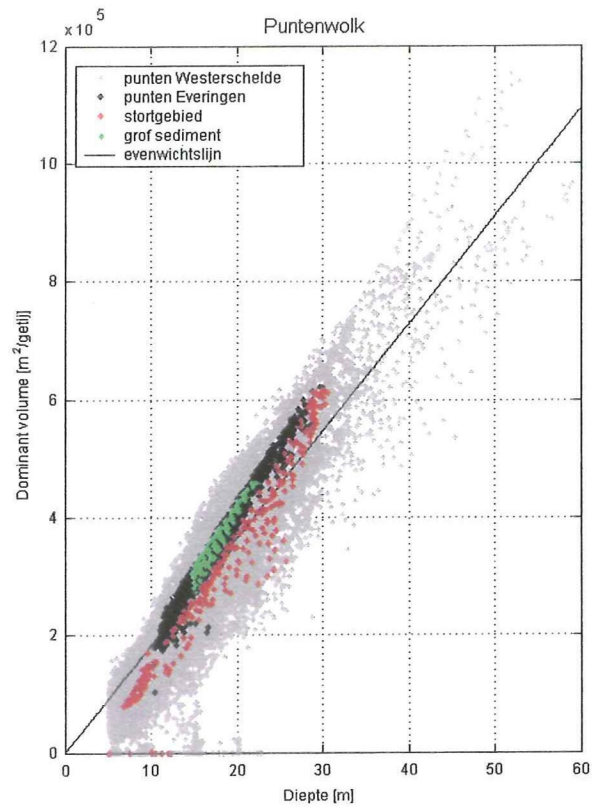
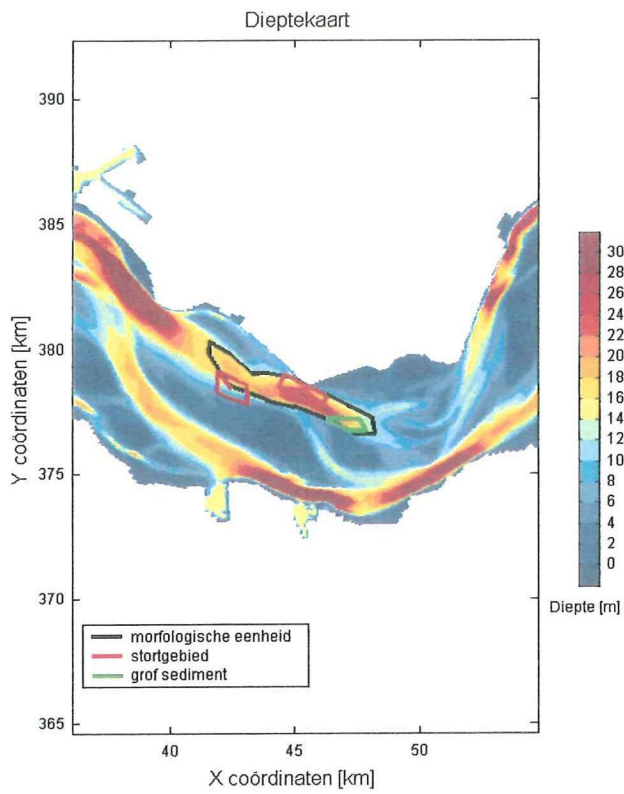


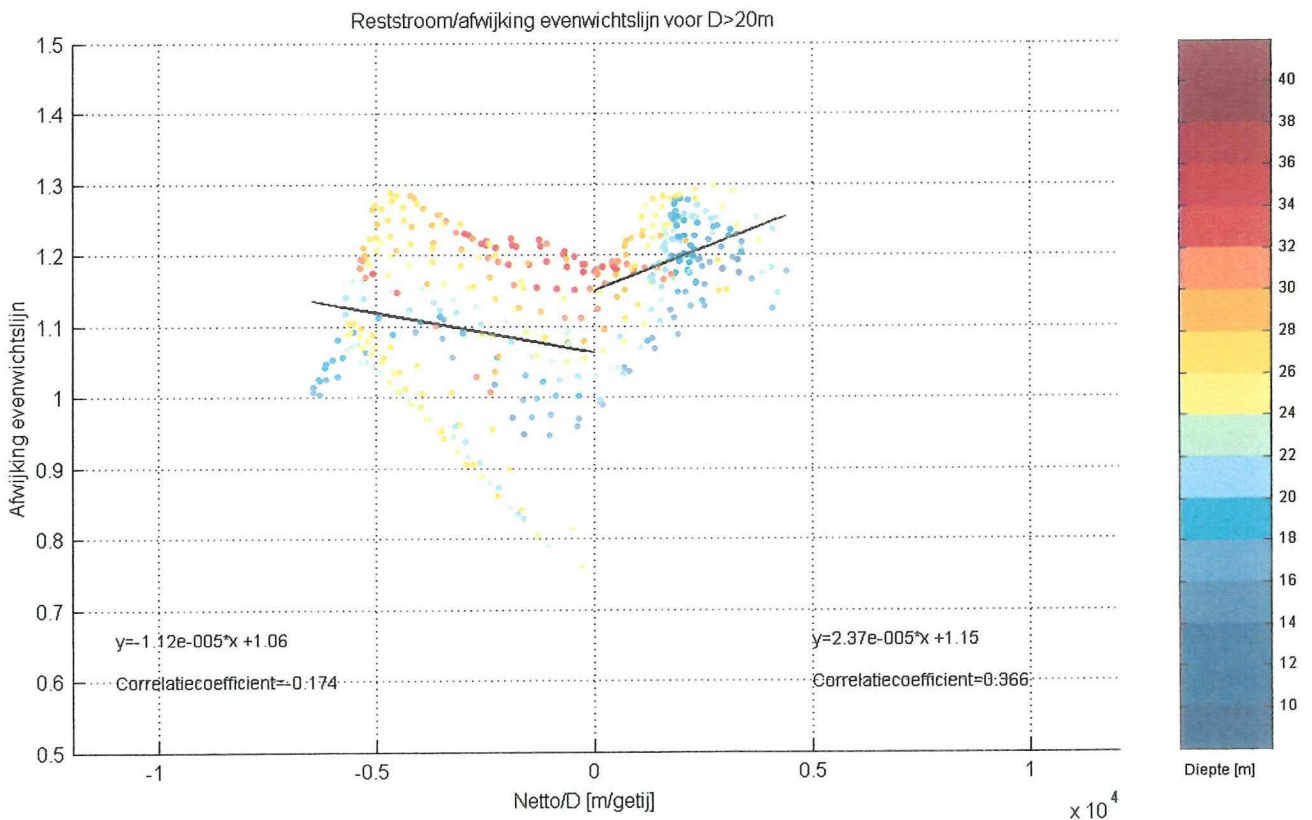
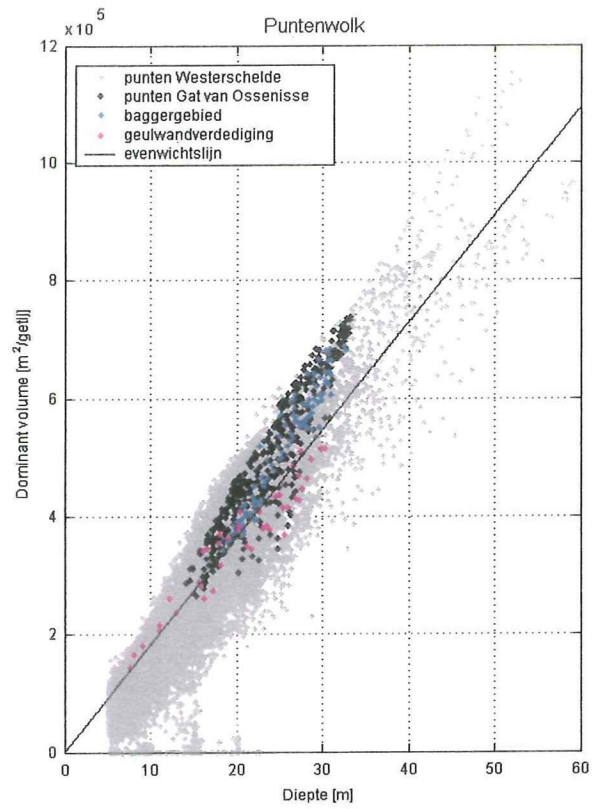
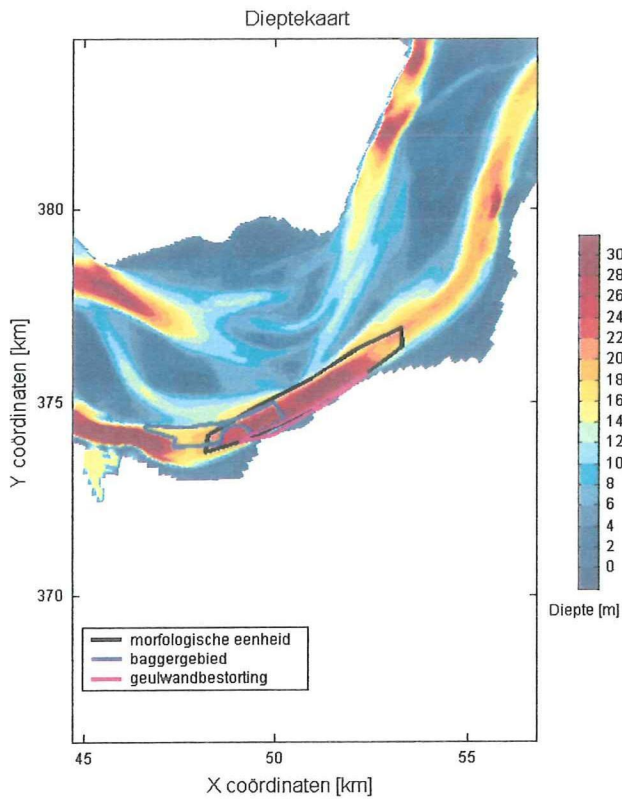


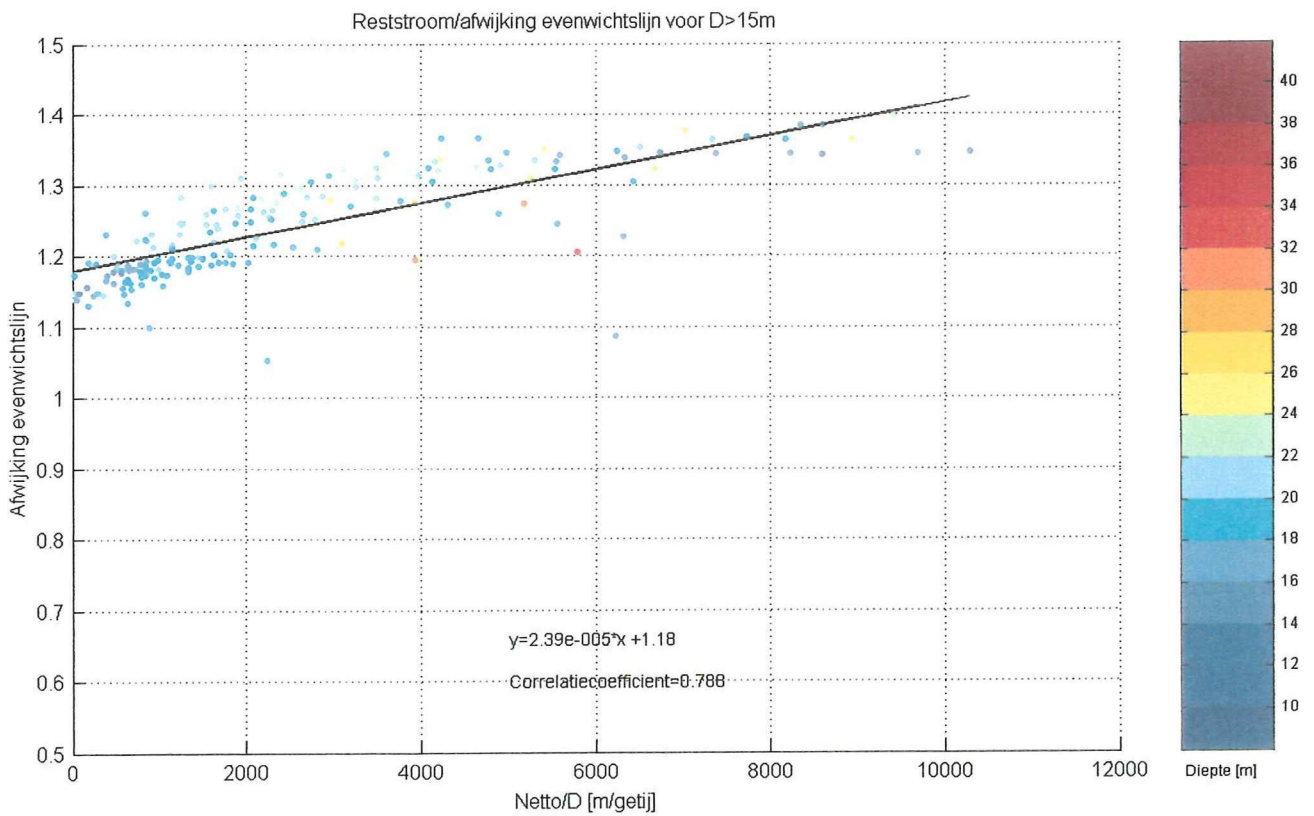
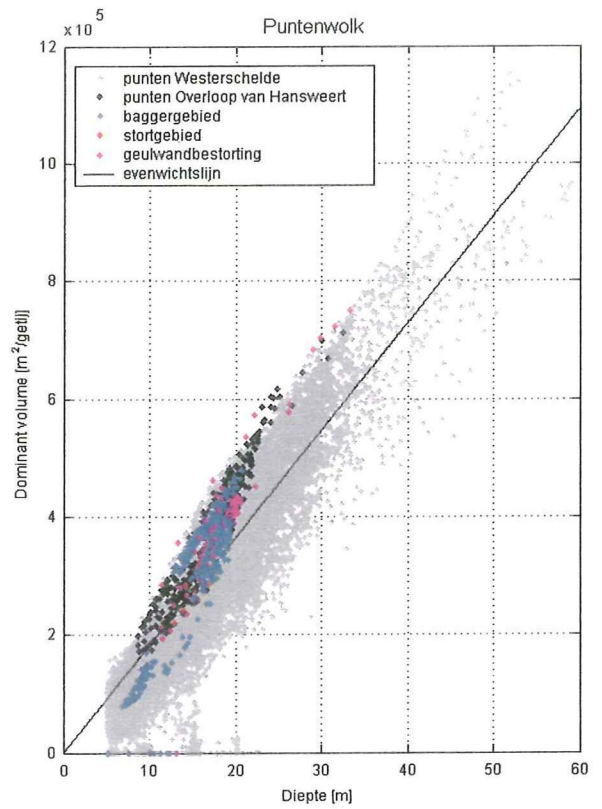
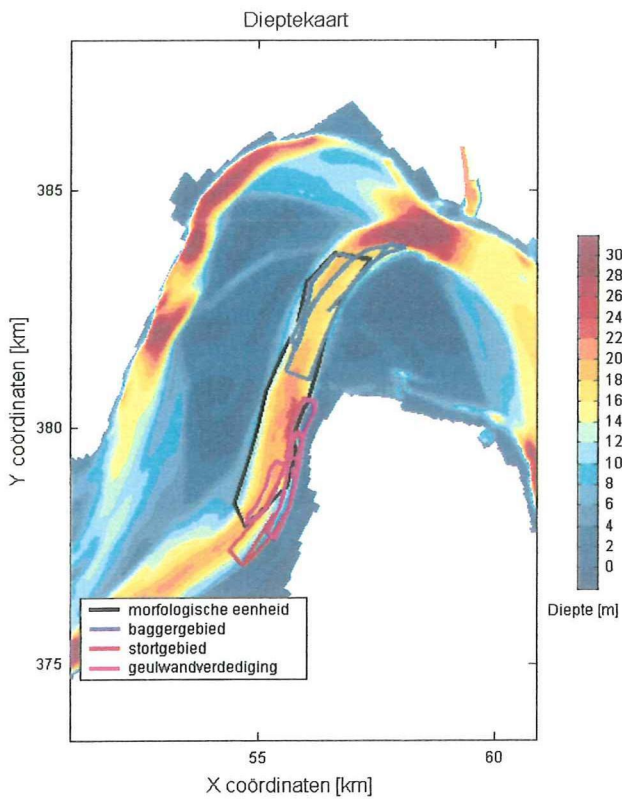


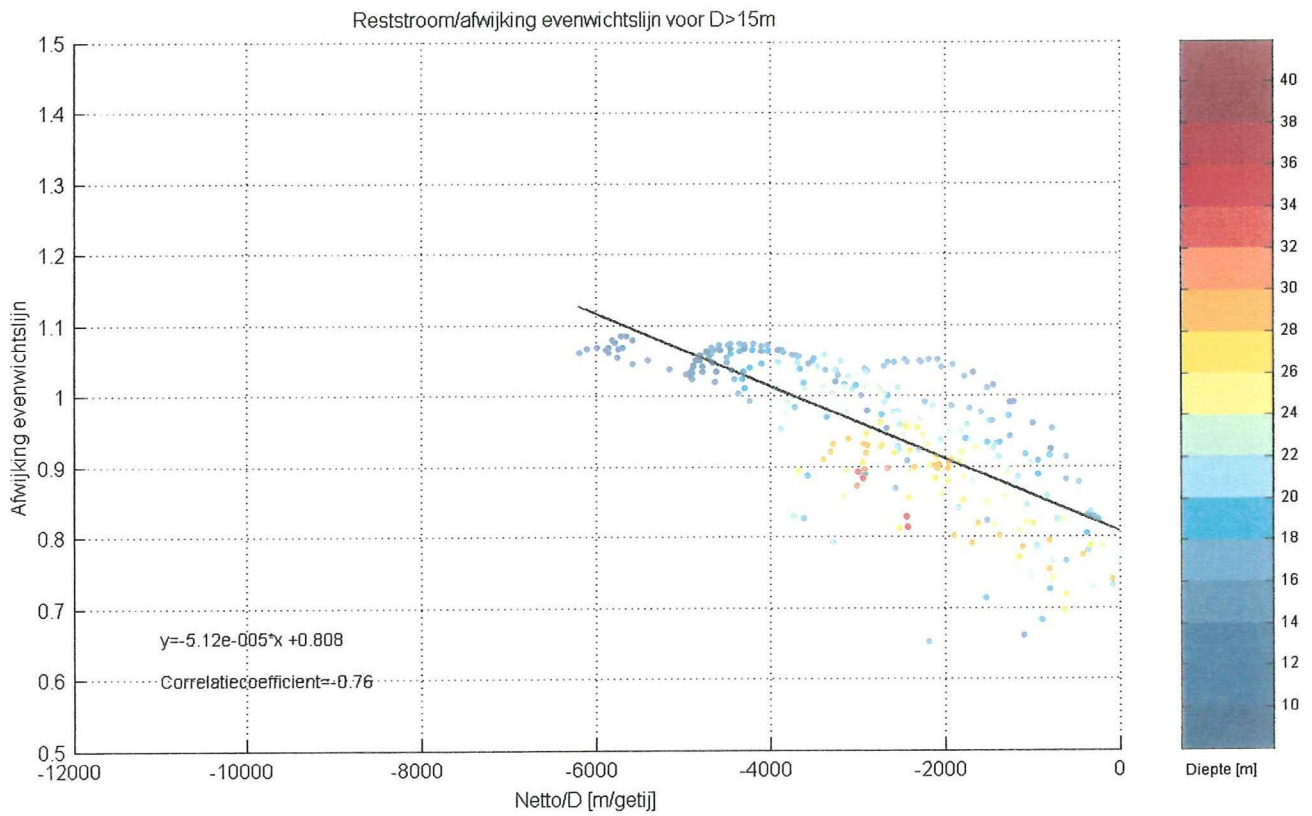
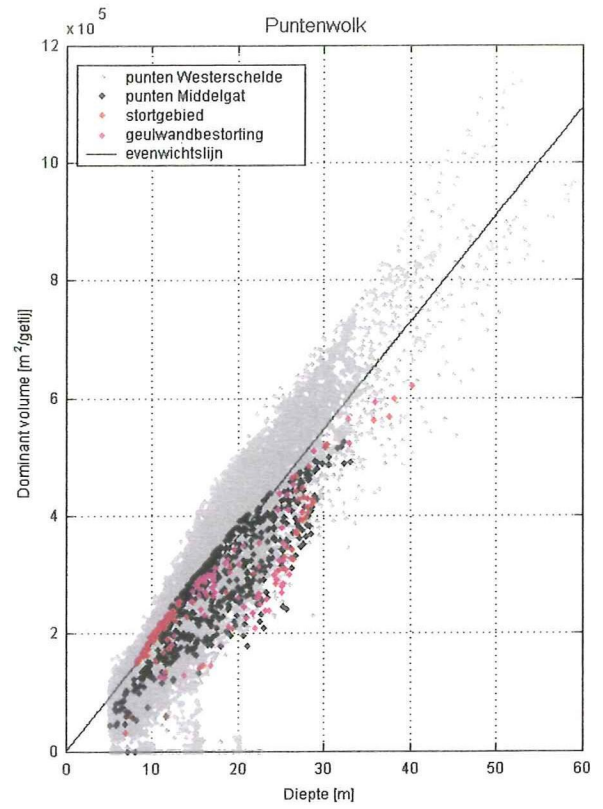
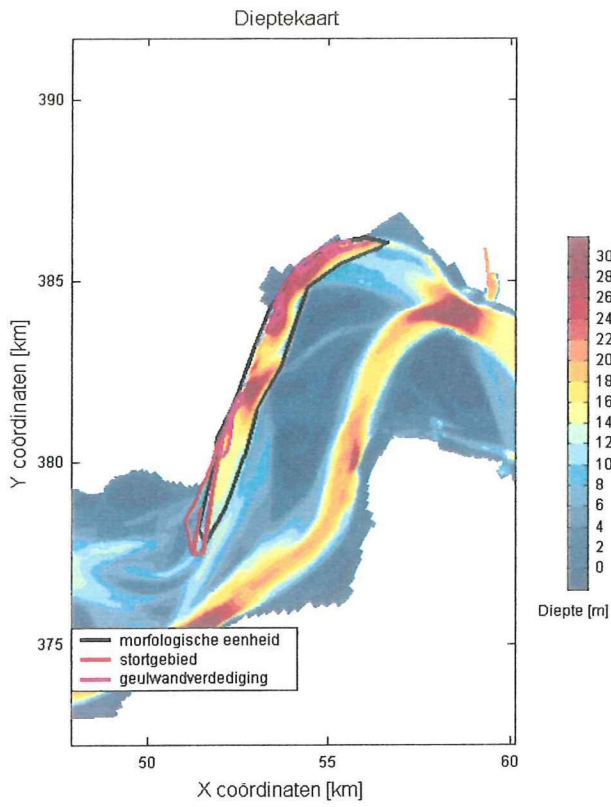


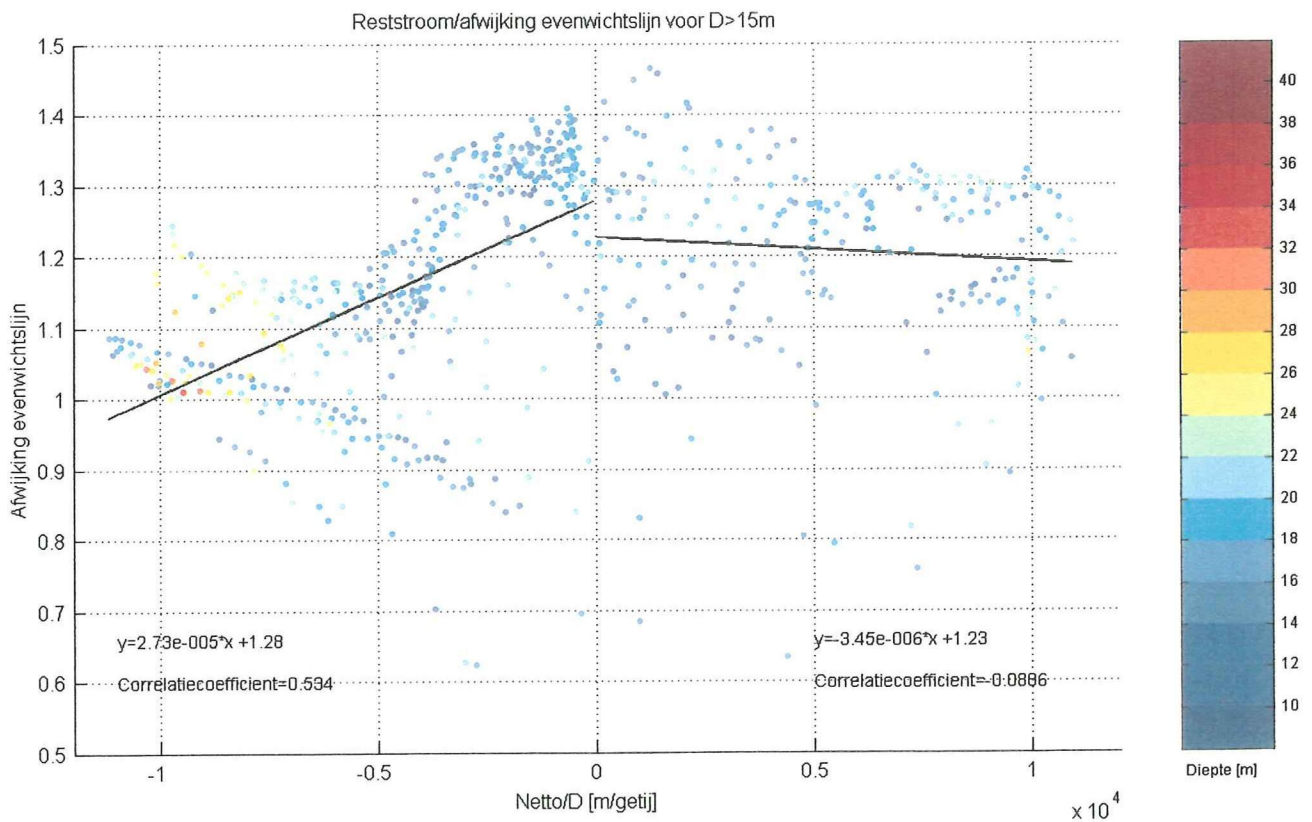
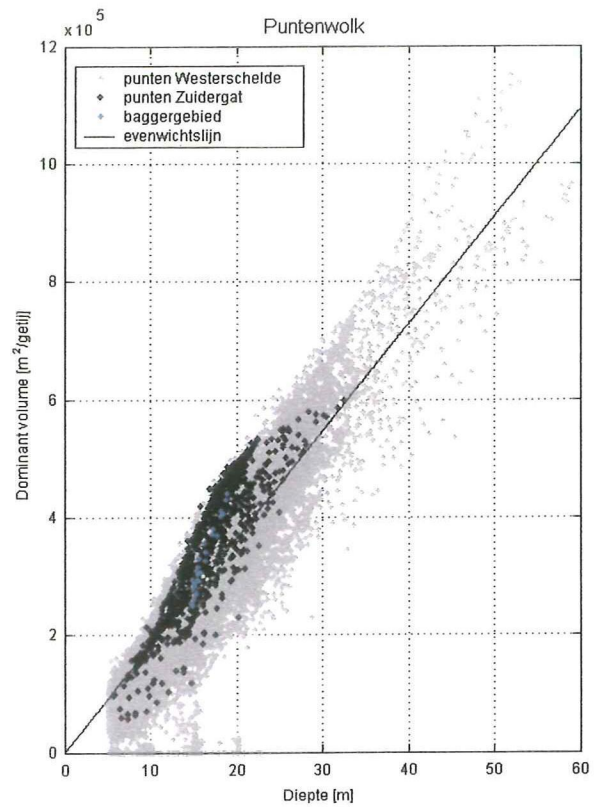
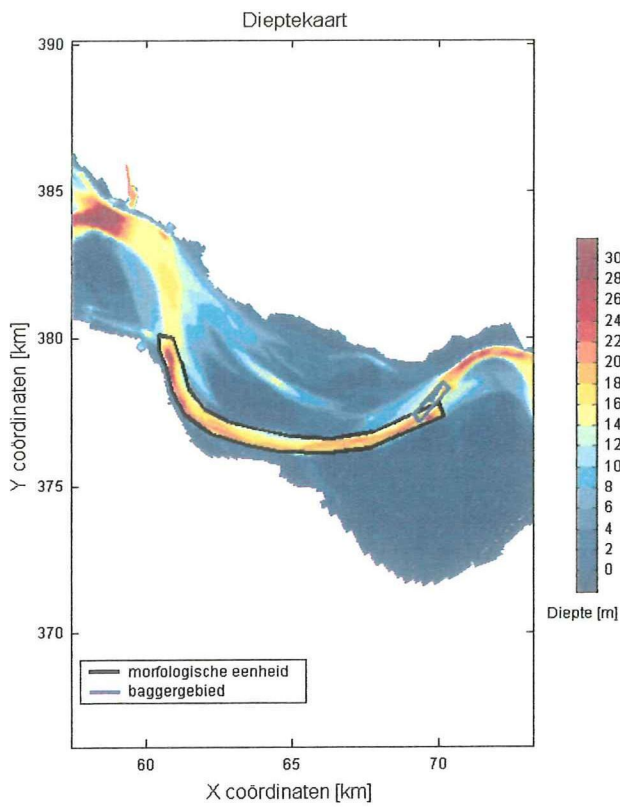


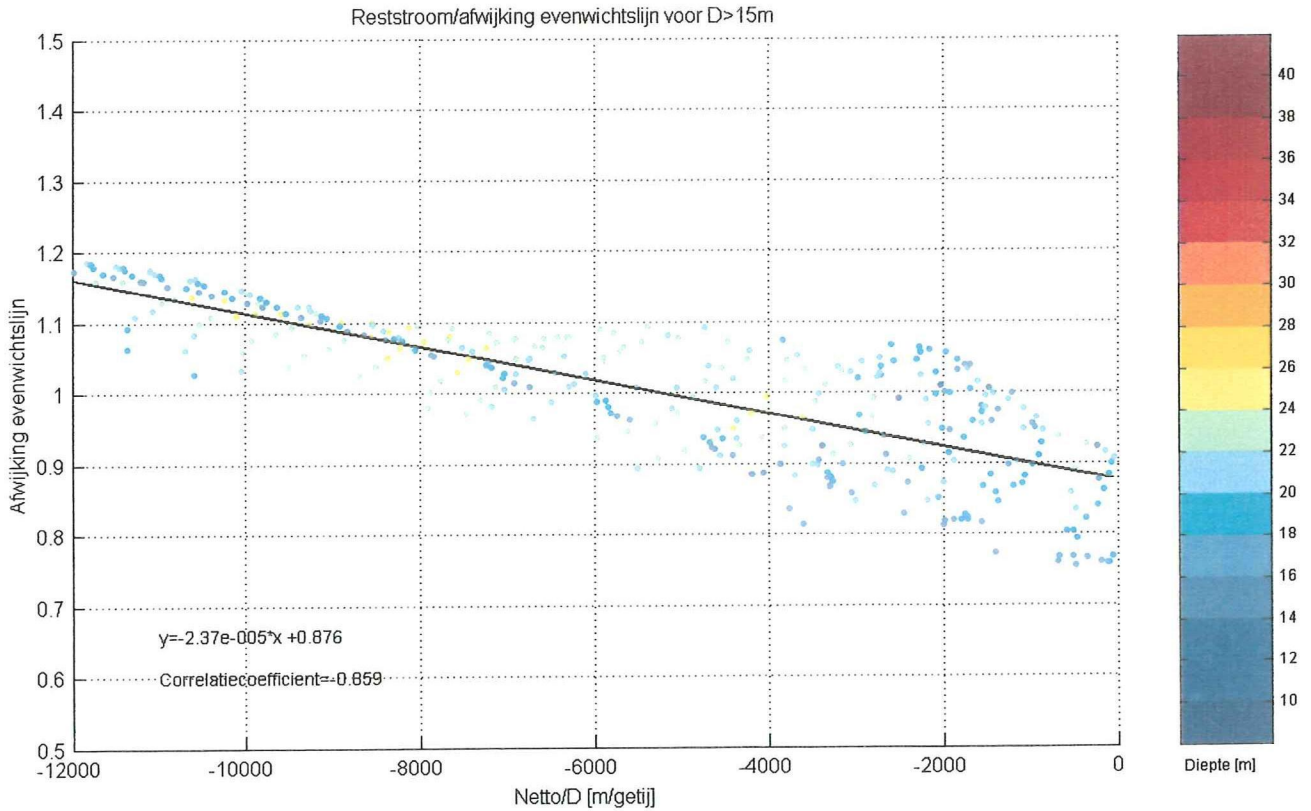
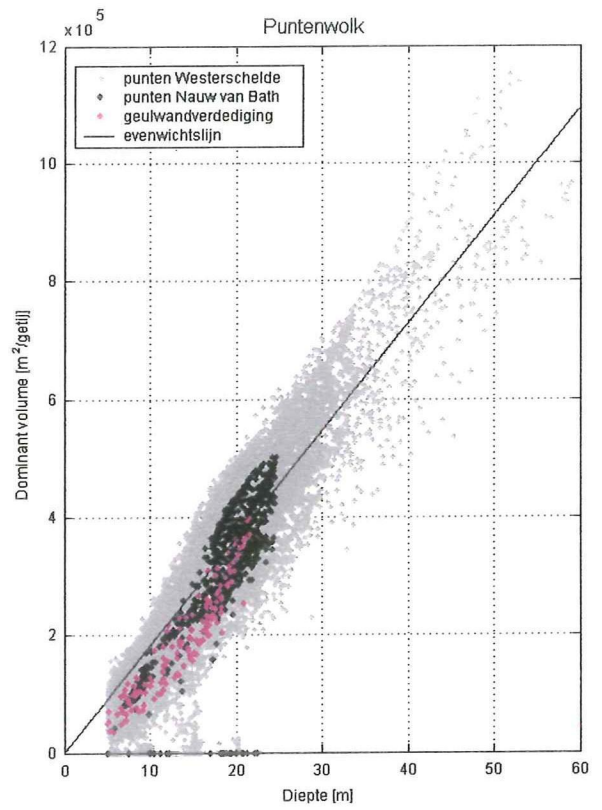
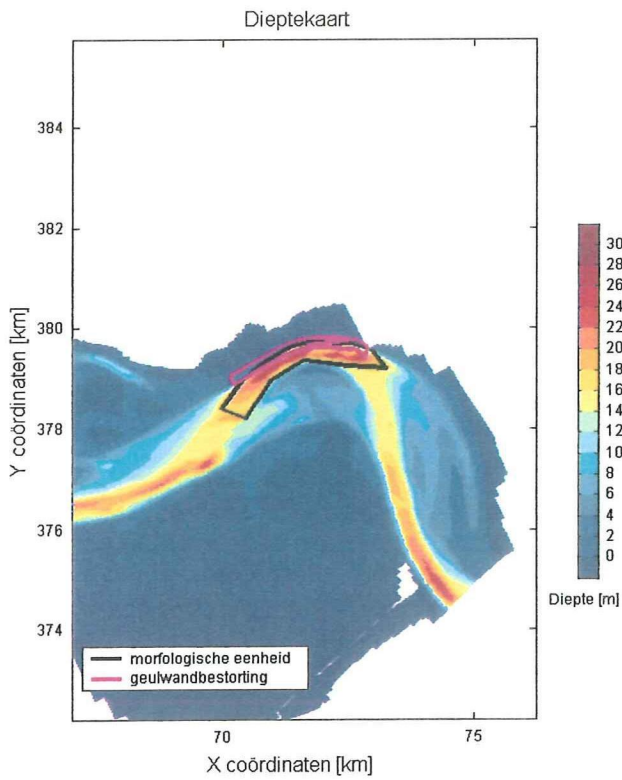


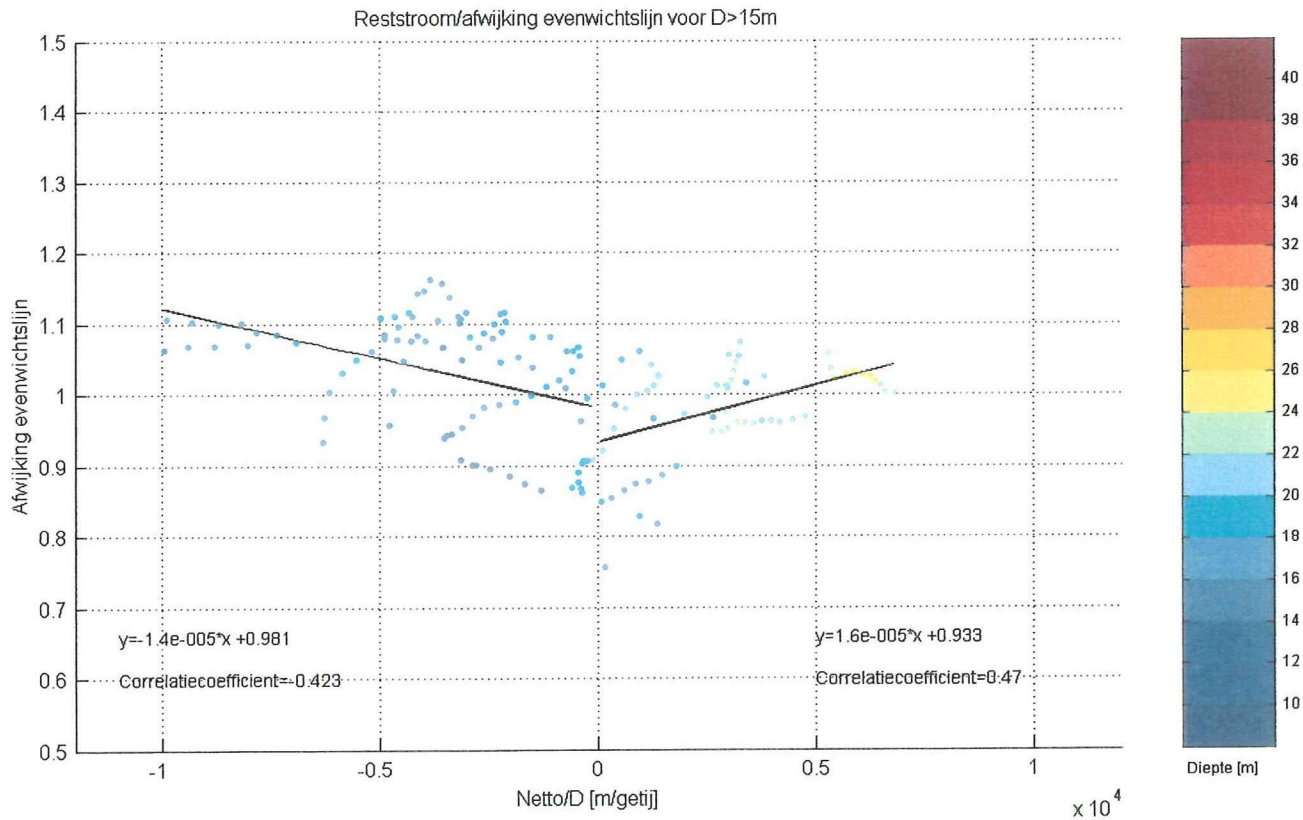
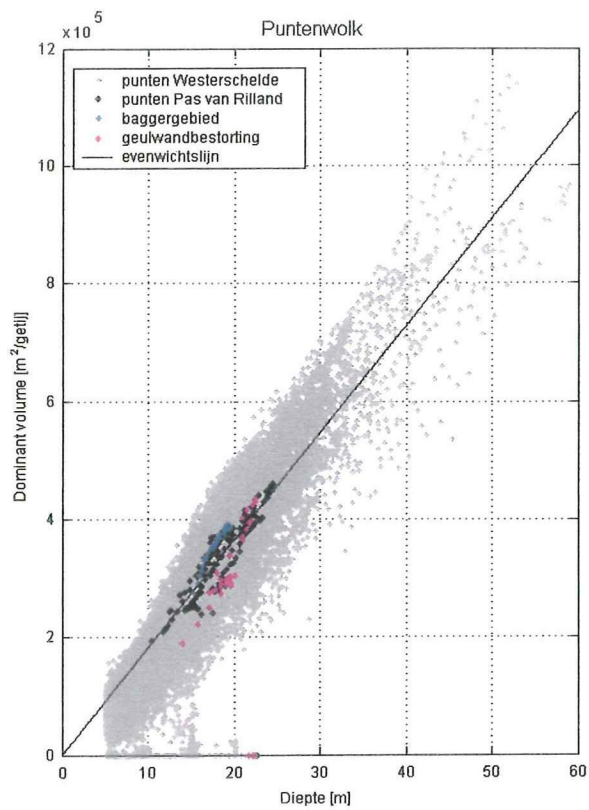
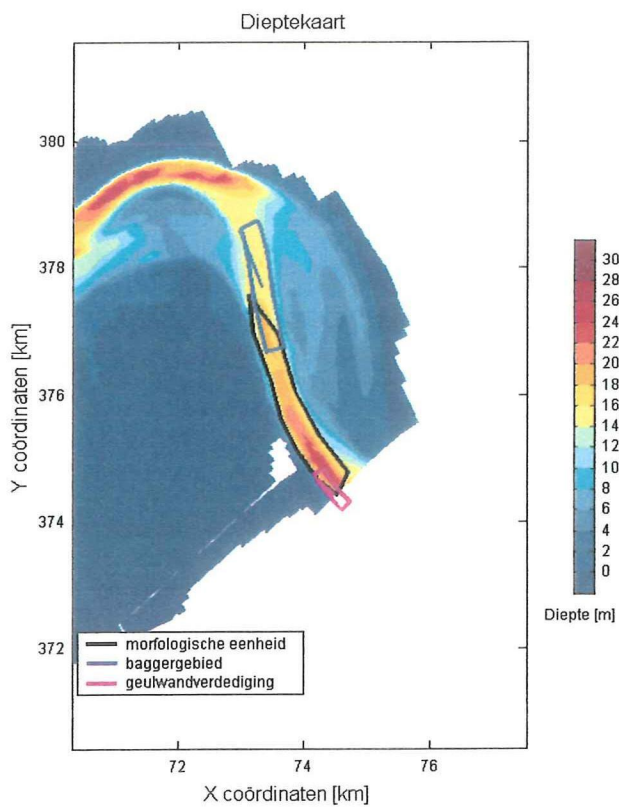


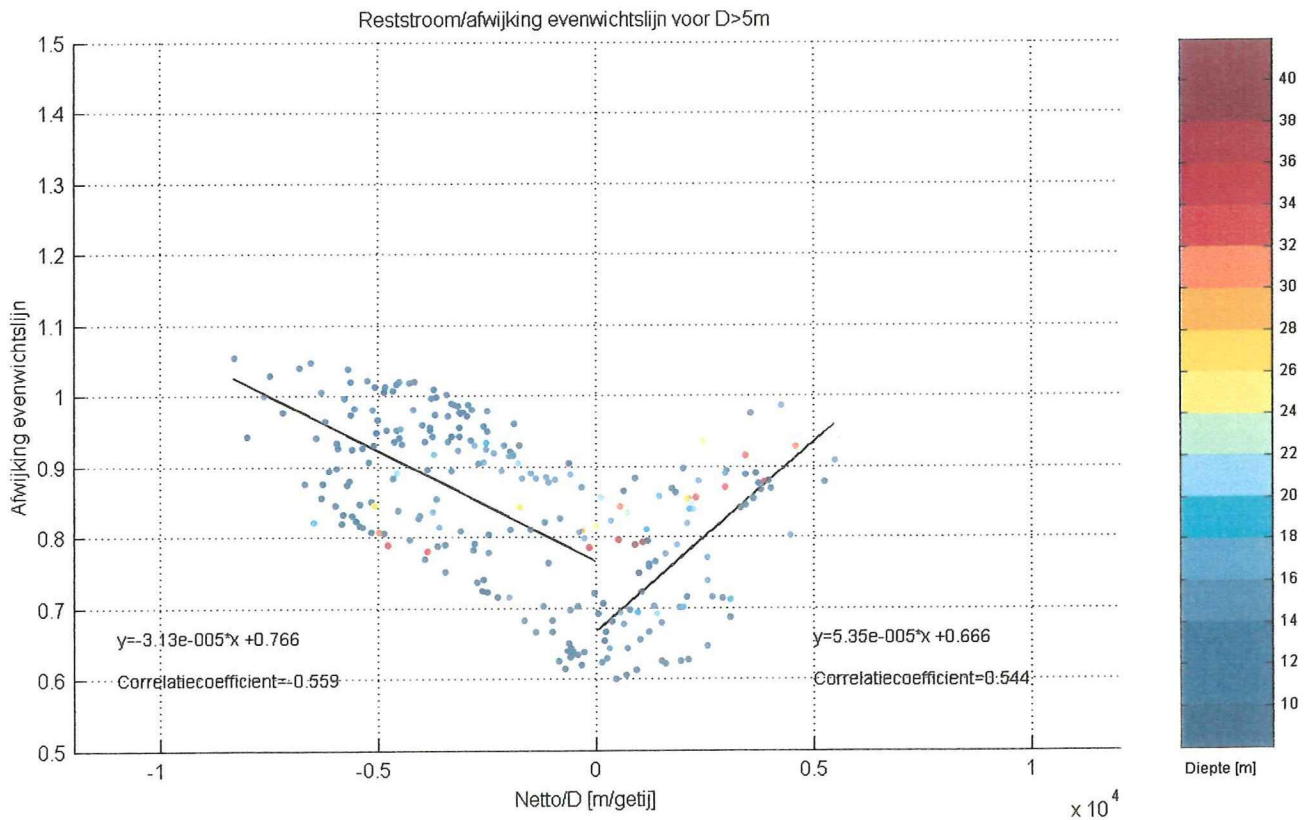
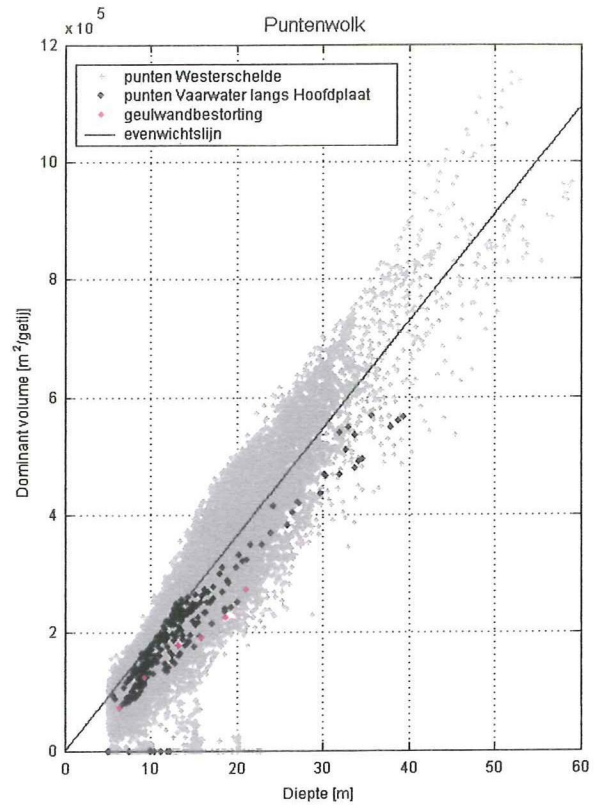
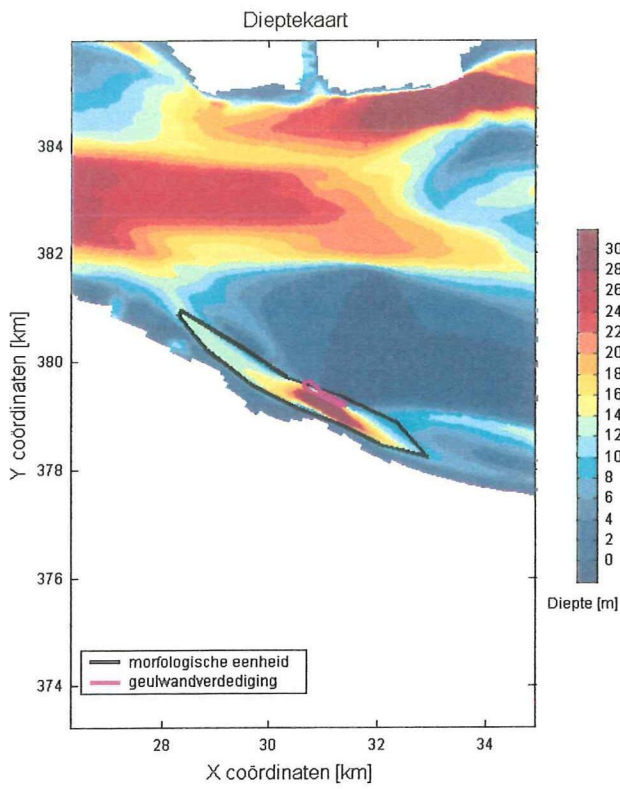




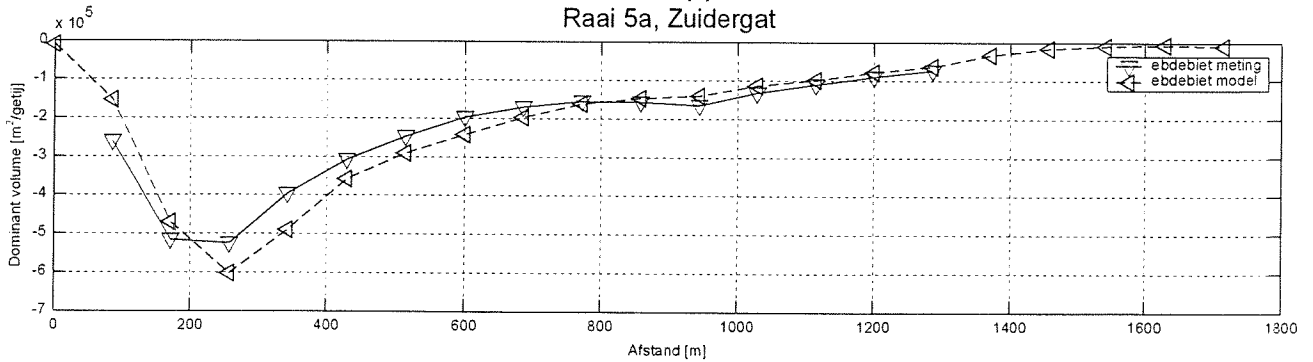
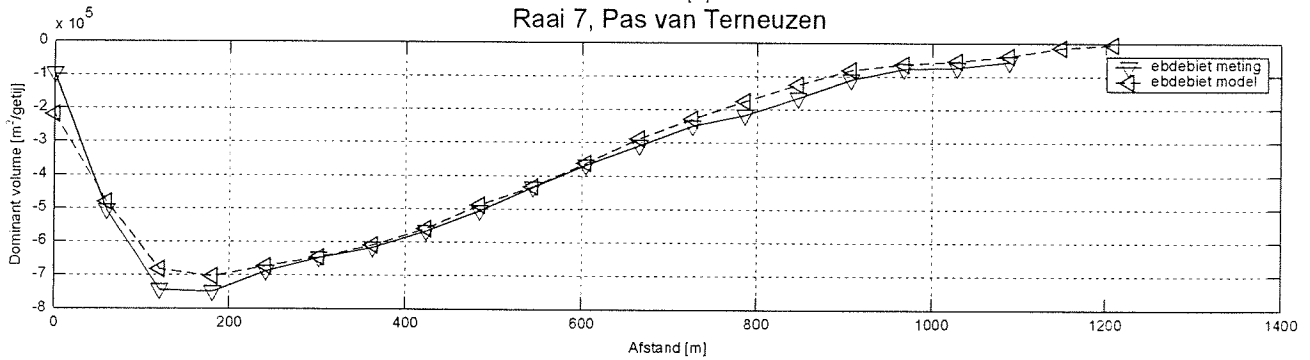
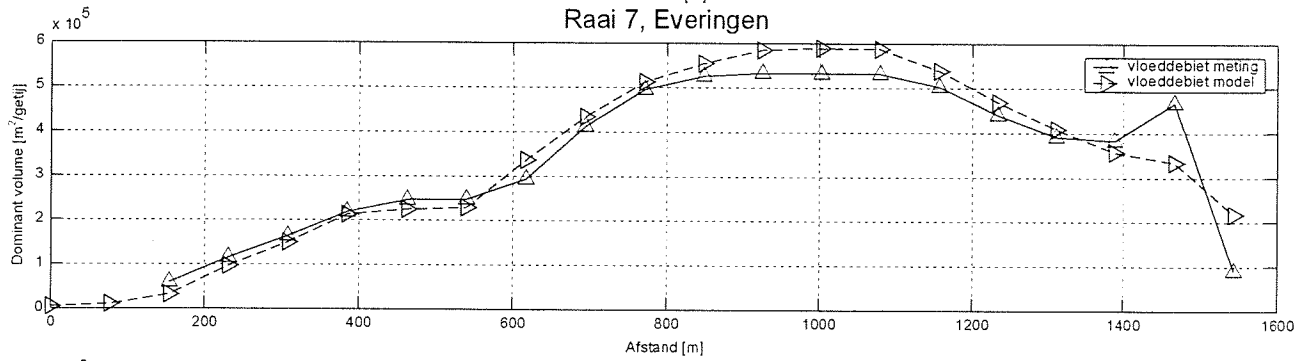
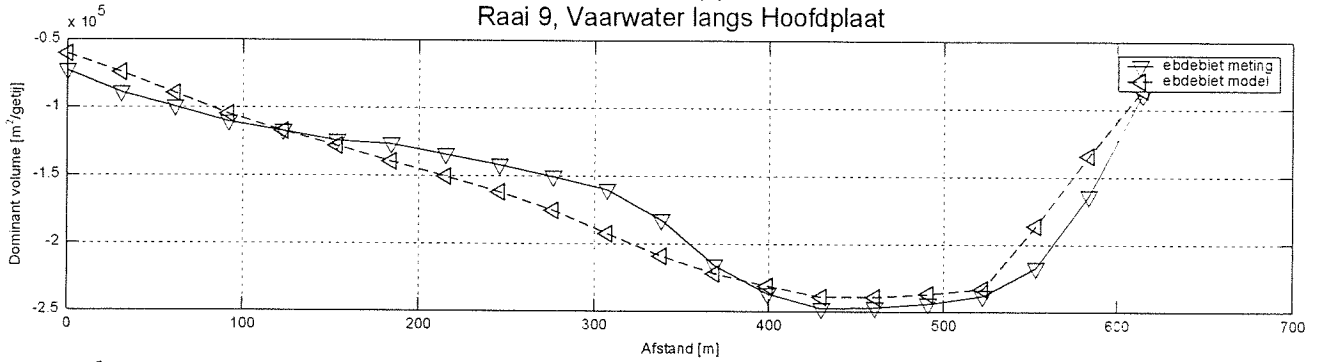
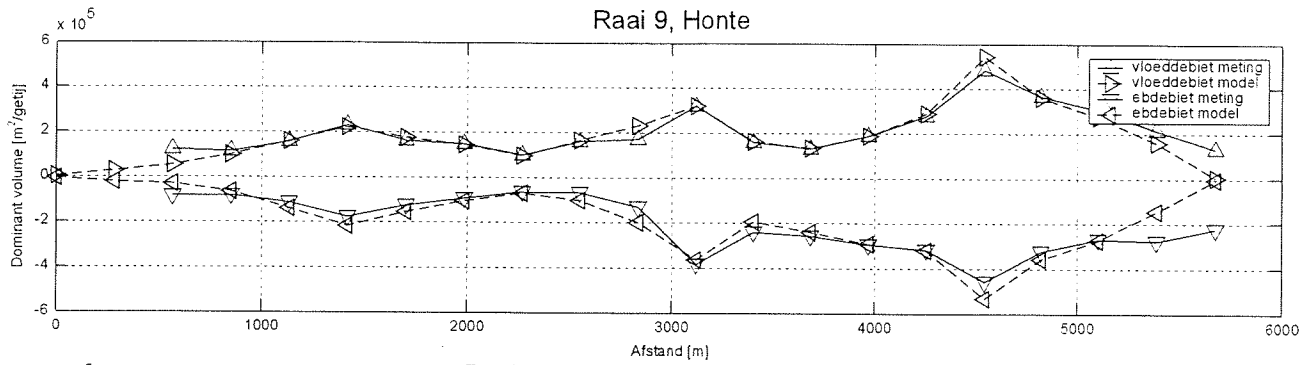








Locatie	Dominantie	Restdebiet <i>D > 15, tenzij anders vermeld</i> <i>y = afwijking evenwichtslijn</i> <i>x = restdebiet/Diepte,</i> <i>C = correlatie x en y</i>	Slechte correlatie door	Verbeterde relatie restdebiet na eliminatie bagger-stort en bestortingen
I. Wielingen	eb- en vloed	D > 15: vl: $y = 3,749e-6 \cdot x + 0,941$ C = 0,165 D > 20 vl: $y = 9,91e-6 \cdot x + 0,930$ C = 0,443	Baggeractiviteiten	D > 20 vl: $y = 9,91e-6 \cdot x + 0,930$ C = 0,442 eb: $y = -4,01e-5 \cdot x + 0,884$ C = 0,494
II. Honte West	eb	D > 15 $y = -2,810e-5 \cdot x + 0,975$ C = 0,637	Baggeractiviteiten	D > 15 $y = -3,447e-5 \cdot x + 0,935$ C = 0,857
III. Honte Oost	vloed	D > 15 $y = 4,867e-5 \cdot x + 0,797$ C = 0,676	Baggeractiviteiten Stortactiviteiten Schelpenrug Fijn sediment	D > 15 $y = 4,402e-5 \cdot x + 0,853$ C = 0,781
IV. Pas van Terneuzen West	eb	$y = -3,291e-5 \cdot x + 0,846$ C = 0,868	Baggeractiviteiten Zeer grof sediment	$y = -3,267e-5 \cdot x + 0,847$ C = 0,887
V. Pas van Terneuzen Oost	eb	$y = -5,007e-5 \cdot x + 0,793$ C = 0,603	Baggeractiviteiten Bodemsamenstelling Geulwandbestorting Boomse klei	$y = -6,514e-5 \cdot x + 0,728$ C = 0,760
VI. Everingen	vloed	D > 15 $y = 2,449e-5 \cdot x + 0,9892$ C = 0,639 D > 20 $y = 2,645e-5 \cdot x + 1,009$ C = 0,761	Stortactiviteiten Zeer grof sediment	D > 15 $y = 2,080e-5 \cdot x + 1,018$ C = 0,670 D > 20 $y = 1,781e-5 \cdot x + 1,051$ C = 0,804
VII. Gat van Ossensisse	half eb, half vloed	vl: $y = 5,628e-6 \cdot x + 1,158$ C = 0,0622 eb: $y = -1,415e-5 \cdot x + 1,042$ C = 0,256	Baggeractiviteiten	vl: $y = 2,373e-5 \cdot x + 1,150$ C = 0,366 eb: $y = -1,121e-5 \cdot x + 1,062$ C = 0,174
VIII. Overloop van Hansweert	vloed	$y = 1,332e-5 \cdot x + 1,159$ C = 0,420	Stortactiviteiten Baggeractiviteiten Oeververdediging	$y = 2,385e-5 \cdot x + 1,179$ C = 0,788
IX. Middelgta	eb	$y = -4,611e-5 \cdot x + 0,752$ C = 0,487	Oververdediging Stortactiviteiten	$y = -5,124e-5 \cdot x + 0,809$ C = 0,760
X. Zuidergat	hal eb, half vloed	eb: $y = 2,728e-5 \cdot x + 1,279$ C = 0,534 vl: $y = -3,45e-6 \cdot x + 1,23$ C = 0,0886	Baggeractiviteiten	eb: $y = 2,728e-5 \cdot x + 1,279$ C = 0,534 vl: $y = -3,45e-6 \cdot x + 1,23$ C = 0,0886
XI. Nauw van Bath	eb	$y = -2,445e-5 \cdot x + 0,856,$ C = 0,809	Geulwandverdediging	$y = -2,375e-5 \cdot x + 0,876$ C = 0,859
XII. Pas van Rilland	half eb, half vloed	vl: $y = 7,083e-6 \cdot x + 0,932$ C = 0,166 eb: $y = -1,663e-5 \cdot x + 0,978$ C = 0,522	Baggeractiviteiten Oeververdediging	vl: $y = 1,603e-5 \cdot x + 0,933$ C = 0,470 eb: $y = 1,399e-5 \cdot x + 0,981$ C = 0,4227
XIII. Vaarwater langs Hoofdplaat	half eb, half vloed	D > 5 eb: $y = -1,948e-5 \cdot x + 0,798$ C = 0,366		eb: $y = -3,130e-5 \cdot x + 0,766$ C = 0,559 vl: $y = 5,35e-5 \cdot x + 0,667$ C = 0,544



<i>Class Name</i>	<i>Millimeters</i>	<i>Micrometers</i>	<i>Phi Values</i> $\varphi = -2\log(d)$
Boulders	> 256		< -8
Cobbles	256-64		-8 to -6
Gravel	64-2		-6 to -1
Very coarse sand	2.0-1.0	2000-1000	-1 to 0
Coarse sand	1.0-0.50	1000-500	0 to 1
Medium sand	0.50-0.25	500-250	1 to 2
Fine sand	0.25-0.125	250-125	2 to 3
Very fine sand	0.125-0.062	125-62	3 to 4
Coarse silt	0.062-0.031	62-31	4 to 5
Medium silt	0.031-0.016	31-16	5 to 6
Fine silt	0.016-0.008	16-8	6 to 7
Very fine silt	0.008-0.004	8-4	7 to 8
Coarse clay	0.004-0.0020	4-2	8 to 9
Medium clay	0.0020-0.0010	2-1	9 to 10
Fine clay	0.0010-0.00050	1-0.5	10 to 11
Very fine clay	0.00050-0.00024	0.5-0.25	11 to 12
Colloids	< 0.00024	< 0.24	> 12

Classificatie van korreldiameters volgens de American Geophysical Union

