

Het gedrag van drempels in de Westerschelde
Literatuurstudie en hypothesen

maart 1996

drs F.T.G. Tank
Universiteit Utrecht
Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen
Vakgroep Fysische Geografie
Instituut voor Marien en Atmosferisch onderzoek (IMAU)

IMAU Rapport 96-07

Rapport voor de Rijkswaterstaat Directie Zeeland
en het Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ

Project MOVE/DREMPELS & project VERDIEP

'In our eagerness to reshape rivers for the needs of man,
we often failed to recognize the river's needs'

Winkley, 1989

Voorwoord

Dit onderzoek valt binnen het kader van het project DREMPELS dat weer onderdeel is van het project MOVE (MOnitoring VERdieping). Het project MOVE is in 1995 door Directie Zeeland opgestart om de gevolgen op het systeem van de in 1997 te beginnen '48/'43-verdieping van de Westerschelde te kunnen monitoren en inschatten en zonodig te kunnen ingrijpen. Binnen het RIKZ valt het project DREMPELS binnen het project VERDIEP. Een deel van het onderzoek binnen het project DREMPELS is door Directie Zeeland uitbesteed aan de Universiteit Utrecht. De uitvoering van en de dagelijkse begeleiding van het Utrechtse onderzoek vindt plaats bij het RIKZ.

Het onderzoek naar het gedrag van drempels in de Westerschelde gaat uit van de in het project OOSTWEST verkregen inzichten in het fysische systeem in het algemeen en het in 1994 gerapporteerde onderzoek naar drempels door het Ingenieursbureau Svasek (Bliek en Ruijter, 1994) in het bijzonder.

De begeleiders ir. A. Langerak (RIKZ) en dr. J.R. Van den Berg (UU) wil ik, evenals drs. O. Van Kleef, ir. P. Sijstermans (beiden Directie Zeeland), dr. ir. J. van de Graaff (TUD), drs. S. Huijs (UU), drs. C. Storm, drs. L. Uit den Bogaard en drs. H. Verbeek (allen RIKZ), bedanken voor hun adviezen, commentaar en prettige samenwerking.

Middelburg, februari 1996

Inhoud

Lijst van figuren

Lijst van symbolen

1. Inleiding	1
1.1 Kader	1
1.2 Resultaten uit eerder onderzoek	2
1.3 Doel literatuurstudie	3
2 Morfologie	5
2.1 Inleiding	5
2.2 Geulpatronen	5
2.3 Banken	8
2.3.1 Inleiding	8
2.3.2 'Point bar'	8
2.3.3 'Alternate bar'	13
2.3.4 'Middle bar'	15
2.3.5 'Crossings'	16
2.3.6 'Riffle-pool'-eenheid	18
2.4 Samenvatting	19
3 Processen	21
3.1 Inleiding	21
3.2 Waterbeweging in een meanderende rivier	21
3.2.1 Hoofdstroming	21
3.2.2 Secundaire stroming	25
3.3 Bodemschuifspanning	32
3.4 Sedimenttransport en morfologie	33
3.5 Samenvatting	39
4 Conclusies	43
5 Hypothesen	45
Literatuur	47
Mogelijk relevante literatuur	51
Bijlage A Sub-hypothesen	

Lijst van figuren

- Figuur 1.1 Lokatie Westerschelde in Zuid-West Nederland en Antwerpen
- Figuur 2.1 De Westerschelde. Geulen en platen
- Figuur 2.2 Schema van een drempel op de overgang tussen twee bochten en/of op de kruising van geulen
- Figuur 2.3 Estuariene meanders (bron: Ahnert, 1960)
- Figuur 2.4 'Point bar' in de binnenbocht van een riviermeander (bron: Anthony en Harvey, 1991)
- Figuur 2.5 Lengte langs midden van een rivier waarover een zandkorrel van de buiten- naar de binnenbocht oversteekt
- Figuur 2.6 Transport van een zandkorrel van buiten- naar binnenbocht door de gecombineerde werking van eb en vloed
- Figuur 2.7 Definitie sinusoïteit
- Figuur 2.8 Verandering in de waterbeweging rondom de Plaat van Ossenissee tussen circa 1955 en 1995
- Figuur 2.9 De Plaat van Ossenissee en de Plaat van Walsoorden/Platen van Valkenisse en lokatie 'alternate bars' in de Westerschelde
- Figuur 2.10 'Alternate bars' in een rechte geul (bron: Knighton, 1984)
- Figuur 2.11 Hoek tussen opeenvolgende bochten
- Figuur 2.12 Kromming van de stroomdraden van de hoofdstroming om de Plaat van Ossenissee en Plaat van Walsoorden met en zonder 'alternate bars'
- Figuur 2.13 'Middle bar' in een rivier (bron: Church en Jones, 1982)
- Figuur 2.14 Dwarsprofielen van een bocht (A, C, E) en een 'crossing' (B, D) in een rivier (bron: Knighton, 1984)
- Figuur 2.15 Lokatie van de stroomdraden van de eb- en de vloedstroom op een 'crossing' in een estuarium
- Figuur 2.16 'Riffle/pool'-eenheid in een meanderende rivier (bron: Thompson, 1986)
- Figuur 2.17 Schematische weergave van stroming-sediment interacties in een 'riffle-pool'-systeem, en de 'reversal hypothesis' (naar: Clifford en Richards, 1992)
- Figuur 3.1 Definitie schets van coördinaten systeem van de stroomlijnen (s = langsrichting; n = dwarsrichting; u = diepte gemiddelde snelheid hoofdstroming; v = diepte gemiddelde snelheid van de stroming in dwarsrichting)
- Figuur 3.2 Zones met versnellende en vertragende hoofdstroming in de binnen- en buitenbocht en zones met erosie- en sedimentatie tijdens eb en vloed op en rondom de Drempel van Hansweert
- Figuur 3.3 Zones waarin de secundaire stroming uitdempt na het einde van de bocht in het Zuidergat -bij eb- en de bocht bij Hansweert -bij vloed- en het midden van de drempel
- Figuur 3.4 Het verloop gedurende een getij van de secundaire stroming (U_n) en de snelheid door de componenten centrifugaalkrachten (U_n^2) en Coriolisversnelling (U_n^c) (bron: Booij en Kalkwijk, 1982)
- Figuur 3.5 Hoofdcel en buitenbocht-cel met secundaire stroming in een rivierbocht (bron: Knighton, 1984)
- Figuur 3.6 Model van het stromingspatroon dat optreedt in een meanderende rivier met 'riffle-pool'-eenheden (bron: Thompson, 1986)
- Figuur 3.7 Kromming van de stroomdraad in een bocht bij lage, midden en hoge afvoer
- Figuur 3.8 Richting van de sedimentflux door de secundaire stroming tijdens eb en vloed op de Drempel

van Hansweert

Figuur 3.9 Richting van het sediment transport onder invloed van secundaire stroming en een hellende bedding (bron: Talmon et al., 1995)

Figuur 3.10 Relatieve dampings- (λ_t/L_D) en golflengte (λ_t/L_p) uitgezet tegen de interactie parameter λ_s/λ_t (bron: De Vriend en Struiksma, 1983)

Lijst van symbolen

B	=	geulbreedte (m)
b	=	coëfficiënt (-)
C	=	Chézy-factor ($m^{1/2}/s$)
d_{50}	=	mediaan korrelgrootte (m)
E	=	calibratie-coëfficiënt
G	=	nat gewicht van de korrels (N)
g	=	versnelling van de zwaartekracht (m/s^2)
h	=	waterdiepte (m)
i_s	=	intensiteit van de secundaire stroming (m/s)
K_b	=	'fluid drag force' op de korrels (N)
l	=	lengte rivier gemeten langs het midden van de waterloop (m)
n	=	afstand dwars op stroomdraad (m)
p	=	diepte gemiddelde totale druk (N/m^2)
p_z	=	diepte afhankelijke druk (N/m^2)
R	=	bochtstraal (m)
R_s	=	kromtestraal van de stroomlijnen (m)
S	=	grootte van het sedimenttransport (m^2/s)
s	=	afstand langs stroomdraad (m)
U	=	hoofdstroomsnelheid (m/s)
u	=	diepte gemiddelde hoofdstroomsnelheid (m/s)
v	=	diepte gemiddelde snelheid in dwarsrichting (m/s)
v_s	=	horizontale component van de secundaire stroming (m/s)
x	=	ruimtelijke coördinaat (m)
y	=	ruimtelijke coördinaat (m)
z	=	verticale afstand vanaf de bodem (m)
z_b	=	bodemhoogte (m)
α	=	richting van het sedimenttransport
α_1	=	constante die afhangt van de vorm van het profiel van de hoofdstroming (-)
α_2	=	constante die afhangt van de vorm van het profiel van de secundaire stroming (-)
β	=	vaste coëfficiënt (-)
Δ	=	relatieve natte dichtheid van sediment (-)
δ	=	hoek van de richting van de stroming, of van de bodemschuifspanning
Θ	=	Shieldsparameter
θ	=	hoek tussen twee opeenvolgende bochten ($^\circ$)
θ_{cr}	=	kritieke hoek tussen twee opeenvolgende bochten ($^\circ$)
λ_1	=	aanpassingslengte van de hoofdstroom (m)
λ_2	=	aanpassingslengte van stromingskenmerken om dwars de geul over te steken (m)
λ_3	=	aanpassingslengte van de secundaire stroming (m)
λ_4	=	aanpassingslengte van de morfologie (m)

ρ	=	dichtheid van water (kg/m ³)
ρ_s	=	dichtheid van zand (kg/m ³)
T	=	aanpassingstijd van de morfologie (s)
τ_b	=	bodemschuifspanning (N/m ²)
τ_{bs}	=	component van de bodemschuifspanning in langsrichting (N/m ²)
τ_{bn}	=	component van de bodemschuifspanning in dwarsrichting (N/m ²)
ν_t	=	kinematische turbulente viscositeit (m ² /s)

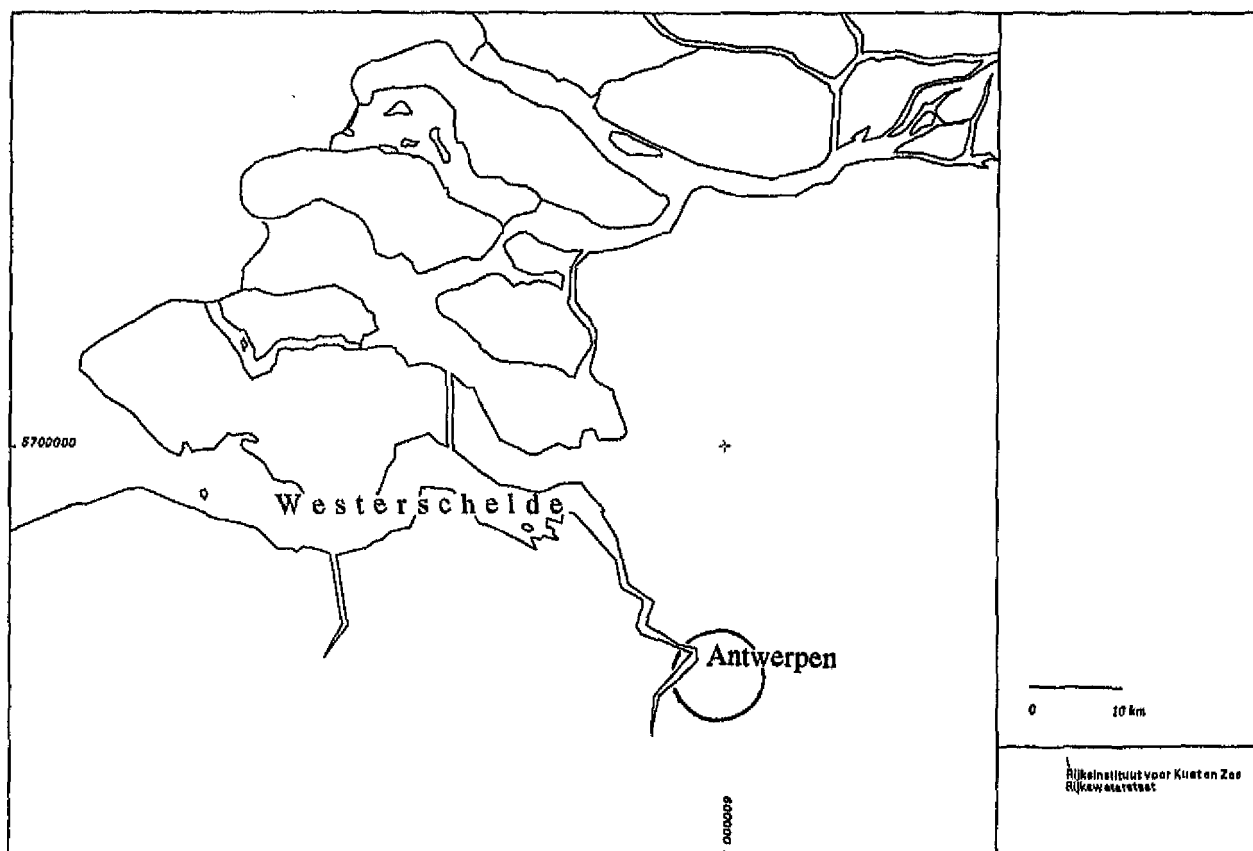
1. Inleiding

1.1 Kader

In dit rapport wordt aan de hand van een literatuurstudie getracht het morfologische gedrag van drempels in estuaria te verklaren.

Drempels zijn natuurlijke ondiepten in de geul op de overgang tussen twee bochten in estuaria en meanderende rivieren. Ook in de Westerschelde in zuid-west Nederland (figuur 1.1) komen drempels voor. De Westerschelde vormt de vaarweg naar de zeehaven van Antwerpen. Zij vormen daar een probleem voor de steeds dieper stekende schepen en dienen daarom gebaggerd te worden. De baggerwerkzaamheden, die vooral in het oosten van de Westerschelde geconcentreerd zijn, hebben jaarlijks een omvang van ongeveer 8 Mm³. Met de 48'/43'-verdieping, die naar verwachting begin 1997 start, zal deze omvang aanvankelijk bijna verdubbelen en op de lange termijn stabiliseren op 12 à 15 Mm³ per jaar. Deze toename van het bagger- en stortwerk betekent een vergrote ingreep op de fysische structuur van het estuarium met alle gevolgen van dien voor het ecologisch systeem van de Westerschelde.

In het Beleidsplan Westerschelde (Bestuurlijk Klankbordforum Westerschelde, 1991) is een lange termijn visie opgesteld waarin men het natuurlijk karakter van de Westerschelde zoveel mogelijk wil behouden zonder dat daarbij de maatschappelijke functies verloren gaan.



Figuur 1.1 Lokatie Westerschelde in Zuid-West Nederland en Antwerpen

Om de druk op het fysisch systeem van de Westerschelde te reduceren worden door Rijkswaterstaat/Directie Zeeland beheersalternatieven, die de diepte van een drempel op een min of meer natuurlijke manier vergroten, onderzocht. Hierbij wordt gedacht aan getijvolumevergroting door ontpolderen, morfologisch baggeren en storten of aan het aanleggen van (onderwater-) leidammen om de stroming over een drempel te concentreren. Om de gevolgen van deze alternatieven op de diepte van de drempel juist te kunnen inschatten is kennis nodig over het gedrag van een drempel.

Voorjaar 1995 is Directie Zeeland daarom gestart met een meerjarig onderzoek binnen het project MOVE naar het gedrag van drempels in de Westerschelde.

De doelstelling van het onderzoek naar het gedrag van drempels in de Westerschelde binnen het project MOVE/project DREMPELS luidt:

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

1.2 Resultaten uit eerder onderzoek

In de verkennende fase van het drempelonderzoek, die reeds is afgesloten, is aan de hand van een literatuuronderzoek en beschrijvingen van de morfologische ontwikkeling van een aantal drempels en de waterbeweging over de drempels een drietal drempel-typen in de Westerschelde onderscheiden. Het zijn de volgende typen: 'botsende geulen', 'ontwijkende geulen'- en 'parallele geulen'-drempel (Tank, 1995). Elk der typen wordt gekenmerkt door een karakteristiek geulpatroon en bijbehorende waterbeweging. Alle drempels in de Westerschelde waren in de jaren '50 van deze eeuw van het 'botsende geulen'-type maar zijn sindsdien overgegaan naar een van de andere typen. Verder is in de verkennende fase van het drempelonderzoek een aantal hypothesen opgesteld over het gedrag van drempels.

De belangrijkste mechanismen die het gedrag van drempels in estuaria bepalen zijn volgens dit eerder onderzoek:

- 1 de demping van de secundaire stroming na een bocht, waardoor het dwarsprofiel van driehoekig naar rechthoekig overgaat: het rechthoekige profiel is daar relatief breed en ondiep en vormt de drempel. De secundaire stroming is mogelijk ook van belang voor de aanzanding van de drempel, door aanvoer van geërodeerd materiaal van de buiten- naar de binnenbocht.
- 2 de stroomdraden van de eb en de vloed ontlopen elkaar sterk ter hoogte van een drempel. Dit mechanisme zorgt ook voor een breed en ondiep dwarsprofiel.
- 3 De divergentie van de stroming ter hoogte van de drempel door o.a. aftapping van de nevengeulen en door het brede én ondiepe dwarsprofiel. De divergentie leidt tot vertraging van de stroomsnelheid en daarmee tot sedimentatie op te ruime drempels.

Deze hypothesen zullen, samen met de in dit rapport geformuleerde nieuwe hypothesen, met behulp van fysische metingen op de Drempel van Hansweert najaar 1995 en voorjaar 1996 worden getoetst.

1.3 Doel literatuurstudie

Het doel van de hier gepresenteerde literatuurstudie is tot een dieper inzicht te komen in het gedrag van drempels in de Westerschelde en het aanscherpen van al eerder geformuleerde hypothesen (Tank, 1995) over dit gedrag. Dit wordt getracht aan de hand van de analogie van vormen en processen in rivieren met die in de Westerschelde en andere estuaria.

De literatuurstudie wordt geleid door de volgende onderzoeksvragen:

- Wat is de overeenkomst tussen de morfologische eenheden van rivieren en de morfologie van de Westerschelde?
- Zijn deze morfologische eenheden in estuaria door de zelfde processen als in rivieren tot stand gekomen?
- Welke processen spelen een rol in de waterbeweging, sedimentbeweging en morfologische ontwikkeling in bochten in rivieren?
- Welke van deze processen uit rivieren spelen ook een rol in de Westerschelde?
- Welke van deze processen spelen een rol op de drempels in de hoofdgeul van de Westerschelde?

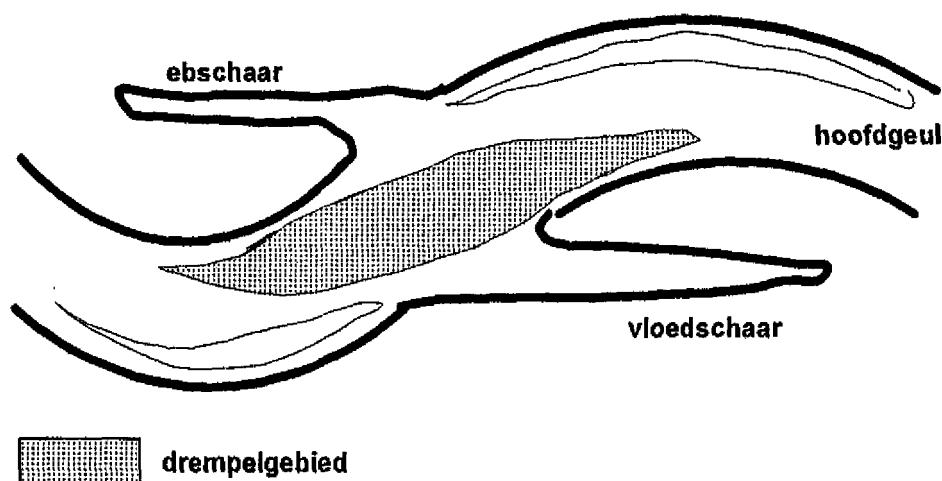
Door gebrek aan tijd is niet alle in de literatuurlijst vermelde literatuur voor deze literatuurstudie gebruikt. Na de literatuurlijst bevindt zich een lijst met mogelijk relevante literatuur voor het onderzoek naar drempels.

In hoofdstuk 2 komt de morfologie aan de orde. De processen worden beschreven in hoofdstuk 3. In hoofdstuk 4 volgen de conclusies en in hoofdstuk 5 tenslotte worden de hypothesen -ook die uit eerder onderzoek- over het gedrag van drempels in de hoofdgeul van de Westerschelde samengevat.

2 Morfologie

2.1 Inleiding

De Westerschelde is een langwerpig, trechtervormig estuarium met een complex stelsel van geulen en platen (figuur 2.1). In stroomopwaartse richting (uitgaande van de rivierstroming) in de Westerschelde nemen de getijvolumina en daarmee ook de dimensies van de geulen en ook het aantal geulen af. De horizontale geometrie van het geulensysteem bepaalt de ligging van de drempels die op de overgang tussen twee bochten en/of op de kruising van geulen voorkomen (figuur 2.2). De kruisende geulen zijn eb- of vloedgedomineerd zodat ter hoogte van een drempel tegengestelde netto zandtransporten samen komen.



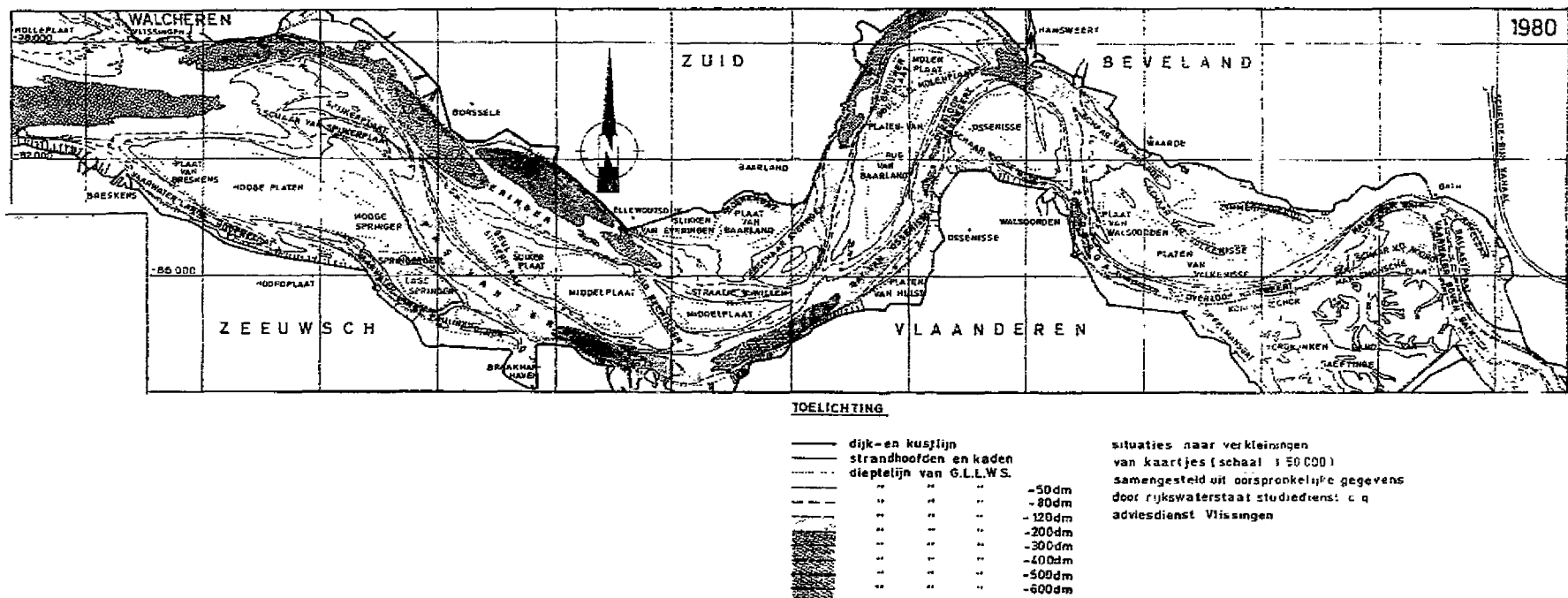
Figuur 2.2 Schema van een drempel op de overgang tussen twee bochten en/of op de kruising van geulen

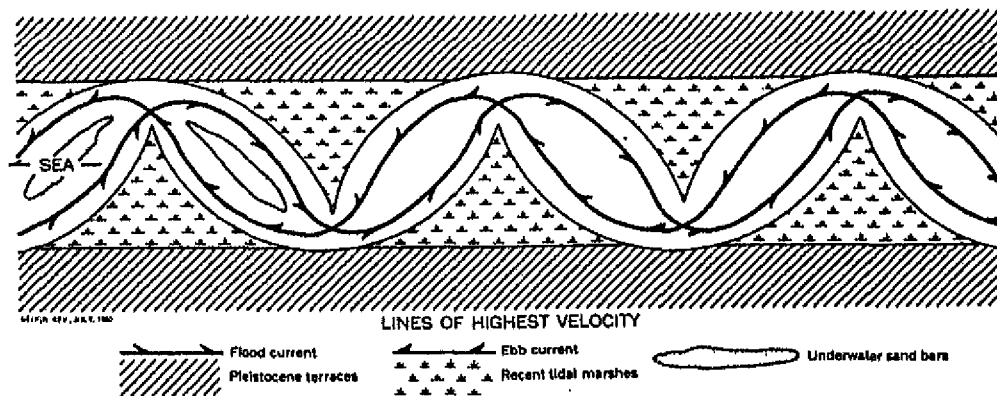
De morfologie van de Westerschelde vertoont, blijkens de volgende hoofdstukken, veel elementen die overeen komen met de morfologie in rivieren. Ook de processen die deze morfologische elementen in rivieren veroorzaken en die de morfologische eenheden genereren spelen een rol in de Westerschelde en andere estuaria. Vormen en processen in estuaria en rivieren hangen dus sterk met elkaar samen en beïnvloeden elkaar. Ook in de Westerschelde wordt het gedrag van drempels in de hoofdgeul waarschijnlijk beïnvloed door andere kenmerken van morfologische eenheden.

2.2 Geulpatronen

Een typisch element van een estuarium zoals de Westerschelde is het meanderen van de hoofdgeul. De meanders in estuaria verschillen van die in rivieren en worden estuariene meanders genoemd (Ahnert, 1960). Het verschil met rivieren is dat door de bidirectionele stroming de stroomdraden van de eb en de vloed in de bochten dichtbij elkaar liggen en op de rechte stukken elkaar sterk ontlopen (figuur 2.3). Onder andere hierdoor zijn de bochten

De Westerschelde. Geulen en platen





Figuur 2.3 Estuariene meanders (bron: Ahnert, 1960)

in estuaria relatief smal en diep en de rechte stukken relatief breed en ondiep en deze stukken worden daarom ook wel drempels genoemd.

De relatief smalle en diepe geuldelen tussen de drempels worden door Allersma (1994) 'elementaire geulen' genoemd. Deze worden gekenmerkt door:

- een relatief ondiep begin waar het water toestroomt
- een relatief diep, meestal gekromd middenstuk waarin de stroom zich concentreert en waar erosie van de buitenbocht optreedt;
- een weer relatief ondiep einde (soms een duidelijke drempel) waar de stroom divergeert.

Deze elementaire geulen hebben een lengte van minimaal enkele kilometers en een breedte van minimaal 0.5 kilometer en vertonen een meanderend patroon. Het meanderend patroon komt sterk overeen met dat van alluviale rivieren. Kennis uit de rivierkunde over deze meanderende rivieren is waarschijnlijk ook deels van toepassing op de elementaire geulen in de Westerschelde.

Uit het patroon van de dominante beddingvormen in de elementaire geulen van een estuarium met sterke fluviatiele kenmerken is afgeleid dat het patroon van de ebstroming met ongeveer dezelfde golflengte meandert als het patroon van de vloedstroom, maar dat de amplitude van het patroon van de ebstroom geringer is (Ashley, 1980). In de Westerschelde lijkt het erop juist de ebstroom een grotere amplitude heeft; de golflengte waarmee de eb- en de vloedstroom meandert is wel ongeveer gelijk.

In de Westerschelde zijn de relatief grote elementaire geulen vaak grotendeels ebgedomineerd; het bovenstroomse, ondiepe uiteinde kan vloedgedomineerd zijn. In lange en smalle estuaria is vaak de ebgeul het dominante element in de bodemconfiguratie (Robinson, 1960).

In de Westerschelde takken nevengeulen van de elementaire geulen af. Deze geulen zijn relatief recht, relatief breed en ondiep (hoge breedte/diepte-ratio) en over het algemeen vloedgedomineerd. Deze geulen hebben een enigszins verwilderd (vlechtend) karakter zoals ook in rivieren met een groot langsverhang. De vloedscharen eindigen veelal in een ondiep gebied op de overgang naar de elementaire ebgeul.

2.3 Banken

2.3.1 Inleiding

In rivieren komen een aantal kenmerkende bank ('bar') -vormen voor. De belangrijkste zijn de 'point bar', de 'alternate bar' en de 'middle bar'. In estuaria, zoals de Westerschelde, komen analoge banktypen voor (Ashley, 1980; Dalrymple en Rhodes, 1995). Over de morfologie en genese van 'bars' in estuaria is zeer weinig bekend in de literatuur (Dalrymple en Rhodes, 1995). Daarnaast vertoont de Westerschelde met de opeenvolging van diepe bochten en ondiepe drempels overeenkomst met de 'riffle-pool'-eenheid, een fundamentele morfologische eenheid van veel (grind-)rivieren.

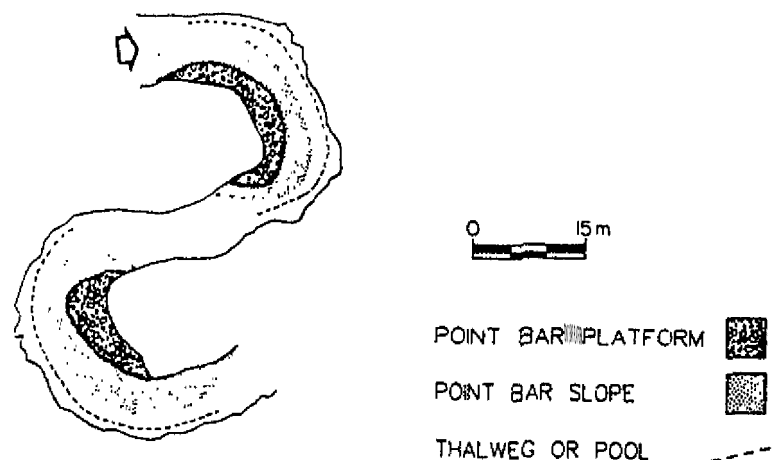
Volgens Church en Jones (1982) hebben 'bars' -in grindrivieren weliswaar, maar dit geldt ongetwijfeld ook in estuaria- een tweeledige functie:

1. genereren een hydraulische weerstand, zodanig dat dit ten goede komt aan de stabiliteit van een rivier en
2. tijdelijke opslagzone voor sediment.

In deze tekst is de engelse terminologie van de banken ('bars') gehandhaafd om verwarring tussen de vele verschillende typen banken te vermijden.

2.3.2 'Point bar'

De 'point bar' (ook wel: 'forced bars' of kronkelwaard in het nederlands) bevindt zich in de binnenbocht van een riviermeander (figuur 2.4). 'Point bars' in rivieren zijn een reactie op het stromingspatroon in een bocht, d.w.z. 'point bars' zijn een gevolg i.p.v. een oorzaak van meanderen (Ikeda, 1989). Tevens beïnvloeden de 'point bars'



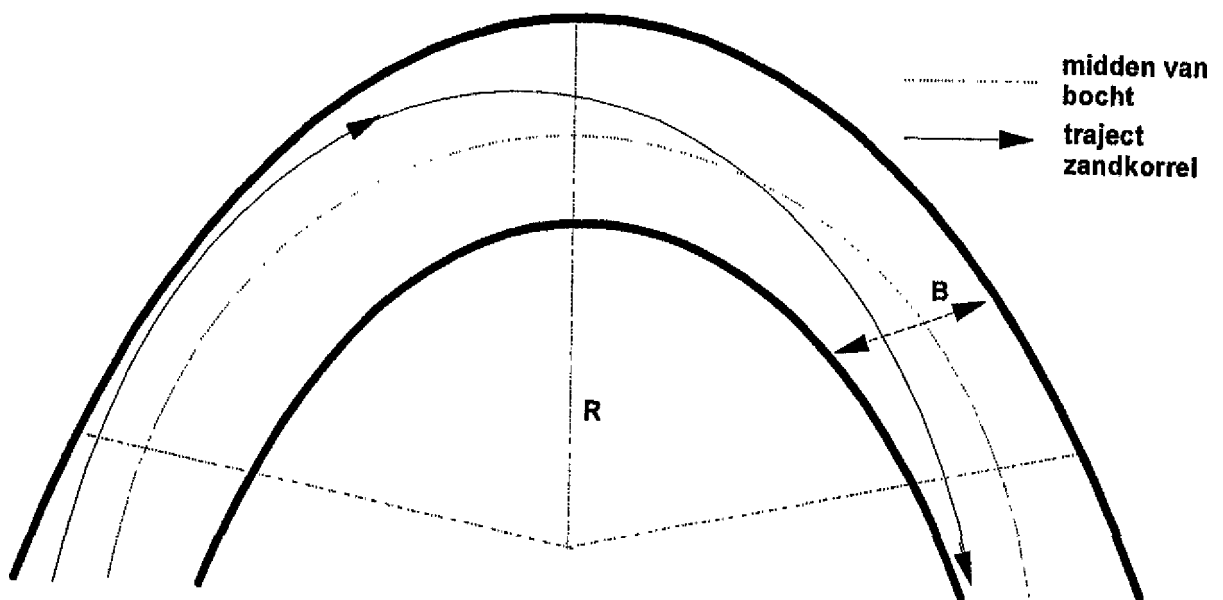
Figuur 2.4 'Point bar' in de binnenbocht van een riviermeander (bron: Anthony en Harvey, 1991)

het stromingspatroon in een bocht. De 'point bar' wordt in de binnenbocht gevormd ten gevolge van een zich dempende, golfvormige verstoring van het langsprofiel van de bodem vanaf het begin van de bocht (Struiksma et al., 1985). Het zijn sedimentaire eenheden, waarbij het sediment gedeeltelijk afkomstig is uit de buitenbocht, die erodeert. De aanvoer van sediment naar de 'point bar' vindt o.a. plaats door secundaire stromen die aan de bodem naar de binnenbocht zijn gericht. Mogelijk vindt deels ook sedimentatie plaats door vertraging van de stroming stroomopwaarts van de bochtapex (zie hoofdstuk 3.2). Het gedeelte dat naar de binnenbocht oversteekt is overigens zeer klein, zoals bleek uit laboratoriumproeven door Friedkin (1945): het meeste materiaal dat in de buitenbocht wordt geërodeerd wordt in de stroomafwaarts gelegen 'bar' of 'crossing' afgezet. Alleen zand dat aan het begin van de rivierbocht erodeert bereikt de binnenbocht. Gebaseerd op theoretische overwegingen is door NEDECO (1959) een vergelijking opgesteld voor de lengte langs het midden van de rivier waarover een zandkorrel van de buiten- naar de binnenbocht oversteekt (figuur 2.5):

$$l = \frac{B \cdot R}{8 \cdot h} \quad (1)$$

waarin:

- l = lengte van de rivier gemeten langs het midden van de waterloop (m)
- B = rivierbreedte (m)
- R = bochtstraal (m)
- h = waterdiepte (m)



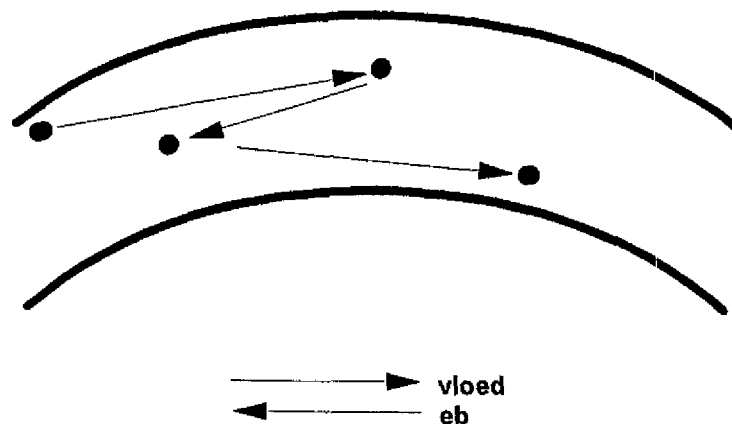
Figuur 2.5 Lengte langs midden van een rivier waarover een zandkorrel van de buiten- naar de binnenbocht oversteekt

Deze vergelijking geldt overigens voor een cirkelvormige meander. Voor rivieren met $B = 1000$ m en $h = 5$ m geldt: $l = 25R$. Hieruit is af te leiden dat pas als een zandkorrel bijna 4 maal een volledige cirkel heeft afgelegd de zandkorrel is overgestoken.

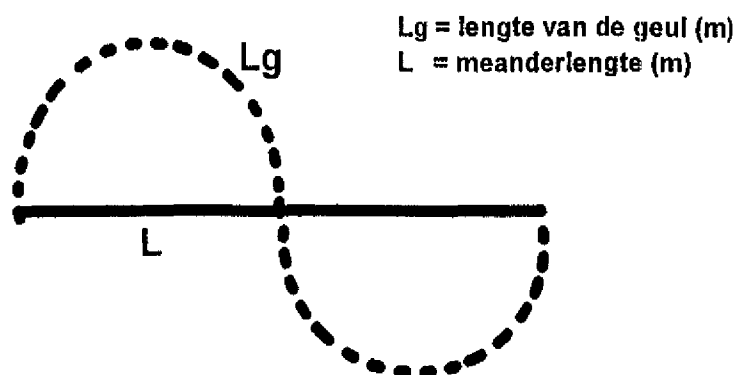
Enkele rekenvoorbeelden illustreren dit voor de Westerschelde:

In bijvoorbeeld de bocht bij Hansweert in de Westerschelde met een breedte van 1300 m (tijdens vloed), een gemiddelde waterdiepte van 20 m (tijdens vloed) en een kromtestraal van 2200 m zou volgens bovenstaande vergelijking l circa 18 km zijn. Dit houdt in dat een zandkorrel die aan het begin van de bocht bij Hansweert erodeert niet zal worden afgezet in de binnenbocht. Een identieke berekening voor het Zuidergat (tijdens vloed: $B = 800$ m; $h = 19$ m; $R = 2000$ m) levert een l op van circa 10 km.

Uit beide voorbeelden geldt dat een zandkorrel in de Westerschelde, ook al wordt hij aan het begin van een bocht in de buitenbocht geërodeerd, zeer waarschijnlijk nooit in een getijfase in de binnenbocht wordt afgezet. Het is overigens de vraag of zandkorrels in een getijfase afstanden die uit de berekening volgen kunnen afleggen: in Storm (1995) wordt de gemiddelde afgelegde weg tijdens een gemiddeld springtij van een eb- of vloedfase voor zand in suspensie geschat op ten hoogste enkele kilometers. Wel is mogelijk dat in estuaria door de gecombineerde werking van eb en vloed een zandkorrel na enkele getijden de binnenbocht wel kan bereiken (figuur 2.6).



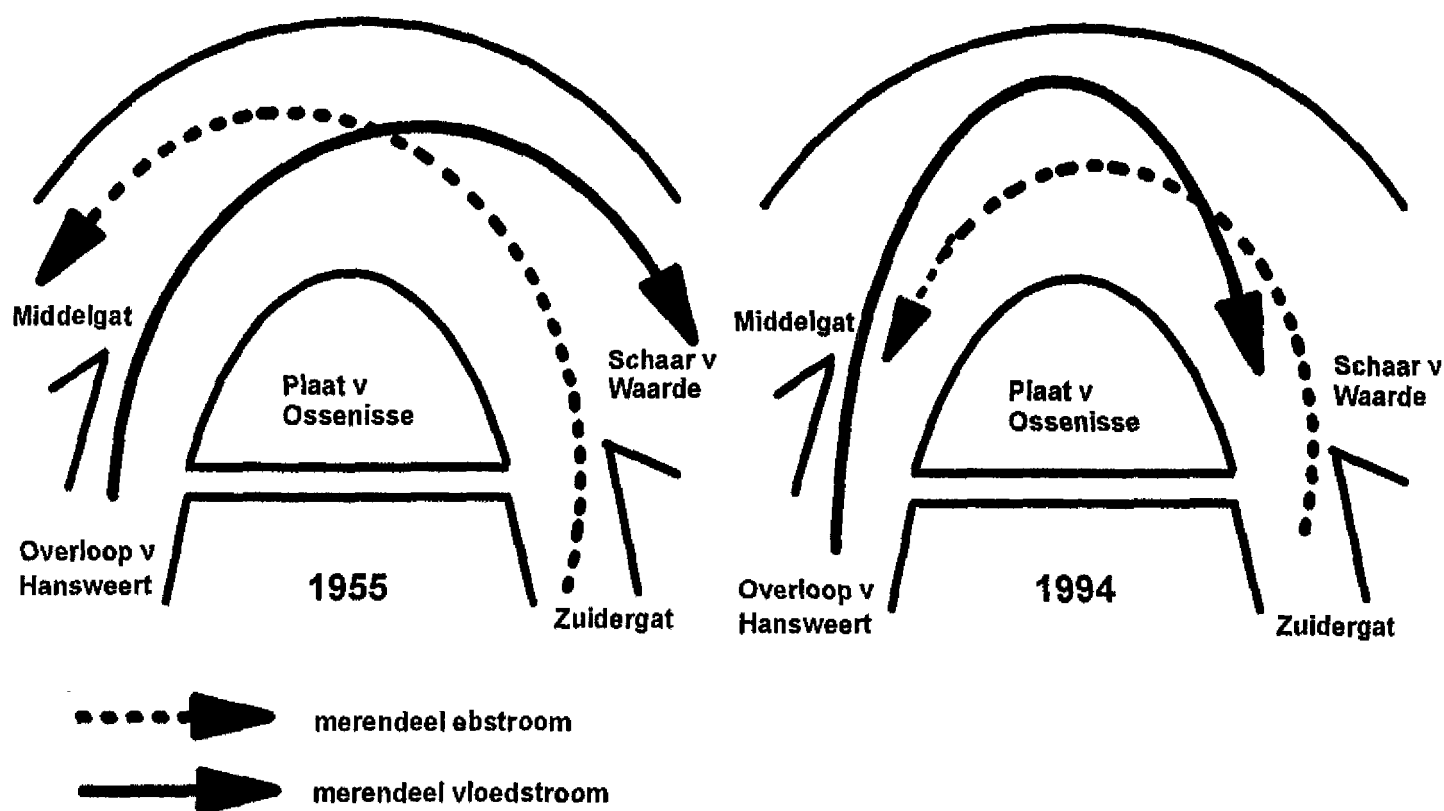
Figuur 2.6 Transport van een zandkorrel van buiten- naar binnenbocht door de gecombineerde werking van eb en vloed



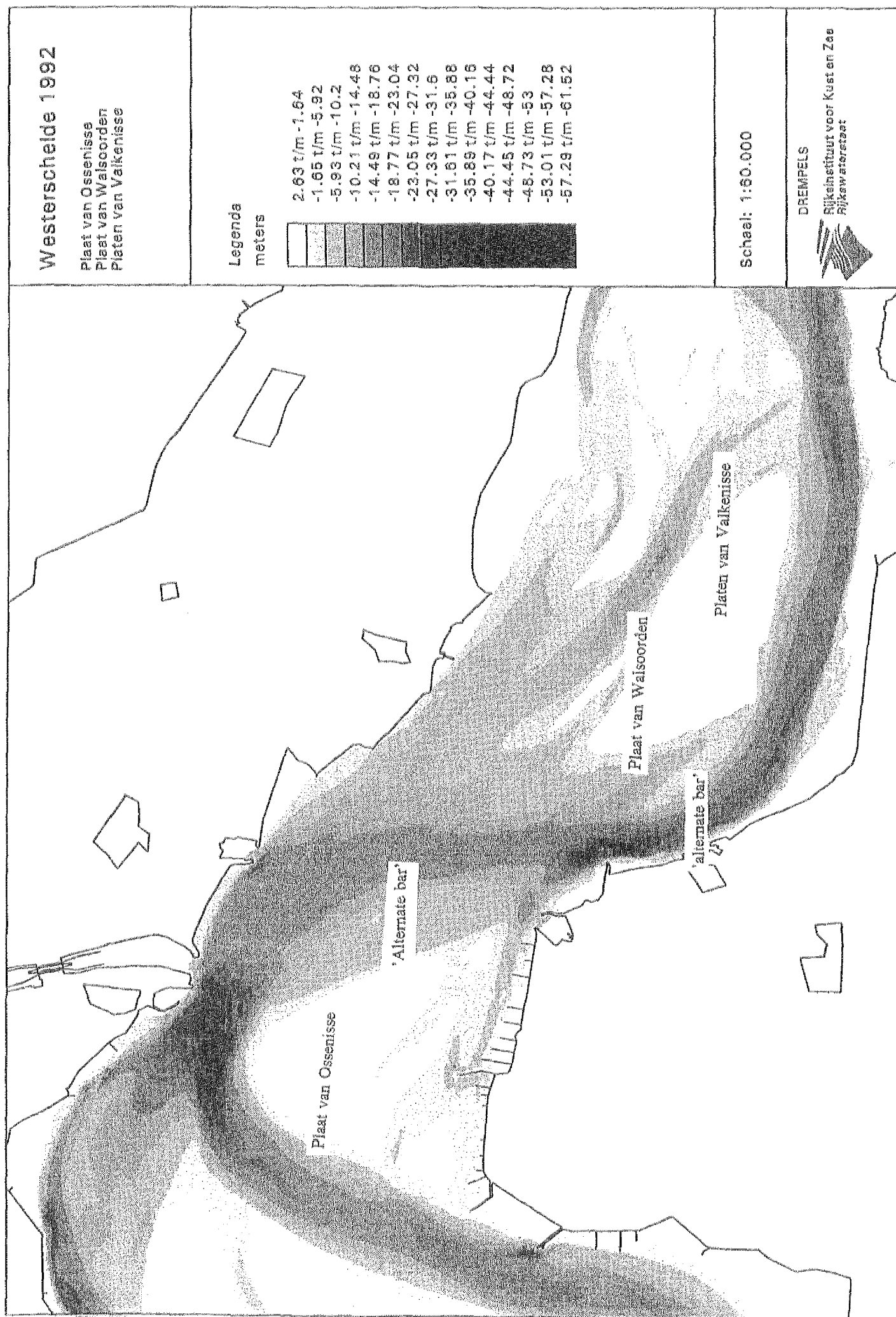
Figuur 2.7 Definitie sinusoiditeit

Bij migratie van de buitenbocht migreert de 'point bar' mee. In de Westerschelde zijn bochten in de loop van de tijd veelal vastgelegd door bestortingen of is de migratie van de bochten gelimiteerd door de bedijking. Als gevolg hiervan is de migratie van de 'point bars' in de Westerschelde beperkt. De omvang en de stabiliteit van de 'pointbar' nemen toe met een toename van de sinusoïteit van de meandergeul (Tubino en Seminara, 1990). De sinusoïteit (S) is gedefinieerd als de ratio van de lengte van de meandergeul en de meanderlengte (figuur 2.7). De toename in hoogte van de Plaat van Ossensisse in de Westerschelde in de afgelopen 40 jaar kan mogelijk gedeeltelijk verklaard worden doordat steeds meer water in loop van deze periode een scherpere bocht is gaan maken rondom de Plaat van Ossensisse. Hierdoor is de grootte van de secundaire stroming toegenomen en daarmee de aanvoer van sediment naar de binnenbocht richting de plaat. De verandering van de waterbeweging rondom de Plaat van Ossensisse in de afgelopen 40 jaar is veroorzaakt door twee ontwikkelingen (figuur 2.8):

1. De Overloop van Hansweert is ten kostte van het Middelgat steeds meer water gaan voeren. Dit is een min of meer natuurlijke ontwikkeling en vindt plaats sinds de jaren '30 van deze eeuw (Van Kleef, 1994).
2. Het Zuidergat is ten kostte van de Schaar van Waarde steeds meer water gaan voeren. Dit is vooral het gevolg van omvangrijke baggerwerkzaamheden op de Drempel van Hansweert sinds de jaren '60.



Figuur 2.8 Verandering in de waterbeweging rondom de Plaat van Ossensisse tussen circa 1955 en 1994



Figuur 2.9

De Plaat van Ossenisse en de Plaat van Walsoorden/Platen van Valkenisse en de lokatie van 'alternate bars' in de Westerschelde

In de Westerschelde zijn ook morfologische eenheden met kenmerken van 'point bars' waarneembaar. Duidelijke voorbeelden zijn de Plaat van Ossensisse en de Plaat van Walsoorden/Platen van Valkenisse (figuur 2.9). Beide platen/plaatcomplexen bevinden zich in de binnenbocht van de meanderende hoofdgeul. Waarschijnlijk zijn zij deels ontstaan door dezelfde processen die in een rivier 'point bars' doen ontstaan: de aanvoer naar de binnenbocht van sediment door secundaire stromingen en mogelijk ook door vertraging van de stroming stroomafwaarts van de bochtapex waardoor sedimentatie plaatsvindt. Overigens vertonen de Plaat van Ossensisse en de Plaat van Walsoorden/Platen van Valkenisse kenmerken van 'middle bars' (zie hieronder). Vooral bij de Plaat van Walsoorden/Platen van Valkenisse is dit duidelijk: deze vormt de 'middle bar' tussen het Zuidergat en de Schaar van Waarde/Schaar van Valkenisse.

Van belang voor het gedrag van de drempels in de hoofdgeul van de Westerschelde is dat de vorm en omvang van een 'point bar'/plaat het stromingspatroon van bocht naar drempel beïnvloedt. Een toename van de hoogte van een 'point bar' of een uitbreiding van het oppervlak van de 'point bar' richting buitenbocht hebben een grotere kromming van de stroming tot gevolg. De secundaire stromen zijn hierdoor sterker en blijven langer intact waardoor deze ter hoogte van een drempel nog niet geheel zijn uitgedempt en dit heeft mogelijk een diepere en kortere drempel tot gevolg (zie ook paragraaf 3.2.2 over secundaire stroming).

2.3.3 'Alternate bar'

'Alternate bars' (ook wel: 'free bars' of alternerende banken in het nederlands) kunnen om en om aan beide zijden van de geul in een al of niet meanderende rivier voorkomen (figuur 2.10). De hoogte van de 'alternate bars' is ongeveer de gemiddelde waterdiepte in een geul en de lengte ligt in de orde van enkele malen de geulbreedte. Ze kunnen migrerend ('free alternate bar') of niet-migrerend ('forced/fixed alternate bars'). In



Figuur 2.10 'Alternate bars' in een rechte geul (bron: Knighton, 1984)

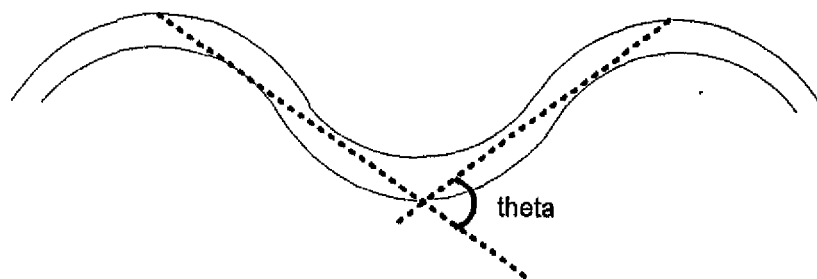
estuaria komen 'alternate bars' voor in relatief diepe systemen (breedte/diepte-ratio minder dan 100) (Dalrymple en Rhodes, 1995). De breedte/diepte-ratio van bijvoorbeeld de Drempel van Hansweert in de Westerschelde is circa 65. 'Alternate bars' spelen een kritieke rol in het initiëren van het meanderproces door het lateraal uiteenlopen van de stroming dwars over een geul naar de oever aan de andere zijde (Whiting en Dietrich, 1991 in: Rhoads, 1992).

'Alternate bars' is een zichzelf genererend effect in tegenstelling tot 'point bars', die geforceerd zijn door de gekromde stroming (Parker en Johannesson, 1989). 'Alternate bars' kunnen ook het gevolg zijn van constante,

horizontale turbulentie, die ontstaan door de stroming rondom een 'point bar' in een bocht (Seminara en Tubino, 1989). Beide typen banken, de 'point bar' en de 'alternate bar', kunnen gelijktijdig in een geul voorkomen en er kan interactie tussen beide plaatsvinden. In het geval van migrerende 'alternate bars' kunnen deze als deze in fase zijn met de 'point bars' ('forced') het reliëf van de bodemmorfolgie versterken; en indien ze uit fase zijn het juist uitdempen (Ikeda, 1989). Niet-migrerende 'alternate bars' kunnen ook overgaan in 'point bars'; dit treedt vooral op in geulen met een relatief lage breedte/diepte-ratio.

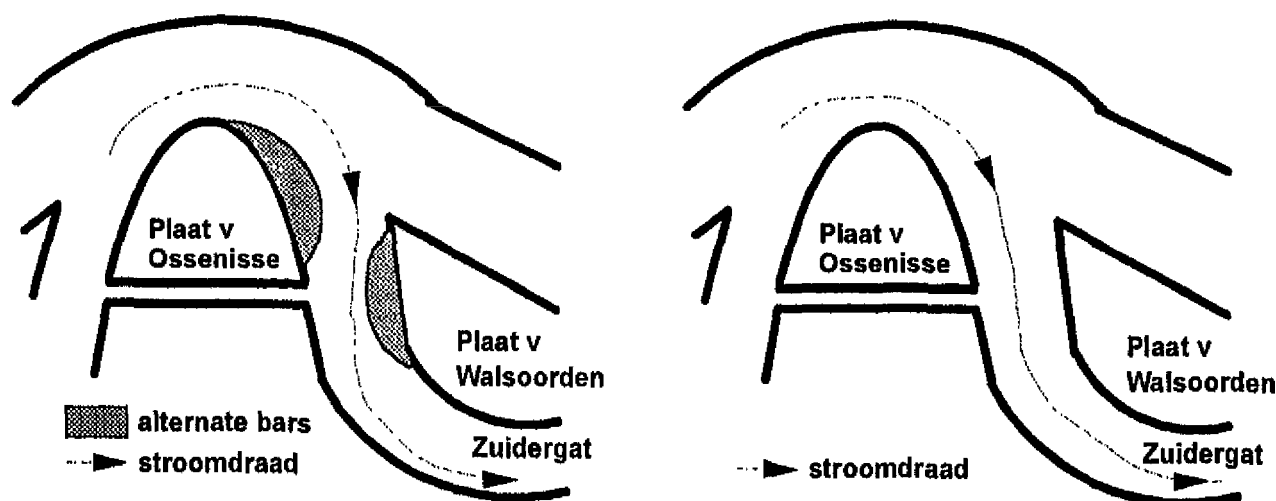
'Alternate bars' dempen uit en stoppen met migreren in sinusvormige geulen, als de hoek tussen twee opeenvolgende bochten (θ) groter is dan de kritische waarde van 20 à 40 graden (figuur 2.11). Als de hoek θ kleiner is, en de geul dus relatief recht, migreren de 'alternate bars'. Dit bleek uit laboratoriumproeven van Kinoshita en Miwa (1974 in: Ikeda, 1989). Voorwaarde is wel dat de dimensies van de 'forced/point bars' groot zijn en dat hangt weer sterk af van de meanderlengte. Er geldt volgens een theoretische analyse van Tubino en Seminara (1990): dat hoe groter de amplitude van de 'free bars', hoe sinusvormiger de geul moet zijn om de 'free bars' te kunnen laten verdwijnen. Dit is ook waargenomen in het veld door Kinoshita en Miwa (1974 in: Tubino en Seminara, 1990). Overigens kunnen 'alternate bars' bij een grote θ (d.w.z. een θ veel groter dan de kritische waarde) weer ontstaan.

'Alternate bars' lijken ook in de Westerschelde voor te komen. Dit wordt ondersteund door de breedte/diepte-ratio de hoofdgeul die over het algemeen ruim onder de 100 ligt. Voorbeelden van 'alternate bars' in de Westerschelde zijn het oostelijk deel van de Plaat van Ossensisse en het westelijk deel van de Plaat van Walsoorden (figuur 2.9). Dit zijn dan niet-migrerende 'alternate bars'. Dit stemt overeen met de hoeken tussen opeenvolgend-



Figuur 2.11 Hoek tussen opeenvolgende bochten

de bochten die over het algemeen groter zijn dan θ_{cr} en ze komen om en om in de hoofdgeul voor. Zij veroorzaken binnen de meanderende hoofdgeul een meanderen van de hoofdstroom en daardoor hebben zij waarschijnlijk invloed op het gedrag van de drempels. Mogelijk ontstaat door de 'alternate bars' binnen de meanderende hoofdgeul een secundaire stroming gesuperponeerd op de secundaire stroming in de meanderende hoofdgeul. Hierdoor is het dwarsprofiel op delen van een drempel asymmetrischer en de diepte van de drempel groter. Ook is het mogelijk dat, in het geval van de 'alternate bars' aan de oostelijke zijde van de Plaat van Ossensisse en aan de westelijke zijde van de Plaat van Walsoorden, de hoofdstroming minder gekromd is dan in het geval van een situatie zonder deze 'alternate bars' (figuur 2.12). Hierdoor is de secundaire stroming minder sterk en het dwarsprofiel ter hoogte van de drempel minder asymmetrisch.



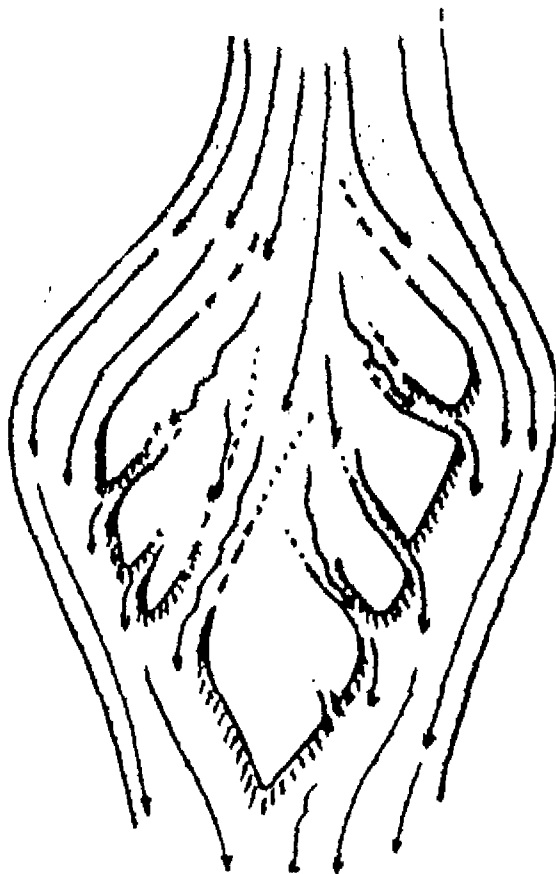
Figuur 2.12 Kromming van de stroomdraden van de hoofdstroming om de Plaat van Ossenisse en Plaat van Walsoorden/Platen van Valkenisse met en zonder aanwezigheid van 'alternate bars'

2.3.4 'Middle bar'

Een 'middle bar' is een 'bar' in een rivier of estuarium waarlangs aan beide zijden stroming plaatsvindt (figuur 2.13). Tijdens een groot deel van de afvoeren in een rivier ligt een goed ontwikkelde 'middle bar' droog. In estuaria komt de lengte van een 'middle bar' overeen met enkele malen de geulbreedte en de breedte met ongeveer de geulbreedte (Dalrymple en Rhodes, 1995). Als in rivieren de stroming van een diepe geul overgaat naar een ondieper maar breder stuk, neemt de stroomsnelheid af, waardoor ook de bodemschuifspanning afneemt naar een niveau waardoor sedimentatie optreedt en de 'middle bar' wordt gevormd (Davoren en Mosley, 1986). De 'middle bar' zelf versterkt dit mechanisme. Voorwaarde is wel dat het systeem uit evenwicht is met de waterbeweging. De 'middle bar' in rivieren is nauw verbonden met het voorkomen 'crossings', de plaats waar de stroomdraad tussen opeenvolgende bochten van de ene naar de andere oever oversteekt. Op een 'crossing' divergeert de stroming en vindt er sedimentatie plaats (Ashley, 1980).

In de Westerschelde komen ook 'middle bars' voor. Een voorbeeld hiervan op macro-niveau is de Plaat van Walsoorden/Platen van Valkenisse (figuur 2.9). Dit plaatcomplex heeft, zoals al eerder genoemd, ook kenmerken van 'point bars'. Dit platencomplex wordt vermoedelijk deels gevormd door sedimentatie ten gevolge van divergentie en vertraging van de stroming tijdens vloed over de Drempel van Hansweert. De omvang en vooral de hoogte van de 'middle bars' hebben invloed op de stroming, zeker als de 'middle bar' deels ook een 'point bar' is. Hoe hoger een 'middle bar' hoe korter de periode is waarin water over de plaat stroomt tijdens hoge waterstanden en hoe langer de periode is waarin de stroming in een bocht gekromd blijft. Hierdoor blijft tijdens een groot deel van een getij de secundaire stromingen relatief sterk (zie ook paragraaf 3.2.2, waar hier dieper op ingegaan wordt). Sterkere secundaire stromingen hebben een asymmetrischer dwarsprofiel tot gevolg en hebben een langere aanpassingslengte dan minder sterke secundaire stromingen.

Op een kleiner schaalniveau zouden drempelgebieden ook beschouwd kunnen worden als -beginnende- 'middle bars'. Op de drempels namelijk divergeert en vertraagt de stroming ook en vindt er, in het geval van verdiepte



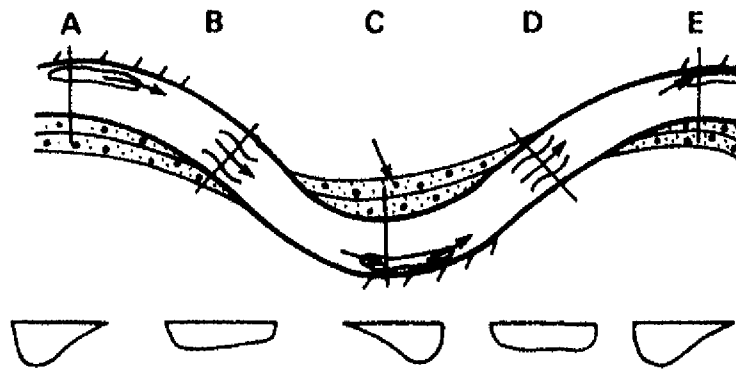
Figuur 2.13 'Middle bar' in een rivier (bron: Church en Jones, 1982)

drempels, sedimentatie plaats. Deze 'middle bars' zijn nog in een pril stadium en vallen tijdens geen enkele waterstand droog. Als de oevers niet waren bestort en de geulen in de Westerschelde nog vrij konden meanderen en als de baggerwerkzaamheden worden gestopt, zullen zij in omvang toenemen en op den duur deels komen droog te vallen.

2.3.5 'Crossings'

In rivieren bevinden de 'crossings' zich in het relatief rechte geuldeel tussen twee bochten, op de plaats waar de stroomdraad van de ene oever naar de andere oversteekt. De geul is hier in vergelijking met de bocht relatief breed en ondiep (figuur 2.14) omdat de secundaire stroming minder sterk of uitgedempt is. Zoals al eerder vermeld, is volgens Friedkin (1945) een deel van het sediment op een 'crossing' afkomstig van erosie van de stroomopwaarts gelegen buitenbocht. In situaties met bidirectionele stroming, zoals de Westerschelde, zal de 'crossing' van de stroomdraad van de ebstroom niet op dezelfde plaats liggen als de 'crossing' van de stroomdraad van de vloedstroom (figuur 2.15). Hierdoor zal het 'crossing'-gebied in een estuarium relatief groot zijn vergeleken met rivieren. Als de 'crossings' van eb en vloed op een min of meer dezelfde plaats liggen zou dat een diepere drempel tot gevolg hebben.

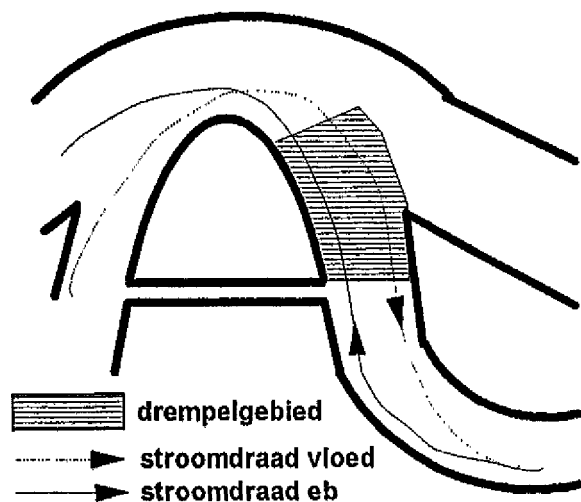
De grootte van de afvoeren in zandrivieren, zoals bijvoorbeeld de Mississippi, is van invloed op de diepte van de 'crossing': bij afnemende en lage afvoeren vindt over het algemeen erosie van de 'crossing' plaats en verdiept de



Figuur 2.14 Dwarsprofielen van een bocht (A, C, E) en een 'crossing' (B, D) in een rivier (bron: Knighton, 1984)

'crossing' en vice versa (Anthony en Harvey, 1991; Winkley, 1984). Tijdens afnemende en lage afvoeren is de waterstand boven een 'crossing' laag en treedt er boven een 'crossing' een stroomversnelling, en dus erosie, op. In een estuarium heeft een verlaging van de afvoer een verlaging van de stroomsnelheid en dus sedimentatie van de drempels tot gevolg.

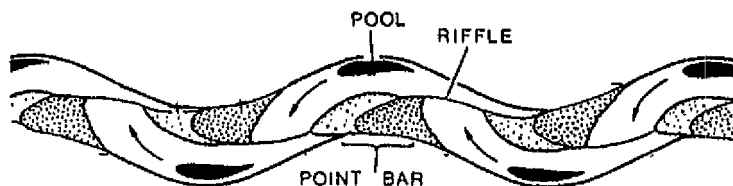
In een rivier is een tijdschaal van een jaar voor bovenstaand effect relevant. In een estuarium treden juist grote variaties op in waterstanden op een tijdschaal van een getij of van een springtij/doodtij-cyclus. Omdat de duur van deze tijdschalen in een estuarium vergeleken bij een rivier gering zijn, zullen de veranderingen in bodemhoogte ook gering zijn.



Figuur 2.15 Lokatie van de stroomdraden van de eb- en vloedstroom op een 'crossing' in een estuarium

2.3.6 'Riffle-pool'-eenheid

Een kenmerkend element in grindrivieren met een relatief klein verhang is de opeenvolging van 'riffles' en 'pools', waarbij de erosievorm 'pool' met de daarvan stroomafwaarts gelegen depositievorm 'riffle' een eenheid vormt (Thompson, 1986). In figuur 2.16 laat een opeenvolging van 'pools' en 'riffles' zien in een meanderende



Figuur 2.16 'Riffle-pool'-eenheid in een meanderende rivier (bron: Thompson, 1986)

rivier. Kenmerkend is de combinatie van 'riffles' en de daarmee geassocieerde 'bars', zoals 'point bars'. 'Riffles' zijn hoge punten in de beddingtopografie met relatief grof beddingmateriaal, waarover het langsverhang groot is en waarover de stroming een hoge snelheid heeft en divergeert. 'Pools' zijn lage punten in de beddingtopografie met relatief langzame, convergerende stroming, een gering langsverhang en relatief fijn beddingmateriaal.

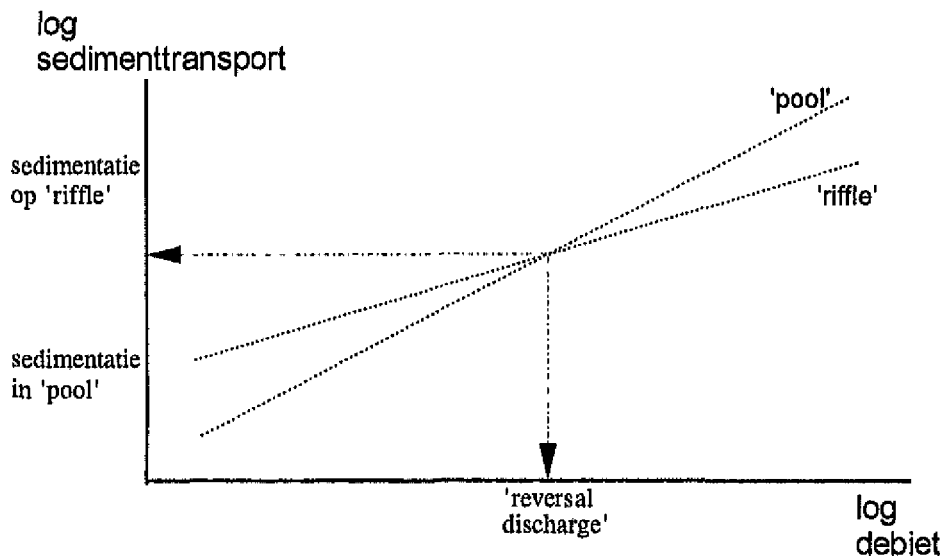
In de Westerschelde is ook een opeenvolging van 'riffles' en 'pools' waarneembaar, waarbij de 'riffles' overeen komen met de drempels en de 'pools' met de diepe bochten (zie ook Tank, 1995). Deze parallel moet met enige voorzichtigheid worden betracht omdat in de Westerschelde hoofdzakelijk zand voorkomt, en het dus geen grindrivier is. Wel komt de divergentie van de stroming over een 'riffle' overeen met die over een drempel. Wat tegen de vergelijking spreekt is dat het langsverhang van de waterspiegel boven een drempel in tegenstelling tot dat boven een 'riffle' (tijdens lage afvoeren) relatief gering is ten opzichte van het gemiddelde langsverhang. In de bochten is het langsverhang en de stroomsnelheid groter dan op de -verdiepte- drempels in de hoofdgeul. Dit blijkt uit berekeningen met het 2-D waterbewegingsmodel Scaldis100 van de Westerschelde van de waterstanden tijdens maximum stroom van zowel de eb als de vloed (zie Tank, 1995). Mogelijk kan dit verschil ontstaan doordat de drempelgebieden te ruim zijn voor de dominerende waterbeweging. Hierdoor treedt verlaging op van de snelheid van de langsstroming.

Desondanks blijft de grote overeenkomst tussen de 'riffle-pool'-eenheid en de drempel-bocht-eenheid in de Westerschelde bestaan en het is goed mogelijk dat -gedeeltelijk- dezelfde processen als in grindrivieren een rol spelen in de Westerschelde. De 'riffle-pool'-eenheid wordt namelijk beschouwd als een fundamentele eenheid waarin de morfologie, stromingspatronen, sedimentatie en geulveranderingen sterk aan elkaar gekoppeld zijn (Thompson, 1986). Vooral het patroon van secundaire stromingen dat ontstaat in 'riffle-pool'-eenheden vertoont mogelijk veel gelijkenis met dat in de Westerschelde (in paragraaf 3.2.2 wordt hier dieper op in gegaan).

De term 'riffle' veroorzaakt de nodige verwarring omdat deze door sommige auteurs (bijvoorbeeld: Winkley, 1984; Ashley, 1980) ook gebruikt wordt voor 'crossings' in zandrivieren. De 'crossings' in zandrivieren zijn weliswaar ondiep, maar er is boven deze ondiepten tijdens de meeste afvoeren geen sprake van een vergroot

langsverhang, en dus ook niet van versnelde stroming. Een uitzondering hierop zijn extreem lage afvoeren: dan kunnen in zandrivieren boven de ondiepe 'crossings' grote langsverhangen optreden en treedt er stroomversnelling op (mondelinge mededeling N. Struiksmā).

In een 'riffle-pool'-eenheid in een rivier is tijdens lage tot gemiddelde afvoeren sprake van transport van relatief fijn materiaal van de 'riffle' naar de stroomafwaarts gelegen 'pool'. Tijdens hoge afvoeren -circa 50 à 90 % van de 'bankfull discharge'- treedt in dit patroon een omslag op en wordt relatief grof materiaal van de 'pool' naar de stroomafwaarts gelegen 'riffle' getransporteerd (figuur 2.17). Deze omslag staat bekend als de 'reversal hypothesis' (Clifford en Richards, 1992). De oorzaak van de omslag is dat de grootte van de bodemschuifspanning bij toenemende afvoeren in de 'pool' gelijkert wordt aan die op de 'riffle' en op een gegeven moment voldoende wordt om grover materiaal uit de 'pool' te transporteren.



Figuur 2.17 Schematische weergave van de stroming-sediment interacties in een 'riffle/pool'-systeem, en de 'reversal hypothesis' (bron: Clifford en Richards, 1992)

Of deze omslag ook in de hoofdgeul van de Westerschelde optreedt is onwaarschijnlijk omdat, zoals al eerder vermeld, boven de verdiepte drempels tijdens een gehele getijfase de stroming vertraagt en er aanvoer van sediment uit de diepe bochten naar de drempels plaatsvindt. Mogelijk kan wel de aanvoer van sediment uit een bocht naar een drempel tijdens een springtij/doodtij-cyclus verschillen: de vertraging van de hoofdstroming op een drempel is tijdens doodtij geringer dan tijdens een springtij en treedt er dus meer sedimentatie op tijdens een springtij.

2.4 Samenvatting

- de grootschalige morfologische eenheden in de Westerschelde vertonen sterke overeenkomsten met elementen die bekend zijn uit de riviermorfologie.
- de hoofdgeul vertoont een meanderend patroon en lijkt daarmee veel op laagland rivieren met eveneens zandig

sediment; een verschil met meanderende laagland rivieren is dat de overgang tussen twee bochten in de Westerschelde relatief lang en recht is. Dit kan verklaard worden doordat de stroomdraden van de eb- en de vloedstroming niet op dezelfde plaats de geul kruisen. Dit is het gevolg van de ruimtelijke scheiding tussen beide stroomdraden van eb en vloed. Daarnaast zijn de meanderbochten in de Westerschelde minder scherp dan in rivieren.

- van de hoofdgeulen takken eb- en vloedscharen, nevengeulen, af. Deze vertonen een verwilderd (vlechtend) karakter en hebben in tegenstelling tot de -hoofdzakelijk- ebgedomineerde hoofdgeul een relatief hoge breedte/diepte-ratio ($B/h > 100$).
- de platen en drempels in de Westerschelde komen -deels- overeen met banken ('bars') in rivieren; de platen in de binnenbochten met 'point bars' en met 'middle bars'; ook zijn delen van platen als 'alternate bars' te beschouwen; drempels vertonen veel overeenkomst met 'crossings' en -op een kleinere schaal- ook met 'middle bars'; de opeenvolging van -diepe- elementaire geulen en -ondiepe- drempels lijkt veel op de opeenvolging van 'pools' en 'riffles' in grindrivieren.
- de platen en drempels in de Westerschelde hebben evenals de banken in rivieren de functie om sediment te bergen of te leveren en bieden tevens weerstand voor de stroming, hetgeen ten goede komt aan de stabiliteit van de geulen.

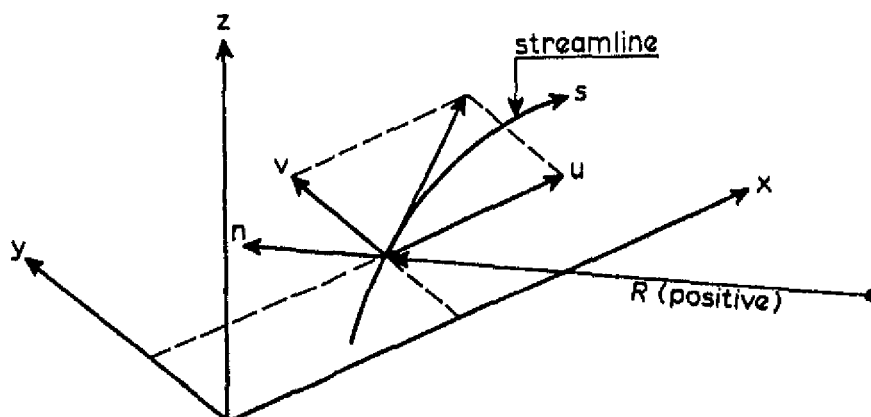
3 Processen

3.1 Inleiding

In deze paragraaf worden de processen die optreden in meanderende rivieren en waarschijnlijk ook in estuaria beschreven. Daarbij komen de waterbeweging, het sedimenttransport en de morfologie aan de orde. Tevens wordt een inschatting gemaakt in hoeverre en hoe deze fenomenen uit de rivierkunde opgaan voor de hoofdgeul in de Westerschelde.

3.2 Waterbeweging in een meanderende rivier

De stroming in rivier bestaat uit primaire -in de langsrichting (s)- en secundaire componenten -in de dwarsrichting (n) van de geul- (figuur 3.1). Zowel de primaire hoofdstroming (u) als de secundaire stroming (v) kunnen weer ontleed worden in horizontale en verticale componenten. De secundaire stroming is het gevolg van topografische verstoringen, zoals een bocht. De secundaire stromingen zijn met name sterk ontwikkeld in bochten maar spelen ook een rol in de rechte stukken van de rivier, o.a. door naijlingseffecten.



Figuur 3.1 Definitie schets van coördinaten systeem van de stroomlijnen (s = langsrichting; n = dwarsrichting; u = diepte gemiddelde snelheid hoofdstroming; v = diepte gemiddelde snelheid van de stroming in dwarsrichting; R = bochtstraal)

3.2.1 Hoofdstroming

De momentum-vergelijking van de diepte gemiddelde hoofdstroming kan bij stationaire stroming als volgt geschreven worden (De Vriend en Struikma, 1983):

$$\alpha_1 \bar{u} \frac{d\bar{u}}{ds} + \alpha_2 \bar{u} \left(\frac{\delta i_s}{\delta n} + \frac{i_s}{R_s} \right) = - \frac{1}{\rho} \frac{d\bar{p}}{ds} - \frac{g}{C^2} \frac{\bar{u}^2}{h} \quad (2)$$

(1) (2) (3) (4)

waarin:

α_1	=	constante die afhangt van de vorm van het profiel van de hoofdstroming (-)
α_2	=	constante die afhangt van de vorm van het profiel van de secundaire stroming (-)
u	=	diepte gemiddelde hoofdstroming (m/s)
i_s	=	intensiteit van de secundaire stroming (m/s)
R_s	=	kromtestraal van de stroomlijnen (m)
p	=	diepte gemiddelde totale druk (N/m ²)
h	=	waterdiepte (m)
g	=	versnelling van de zwaartekracht (m/s ²)
C	=	Chézy-factor (m ^{1/2} /s)
ρ	=	dichtheid van water (kg/m ³)
s	=	afstand langs stroomdraad (m)
n	=	afstand dwars op stroomdraad (m)

De eerste term (1) in vergelijking 2 geeft de inertia van de hoofdstroming aan. De tweede term (2) drukt de invloed van de secundaire stroming op de hoofdstroming uit. De aandrijvende kracht van de hoofdstroming wordt bepaald door het drukverschil in ten gevolge van het langsverhang in term (3). In de laatste term (4) wordt de remmende kracht op de hoofdstroming, de wrijving, weergegeven.

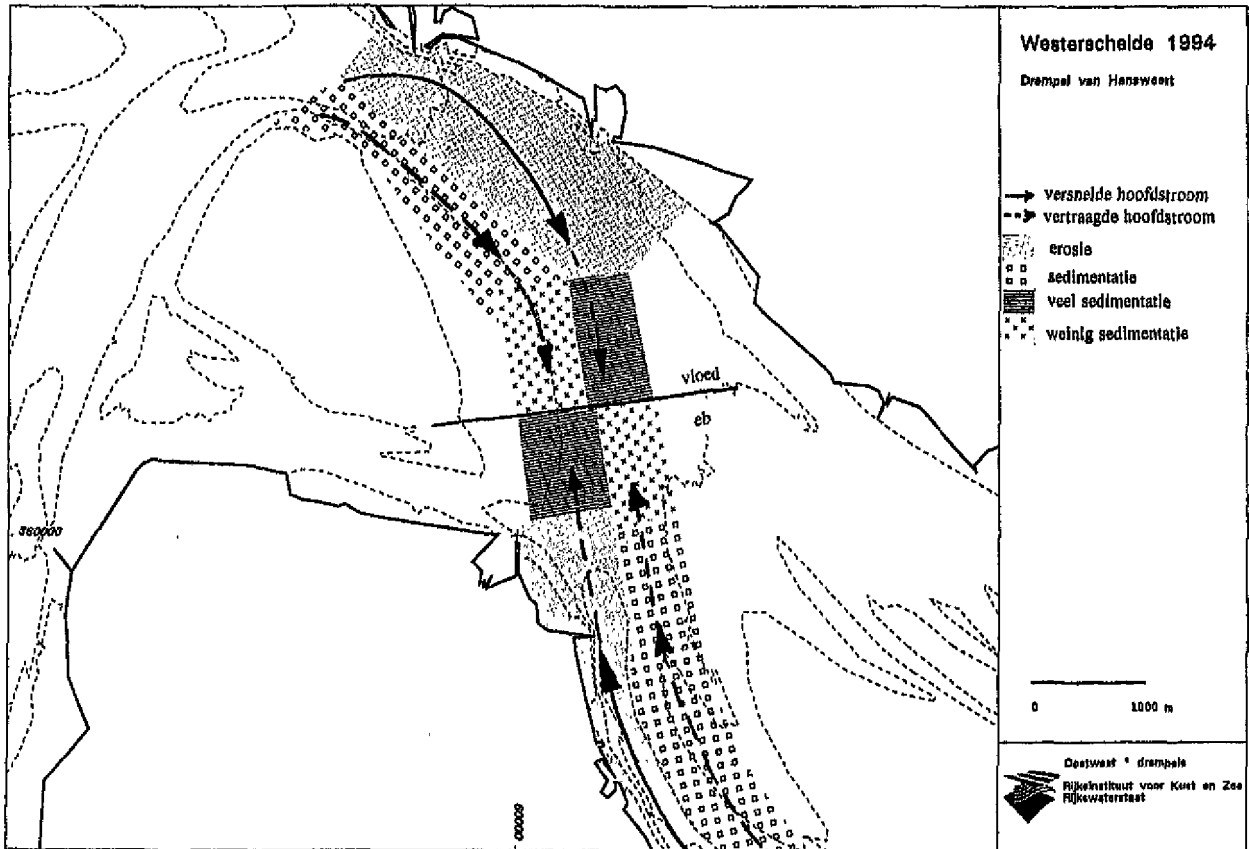
Gebaseerd op -een hier verder niet uitgevoerde- analyse van vergelijking 2 is volgens De Vriend en Struiksma (1983) het verloop van de hoofdstroming in een rivier op de overgang van een rechte geul naar een bocht, in de bocht en vervolgens op de overgang van bocht naar een rechte geul als volgt:

- 1 als de stroming de bocht nadert, merkt de stroming de benedenstroomse invloed van het verhang ('pressure head'), en de kromming van de stroomlijnen neemt gradueel toe; in het geval van een abrupte overgang van een recht stuk naar een bocht met een constante kromming, is de grootte van de overgangszone waarover de bochtstralen zich aanpassen ongeveer gelijk aan de breedte van de geul (B);
- 2 als de stroming de bocht in gaat, komt de kromming van de stroomlijnen overeen met het dwars- en langsverhang; dit leidt tot een versnelling van de stroming in de binnenbocht (potentieel stromings-effect) (figuur 3.2);
- 3 net voorbij het begin van de bocht past de hoofdstroming zich geleidelijk aan aan de niet-uniforme diepteverdeling; dit heeft een naar de buitenbocht gerichte verschuiving van de hoofdstroming tot gevolg (figuur 3.2); de bijbehorende aanpassingslengte van de hoofdstroming kan berekend worden met:

$$\lambda_1 = \alpha_1 \left(\frac{C^2}{2g} \right) h \quad (3)$$

waarin:

λ_1 = aanpassingslengte van de hoofdstroom (m)



Figuur 3.2 Zones met versnellende en vertragende hoofdstroming in de binnen- en buitenbocht en zones met erosie- en sedimentatie tijdens eb- en vloed op respectievelijk het zuidelijk en het noordelijk deel van de Drempel van Hansweert

Deze vergelijking is afgeleid van term (4) uit vergelijking 2.

Bij aanname dat $\alpha_1 \approx 1$, geeft vergelijking 3 een aanpassingslengte van 250 m bij een kleine geul met een diepte van 2 m en een lengte van 2500 m bij een grote geul met een diepte van 20 m (Allersma, 1994). Dit zijn waarden die ook in de Westerschelde voorkomen.

- 4 de naar buiten gerichte verschuiving van de hoofdstroming wordt versterkt door het convectie-effect van de verticale component van de secundaire stroming; omdat de lengteschaal van het ontwikkelen en afsterven van de intensiteit van de secundaire stroming (i_s) meestal kleiner is dan λ_1 , kan deze component van de verschuiving ook gekarakteriseerd worden door de aanpassingslengte λ_1 ;
- 5 als de bocht lang genoeg is, wordt ook het convectie-effect van de horizontale secundaire stroming merkbaar

door een afname van de snelheid van de diepte gemiddelde hoofdstroming. Dit effect verloopt geleidelijk van de binnen- naar de buitenbocht; de aanpassingslengte van dit proces kan als volgt worden berekend:

$$\lambda_2 = \frac{\alpha_1 \bar{u}}{\alpha_2 i_s} B \quad (4)$$

waarin:

- λ_2 = aanpassingslengte van stromingskenmerken om dwars over de geul te steken (m)
- α_2 = constante die afhangt van de vorm van het stromingsprofiel van de secundaire stroming (-)
- i_s = maat voor de intensiteit van de secundaire stroming (m/s)
- B = geulbreedte (m)

Vergelijking 4 is afgeleid uit de eerste twee termen van vergelijking 2.

De aanpassingslengte heeft een orde van grootte van BR_s/h , en die is meestal zeer groot (R_s = kromtestraal van de stroomlijnen) en zou voor een estuarium als de Westerschelde in de orde van grootte liggen van vele kilometers.

- 6 nabij het einde van de bocht neemt de kromming van de stroomlijnen geleidelijk af (de omvang van de overgangszone ligt in de orde van grootte van de geulbreedte (B));
- 7 de invloed van de variatie van de drukgradiënt in dwarsrichting wekt drukgradiënten in de langsrichting op die de stroming in de binnenbocht vertraagt en in de buitenbocht versnelt (effect potentiële stroming); dit veroorzaakt een versterkte buitenwaartse verschuiving van de dwarsverdeling van de hoofdstroming nabij het einde van de bocht;
- 8 voorbij de bocht vindt een geleidelijke aanpassing plaats van de stroming aan de beddingtopografie, met als aanpassingslengte λ_1

Het is aannemelijk dat een soortgelijk stroombeeld als hierboven is geschetst, zeker tijdens maximum stroom, ook in bochten in de Westerschelde optreedt. De verschuiving van de stroomdraad halverwege de bocht van de binnen- naar de buitenbocht, zoals in de punten 2 en 3 is opgetekend, leidt tot een versnelling van de hoofdstroming in de buitenbocht en vertraging van de hoofdstroming in de binnenbocht in de tweede helft van de bocht. Dit heeft implicaties voor de bodem. De versnelling van de hoofdstroming heeft waarschijnlijk erosie in de buitenbocht (van de tweede helft van de bocht) tot gevolg. Voorwaarde is dat de geul te krap is. Door de vertraagde stroom in de binnenbocht (in de tweede helft van de bocht) treedt, mits de geul te ruim is, sedimentatie op in de tweede helft van de binnenbocht. Dit sediment is afkomstig van erosie door de hoofdstroom van de binnenbocht in de eerste helft van de bocht. In de bochten rondom de Drempel van Hansweert leidt dat waarschijnlijk tot zones met sedimentatie in de binnenbochten vlak bij de drempel als aangegeven in figuur 3.2. Als de stroming van de bocht overgaat naar de drempel bevat het water uit buitenbocht relatief veel sediment en in de binnenbocht relatief weinig sediment door sedimentatie in de binnenbocht. Op de -verruimde- drempel vertraagt de hoofdstroming en in zones van de drempel die aan de buitenbocht grenzen vindt relatief veel sedimentatie plaats. In de zones aan de stroomopwaartse zijde van de drempel vindt relatief weinig sedimentatie

plaats. In figuur 3.2 is dit geïllustreerd.

Als de stroming uit de bocht komt treedt er volgens punt 8 divergentie op van de hoofdstroming. Hierdoor vertraagt de hoofdstroming. Deze vertraging wordt versterkt doordat in de hoofdgeul van de Westerschelde de drempel verdiept zijn.

De aanpassingslengte van de hoofdstroming in de hoofdgeul van de Westerschelde is circa 2500 m. Gerekend vanaf het begin van de stroomopwaarts van de drempel gelegen bocht zou de verstoring van de hoofdstroming tijdens eb en vloed op bijvoorbeeld de Drempel van Hansweert goeddeels zijn uitgedempt.

3.2.2 Secundaire stroming

De fenomenen van de stroming in een bocht, zeker in een bocht met een relatief grote bochtstraal, verschillen fundamenteel weinig van die in een min of meer rechte geul (Struiksma en Crosato, 1989).

De momentumvergelijking van volledig tot ontwikkeling gekomen secundaire stroming in een geul is volgens De Vriend en Struiksma (1983):

$$-\frac{U^2}{R_s} = -\frac{1}{\rho} \frac{\delta p_z}{\delta n} + \frac{\delta}{\delta z} \left(v_t \frac{\delta v_s}{\delta z} \right) \quad (5)$$

(1) (2) (3)

waarin:

U = hoofdstroomsnelheid (m/s)

p_z = diepte afhankelijke druk (N/m²)

v_t = kinematische turbulente viscositeit (m²/s)

v_s = horizontale component van de secundaire stroming (m/s)

z = verticale afstand van af de bodem (m)

De eerste term (1) in vergelijking 5 drukt de invloed op de secundaire stroming van de kromming van de stroomlijnen van de hoofdstroming uit. De tweede term (2) geeft de drijvende kracht op de secundaire stroming door het dwarsverhang weer. De derde term (3) beschrijft de invloed van de turbulentie op de snelheidsverdeling van de verticaal.

Een karakteristiek element van de secundaire stroming dat uit vergelijking 5, zonder dat dit hier wordt aangetoond, kan worden afgeleid is de aanpassingslengte van de secundaire stroming (λ_s). De aanpassingslengte (λ_s) is de lengte waarover de secundaire stroming in rivieren volledig aangepast is aan de veranderende stromingsomstandigheden die door een bocht worden veroorzaakt. De aanpassingslengte van de secundaire stroming in rivieren kan als volgt berekend worden:

$$\lambda_3 = \beta \frac{C}{\sqrt{g}} h \quad (6)$$

waarin:

λ_3 = aanpassingslengte van de secundaire stroming (m)

β = vaste coëfficiënt, ongeveer 0.6 (-) (volgens: Booij en Kalkwijk, 1986 in: Struik-
sma en Crosato, 1989)

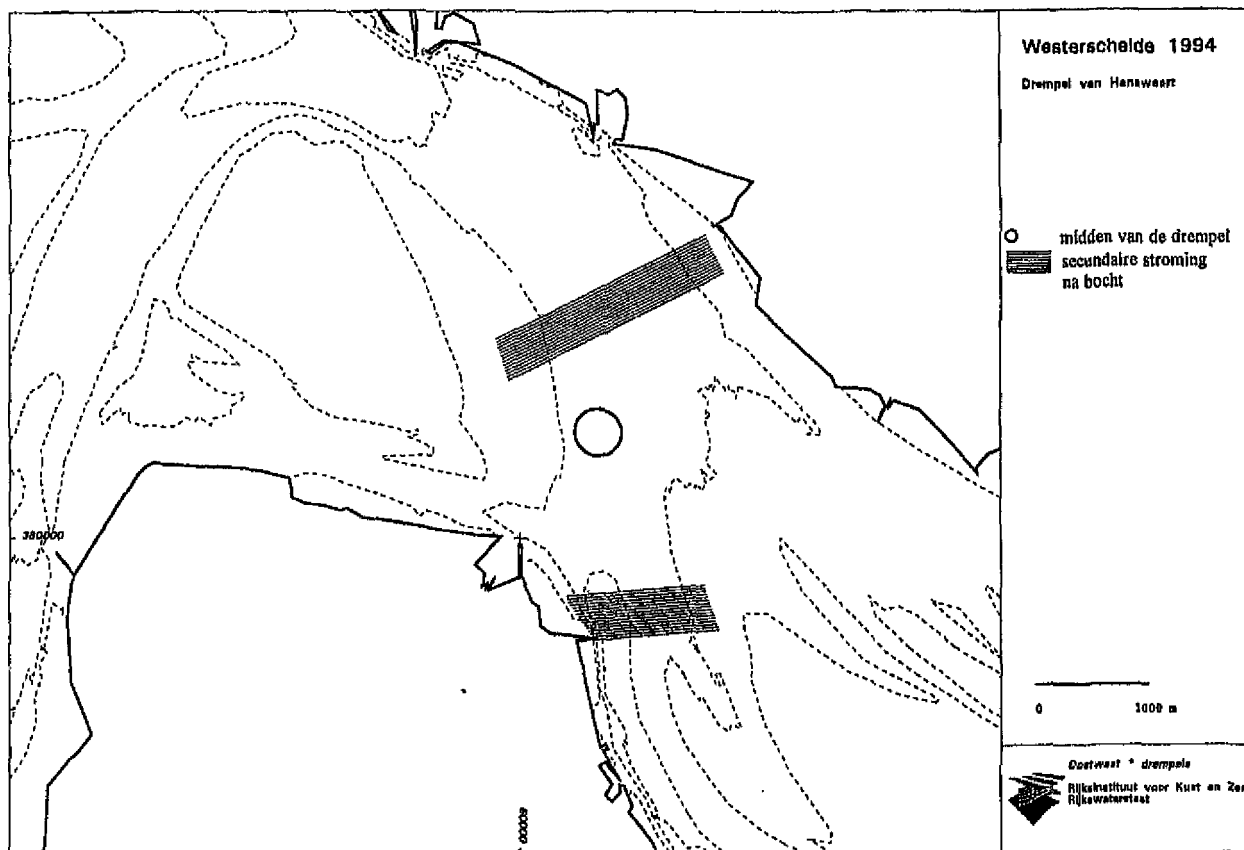
De aanpassingslengte van de secundaire stroming (λ_3) in een rivier levert toegepast voor de situatie in de Westerschelde ($C = 60 \text{ m}^2/\text{s}$; $h = 20 \text{ m}$) een waarde van ruim 200 m op. Dit is onder gelijke condities overigens bijna de helft kleiner dan de aanpassingslengte voor secundaire stroming in estuaria volgens Booij en Kalkwijk (1986; zie ook: Tank, 1995). Over het algemeen geldt dat in rivieren de aanpassingslengte van de secundaire stroming (λ_3) in de orde van grootte van de breedte van de geul ligt (De Vriend en Struik-
sma, 1983). Als deze vuistregel ook opgaat voor de Westerschelde dan zou de aanpassingslengte van de secundaire stroming een orde van grootte hebben van circa 1000 m. Dit wijkt sterk af van de aanpassingslengte van Booij en Kalkwijk (1986).

In de bochten rondom de Drempel van Hansweert is de aanpassingslengte van de secundaire stroming zo groot dat te verwachten is dat de secundaire stroming pas halverwege een bocht volledig tot ontwikkeling is gekomen. Aan het einde van de bocht als het water de Drempel van Hansweert opstroomt past de secundaire stroming zich aan de nieuwe situatie aan. De afstand van het einde van de bocht tot het midden van de Drempel van Hansweert circa 1500 m (figuur 3.3). Dit geldt zowel voor de ebstroom uit het Zuidergat als de vloedstroom uit de bocht bij Hansweert. Hierop gebaseerd zou volgens de aanpassingslengte in estuaria van Booij en Kalkwijk (1986) de secundaire stroming op het midden van de drempel volledig zijn verdwenen. Alleen aan het begin van de stroomopwaartse zijde van de drempel is de secundaire stroming in een zone van enkele honderden meters nog aanwezig (figuur 3.3). Ook volgens de vuistregel in rivieren, die stelt dat de lengte van de aanpassing van de secundaire stroming ongeveer gelijk aan de geulbreedte is, geldt dat op het midden van de Drempel van Hansweert de secundaire stroming volledig is verdwenen. De zone op de stroomopwaartse zijde van de drempel na een bocht waar de secundaire stroming nog niet volledig is uitgedempt zou langer zijn dan volgens de vergelijking van Booij en Kalkwijk (1986). De lengte van deze zone is circa 1000 m.

Overigens geldt dat in de overgangszone, als de secundaire stroming niet volledig ontwikkeld is, de aanpassing significant langzamer is dan in het geval van een volledig ontwikkelde secundaire stroming (De Vriend en Struik-
sma, 1983). In de Westerschelde zijn de dimensies van de geulen zodanig dat, zoals al eerder is opgemerkt, de secundaire stroming in een bocht volledig tot ontwikkeling komt.

Secundaire stroming in estuaria: effect Coriolis-versnelling

Wat betreft de opwekking van de secundaire stroming is er een verschil tussen -ondiepe- rivieren en estuaria: van wege de veel grotere dimensies kan in estuaria de invloed van de Coriolisversnelling niet altijd verwaarloosd worden (Booij en Kalkwijk, 1982) en in -ondiepe- rivieren wel. In estuaria wordt de secundaire stroming beïnvloed door de centrifugaalkrachten en de Coriolisversnelling (zie ook: Tank, 1995). De invloed van de centrifugaalkrachten en de Coriolisversnelling op de secundaire stroming is vaak van dezelfde orde van grootte en ze beïnvloeden de stroming onafhankelijk van elkaar (Booij en Kalkwijk, 1982). De Coriolisversnelling levert

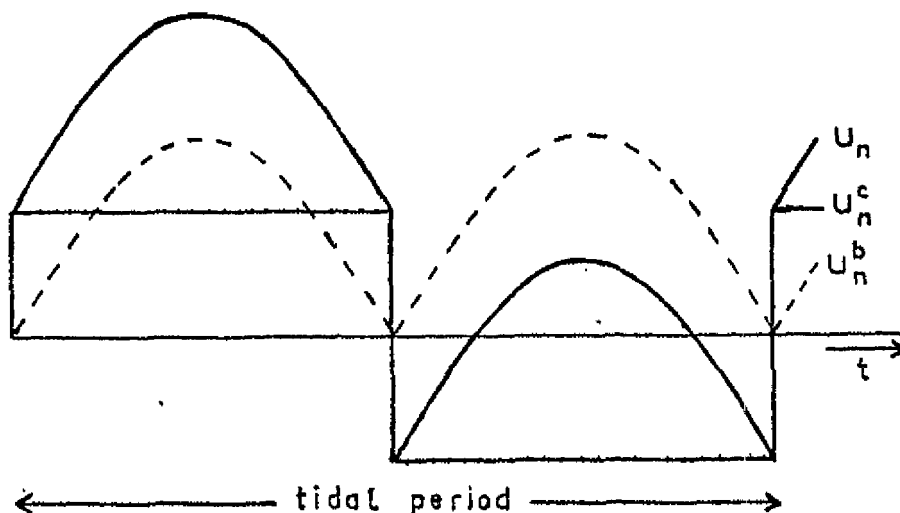


Figuur 3.3 Zones waarin de secundaire stroming uitdempt na het einde van de bocht in het Zuidergat -bij eb- en de bocht bij Hansweert -bij vloed- en het midden van de drempel

een kracht die afhankelijk is van de snelheid van de hoofdstroming en die wisselt met de richting van de stroming (eb en vloed). De centrifugaalkrachten zijn richting onafhankelijk; ze zijn afhankelijk van de grootte van de snelheid van de hoofdstroming en van de bochtstraal. De gevolgen voor de snelheid van de secundaire stroming van het samenspel van de centrifugaalkrachten en de Coriolisversnelling gedurende een getij worden geïllustreerd in figuur 3.4. In deze figuur is te zien dat gedurende het eerste deel van een getij de Coriolis-versnelling de centrifugaal krachten versterken. In de tweede helft van het getij werkt de Coriolis-versnelling in tegengestelde-richting dan de centrifugaalkrachten, die beide overigens even groot zijn als in de eerste getijfase. Dit heeft vergeleken bij de eerste getijfase een relatief lage snelheden van de secundaire stroming tot gevolg.

Fenomenen van de secundaire stroming

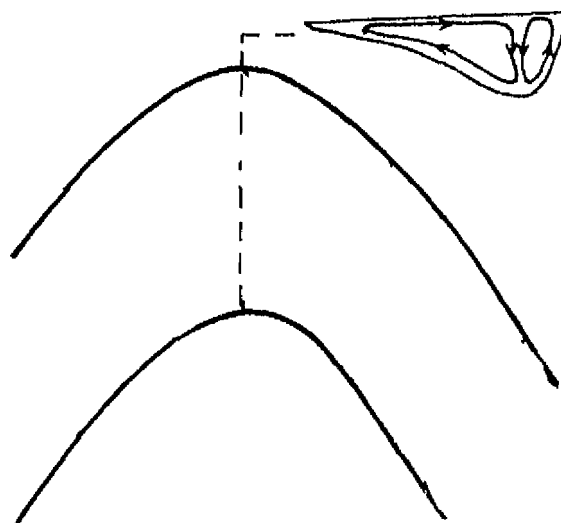
Uit metingen in stroomgoten en in rivieren is gebleken dat in bochten naast een hoofdcel met secundaire stroming in de buitenbocht vaak een kleinere cel met secundaire stroming voorkomt (Bathurst et al., 1977). Deze kleine cel heeft een circulatiepatroon tegengesteld aan dat van de hoofdcel en wordt de buitenbocht-cel genoemd (figuur 3.5). Deze buitenbocht-cel ontstaat in geulen met steile oevers en een lage breedte/diepte-ratio (Bathurst et al., 1979), zoals die ook in de Westerschelde voorkomen. De horizontale uitbreiding van de buitenbocht-cel dwars op de geul vanaf de oever is circa twee maal de waterdiepte (Bathurst et al., 1979).



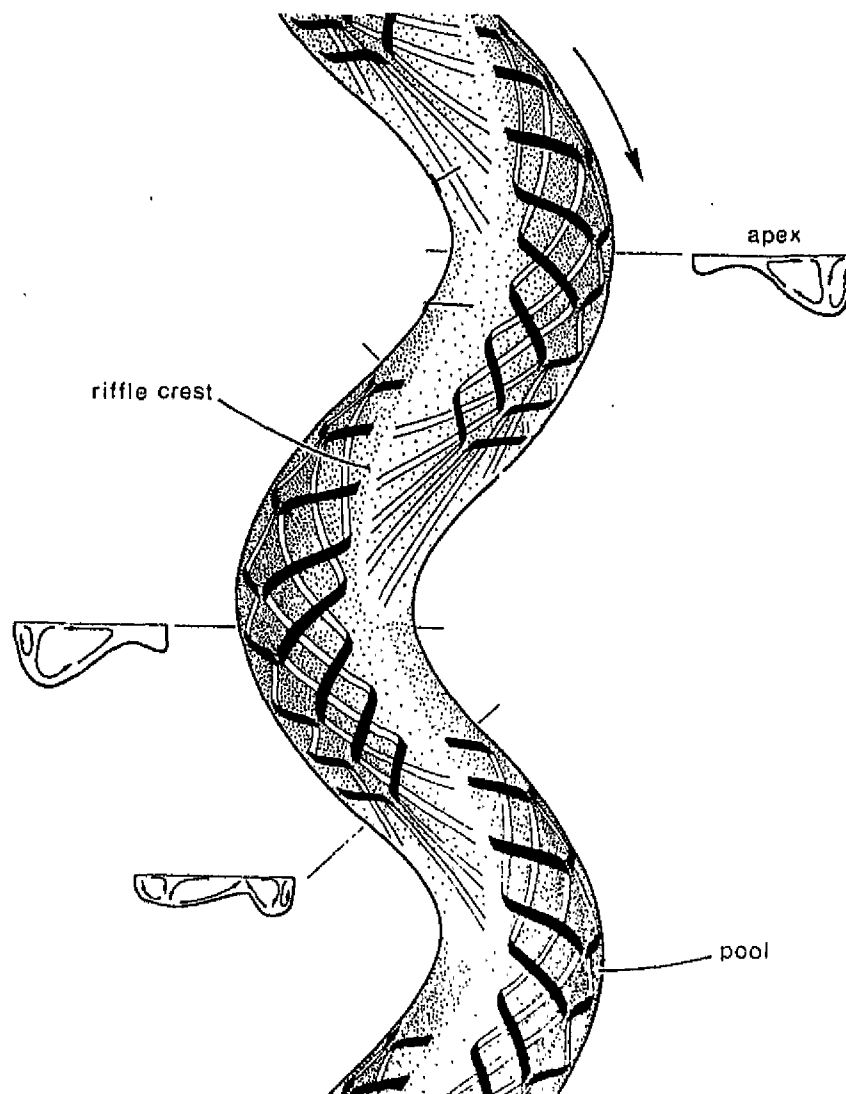
Figuur 3.4 Het verloop gedurende een getij van de secundaire stroming (U_s) en de snelheid door de componenten centrifugaalkrachten (U^b) en Coriolisversnelling (U^c) (bron: Booij en Kalkwijk, 1982)

De buitenbocht-cel ontstaat door wrijving met de oever (Rozovskii, 1961 in: Bathurst et al., 1979). Tijdens lage afvoeren is de buitenbocht-cel niet tot nauwelijks ontwikkeld.

Het voorkomen van een hoofdcel en de buitenbocht-cel met secundaire stroming heeft gevolgen voor de verdeling van de bodemschuifspanning en daarmee het zandtransport en de ontwikkeling van de morfologie van rivieren. De combinatie van beide cellen heeft namelijk 'downwelling' en daarmee extra bodemschuifspanning die weer erosie tot gevolg heeft (Bathurst et al., 1979). De grootte van de bodemschuifspanning hangt in eerste instantie af van de sterkte van de buitenbocht-cel.



Figuur 3.5 Hoofdcel- en buitenbochtcel met secundaire stroming in een rivierbocht (bron: Knighton, 1984)



Figuur 3.6 Model van het stromingspatroon dat optreedt in een meanderende rivier met 'riffle-pool'-eenheden (bron: Thompson, 1986)

In figuur 3.6 is een model van Thompson (1986) weergegeven met het stromingspatroon gebaseerd op bovengenoemde inzichten van Bathurst et al. (1977 en 1979). Het model treedt op in een meanderende rivier met 'pools' en 'riffles'. In de 'pools' ontwikkelt een grote cel met secundaire stroming en een kleine tegengesteld draaiende buitenbochtcel. Ten gevolge van beide tegengesteld draaiende cellen vindt er convergentie aan het wateroppervlak plaats van de stroming. Beide cellen dempen stroomafwaarts uit en over de 'riffle' treedt er divergentie van de stroomlijnen op. Stroomafwaarts van deze 'riffle' vormt zich er in de volgende 'pool' weer een dominante cel met secundaire stroming met een rotatie in tegengestelde richting. Hierdoor kunnen ter hoogte van de 'riffle' in een dwarssectie 4 cellen met secundaire stroming optreden. Het stromingspatroon in de figuur 3.6 hangt duidelijk samen met de morfologie -de 'riffle-pool'-eenheid: het stromingspatroon wordt opgewekt door de morfologie en is er tevens ook de oorzaak ervan.

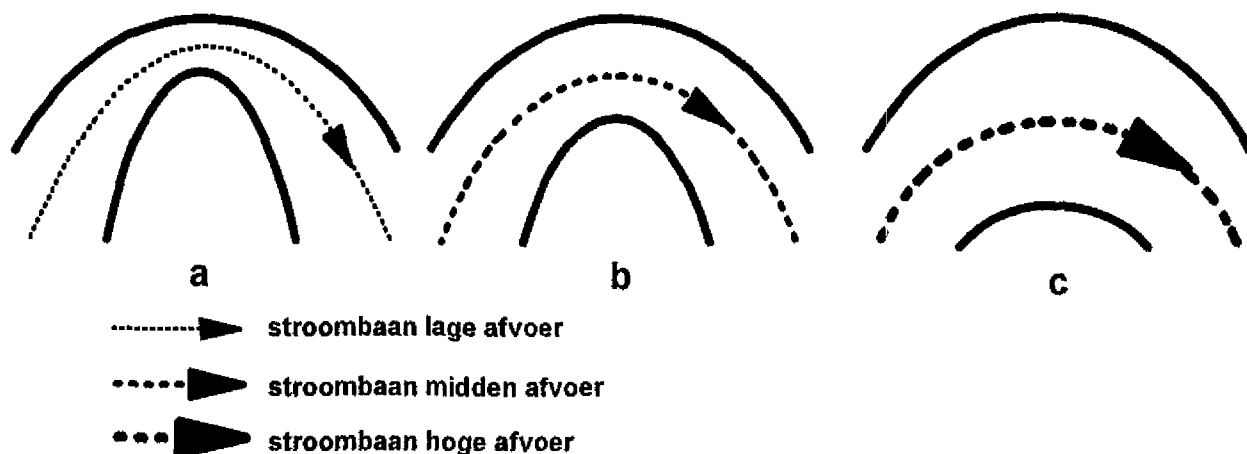
De invloed van de secundaire stroming op de hoofdstroming in rivieren varieert met de grootte van de debieten (Bathurst et al., 1979). De combinatie van de secundaire stroming en de hoofdstroming bepaalt de grootte en

richting van de bodemschuifspanning en dus de grootte en richting van het sedimenttransport. De grootte van de secundaire stroming is evenredig met de snelheid van de hoofdstroming en omgekeerd evenredig met de kromming van de hoofdstroming.

Tijdens lage afvoeren, als de 'point bar' droog ligt is de secundaire stroming niet sterk ontwikkeld en is de invloed ervan op de hoofdstroming gering. De stroming is weliswaar sterk gekromd, maar is door de geringe stroomsnelheid van de hoofdstroming blijft de secundaire stroming klein (figuur 3.7a).

Tijdens gemiddelde afvoeren is de stroming iets minder gekromd (de 'point bar' valt gedeeltelijk droog), maar door de hoge stroomsnelheden is de secundaire stroming goed ontwikkeld en de invloed ervan op de hoofdstroming is dan ook relatief groot (figuur 3.7b).

Tijdens hoge afvoeren is de invloed van de secundaire stroming gering. De hoofdstroming is relatief weinig gekromd (het water stroomt gedeeltelijk over de 'point bar') waardoor, ondanks hoge stroomsnelheden die gunstig zijn voor de sterkte van de secundaire stroming, de secundaire stroming een geringe invloed heeft op de hoofdstroming (figuur 3.7c).



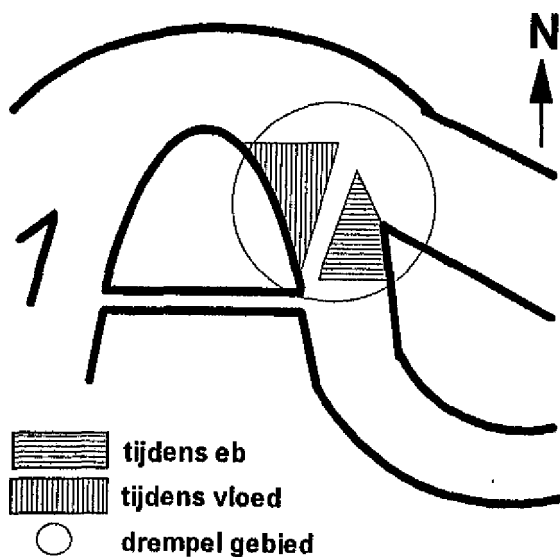
Figuur 3.7 Kromming van de stroomdraad in een bocht bij lage, midden en hoge afvoeren

Deze inzichten uit de rivierkunde van Thompson (1986) en Bathurst et al. (1979) gelden waarschijnlijk ook deels voor de stroming in de hoofdgeul van de Westerschelde. De Westerschelde is er een opeenvolging in de meanderende hoofdgeul van diepe bochten ('pools') en ondiepe rechte stukken tussen bochten ('riffles'). Te verwachten is dat in de Westerschelde ook een stroombeeld aanwezig zoals in figuur 3.6 geschetst is. Evenals in het stromingsmodel van Thompson (1986) is, zoals al eerder aangegeven is, op de Drempel van Hansweert de secundaire stroming volledig uitgedempt. Of er in een dwarssectie ter hoogte van de Drempel van Hansweert vier cellen met secundaire stroming optreden is dan ook twijfelachtig. Zoals al eerder opgemerkt ontstaan er op de stroomafwaartse zijde van de drempel geen cellen met secundaire stroming. Deze cellen met secundaire stroming ontwikkelen zich pas in de stroomafwaarts van de drempel gelegen bocht.

In de hoofdgeul van Westerschelde is het stroombeeld uit figuur 3.6 maar van korte duur en waarschijnlijk ongeveer een half uur per getijfase volledig ontwikkeld. Gedurende lange perioden in een getijfase is de stroming namelijk gering en is de hoofdcel met secundaire stroming nauwelijks tot ontwikkeling gekomen. Ook de buitenbocht-cel is pas volledig tot ontwikkeling gekomen als de stroomsnelheden van de hoofdstroming hoog zijn

en de wrijving met de oever van de buitenbocht maximaal is. Daarnaast wordt in de Westerschelde het stroombeeld tijdens hoog water verstoord door water dat kortsluit over de platen. Volgens Bathurst et al. (1979) is dan de secundaire stroming relatief klein en in verhouding met de hoofdstroming gering. Overigens kan door water dat kortsluit over de platen tijdens hoogwater in de binnenbocht een derde cel met secundaire stroming ontstaan (Peters en Sterling, 1976; zie ook: Tank, 1995). Deze derde cel met secundaire stroming is alleen van belang tijdens het laatste deel van de vloed omdat dan de twee andere cellen ook goed ontwikkeld zijn. Tijdens het eerste deel van de eb fase kan, als er nog water over de platen kortsluit, deze cel nog wel ontstaan. Deze cel die ontstaat door water dat over de platen stroomt is dan de enige cel omdat de hoofdcel en de buitenbocht-cel niet tot ontwikkeling zijn gekomen door de geringe hoofdstroomsnelheid.

Hierop gebaseerd is er in de hoofdgeul van de Westerschelde een soortgelijk stroombeeld, zoals door Thompson (1986) in figuur 3.6 is geschetst, tijdens vloed aanwezig bij waterstanden ruim onder hoogwater. Dan namelijk lopen de platen nog niet onder. Omdat de platen tijdens vloed onderlopen ten tijde van maximum stroom, dat in de Westerschelde bij waterstanden van circa NAP 2 m (Jeuken, 1992) optreedt, is het stroombeeld uit figuur 3.6 in de Westerschelde vóór maximum stroom volledig ontwikkeld. De secundaire stroming is volledig ontwikkeld omdat de verhouding tussen stroomsnelheid en kromming van de hoofdstroom gunstig is. Tijdens eb treedt het stroombeeld van Thompson (1986) op ten tijde van maximum stroom. Dit treedt op bij waterstanden rond NAP 0 m (Jeuken, 1992). Bij deze waterstanden stroomt geen water over de platen en er ontstaat ook geen derde cel met secundaire stroming. Tijdens deze periode in de eb fase is de secundaire stroming in de hoofdcel volledig ontwikkeld omdat de verhouding tussen stroomsnelheid en kromming van de stroombanen van de hoofdstroming gunstig is.



Figuur 3.8 Richting van de sedimentflux door de secundaire stroming tijdens eb en vloed op de Drempel van Hansweert

Het patroon van cellen met secundaire stroming is, zoals hierboven reeds is aangegeven, op een drempel in de hoofdgeul van de Westerschelde niet aanwezig en heeft daar geen invloed op de morfologie. De secundaire stroming is wel aanwezig op de overgang tussen bocht en drempel en heeft daar invloed op de richting en grootte het sedimenttransport naar de drempel. De hoofdcel is het meest ontwikkeld en heeft een transport in de richting

de binnenbocht tot gevolg. Voor de Drempel van Hansweert geldt dat tijdens vloed dan een dwarscomponent van het sedimenttransport naar het noordwestelijke deel van de Drempel van Hansweert optreedt. Tijdens eb is er een dwarscomponent van het sediment naar het zuidoostelijke deel van de drempel (figuur 3.8). Deze dwarscomponenten van het sedimenttransport op de overgang van bocht naar drempel zijn overigens gering vergeleken met de langscomponent van het sedimenttransport.

Het aantal cellen is van invloed op de grootte van de bodemschuifspanning en dus op de grootte van het sedimenttransport omdat op de plaatsen waar twee cellen samen komen een extra bodemschuifspanning optreedt. In de buitenbocht veroorzaken de hoofdcel en de buitenbocht-cel deze extra bodemschuifspanning en versterken daarmee de erosie van de hoofdstroming in de buitenbocht (in het tweede deel van de bocht).

3.3 Bodemschuifspanning

Het samenspel van de hoofdstroming en de secundaire stroming in een rivierbocht heeft een schuifspanning aan de bodem tot gevolg. Deze schuifspanning kan ontleed worden in twee componenten:

1. een langscomponent evenwijdig aan de hoofdstroming (s-richting)
2. een dwarscomponent ten gevolge van de secundaire stroming die loodrecht op de hoofdstroming staat (n-richting; figuur 3.1).

De langscomponent van de bodemschuifspanning in een rivier is:

$$\tau_{bs} = \rho g \frac{\bar{u}^2}{C^2} \quad (7)$$

waarin:

τ_{bs} = component van de bodemschuifspanning in langsrichting (s) (N/m²)

Uit vergelijking 7 blijkt dat τ_{bs} afhangt van de verhouding tussen de snelheid van de langsstroming (u) en de weerstand (C), die weer een functie is van o.a. de diepte.

Voor de lokale component van de bodemschuifspanning in dwarsrichting in een rivierbocht geldt als uitgegaan wordt van volledig ontwikkelde gekromde stroming (De Vriend en Struiksma, 1983):

$$\tau_{bn} = -\alpha_2 \frac{h^2 \bar{u}^2}{R_g} \quad (8)$$

waarin:

τ_{bn} = component van de bodemschuifspanning in dwarsrichting (n) (N/m²)

α_2 = coëfficiënt die afhangt van de vorm van het profiel van de secundaire stroming (-)

Uit vergelijking 8 blijkt dat de lokale τ_{bn} behalve van de diepte gemiddelde stroming (u bar) en waterdiepte (h) ook afhangt van de bochtstraal, zij het dat deze factor minder zwaar weegt dan u (bar) en h . Er geldt dus: hoe scherper de bocht, hoe kleiner de bochtstraal, hoe groter de bodemschuifspanning in dwarsrichting. In het midden van de bocht is de dwarscomponent ongeveer even groot als de langscomponent van de bodemschuifspanning (Talmon et al., 1995).

In rivieren, en ook in de Westerschelde, is in een bocht de dwarscomponent van de bodemschuifspanning maximaal ontwikkeld op de plaats waar de bochtstraal het kleinst is. Stroomafwaarts van dit punt neemt de bochtstraal toe en daardoor neemt de dwarscomponent van de bodemschuifspanning af. Op de relatief rechte stukken van de geul tussen twee bochten, op de plaats waar bijvoorbeeld in de Westerschelde de Drempel van Hansweert voorkomt, is de bochtstraal oneindig groot en de dwarscomponent van de bodemschuifspanning te verwaarlozen. Van de bochtapex naar de drempel treedt er dus een geleidelijke afname van de dwarscomponent van de bodemschuifspanning op.

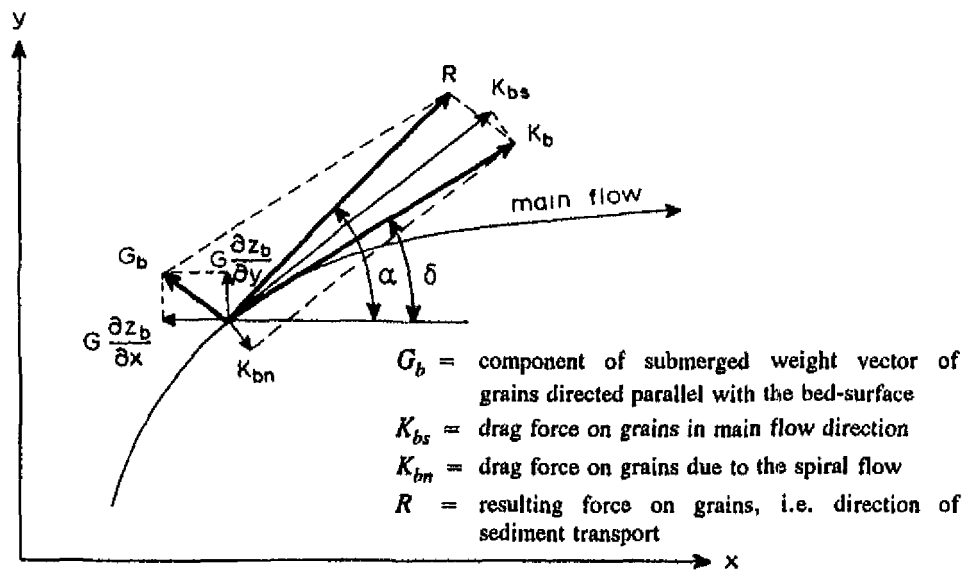
In estuaria moet ten gevolge van de invloed van de Coriolisversnelling en de bidirectionele stroming er rekening mee gehouden worden dat de grootte en de richting van τ_{bn} en dus ook de invloed ervan op τ_{bs} sterk kan verschillen (Booij en Kalkwijk, 1982). In figuur 3.4 wordt dit geïllustreerd aan de hand van snelheden van de secundaire stroming.

De resultante van de component in langsrichting en dwarsrichting van de bodemschuifspanning (τ_b) kan als volgt berekend worden:

$$\tau_b = \sqrt{\tau_{bs}^2 + \tau_{bn}^2} \quad (9)$$

3.4 Sedimenttransport en morfologie

Het sedimenttransport wordt niet alleen door de waterbeweging maar ook door de morfologie bepaald. De door de waterbeweging geïnitieerde bodemschuifspanning werkt in een gebied met een vlakke bodem een sedimenttransport op in de richting van de schuifspanning. Bij een hellende bodem is dit niet het geval. De dwarscomponent van de bodemschuifspanning wordt op niet horizontale beddingen tegengewerkt door de zwaartekracht. Het hellingseffect is de enige stabiliserende (dempende) factor in meander processen. De zwaartekracht genereert een naar beneden gerichte kracht op de korrels, waardoor de richting van het sedimenttransport op niet horizontale beddingen niet meer overeen komt met de richting van de bodemschuifspanning (Struiksma et al., 1985). De richting van het sedimenttransport op een helling kan volgens Van Bendegom (1947) berekend worden met (zie figuur 3.9):



Figuur 3.9 Richting van het sedimenttransport onder invloed van secundaire stroming en een hellende bedding (bron: Talmon et al., 1995)

$$\tan(\alpha) = \frac{\sin(\delta) - \frac{1}{f(\Theta)} \frac{\delta z_b}{\delta y}}{\cos(\delta) - \frac{1}{f(\Theta)} \frac{\delta z_b}{\delta x}} \quad (10)$$

waarin:

- α = richting van het sedimenttransport
 δ = hoek van de richting van de stroming, of van de bodemschuifspanning
 $f(\Theta)$ = K_b/G , een gewogen functie die weergegeven wordt door:

$$f(\Theta) = \frac{0.85}{E} \sqrt{\Theta} \quad (11)$$

Θ = Shieldsparameter =

$$\frac{\bar{u}^2 + v^2}{C^2 \Delta d_{50}} \quad (12)$$

- G = nat gewicht van de korrels (N)
 K_b = 'fluid drag force' op de korrels (N)
 z_b = bodemhoogte (m)

x, y	=	ruimtelijk coördinaten (m)
E	=	calibratiecoëfficiënt (tussen 0.5 en 1.0 volgens: Struiksma en Crosato, 1989)
Δ	=	$(\rho_s - \rho)/\rho$ = relatieve natte dichtheid van het sediment (-)
ρ	=	dichtheid van water (kg/m^3)
ρ_s	=	dichtheid van zand (kg/m^3)
d_{50}	=	mediaan van de korrelgrootte (m)
u	=	diepte gemiddelde snelheid in langsrichting (m/s)
v	=	diepte gemiddelde snelheid in dwarsrichting (m/s)

Vergelijking 10 geldt in situaties met lokaal volledig tot ontwikkeling gekomen helicoïdale beweging.

De gewogen functie $f(\Theta)$ wordt als functie van de Shieldsparameter Θ genomen omdat de krachten van de waterbeweging op de bodem aan Θ gerelateerd verondersteld zijn. De Shieldsparameter is een maat voor de ratio tussen de 'agitating lift' en 'drag' krachten en de stabiliserende kracht G . Uit recent onderzoek (Talmon et al., 1995) is gebleken dat het effect van een hellende bedding behalve door de Shieldsparameter (Θ), ook beïnvloed wordt door de dimensies van de beddingvormen.

De balans tussen beide krachten bepaalt de hellingshoek van de bodem in een bocht. Deze hellingshoek is afhankelijk van de stroomsnelheid. Dit is eenvoudig in te zien als we de transporten in het midden gedeelte van een lange bocht die in evenwicht is bekijken. De grootte van het sedimenttransport in de langsrichting is daar dan ongeveer even groot als het sedimenttransport in dwarsrichting waarbij het effect van de dwarscomponent van de bodemschuifspanning en de hellingshoek van de bodem zorgen voor een stabiele bodem. Indien nu de secundaire stroming toeneemt door toename van de stroming in langsrichting, zal ook het sedimenttransport in dwarsrichting toenemen. Omdat een geul naar een evenwicht streeft wordt er gecompenseerd voor het toegenomen sedimenttransport door aanpassing van de helling van de bodem die steiler wordt (Struiksma et al., 1985). Toename van de hoofdstroom heeft dus een hogere 'point bar' (kronkelwaard) en een diepere 'pool' tot gevolg. In het algemeen kan gezegd worden dat het hellingseffect proportioneel is aan de inverse van de stroomsnelheid van de hoofdstroming (Talmon et al., 1995).

Het type transport dat overheerst, bedtransport of suspensief transport, is van invloed op de resulterende morfologie. Het type transport namelijk bepaalt de grootte van het hellingseffect, de balans tussen de bodemschuifspanning en de component van de zwaartekracht door de hellende bodem. Dit heeft gevolgen voor de richting en grootte van het sedimenttransport en dus voor de resulterende morfologie. De absolute grootte van krachten in dwarsrichting ten gevolge van het hellingseffect is ongeveer twee maal zo groot in situaties met overheersend suspensief sedimenttransport, als in situaties met alleen bed transport (Talmon et al., 1995). In de Westerschelde overheerst het suspensief transport en dit fenomeen speelt daar een rol. Mogelijke verklaringen voor de verschillen in de grootte van het hellingseffect tussen een situatie met overheersend suspensief transport en met overheersend bedtransport zijn:

- a. dat het hellingseffect bij suspensief transport groter is of
- b. dat het hellingseffect ook van invloed is op het suspensief deel van het sedimenttransport en niet alleen op het bed transport gedeelte.

Het begin van de bocht en einde van een bocht worden voorafgegaan respectievelijk gevolgd door overgangszones waar de dwarskrachten niet in balans zijn, ook niet in een evenwichtssituatie. In deze overgangszones werken niet alleen de lokale effecten van de dwarskrachten, secundaire stroming en het hellingseffect, maar ook nog de effecten van de hoofdstroming die zich aanpast aan de veranderingen ten gevolge van een gewijzigde bodemtopografie (inertia van de hoofdstroming) (Struiksma et al., 1985). Hier hebben de netto dwarskrachten een sedimenttransport in dwarsrichting tot gevolg dat nodig is om het sedimenttransport in langsrichting te laten overeenkomen met de lokale stromingscondities. Net voorbij het begin van een bocht en net voorbij het einde van een bocht, in de overgangszones, is de helling van de bodem relatief steil vergeleken met het midden van de bocht. In het geval dat de bochten een lengte hebben die kleiner is dan de lengte van de overgangszone is in de gehele bocht de bedding van het overgangstype. In deze bochten is de dwarscomponent van het sedimenttransport van geringe invloed op de beddingtopografie.

In estuaria met bidirectionele stroming is de lengte van de overgangszone groter dan die in rivieren omdat zowel de eb als de vloed waarschijnlijk verschillende overgangszones aan het begin en eind van een bocht hebben (door verschillende u en R) zodat de zones bij eb en vloed elkaar maar gedeeltelijk overlappen.

De grootte van het sedimenttransport kan benaderd worden met een machtsfunctie van de stroomsnelheid:

$$S \propto U^b \quad (13)$$

waarin:

S = grootte van het sedimenttransport (m^2/s)

U = snelheid hoofdstroming (m/s)

b = coëfficiënt (-)

De coëfficiënt b in vergelijking 13 geeft aan dat het sedimenttransport niet lineair verloopt.

Volgens de sedimenttransportformule van Engelund en Hansen (1967 in: Struiksma en Crosato, 1989) is b constant en gelijk aan 5. De aanname dat b constant is, is in feite onjuist omdat de weerstand (C) bij toenemende stroomsnelheid toeneemt. Voor de omstandigheden in de Westerschelde is uit metingen afgeleid dat $b = 4$ juist is (mondelinge mededeling J.H. Van den Berg). Volgens de sedimenttransportformule van Meyer-Peter & Müller (1948 in: Struiksma en Crosato, 1989) is b variabel en is deze afhankelijk van de Shieldsparameter (Struiksma en Crosato, 1989). Als de waarde van de Shieldsparameter (Θ) dicht bij zijn kritische waarde (Θ_c) ligt, is de parameter b groot en sterk variabel. In de Westerschelde, waar het sediment uit fijn zand bestaat, is overigens Θ vrijwel continue ruim boven de kritische waarde.

Het door de stroming geïnitieerde sedimenttransport leidt tot een verandering in de morfologie. Kenmerkend voor deze verandering is de aanpassingslengte van de morfologie als reactie op plaatselijke verstoring. Deze kan als volgt berekend worden (Struiksma en Crosato, 1989):

$$\lambda_4 = \frac{1}{\pi^2} \cdot h \cdot \left(\frac{B}{h}\right)^2 f(\Theta) \quad (14)$$

waarin:

- λ_4 = aanpassingslengte van de morfologie (m)
- $f(\Theta)$ = gewogen functie
- Θ = Shieldsparameter
- h = waterdiepte (m)
- B = geulbreedte (m)

Uit vergelijking 14 is af te leiden dat de aanpassingslengte kwadratisch, dus sterk, afhankelijk is van de breedte/diepte-ratio. De invloed van een hellende bodem op de richting van het sedimenttransport speelt een rol via de Shieldsparameter.

De aanpassingslengte van de morfologie (λ_4) varieert van 600 m bij kleine geulen tot 6 km bij grote geulen (Allersma, 1994). Een λ_4 van 6 km is dus relevant in de hoofdgeul van de Westerschelde.

De aanpassingstijd van de morfologie is (Allersma, 1994):

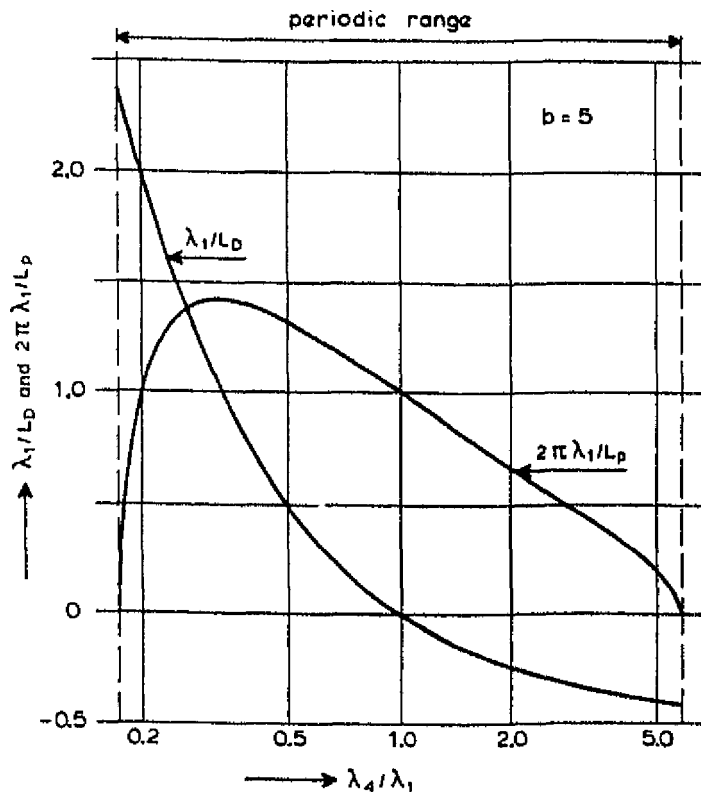
$$T = B^2 f(\Theta) \frac{1}{(\pi^2) S} \quad (15)$$

waarin:

- T = aanpassingstijd van de morfologie (s)
- Δ = $(\rho_s - \rho)/\rho$ (-)
- B = geulbreedte (m)
- S = sedimenttransport per eenheid van breedte (m^2/s)

T geeft een maat voor de tijd die de bodem nodig heeft om zich aan te passen aan een verandering. Voor kleine geulen is T ongeveer 0.5 maand en voor grote geulen ongeveer een jaar (Allersma, 1994).

De ratio van de aanpassingslengte van de morfologie (vergelijking 14) en de aanpassingslengte van de hoofdstroming (vergelijking 3), λ_4/λ_1 , wordt de interactie parameter genoemd (Struiksma en Crosato, 1989). De interactie parameter is een belangrijke indicator in de interactie tussen de stroming en de sedimentbeweging en omdat ze een maat is voor de grootte en de demping van een verstoring (Struiksma et al., 1985). In de meeste natuurlijke rivieren is deze ratio groter dan 0.25. In de bovengenoemde kleine en grote geulen is de interactie parameter circa 2. De interactie parameter geeft verder een indicatie voor het meanderen of vlechten van een rivier. Een rivier met een interactie parameter van 2 en waarden van Θ die kenmerkend zijn voor estuaria zoals de Westerschelde, heeft een meanderend karakter en geen vlechtend karakter (Struiksma en Klaassen, 1988 in: Allersma, 1994). De karakteristieke interactie parameter van een geul is van belang voor het evenwicht van de bedding van die geul. De interactie parameter kan overigens niet met een zeer hoge betrouwbaarheid worden



Figuur 3.10 Relatieve dampings- (λ_1/L_D) en golflengte (λ_1/L_p) uitgezet tegen de interactie parameter λ_4/λ_1 (bron: De Vriend en Struiksmā, 1983)

vastgesteld omdat de grootte van de gewogen functie $f(\Theta)$ onbetrouwbaar is.

De grootte van de ratio is van directe invloed op de dampings- (L_D) en golflengte (L_p) van de bodemverstoring. In figuur 3.10 staat de relatieve dampings- en golflengte van een bodemverstoring in een stroomgoot uitgezet tegen de interactie parameter. Uit de figuur 3.10 is af te leiden dat lage waarden van de interactie parameter gepaard gaan met hoge waarden van de quotiënten λ_1/L_D en λ_1/L_p , de relatieve golf- en dampingslengte van de bodemverstoring. Hoge waarden van deze quotiënten houden in dat de aanpassingslengte van de waterbeweging (λ_1) relatief groot is ten opzichte van de aanpassingslengte van de morfologie, dus dat de verstoring relatief klein en snel gedempt is. Een snelle damping komt ten goede aan de stabiliteit van een geul. Lage waarden van de interactie parameter komen in rivieren weer overeen met geulen met een lage breedte/diepte-ratio. Geulen met een lage breedte/diepte-ratio zijn dus stabieler dan geulen met een hogere breedte/diepte-ratio. In de Westerschelde heeft de ebgedomineerde hoofdgeul een lagere breedte/diepte-ratio dan de vloedgedomineerde nevengeulen. Deze nevengeulen zijn minder stabiel dan de hoofdgeul.

De verschillen in aanpassingslengte van de waterbeweging en de morfologie uiteten zich ook in verschillen in de maxima en minima van de stroomsnelheden en van de bodemhoogte. Het diepste punt van de 'pool' in de bocht en het hoogste punt van een 'crossing' bijvoorbeeld treden op stroomafwaarts van de plaatsen in een rivier waar de snelheid van de hoofdstroming respectievelijk maximaal en minimaal is. In een meanderende zandrivier zoals de Waal, met een geulbreedte van ongeveer 250 m, is dit verschil circa 200 m, zo is gebleken uit modelberekeningen (Struiksmā, 1985).

De λ_4 en dus ook de interactie parameter wordt, zoals al eerder is vermeld, voor een groot deel beïnvloed door de breedte/diepte-verhouding. Dit heeft belangrijke gevolgen voor rivierbeheer. Als bijvoorbeeld de breedte van een rivier verminderd wordt, zal de interactie parameter afnemen en dit zal weer leiden tot een toename van de diepte. Dit heeft een stabielere rivier tot gevolg omdat de demping afneemt. Indien in de geul 'alternate bars' aanwezig zijn nemen ze in omvang af (Struiksmā en Crosato, 1989). Drempels zijn breder dan bochten en de interactie parameter op de drempels hoger dan in bochten. De drempels in de Westerschelde zijn minder stabiel dan de bochten; de aanpassingstijd voor een verstoring van een drempel is dan ook groter dan voor een bocht.

3.5 Samenvatting

Het is waarschijnlijk dat de processen die optreden in rivieren in gemodificeerde vorm ook optreden in estuaria zoals de Westerschelde. De volgende processen worden verondersteld van belang te zijn voor de water- en sedimentbeweging en de morfologische ontwikkeling in een rivierbocht. Overigens is er wel een verschil: de Coriolisversnelling in de Westerschelde is, anders dan in de meeste rivieren, niet te verwaarlozen. De beschrijving van de processen hieronder zijn hoofdzakelijk gebaseerd op een -lineaire- analyse van een 2D-model voor bochtstroming in rivieren (De Vriend en Struiksmā, 1983; Struiksmā et al., 1985; Struiksmā en Crosato, 1989) en aangevuld met inzichten uit een analyse van de secundaire stroming in estuaria (Booij en Kalkwijk, 1982).

Waterbeweging

In een rivierbocht kan de stroming als gevolg van kromming van de stroomlijnen ontleed worden in een primaire (diepte gemiddelde hoofdstroming, u) en een secundaire component (secundaire stroming, v). Belangrijke factoren die van invloed zijn op de diepte gemiddelde hoofdstroming zijn: de waterdiepte (h), de aanpassingslengte van primaire stroming (λ_1) en ook de intensiteit van de secundaire stroming (i_1). λ_1 ligt in de orde van km's voor geulen met dimensies als in de Westerschelde. De stroomdraad van de primaire stroming ligt in het eerste deel van de bocht tegen de binnenbocht aan. In het midden van de bocht steekt de stroomdraad over naar de buitenbocht. Hierdoor ontstaat in de binnenbocht in de tweede helft van de bocht een zone met vertraagde stroom. In deze zone kan sedimentatie plaats vinden.

De secundaire stroming ontstaat door centrifugaal krachten bij stroming door een bocht en in estuaria ook door de Coriolisversnelling. De secundaire stroming door centrifugaalkrachten wordt afhankelijk van de getijfase door de Coriolisversnelling verzwakt of versterkt. Belangrijke factoren die van invloed zijn op de secundaire stroming zijn de snelheid van de diepte gemiddelde hoofdstroming (u) en de kromtestraal van de bocht (R). De aanpassingslengte van de secundaire stroming (λ_2) in estuaria ligt in de orde van grootte van enkele honderden m's of, volgens een vuistregel in de orde van grootte van de geulbreedte, en is daarmee minimaal twee maal groter dan in rivieren. Gezien de grootte van deze aanpassingslengte is het onwaarschijnlijk dat midden op de Drempel van Hansweert in de Westerschelde nog secundaire stroming aanwezig is. Daarnaast doet aftapping van water door nevengeulen net voorbij de bocht het dwarsverhang en daarmee de cel of cellen met secundaire stroming teniet. Dus de waterbeweging -van zowel de eb als de vloed- op het midden van de Drempel van Hansweert lijkt vooral bepaald door de hoofdstroming. De aanpassingslengte van de hoofdstroming ligt in de orde van enkele kilometers en daarom lijkt de invloed van de verstoring van de waterbeweging door de bochten nog een geringe rol te spelen ter hoogte van de Drempel van Hansweert. Op de overgang tussen bocht en drempel is de secundaire

stroming mogelijk nog niet volledig uitgedempt en veroorzaakt dan daar sedimenttransport in de richting van de binnenbocht.

In rivierbochten met steile oevers en een relatief lage breedte/diepte-ratio bestaat de secundaire stroming uit twee cellen: een hoofdcel en een buitenbocht cel. Deze cellen zijn maximaal ontwikkeld in de bochten en verdwijnen geleidelijk in de richting van de drempel. Stroomafwaarts van de drempel ontstaan beide cellen weer. Een soortgelijke situatie treedt in de hoofdgeul in de Westerschelde ook op en is waarschijnlijk maar een korte tijd volledig ontwikkeld. Tijdens vloed is het stromingspatroon met twee cellen volledig ontwikkeld vlak voor maximumstroom, d.w.z. voordat water over de platen kortsluit en het patroon verstoort. De secundaire stroming is dan volledig ontwikkeld omdat de verhouding tussen primaire stroomsnelheid en kromtestraal van de stroomlijnen, factoren die de snelheid van de secundaire stroming bepalen, dan optimaal is. Als water tijdens vloed kortsluit over platen kan een derde cel met secundaire stroming ontstaan. Tijdens eb is het patroon met twee cellen met secundaire stroming volledig ontwikkeld tijdens maximum stroom. De verhouding tussen primaire stroomsnelheid en kromtestraal van de stroombanen genereert dan de sterkste secundaire stroming.

Bodemschuifspanning

In een bocht en in feite elk ander geulstuk waar de secundaire stroming aanwezig is, is de bodemschuifspanning de resultante van bodemschuifspanning (τ_b) opgewekt door de diepte gemiddelde hoofdstroming (τ_{bs}) en van de secundaire stroming (τ_{bn}). De grootte van τ_{bs} en τ_{bn} is ongeveer even groot in het midden van de bocht. Na het midden van een bocht neemt τ_{bn} vervolgens af tot 0 op de rechte overgang tussen twee bochten, daar waar in de Westerschelde de drempels voorkomen.

Sedimenttransport

De grootte en richting van het sedimenttransport (s) is de resultante van de bodemschuifspanning en van het hellingseffect (invloed zwaartekracht op de zandkorrels). Het hellingseffect werkt stabiliserend. Het type sedimenttransport (bodemplast of suspensielast) bepaalt de grootte van het hellingseffect. Als suspensietransport overheerst is het hellingseffect circa twee maal groter dan bij hoofdzakelijk beddingtransport. Omdat in de Westerschelde het suspensief transport overheerst is de invloed van de zwaartekracht op het sediment -het hellingseffect- twee maal zo groot als met overwegend beddingtransport. Dit heeft zijn weerslag in de richting en grootte van het sedimenttransport. De grootte van het sedimenttransport is niet lineair en kan in de Westerschelde benaderd worden met een vierde machtsfunctie van de diepte gemiddelde snelheid ($S \propto u^4$).

Morfologie

De morfologie reageert op een verstoring met een aanpassingslengte (λ_d). λ_d ligt in geulen met dimensies als in de Westerschelde in de orde van km's. λ_d is sterk afhankelijk van de breedte/diepte-ratio van de geul. De ratio tussen de aanpassingslengte van de morfologie en de waterbeweging (λ_d/λ_l) wordt de interactieparameter genoemd. Ze is een maat voor de grootte en de demping van een verstoring van de waterbeweging. Hoe lager de breedte/diepte-ratio van een geul in een rivier, hoe stabielere een geul, omdat dan de demping van een verstoring groot is.

Aanbevelingen

De morfologie van de Westerschelde vertoont veel overeenkomsten met meanderende rivieren. Desondanks zijn veel formules uit de rivierkunde niet direct toepasbaar op de Westerschelde. De oorzaak hiervan ligt in het feit

dat ten gevolge van de bidirectionele stroming de relatie tussen waterbeweging en morfologie verschilt van die in rivieren. Een andere oorzaak is dat een rivier hoge en lage waterstanden heeft; in een estuarium is de gemiddelde waterstand juist constant. De banken ('bars'; platen, drempels) in de Westerschelde en andere estuaria vertonen vaak sterke overeenkomsten met banken in rivieren ('point bars', 'alternate bars', 'riffles'). Uit de literatuurstudie naar het gedrag van deze morfologische eenheden blijkt dat er verder nog nauwelijks onderzoek naar is gedaan. Dalrymple en Rhodes (1995) lijken een klein begin te hebben gemaakt door middel van sedimentologisch onderzoek van banken in estuaria. Het lijkt aanbevelingswaardig de platen in de binnenbochten van de geulen in de Westerschelde procesmatig te bestuderen om zo hun functie in de meanderende hoofdgeul te achterhalen. Uit de rivierkunde zijn veel (wiskundige) modellen voor de waterbeweging bekend die ook in potentie toepasbaar zijn in de Westerschelde. Maar de morfologische modellering van processen in estuaria blijft nog lastig (Wang, 1989).

4 Conclusies

De belangrijkste conclusies uit de literatuurstudie zijn:

- * de grootschalige morfologie van de Westerschelde vertoont veel gelijkenis met meanderende rivieren: de hoofdgeul in de Westerschelde meandert; de platen hebben deels het karakter van 'point bars' en deels van 'middle bars'; kenmerkend is ook de opeenvolging van diepe bochten en ondiepe drempels zoals 'pools' en 'riffles' in rivieren
- * de waterbeweging die van belang is voor drempels in estuaria heeft een primaire en een secundaire component
- * de secundaire stroming in de bochten in een estuarium is volledig ontwikkeld rond maximum stroom en bestaat dan uit een hoofdcel en een buitenbocht-cel
- * op het midden van de drempels is de secundaire stroming volledig uitgedempt; de primaire stroming is daar de dominerende component van de waterbeweging
- * in het tweede deel van de bocht vindt in de binnenbocht vertraging van de stroomsnelheden plaats en in de buitenbocht versnelling; op de overgang van de bocht naar een verdiepte drempel is de vertraging van de primaire stroming dan ook het grootst in de buitenbocht
- * de sedimentatie op een drempel wordt grotendeels bepaald door de primaire stroming
- * de aanpassing van de morfologie aan een verstoring verloopt in smalle en diepe geulen sneller dan in brede en ondiepe geulen

5 Hypothesen

In dit hoofdstuk worden een aantal hypothesen samengevat over het gedrag van drempels in de hoofdgeul van de Westerschelde. Het betreft hier dus geen drempels aan het eind van een eb- of vloedschaar, de zogenaamde schaaldrempels. Op schaaldrempels werken volgens Van Veen (1950) andere processen.

Het gedrag van drempels in een estuarium als de Westerschelde wordt door de volgende -in belang afnemende - mechanismen bepaald:

1. de hoofdstroming die op een drempel divergeert en de secundaire stroming die op de drempel afwezig danwel relatief klein is; het dwarsprofiel van de drempel is daardoor relatief breed en ondiep en rechthoekig;
2. de stroomdraden van de eb- en de vloedstroming die als het ware langs elkaar heen stromen en elkaar kruisen op verschillende plaatsen in het drempelgebied waardoor een breed en ondiep profiel ontstaat;
3. de getijvolumina die over de drempel stromen nemen af door aftapping door nevengeulen; een afname van de -dominante- getijvolumina in de het drempelgebied heeft een afname van het doorstroomoppervlak tot gevolg.

De sedimentatie op een verdiepte drempel wordt vrijwel volledig gedreven door de primaire stroming; de secundaire stroming heeft hooguit een modifierend effect. Het sedimentatiepatroon op een -verdiepte- drempel is waarschijnlijk als volgt:

4. Tijdens een getijfase neemt het water dat de drempel opstroomt op het deel van de drempel dat aan de buitenbocht grenst sterker af dan het deel van de drempel dat aan de binnenbocht grenst. Het water uit de buitenbocht heeft hogere sedimentconcentraties dan het water uit de binnenbocht. Op het deel van de drempel dat aan de buitenbocht grenst vindt relatief meer sedimentatie plaats dan op het deel van de -verruimde- drempel dat aan de binnenbocht grenst. Als het water vervolgens de drempel afstroomt neemt de stroomsnelheid toe en vindt er erosie plaats.

In bijlage A staan een aantal sub-hypothesen opgesomd over de waterbeweging, het sedimenttransport en de morfologie. Tevens is de wijze waarop deze hypothesen getoetst kunnen worden vermeld.

Literatuur

- Ahnert, F., 1960. Estuarine meanders in the Chesapeake Bay Area. *Geogr. Rev.*, 50, 3, 390-401.
- Allersma, E., 1994. Geulen in estuaria. 1-D modellering van evenwijdige geulen. Verslag van een bureaustudie. Delft Hydraulics/Waterloopkundig Laboratorium (WL), Rapport H 1828.
- Anthony, D.J. en M.D. Harvey, 1991. Stage-dependent cross-section adjustments in a meandering reach of Fall River, Colorado. *Geomorphology*, 4, 187 - 203.
- Ashley, G.M., 1980. Channel morphology and sediment movement in a tidalriver, Pitt River, British Columbia. *Earth Surface Processes*, Vol. 5, 347 - 368.
- Bathurst, J.C., C.R. Thorne en R.D. Hey, 1977. Direct measurements of secondary currents in river bends. *Nature*, Vol. 269, 504 - 506.
- Bathurst, J.C., C.R. Thorne en R.D. Hey, 1979. Secondary flow and shear stress at river bends. *Journal of the Hydraulics Division*, HY10, 1277 - 1295.
- Bestuurlijk Klankbordforum Westerschelde, 1991. Beleidsplan Westerschelde, Rijkswaterstaat/Directie Zeeland, 92 p.
- Blik, A.J. en M.N. Ruijter, 1994. Verklarend onderzoek drempels Westerschelde. Ingenieursbureau Svasek, project 940
- Booij, R. en J.P.Th. Kalkwijk, 1982. Secondary flow in estuaries due to the curvature of the main flow and to the rotation of the earth and its development. T.H. Delft, Lab. Fluid Mech., Report no. 9-82., 38 pp. Ook als: Rijkswaterstaat, GEOMOR-nota 83.05.
- Booij, R. en J.P.Th. Kalkwijk, 1986. Adaption of secondary flow in nearly-horizontal flow. *Journal of hydraulic research*, vol. 24, 1, 19 - 37.
- Clifford, N.J. en K.S. Richards, 1992. The reversal hypothesis and the maintenance of riffle-pool sequences: a review and field appraisal. In: Carling, P.A. en G.E. Petts (Eds.), *Lowland floodplain rivers: geomorphological perspectives*. John Wiley & Sons, Canada, 95 - 116.
- Church, M. en D. Jones, 1982. Channel bars in gravel-bed rivers. In: Hey, R.D., J.C. Bathurst en C.R. Thorne (Eds.) *Gravel-bed rivers*. John Wiley & Sons Ltd., 389 - 421.
- Dalrymple, R.W. en R.N. Rhodes, 1995. Estuarine dunes and bars. In: G.M.E. Perillo (Ed.), *Geomorphology and sedimentology of estuaries*. *Development in sedimentology* 53, 359 - 422.
- Davoren, A. en Mosley, M.P., 1986. Observations of bedload movement, bar development and sediment supply in the braided Ohau River. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 11, 643 - 652.
- De Vriend, H.J. en N. Struiksmā, 1983. Flow and bed deformation in river bends. Presented at Rivers '83, ASCE, New Orleans Oct. 1983. Ook: Waterloopkundig Laboratorium/Delft Hydraulics Laboratory, Publication no. 317, 19 pp.
- Friedkin, J.F., 1945. A laboratory study of the meandering of alluvial rivers, U.S. Army Corps of Engineering, MS 39180, 40 pp.
- Ikeda, H., 1989. Sedimentary controls on channel migration and origin of pointbars in sand-bedded meandering rivers. In: Ikeda, S. en G. Parker (Eds.), *River meandering*. *Water Resources Monograph* 12, American Geophysical Union, Washington, 51 - 68.
- Jeuken, M.C.J.L., 1992. Een analyse van stroom- en sedimenttransportmetingen in het oostelijk deel van de Westerschelde. Rijkswaterstaat, Directie Zeeland, Nota NWL-92.17.

- Knighton, D., 1984. Fluvial forms and processes. Edward Arnold, London, 218 pp.
- NEDECO, 1959. River studies and recommendation on improvement of Niger and Benue. North Holland Publishing Company, Amsterdam, 1000 pp.
- Parker, G. en H. Johannesson, 1989. Observations on several recent theories of resonance and overdeepening in meandering channels. In: Ikeda, S. en G. Parker (Eds.), River meandering. Water Resources Monograph 12, American Geophysical Union, Washington, 379 - 462.
- Peters, J.J. en A. Sterling, 1976. Hydrodynamiques et transports de sediments de l'estuaire de l'Escaut. In: Nihoul, C.L. en R. Wollast (eds.), L'estuaire de l'Escaut. Rapport Final Project Mer, Volume 10. Bruxelles, Belgique.
- Rhoads, B.L., 1992. Fluvial geomorphology. Progress in Physical Geography, 16, 4, 456 - 477.
- Robinson, A.H.W., 1960. Ebb-flood channel systems in sandy bays and estuaries. Geography 45, 183 - 199.
- Seminara, G. en M. Tubino, 1989. Alternate bars and meandering: free, forced and mixed interactions. In: Ikeda, S. en G. Parker (Eds.), River meandering. Water Resources Monograph 12, American Geophysical Union, Washington, 267 - 320.
- Storm, C., (1995). Residuele zandtransporten in de Westerschelde. Rijkswaterstaat, RIKZ, Werkdocument (concept).
- Struiksmā, N., 1985. Prediction of 2-D bed topography in rivers. Journ. of Hydraulic Engineering, ASCE, vol. 111, 8, 1169 - 1182. Ook: Waterloopkundig Laboratorium/Delft Hydraulics Lab., Publication no. 85/06.
- Struiksmā, N. en A. Crosato, 1989. Analysis of a 2-D bed topography model for rivers. In: Ikeda, S. en G. Parker (eds.), River meandering, A.G.U., Washington
- Struiksmā, N., K.W. Olesen, C. Flokstra en H.J De Vriend, 1985. Bed deformation in curved alluvial channels. Journ. of Hydraulic Research, vol. 23, 1, 57 - 79.
- Talmon, A.M., M.C.L.M. Van Mierlo en N. Struiksmā, 1995. Laboratory measurements of the direction of sediment transport on transverse alluvial-bed slopes. Journ. of Hydraulic Research, vol. 33, 4, 495 - 517.
- Tank, F.T.G., 1995. Het gedrag van drempels in de Westerschelde. Een verkennende studie. Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, IMAU Rapport 95-18
- Tank, F.T.G., 1996. Het gedrag van drempels in de Westerschelde. Parameterisatie. Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, IMAU (in voorbereiding)
- Thompson, A., 1986. Secondary flows and the pool-riffle unit: a case study of the processes of meander development. Earth Surface Processes and Landforms, vol. 11, 631 - 641.
- Tubino, M. en G. Seminara, 1990. Free-forced interactions in developing meanders and suppression of free bars. J. Fluid Mech., vol. 214, pp. 131-159.
- Van Bendegom, L., 1947. Eenige beschouwingen over riviermorphologie en rivierverbetering, De Ingenieur, vol. 59, 4, pp. B1 - B11.
- Van Kleef, A.W., 1994. Verklaring voor de veranderingen in de grootschalige zandbalans van het gebied rond het Middelgat, Westerschelde. Rijkswaterstaat/Directie Zeeland (concept).
- Van Veen, J., 1950. Eb- en vloed-schaar systemen in de Nederlandse getijwateren. Tijdschrift KNAG, 2e reeks, deel 67, 303-325.
- Wang, Z.B., 1989. Mathematical modelling of morphological processes in estuaries. TUD, Proefschrift, Communications on hydraulic and geotechnical engineering, report nr. 89-1, 208 pp.
- Winkley, B.R., 1989. Factors influencing crossing (riffle) depth. In: Elliot, C.M. (ed.), River meandering, 343 - 354.

Winkley, B.R., 1989. The cause and cure of low water navigation problems on alluvial rivers. P.I.A.N.C.
Bulletin, no. 64, 188 - 197.

Mogelijk relevante literatuur

Lijst met mogelijk relevante, maar in deze studie niet gebruikte literatuur, met betrekking tot de waterbeweging, het sedimenttransport en de morfologie van rivieren en estuaria.

Rivieren

- Alphen, J. van, J. Bloks en P. Hoekstra, 1983. Onderzoek naar waterbeweging, morfologie en sedimentatie structuren in de meanderende rivier de Dommel. Rijksuniversiteit Utrecht, Geografisch Instituut, 419 p.
- Barneveld, J.H. en N. Struiksma, 1993. Bodemkribben Waalbocht Erlecom: RIVCOM-berekeningen voor uitbreiding bodemkribbenveld. Waterloopkundig Laboratorium/WL Q 1504, 9p.
- Bhowmik, N.G. and Stall, J.B., 1978. Hydraulics of flow in the Kaskaskia River. In: Proc. Hydraulic Div. Speciality Conference on Verification of Math. and Phys. Models in Hydraulic Eng., ASCE, pp. 79-86
- Blondeaux, P. and G. Seminara, 1985. A unified bar bend theory of river meanders. *J. Fluid Mech.*, 157, 449-470
- Bluck, B.J., 1971. Sedimentation in the meandering River Endrick. *Scottl. J. Geol.*, 7, 93-138
- Bridge, J.S. and J. Jarvis, 1976. Flow and sedimentary processes in the meandering river South Esk, Glen Cova, Scotland. *Earth Surface Processes*, Vol. 1, n0. 4, pp. 203-336
- Bridge, J.S. and J. Jarvis, 1977. Velocity profiles and bed shear stress over various bed configurations in a river bend. *Earth Surface Processes*, Vol.2, no. 4, pp. 281-294
- Bridge, J.S., 1992. A revised model for water flow, sediment transport, bed topography and grain size sorting in natural river bends. *Water Resources Research*, vol. 28, 4, 999-1013.
- Brooks, J.H. and B.R. Winkley, 1978. River training through geometric alignment. ICID, Grenoble, France.
- Callander, R.A., 1978. River meandering. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 10, 129-158
- Carling, P.A., 1991. An appraisal of the velocity-reversal hypothesis for stable pool-riffle sequences. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16, 19-31.
- Carling, P.A. and N. Wood, 1994. Simulation of flow over pool-riffle topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 19, 319-332.
- Carson, M.A. and G.A. Griffiths, 1987. Influence of channel width on bedload transport capacity. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 113, 12, 1489-1509.
- Coleman, J.M., 1969. Brahmaputra river; channel processes and sedimentation. *Sedimentary Geology*, 3, 129 - 239.
- Colombini, M., M. Tubino and P. Whiting, 1992. Topographic expression of bars in meandering channels. In: Billi, P., R.D. Hey, C.R. Thorne and P. Tacconi (eds.), *Dynamics of gravel bed rivers*. Wiley and Sons, N.Y., 457 - 475.
- Crosato, A., 1990. Simulation of meandering river processes. T.U.Delft, Fac. Civil Eng.
- De Vriend, H.J., 1977. A mathematical model of steady flow in curved shallow channels. *Journal of Hydraulic Research*, 15, p.37-54
- Engelund, F., 1975. Instability of flow in a curved alluvial channel. *Journ. Fluid Mech.*, 72, 145-160
- Ferguson, R., 1987. Hydraulic and sedimentary controls of channel pattern. In: Richards, K. (ed.), *River channels; environment and process*. Inst. of British Geographers, Special Publications 18, 129-158.

- Hooke, R.L., 1975. Distribution of sediment transport and shearstress in a meander bend. *J. of Geol.*, 83(5), p.543
- Ikeda, S. en G. Parker (Eds.), 1989. River meandering. AGU/WRM 12, Washington, 484 pp.
- Jansen, P.Ph., e.a., 1979. Principles of river engineering: the non-tidal alluvial river. Pitman, London
- Knighton, A.D., 1981. Asymmetry of river channel cross-section: part 1. Quantitative indices. *Earth Surface Processes and landforms*, vol. 6, p 581-588.
- Knighton, A.D., 1981. Asymmetry of river channel cross-section: part 2. mode of development and local variation. *Earth Surface Processes and landforms*, vol. 7, p 117-131.
- Leopold, L.B., 1982. Water surface topography in river channels and implications for meander development. In: Hey, R.D., J.C. Bathurst and C.R. Thorne (eds.), *Gravel-bed rivers*, Wiley & Sons, New York, 359-388.
- Mangelsdorf, J., Scheurmann, K. and F.-H. Weiss, 1990. River morphology. A guide for geoscientists and engineers. Springer-Verlag, Berlin.
- Mosselman, E., 1992. Mathematical modelling of morphological processes in rivers with erodible cohesive banks (Thesis). TU Delft, Fac. of Civil Eng., Communications on Hydraulic and geotechnical engineering, 92-3, 134 pp.
- Oleson, K.W., 1987. Bed topography in shallow river bends (Thesis). TU Delft, Fac. of Civil Eng., Communications on Hydraulic and geotechnical engineering, 87-1, 264 pp.
- Richards, K.S., 1976. The morphology of riffle-pool sequences. *Earth Surface Proc.*, vol. 1, 71-88
- Richards, K.S., 1978. Simulation of flow geometry in a riffle-pool stream. *Earth Surface Proc.*, vol. 3, 345-354
- Rozovskii, I.L., 1957. Flow of water in bends of open channels. Acad. of Sciences of the Ukrainian S.S.R., Inst. of Hydrology and Hydraulic Eng., Kiev
- Schielen, R., A. Doelman en H.E. De Swart, 1993. On the nonlinear dynamics of freebars in straight channels. *Intl. Fluid Mechanics*, 252, p. 325-356.
- Struiksma, N., 1983. Rivers: celerity and deformation of bed perturbations travelling over a non-erodible layer. *Waterloopkundig Laboratorium/WL*, 18 pp.
- Struiksma, N., 1993. Improvement fairway Midden-Waal. *Delft Hydr.*, 17 pp.
- Struiksma, N. en G.J. Klaassen, 1988. On the threshold between meandering and braiding. *Int. Conf. on River Regime*, Wallingford, England, May 1988.
- Talmon, A.M., 1992. Bed topography of river bends with suspended sediment transport (thesis). TU Delft, Fac. of Civil Eng., Communications on hydraulic and geotechnical engineering, 92-5, 243 pp.
- Van Bendegom, L., 1943. Spiraalstroming. RWS, Dir. Boven Rivieren, Nota 43.5
- Winkley, B.R., 1977. Man-made cut-offs in the Lower Mississippi River, Conception, Construction and river response. Report P.I. 300-2, U.S.A. CE, Vicksburg, MS
- Winkley, B.R., 1982. Response of the lower Mississippi to River training and realignment. In: Hey, R.D., J.C. Bathurst and C.R. Thorne (eds.), *Gravel-bed rivers*, Wiley and Sons, New York, 659-681
- Winkley, B.R., 1983. ASCE Proceedings of the Conference on 'River Meandering', pp. 343-354 en 370-383, New Orleans, Louisiana
- Yalin, M.S. en Da Silva, A.M.F., 1991. On the formation of alternate bars. In: R. Soulsby and R. Bettess (editors), *Sand transport in rivers, estuaries and the sea*. Euromech Colloq. Proc. 262, 171-178
- Yalin, M.S. en Da Silva, A.M.F., 1992. Horizontal turbulence and alternate bars. *J. Hydrosoci. Hydraul. Eng.*, 9, 47-58
- Yu, B. and M.G. Wolman, 1987. Some dynamic aspects of river geometry. *Water Resources Research*, vol. 25,

Estuaria

- Allersma, E., 1981. Dredging and training works in het Hooghly estuary, India: review of amelioration schemes. Delft Hydraulics Laboratory/Waterloopkundig Laboratorium, R1710.
- Barton, D.C., 1928. Meandering in tidal streams. *Journ. of Geol.*, vol. 36, 615-629
- Barwis, J.H., 1978. Sedimentology of some South Carolina tidal-creek point bars, and a comparison with their fluvial counterparts. In: A.D. Miall (editor), *Fluvial Sedimentology*. Can. Soc. Petrol. Geol. Mem., 5, 129-160
- Berger, R.C. en J.A. Boyd, 1985. Effects of depth on dredging frequency, report 3: an evaluation of advance maintenance projects. Hydraulic Laboratory, Waterways Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi, U.S.A.
- Booij, R., J.G.S. Pennekamp en J.P.Th. Kalkwijk, 1985. Secundaire stroming in de Oosterschelde (Eindverslag). TH Delft, Civiele Techniek, Lab. voor Vloeistofmechanica, Rapport 16-85, 31 pp.
- Dalrymple, R.W., Zaitlin, B.A. en Boyd, R., 1992. Estuarine facies models: conceptual basis and stratigraphic implications. *J. Sediment. Petrol.*, 62, 1130-1146.
- De Jonge, V.N., 1983. Relations between annual dredging activities, suspended matter concentrations and the development of tidal regime in the Ems Estuary. *Can. J. Fish. Aquatic Sci.*, 40 (Suppl. 1), p 289
- Dillo, H.G., 1960. Sandwanderung in Tideflüssen. *Mitteilungen des Franzius Instituts für Grund- und Wasserbau der Technische Hochschule Hannover*. Heft 17, 135 -253
- Dronkers, J., 1986. Tidal asymmetry and estuarine morphology. *Netherlands Journal of Sea Research*, 20, 117-131.
- Ferentinos, G. en M. Collins, 1979. Tidally induced secondary circulations and their associated sedimentation processes. *Journ. Oceangr. Soc. Japan*, 35, 65 - 74.
- Harris, P.T. and M.B. Collins, 1985. Bedform distributions and sediment transport paths in the Bristol Channel and Severn estuary, U.K., *Marine Geology*, 62, 153-166
- Inglis, C.C. and F.J. Kestner, 1958. The long-term effects of training walls, reclamation and dredging on estuaries. *Proc. Inst. Civ. Eng.*, 9, p. 193
- Ludwick, J.C., 1974. Tidal currents and zig-zag sand shoals in a wide estuary entrance. *Geol. Soc. of America Bulletin*, 85, 717-726
- Perillo, G.M.E. en D.G. Cuadrado, 1991. Geomorphologic evolution of EL Toro Channel, Bahia Blanca Estuary (Argentina) prior to dredging. *Marine Geology*, 97, 405 - 412.
- Robinson, A.H.W., 1956. The submarine morphology of certain port approach channel systems, *Journ. Inst. Navig.*, vol 4, 20-46
- Simmons, H.B., 1965. Channel depth as a factor in estuarine sedimentation. *Tech. Bull. 8*, U.S. Army Committee on Tidal Hydraulics, 15.
- Wright, L.D., J.M. Coleman and B.G. Thom, 1973. Processes of channel development in a high-tide-range environment: Cambridge Gulf-Ord River Delta Western Australia, *Journ. Geology*, 81, 15-41

Bijlage A Sub-hypothesen

Het getal tussen de 1 en de 4 voor de sub-hypothese geeft aan op welke hoofdhypothese uit hoofdstuk 5 de subhypothese betrekking heeft. Of een sub-hypothese al eerder, in Tank (1995), verwoord is, wordt aangegeven met een #. Na elke hypothese wordt in cursief schrift aangegeven op welke wijze de metingen getoetst kunnen worden.

WATERBEWEGING

Hoofdstroming

- * (1,4) Als het water van de bocht naar een relatief recht stuk geul stroomt, divergeren de stroomlijnen van de hoofdstroming en vindt er vertraging van de hoofdstroming plaats (#).
De toetsing vindt plaats m.b.v. de richting en de sterkte van de diepte gemiddelde hoofdstroming in een aantal punten tussen bocht en drempel en tussen binnen- en buitenbocht tijdens eb en vloed (langs- en dwarsmetingen; drijvermetingen). Eventueel worden de resultaten aangevuld met resultaten waterbewegingsmodel Scaldis100. De gehele toetsing vindt plaats voor de situatie tijdens maximum stroom.
- * (1,3) De vertraging van de hoofdstroming wordt versterkt door aftapping van water door nevengeulen en door het relatief te ruime geulprofiel op een verdiepte drempel (#).
De toetsing vindt plaats m.b.v. de gemeten getijvolumina over de drempel en de nevengeulen. Verder wordt de vergelijking met evenwichtsparameter van Blik en Ruijter (1994) (dwarsmetingen) bepaald om na te gaan of het geulprofiel te ruim of te krap is. Eventueel worden aanvullende getijvolumina uit Scaldis100 gebruikt.
- * (1,4) Het langsverhang boven een -verdiepte- drempel in de hoofdgeul is klein vergeleken met het langsverhang in de bochten en het langsverhang wordt door de baggerwerkzaamheden op de drempels alleen maar kleiner.
De toetsing vindt plaats m.b.v. de maximum langsverhangen die worden afgeleid uit met Scaldis100 berekende waterstanden. De verhangen tussen bocht en drempel worden daarbij vergeleken. Het tweede deel van de hypothese wordt getoetst door in Scaldis100 een berekening met een verlaagde drempel uit te voeren en die wordt vergeleken met een berekening zonder verlaagde drempel. De toetsing vindt plaats voor de situatie tijdens maximum stroom.
- * (4) In de tweede -stroomafwaartse- helft van een bocht treedt in de buitenbocht een versnelling van de hoofdstroming op en in de binnenbocht een vertraging van de hoofdstroming plaats doordat de stroomdraad naar de buitenbocht is overgestoken.
De toetsing vindt plaats m.b.v. het verloop in langsrichting van de hoofdstroomsnelheden in buiten- en binnenbocht (langsmetingen). De toetsing vindt plaats voor de situatie tijdens maximum stroom.
- * (1,4) De hoofdstroming op een verdiepte drempel in de hoofdgeul vertraagt tijdens een springtij relatief meer dan tijdens een doottij.
De toetsing vindt plaats m.b.v. een analyse van de gemeten stroomsnelheden van de hoofdstroming tussen bocht en drempel en met behulp van resultaten van het waterbewegingsmodel Scaldis100. Drijvermetingen tijdens eb en vloed geven aanvullende informatie. De toetsing vindt plaats voor de situatie tijdens maximum stroom.

Secundaire stroming

- * (1,3) Midden op de drempel is de secundaire stroming niet aanwezig. De secundaire stroming, die in de bocht ontstaan is, heeft een geringe aanpassingslengte in verhouding tot de lengte van de geulen in de Westerschelde en op het midden van de drempel is de secundaire stroming dan ook volledig uitgedempt. De demping wordt versterkt doordat nevengeulen het tegen de oever opgebouwde dwarsverhang, de motor van de secundaire stroming, teniet doen (#).

De toetsing vindt plaats door het verloop van de grootte van de secundaire stroming in langsrichting op de bovenstroomse zijde van de drempel tijdens eb en vloed (langs- en eventueel dwarsmetingen) te bepalen. De toetsing vindt plaats voor de situatie tijdens maximum stroom.

- * (1) Aan de stroomafwaartse zijde van de drempel heeft de secundaire stroming geen invloed op het stroombeeld omdat deze pas weer in de benedenstroomse bocht tot ontwikkeling komt; op de drempel is het vooral de hoofdstroming die van belang is.

De toetsing vindt plaats door het verloop van de secundaire stroming in langsrichting op de benedenstroomse zijde tijdens eb en vloed (langsmeting) te bepalen. Tweede deel van de hypothesen kan afgeleid worden uit waterstanden berekend met Scaldis100. De toetsing vindt plaats voor de situatie tijdens maximum stroom.

- * (1) De secundaire stroming in de bochten in de Westerschelde bestaat waarschijnlijk uit twee cellen: een hoofdcel en een buitenbocht-cel, die aan de hoofdcel tegengesteld draait.

De toetsing vindt plaats m.b.v. een analyse van het patroon van de cellen van de secundaire stroming in verschillende raaien dwars op een geul (dwarsmetingen). De toetsing vindt plaats tijdens maximum stroom.

- * (1) Het patroon van secundaire stroming is maar gedurende een korte periode van ongeveer een half uur per getijfase volledig ontwikkeld; tijdens vloed bij een waterstanden ruim onder HW, omdat dan de platen nog niet geheel zijn ondergelopen terwijl de stroomsnelheden maximaal zijn, waardoor de balans tussen kromming van de stroomdraden en snelheid van de hoofdstroming optimaal is voor een sterke secundaire stroming; tijdens de eb is de secundaire stroming het sterkst bij waterstanden rondom NAP: de stroomsnelheid is bij deze waterstand maximaal en in combinatie met een grote kromming van de stroombanen doordat de platen niet zijn ondergelopen.

De toetsing vindt plaats m.b.v. een analyse van het patroon van de cellen met gemeten secundaire stroming in een of meerdere dwarsraaien (dwarsmetingen). De toetsing vindt plaats tijdens een volledig getij.

- * (1) Als tijdens vloed bij waterstanden rond HW water over de platen kortsluit kan een derde cel met secundaire stroming in de binnenbocht ontstaan.

De toetsing vindt plaats m.b.v. een analyse van het cellenpatroon van de secundaire stroming in een of meerdere dwarsraaien (dwarsmetingen). Toetsing vindt plaats rondom maximum vloedstroom.

- * (1) De grootte van de secundaire stroming in de hoofdcel is in scherpe bochten maximaal 10 cm/s (#).

De toetsing vindt plaats m.b.v. een analyse van de grootte van de secundaire stroming in een optimale situatie, d.w.z. vlak bij de bodem nabij de bochtapex (dwarsmetingen) gedurende maximum stroom.

SEDIMENTTRANSPORT

- * (1,4) Het sedimenttransport van buiten- naar binnenbocht als gevolg van de secundaire stroming is ondergeschikt aan het langstransport door de hoofdstroming.

De toetsing vindt plaats door vergelijking van de dwars- en langscomponent van het transport door de secundaire stroming in een aantal meetpunten dwars op de geul (dwarsmetingen). De toetsing vindt plaats voor de situatie tijdens maximum stroom.

- * (1,4) De invloed van het sedimenttransport van buiten- naar binnenbocht als gevolg van de secundaire stroming op het langtransport neemt af op de overgang van bocht naar drempel.
De toetsing vindt plaats door vergelijking van de dwarscomponent van het sedimenttransport in een aantal punten tussen bocht en drempel (langsmetingen). De toetsing vindt plaats voor de situatie tijdens maximum stroom.
- * (1,4) Midden op de drempel wordt het sedimenttransport bepaald door de hoofdstroming.
De toetsing vindt plaats door een analyse van de grootte van de langs- en dwarstransport in meetpunten in het midden van de drempel (langs- en dwarsmetingen). De toetsing vindt plaats voor de situatie tijdens maximum stroom.
- * (1,4) De hoofdstroming op een verdiepte drempel vertoont de volgende snelheidsgradiënten: eerst vertraging en vervolgens versnelling; hierdoor treedt sedimentatie aan de stroomopwaartse zijde en erosie aan de stroomafwaartse zijde van de drempel op (#).
De toetsing vindt plaats door een analyse van het verloop van de langstroming en langtransport over een drempel (langsmetingen). De toetsing vindt plaats tijdens maximum stroom.
- * (1) Op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert is de sedimentatie tijdens vloed groter dan de erosie daar tijdens eb. Op de zuidelijke zijde van de Drempel van Hansweert is de sedimentatie tijdens eb groter dan de erosie daar tijdens vloed. Het merendeel van de sedimentatie op de -verdiepte- drempel vindt plaats tijdens vloed.
De toetsing vindt plaats door een analyse van de gradiënt over de Drempel van Hansweert van de zandtransporten tijdens de eb- en de vloedfase.
- * (1) Sedimentatie op de drempel treedt vooral op tijdens een springtij.
De toetsing vindt plaats met behulp van bodemveranderingen gedurende doottij- springtijcycli.
- * (1) Het merendeel van de sedimentatie vindt globaal plaats op plekken waar recentelijk gebaggerd is.
De toetsing vindt plaats met behulp van het ruimtelijk patroon van de bodemveranderingen in de periode naar baggerwerkzaamheden.
- * (4) In het tweede deel van de bovenstroomse bocht treedt in de buitenbocht door versnellende hoofdstroming erosie en in de binnenbocht door vertragende hoofdstroming sedimentatie op. Het sediment dat in de binnenbocht wordt afgezet is in de binnenbocht van het eerste deel van de bocht geërodeerd. Voorwaarde is dat het systeem uit evenwicht is.
De toetsing vindt plaats door een analyse van het verloop van de stroomsnelheid en het sedimenttransport in langsrichting in binnen- en buitenbocht (langsmetingen). De toetsing vindt plaats tijdens maximum stroom.
- * (1,4) De erosie in de buitenbocht wordt versterkt doordat daar de hoofdcel en buitenbocht-cel met secundaire stroming extra bodemschuifspanning veroorzaken.
De toetsing vindt plaats door berekeningen van het verloop van de totale bodemschuifspanning en/of sedimentconcentratieverticalen van de gemeten langs- en dwarsstroomsnelheden in een dwarsraai in combinatie met de lokatie van de cellen met secundaire stroming (dwarsmetingen). De toetsing vindt plaats voor de situatie gedurende maximumstroom.
- * (4) Als de hoofdstroming vanuit de bocht de -verdiepte- drempel bereikt en vertraagt deze en er vindt aan de stroomopwaartse zijde van de drempel, in het deel dat aan de buitenbocht grenst, relatief veel sedimentatie plaats vergeleken bij het deel van de drempel dat aan de binnenbocht grenst.

De toetsing vindt plaats door het verloop van het sedimenttransport in langs- en dwarsrichting over een drempel en patronen in morfologische veranderingen (langs- en dwarsmetingen) te bepalen. De toetsing vindt plaats voor de situatie gedurende maximum stroom.

- * (4) De dwarscomponent van het sedimenttransport door secundaire stroming die naar de binnenbocht gericht is wekt juist op de drempel nabij de binnenbocht veel sedimentatie en op de drempel nabij de buitenbocht weinig sedimentatie op. Dit patroon is onder geschikt aan het sedimentatiepatroon dat door de langsstroming veroorzaakt wordt op de stroomopwaartse zijde van een drempel.

De toetsing vindt plaats door verhouding tussen de gemeten transporten in langs- en dwarsrichting over een drempel (langsmetingen) te bepalen. De toetsing vindt plaats tijdens maximum stroom. Patroon van bodemvormen.

- * (4) Er zijn 3 belangrijke mechanismen te onderscheiden die residueel sedimenttransport naar een -verdiepte-drempel veroorzaken (#):

- 1 getij-asymmetrie,
- 2 Getij Residuele Stroming (GRS) en
- 3 onder- en oververzadiging

De residuele sedimenttransporten door deze drie mechanismen zijn geen actieve factor in de vorming en/of handhaving van de drempels.

De toetsing vindt plaats door de omvang van de drie transporten te bepalen uit de metingen. De omvang van het residueel zandtransport door getijasymmetrie kan vastgesteld worden door van de eb- en de vloedfase de grootte van het sedimenttransport vast te stellen op verschillende lokaties op een drempel. De grootte van GRS is met behulp van een modelberekening (Scaldis100 met een transportformule, bijvoorbeeld Engelund-Hansen) over een doottij/springtijcyclus vast te stellen. Patroon van bodemvormen op de drempel geeft aanvullende informatie. De transporten door onder- en oververzadiging kunnen uit de langsmetingen over de Drempel van Hansweert door te integreren over een geheel getij bepaald worden. Onder- en oververzadiging wordt gerefereerd aan de transportformule van Engelund-Hansen.

MORFOLOGIE

- * (1) De morfologie van een drempel in de Westerschelde wordt in eerste instantie bepaald wordt door de hoofdstroming; de secundaire stroming heeft hooguit een modifierend effect.
- * (1) De kromming van een bocht en de omvang van de bijbehorende 'point bar', de plaat in de binnenbocht, zijn van invloed op de dimensies (o.a. diepte) van de drempel. Een afname van de hoogte van een plaat in de binnenbocht heeft een ondiepere en langere drempel tot gevolg.
De toetsing vindt plaats door een relatie te leggen tussen de omvang van verschillende drempel-'point bar'-systemen in bijvoorbeeld de Oosterschelde en de Waddenzee.
- * (2) De afstand tussen de 'crossings' van de stroomdraden en het ruimtelijke verschil tussen de stroomdraden van de eb en de vloed is direct van invloed op de vorm (diepte, lengte en breedte) van de drempel.
De toetsing vindt plaats door een relatie tussen de verschillende parameters van drempels in verschillende systemen in de Oosterschelde en de Waddenzee te leggen.
- * Drempels in de hoofdgeul zijn beginnende 'middle bars'. Indien de Westerschelde vrij kon meanderen zou een toename van de divergentie van de hoofdstroming plaatsvinden en uiteindelijk zouden de drempels als een 'middle bar' boven de gemiddelde waterspiegel uitgroeien en water zou er om heen stromen.

De toetsing vindt plaats door analyse van de historische ontwikkeling gedurende circa 100 jaar van drempels in vrij meanderende systemen zoals de Waddenzee en mogelijk ook de Oosterschelde.

- * De drempels in de Westerschelde zijn minder stabiel dan de bochten. De aanpassingstijd van bodemverstoringen in drempelgebieden is groter dan die in bochten.

De toetsing vindt plaats door vergelijking van de ontwikkeling van bodemverstoringen van ongeveer gelijke omvang in een bocht en op een drempel.

- * De meanderlengte van verschillende opeenvolgende geuldelen is verschillend -door grote verschillen in getijvolumina. Waar geuldelen in elkaar overgaan is het geulprofiel relatief breed (Tank, 1996).