

Het gedrag van drempels in de Westerschelde
Een conceptueel morfodynamisch model - Toetsing hypothesen

Oktober 1997

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

IMAU Rapport 97-14

Rapport voor het Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ

Project VERDIEPING-vaargeulbeheer
Projectgroep DREMPELS

Producten drempelonderzoek:

Binnen de studiereeks 'Het gedrag van drempels in de Westerschelde' zijn de volgende producten verschenen:

- Een verkennende studie. IMAU R 95-18
- Literatuurstudie en hypothesen. IMAU R 96-07
- Parameterisatie. IMAU R 96-08
- Beschrijving en analyse van metingen van de waterbeweging op en rondom de Drempel van Hansweert. IMAU R 97-01
- Beschrijving en analyse van zandtransportmetingen op en rondom de Drempel van Hansweert. IMAU R 97-08
- Beschrijving en analyse van metingen van de morfologie op en rondom de Drempel van Hansweert. IMAU R 97-09
- Een conceptueel morfodynamisch model - Toetsing hypothesen. IMAU R 97-14

Daarnaast is verschenen:

- 'The morphodynamics of a sill in the Schelde Estuary (The Netherlands) and the influence of maintenance dredging activities', 27th Congress IAHR, San Francisco, August 10-15, 1997, Proceedings Theme B, Volume 1, 695-700.
- 'Modelling the morphodynamics of a sill in the Scheldt Estuary (The Netherlands)'. Proceedings PCP Conference, Christchurch, New Zealand, September 1997.
- Toetsing hypothesen/Conceptueel morfodynamisch model Drempels van Bath en Valkenisse. (TUD stageverslag)
- Modelleren morfodynamisch gedrag van de Drempel van Hansweert. Fase 1: Modelbouw en simulatie huidige situatie. TUD, Faculteit der Civiele Techniek, Vakgroep Waterbouwkunde

Andere, nog te verschijnen, producten in het drempelonderzoek zijn:

- Evaluatie beheersalternatieven. IMAU/TUD
- Eindrapportage Drempelonderzoek. RIKZ

Voorwoord

Dit is het laatste rapport van het geomorfologische deel van het onderzoek naar drempels in de Westerschelde. Dit onderzoek is in het voorjaar van 1995 door Directie Zeeland opgestart in het kader van het toen net ondertekende verdrag tussen België en Nederland inzake de verdieping 48'/43' van de Westerschelde. Het drempelonderzoek maakt sinds 1 januari 1997 deel uit van het project VERDIEPING-vaargeulbeheer. Het drempelonderzoek is een gezamenlijk project van het Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ, de Technische Universiteit Delft (TUD) en de Universiteit Utrecht (UU). Het project wordt in opdracht van het Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ - Rijkswaterstaat/Directie Zeeland uitgevoerd.

Het deel van het drempelonderzoek dat uitbesteed is aan de Universiteit Utrecht wordt uitgevoerd bij het RIKZ in Middelburg. Daar vindt ook de dagelijkse begeleiding van het Utrechtse onderzoek plaats.

Het onderzoek naar het morfodynamisch gedrag van drempels in de Westerschelde is een direct vervolg op de in het project OOSTWEST (Vroon et al., 1997) verkregen inzichten in het fysisch systeem van de Westerschelde in het algemeen en het in 1994 gerapporteerde onderzoek naar drempels door het ingenieursbureau Svašek (Bliek en Ruijter, 1994) in het bijzonder.

Mijn directe begeleiders ir A. Langerak, drs H. Verbeek (projectleider) (beiden RIKZ) en dr J.H. van den Berg (UU), de begeleidingsgroep bestaande uit dr ir J. van de Graaff en ir M.D. Groenewoud (beiden TUD) en de collega's ir. M.H.P. Jansen (Ingenieursbureau Svašek) en C.A.H. (Koen) Wouters (afstudeerder en kamergenoot) wil ik bedanken voor hun inzet en prettige samenwerking in deze fase van het drempelonderzoek.

Middelburg, oktober 1997

‘Een der doelen van de stuw (boven Antwerpen) zou dus zijn de baggerwerken beneden Antwerpen zooveel mogelijk te beperken, zulks gedeeltelijk door den spuistroom, doch grootendeels door het doen ophouden van de plaatselijke zandstromen’.

Van Veen, 1944

Inhoud

Lijst van figuren

Lijst van tabellen

1	Inleiding	1
1.1	Kader	1
1.2	Doelstelling	2
2	Toetsing hypothesen	3
2.1	Inleiding	3
2.2	Waterbeweging	5
2.2.1	Inleiding	5
2.2.1	Hoofdstroming	5
2.2.2	Secundaire stroming	17
2.3	Sedimenttransport	26
2.4	Morfologie	43
3	Een conceptueel morfodynamisch model	47
3.1	Inleiding	47
3.2	Het model	47
3.3	Conceptueel morfodynamisch model van de Drempel van Hansweert	52
4	Discussie	55
5	Conclusies	57
6	Aanbevelingen	59
	Literatuur	61

Lijst van figuren

- Figuur 2.1 Meetlokaties metingen op de Drempel van Hansweert: dwarsraaien
- Figuur 2.2 Meetlokaties metingen op de Drempel van Hansweert: langsraaien F, G, H en J
- Figuur 2.3 Meetlokaties metingen op de Drempel van Hansweert: langsraai M
- Figuur 2.4 Getij-asymmetrie van het horizontale getij: stroomsnelheden tijdens een getijcyclus
- Figuur 2.5 Residueel zandtransport door onder- en oververzadigde getijstromen in de aanloop naar een te ruime drempel
- Figuur 3.1 Schema van het morfodynamisch model
- Figuur 3.2 Conceptueel morfodynamisch model van drempels in de Westerschelde. A Mechanismen en B. Processen

Lijst van tabellen

- Tabel 2.1 Overzicht subhypothesen en relatie met hoofdhypothesen
- Tabel 2.2 Langsverhangen ($\times 10^{-5}$ m/m) in de bocht rondom Plaat van Ossensisse en op de Drempel van Hansweert
- Tabel 2.3 Gemeten versnelling en vertraging (-) van de stroomsnelheden (in m/s) in binnen- en buitenbocht op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert tussen de raaien B en C
- Tabel 2.4 Overzicht beoordeling van de getoetste hypothesen

1 Inleiding

1.1 Kader

In het overgangsgebied tussen twee bochten is een meanderende geul relatief ondiep. Op plaatsen waar deze natuurlijke ondiepten een belemmering opleveren voor de scheepvaart spreekt men van drempels. In de Westerschelde, gelegen in ZW Nederland, komen drempels voor in de vaarweg naar de zeehaven van Antwerpen. De drempels vormen daar een probleem voor de steeds dieper stekende schepen en moeten daarom door middel van baggerwerk worden verdiept. De baggerwerkzaamheden om voldoende diepte te onderhouden, zijn in het oosten van de Westerschelde geconcentreerd en hebben jaarlijks een omvang van circa $9 \cdot 10^6$ m³. De '48/'43- verdieping, die naar verwachting in 1997 start, leidt aanvankelijk tot een baggerinspanning van $17 \cdot 10^6$ m³ per jaar. Na de verdieping, die 4 jaar duurt, zal het onderhoudsbaggerwerk stabiliseren op $14 \cdot 10^6$ m³ per jaar (Huijs, 1997). Deze toename van het bagger- en stortwerk betekent een nog grotere 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, waarbij men het natuurlijk karakter van de Westerschelde zoveel mogelijk wil behouden zonder dat daarbij de maatschappelijke functies aangetast worden. Om de druk op het fysisch systeem van de Westerschelde te reduceren worden door Rijkswaterstaat/Directie Zeeland beheersalternatieven, die de baggerinspanning verminderen bij een voldoende diepe drempel, onderzocht. Dit onderzoek vindt plaats binnen het project VERDIEPING.

De beheersalternatieven die overwogen worden zijn: het verder naar het westen storten van specie, de concentratie van de zandwinning in het oosten van de Westerschelde, de vergroting van de komberging door ontpolderen, harde maatregelen zoals het aanleggen van (onderwater-) leidammen om de stroming over een drempel te concentreren en het morfologisch baggeren en storten. Bij morfologisch baggeren en storten wordt gedacht aan het op overdiepte brengen van de drempel, het midden op de drempel in de vaargeul baggeren en beïnvloeding van de lokale debietverdeling door het volstorten van nevengeulen. Om de gevolgen van deze alternatieven op de baggerinspanning juist te kunnen inschatten, is kennis nodig over het morfologisch gedrag van een drempel.

De doelstelling van het onderzoek naar het gedrag van drempels in de Westerschelde luidt:

Het verkrijgen van inzicht in de morfodynamische 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.

In dit rapport worden de hypothesen over het morfodynamisch gedrag van de Drempel van Hansweert (Tank, 1996a) getoetst en een conceptueel denkmodel van een drempel verwoord.

1.2 Doelstelling

Om inzicht te verkrijgen in het gedrag van drempels in de Westerschelde is een aantal metingen van de waterbeweging, zandtransporten en de morfologie verricht op en rondom de Drempel van Hansweert. De beschrijving en analyse van deze metingen is te vinden in de volgende rapporten: Tank (1997a), Tank (1997b) en Tank (1997c). De Drempel van Hansweert is een grote drempel in het midden van het Nederlands deel van het estuarium waar jaarlijks $2,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ wordt gebaggerd (Huijs, 1997).

De doelstelling van dit rapport is de formulering van een conceptueel morfodynamisch denkmodel van de Drempel van Hansweert. Om tot formulering hiervan te komen worden de hypothesen over dit gedrag die al eerder in Tank (1996a) zijn verwoord, getoetst.

Leeswijzer

In hoofdstuk 2 worden de hypothesen getoetst. Om de bewijsvoering in dit hoofdstuk in alle details te kunnen volgen, wordt aanbevolen bovengenoemde rapporten (Tank, 1997a, 1997b en 1997c) bij de hand te hebben. In hoofdstuk 3 wordt een morfodynamisch model van een drempel geformuleerd. Dit model vormt de **kern** van dit rapport. Als voorbeeld wordt het denkmodel van de Drempel van Hansweert gepresenteerd. In hoofdstuk 4 worden de resultaten uit dit rapport bediscussieerd. In hoofdstuk 5 volgen de belangrijkste conclusies en tenslotte zijn in hoofdstuk 6 enkele aanbevelingen voor nader onderzoek genoemd.

2 Toetsing hypothesen

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de hypothesen uit Tank (1996a) over het gedrag van de Drempel van Hansweert getoetst.

Er zijn destijds 4 hoofdhypothesen opgesteld die weer onderverdeeld zijn een aantal subhypothesen.

Hoofdhypothesen

Het morfodynamisch gedrag van de Drempel van Hansweert 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 dan wel 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 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 de stroomsnelheid van 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 daardoor 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 hetgeen erosie tot gevolg heeft.

In de hierna volgende paragrafen in dit hoofdstuk worden de subhypothesen getoetst. De subhypothesen zijn gerangschikt onder de noemers waterbeweging, sedimenttransport en morfologie. In tabel 2.1 staat van elke subhypothese de relatie de hoofdhypothese. Per subhypothese volgt een korte nadere uitleg van de subhypothese, wordt de toetsingswijze omschreven, komen de resultaten aan bod en tenslotte volgen de conclusies. Bij de toetsing wordt meestal naar één karakteristiek meetpunt verwezen. Niet alle subhypothesen worden getoetst. De reden hiervoor wordt vermeld. De subhypothesen betreffende de morfologie zijn geen van alle getoetst omdat gegevens hiervoor ontbraken, en/of de inspanning te groot zou

Subhypothese		Relatie met hoofdhypothesen			
Code	Omschrijving	1	2	3	4
W1	divergentie/afname stroomsnelheid	X			X
W2	afname stroomsnelheid	X		X	
W3	langsverhang	X			X
W4	verdeling stroomsnelheid in bocht		X		X
W5	vertraging stroomsnelheid doortij/springtij	X			X
SEC1	demping secundaire stroming	X		X	
SEC2	ontwikkeling secundaire stroming	X			
SEC3	aantal cellen met secundaire stroming	X			
SEC4	invloed platen op secundaire stroming	X			
SEC5	cel met secundaire stroming door stroming over plaat	X			
SEC6	grootte secundaire stroming	X			
SED1	zandtransport door secundaire stroming	X			X
SED2	invloed demping secundaire stroming op zandtransport	X			X
SED3	zandtransport wordt niet beïnvloed door secundaire stroming	X			X
SED4	patroon zandtransport op drempel	X			X
SED5	aanzandingspatroon door afname/toename stroomsnelheid	X			
SED6	aanzanding in doortij/springtij cyclus	X			
SED7	aanzanding in baggervak	X			
SED8	aanzandingspatroon in bocht				X
SED9	aanzandingspatroon in bocht door secundaire stroming	X			X
SED10	aanzandingspatroon door langsstroming				X
SED11	aanzandingspatroon door secundaire stroming				X
SED12	mechanismen voor residueel zandtransport				X
M1	morfologie bepaald door langsstroming				
M2	dimensies platen hebben invloed op dimensies drempel				
M3	ruimtelijke scheiding 'talwegs' eb en vloed hebben invloed op de morfologie				
M4	drempels zijn beginnende 'middle bars'				
M5	drempels minder stabiel dan bochten				
M6	meanderlengte beïnvloedt drempel				

Tabel 2.1 Overzicht subhypothesen en relatie met hoofdhypothesen.
De hypothesen voorzien van een of meer kruisjes zijn getoetst.

zijn en/of het belang van de subhypothese sinds het opstellen ervan is afgenomen door recentere inzichten.

De toetsing is gebaseerd op de beschrijving en analyse uit eerdere rapporten. Bij de toetsing wordt dan ook veelal verwezen naar figuren in die eerdere rapporten. Het is dus raadzaam om deze rapporten bij de hand te hebben om de bewijsvoering in dit rapport nauwgezet te volgen. Dit rapport kan ook op zichzelf staand gelezen worden, waarbij enige voorkennis wel essentieel is.

Het getal 1 tot en met 4 voor de sub-hypothese geeft aan op welke van de hierboven genoemde hoofdhypothese de subhypothese betrekking heeft (zie ook tabel 2.1).

Na de toetsing van de subhypothesen worden de vier hoofdhypothesen getoetst.

2.2 Waterbeweging

2.2.1 Inleiding

De waterbeweging is onderverdeeld in hoofd- en secundaire stroming. De hoofdstroming is hier gedefinieerd als de over de waterdiepte gemiddelde stroming. Met de term secundaire stroming wordt hier lokale stroming loodrecht op de diepte gemiddelde hoofdstroomvector bedoeld *in een meetpunt*. Over de verticaal gemiddeld is de secundaire stroming 0 m/s (zie ook: Tank, 1997a).

In figuur 2.1 t/m 2.3 staan de lokaties van de verschillende meetraaien en -punten aangegeven. In onderstaande tekst komen deze raaien en punten regelmatig aan de orde en het dient als houvast voor de lezer.

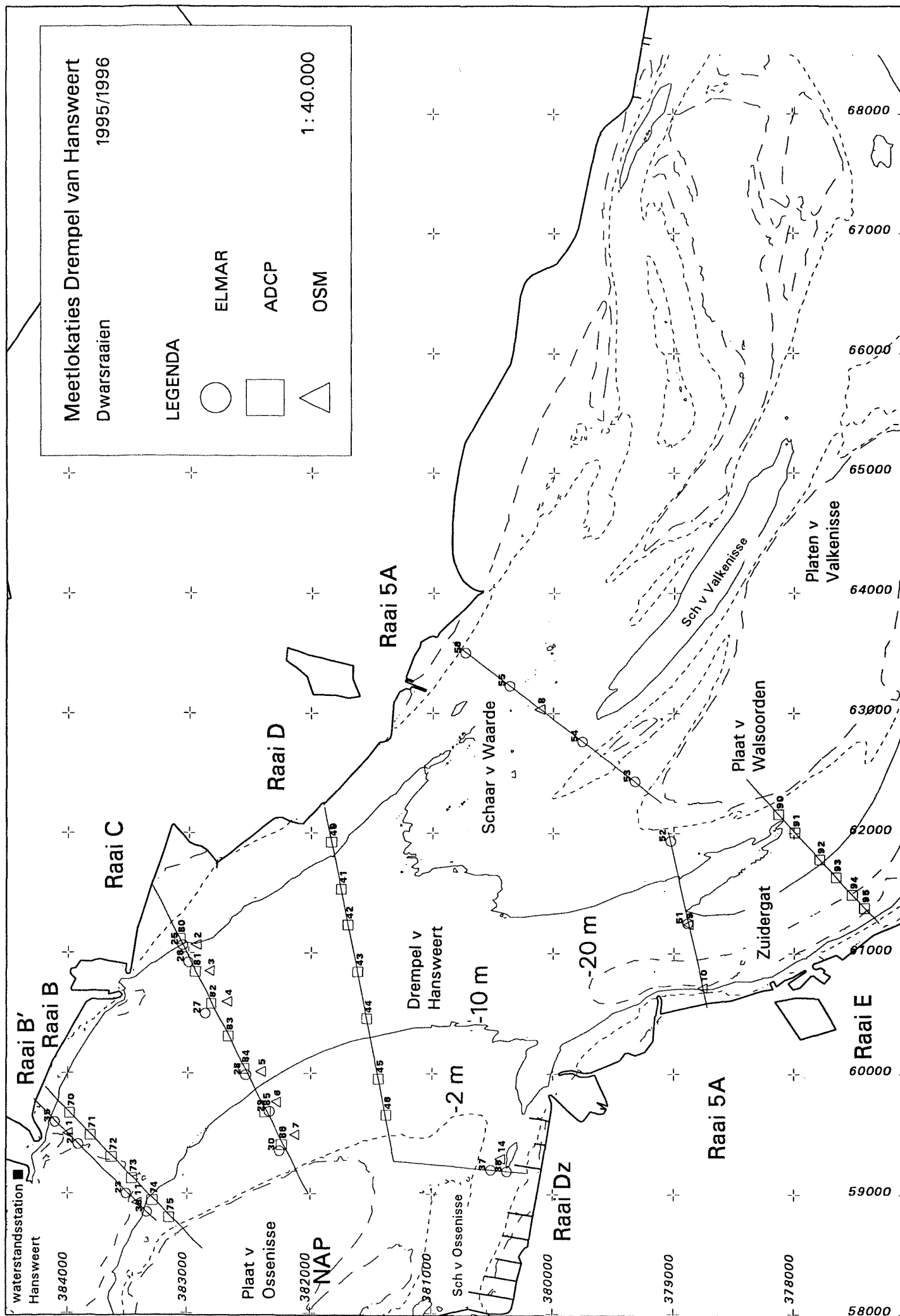
2.2.1 Hoofdstroming

- W1 (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.

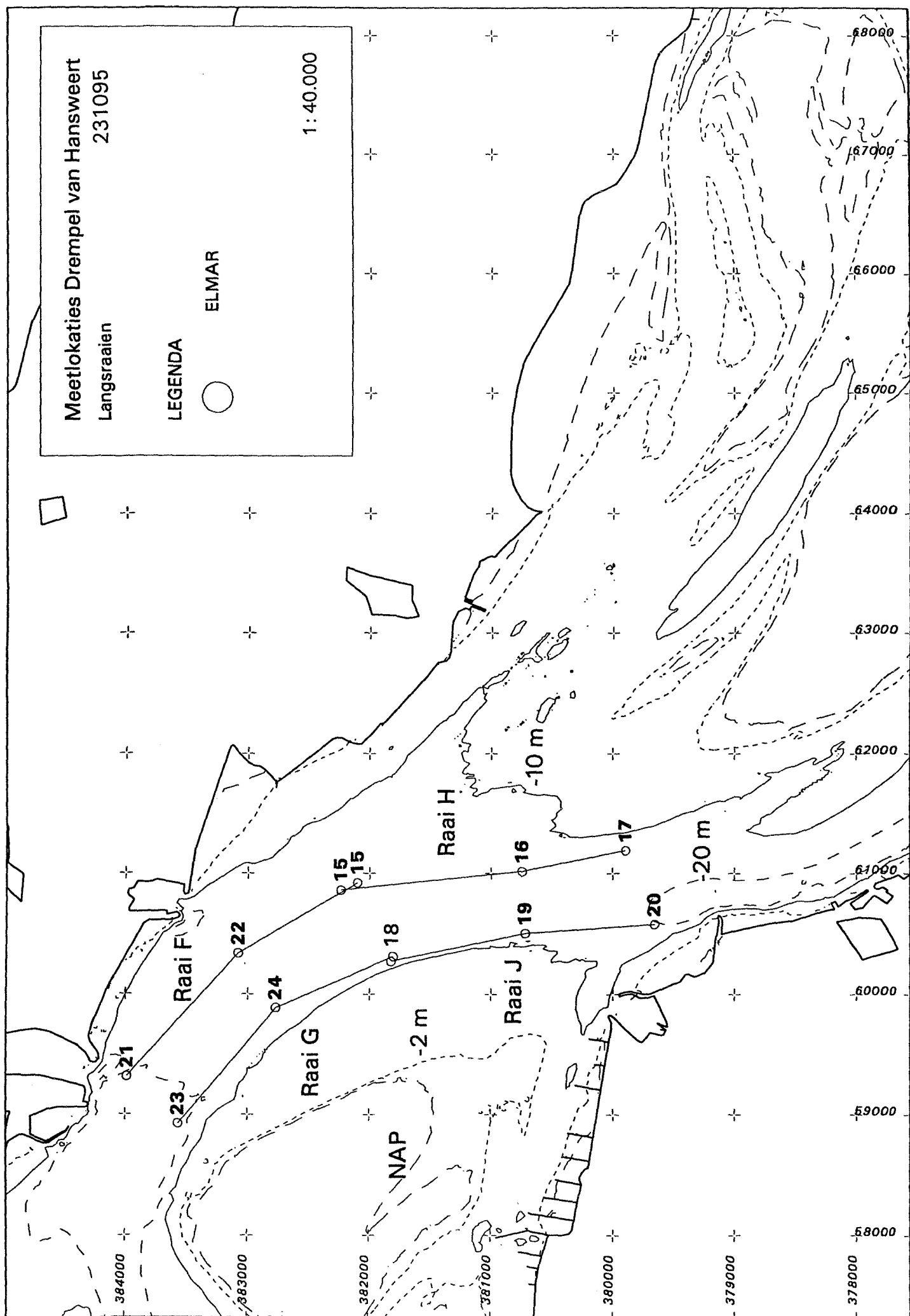
Nadere uitleg

De hypothese kan opgedeeld worden in twee delen:

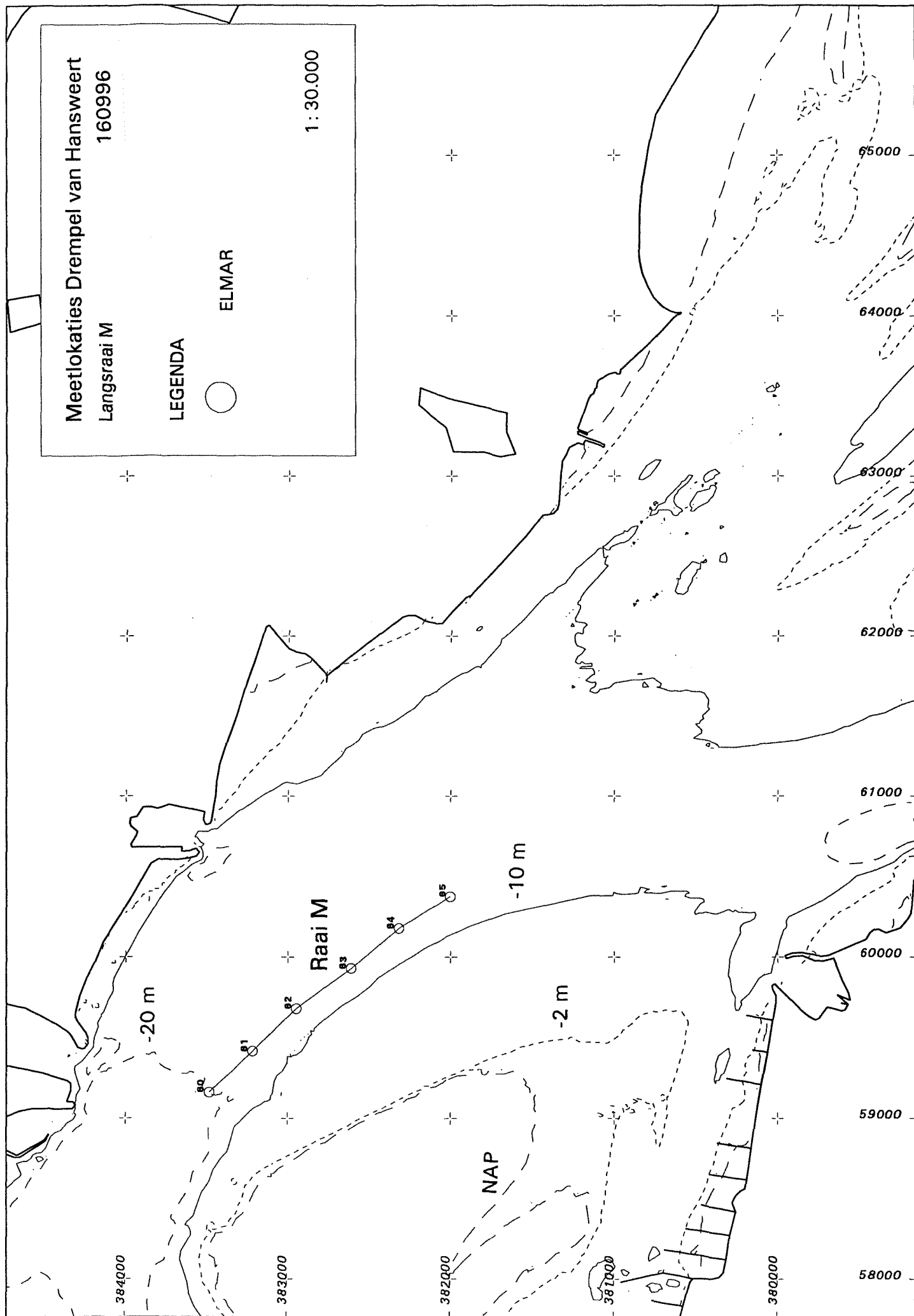
- W1a Als het water van een bocht naar een relatief recht stuk geul stroomt, vindt divergentie van de hoofdstroming plaats;
- W1b Als water van een bocht naar een relatief recht stuk geul stroomt, neemt de stroomsnelheid af.



Figuur 2.1



Figuur 2.2



Figuur 2.3

Divergentie van de hoofdstroming vindt plaats op de overgang van een bocht met een relatief diep en smal geulprofiel naar de drempel met een relatief breed en ondiep geulprofiel. Als de stroming de drempel is gepasseerd convergeert de stroming weer.

Als het water een -verdiepte- drempel opstroomt neemt de stroomsnelheid af. Als het water aan de andere zijde van de drempel naar een -in evenwicht zijnde- geulbocht stroomt neemt de stroomsnelheid weer toe.

W1a Als het water van een bocht naar een relatief recht stuk geul (drempel) stroomt, vindt divergentie van de stroming plaats en convergentie aan de andere zijde van de drempel.

Toetsingswijze

De toetsing vindt plaats door het verloop van de stroomdraden van de diepte gemiddelde stroming en de dwarsstroming in een aantal dwarsraaien tussen bocht en drempel tijdens maximum eb en maximum vloed te beschouwen. De gegevens van de stroomsnelheid zijn afkomstig van metingen met ELMAR en ADCP tijdens een aantal gemiddelde springtijden. Daarnaast worden drijvermetingen tijdens maximum eb en maximum vloed ten tijde van een gemiddeld getij gebruikt. Resultaten van het 2DH waterbewegingsmodel SCALDIS100 vullen ontbrekende metingen aan.

Resultaten

De meetresultaten van de waterbeweging staan in Tank (1997a). Uit de dwarsstroming in de raaien B, C en D op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert blijkt dat de stroming tijdens maximum eb convergeert en tijdens maximum vloed daar divergeert (figuren 3.33a t/m 3.36a en 3.40a t/m 3.44a in: Tank, 1997a). Op het zuidelijke deel van de drempel vindt tijdens maximum eb divergentie plaats, zo blijkt uit drijvermetingen met twee drijvers van identieke lengte (figuur 3.19). In het kaartje met diepte gemiddelde stroomvectoren zijn deze patronen ook te zien (figuur 3.14). De divergentie op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert is veel groter dan op de zuidelijke zijde van de drempel. Tijdens maximum vloed zijn geen metingen op de zuidelijke zijde van de drempel gedaan. Gebaseerd op modelresultaten van SCALDIS100 vindt hier noch convergentie noch divergentie plaats (Bijlage B.4 in: Tank, 1995).

W1b Als het water van een bocht naar een relatief recht stuk geul (drempel) stroomt, neemt de stroomsnelheid af en als het water de drempel afstroomt, neemt de stroomsnelheid toe.

Toetsingswijze

De toetsing vindt plaats door het verloop over de drempel van Hansweert van de diepte gemiddelde stroomsnelheid te beschouwen tijdens maximum eb en vloedstroom. De gegevens zijn afkomstig van metingen met ELMAR, ADCP (tijdens gemiddelde springtijden) en drijvers (tijdens een gemiddeld getij).

Resultaten

Meetresultaten van de waterbeweging staan in Tank (1997a). Op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert neemt in de binnenbocht (raai M) tijdens maximum eb de stroomsnelheid met 0.4 m/s toe en tijdens maximum vloed met 0.6 m/s af tussen bocht en drempel (figuur 3.18). Drijvermetingen laten dit ook zien (figuur 3.19 en 3.20). Op zuidelijke zijde van de drempel is in de binnenbocht in het westen een afname van bocht naar drempel van ongeveer 0.1 m/s te zien (figuur 3.17 en figuur 3.19). De veranderingen in stroomsnelheid zoals berekend met SCALDIS100 van drempel naar bocht tijdens maximum vloed op het zuidelijke deel van de Drempel van Hansweert zijn klein (Bijlage B.4 in: Tank, 1995).

Conclusies

Op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert treedt aanzienlijke convergentie en toename van de stroomsnelheid plaats tijdens maximum ebstroom. Tijdens maximum vloedstroom vindt hier divergentie en afname van de stroomsnelheid plaats. Op de zuidelijke zijde van de Drempel van Hansweert, op de overgang naar het Zuidergat, vindt tijdens maximum ebstroom in geringe mate divergentie en afname van de stroomsnelheid plaats. Tijdens maximum vloed is de convergentie en toename van de stroomsnelheid gering dan wel afwezig.

W2 (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.

Nadere uitleg

Hypothese W2 is onder te verdelen in:

W2a Door aftapping van water door nevengeulen vertraagt de hoofdstroming op de drempel.

W2b Het (relatief) te ruime geulprofiel van de drempel veroorzaakt vertraging van de stroming naar de drempel.

Aftapping van water door nevengeulen hoeft niet per definitie tot vertraging van de stroming naar een drempel te leiden. Als op het splitsingspunt van hoofdgeul en nevengeul de morfologie in evenwicht is met het getijvolume zal geen verandering in stroomsnelheid optreden. Aftapping van water door een nevengeul beïnvloedt wel het oppervlak van het evenwichtsprofiel van een drempel (Tank, 1996b) omdat door aftapping het getijvolume over de drempel afneemt. Hypothese W2a wordt niet getoetst omdat de Drempel van Hansweert zich juist ter hoogte van het begin van de overgang naar de nevengeul bevindt. En op die overgang is het getijvolume nog niet duidelijk verdeeld tussen hoofd- en nevengeul.

Volgens Blik en Ruijter (1994) bestaat het volgende verband tussen geuloppervlak en getijvolumina in de Westerschelde:

$$DV = 14632 * A \quad 2.1$$

waarin:

DV = dominant volume; vloedvolume in vloedgeulen en ebvolume in ebgeulen (m³)
14632 = constante (m)
A = doorstroomoppervlak beneden NAP (m²)

Hiervan afgeleid is de evenwichtsparameter P:

$$P = 14632 * A/DV \quad 2.2$$

Indien $P > 1$ dan is het doorstroomoppervlak van de geul te ruim.

Door baggerwerkzaamheden is het geulprofiel op de Drempel van Hansweert te ruim voor het getijvolume. Voor een deel is een drempel ook te ruim ten gevolge van interne dominantie (Van Kleef, 1994). De hoofdgeul stroomop- en stroomafwaarts van de drempel zijn (meer) in evenwicht met het getijvolume. Daardoor zal de stroming vertragen als de stroming de drempel

opstroomt en versnellen als de stroming de drempel afstroomt.

W2b Het te ruime geulprofiel van de drempel veroorzaakt vertraging van de hoofdstroming.

Toetsingswijze

Met behulp van de eerder genoemde evenwichtsparameter van Blik en Ruijter (1994) wordt aangetoond of het dwarsprofiel van een drempel te ruim is voor het -gemeten- getijvolume. Vervolgens wordt met deze vergelijking ook berekend hoe groot de afname van de stroomsnelheid is.

Resultaten

Het dominante getijvolume omgerekend naar een gemiddeld getij in raai D, die midden op de drempel ligt, is 382.106 m^3 en het doorstroomoppervlak onder NAP is 31400 m^2 (figuur 3.47 in: Tank, 1997a). De bijbehorende evenwichtsparameter P is 1,20, dus het profiel is 20% te ruim.

Conclusies

Hypothese W2a over de beïnvloeding door aftapping door nevengeulen van het geuloppervlak van een drempel is niet getoetst door gebrekkige gegevens. De Drempel van Hansweert is 20% te ruim voor het dominante getijvolume. Hierdoor is de stroomsnelheid op een drempel lager dan in de aanpalende hoofdgeulen (Hypothese W2b).

- W3 (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.

Nadere uitleg

De hypothese W3 is op te delen tweeën:

- W3a Het langsverhang boven een -verdiepte- drempel is kleiner dan in bochten
 W3b Het langsverhang boven een -verdiepte- drempel neemt af bij extra verruiming van die drempel.

De stroomsnelheid hangt af van het (langs-)verhang. Omdat -verdiepte- drempels te ruim zijn voor het getijvolume zullen daar lagere stroomsnelheden optreden dan in de bochten stroomopwaarts en stroomafwaarts ervan. Dit patroon in stroomsnelheden uit zich ook in het langsverhang: op drempels en in bochten respectievelijk relatief laag en relatief hoog.

De deelhypothese W3b vergt relatief grote inspanning omdat hiervoor apart een modelberekening moet worden uitgevoerd en is daarom niet onderzocht. Dat door een extra verdieping van een drempel de stroomsnelheden en ook het langsverhang op de drempel zullen afnemen is echter zeer waarschijnlijk.

W3a Het langsverhang boven een -verdiepte- drempel is kleiner dan in bochten.

Toetsingswijze

Langsverhangen zijn niet gemeten. De toetsing vindt plaats m.b.v. de langsverhangen die worden afgeleid uit met Scaldis100 berekende waterstanden tijdens maximum eb- en vloedstroom. De verhangen tussen bocht en drempel worden daarbij vergeleken. De toetsing vindt plaats voor de situatie tijdens maximum stroom bij een gemiddeld springtij.

Resultaten

In tabel 2.2 staan de langsverhangen in de bocht rondom de Plaat van Ossenis en over de Drempel van Hansweert tijdens maximum eb en maximum vloed stroom. De langsverhangen zijn berekend langs de NAP -10 m dieptelijn.

	Bocht	Drempel	Bron
Maximum eb	2.7	3.8	Bijlage D.4 (Tank, 1995)
Maximum vloed	2.7	1.9	Bijlage D.3 (Tank, 1995)

Tabel 2.2 Langsverhangen ($\times 10^{-5}$ m/m) in de bocht rondom Plaat van Ossenis en op de Drempel van Hansweert

Tijdens maximum vloed is het langsverhang in de bocht groter dan boven de drempel. Tijdens maximum eb is dit niet het geval. Dat tijdens maximum eb het langsverhang in de bochten geringer is dan op de drempel kan ook verklaard worden doordat het niet overal gelijktijdig maximum stroom is: op het moment van maximum stroom boven de drempel is het nog geen maximum stroom in de bocht.

Conclusies

Tijdens maximum vloed is het langsverhang in de bochten groter dan op de drempel. Tijdens maximum eb is dat (nog) niet aangetoond. De hypothese W3b over de invloed van een verdieping van een drempel op het langsverhang is niet aangetoond.

- W4 (2,4) 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 doordat de stroomdraad naar de buitenbocht is overgestoken.

Nadere uitleg

In de tweede helft van een bocht steekt -in ieder geval in rivieren- de stroomdraad over van de binnenbocht naar de buitenbocht. De verdeling over de breedte van de geul van de stroomsnelheid van de langsstroming in het tweede deel van de bocht is van invloed op het sedimentatiepatroon en daarmee op de morfologie van de Drempel van Hansweert.

Toetsingswijze

De toetsing vindt plaats m.b.v het verloop in langsrichting van de hoofdstroomsnelheden in buiten- en binnenbocht. Daartoe zijn drijfvermetingen in binnen- en buitenbocht tijdens maximum stroom tijdens een gemiddeld getij beschikbaar.

Resultaten

Maximum eb - Gemiddeld getij

Tijdens maximum eb is de stroomsnelheid in de buitenbocht van het Zuidergat circa 0.3 m/s groter dan in de binnenbocht (figuur 3.19 in: Tank, 1997a). Als het ebwater de drempel opstroomt neemt het water uit de buitenbocht absoluut 0.1 m/s en relatief 10 % in stroomsnelheid af. In de binnenbocht is de afname in stroomsnelheid absoluut enkele 0.01 m/s en relatief enkele %.

Maximum vloed - Gemiddeld getij

Het vloedwater uit de bocht om de Plaat van Ossenissee heeft, anders dan in de hypothese is voorspeld, in de binnenbocht een stroomsnelheid die 0.05 à 0.1 m/s hoger is dan in de buitenbocht (figuur 3.20 in: Tank, 1997a). Het vloedwater dat de Drempel van Hansweert opstroomt neemt zowel in de binnenbocht als in de buitenbocht met 35% in stroomsnelheid af.

Conclusies

Tijdens maximum eb gedurende een gemiddeld getij treden in het Zuidergat stroomsnelheden in de buitenbocht op. Tijdens maximum vloed treden in de bocht rondom de Plaat van Ossenissee in de binnenbocht de hoogste stroomsnelheden op. Als het water de Drempel van Hansweert opstroomt neemt de stroomsnelheid in binnen- en buitenbocht met respectievelijk 0 en 10% af; tijdens maximum vloed is de afname in binnen- en buitenbocht 35%.

W5 (1,4) De hoofdstroming op een verdiepte drempel in de hoofdgeul afname tijdens een springtij relatief meer dan tijdens een doottij.

Nadere uitleg

Tijdens een springtij zijn de stroomsnelheden hoger dan tijdens een doottij. De afname van de stroomsnelheid op de drempel zal dan ook groter zijn tijdens een springtij dan tijdens doottij. Hierdoor is de relatieve onderverzadiging van de waterkolom met sediment tijdens springtij groter dan tijdens doottij. Daardoor zal tijdens een springtij op de Drempel van Hansweert meer sedimentatie optreden dan tijdens een doottij.

Toetsingswijze

De toetsing vindt plaats m.b.v. een analyse van de gemeten stroomsnelheden van de hoofdstroming tussen bocht en drempel. De stroomsnelheden in de binnenbocht en buitenbocht worden met elkaar vergeleken tijdens een doottij en een springtij. De toetsing vindt plaats voor de situatie tijdens maximum stroom.

Resultaten

De gemeten veranderingen in de stroomsnelheden in binnen- en buitenbocht in raai B en C op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert tijdens een doottij en een springtij (figuren 3.1 t/m 3.4 in: Tank, 1997a) zijn samengevat in tabel 2.3.

		doottij	springtij
Maximum eb	binnenbocht	0.30	0.15
	buitenbocht	0.20	0.15
Maximum vloed	binnenbocht	-0.30	-0.30
	buitenbocht	-0.40	0.00

Tabel 2.3 Gemeten toe- en afname (-) van de stroomsnelheden (in m/s) in binnen- en buitenbocht op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert tussen de raaien B en C

Uit de tabel blijkt dat de versnellingen en vertragingen van de stroomsnelheid tijdens doottij tussen de 50 en 100% groter zijn dan tijdens springtij. De oorzaak hiervan ligt in het feit dat de verdiepte Drempel van Hansweert voor het getijvolume tijdens een springtij minder te ruim is dan voor het kleinere getijvolume tijdens een doottij.

Conclusies

De afname (en toename) van de stroomsnelheid is tijdens een doottij tussen de 50% en 100% groter dan tijdens een springtij.

2.2.2 Secundaire stroming

SEC1 (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.

Nadere uitleg

Hypothese SEC1 is onder te verdelen in drie deelhypothesen:

- SEC1a Midden op de drempel is de secundaire stroming niet aanwezig;
- SEC1b De secundaire stroming heeft een geringe aanpassingslengte in verhouding tot de lengte van de geulen van de Westerschelde en
- SEC1c Demping van de secundaire stroming wordt versterkt door aftapping door nevengeulen.

Secundaire stroming in de Westerschelde ontstaat door centrifugaal krachten in bochten en door de Coriolis versnelling. Het aandeel van de centrifugaal krachten is daarbij groter dan dat van de Coriolis versnelling. Stroomafwaarts van een bocht, als de centrifugaal krachten geen rol meer spelen, dempt de secundaire stroming volgens Booij en Kalkwijk (1986; zie ook: Tank, 1995) uit met een aanpassingslengte (L) van:

$$L = 18 * h \quad 2.3$$

waarin:

- 18 = constante (-)
- h = waterdiepte (m).

Voor een waterdiepte van 20 m betekent dit dat op bijna 400 m stroomafwaarts van een bocht de secundaire stroming een sterkte heeft van 33% van de oorspronkelijke waarde aan het eind van de bocht.

Door de centrifugaalkrachten en Coriolis versnelling ontstaat een dwarsverhang tegen de oever van de buitenbocht aan. Op plaatsen waar nevengeulen aftakken kan er geen dwarsverhang meer tegen de oever worden opgebouwd omdat het water door de nevengeulen wordt afgetapt, waardoor de secundaire stroming in de hoofdgeul verdwijnt.

SEC1a Midden op de drempel is de secundaire stroming niet aanwezig.

Toetsingswijze

De grootte van de gemeten secundaire stroming in de dwarsraai D, die vrijwel over het midden van de Drempel van Hansweert ligt, tijdens een gemiddeld springtij wordt bekeken. De secundaire stroming wordt bekeken tijdens maximum eb- en vloedstroom.

Resultaten

Maximum eb

Midden op de Drempel van Hansweert zijn tijdens maximum eb 3 cellen met secundaire stroming aanwezig (figuur 3.37 in: Tank, 1997a): een cel op het plateau ten oosten van de Plaat van Ossenissee en twee cellen naast elkaar in de diepe geul waarvan in de cel in de binnenbocht nabij de bodem de secundaire stroming naar de binnenbocht is gericht. De maximale grootte van de secundaire stroming nabij de bodem is 0.25 m/s en gemiddeld tussen de 0.05 en 0.10 m/s.

Maximum vloed

Midden op de drempel van Hansweert zijn tijdens maximum vloed 3 cellen met secundaire stroming aanwezig (figuur 3.44 in: Tank, 1997a). Een cel is aanwezig op het plateau ten oosten van de Plaat van Ossenissee en twee cellen boven elkaar in de diepe geul. De cel in de diepe geul is vlak boven de bodem naar de binnenbocht gericht. Nabij de bodem is de maximale snelheid van de secundaire stroming 0.1 m/s en gemiddelde 0.03 m/s.

Secundaire stroming komt voor op het midden van de Drempel van Hansweert. Deze secundaire stroming is het gevolg van secundaire stroming uit een bocht die nog niet volledig is uitgedempt of van de Coriolis-versnelling die ook en rechte stukken werkzaam is.

SEC1b De secundaire stroming heeft een geringe aanpassingslengte in verhouding tot de lengte van de geulen

Toetsingswijze

De demping van de secundaire stroming van bocht naar drempel wordt op twee wijzen onderzocht: met behulp van bovenstaande vergelijking 2.3 van Booij en Kalkwijk (1986) en met behulp van metingen. Bij de metingen wordt het verloop van de secundaire stroming over de drempel onderzocht waarbij de snelheid van de secundaire stroming vlak boven de bodem een maat is voor de intensiteit van de secundaire stroming.

Resultaten

Uit de vergelijking van Booij en Kalkwijk (1986) blijkt dat bij waterdiepten van 20 m de secundaire stroming na 400 m nog 33% van zijn oorspronkelijke waarde heeft. Omdat in het drempelgebied over een lengte van ruim 1000 m de geul vrijwel recht is kan verwacht worden dat de secundaire stroming midden op de Drempel van Hansweert vrijwel volledig is uitge-

dempt.

Uit metingen in de langsraaien H en J op de zuidelijke zijde van de Drempel van Hansweert blijkt dat, tijdens maximum eb tijdens een matig ontwikkeld springtij, van de meetpunten 20/17 tot de meetpunten 19/16 de secundaire stroming vlak boven de bodem van gemiddeld 0.03 m/s tot gemiddeld 0.6 m/s toeneemt (figuur 3.39a in: Tank, 1997a). Overigens ligt het puntenpaar 20/17 aan het noordelijke einde van de bocht van het Zuidergat.

In de langsraaien F en G op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert vindt op de overgang van bocht naar drempel een afname van de secundaire stroming vlak boven de bodem plaats van 0.15 m/s in meetpunten 23/21 naar 0.03 m/s in meetpunten 18/15 (figuur 3.45a in: Tank, 1997a).

SEC1c Damping van de secundaire stroming wordt versterkt door aftapping door nevengeulen

Toetsingswijze

De nevengeulen nabij de Drempel van Hansweert zijn de Schaar van Waarde en de Schaar van Ossenisse. Omdat de Schaar van Waarde onder een geringe hoek van de hoofdgeul aftakt is de invloed ervan op de secundaire stroming tijdens vloed niet goed in te schatten. De Schaar van Ossenisse staat vrijwel loodrecht op de hoofdgeul aan het eind van het Zuidergat en de invloed van de aftappende werking op secundaire stroming tijdens eb uit het Zuidergat wordt onderzocht. Omdat gedetailleerde gelijktijdig verrichte stroommetingen rondom de Schaar van Ossenisse ontbreken worden waterstanden van het model SCALDIS100 tijdens een gemiddeld springtij gebruikt. Dwarsverhangen zijn een maat voor de secundaire stroming.

Resultaten

Tijdens maximum eb treden in het kromste deel van het Zuidergat dwarsverhangen op van maximaal 0.08 m (Bijlage C.3 in: Tank, 1995). Noordelijk hiervan, ter hoogte van het Oude Hoofd van Walsoorden zijn deze dwarsverhangen nagenoeg verdwenen. Nog noordelijker, op de plaats waar de Schaar van Ossenisse aftakt, is het dwarsverhang afwezig. Het kan dus niet worden aangetoond dat de aftappende werking van nevengeulen dwarsverhangen en dus secundaire stroming teniet doet.

Conclusies

Midden op de Drempel van Hansweert treden vlak boven de bodem secundaire stromingen op van gemiddeld 0.08 m/s tijdens maximum eb en gemiddeld 0.03 m/s tijdens maximum vloed. De secundaire stroming heeft theoretisch een geringe aanpassingslengte in verhouding tot de lengte dimensies van de hoofdgeul. Uit metingen blijkt wel dat, in ieder geval tijdens maximum vloed, dat de secundaire stroming van bocht naar drempel aanzienlijk dempt. De afname van de secundaire stroming door aftapping door nevengeulen kan niet aangetoond worden.

- SEC2 (1) Aan de stroomafwaartse zijde van de drempel is er nauwelijks of geen secundaire stroming; pas weer in de benedenstroomse bocht komt de secundaire stroming weer tot ontwikkeling. Op de drempel is het dus vooral de hoofdstroming die van belang is.

Nadere uitleg

Hypothese SEC2 is in twee deelhypothesen op te delen:

- SEC2a Aan de stroomafwaartse zijde van de drempel is nauwelijks secundaire stroming aanwezig en
SEC2b op de drempel is vooral de hoofdstroming van belang.

Deelhypothese SEC2a gaat ervan uit dat midden op de drempel de secundaire stroming nihil is en dat de secundaire stroming pas in de volgende bocht weer volledig tot ontwikkeling komt. Tussen drempel en bocht is de secundaire stroming dus gering. Deelhypothese SEC2b is een conclusie van SEC1 en SEC2a.

SEC2a Aan de stroomafwaartse zijde van de drempel is nauwelijks secundaire stroming aanwezig

Toetsingswijze

De toetsing vindt plaats door het verloop van de secundaire stroming in langsrichting op de benedenstroomse zijde tijdens eb en vloed (langsmeting) te bepalen. De toetsing vindt plaats tijdens maximum eb op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert. Omdat tijdens maximum vloedstroom op de zuidelijke zijde van de Drempel van Hansweert geen metingen hebben plaatsgevonden kan de secundaire stroming daar niet worden onderzocht.

Resultaten

Maximum eb

Op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert is in de raaien B en C tijdens maximum eb secundaire stroming aanwezig (figuren 3.33 t/m 3.36 in: Tank, 1997a). In raai B, dat meer in de bocht rondom de Plaat van Ossensisse ligt, zijn vlak boven de bodem de secundaire stroomsnelheden hoger dan in raai C: tijdens een doottij zijn de maximale secundaire stroomsnelheden vlak boven de bodem in raai B 0.50 m/s en in raai C 0.10 m/s.

SEC2b Op de drempel is vooral de hoofdstroming van belang.

Toetsingswijze

Stroomsnelheden van de langsstroming en de secundaire stroming midden op de drempel in de meetpunten 43 en 44 van raai D tijdens maximum stroom worden met elkaar vergeleken.

Resultaten

Maximum eb

In de meetpunten 43 en 44 die midden op de drempel van Hansweert liggen treden tijdens een gemiddeld springtij tijdens maximum eb stroomsnelheden in langsrichting op van 1.2 m/s (figuur 3.6 in: Tank, 1997a). De secundaire stroomsnelheden vlak boven de bodem zijn op dat moment gemiddeld 0.1 m/s (figuur 3.37 in: Tank, 1997a), dus ongeveer 10% van de stroomsnelheid in langsrichting.

Maximum vloed

De maximale vloedstroomsnelheden in de meetpunten 43 en 44 in raai D zijn 1.3 m/s (figuur 3.6 in: Tank, 1997a). De secundaire stroomsnelheden in die meetpunten liggen op dat moment in de orde van 0.05 m/s (figuur 3.44 in: Tank, 1997a). De secundaire stroomsnelheden zijn ongeveer 5% van de stroomsnelheden in langsrichting tijdens maximum vloed.

Conclusies

Als het water van drempel naar bocht stroomt ontwikkelt zich er reeds secundaire stroming. Dit kon voor de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert aangetoond worden voor maximum eb. Midden op de Drempel van Hansweert is de langsstroming 10 à 20 keer zo groot als de secundaire stroming. Dit wil overigens niet zeggen dat de secundaire stroming niet van belang is: de secundaire stroming is waarschijnlijk van belang voor de verdeling van het sediment over de breedte van de geul.

SEC3 (1) De secundaire stroming in de bochten in de Westerschelde bestaat waarschijnlijk uit twee cellen. De draairichting van beide cellen is verschillend.

Nadere uitleg

De hoofdcel met secundaire stroming draait zodanig dat deze nabij de bodem naar de binnenbocht gericht is. De buitenbocht cel met secundaire stroming is aanzienlijk kleiner dan de hoofdcel. Daarom is de hoofdcel van grote invloed op de verdeling van het sediment over de breedte van de geul en daarmee op sedimentatiepatronen en sedimentatiesnelheden.

Toetsingswijze

De toetsing vindt plaats m.b.v. een analyse van het patroon van de cellen van de secundaire stroming in raai B en C in de bocht rondom de Plaat van Ossenissee en in raai E in het Zuidergat. De toetsing vindt plaats tijdens maximum stroom.

Resultaten

Maximum eb

Het cellenpatroon met secundaire stroming in de bochten rondom en op de Drempel van Hansweert is complex (figuur 3.46 in: Tank, 1997a). In raai E in het Zuidergat zijn in ieder geval 3 kleine cellen te zien. In de raaien B en C zijn 2 à 3 cellen met secundaire stroming te zien. De hoofdcel maakt deel uit van het cellen-systeem en draait nabij de bodem richting de binnenbocht. In raai C is tijdens een springtijmeting kleine een buitenbocht cel te zien.

Maximum vloed

In de raaien B en C zijn tijdens maximum vloed 1 of 2 cellen met secundaire stroming te zien (figuur 3.46 in: Tank, 1997a). In het geval van twee cellen is één cel dominant en de kleinere cel draait in de buitenbocht. Opvallend is dat de grootste cel zodanig draait dat nabij de bodem de secundaire stroming naar de buitenbocht gericht is. Tijdens vloed is niet in raai E gemeten.

Conclusies

In de bochten rondom de Drempel van Hansweert is het patroon met cellen met secundaire stroming complex. Tijdens maximum eb zijn 2 à 3 cellen aanwezig waarvan de hoofdcel nabij de bodem richting de binnenbocht draait. Tijdens maximum vloed zijn 1 à 2 cellen met secundaire stroming aanwezig waarvan de hoofdcel juist nabij de bodem naar de buitenbocht gericht is.

SEC4 (1) Het patroon van secundaire stroming is maar gedurende een korte periode van ongeveer een half uur per getijfase volledig ontwikkeld; tijdens vloed bij waterstanden ruim onder HW, omdat dan de platen nog niet geheel zijn ondergelopen terwijl de stroomsnelheden maximaal zijn, waardoor de combinatie tussen kromming van de stroomdraden en snelheid van de hoofdstroming optimaal is voor het aandrijven van 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, de platen zijn inmiddels droogvallen is dat een goede voorwaarde voor het optreden van secundaire stroming.

Nadere uitleg

De secundaire stroming en het bijbehorende cellenpatroon is van belang voor de verdeling van het sediment over de breedte van de geul. Het patroon van de secundaire stroming dat die verdeling hoofdzakelijk bepaalt, zal optreden in de periode rondom maximum stroom. Het is zaak om te weten hoe lang dit patroon aanhoudt.

Toetsingswijze

Het verloop tijdens een getij van het cellenpatroon met secundaire stroming in een raai in een bocht is niet geanalyseerd omdat dat een te grote inspanning zou vergen. Wel is het verloop tijdens een getij van de grootte van de dwarsstroming vlak boven de bodem in een aantal dwarsraaien onderzocht. Maar omdat dwarsstroming niet ontleed is in divergentie/convergentie van de stroming en secundaire stroming (zie: Tank, 1997a) kan er niets over het verloop van de secundaire stroming worden gezegd.

Conclusies

De hypothese SEC4 kan niet worden getoetst omdat de analyse van het patroon met secundaire stroming gedurende een geheel getij niet is uitgevoerd. Het gebruik van de resultaten van een 3D waterbewegingsmodel (zie ook Jansen, 1997b) is hiervoor wel geschikt.

SEC5 (1) Als tijdens vloed bij waterstanden rond HW water over de platen kortsluit kan een derde cel met secundaire stroming in de binnenbocht ontstaan.

Nadere uitleg

De derde cel met secundaire stroming zal tegengesteld draaien in vergelijking met de draai-richting van de middelste hoofdcel. De derde cel met secundaire stroming beïnvloedt de verdeling van sediment over de breedte van de geul.

Toetsingswijze

De toetsing vindt plaats m.b.v. een analyse van het cellenpatroon van de secundaire stroming in enkele dwarsraaien op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert. Toetsing vindt plaats rondom maximum vloedstroom.

Resultaten

Tijdens maximum vloedstroom is alleen in raai D een derde cel in de binnenbocht aanwezig (figuur 3.46 in: Tank, 1997a). In de raaien B en C zijn 2 cellen aanwezig: een hoofdcel en een buitenbochtcel. De cel in de binnenbocht in raai D bevindt zich op het plateau ten oosten van de Plaat van Ossensisse. De cel draait nabij het oppervlak in de richting van de binnenbocht en kan daarom niet veroorzaakt zijn door water dat tijdens vloed over de Plaat van Ossensisse stroomt.

Conclusies

Een derde cel met secundaire stroming in de binnenbocht tijdens maximum vloed die aangedreven wordt door van over de Plaat van Ossensisse komend water kan niet worden aangetoond. Mogelijk ontstaat deze cel nog na maximum vloedstroom als de waterstanden nog hoger zijn. Als er dan nog een derde cel met secundaire stroming ontstaat zal deze van korte duur zijn en daarom van weinig invloed zijn op de verdeling van sediment over de breedte van de geul.

SEC6 (1) De grootte van de secundaire stroming in de hoofdcel is in scherpe bochten maximaal 0.10 m/s.

Nadere uitleg

De grootte van de secundaire stroomsnelheid bepaalt de mate waarin het sediment over de breedte van de geul wordt verdeeld.

Toetsingswijze

De toetsing vindt plaats m.b.v. een analyse van de grootte van de secundaire stroming in een optimale situatie, d.w.z. in punten vlak bij de bodem in raai B die nabij de bochtapex ligt en gedurende maximum stroom.

Resultaten

Maximum eb

Tijdens doottij komen vlak boven de bodem secundaire stroomsnelheden voor van maximaal 0.5 m/s in de binnenbocht van raai B (figuur 3.33a in: Tank, 1997a).

Maximum vloed

Tijdens doottij komen vlak boven de bodem secundaire stroomsnelheden voor van maximaal 0.1 m/s in de binnenbocht van raai B (figuur 3.40a in: Tank, 1997a).

Maximale secundaire stroomsnelheden vlak boven de bodem zullen in bochten tijdens een springtij hoger zijn.

Conclusies

Maximale secundaire stroomsnelheden vlak boven de bodem kunnen tijdens eb 0.5 m/s en tijdens vloed 0.1 m/s groot zijn.

2.3 Sedimenttransport

SED1 (1,4) Het zandtransport van buiten- naar binnenbocht als gevolg van de secundaire stroming is veel kleiner dan het transport door de hoofdstroming.

Nadere uitleg

Het zandtransport door de secundaire stroming dwars op de geul is kleiner dan het zandtransport in hoofdstroomrichting.

Toetsingswijze

De toetsing vindt plaats door vergelijking van de dwars- en langscomponent van het zandtransport vlak boven de bodem door de secundaire stroming in een aantal meetpunten dwars op de geul (dwarsmetingen). De toetsing vindt plaats voor de situatie tijdens maximum stroom ten tijde van een gemiddeld springtij.

Resultaten

In raai C midden op de drempel in meetpunt 27 treden tijdens maximum ebstroom vlak boven de bodem langstransporten op van $88 \text{ g/m}^2\text{s}$ en een secundair zandtransport op van $6 \text{ g/m}^2\text{s}$ (Figuur 3.19 en figuur 3.27 in: Tank, 1997b). Tijdens maximum vloed treden in hetzelfde meetpunt zandtransporten vlak boven de bodem op van respectievelijk $370 \text{ g/m}^2\text{s}$ en $15 \text{ g/m}^2\text{s}$ (figuur 3.20 en figuur 3.27 in: Tank, 1997).

Conclusies

Het zandtransport door de secundaire stroming vlak boven de bodem is tijdens maximum eb en maximum vloed 5 à 10 % van het zandtransport in de hoofdstroomrichting.

SED2 (1,4) De verhouding van het sedimenttransport van buiten- naar binnenbocht als gevolg van de secundaire stroming en het transport in hoofdstroomrichting neemt af op de overgang van bocht naar drempel.

Nadere uitleg

Van bocht naar drempel neemt de kromming en daarmee ook de grootte van de secundaire stroming af en het daardoor opgewekte dwarstransport neemt dan ook af.

Toetsingswijze

De toetsing vindt plaats door vergelijking van het zandtransport vlak boven de bodem door de secundaire stroming in een aantal punten tussen bocht en drempel (langsmetingen). De toetsing vindt plaats voor de situatie tijdens maximum vloedstroom.

Resultaten

Op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert neemt in stroomrichting tijdens maximum vloed van raai B' naar raai C het zandtransport in de buitenbocht af van 100 g/m².s naar 15 g/m².s (figuur 3.27 in: Tank, 1997b). Overigens zijn de metingen in beide raaien niet gelijktijdig en ook nog onder verschillende omstandigheden verricht zodat de resultaten van beide metingen niet geheel correct is. Overigens blijkt uit de metingen dat de geulen rondom de Drempel van Hansweert vaak diverse cellen met secundaire stroming bevatten die tegengesteld aan elkaar draaien.

Conclusies

Het lijkt erop dat van bocht naar drempel het zandtransport vlak boven de bodem van bocht naar drempel afneemt. Omdat er diverse cellen met secundaire stroming aanwezig zijn in de geulen hoeft dit niet automatisch te betekenen dat het zand dan naar de binnenbocht wordt getransporteerd.

SED3 (1,4) Midden op de drempel wordt het sedimenttransport bepaald door de hoofdstroming.

Nadere uitleg

Deze hypothese gaat ervan uit dat midden op de drempel de secundaire stroming uitgedempt is en dat daardoor het zandtransport door secundaire stroming te verwaarlozen is.

Toetsingswijze

De toetsing vindt plaats door een analyse van de secundaire stroming en het daardoor opgewekte zandtransport in meetpunten in het midden van de drempel. De toetsing vindt plaats voor de situatie tijdens maximum stroom.

Resultaten

Midden op de drempel zijn geen specifieke metingen uitgevoerd die bedoeld zijn om het zandtransport door de secundaire stroming te traceren (zie figuren in: Tank, 1997a). Wel blijkt dat in raai D (figuur 3.37a) en in de meetpunten 18 en 15 in de raaien H en J (figuur 3.39a) en F en G (figuur 3.45a) die min of meer midden op de drempel liggen, secundaire stroming optreedt. Te verwachten valt dat deze secundaire stroming zandtransport in dwarsrichting opwekt, zij het dat dit transport gering is in vergelijking met het zandtransport in hoofdstroomrichting.

Conclusies

Midden op de drempel wordt het zandtransport door de hoofdstroming gedomineerd; de secundaire stroming is daar klein en het zandtransport erdoor gering.

SED4 (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.

Nadere uitleg

Hypothese SED4 gaat ervan uit dat door de afname van de stroomsnelheid als het water de drempel opstroomt en de toename van de stroomsnelheid als het water de drempel afstroomt, respectievelijk sedimentatie en erosie veroorzaakt. Of er daadwerkelijk sedimentatie en erosie optreedt kan niet worden aangetoond omdat er geen bodemverschilkaarten beschikbaar zijn van een getijfase. Dit staat los van de vraag of de bodemveranderingen over een getijfase wel significant zijn.

Toetsingswijze

De toetsing vindt plaats door een analyse van het verloop van het langstransport over de drempel. De toetsing vindt plaats voor de situatie tijdens maximum stroom.

Resultaten

Op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert is in de binnenbocht in raai M tijdens een gemiddeld springtij tijdens maximum eb van drempel naar bocht een toename van het diepte geïntegreerde zandtransport te zien (figuur 3.13 in: Tank, 1997b). Tijdens maximum vloed is in raai M in de binnenbocht van bocht naar drempel een afname van het diepte geïntegreerde zandtransport te zien (figuur 3.13 in: Tank, 1997b). De toename van het diepte geïntegreerde zandtransport tijdens maximum eb en de afname ervan tijdens maximum vloed zouden respectievelijk erosie en sedimentatie tot gevolg kunnen hebben. Een andere oorzaak van de toename van het diepte geïntegreerde zandtransport tijdens maximum eb en de afname tijdens maximum vloed zouden ook het gevolg kunnen zijn van de toename en de afname van de geulbreedte waardoor de hoeveelheid zand per eenheid geulbreedte tijdens maximum eb toeneemt en tijdens maximum vloed afneemt.

Conclusies

De sedimentatie bij afname van de stroomsnelheid drempelopwaarts en de erosie bij toename van de stroomsnelheid drempelafwaarts kunnen niet worden aangetoond.

SED5 (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.

Nadere uitleg

Residueel zandtransport door onder- en oververzadiging (Storm, 1996; en ook: Tank, 1995) leidt tot bovenstaand erosie- en sedimentatiepatroon. Uit onderzoek met een 'impulsbalans' door Blik en Ruijter (1994) werd afgeleid dat een drempel wordt opgebouwd door sedimentatie tijdens vloed. Door de ebstroom wordt deze sedimentatie (voor een deel) weer opgeruimd.

Toetsingswijze

De toetsing vindt plaats door een analyse van de gradiënt van de zandtransporten over de Drempel van Hansweert tijdens de eb- en de vloedfase. Aanvullende gegevens zijn afkomstig van andere metingen.

Resultaten

Op de noordelijke zijde van de drempels is in de binnenbocht in raai M tijdens maximum eb een kleinere toename van het zandtransport aanwezig dan de afname van het zandtransport tijdens vloed (figuur 3.13 in: Tank, 1997b). Hieruit zou geconcludeerd kunnen worden dat de sedimentatie tijdens vloed groter is dan de erosie tijdens eb. Doordat de breedte van de geul niet constant is kan het verband tussen gradiënten in het zandtransport en erosie/sedimentatie niet zo sterk worden aangetoond. Dat op de noordelijke zijde van de drempel het vloedtransport groter is dan het ebtransport blijkt uit het vloedgedomineerde zandtransport in raai C (figuur 3.32 in: Tank, 1997b). Op het zuidelijk deel van de drempel zijn geen gradiënten in het zandtransport tijdens zowel eb als vloed gemeten en daardoor kan geen uitspraak gedaan worden over erosie- en sedimentatiepatronen tijdens beide getijfasen.

Conclusies

Op de noordelijke zijde van de drempel lijkt het erop dat de sedimentatie daar tijdens vloed groter is dan de erosie tijdens eb. Voor het zuidelijk deel van de drempel konden deze patronen niet worden vastgesteld. De sedimentatie op de drempel vindt voornamelijk plaats tijdens vloed omdat vloedgedomineerd zandtransport overheerst.

SED6 (1) Sedimentatie op de drempel treedt vooral op tijdens een springtij.

Nadere uitleg

De sedimentatie op een -verdiepte- drempel is het grootst tijdens een springtij omdat dan de zandtransporten vele malen groter zijn dan tijdens een gemiddeld of doodtij. Overigens valt aan de hand van de toetsing van waterbewegingshypothese W5 bovenstaande hypothese SED6 te betwifelen: daar immers zagen we dat de afname van de stroomsnelheid als het water een -verdiepte- drempel op- en afstroomt tijdens doodtij groter is dan tijdens springtij. Er kan tijdens doodtij meer sedimentatie op een drempel verwacht worden.

Toetsingswijze

De toetsing vindt plaats met behulp van bodemveranderingen gedurende doodtij- springtijcycli.

Resultaten

Uit figuur 3.13 (Tank, 1997c) blijkt dat er geen sterk verband is tussen de sedimentatie op de Drempel van Hansweert en de fase in de doodtij-springtij cyclus.

Conclusies

De hypothese dat sedimentatie op een drempel tijdens een springtij groter is dan tijdens een doodtij wordt niet door de metingen bevestigd noch tegengesproken. Het is waarschijnlijker dat juist tijdens doodtij de sedimentatie het grootst is.

SED7 (1) Het merendeel deel van de sedimentatie vindt globaal plaats op plekken waar recentelijk gebaggerd is.

Nadere uitleg

Hypothese SED7 veronderstelt dat de extra verruiming van het geulprofiel op de drempel door baggerwerkzaamheden verhoogde sedimentatie daar veroorzaakt.

Toetsingswijze

De toetsing vindt plaats met behulp van het ruimtelijk patroon van de bodemveranderingen in de periode na de baggerwerkzaamheden.

Resultaten

Uit de 'autonome' bodemontwikkeling van de Drempel van Hansweert in oktober 1995 blijkt dat in het baggervak, waar in september 1995 nog gebaggerd is, over het algemeen sedimentatie optreedt van tussen de 0.2 en 0.5 m (figuur 3.5 in: Tank, 1997c). Deze bodemveranderingen zijn significant. In het omliggende gebied treden bodemveranderingen op tussen -0.2 en 0.2 m. Deze veranderingen zijn niet significant.

Conclusies

Sedimentatie vindt met name plaats op plekken waar recentelijk gebaggerd is. Hetzelfde fenomeen is waar te nemen in berekeningen met het SUTRENCH-model: aanzanding van gebaggerde locaties (bijvoorbeeld: Van Rijn en Tan, 1985).

- SED8 (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.

Nadere uitleg

Hypothese SED8 is op te delen in 2 subhypothesen:

- SED8a In het tweede deel van de bovenstroomse bocht treedt in de buitenbocht door versnellende hoofdstroming erosie en in de binnenbocht door vertragende stroming sedimentatie op;
- SED8b Het sediment dat in de binnenbocht wordt afgezet is in de binnenbocht van het eerste deel van de bocht geërodeerd.

De eerste deelhypothese ligt in het verlengde van waterbewegingshypothese W4 waarin ervan wordt uitgegaan dat de stroomdraad halverwege een bocht van de binnenbocht naar de buitenbocht oversteekt. Hierdoor vindt in de tweede helft van de bocht in de binnenbocht afname van de stroomsnelheid plaats en in de buitenbocht toename van de stroomsnelheid. Dit zou in de binnenbocht sedimentatie en in de buitenbocht erosie tot gevolg hebben. Of deze erosie- en sedimentatiepatronen optreden hangt niet zo zeer af van toenemende en afnemende stroomsnelheid maar veeleer van het feit of de morfologie in evenwicht is met de waterbeweging. Echter door oeververdedigingen wordt de migratie van de meanderbocht belet.

De tweede deelhypothese gaat ervan uit dat er geringe uitwisseling optreedt tussen binnen- en buitenbocht en zand dat in de binnenbocht wordt geërodeerd in de binnenbocht blijft.

- SED8a In het tweede deel van de bovenstroomse bocht treedt in de buitenbocht door versnellende hoofdstroming erosie en in de binnenbocht door vertragende stroming sedimentatie op.*

Toetsingswijze

De toetsing vindt plaats door een analyse van het verloop van de stroomsnelheid en het sedimenttransport in langsricting in binnen- en buitenbocht (langsmetingen). De toetsing vindt plaats voor een situatie tijdens maximum stroom.

Resultaten

Bij hypothese W4 is al aangetoond dat in de tweede helft van de bocht rondom de Plaat van Ossensisse tijdens maximum vloed de stroomdraad niet oversteekt en in de binnenbocht blijft. Uit gelijktijdig verrichte metingen op de noordelijke zijde van de drempel van Hansweert blijkt dat zowel in de binnen- als in de buitenbocht afname van de stroomsnelheid optreedt (figuur 3.17 in: Tank, 1997a). Zowel in de binnen- als in de buitenbocht neemt het zandtransport af van bocht naar drempel tijdens maximum vloedstroom (figuren 3.11 en 3.13 in: Tank, 1997b). Omdat van bocht naar drempel de geulbreedte niet constant is, kunnen hieruit geen erosie- en

sedimentatiepatronen worden afgeleid.

SED8b Het sediment dat in de binnenbocht wordt afgezet is in de binnenbocht van het eerste deel van de bocht geërodeerd.

Toetsingswijze

In de bocht rond de Plaat van Ossenissee zijn geen metingen verricht of geanalyseerd om hypothese SED8b te toetsen. Het is overigens de vraag of afdoende metingen uitsluitsel hadden kunnen geven omtrent deze hypothese omdat in de bocht rondom de Plaat van Ossenissee een bifurcatie optreedt van een hoofdgeul (Middelgat). Dit maakt de toetsing van de hypothese er niet eenvoudiger op.

Conclusies

De metingen zijn niet afdoende om erosie- en sedimentatiepatronen op de overgang naar de drempel in binnen- en buitenbocht en in de bocht aan te tonen. Beide deelhypothesen kunnen dan ook niet getoetst worden. Hypothese SED8 gaat er van uit dat de stroomdraad in het tweede deel van de bocht oversteekt naar de buitenbocht. Eerder bleek al dat tijdens vloed de stroomdraad rondom de Plaat van Ossenissee in de binnenbocht blijft.

SED9 (1,4) De erosie in de buitenbocht wordt versterkt doordat daar de hoofdcel en buitenbocht-cel met secundaire stroming extra bodemschuifspanning en daardoor erosie veroorzaken.

Nadere uitleg

Als in een geul twee cellen met secundaire stroming voorkomen die zodanig draaien dat beide cellen nabij de bodem divergeren heeft dit 'downwelling' en daarmee extra bodemschuifspanning tot gevolg (Bathurst et al., 1979; ook: Tank, 1996b). De extra bodemschuifspanning leidt weer tot erosie. Op plaatsen waar twee cellen met secundaire stroming samenkomen ('upwelling') en nabij de bodem convergeren treedt sedimentatie op.

Toetsingswijze

Het patroon van cellen met secundaire stroming tijdens maximum stroom van 'downwelling' en 'upwelling' wordt vergeleken met de morfologie van de dwarsprofielen.

Resultaten

In enkele gevallen zoals de ELMAR-meting in raai C tijdens maximum ebstroom komt het patroon van 'downwelling' en 'upwelling' overeen met 'holes' en 'bumps' in het dwarsprofiel (figuur 3.36b in: Tank, 1997a). Maar veel vaker is er geen verband te ontdekken tussen het cellenpatroon van de secundaire stroming en de morfologie van het dwarsprofiel.

Het cellenpatroon van de secundaire stroming is niet consistent: het verandert van patroon en intensiteit binnen een getijfase, per getijfase en ook over een doottij-springtij-cyclus.

Conclusie

Een verband tussen het cellenpatroon van de secundaire stroming tijdens maximum stroom en de morfologie van een dwarsprofiel is niet aangetoond.

SED10(4) Als de hoofdstroming vanuit de bocht de -verdiepte- drempel bereikt, 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.

Nadere uitleg

De hypothese SED10 gaat ervan uit dat in de tweede deel van de bocht de stroomdraad naar de buitenbocht oversteekt en dat op plaatsen waar in het dwarsprofiel de grootste zandconcentraties optreden ook de meeste sedimentatie plaatsvindt. Als ten gevolge van het te ruime dwarsprofiel op de drempel de stroomsnelheid vertraagt, vindt er sedimentatie plaats die in de buitenbocht groter is dan in de binnenbocht.

Toetsingswijze

De toetsing vindt plaats door het patroon van het sedimenttransport tijdens maximum stroom over een drempel te beschouwen en door naar patronen in morfologische veranderingen te kijken.

Resultaten

Van de stroming uit het Zuidergat die de drempel bereikt treden tijdens maximum eb de hoogste zandtransporten in de buitenbocht op (figuren 3.10 en 3.11 in: Tank, 1997b). Het lijkt erop dat op het westelijke deel van de zuidelijke drempel geen sedimentatie optreedt omdat drempelopwaarts het zandtransport toeneemt. Het in westelijk deel van de zuidelijke drempel vindt overheersend sedimentatie plaats gedurende de maand toen er niet gebaggerd werd (figuur 3.5 in: Tank, 1997c).

Op de noordelijke zijde van de drempel steekt, zoals al eerder is opgemerkt, tijdens maximum vloed de stroomdraad niet over van de binnenbocht naar de buitenbocht (figuur 3.14 in: Tank, 1997a). Drempelopwaarts neemt van bocht naar drempel het zandtransport in de binnenbocht af (figuur 3.12 en 3.13 in: Tank, 1997b). Dit hoeft niet te duiden op sedimentatie omdat door het verruimen van het geulprofiel ook het zandtransport per eenheid geulbreedte kan afnemen. Uit de morfologische veranderingen gedurende de maand dat er niet gebaggerd werd trad in de binnenbocht overheersend sedimentatie op (figuur 3.5 in: Tank, 1997c). Net als aan de zuidzijde van de drempel komen de plaatsen binnen het dwarsprofiel waar veel aanzanding plaatsvindt overeen met de lokaties waar gebaggerd wordt. Dus logischerwijs zal daar ook de meeste sedimentatie plaatsvinden.

Conclusies

Of op plaatsen waar binnen een dwarsprofiel in een bocht waar de grootste zandtransporten optreden ook op de aansluitende delen van de drempel de grootste sedimentatie plaatsvindt, kon niet worden aangetoond, maar hoeft daarom niet minder waar te zijn.

- SED11(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 ondergeschikt aan het sedimentatiepatroon dat door de hoofdstroming veroorzaakt wordt op de stroomopwaartse zijde van een drempel.

Nadere uitleg

Hypothese SED11 is onder te verdelen in drie deelhypothesen:

- SED11a De dwarscomponent van het sedimenttransport door secundaire stroming is naar de binnenbocht gericht;
- SED11b De naar de binnenbocht gerichte dwarscomponent wekt juist op de drempel nabij de binnenbocht veel sedimentatie, en op de drempel nabij de buitenbocht, weinig sedimentatie op;
- SED11c Dit patroon is ondergeschikt aan het sedimentatiepatroon dat door de hoofdstroming veroorzaakt wordt op de stroomopwaartse zijde van een drempel.

Hypothese SED11a en SED11b gaan er van uit dat in de bochten van de hoofdgeul een cel met secundaire stroming ontstaat die zoals in rivieren nabij de bodem een zandtransport richting de binnenbocht genereert.

Deelhypothese SED11c wordt niet getoetst omdat dit al eerder aan de orde is gekomen bij de toetsing van andere hypothesen.

SED11a De dwarscomponent van het sedimenttransport door secundaire stroming is naar de binnenbocht gericht.

Toetsingswijze

De toetsing vindt plaats door gemeten zandtransporten in dwarsrichting door de secundaire stroming over een drempel te bepalen. Ook naar patronen in de cellen met secundaire stroming wordt gekeken. De toetsing vindt plaats tijdens maximum stroom.

Resultaten

Op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert zijn in raai B en C tijdens maximum eb 2 à 3 cellen met secundaire stroming en transport aanwezig. Gebaseerd op AZTM gegevens lijkt het erop dat de cel in de binnenbocht vlak boven de bodem niet naar de binnenbocht is gericht (figuur 3.27 in: Tank, 1997b). Uit ELMAR- en ADCP-metingen valt af te leiden dat de cel in de binnenbocht vlak boven de bodem juist wel een zandtransport naar de binnenbocht genereert (figuur 3.46 in: Tank, 1997a). Tijdens maximum vloed zijn ook 1 à 3 cellen met secundaire stroming aanwezig die afhankelijk van welk instrument wordt geanalyseerd wel of niet naar de binnenbocht een dwarstransport opwekken (figuur 3.46 in: Tank, 1997a en figuur 3.27 in: Tank, 1997b).

SED11b De naar de binnenbocht gerichte dwarscomponent wekt juist op de drempel nabij de binnenbocht veel sedimentatie, en op de drempel nabij de buitenbocht, weinig sedimentatie op.

Toetsingswijze

Gekeken wordt naar de grootte van zandtransporten binnen een dwarsraai op de noordelijke zijde van de drempel. Ook worden op de drempel 'autonome' sedimentatie patronen gedurende een maand in beschouwing genomen.

Resultaten

Op de noordelijke zijde van de drempel in raai B en C vinden de grootste zandtransporten tijdens zowel maximum eb als maximum vloed in de binnenbocht rondom de Plaat van Ossenissee plaats (figuur 3.9 in: Tank, 1997b). Dit hoeft niet vanzelfsprekend een gevolg te zijn van de cellen met secundaire stroming die tot een netto aanvoer van zand naar de binnenbocht leiden. Ook de veel hogere stroomsnelheden tijdens zowel eb als tijdens vloed in de binnenbocht kunnen tot grotere zandtransporten aanleiding geven. Daarnaast is ook het effect op de zandtransportverdeling over de breedte van de geul van de andere cellen met secundaire stroming niet waar te nemen.

De 'autonome' ontwikkeling van de bodem in de maand oktober 1995 laat zien dat de meeste aanzanding in de binnenbocht langs de rand van het plateau optreedt (figuur 3.5 in: Tank, 1997c). Ook dit hoeft uiteraard niet het gevolg te zijn van de secundaire stroming: de grote aanzanding in de binnenbocht wordt ook veroorzaakt doordat de geul op die plek relatief meer uit evenwicht is door de baggerwerkzaamheden aldaar.

Conclusies

De dwarscomponent van de secundaire stroming is niet in alle gevallen naar de binnenbocht gericht. Grote sedimentatie op het aan de binnenbocht grenzende deel van de drempel hoeft daarvan niet het gevolg te zijn omdat ook andere processen een rol kunnen spelen. Overigens is het uit de metingen naar voren gekomen beeld van de secundaire stroming niet consistent en daardoor onbetrouwbaar. Hypothese SED11c is niet getoetst.

SED12(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.

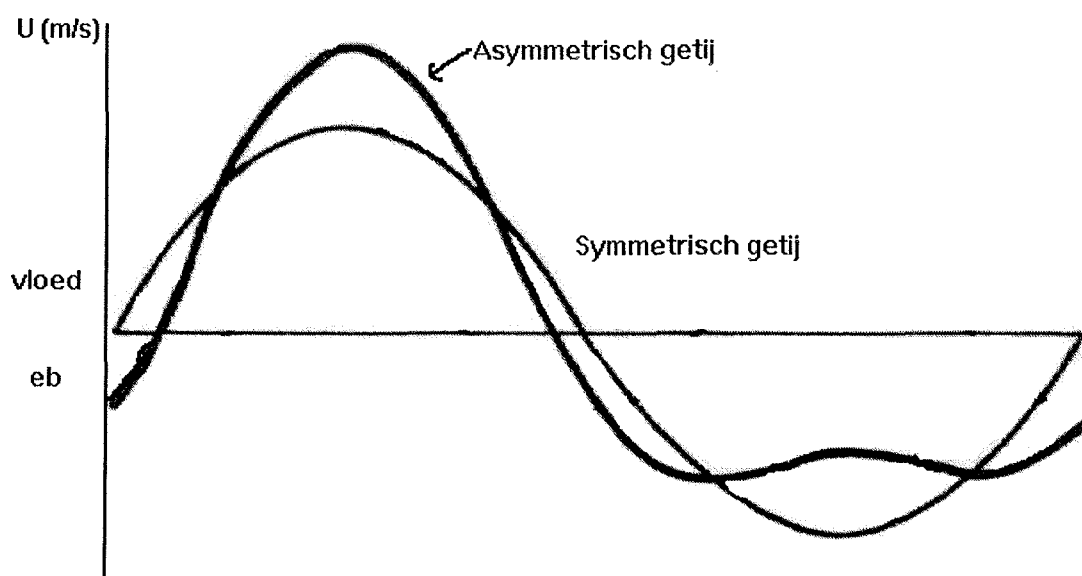
Nadere uitleg

Hypothese SED12 is te verdelen in twee subhypothesen:

SED12a Er zijn drie belangrijke mechanismen te onderscheiden die residueel sedimenttransport naar een -verdiepte- drempel veroorzaken: getij-asymmetrie, GRS en onder- en oververzadiging;

SED12b De residuele sedimenttransporten door deze drie mechanismen zijn geen actieve factor in de vorming en/of handhaving van de drempels.

Getij-asymmetrie is de vervorming van de getijgolf in ondiep water door bodemwrijving, veranderingen in de geometrie van het estuarium, reflecties van de getijgolf en de interactie tussen het getij en de komberging (Storm, 1996). In een estuarium als de Westerschelde wordt de getijgolf zodanig gedeformeerd dat de golftop smal en gepiekt is en het golfdal lang en afgevlakt. Het horizontale getij heeft de volgende stroomsnelheden: hoge maximale vloedstroomsnelheden en lage maximale ebstroomsnelheden (figuur 2.4). Het verloop tijdens een getij van de stroomsnelheden beïnvloeden het zandtransport zodanig dat er een residueel zandtransport optreedt. Over het algemeen vinden in de ondiepe geulen en het intergetijdegebied in de Westerschelde residuele zandtransporten in vloedrichting plaats en in de diepe geulen in ebrichting.

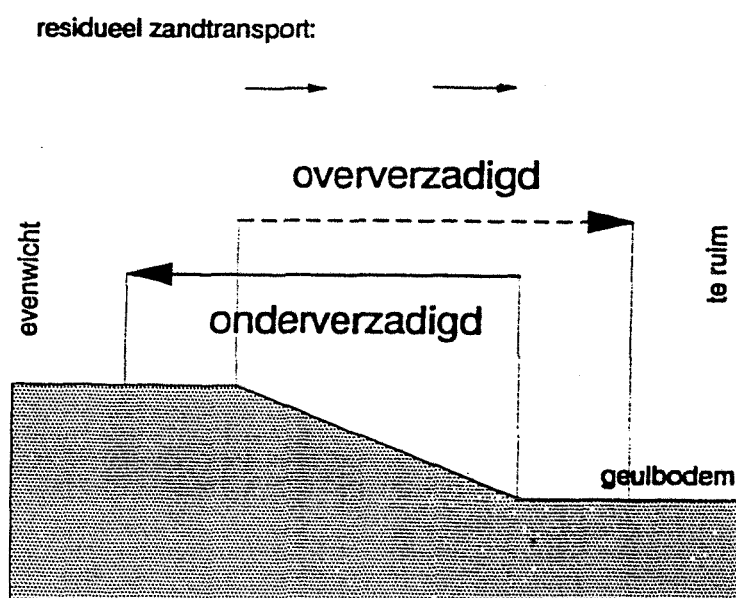


Figuur 2.4 Getij-asymmetrie van het horizontale getij: stroomsnelheden tijdens een getijcyclus

Getij Residuele Stromingen (GRS) zijn de reststromen van horizontale circulatiepatronen zoals eb- en vloedscharen of eb- en vloedgedomineerde geuldelen of neren rondom obstakels en platen (Storm, 1996). Deze horizontale circulatiepatronen ontstaan door de interactie van het horizontale getij met de geometrie. GRS is gedefinieerd als het residuele watertransport op een willekeurige lokatie in een estuarium als gevolg van het getij, gemiddeld over een doottij-springtij cyclus. De invloeden van de rivierafvoer, het weer en ongelijkheden in het getij vallen hiermee weg. In een geul van dijk tot dijk is de GRS nul: een eboverschot wordt gecompenseerd door een vloedoverschot. GRS is een factor 10 à 100 kleiner dan de maximale stroomsnelheden en ruimtelijk zeer consistent en van groot belang voor patronen in het zandtransport.

Residueel zandtransport door *onder- en oververzadiging* is een compenserende reactie van het morfologisch systeem op geulen en geuldelen die uit evenwicht zijn met de waterbeweging zoals verdiepte drempels. De theorie is afkomstig uit Storm (1996).

Onder- en oververzadiging veroorzaakt een residueel transport van een geuldeel naar een verdiepte drempel doordat het momentane zandtransport met een vertraging reageert op een verandering in de stroomsnelheid. De veranderingen in de stroomsnelheid ontstaan door relatieve veranderingen in het doorstroomoppervlak. De vertragingen en versnellingen kunnen gemiddeld over een getijfase in bepaalde geuldelen aanwezig zijn. In deze geuldelen treedt gemiddeld over een getijfase oververzadigd sedimenttransport bij vertragende stroom op en onderverzadigd sedimenttransport bij versnellende stroom op. Deze *ruimtelijke* onder- en oververzadigingen zijn gesuperponeerd op *temporele* onder- en oververzadigingen door versnellende en vertragende stroom gedurende een getij. In de getijfase met oververzadiging wordt meer zand getransporteerd in een bepaalde richting dan in de daaropvolgende fase met onderverzadiging in de andere richting. Dit leidt tot een netto zandtransport van een geul naar de -te ruime- drempel (figuur 2.5). De verstoring die het te ruime geulprofiel is, wordt als het ware uitgevlakt.



Figuur 2.5 Residueel zandtransport door onder- en oververzadigde getijstromen in de aanloop naar een te ruime drempel (uit: Storm, 1996)

Het relatieve belang van de verschillende mechanismen uit hypothese SED12a kan niet worden ingeschat omdat de analyses verschillende metingen betreffen of omdat een deel van de analyse op berekeningen is gebaseerd.

De tweede deelhypothese wordt niet getoetst omdat de hypothese niet meer relevant wordt geacht. De aanzanding en het patroon in de aanzanding wordt veroorzaakt door deze mechanismen, maar het ontstaan van drempels wordt niet door deze mechanismen bepaald en is een gevolg van de grootschalige meandervorm in de hoofdgeul van de Westerschelde.

SED12a Er zijn drie belangrijke mechanismen te onderscheiden die residueel sedimenttransport naar een verdiepte drempel veroorzaken: getij-asymmetrie, GRS en onder- en oververzadiging.

Toetsingswijze

De toetsing vindt plaats door de omvang van de drie transporten te bepalen uit de metingen. De omvang van het residueel zandtransport door getij-asymmetrie gedurende een getij kan vastgesteld worden door van een aantal meetpunten in een dwarsraai op de drempel uit de stroomsnelheden de zandtransporten te berekenen. Het effect van GRS wordt geneutraliseerd door de diepte gemiddelde stroomsnelheden in elk meetpunt met een vaste factor aan te passen, zodat de reststroom in elk meetpunt 0 m/s is.

De grootte van het zandtransport door GRS is met de transportformule van Engelund-Hansen berekend uit momentane OSM-metingen die gedurende 4 weken (2 doortij/springtij-cycli) in een dwarsraai op de Drempel van Hansweert zijn verricht. De middeling over twee doortij/springtij-cycli vond plaats om de effecten van rivierafvoer, weersinvloeden en ongelijkheden in het getij te corrigeren.

De zandtransporten door onder- en oververzadiging kunnen uit de langsmetingen in de binnenbocht op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert worden bepaald. De onder- en oververzadiging wordt ingeschat door de gemeten concentratieverticalen te vergelijken met berekende concentratieverticalen.

Resultaten

Getij-asymmetrie

In raai C op het noordelijk deel van de Drempel van Hansweert treedt tijdens een getij gedurende een springtij over de hele breedte van de geul een netto zandtransport op in vloedrichting door getij-asymmetrie (figuur 3.32 en tabel 3.4 in: Tank, 1997b).

GRS

Op de drempel in raai C vindt tijdens een periode van twee doortij/springtij-cycli een residueel zandtransport plaats in vloedrichting. Dit residueel transport wordt in het westen van raai C, op het plateau ten oosten van de Plaat van Ossensisse, (deels) gecompenseerd door een transport in ebrichting (tabel 3.2 in: Tank, 1997b). Tijdens een getij gedurende een springtij is dwars op de geul een identiek patroon te zien in het residuele transport.

Onder- en oververzadiging

Zandtransport door onder- en oververzadiging op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert kan niet 'hard' worden aangetoond (tabel 3.6 en figuur 3.36 in: Tank, 1997b). Tijdens de eb fase lijkt dit wel waarschijnlijker dan tijdens de vloed fase.

Conclusies

Op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert is het zandtransport asymmetrisch in vloedrichting. Ten gevolge van GRS is op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert zandtransport aanwezig die over een groot deel van de breedte van de geul vloedgericht is, maar in het westen op het plateau ten oosten van de Plaat van Ossensisse, ebgericht is. Zandtransport op de noordelijke zijde van de drempel naar en door de -verdiepte- drempel kan niet worden aangetoond noch worden tegengesproken. De methodiek was hiervoor niet afdoende.

Hypothese SED12b is niet getoetst.

2.4 Morfologie

Geen enkele van de hieronder volgende hypothesen over morfologie is getoetst. De reden hiervoor wordt vermeld. Wel zijn ze nader toegelicht.

- M1 (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.

Nadere uitleg

Deze hypothese is al bij de hypothesen over de waterbeweging getoetst. Daar bleek dat de zandtransporten in hoofdstroomrichting groter zijn dan in dwarsrichting door de secundaire stroming. Daarnaast is de secundaire stroming op de drempel relatief gering vergeleken met die in een bocht.

- M2 (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.

Nadere uitleg

De hypothese is gebaseerd op de invloed van de 'point bar' op de secundaire stroming: in het geval van een hoge plaat stroomt er minder water over de plaat en het water wordt gedwongen een meer gekromde baan in de geul te nemen. Hierdoor neemt de secundaire stroming in sterkte toe. Het gevolg hiervan is dat in het drempelgebied tussen twee opeenvolgende bochten de secundaire stroming over een grotere lengte aanwezig is waardoor daar ook een kenmerkend driehoekig relatief smal en ondiep geulprofiel aanwezig is.

De toetsingswijze zou als volgt kunnen zijn: 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. De verwachting is dat de inspanning die deze exercitie zou vergen in geen verhouding staat tot de toename van de kennis.

- M3 (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.

Nadere uitleg

Deze hypothese is een variatie op de hypothese over de ruimtelijke scheiding van eb- en vloedstroombanen. De toetsing kan plaats vinden door de relatie tussen de verschillende

parameters van drempels en geulen in verschillende systemen in de Oosterschelde en de Waddenzee te onderzoeken. De hypothese is niet getoetst omdat de inspanning naar verhouding erg groot zou zijn.

- M4 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.

Nadere uitleg

De toetsing kan plaats vinden 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 toetsing zou naar verhouding een te grote inspanning vergen.

- M5 De drempels in de Westerschelde zijn minder stabiel dan de bochten. De aanpassingstijd van bodemverstoringen in drempelgebieden is groter dan die in bochten.

Nadere uitleg

De toetsing kan plaats vinden door vergelijking van de ontwikkeling van bodemverstoringen van ongeveer gelijke omvang in een bocht en op een drempel. Deze hypothese is in de praktijk zeer lastig te toetsen.

- M6 De meanderlengte van verschillende opeenvolgende geuldelen is verschillend door grote verschillen in getijvolumina. Waar geuldelen in elkaar overgaan is het geulprofiel relatief breed (Tank, 1996b).

Nadere uitleg

Van west naar oost neemt in de Westerschelde het getijvolume af. Hierdoor zal van west naar oost de lengte van de opeenvolgende meanders afnemen. Daarnaast kan door aftakkende nevengeulen het getijvolume in de hoofdgeul op bepaalde punten sterk verspringen. Hierdoor verspringt de meanderlengte van de opeenvolgende meanders van de hoofdgeul sterk. Twee meanders in de hoofdgeul kunnen o.a. door verschillende uitbochtingsnelheden niet goed op elkaar aansluiten. Op deze overgangen bevinden zich drempels. Deze hypothesen is lastig te toetsen en daarom wordt van toetsing afgezien.

Conclusie

De hypothesen over de morfologie zijn niet getoetst omdat ze te veel inspanning zou vergen. Die inspanning wordt geacht niet in verhouding te staan tot de extra kennis die over het gedrag van drempels kan worden vergekregen.

2.5 Hoofdhypothesen

Uit tabel 2.4 blijkt dat de eerste drie hoofdhypothesen uit paragraaf 2.1 kloppen. Deze komen in gewijzigde vorm en volgorde voor in het volgende hoofdstuk waarin een morfodynamisch model wordt geformuleerd. De vierde hoofdhypothese waarin aan de hand van patronen in de waterbeweging erosie- en sedimentatiepatronen worden beschreven klopt niet. De belangrijkste reden waarom deze hypothese niet klopt is het feit dat de stroomdraad op de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert in de tweede helft van de bocht niet van de binnenbocht naar de buitenbocht oversteekt.

Subhypothese		
Code	Omschrijving	Beoordeling toetsing
W1	divergentie/afname stroomsnelheid	+
W2	afname stroomsnelheid	+
W3	langsverhang	-
W4	verdeling stroomsnelheid in bocht	-
W5	vertraging stroomsnelheid doortij/springtij	-
SEC1	demping secundaire stroming	+/-
SEC2	ontwikkeling secundaire stroming	-/+
SEC3	aantal cellen met secundaire stroming	+
SEC4	invloed platen op secundaire stroming	0
SEC5	cel met secundaire stroming door stroming over plaat	-
SEC6	grootte secundaire stroming	+
SED1	zandtransport door secundaire stroming	+
SED2	invloed demping secundaire stroming op zandtransport	+
SED3	zandtransport niet beïnvloed door secundaire stroming	+
SED4	patroon zandtransport op drempel	0
SED5	aanzandingspatroon door afname/toename stroomsnelheid	+
SED6	aanzanding in doortij/springtij cyclus	0
SED7	aanzanding in baggervak	+
SED8	aanzandingspatroon in bocht	0/-
SED9	aanzandingspatroon in bocht door secundaire stroming	-
SED10	aanzandingspatroon door langsstroming	0
SED11	aanzandingspatroon door secundaire stroming	-/+
SED12	mechanismen voor residueel zandtransport	+ / 0
M1	morfologie bepaald door langsstroming	0
M2	dimensies platen hebben invloed op dimensies drempel	0
M3	ruimtelijke scheiding talwegs eb en vloed hebben invloed op de morfologie	0
M4	drempels zijn beginnende 'middle bars'	0
M5	drempels minder stabiel dan bochten	0
M6	meanderlengte beïnvloedt drempel	0

Tabel 2.4 Overzicht beoordeling van de getoetste subhypothesen
 + = bevestigde subhypothese; - = niet bevestigde subhypothese; 0 = niet getoetste hypothese

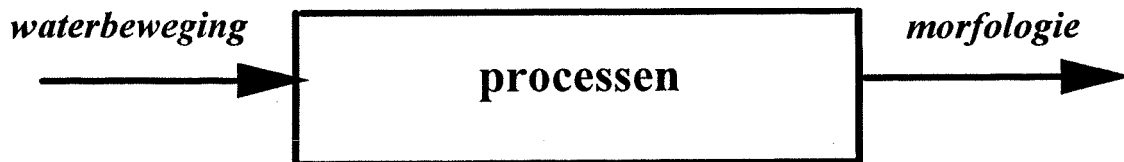
3 Een conceptueel morfodynamisch model

3.1 Inleiding

Gebaseerd op een analyse van de metingen op de Drempel van Hansweert en van berekeningen met een 2DH waterbewegingsmodel kan een conceptueel model worden geformuleerd. Dit is een beschrijvend denkmodel van het morfodynamisch gedrag van een drempel. Als voorbeeld wordt hiervoor de Drempel van Hansweert genomen.

3.2 Het model

Het conceptueel morfodynamisch model van drempels in de Westerschelde bestaat uit twee onderdelen: mechanismen en processen. De mechanismen zijn daarbij gedefinieerd als tijdsafhankelijk en de processen als tijdsafhankelijk. In het model vormen de processen de 'schakel' tussen de waterbeweging en de morfologie (figuur 3.1).



Figuur 3.1 Schema van het morfodynamisch model

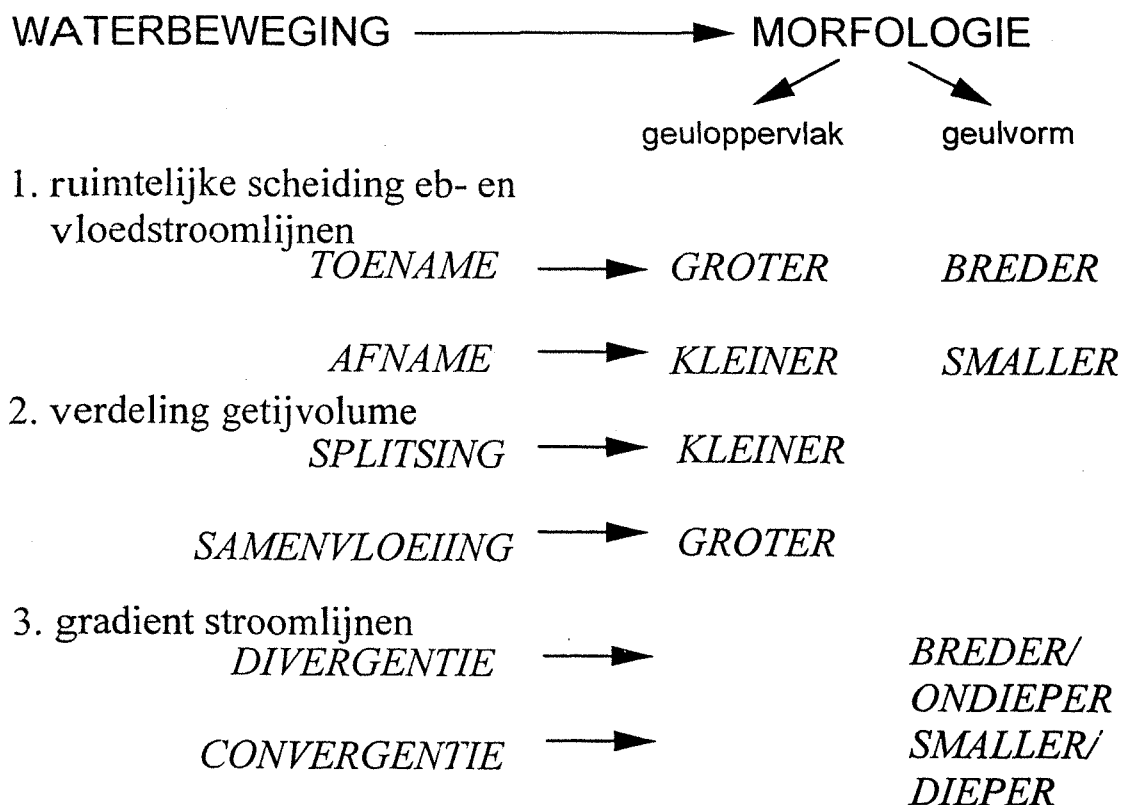
In figuur 3.2 staat het conceptueel morfodynamisch model van een drempel in een zandig estuarium. Dit model is opgesteld aan de hand van inzichten uit het onderzoek naar drempels in de Westerschelde in het algemeen en naar de Drempel van Hansweert in het bijzonder.

Niet bij elk mechanisme spelen alle processen een rol. Ruimtelijke onder- en onduurzadiging is het belangrijkste proces binnen de mechanismen. Andere processen zijn aan ruimtelijke onder- en oververzadiging ondergeschikt, zoals secundaire stroming of getij-asymmetrie, of gelijkwaardig, zoals Getij Residuele Stroming (GRS).

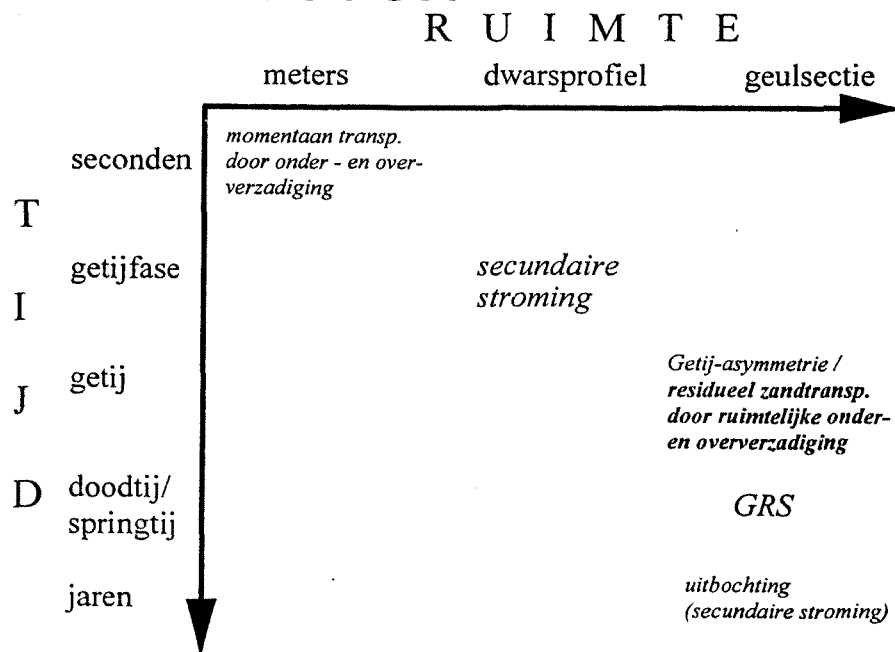
Mechanismen

De drie hoofdmechanismen zijn: de ruimtelijke scheiding van eb- en vloedstroombanen, verdeling van het getijvolume en gradiënt in de stroomlijnen. Deze mechanismen beschrijven de invloed van de waterbeweging op de morfologie. Met morfologie wordt hier de vorm- en de grootte van het oppervlak van de dwarsdoorsnede van de drempel bedoeld.

A. Mechanismen



B. Processen



Figuur 3.2 Conceptueel morfodynamisch model van drempels in de Westerschelde. A. Mechanismen en B. Processen

Ruimtelijke scheiding van eb- en vloedstroomlijnen

Het mechanisme van ruimtelijke scheiding van eb- en vloedstroomlijnen beïnvloedt de vorm en het oppervlak van het geulprofiel. De ruimtelijke scheiding van een stroomlijn is hier gedefinieerd als de afstand tussen twee stroomlijnen. Bij toename van de afstand tussen de eb- en vloedstroomlijnen zal de geul daardoor breder worden. Dit is een gevolg van gedifferentieerde uitbochting van de eb- en vloeddelen in de geulen. Een ander gevolg van toename van de ruimtelijke scheiding van eb- en vloedstroomlijnen is de vergroting van het geuloppervlak door de afname van de efficiëntie van het gebruik het geuloppervlak. De dominantie binnen een geul neemt dan toe (Van Kleef, 1994).

Bij lagere dominantie, wanneer eb en vloed grotendeels dezelfde delen van de geul gebruiken, is een kleiner geuloppervlak voldoende.

De processen die in dit mechanisme een belangrijke rol spelen zijn: secundaire stroming en GRS. De secundaire stroming speelt op de *lange termijn* een rol bij de uitbochting, waardoor eb- en vloed gedomineerde geulen uit elkaar gaan lopen. Op de *korte termijn* veroorzaakt de secundaire stroming patronen in sedimenttransporten. GRS veroorzaakt ruimtelijk consistente en aan beide zijden van de drempel tegengestelde zandtransporten. Zandtransporten door getij-asymmetrie en onder- en oververzadiging spelen indirect een rol bij het mechanisme.

Verdeling van het getijvolume

Het mechanisme de verdeling van het getijvolume tussen de hoofd- en nevengeulen of tussen de hoofdgeulen beïnvloedt het dwarsoppervlak van een drempel. Een groter getijvolume leidt tot een groter geuloppervlak. Het verband tussen getijvolume en geuloppervlak in de Westerschelde is sterk, zoals onder andere door Blik en Ruijter (1994) is aangetoond. Als stroomopwaarts van een drempel een nevengeul aftakt van de hoofdgeul, wordt het getijvolume over beide geulen verdeeld. Het getijvolume over de drempel is kleiner dan in de hoofdgeul stroomopwaarts van de splitsing en hierdoor is het geuloppervlak op de drempel kleiner dan stroomopwaarts van de splitsing. Vice versa zal een samenvloeiing van getijvolume uit twee geulen stroomopwaarts van een drempel het getijvolume over de drempel doen toenemen. Hierdoor neemt het geuloppervlak van de drempel toe. Een splitsing die van invloed is op het getijvolume over een drempel heeft tijdens de andere getijfase wanneer er een samenvloeiing optreedt geen invloed op het geuloppervlak van de drempel.

Het proces dat bij dit mechanisme van belang is, is zandtransport door onder- en oververzadiging. Bij veranderingen in de verdeling van het getijvolume raakt de morfologie uit evenwicht. De geul waar het getijvolume is toegenomen wordt te krap en door toename van de stroomsnelheid vindt daar netto erosie plaats. De andere geul wordt te ruim en er vindt door afname van de stroomsnelheid *netto* sedimentatie plaats. De andere processen secundaire stroming en getij-asymmetrie hebben alleen indirect invloed op dit mechanisme, zoals bijvoorbeeld alleen op aanzandingspatronen.

Gradiënt in de stroomlijnen

Het mechanisme de gradiënt in de stroomlijnen over een drempel beïnvloedt de vorm van het

geuloppervlak als volgt: divergerende stroming leidt tot een relatief breed en ondiep geuloppervlak en convergerende stroming leidt omgekeerd tot een relatief smal en diep geuloppervlak. Mogelijk heeft divergerende en convergerende stroming ook invloed op de grootte van het geuloppervlak. Immers divergentie of convergentie heeft een verandering van de evenwichtsverticaal van de stroming en daardoor van de zandtransporten tot gevolg. Bij de veranderende evenwichtsverticaal hoort een andere evenwichtsgeulprofiel en -oppervlak. Hoe dit mechanisme precies in elkaar steekt is niet bekend en dient nader onderzocht te worden.

Het proces dat hierbij van belang is, is onder- en oververzadiging: de veranderende evenwichtsconcentratieverticalen als de stroombanen divergeren of convergeren leiden tot sedimentatie of erosie. Als voorbeeld: divergerende stroming kan leiden tot afname van de stroomsnelheid en daarmee tot oververzadiging. De oververzadiging, dus de afname van het transport, heeft sedimentatie tot gevolg. Voor convergerende stroming zou dit mechanisme net omgekeerd kunnen werken.

De processen secundaire stroming en getij-asymmetrie spelen een indirecte rol bij dit mechanisme.

Processen

De processen die een rol spelen bij het morfodynamisch gedrag van de drempels werken op verschillende ruimte- en tijdschalen. Kenmerkend is dat als de tijdschaal toeneemt ook de ruimteschaal toeneemt. De processen vormen de schakel tussen de waterbeweging en de morfologie in de drie mechanismen.

Onder- en oververzadiging

Residueel zandtransport door onder- en oververzadiging is één van de belangrijkste processen bij morfologische veranderingen. Het is een proces dat afspeelt op verschillende ruimte- en tijdschalen: van ruimteschalen van meters tot geulsecties en tijdschalen van seconden tot een getij. Door momentane veranderingen van de stroomsnelheid ontstaan veranderingen in de evenwichtsconcentratieverticaal en dat leidt tot erosie of sedimentatie. Afname van de stroomsnelheid leidt tot oververzadiging en dat heeft weer sedimentatie tot gevolg; toename van de stroomsnelheid leidt tot onderverzadiging en daarmee tot erosie. Als de morfologie aanzienlijk uit evenwicht is met de heersende waterbeweging kunnen over een getij ruimtelijke consistente patronen in residuele zandtransport optreden. Hierdoor vinden ruimtelijke patronen in *netto* erosie en sedimentatie plaats. Dan is er sprake van ruimtelijke onder- en oververzadiging. De drempels in de Westerschelde worden door baggeren verdiept en daardoor uit evenwicht gebracht: ze zijn te ruim. De mate en ruimtelijke schaal van de verruiming zijn zodanig dat ten gevolge hiervan een reactie plaatsvindt in de vorm van een netto sterk zandtransport naar de verdiepte drempel door ruimtelijke onder- en oververzadiging. Omdat op de drempels vrijwel continu wordt gebaggerd heeft de verruiming een permanent karakter en domineert het residuele zandtransport door onder- en oververzadiging andere processen en mechanismen.

Secundaire stroming

De secundaire stroming speelt ook op verschillende ruimte- en tijdschalen. Op een ruimteschaal van een geulsectie en op een tijdschaal van jaren speelt de secundaire stroming een rol bij uitbochting. Door uitbochting gaan eb- en vloedgeulen meer uit elkaar lopen. Dit is in feite het al eerder genoemde mechanisme ruimtelijke scheiding van eb- en vloedbanen. Door Van Veen (1950) is dit eb- en vloodscharwerking genoemd.

Op een ruimteschaal van een dwarsprofiel en op een tijdschaal van een getij is de secundaire stroming van invloed op de herverdeling van het zandtransport binnen een dwarsprofiel. Deze herverdeling van zandconcentraties en van het zandtransport binnen een dwarsprofiel beïnvloedt de erosie- en sedimentatiepatronen ten gevolge van het zandtransport door ruimtelijke onder- en oververzadigingen in de concentratieverticaal.

De herverdeling van het zandtransport binnen een dwarsprofiel wordt op twee wijzen veroorzaakt. In het geval van één cel veroorzaakt ten eerste de secundaire stroming een netto zandtransport nabij de bodem, waar de grootste zandconcentraties optreden, van buiten- naar binnenbocht. Ten tweede neemt in de binnenbocht de valsnelheid van het sediment relatief af doordat de secundaire stroming daar naar boven is gericht. Het zand zal in de binnenbocht hierdoor minder snel bezinken waardoor de zandconcentratie in suspensie toeneemt. In de buitenbocht neemt de valsnelheid van het sediment juist relatief toe en wordt bezinking van het zand in suspensie versterkt. Het gevolg is dat in de binnenbocht de zandconcentraties in suspensies groter zijn dan in de buitenbocht. In het geval van complexe morfologische situaties zoals in estuaria is er zeer waarschijnlijk sprake van meerdere cellen met secundaire stroming. In dit geval werken dezelfde principes, zij het dat de verdeling van het zand over het dwarsprofiel anders is. Op plaatsen waar twee cellen samenkomen kan, als ze daar naar beneden gericht zijn, 'downwelling', een vergrootte schuifspanning op de bodem en eventueel erosie, voorkomen (Bathurst et al., 1979). Waar twee cellen naar boven draaien treedt 'upwelling' en mogelijk sedimentatie op.

Getij-asymmetrie

Zandtransport door getij-asymmetrie is van belang binnen een geulsectie en over een getij. Het zandtransport door getij-asymmetrie heeft een dominante richting, in eb- of vloedrichting, over de volledige breedte van de geul. De getij-asymmetrie beïnvloedt, net als de secundaire stroming, op korte termijn het zandtransport door ruimtelijke onder- en oververzadiging.

Anders dan secundaire stroming die dwars op de geulas invloed heeft, heeft getij-asymmetrie invloed in de lengterichting van de geul.

In het geval van vloedgedomineerd zandtransport door getij-asymmetrie zal aan de vloedzijde van een te ruim geuldeel de netto aanzanding sneller verlopen dan aan de ebzijde. Dit steekt als volgt in elkaar: aan de vloedzijde zal tijdens vloed relatief veel sedimentatie plaatsvinden terwijl tijdens vloed aan de ebzijde relatief veel erosie plaats zal vinden. Tijdens de daaropvolgende ebfase vindt relatief weinig sedimentatie plaats van aan de ebzijde van het te ruime geuldeel en aan de vloedzijde is de erosie gering. Op den duur zal de netto sedimentatie aan de vloedzijde zich in vloedrichting uitbreiden, de ebzijde bereiken en de verstoring wordt uitgedempt. Bij ebgedomineerd transport door getij-asymmetrie werkt dit precies omgekeerd.

Getij Residuele Stroming

Zandtransport door Getij Residuele Stroming (GRS) is van belang op een ruimteschaal van een geulsectie en op een tijdschaal van een doottij/springtij-cyclus. GRS zijn consistente horizontale circulatiepatronen die ontstaan door de interactie tussen het horizontale getij en de geometrie (Storm, 1996). Zandtransporten door GRS zijn ruimtelijk zeer consistente resttransporten in bijvoorbeeld eb- en vloedgedomineerde geuldelen. Van dijk tot dijk is de GRS 0 m/s; het restzandtransport hoeft niet 0 m/s te zijn en is dit in de meeste gevallen ook niet. Zandtransport door GRS hangt nauw samen met de ruimtelijke scheiding van eb- en vloedstroombanen en houdt deze scheiding in stand.

3.3 Conceptueel morfodynamisch model van de Drempel van Hansweert

Het morfologisch gedrag van de Drempel van Hansweert wordt volledig bepaald door de getijstrooming. Het morfologisch gedrag is daarbij gedefinieerd als de mechanismen en processen die de morfologie van de drempel bepalen. De toevoer van zand door golven van de Plaat van Ossensisse naar de drempel is te verwaarlozen, ook tijdens stormen met windkracht 9 Bft (Israël, 1997).

Hieronder wordt het morfodynamisch model van de Drempel van Hansweert onder invloed van getijstromen geformuleerd.

Op de Drempel van Hansweert lopen de *stroomlijnen van de eb- en vloedstroom* relatief sterk uiteen. De stroomlijn met de grootste ebsnelheden bevindt zich in het westen van het drempelgebied op het plateau ten oosten van de Plaat van Ossensisse. De stroomlijn met de grootste vloedsnelheden bevindt zich daar oostelijk van en is gelokaliseerd in de hoofdgeul langs de plateaurand en steekt zuidwaarts over naar het oostelijk deel van de geul. Op het noordelijk deel van de drempel zijn er twee van dergelijke stroomlijnen tijdens vloed (en ook tijdens eb) omdat door de nevengeul (de Schaar van Waarde) aftakt van de hoofdgeul de stroomdraad met de grootste maximum vloedsnelheden uit de bocht bij Hansweert wordt gesplitst. De ruimtelijke scheiding van de stroomlijnen met de grootste eb- en vloedsnelheden is een belangrijk mechanisme voor het morfologisch gedrag van de Drempel van Hansweert in het zuidelijke drempelgebied.

De ruimtelijke scheiding van eb- en vloedstroombanen hangt nauw samen met het proces GRS. Op de noordelijke zijde van het drempelgebied vindt op het westelijk deel van het plateau ten oosten van de Plaat van Ossensisse een zandtransport door GRS plaats in ebrichting. Dit transport vindt op het oostelijk deel van het plateau en de rest van het drempelgebied door GRS een residueel zandtransport in vloedrichting plaats. Beide residuele transporten compenseren elkaar gedeeltelijk, waardoor de eb- en vloedstroombanen gescheiden blijven.

De *verdeling van het getijvolume* beïnvloedt het gedrag van de Drempel van Hansweert als volgt: tijdens eb wordt een klein deel, circa 5%, van het ebvolume uit het Zuidergat vlak voor

het de Drempel opstroomt door de Schaar van Ossenissee afgetapt. Hierdoor zal het geuloppervlak van het zuidelijk deel van de drempel in geringe mate kleiner worden. Op het noordelijk deel van de drempel komt tijdens eb uit de Schaar van Waarde 40% van het totale ebvolume bij het ebvolume in de hoofdgeul: het gevolg hiervan is een toename van het geuloppervlak van het noordelijke deel van de drempel tot het geuloppervlak in de bocht bij Hansweert. Tijdens de vloedfase beïnvloedt de forse aftapping van 40% van vloedvolume van de hoofdgeul door de Schaar van Waarde het geuloppervlak van het hele drempelgebied aanzienlijk. Ten zuiden van de drempel komt het vloedvolume uit de Schaar van Ossenissee bij het volume in de hoofdgeul. Dit stroomt echter niet over de drempel. Het eb- en vloedvolume dat over de Drempel van Hansweert stroomt bepaalt in eerste instantie het geuloppervlak van de Drempel. De verdeling van het getijvolume op de Drempel van Hansweert wordt de laatste 40 jaar gestuurd door baggerwerken op de drempel en stortingen in de Schaar van Waarde. Hierdoor is de verdeling van het getijvolume over hoofd- en nevengeul aanzienlijk veranderd: het getijvolume over de drempel is aanzienlijk toegenomen. Toch is de drempel nog steeds niet in evenwicht met het nieuwe getijvolume: de drempel is te ruim. Ten gevolge hiervan vindt naar de drempel een netto zandtransport plaats door ruimtelijke onder- en oververzadiging.

Het *verloop van de stroomlijnen* over de Drempel van Hansweert speelt vooral op de noordelijke zijde van de drempel een rol. Tijdens eb divergeert de waterstroom van de drempel en ook vanuit de Schaar van Waarde naar de relatief nauwe bocht om de Plaat van Ossenissee. Op het zuidelijke deel van de drempel vindt er geen tot nauwelijks divergentie plaats. Tijdens vloed divergeert de stroming uit de bocht rondom de Plaat van Ossenissee op de noordelijke zijde van de drempel en ook naar de Schaar van Waarde. Op de zuidelijke zijde van de drempel vindt mogelijk in geringe mate divergentie plaats. Divergentie leidt tot een relatief ondiep en breed dwarsprofiel en vice versa.

Omdat de Drempel van Hansweert verdiept wordt en te ruim is, is het belangrijkste natuurlijke proces dat morfologische veranderingen veroorzaakt *residueel zandtransport door ruimtelijke onder- en oververzadiging*. Door dit proces vindt over een getij netto aanzanding plaats op de drempel. Het grootste deel van deze aanzanding van de baggersleuf vindt plaats vanuit het noorden omdat op de drempel vloedgedomineerd zandtransport plaats vindt. Binnen een getij en in de breedte van de geul heeft de secundaire stroming waarschijnlijk invloed op het patroon van aanzanding door zandtransport door de ruimtelijke onder- en oververzadiging. Het is onbekend hoe dit patroon er precies uit ziet omdat onbekend is hoe het cellenpatroon met secundaire stroming in elkaar steekt. Het lijkt erop dat minimaal twee cellen aanwezig zijn die in ruimte en tijd sterk veranderen.

De aanzandingssnelheid van de verdiepte drempel gedurende een maand is ongeveer van gelijke omvang als de maandelijkse baggerhoeveelheden (Tank, 1997c). Uit berekeningen met DELFT2D-MOR van de verdiepte Drempel van Hansweert blijkt dat deze aanzanding over deze periode lineair verloopt (Groenewoud, 1997). De aanzanding is het grootst op de plaatsen waar recentelijk is gebaggerd. Het lineaire verloop van de aanzanding is een sterke aanwijzing voor het 'te ruim' zijn van het dwarsprofiel. Bij een kleine afwijking zou immers al een logaritmische afname te zien moeten zijn.

Een nog niet eerder genoemde en weliswaar niet actieve factor in het morfodynamisch gedrag van de Drempel van Hansweert is de dijkconfiguratie en de bestortingen van geulwanden. De dijken en de geulwandverdedingen leggen een limiet op aan de mechanismen. Met name het mechanisme ruimtelijke scheiding van eb- en vloedstroomlijnen wordt hierdoor beïnvloed. Het uitbochten van de geulen wordt hierdoor beperkt waardoor de scheiding tussen eb- en vloedstroombanen niet wordt vergroot. Een tweede en minder belangrijk effect is dat door de dijken en de geulwandverdedigingen de secundaire stroming niet meer in het horizontale maar en in het verticale vlak werkt waardoor de geulen dieper worden (Friedkin, 1945 in: Thorne, 1992).

4 Discussie

In dit rapport zijn de hypothesen over het morfodynamisch gedrag van drempels in de Westerschelde uit Tank (1996a) getoetst met behulp van meet- en modelresultaten. De hypothesen zijn onderverdeeld in een groot aantal subhypothesen. Aan de hand de toetsing van de hypothesen is een conceptueel morfodynamisch model voor de Westerschelde-drempels geformuleerd. Alle hoofdhypothesen en het grootste deel van de subhypothesen is getoetst. Een aantal subhypothesen is niet getoetst omdat dit praktisch niet haalbaar bleek of omdat de belang ervan sinds het opstellen verminderd bleek te zijn. Een aantal hypothesen is herschreven of omdat recentere inzichten dit noodzaakten of omdat dit de subhypothese beter toetsbaar maakte. Met behulp van de getoetste hypothesen is een conceptueel morfodynamisch model geformuleerd.

Het morfologisch onderzoek naar drempels in de Westerschelde heeft kennis van het morfodynamische gedrag van drempels in estuaria vergroot. Toch blijven er nog leemten in de kennis over dit gedrag. De oorzaak van deze leemten ligt deels in de beperking van de natuurmetingen waardoor bepaalde mechanismen en processen niet konden worden aangetoond. Ook de (nog) beperkte integratie van metingen en modelresultaten is hier debet aan. Voor een ander deel wordt dit veroorzaakt door de complexiteit van het morfodynamisch gedrag van drempels in de Westerschelde. Het relatieve belang van de mechanismen en processen kon daardoor niet worden doorgrond. Door meer en nauwgezet (model-)onderzoek in de komende jaren kunnen deze leemten worden aangevuld.

De baggerwerken hebben een dominerende invloed op het morfologisch gedrag van drempels in de Westerschelde. Op de korte termijn doordat aanzanding met name veroorzaakt wordt door de recente verstoring door de baggerwerken. Deze aanzanding verloopt lineair volgens berekeningen met het DELFT2D-MOR model (Groenewoud, 1997). Dit lineaire verloop is enigszins verbazingwekkend omdat een asymptotisch verloop zou worden verwacht: de reactie op de verstoring verloopt aanvankelijk het snelst en dempt uit omdat ook de verstoring wordt uitgevlakt.

5 Conclusies

In dit rapport is een conceptueel morfodynamisch model van drempels in de Westerschelde geformuleerd. Dit model wordt hieronder kort samengevat. Het model wordt vooraf gegaan door de toetsing van een aantal hypothesen over het gedrag van de Drempel van Hansweert. De hypothesen waren eerder verwoord in Tank (1996a). De toetsing vond plaats met metingen van de hydrodynamica, sedimenttransport en morfologie op de Drempel van Hansweert in de Westerschelde en met resultaten van het 2D-waterbewegingsmodel SCALDIS100. Inzichten afkomstig van een literatuurstudie en een analyse van historische gegevens vullen het model aan.

Het morfodynamisch model is opgebouwd uit mechanismen en processen waarbij de processen de 'schakels' zijn tussen de waterbeweging en de morfologie in de mechanismen.

Mechanismen

1. ruimtelijke scheiding van eb- en vloedstroomlijnen op de drempel: hierdoor ontstaat een relatief breed, ondiep en groot geulprofiel;
2. verdeling getijvolume (splitsing/samenvloeiing): beïnvloedt het geuloppervlak;
3. verloop stroomlijnen (divergentie/convergentie): beïnvloedt de geulbreedte en -diepte

Processen

Op verschillende ruimte- en tijdschalen zijn de volgende processen waardoor (residueel) zandtransport plaatsvindt van belang:

1. (ruimtelijke) onder- en oververzadigingen
2. secundaire stroming/uitbochting
3. getij-asymmetrie
4. Getij Residuele Stroming (GRS)

Kenmerkend aan de drempels in de vaargeul van de Westerschelde is dat ze door baggeren verdiept zijn. Hierdoor zijn ze te ruim. Het belangrijkste natuurlijke proces dat deze verdieping tegengaat is residueel zandtransport door ruimtelijke onder- en oververzadiging, alhoewel dit door metingen (nog) niet helemaal aangetoond kon worden. Dit mechanisme werkt op een tijdschaal van een getij. Erosie- en sedimentiepatronen door dit mechanisme worden gestuurd door getij-asymmetrie en secundaire stroming. Residueel zandtransport door GRS heeft tot gevolg dat de drempelvorm in stand blijft.

6 Aanbevelingen

Zoals al eerder geconstateerd bevat de kennis over het morfodynamisch gedrag van drempels in de Westerschelde nog een aantal leemten. Hieronder worden deze geïnventariseerd en aansluitend worden aanbevelingen voor nader onderzoek gedaan.

De belangrijkste leemten in de kennis over het morfodynamisch gedrag van drempels zijn:

- het patroon van cellen met secundaire stroming op een drempel gedurende een getij en een doottij/springtij cyclus. De natuurmetingen konden hierover geen uitsluitsel geven omdat ze daarvoor te onnauwkeurig zijn. Analyse van 3D model resultaten zouden hierover meer inzicht kunnen geven. Sinds kort is 3D waterbewegingsmodel van het oostelijke deel van de Westerschelde genaamd TRISCAL (Jansen, 1997b) beschikbaar. De 2D versie van dit model is reeds gecalibreerd (Jansen, 1997a). Het 3D model rekent met 7 lagen in de verticaal: dit zijn voldoende lagen om de secundaire stroming te kunnen onderzoeken. Mogelijk kan later met een quasi 3D morfologisch model, op basis van DELFT3D-MOR, de invloed van de secundaire stroming op het zandtransport worden onderzocht;
- de invloed van divergentie en convergentie van de stroombanen op de *vorm* en op het *oppervlak* van een geulprofiel van een drempel moet worden onderzocht. Onderzoek met een 2D morfologisch model kan hiermee volstaan;
- ook de invloed van een bifurcatie op het *oppervlak* van het evenwichtsprofiel is nog onbekend en met behulp van een mathematisch morfologisch model te onderzoeken. Het is namelijk nog niet volledig bekend in welke mate een bifurcatie (splitsing van een geul in twee of meer geulen) het *evenwichtsoppervlak* van een geulprofiel beïnvloedt;
- het belang van onder- en oververzadiging kon ondanks speciaal daarvoor ingerichte metingen niet worden aangetoond. Niet alleen de metingen schoten te kort, ook de complexe morfologie (verbreding/versmalling van de geul) speelde hierbij een rol. Metingen onder gecontroleerde omstandigheden met een constante geulbreedte in een stroomgoot zouden meer inzicht kunnen geven in dit proces; ook een analyse van quasi 3D morfologische berekeningen kunnen meer inzicht geven;
- uit veldwaarnemingen en -metingen (o.a. HF-radar metingen; zie: Dam, 1997) en uit modelresultaten (SCALDIS100) is bekend dat ten oosten van de Plaat van Ossenis in het drempelgebied tijdens vloed een neer ontstaat. De gevolgen van deze neer voor de morfologie is onbekend. De neer kan extra sedimentatie veroorzaken doordat het als een zandvang fungeert. Mogelijk heeft de neer alleen effect op de slibfractie van het sediment zodat het morfologisch effect van deze neer beperkt is. Een methode om dit te onderzoeken is een model te gebruiken waarin diverse fracties zijn gemodelleerd.

Kortom: het onderzoek naar het morfodynamische gedrag van drempels zal het in de toekomst vooral moeten hebben van het gebruik van mathematische modellen en verdere integratie van het modelonderzoek en analyse van metingen. Reeds is de afstuderende Delftse waterbouwer bezig met het onderzoek naar secundaire stroming (in zowel dwars- als hoofdstroomrichting) op de Drempel van Valkenisse. Daarbij wordt gebruikt gemaakt van het 3D waterbewegingsmodel TRISCAL (Jansen, 1997b). In de nabije toekomst is het de bedoeling dat bij de sectie

Waterbouwkunde van de Faculteit der Civiele Techniek van de TUD een A.I.O. wordt aangesteld die m.b.v. van mathematische modellen het (fundamentele) onderzoek naar het gedrag van drempels voortzet. Al deze inspanningen met mathematische modellen willen niet zeggen dat (niet mathematisch) fenomenologisch morfologisch onderzoek naar het gedrag van drempels overbodig is geworden. Integendeel zelfs: de metingen van de zandtransporten zouden nader geanalyseerd kunnen worden. Daartoe dient eerst het theoretisch kader te worden verdiept. Deze analyses zouden dan parallel moeten lopen aan het Delftse promotie-onderzoek naar drempels. Zeer waarschijnlijk zijn er nog aanvullende metingen nodig naar het sedimenttransport in hoofdstroomrichting waarbij ook de korrelgrootte van het sediment in suspensie moet worden gemeten; dit ontbreekt in de huidige metingen. Uiteraard behoeven deze nieuwe metingen een nadere beschrijving en analyse.

Bij het onderzoek naar het morfodynamisch gedrag van de Drempel van Hansweert is de configuratie rondom de drempel geschematiseerd tot twee bochten in een enkele hoofdgeul waar nevengeulen van aftakken. De drempel bevindt zich op de overgang tussen de twee bochten. Daarbij is bewust de invloed van de bifurcatie van de twee hoofdgeulen (Overloop van Hansweert en Middelgat) stroomafwaarts van de drempel buiten beschouwing gelaten. Tijdens vloed heeft de samenvloeiing van de stroming uit beide geulen waarschijnlijk complexe (secundaire) stromingspatronen tot gevolg die ook de drempel beïnvloeden. Het vloedwater uit de Overloop van Hansweert 'schiet' onder dat uit het Middelgat. Het lijkt erop dat het cellenpatroon van de secundaire stroming zodanig is dat nabij de bodem de secundaire stroming naar de buitenbocht gericht is. Dit bleek al uit de analyse van de metingen van de waterbeweging (Tank, 1997a) en is bevestigd door de eerste resultaten van het in aanbouw zijnde waterbewegingsmodel TRISCAL (Jansen, 1997b). In dit kader moet ook de verondieping op de noordelijke zijde van de drempel voor de veerhaven van Kruiningen in de jaren '90 worden genoemd (Tank, 1997c). Hierdoor bestaat de Drempel van Hansweert uit twee min of meer gescheiden ondiepten. Mogelijk is dit een gevolg van de stroming uit de Overloop van Hansweert en het Middelgat. Overigens is tijdens het huidige onderzoek uitgegaan van een aangesloten drempel waarvan het langgerekte centrum langs het plateau ten oosten van de Plaat van Ossenis ligt.

Behalve procesonderzoek met de huidige bodemligging zou een onderzoek naar de invloed van de hoogte, de vorm en de ligging van een plaat (bijvoorbeeld de Plaat van Ossenis) op de drempelvorm (diepte, breedte en lengte) erg interessant zijn. De secundaire stroming fungeert hierbij waarschijnlijk als het belangrijkste aansturende proces.

Literatuur

- 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.
- Bliek, A.J. en M.N. Ruijter, 1994. Verklarend onderzoek drempels Westerschelde. Ingenieursbureau Svašek, project 940.
- 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.
- Dam, G., 1997. De vergelijking van HF-radar met andere stromingsgegevens. Een onderzoek naar de HF-radar metingen bij de locatie Hansweert. Rijkswaterstaat/Rijksinstituut voor Kust en Zee. Stageverslag, RIKZ/OS-97.820X.
- Groenewoud, M.D., 1997. Modellerings morfodynamisch gedrag van de Drempel van Hansweert. Fase 1: Modelbouw en simulatie huidige situatie. TU Delft, Faculteit der Civiele Techniek, Vakgroep Waterbouwkunde.
- Huijs, S.W.E., 1997. Baggerinspanning bij verdieping '48/'43. Rijkswaterstaat, Directie Zeeland, Afdeling Rivierkunde (NWL), Notitie NWL-97.21, 6 p.
- Israël, C.G., 1997. Modellerings van het sedimenttransport over de Plaat van Ossensisse in de Westerschelde. Afstudeerrapport TU Delft, Vakgroep Waterbouwkunde en Geotechniek.
- Jansen, M.H.P., 1997a. Bouw, calibratie en verificatie SCALWEST. T.b.v. Project Verdieping. Rapportage Activiteit A. Ingenieursbureau Svašek bv, projectnr. 1011, 56 pp.
- Jansen, M.H.P., 1997b. Bouw en validatie TRISCAL. Een 3D-model van de Westerschelde. T.b.v. Project Verdieping. Rapportage Activiteit B. Ingenieursbureau Svašek bv, projectnr. 1011.
- Storm, C., 1996. Residuele zandtransporten in de Westerschelde. Rijkswaterstaat/Rijksinstituut voor Kust en Zee. RIKZ-Werkdocument OS-96.837X, 72 p.
- Storm, C., P. Bollebakker, J. de Jong en G. Mol, 1994. Nauwkeurigheid zandbalans Westerschelde 1965 - 1990 en aanbevelingen ter optimalisatie. Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ, Rapport RIKZ-94.008.
- Tank, F.T.G., 1995. Het gedrag van drempels in de Westerschelde. Een verkennende studie. Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, IMAU R 95-18.
- Tank, F.T.G., 1996a. Het gedrag van drempels in de Westerschelde. Literatuurstudie en hypothesen. Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, IMAU R 96-07.
- Tank, F.T.G., 1996b. Het gedrag van drempels in de Westerschelde. Parameterisatie. Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, IMAU R 96-08.
- Tank, F.T.G., 1997a. Het gedrag van drempels in de Westerschelde. Beschrijving en analyse van metingen van de waterbeweging op en rondom de Drempel van Hansweert. Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, IMAU R 97-01.
- Tank, F.T.G., 1997b. Het gedrag van drempels in de Westerschelde. Beschrijving en analyse van zandtransportmetingen op en rondom de Drempel van Hansweert. Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, IMAU R 97-08.

- Tank, F.T.G., 1997c. Het gedrag van drempels in de Westerschelde. Beschrijving en analyse van metingen van de morfologie op en rondom de Drempel van Hansweert. Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, IMAU R 97-09.
- Thorne, C.R., 1992. Bend scour and bank erosion on the meandering Red River, Louisiana. In: P.A. Carling en G.E. Petts (eds.), Lowland floodplain rivers, Geomorphological perspectives. John Wiley & Sons, 299 p.
- Van Kleef, A.W., 1994. Verklaring voor de veranderingen in de grootschalige zandbalans van het gebied rond het Middelgat, Westerschelde. Rijkswaterstaat/Directie Zeeland.
- Van Rijn, L.C. en G.L. Tan, 1985. SUTRENCH-model. Two-dimensional vertical mathematical model for sedimentation in dredged channels and trenches by currents and waves. Rijkswaterstaat, Rijkswaterstaat Communications 41, 63 p.
- Van Veen, J., 1944. Schelderegiem en Schelderegie. Rijkswaterstaat, Directie Beneden Rivieren, 81 p.
- Van Veen, J., 1950. Eb- en vloed-systeem in de Nederlandse getijwateren. Tijdschrift KNAG, 2e reeks, deel 67, pp. 303-325.
- Vroon, J.H., C. Storm en J. Coossen, 1997. Westerschelde, stram of struis? Eindrapport van het Project Oostwest, een studie naar de beïnvloeding van fysische en verwante biologische patronen in een estuarium. Rijkswaterstaat/RIKZ, Rapport RIKZ-97.023