

fysiek in verband met
met digitaal op Kp.

HET GEDRAG VAN DREMPELS IN DE WESTERSCHELDE

Toetsing van hypothesen en beschrijvend morfodynamisch model van de Drempels van Bath en Valkenisse.

Stagerapport
Technische Universiteit Delft (TUD)
Vakgroep Waterbouwkunde
Rapport in opdracht van het Rijksinstituut voor Kust en Zee te Middelburg (RIKZ)
Project Verdieping-Vaargeulbeheer
Werkdocument RIKZ/OS-97.831x

Koen Wouters
Middelburg, augustus 1997

Ministerie van Verkeer en Waterstaat
Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat
Rijksinstituut voor Kust en Zee / RIKZ

Aan

Van
C.A.H. Wouters

Doorkiesnummer
--

Datum
30 oktober 1997

Bijlage(n)
--

Nummer
RIKZ/OS-97.831x

Project
Verdieping-Vaargeulbeheer

Onderwerp

Toetsing van de hypothesen uit de literatuurstudie van Tank(1996) en beschrijvend
morfodynamisch model van de Drempels van Bath en Valkenisse.

Vestiging Middelburg
Postbus 8039, 4330 EA Middelburg
Bezoekadres Grenadierweg 31

Telefoon 01180-72200
Telefax 01180-16500

Bereikbaar 20 minuten loopafstand vanaf station Middelburg richting industriegebied Arnestein, treintaxi

Voorwoord

Het drempelonderzoek is in het voorjaar van 1995 door Directie Zeeland opgestart in het kader van het toen ondertekende verdrag tussen België en Nederland over de verdieping 48'43' van de Westerschelde. Het drempelonderzoek is een onderdeel van het project Verdieping en is een gezamenlijk project met Directie Zeeland, het Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ) in Middelburg, de Technische Universiteit Delft (TUD) en de Universiteit Utrecht (UU).

Het onderzoek naar het gedrag van drempels in de Westerschelde is een direct vervolg op de inzichten die in het project OostWest (Vroon et al., 1997) zijn verkregen.

Deze deelstudie is een onderdeel van het onderzoek naar de Drempel van Hansweert. Hierin wordt de kennis die is opgedaan aan de Drempel van Hansweert vergeleken met twee andere drempels in de Westerschelde. De studie naar de Drempel van Hansweert zal eind 1997 worden afgerond.

Mijn dank gaat uit naar drs. F.T.G. Tank voor zijn begeleiding en prettige samenwerking en drs. H. Verbeek, ir. A. Langerak, ir. M. Jansen, dr. ir. J. v.d. Graaff, ir. M. Groenewoud en dr. J.H. Van den Berg voor hun adviezen en opbouwende kritiek.

Middelburg, augustus 1997

Samenvatting

Drempels zijn ondieptes in een geul. Deze komen vooral voor op de overgang tussen twee bochten in rivieren en estuaria. Ook in de Westerschelde zijn deze drempels aanwezig. Voor de scheepvaart tussen Antwerpen en de Noordzee zijn deze ondieptes in de vaargeul een toenemende hinder. Met de schaalvergroting van de zeescheepvaart wordt voor de steeds dieper stekende schepen de Antwerpse haven in een smaller getijvenster bereikbaar. Dit is economisch onaantrekkelijk en daarom moeten deze drempels worden verdiept. Door deze verdieping moet de huidige baggerhoeveelheid van 9 Mm³, worden vergroot naar 12 tot 15 Mm³ per jaar.

Deze forse ingreep in de morfologie heeft invloed op de ecologie. De natuurlijke waarden dienen zoveel mogelijk behouden te worden, zoals ook is bepaald door het Beleidsplan Westerschelde (BKW, 1991). Om dit te bereiken wordt door Rijkswaterstaat/Directie Zeeland onderzoek gedaan naar beheersalternatieven die het baggerbezwaar verminderen.

Om de effecten van beheersalternatieven te kunnen bepalen, moet eerst kennis over het morfodynamisch gedrag van drempels worden vergaard. Daarom is Rijkswaterstaat/Directie Zeeland gestart met het project Drempels met als doelstelling:

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.

Tot nu toe is het onderzoek naar het morfodynamisch gedrag van drempels vooral gericht op de Drempel van Hansweert waar omvangrijke meetcampagnes hebben plaatsgevonden. Deze deelstudie heeft als doelstelling:

Het opschalen van kennis over de Drempel van Hansweert naar de Drempels van Bath en Valkenisse. Tevens dient een beschrijvend morfodynamisch model voor de Drempels van Bath en Valkenisse te worden gegenereerd, aan de hand van hypothesen die zijn opgesteld in de verkennende studie en de literatuurstudie door Tank (1995, 1996).

De hypothesen worden getoetst om inzicht te krijgen in de processen die spelen op een drempel. Deze zijn onderverdeeld in langs- en dwarsstroming, sedimenttransport en morfologie. Uit de inzichten die hieruit verkregen worden, wordt een beschrijvend morfodynamisch model gemaakt voor de Drempels van Bath en Valkenisse.

Uit het beschrijvend morfodynamisch model wordt geconcludeerd dat:

- De drempels worden gevormd op plaatsen waar sedimentatie optreedt ten gevolge van vertraging. De belangrijkste oorzaken van vertraging zijn:
 - divergentie van de stroming
 - te ruim geulprofiel wegens kunstmatige verdieping van de drempel
- De morfodynamiek van de Drempels van Bath en Valkenisse lijkt niet op die in een rivier, hoewel de processen die in een rivier spelen wel een modificerend effect op de vorming van de drempels in de Westerschelde hebben.

Inhoudsopgave

VOORWOORD.....	i
SAMENVATTING.....	ii
1. INLEIDING	1
1.1 KADER	1
1.2 DOELSTELLING	1
1.3 LEESWIJZER	2
2. PROCESSEN DIE VAN BELANG ZIJN VOOR HET GEDRAG VAN DREMPELS.....	3
2.1 INLEIDING	3
2.2 WATERBEWEGING	3
2.2.1 Waterbeweging in langsrichting.....	3
2.2.2 Divergentie/Convergentie	4
2.2.3 Residuele stroming	4
2.2.4 Getij asymmetrie.....	5
2.2.5 Secundaire stroming ten gevolge van bochtverhang.....	6
2.2.6 Secundaire stroming ten gevolge van Coriolis	6
2.3 SEDIMENTBEWEGING.....	7
2.3.1 Algemeen	7
2.3.2 Sedimenttransport onder invloed van secundaire stroming.....	7
2.4 MORFOLOGIE EN DREMPELVORMING	7
2.4.1 Morfologie.....	7
2.4.2 Drempels.....	7
3. OMGEVINGSSCHETS VAN DE DREMPELS	9
3.1 DREMPEL VAN BATH.....	9
3.2 DREMPEL VAN VALKENISSE.....	9
4. BESCHIKBARE GEGEVENS.....	10
4.1 MEETGEGEVENS	10
4.1.1 AZTM.....	10
4.1.2 Bodemgegevens.....	10
4.1.3 Baggercijfers	11
4.2 MODELGEGEVENS.....	12
4.2.1 SCALWEST 2DH.....	12
4.2.2 SCALWEST 3D.....	12
5. TOETSING VAN DE HYPOTHESEN	13
5.1 INLEIDING	13
5.2 LANGSSTROMING.....	13
5.2.1 Hypothese W1; divergentie en vertraging op de drempel.....	13
5.2.2 Hypothese W2; vertraging door aftapping nevengeulen en te ruim profiel.....	16
5.2.3 Hypothese W3; langsverhang op de drempel.....	18
5.2.4 Hypothese W4; versnelling van de stroming in de buitenbocht	19
5.2.5 Hypothese W5; verschil in stroomsnelheid voor doortij en springtij	20
5.3 SECUNDAIRE STROMING	21
5.3.1 Hypothese Sec1; secundaire stroming en de aanpassingslengte	21
5.3.2 Hypothese Sec2; na de drempel is er geen secundaire stroming.....	23
5.3.3 Hypothese Sec3; dubbele spiraalstroom.....	23
5.3.4 Hypothese Sec4; grootte van de secundaire stroming.....	24
5.4 SEDIMENTTRANSPORT	24
5.4.1 Hypothese Sed1; verschil in sedimentatie bij drempel door sec. stroming.....	24

5.4.2 Residueel sedimenttransport	24
5.5 BODEMVERSCHILKAARTEN	26
5.5.1 Bodemverschilkaarten van 1996-1993	26
5.5.2 Baggerwerk in relatie tot de 3 maandelijkse kuberingen	26
6. BESCHRIJVEND MORFODYNAMISCH MODEL VAN DE DREMPELS VAN BATH EN VALKENISSE	27
6.1 BESCHRIJVEND MORFODYNAMISCH MODEL VAN DE DREMPEL VAN BATH	27
6.2 BESCHRIJVEND MORFODYNAMISCH MODEL VAN DE DREMPEL VAN VALKENISSE	29
7. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	31
7.1.1 Conclusies met betrekking tot de waterbeweging bij de Drempel van Bath	31
7.1.2 Conclusies met betrekking tot het sedimenttransport bij de Drempel van Bath	31
7.1.3 Conclusies met betrekking tot de morfologie bij de Drempel van Bath	31
7.1.4 Conclusies met betrekking tot de waterbeweging bij de Drempel van Valkenisse	31
7.1.5 Conclusies met betrekking tot het sedimenttransport bij de Drempel van Valkenisse	32
7.1.6 Conclusies met betrekking tot de morfologie bij de Drempel van Valkenisse	32
7.1.7 Algemene conclusie over Drempels van Bath en Valkenisse	32
7.2 AANBEVELINGEN	32
8. LITERATUUR	33
9. EVALUATIE VAN DE STAGE	34
9.1 MOTIVATIE	34
9.2 STAGEOPDRACHT	34
9.3 VERLOOP VAN DE STAGE	34
9.4 RESULTAAT	35
9.5 BEGELEIDING	35
9.6 RIKZ MIDDELBURG	36

Lijst van figuren

FIGUUR 2-1: MORFODYNAMISCH MODEL
FIGUUR 2-2: DIVERGENTIE
FIGUUR 2-3: GETIJ RESIDUELE STROMING
FIGUUR 2-4: GETIJ ASYMMETRIE BIJ MEETPUNT BATH
FIGUUR 2-5: SECUNDAIRE STROMING IN DWARSRICHTING
FIGUUR 5-1: DOMINANT VOLUME/DOORSTROOMOPPERVLAK VOOR DE GEMETEN WAARDEN EN DE WAARDEN ZOALS DEZE VOLGENS BLIEK ZOULDEN MOETEN ZIJN.

Lijst van tabellen

TABEL 4-1: OVERZICHT VAN DE GEBRUIKTE METINGEN
TABEL 4-2: MEETFOUTEN
TABEL 5-1: DOMINANT VOLUME/DOORSTROOMOPPERVLAK
TABEL 5-2: LANGSVERHANGEN (IN M/M) OVER DE DREMPELS VAN BATH EN VALKENISSE EN IN HET NAUW VAN BATH
TABEL 5-3: RELATIEVE SNELHEIDSVERSCHILLEN [-]
TABEL 5-4: SEDIMENTTRANSPORTEN IN RAAI 2
TABEL 5-5: NETTO AANZANDING DREMPELS

Bijlagen

BIJLAGE 1: KAART WESTERSCHELDE
BIJLAGE 2: FIJN GRID SCALWEST
BIJLAGE 3: GROF GRID SCALWEST
BIJLAGE 4: DIVERGENTIE/CONVERGENTIE EB
BIJLAGE 5: DIVERGENTIE/CONVERGENTIE VLOED
BIJLAGE 6: SNELHEID EB
BIJLAGE 7: SNELHEID VLOED
BIJLAGE 8: RAAIEN WAARIN HET DOORSTROOMPROFIEL IS GEMETEN
BIJLAGE 9: SPIRAALSTROMING UIT AZTM METING, RAAI 2, 1989, UIT 4 GEM. WAARDEN OP MAX. STROMING
BIJLAGE 10: SPIRAALSTROOM IN HET NAUW VAN BATH; SCALWEST 3D, MAX. EBSTROOM
BIJLAGE 11: VERSCHIL IN STROMING TUSSEN BOVENLAAG EN ONDERLAAG, MAX EB
BIJLAGE 12: VERSCHIL IN STROMING TUSSEN BOVENLAAG EN ONDERLAAG, MAX VLOED
BIJLAGE 13: LIGGING VAN DE KUBEERPOLYGONEN
BIJLAGE 14: VERSCHIL IN BODEMLIGGING 1993-1996
BIJLAGE 15: BAGGERGEGEVENS/KUBERINGEN

1. Inleiding

1.1 Kader

In dit rapport wordt de morfodynamiek van de Drempels van Bath en Valkenisse beschreven. Tevens worden hypothesen getoetst met betrekking op het morfodynamisch gedrag, die door Tank (1996) zijn geformuleerd.

Drempels zijn ondieptes in een geul. Deze komen vooral voor op de overgang tussen twee bochten in rivieren en in estuaria. In de Westerschelde komen deze drempels op een aantal plaatsen voor (Zie Bijlage 1).

Voor de scheepvaart tussen Antwerpen en de Noordzee zijn deze ondieptes in de vaargeul een toenemende hinder. Door de schaalvergroting van de zeescheepvaart wordt voor de steeds dieper stekende schepen de Antwerpse haven in een steeds smaller getijvenster bereikbaar. Dit is economisch onaantrekkelijk en daarom moeten deze drempels worden verdiept. Door deze verdieping zal het onderhoudsbaggerwerk van 9 Mm³ worden vergroot naar 12 tot 15 Mm³ per jaar (Tank, 1996).

Deze forse ingreep in de morfologie heeft invloed op de ecologie en op de veiligheid van de gebieden die aan de Westerschelde liggen. De natuurlijke waarden dienen zoveel mogelijk behouden te worden, zoals is bepaald in het Beleidsplan Westerschelde (Bestuurlijk Klankbordforum Westerschelde, 1991). Om dit te bereiken wordt door Rijkswaterstaat/Directie Zeeland onderzoek gedaan naar beheersalternatieven die het baggerbezwaar verminderen. Deze zijn te onderscheiden in het veranderen van de baggeractiviteiten en het aanpassen van de morfologie.

Voorbeelden van het veranderen van de baggeractiviteiten zijn: het veranderen van de frequentie van de baggerwerkzaamheden, het op grotere afstand dumpen van baggerspecie en het baggeren voor zandwinning.

Voorbeelden van het aanpassen van de morfologie zijn: kombergingsvergroting door middel van ontpoldering, het aanleggen van leidammen en morfologisch baggeren.

1.2 Doelstelling

Om de effecten van deze beheersalternatieven te kunnen bepalen, moet eerst kennis over het morfodynamisch gedrag van drempels worden vergaard. Daarom zijn Rijkswaterstaat/Directie Zeeland en het Rijksinstituut voor Kust en Zee gestart met het drempelonderzoek met als doelstelling:

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.

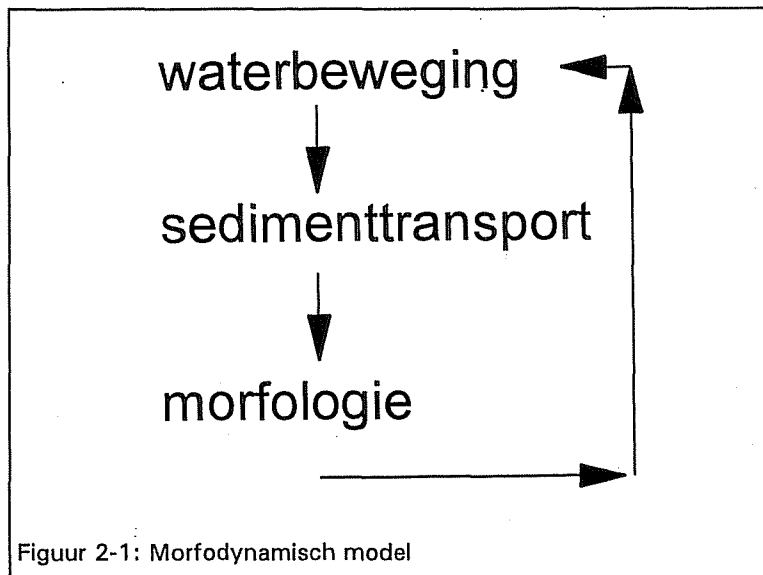
Tot nu toe is het onderzoek naar het morfodynamisch gedrag van drempels vooral gericht op de Drempel van Hansweert waar omvangrijke metingen hebben plaatsgevonden. De doelstelling van deze deelstudie luidt:

Het opschalen van de kennis van de Drempel van Hansweert naar de Drempels van Bath en Valkenisse. Tevens dient een beschrijvend morfodynamisch model van de Drempels van Bath en Valkenisse te worden gegenereerd, aan de hand van het toetsen van hypothesen die zijn opgesteld in de verkennende studie (Tank, 1995) en de literatuurstudie (Tank, 1996).

1.3 Leeswijzer

De haastige lezer wordt direct verwezen naar hoofdstuk 6 waarin het beschrijvend morfodynamisch model voor de Drempels van Bath en Valkenisse wordt verwoord. De lezer die geïnteresseerd is in de achtergronden van en de toetsingsmethoden waarop dit morfodynamisch model is gebaseerd, kan gebruik maken van de hoofdstukken 2 t/m 5. In hoofdstuk 2 zullen de processen worden beschreven die van belang zijn voor de morfologie in de Westerschelde. De omgevingsschets wordt in hoofdstuk 3 beschreven. De gebruikte metingen staan in hoofdstuk 4. In hoofdstuk 5 worden de hypothesen uit de verkennende studie en de literatuurstudie door Tank (1995, 1996) getoetst. Het beschrijvend morfodynamisch model van beide drempels wordt in hoofdstuk 6 beschreven. Dit leidt tot conclusies en aanbevelingen die in hoofdstuk 7 worden beschreven.

2. Processen die van belang zijn voor het gedrag van drempels



2.1 Inleiding

Bij de morfodynamiek van drempels spelen verschillende processen een rol. Een denkmodel daarbij staat in Figuur 2-1. Hierin wordt verondersteld dat de waterbeweging de grootte van het sedimenttransport bepaalt. Het sedimenttransport bepaalt op haar beurt de verandering van de morfologie door sedimentatie en erosie.

Echter de waterbeweging is afhankelijk van de morfologie. Door de vervorming van de bodem, zal het water anders gaan stromen. Met de gewijzigde waterbeweging kan weer dezelfde redenatie worden gehouden.

De drie onderdelen van het morfodynamisch model worden hieronder kort toegelicht.

2.2 Waterbeweging

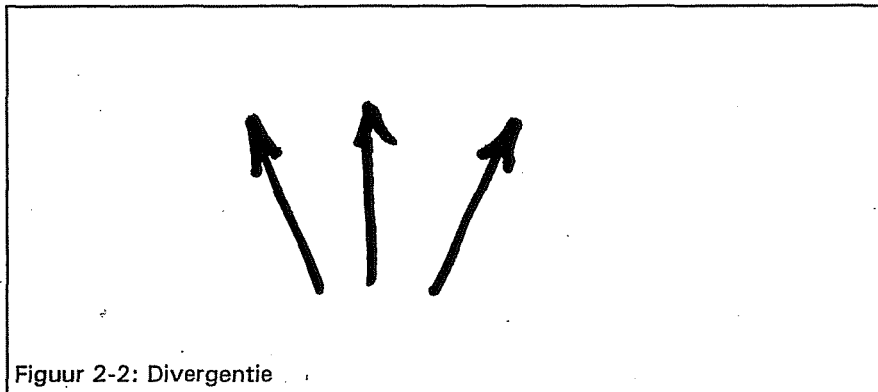
2.2.1 Waterbeweging in langsrichting

Het sedimenttransport wordt vaak gerelateerd aan de stroomsnelheid tot de 4^e macht. Kleine fluctuaties in de snelheid resulteren daardoor in grote verschillen in sedimenttransport. Deze verschillen in sedimenttransport vormen aanzanding en erosie. Vanwege de gevoeligheid voor het sedimenttransport, is het van belang de snelheid nauwkeurig te kennen.

De stroomsnelheid van het water wordt bepaald door verhangen, coriolis effect, wind, waterdiepte en bodemwrijving. De verhangen in langsrichting ontstaan voornamelijk door getij.

2.2.2 Divergentie/Convergentie

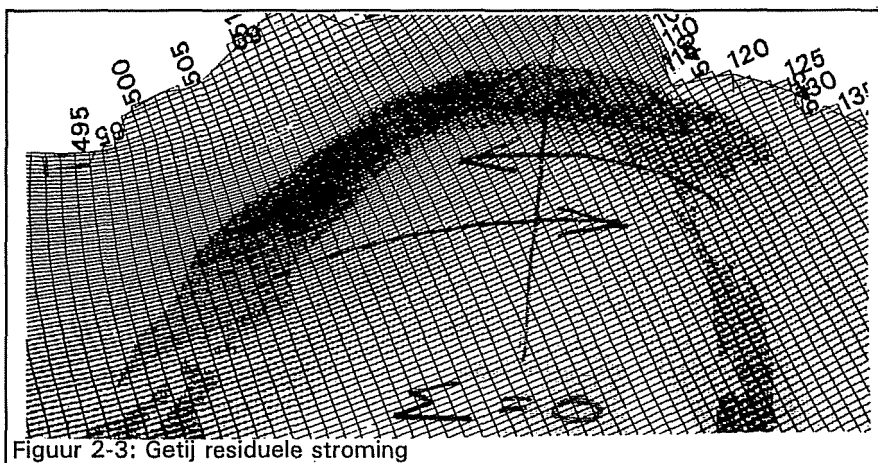
Divergentie is het verspreiden van de stroom over een grotere geulbreedte (Zie Figuur 2-2). Hierdoor staan de vectoren van de stroming van elkaar af gericht (convergentie naar elkaar toe gericht). Door divergentie neemt het debiet per meter breedte [$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$] af. Bij een kleiner debiet per breedte hoort een kleinere evenwichtssnelheid. Op een drempel is de verandering van de snelheid van belang voor de sedimenttransportcapaciteit van de stroming.



2.2.3 Residuele stroming

Residuele stroming zijn patronen in de waterbeweging, waarvan het netto volume transport over een doodtij/springtijcyclus van dijk tot dijk nul bedraagt, maar waar binnen een raaisectie delen zijn, die een netto watertransport hebben. (Zie Figuur 2-3).

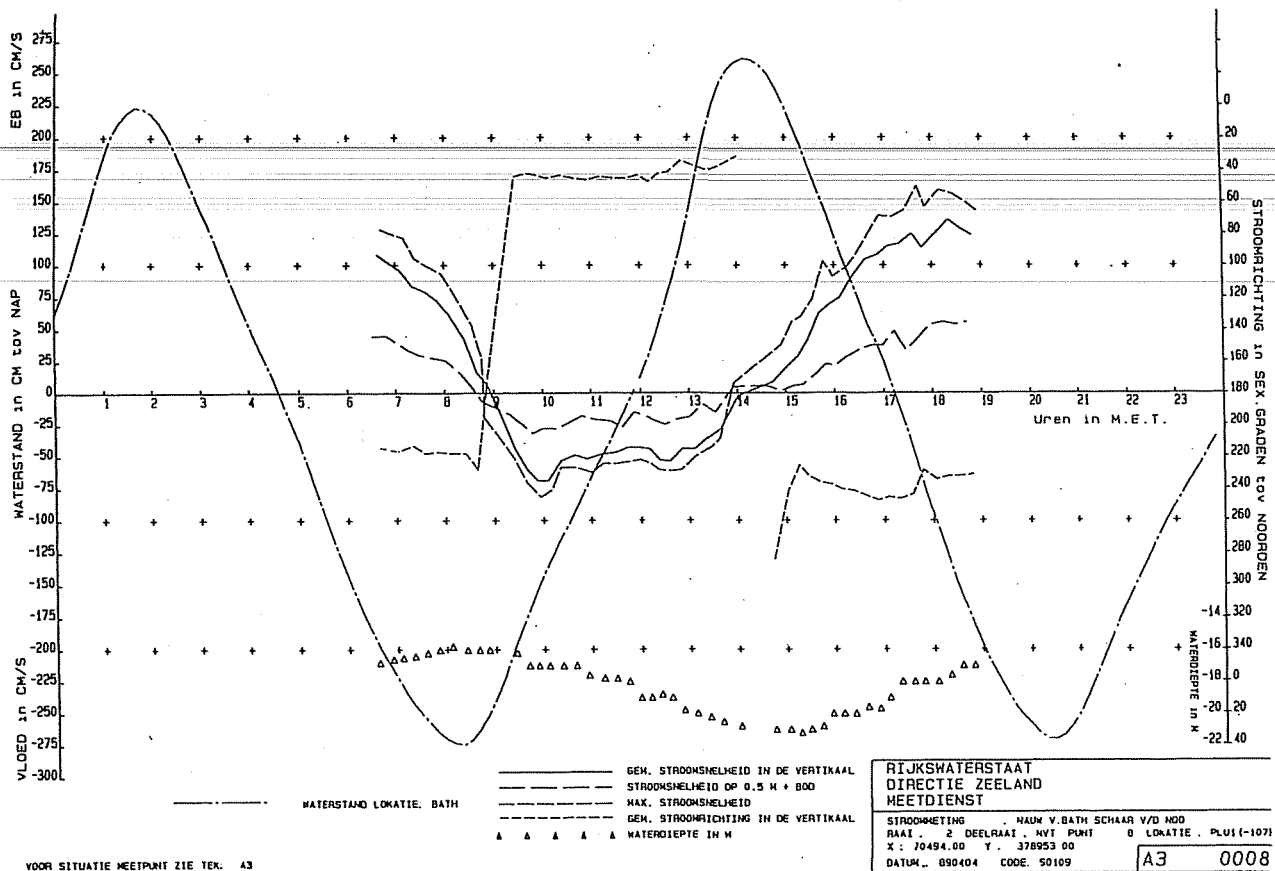
Als de waterbeweging sediment transporteert, dan zal voor het sediment binnen een raaisectie ook een residueel transport ontstaan.



2.2.4 Getij asymmetrie

De dominerende getijgolf op de Noordzee is een golf met een periode van 12h24'. Deze variatie van de waterstand op zee zorgt voor een verhang in de Westerschelde, waardoor eb- en vloedstromen ontstaan. Het verschil in vorm tussen de stroomsnelheidsgolf die het estuarium in gaat en die het estuarium uitgaat wordt getijasymmetrie genoemd. Zie figuur 2-4. Dit kan bijvoorbeeld betekenen dat de eb langer duurt dan de vloed. In figuur 2-4 is dit te zien als een niet symmetrische vorm van de golf.

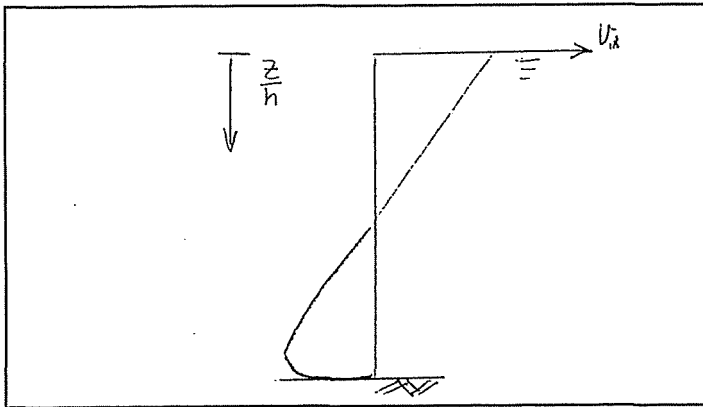
Getijasymmetrie kan gevolgen hebben voor het sedimenttransport. Omdat het sedimenttransport ongeveer evenredig is met de snelheid tot de 4^e macht, zal bij een gelijk getijvolume, een kort durende grote snelheid meer sediment transporteren, dan bij een lang durende kleine snelheid. Hierdoor ontstaat een netto sedimenttransport.



Figuur 2-4: Getij asymmetrie bij meetpunt Bath

2.2.5 Secundaire stroming ten gevolge van bochtverhang

Secundaire stroming in dwarsrichting (figuur 2-5) is de stroming die in een stroomvertikaal haaks op de hoofdstroomrichting staat. De som over de hele vertikaal is per definitie nul. De twee belangrijkste mechanismen die een secundaire stroming induceren zijn de bochtstroom en de invloed van de coriolis versnelling.



Figuur 2-5: Secundaire stroming in dwarsrichting

Bochtstromen.

Bij een bochtstroom moet het water van richting worden veranderd. Hier treedt een dwarsverhang op. Deze oppervlaktehelling brengt een drukgradiënt mee die de stroming de bocht om duwt. De grotere stroomsnelheden bovenin de vertikaal vereisen echter een grotere drukgradiënt voor dezelfde kromming, zodat een secundaire snelheid naar de buitenbocht overblijft. Onderin is de drukgradiënt te groot voor de kleinere stroomsnelheid, zodat een secundaire snelheid naar de binnenbocht resulteert. Ruimtelijk gezien zal een waterdeeltje dan een spiraalvormige baan beschrijven.

Deze spiraalvormige stroming heeft invloed op het sedimenttransport. Omdat bij de bodem een grotere concentratie sediment in de vertikaal aanwezig is, zal er een netto transport naar de binnenbocht zijn. Bij drempels is dit netto dwarstransport van belang voor de vorming van de drempel.

Secundaire stroming ten gevolge van Coriolis

Ook in een rechte geul ontstaat een spiraalstroming. Volgens Coriolis ondervindt een deeltje op het noordelijk halfrond een schijnversnelling naar rechts op het moment dat het deeltje beweegt. Deze schijnversnelling is rechtevenredig met de snelheid. Omdat in een rechte watergeul de stroming bovenin de geul harder stroomt dan onderin, zal de stroming bovenin een grotere invloed van Coriolis ondervinden. De stroming bovenin zal sterker naar rechts stuwen dan de stroming onderin en zal daarmee een spiraalstroom op gang brengen. De secundaire stroming is niet afhankelijk van de snelheid van de langsstroom, maar alleen afhankelijk van het snelheidsverschil tussen de bovenste- en onderste laag van de langsstroming.

Deze spiraalvormige stroming heeft net als bij de bochtstroming invloed op het sedimenttransport.

2.3 Sedimentbeweging

2.3.1 Algemeen

Sedimenttransport is het transport van bodemdeeltjes. Dit transport wordt onderscheiden in het bodemtransport en het suspensietransport. De overgang tussen beide is niet scherp aan te geven.

Sedimenttransport is van veel factoren afhankelijk. De voornaamste factoren zijn:

- stroomsnelheid van het water
- grootte van de korrel

In de Westerschelde zijn de afmetingen van de zandkorrels zodanig klein dat vrijwel altijd van suspensietransport kan worden uitgegaan. Het suspensietransport wordt vaak gerelateerd aan de stroomsnelheid tot de 4^e macht. Wat inhoudt dat bijvoorbeeld een 4% grotere stroomsnelheid, een toename van het sedimenttransport met 17% geeft.

2.3.2 Sedimenttransport onder invloed van secundaire stroming

Vanwege spiraalstroming zal de stroming aan de bodem een andere richting hebben dan de stroming aan het oppervlak. Door de dwarscomponent van de waterbeweging aan de bodem, zal ook een dwarscomponent ontstaan voor het bodemtransport en voor het suspensietransport in de onderste helft van de stroming. De bovenste helft van de stroming neemt alleen sediment in suspensie mee in de overheersende stroomrichting van de bovenste helft van de vertikaal. Een bijkomend effect is dat de sedimentconcentratie in de bovenste laag lager is dan de concentratie in het onderste deel van de stroming. De richting van het totale sedimenttransport hoeft dus niet gelijk te zijn aan de richting van de hoofdstroom.

2.4 Morfologie en drempelvorming

2.4.1 Morfologie

Morfologie is de beschrijving van de bodem van een oppervlaktewater zoals: een zee, een estuarium of een rivier. Het beschrijft de ligging van de geulen, platen en andere bodemvormen, zoals ribbels en drempels.

De morfodynamiek beschrijft de veranderingen van de morfologie, die zeer sterk gerelateerd zijn aan de waterbeweging en het sedimenttransport. Door de verandering van de bodem gaat bijvoorbeeld een rivier anders stromen, wat weer invloed heeft op het sedimenttransport. Alle sedimenttransportmechanismen die eerder in dit hoofdstuk zijn genoemd, hebben invloed op de morfodynamiek.

2.4.2 Drempels

Drempels zijn natuurlijke ondiepe gedeeltes in relatief rechte stukken rivier of getijdegeul. Deze komen overwegend voor tussen twee bochten, op plaatsen waar divergentie optreedt en bij aftakkende geulen. De grootte van de drempel hangt sterk af van de waterbeweging. In natuurlijke omstandigheden kunnen de drempels in evenwicht zijn met de omgeving. De drempel zal over een doodtij/springtijcyclus dan nauwelijks groeien.

In estuaria komen deze drempels ook voor, maar in een licht gewijzigde vorm. De bodem past zich aan, aan de bi-directionele stroming.

De vorm van de drempel wordt bepaald door de aanstroming en afstroming van de drempel. Bij een sterke stroom aan de buitenbocht, kan de drempel diagonaal door de geul lopen, zoals bij de Drempel van Valkenisse. Het doodlopen van een nevengeul op een drempel kan ook een aanleiding zijn tot drempelvorming. Dit is te zien bij de Drempel van Bath, waar de Schaar van de Noord doodloopt.

3. Omgevingsschets van de drempels

3.1 Drempel van Bath

De Drempel van Bath is de meest oostelijke drempel in de Westerschelde (Zie Bijlage 1). De drempel ligt in het Vaarwater boven Bath en sluit met de benedenstroomse zijde aan op het Nauw van Bath. Westelijk van de drempel ligt de plaat van Saeftinge met daarin de Schaar van de Noord. Oostelijk ligt de Appelzak.

De geul waarin de drempel ligt is eb gedomineerd.

Sinds 1920 wordt nabij de Drempel van Bath gebaggerd om de scheepvaart mogelijk te maken. Voor 1950 was dat ruim $1\text{Mm}^3/\text{j}$, dit is na de 2^e wereldoorlog verdubbeld naar $2\text{Mm}^3/\text{j}$. In eerste instantie werd gebaggerd omdat de bocht te krap was. Dit is later uitgebreid naar de drempel wegens de ondiepte van de drempel.

De gebaggerde specie is tot 1980 grotendeels in de Schaar van de Noord gestort. Nu wordt een groot deel van deze specie in de buitenbocht van het Zuidergat gedeponeerd. Dit is 15km benedenstrooms van de drempel.

Mede door het storten van specie in de Schaar van de Noord is de Drempel van Bath zich gaan verdiepen en verbreden. De diepte bedroeg in 1950 10 m en bedraagt nu 15 m. Met het verruimen van dit profiel is het gebied ten oosten van de drempel, de Appelzak zich gaan verondiepen, mede onder invloed van de leidam aan de bovenstroomse zijde van de Appelzak.

De Schaar van de Noord migreert van zuid naar noord over de Plaat van Saeftinge. In de 80-er jaren is de schaar in belang afgenomen, maar door nieuwe kortsluiting van de Schaar van de Noord is sinds 1994 het debiet door de geul weer toegenomen.

3.2 Drempel van Valkenisse

De Drempel van Valkenisse ligt benedenstrooms van het Nauw van Bath. Ten westen van de drempel ligt de Overloop van Valkenisse. De drempel ligt op de overgang tussen twee bochten. Ter hoogte van de drempel begint aan de oostzijde de Schaar van de Noord. Deze vloed-schaar is eigenlijk het doodlopen van de buitenbocht van de Overloop van Valkenisse. Aan de bovenstroomse zijde van de drempel mondt de Zimmermangeul uit.

De monding van de Zimmermangeul is in de loop van de tijd niet verplaatst. De Schaar van Valkenisse heeft de monding vaak verlegd. Tussen 1931 en 1967 verplaatste de geul zich oostwaarts, vervolgens mondde de Schaar van Valkenisse uit in de Zimmermangeul, waarna de monding van de schaar zich weer westwaarts verplaatste.

Voor 1950 was deze drempel diep genoeg voor de scheepvaart. Vanwege de schaalvergroting in de scheepvaart kwam er behoefte aan een diepere vaargeul. Daarom is de vaargeul tussen 1950 en 1970 verdiept. In deze periode bedroeg het onderhoudsbaggerwerk $1\text{Mm}^3/\text{j}$. Na de laatste verdieping die in begin jaren '70 een aanvang nam, nam de baggerinspanning aanvankelijk toe tot $4\text{Mm}^3/\text{j}$ om vervolgens weer af te nemen tot $1.5\text{Mm}^3/\text{j}$.

De stortplaatsen waren voornamelijk de zuidoever van het Zuidergat, waar tijdens het verdiepen $4\text{Mm}^3/\text{j}$ werd gestort. In de Schaar van Waarde werd gemiddeld $1\text{Mm}^3/\text{j}$ gestort. Aanvankelijk werd ook $1\text{Mm}^3/\text{j}$ gestort in de Schaar van de Noord, maar dit is sinds 1980 teruggebracht tot $0.3\text{Mm}^3/\text{j}$.

4. Beschikbare gegevens

Voor het toetsen van de hypothesen in hoofdstuk 5, worden meetgegevens en modelresultaten gebruikt. De gebruikte metingen en modelresultaten worden in dit hoofdstuk toegelicht.

4.1 Meetgegevens

De stroomsnelheid kan op verschillende manieren worden gemeten. Voor de hier gebruikte metingen is gebruik gemaakt van de AZTM.

4.1.1 AZTM

De waterbeweging en het sedimenttransport worden gemeten met een Acoustische ZandTransportMeter (AZTM). Deze werkt op basis van het veranderen van een geluidsgolf door gesuspenderde sedimentdeeltjes. Uit de amplitude en de frequentieverschuiving van het verstrooide signaal kan de concentratie en de snelheid van de zanddeeltjes continu berekend worden. Uit de concentratie en de snelheid wordt het zandtransport berekend. Deze transportmeter is gemonteerd op een meetvis en wordt bediend vanaf een meetschip. Een verticaal wordt van onder naar boven gemeten, volgens een vast meetschema, waarbij de onderste meetpunt op 0.50m van de bodem ligt.

De nauwkeurigheid van deze meter is voor de snelheid 2% en voor de concentratie 5% bij bekende korrelafmetingen en 30% bij onbekende korrelafmetingen. (WL, 1983)

De sedimentmetingen zijn gelijktijdig en in het zelfde meetpunt verricht met de stroommetingen (Zie Tabel 4-1)

datum	raai	rapportnummer	getij coëfficiënt	wind	
4 april 1989	2	ZLMD-89.N.063	1.12	NO 6-7 Bft.	
22 juni 1994	2	ZLMD-94.N.027	1.08	NW 5 Bft.	div. storingen

Tabel 4-1: Overzicht van de gebruikte metingen

4.1.2 Bodemgegevens

De bodemligging wordt bepaald met lodingen. Sinds 1992 gebeurt dat bij Rijkswaterstaat met RWSLOD, dit is een peil- en verwerkingssysteem.

Voor de gehele Westerschelde zijn deze lodingen periodiek (1x per jaar, raaiafstand 100m).

Voor detailgebieden zijn deze ook periodiek, maar met een hogere frequentie (4x per jaar) en worden bovendien de raaien om de 75m gevaren.

De dieptegegevens worden gebiedsdekkend gemaakt met het programma Digibeeld. Dit programma interpoleert de dieptegegevens tot een grid. Het resultaat wordt een Digitaal Terrein Model genoemd.

Fouten in de dieptegegevens kunnen worden onderverdeeld in stochastische, vaste en variabele systematische fouten (Storm et al., 1994). De orde grootte van de stochastische fout en van de systematische fout staan in Tabel 4-2. Van de variabele systematische fout is geen getal te geven bij gebrek aan wetenschap hiervan.

	Stochastische fout [m]	vaste systematische fout [m]
geulbodems/vlakke gebieden	± 0.19	- 0.10
geul-/plaathellingen	± 0.39	- 0.25

Tabel 4-2: Meetfouten

De gemeten waterdiepten zijn niet geheel gebiedsdekkend. Om dieptekaarten gebiedsdekkend te maken, moeten de bodemgegevens worden geïnterpoleerd met DIGIBEELD. Volgens de Meetkundige Dienst en Technisch Fysische Dienst (TPD) van TNO in Storm et al. (1994), is gebleken dat DIGIBEELD een objectieve en betrouwbare interpolatiemethode is.

De nauwkeurigheid van de bodemhoogteverschillen wordt grotendeels bepaald door de bij het meten en bewerken ontstane fouten. De vaste systematische fouten van de twee bodemkaarten vallen bij het maken van een bodemhoogteverschilkaart voor een groot deel tegen elkaar weg.

Kuberen is het bepalen van het nat volume boven een polygoon die is uitgezet op een dieptekaart. Aan de bovenzijde wordt een referentie hoogte opgegeven (t.o.v. NAP of GLLWS). Aan de onder zijde bevindt zich de (geïnterpoleerde) bodem. Door het verschil in volume te bepalen tussen twee tijdsperioden (verschilkuberingen) kan de volumeverandering van het door de polygoon aangegeven volume worden berekend. De volumeverandering is gelijk aan de toe- of afname van het zandvolume.

Bij verschilkuberingen valt naast de vaste systematische fouten ook de stochastische fouten voor een deel weg. (Storm et al., 1994)

4.1.3 Baggercijfers

Baggercijfers zijn afkomstig van de Afdeling Maritieme Schelde van het Belgisch Ministerie van Openbare Werken. Deze worden direct bepaald uit de massa die de baggerschepen vervoeren.

4.2 Modelgegevens

Omdat de metingen niet gebiedsdekkend zijn, zijn er modelresultaten gebruikt. Deze modelgegevens hebben een grotere dichtheid. Ook zijn resultaten uit modelberekeningen onderling consistent en beter vergelijkbaar dan metingen van verschillende locaties, welke op verschillende dagen gemeten zijn. Een ander voordeel van de modelresultaten is het inzichtelijk maken van de waterbewegingen met behulp van animaties. Het nadeel van modelgegevens is dat het een benadering van de werkelijkheid is. Tevens is de nauwkeurigheid in de geulen veel groter dan aan de randen. De fout in snelheid in de geul is in de orde 0-5%. Aan de randen kan deze fout in de orde van 20% of meer liggen. Bij het toetsen van de hypothesen aan de modelresultaten wordt vaak het moment van maximale stroming gebruikt. Dit is gedaan omdat bij de grootste stroomsnelheid ook het grootste sedimenttransport optreedt. Als er een ander tijdstip wordt gebruikt dan zal het worden vermeld.

4.2.1 SCALWEST 2DH

SCALWEST is een toepassing van het 2DH waterbewegingsmodel WAQUA dat is afgeregeld voor de Westerschelde. Het model gebruikt bodemgegevens van 1996 (Jansen, 1997) Dit model rekent met een kromlijinig grid. (Zie Bijlage 2) De gridafmeting is variërend en zodanig gekozen dat bij interessegebieden het grid fijner is. Met name bij de drempels en (binnen) bochten is het grid fijner. Daar zijn de gridafmetingen 10x20m. De gridlijnen volgen zo goed mogelijk de geulen. Het model bestrijkt de hele Westerschelde vanaf de voordelta tot aan Gent in België. Het model rekent met doottij met de randvoorwaarden van 27-4-1996 en met springrij met de randvoorwaarden van 5-5-1996. Dit zijn beide gegevens van een gemiddeld spring- en doottij. In de gesimuleerde periodes was er weinig wind, maximaal 2-3 Bft.

4.2.2 SCALWEST 3D

SCALWEST 3D met 8 lagen waterbeweging is een uitbereiding van SCALWEST 2DH. Het gebruikt eveneens de bodemgegevens van 1996 en het kromlijnige grid. De gridafmetingen zijn grover (1:3) dan bij het 2DH model om rekentijd te besparen. (Zie Bijlage 3) De resultaten die hier worden gebruikt zijn nog niet geverifieerd, maar worden toch gebruikt omdat deze inzicht geven in het stromingsbeeld. De randvoorwaarden van het model zijn van de datum 28-9-1996, dit is een gemiddeld springtij.

5. Toetsing van de hypothesen

5.1 Inleiding

In de eerste fase van het onderzoek naar het morfodynamisch gedrag van drempels in de Westerschelde is een literatuurstudie uitgevoerd (Tank, 1995 en 1996). Op basis van deze studie, die sterk leunt op de rivierkunde en die is aangevuld met inzichten uit analyses van metingen zijn een aantal hypothesen over het gedrag opgesteld (Tank, 1996). Deze zijn onderverdeeld in waterbeweging, sedimenttransport en morfologie.

De hypothesen met betrekking tot de waterbeweging zijn uitgebreider uitgewerkt dan die over het sedimenttransport, omdat hiervan meer gegevens beschikbaar waren. De hypothesen met betrekking op de morfologie zijn niet getoetst. Deze hypothesen bleken minder relevant te zijn voor de vorming van drempels.

In dit hoofdstuk worden de hypothesen getoetst voor de Drempels van Bath en Valkenisse. De werkwijze is per hypothese gelijk. Na de hypothese (in vet gedrukt) volgt eerst een nadere uitleg van de hypothese, daarna wordt de methode van toetsen kort beschreven. Vervolgens worden de resultaten gepresenteerd. Elke toetsing eindigt met een conclusie.

5.2 Langsstroming

5.2.1 Hypothese W1; divergentie en vertraging op de drempel

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 bestaat uit twee stellingen die apart getoetst worden:

- W1a Als het water van de bocht naar een relatief recht stuk geul stroomt, divergeren de stroomlijnen van de hoofdstroming.
- W1b Als het water van de bocht naar een relatief recht stuk geul stroomt, neemt de stroomsnelheid af.

W1a Divergentie stroming van bocht naar drempel

Method

Divergentie is het uiteen lopen van stroomlijnen. Het aantonen van divergentie gebeurt grafisch door het volgen van stroomlijnen. Het is vrij eenvoudig te zien of de stroomlijnen divergeren of convergeren.

Beschrijving van de optredende divergentie/convergentie

De nummers die in de tekst tussen haakjes worden genoemd, komen overeen met de raainummers in de bijlagen.

Drempel van Bath; Eb

Zie Bijlage 4

Aan de Antwerpse zijde van de Drempel van Bath lopen tijdens de maximum eb stroming de stroombanen parallel (1). Op de drempel buigt een groot deel van de stroom af naar de Schaar van de Noord (2). Er treedt daarbij divergentie op. Deze divergentie houdt stand tot de stroming het Nauw van Bath bereikt. Daar convergeert de stroming naar een buitenbochtstroom (3).

Drempel van Valkenisse; Eb

Na het Nauw van Bath, waar de stroming uit de diepe buitenbocht komt, divergeert de stroming op de Drempel van Valkenisse (4). De invloed van het water dat van de Plaat van Saeftinge naar de drempel stroomt, is te verwaarlozen bij het water dat divergeert op de drempel. De divergentie van de hoofdstroom zet door tot de aan de Schaar van Valkenisse.

Drempel van Valkenisse; Vloed

Zie Bijlage 5

De stroming naar de Drempel van Valkenisse komt uit de Overloop van Valkenisse. Deze langgerekte bocht heeft een sterke buitenbochtstroom (4). Aan de rechterzijde van de Drempel van Valkenisse divergeert de stroming naar de Schaar van de Noord, die het water de Plaat van Saeftinge op leidt (3). Het volume dat de plaat opstroomt is 60% van het getijvolume. In de Schaar van de Noord stroomt het tevens sneller dan op de drempel.

Drempel van Bath; Vloed

Met vloed stroomt het grootste deel van het getijvolume (60%) over de Plaat van Saeftinge. Op het moment dat het water van de Plaat van Saeftinge naar het Vaarwater boven Bath stroomt, is het deel net voor de drempel convergent (2). Het bovenste deel van het water dat van de Plaat van Saeftinge stroomt naar het Vaarwater boven Bath schiet door de traagheid door naar de Appelzak. Op de drempel zelf convergeert de stroming aan de zijde van de Plaat van Saeftinge. Aan de zijde van de Appelzak is de stroming convergent tot 500m voorbij de drempel.

Ten zuiden van de drempel, naast het Verdronken land van Saeftinge convergeert de stroming naar de geul die wordt gefixeerd door de leidam (1).

Conclusie

Op beide drempels treedt divergentie op, met de uitzondering van de Drempel van Bath tijdens vloed, waar de stroming aan de westzijde convergeert.

W1b Van bocht naar drempel neemt de stroomsnelheid af.

Methodes

Met behulp van het model SCALWEST worden op het moment van maximum eb- en vloedstroom de snelheden van het hele drempelgebied weergegeven in een kleurenplot. Hieruit is te zien waar de stroming versnelt en vertraagt.

Beschrijving van het snelheidsverloop met springtij

Drempel van Bath; maximum eb

Zie Bijlage 6

Tijdens de maximum ebstroom neemt de stroomsnelheid van 1.40 m/s aan het begin van de drempel af tot 1.20 m/s op de drempel. Net na de drempel buigt een groot deel van de stroming af richting de Schaar van de Noord. Vanwege het grote verhang neemt daar de snelheid toe, tot lokaal 0.25 m/s meer dan op de drempel. Het deel van de stroming dat van de drempel naar het Nauw van Bath stroomt, neemt in snelheid af tot 1.00 m/s. In de bocht zelf neemt aan de binnenbochtzijde de stroomsnelheid met 0.05 m/s toe.

Drempel van Bath; maximum vloed

Zie Bijlage 7

Tijdens de maximum vloedstroom is in de stroomsnelheid op de Drempel van Bath een lichte toename te zien van 0.80 m/s naar 0.95 m/s. Ten zuiden van de drempel, neemt de stroming dezelfde snelheid aan als voor de drempel. In het Vaarwater boven Bath vindt ter hoogte van de leidam een toename van de stroomsnelheid plaats van 1.00 m/s naar 1.20 m/s. Aan het einde van de Schaar van de Noord neemt de stroomsterkte af, van 1.60 cm/s naar 0.90 cm/s. Deze vermindering in snelheid kan duiden op een sterke verandering in het sedimenttransport.

Drempel van Valkenisse; maximum eb

Zie Bijlage 6

Tijdens maximum eb neemt de stroomsnelheid die uit het Nauw van Bath komt eerst in snelheid toe, van 1.25 m/s naar 1.35 m/s. Dit kan worden toegeschreven aan de bochtstroming. Daarna stroomt het water de drempel op. Hierbij neemt de stroomsnelheid weer af naar 1.25 m/s. Na de drempel blijft de stroomsnelheid geringe mate afnemen (0.05 m/s). De stroomsnelheid wordt niet beïnvloed door de stroming van de Plaat van Saeftinge. In stroomafwaartse richting blijft de snelheid constant.

Drempel van Valkenisse; maximum vloed

Zie Bijlage 7

De Overloop van Valkenisse heeft aan de buitenbocht zijde een hoge snelheid. Tijdens vloed neemt de stroomsnelheid af van 1.70 m/s naar 1.45 m/s als het water uit de Overloop van Valkenisse de drempel opstroomt. Als het water de drempel afstroomt neemt de snelheid met 0.10 m/s toe. Van het gebied na de drempel tot de het midden van de Plaat van Saeftinge divergeert de stroming. In de Schaar van de Noord neemt de snelheid zelfs lokaal toe tot 1.60 m/s. Het deel van de stroming dat door het Nauw van Bath gaat, neemt na de drempel in sterkte af, maar blijft daarna constant.

Conclusies

De snelheden van de stroming fluctueren niet veel op de drempel. De verandering van de snelheid blijft in de orde van 10-15%.

5.2.2 Hypothese W2; vertraging door aftapping nevengeulen en te ruim profiel

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

Deze hypothese kan onderverdeeld worden in twee hypothesen, te weten:

- W2a De afname van de snelheid van de hoofdstroming wordt versterkt door aftapping van water door nevengeulen.
- W2b De afname van de snelheid van de hoofdstroming wordt versterkt door het relatief te ruime geulprofiel op een verdiepte drempel.

W2a Vertraging stroomsnelheid door aftapping

Hypothese W2a wordt hier niet onderzocht. De enige nevengeul die in de buurt van een drempel komt is de Zimmermangeul. Deze heeft maar 3% aandeel in het getijvolume, waarmee deze niet van belang wordt geacht voor de groei van de drempel.

W2b Vertraging stroomsnelheid op drempel door te ruim geulprofiel

Hypothese W2b is gebaseerd op de empirische relatie tussen getijvolume en doorstroomoppervlak in geulen in de Westerschelde. Dit is reeds eerder gedaan door Blik en De Ruiter, 1994. Deze relatie luidt:

$$DV = 14632 \cdot A$$

DV = ebvolume in een ebgeul; vloedvolume in vloedgeul [m³]

14632 = constante [m]

A = dwarsoppervlak geul [m²]

Deze relatie houdt in dat er bij een gegeven doorstroomoppervlak kennelijk een evenwichtsstroomsnelheid hoort. In de Westerschelde is in een geul die in evenwicht is de evenwichtsstroomsnelheid 0.66 m/s. Waarbij de evenwichtssnelheid de rekenkundige constante snelheid is gedurende de gehele getijfase.

De evenwichtsconstante is bepaald uit veel meetgegevens, maar mag niet zomaar worden toegepast voor alle punten in de Westerschelde, immers de randvoorwaarden veranderen (korrelgrootte, slibgehalte, zoutgehalte, harde bodemlagen, veenbanken, etc.)

Om toch een waarde te geven aan het te ruim of te krap zijn van het profiel, worden voor verschillende doorsnedes de verhouding dominant volume/doorstroomoppervlak bepaald. (Zie Bijlage 8 en tabel 5.1) Met deze verhouding wordt geprobeerd om een verschil aan te tonen tussen geuldelen waar niet wordt gebaggerd en de (verdiepte) drempels.

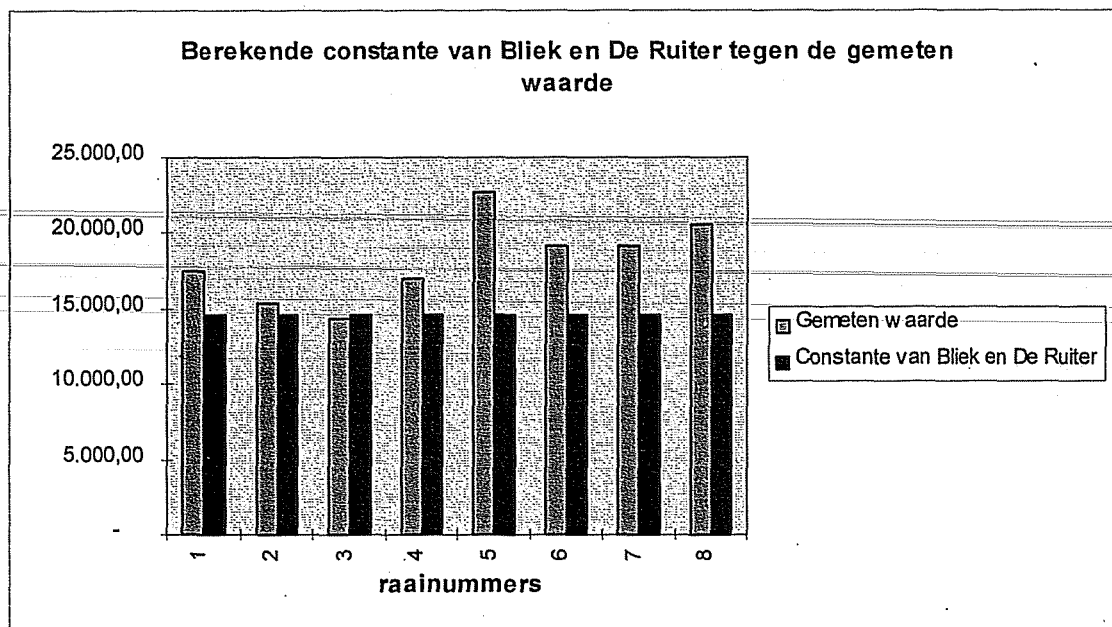
De volumegegevens worden met SCALWEST 2DH bepaald. De doorstroomoppervlakken worden met PROFIELGIS bepaald, voor een bodem van 1996.

Resultaten

Berekende Constante is het quotient van DV/Opp.

		Opp [m ²]	DV [m ³]	Berekende Constante van Blik constante en De Ruiter	
1	Overloop van Valkenisse	16.260	2,85E+08	17.528	14.632
2	Drempel van Valkenisse I	18.535	2,85E+08	15.376	14.632
3	Drempel van Valkenisse II	19.178	2,75E+08	14.339	14.632
4	Nauw van Bath	8.730	1,49E+08	17.067	14.632
5	Plaat van Saeftinge	5.770	1,31E+08	22.705	14.632
6	Drempel van Bath	13.048	2,50E+08	19.159	14.632
7	Vaarwater boven Bath	10.715	2,05E+08	19.132	14.632
8	Vaarwater boven Bath bij de leidam	11.673	2,40E+08	20.559	14.632

Tabel 5-1: Dominant volume/doorstroomoppervlak



Figuur 5-1 dominant volume/doorstroomoppervlak voor de gemeten waarden en de waarden zoals deze volgens Blik zouden moeten zijn.

In tabel 5-1 wordt de relatieve ruimheid van de raaien berekend. Deze gegevens zijn tevens in figuur 5-1 grafisch weergegeven. Uit deze maat voor de ruimheid van het doorstroomprofiel, volgt dat de Drempel van Valkenisse aan de verwachte waarde volgens Blik en De Ruiter voldoet. Het Vaarwater boven Bath en de drempel van Bath zijn krappere dan de Drempel van Valkenisse. Een deel van de afwijking kan worden verklaard, uit het feit dat de constante volgens Blik en De Ruiter, is opgesteld aan de hand van gemiddeld getij gegevens en niet uit springtijgegevens.

Als de berekende geulgegevens met elkaar worden vergeleken blijkt dat de Drempel van Valkenisse het meest ruime profiel heeft. De ruimheid van Drempel van Bath verschilt nauwelijks met de aansluitende geulen.

Conclusies

Uit de toetsing blijkt dat het doorstroomprofiel op de Drempel van Valkenisse ruimer is dan het profiel waarop het aansluit. Dit verband is bij de Drempel van Bath niet aanwezig. Vanwege het te ruim zijn van het doorstroomoppervlak ten opzichte van het dominant volume kan vertraging optreden die van belang is voor de verandering in sedimenttransportcapaciteit en daarmee de aanzanding van de drempels.

5.2.3 Hypothese W3; langsverhang op de drempel

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

Deze hypothese kan worden onderverdeeld in twee delen:

- W3a Het langsverhang over een -verdiepte- drempel in de hoofdgeul is kleiner dan het langsverhang in bochten.
- W3b Het langsverhang over de drempels wordt kleiner als er meer wordt gebaggerd.

Beide deelhypothesen zijn in feite een variatie op de vorige hypothese W2, omdat de stroomsnelheid in feite een afgeleide is van het langsverhang. Deelhypothese W3b wordt niet getoetst, omdat modelresultaten of metingen ontbreken voor een extra verdiepte drempel.

Wel is het zeer waarschijnlijk dat als een drempel nog meer wordt verruimd, het langsverhang over die drempel afneemt, omdat de weerstand vermindert.

W3a Het langsverhang over een -verdiepte- drempels in de hoofdgeul is kleiner dan het langsverhang in bochten

Methode

De gebruikte waterstandsgegevens zijn afkomstig van een SCALWEST berekening ten tijde van een gemiddeld springtij. De langsverhangen worden berekend op beide drempels en in het Nauw van Bath. De langsverhangen worden berekend uit het maximale verhang van de stroomdraad. Over de drempel wordt de stroomdraad recht verondersteld. Dit is gedaan voor zowel eb als vloed. De verhangen in de bocht het Nauw van Bath zijn bepaald uit de waterstandsverschillen tussen begin en einde het Nauw van Bath en de lengte van de gekromde stroomdraden. Daarbij wordt de gemiddelde waarde gebruikt van binnen- en buitenbocht.

Resultaten

	Drempel v. Bath	Drempel v. Valkenisse	Nauw v. Bath
Maximum eb	$6.6 \cdot 10^{-5}$	$2.2 \cdot 10^{-5}$	$5.4 \cdot 10^{-5}$
Maximum vloed	$4.0 \cdot 10^{-5}$	$2.9 \cdot 10^{-5}$	$2.3 \cdot 10^{-5}$

Tabel 5-2: Langsverhangen (in m/m) over de Drempels van Bath en Valkenisse en in het Nauw van Bath

Eb

Voor de ebstroom volgt dat het verhang naar een derde van de waarde afneemt van de Drempel van Bath naar de drempel van Valkenisse (Zie Tabel 5-2). Dit verklaart ook voor een deel het vertragen van de stroomsnelheid. Dit verhang is groter dan het verhang bij vloed.

Vloed

Met vloed is het verhang op de drempels groter dan het verhang in de bocht. Tevens is het verhang over de Drempel van Bath 30% groter dan het verhang over de drempel van Valkenisse.

Het kleine verhang over het Nauw van Bath is waarschijnlijk te verklaren uit het stromingspatroon. Het deel van de stroming dat door het Nauw van Bath gaat is kleiner dan het deel dat over de Plaat van Saeftinge gaat. Het Nauw wordt ruimtelijk kortgesloten door de Schaar van de Noord.

Conclusies

De hypothese W3a dat het langsverhang over een verdiepte drempel in de hoofdgeul kleiner is dan het langsverhang in de bochten, is onjuist. Het tegendeel is aangetoond. De oorzaak is vermoedelijk dat de vloedstroom niet het Nauw van Bath volgt.

Het belang van deze hypothes voor de vorming van drempels is onduidelijk, mede omdat de verhangen permanent veranderen onder invloed van getij, terwijl dit een momentopname is van de verhangen.

W3b kan niet worden getoetst bij gebrek aan gegevens voor een verder verdiepte drempel.

5.2.4 Hypothese W4; versnelling van de stroming in de buitenbocht

In de tweede -stroomafwaartse- helft van een bocht treedt in de buitenbocht een versnelling van de hoofdstroming op en in de binnenbocht een vertraging van de hoofdstroming plaats doordat de stroomdraad naar de buitenbocht is overgestoken.

Nadere uitleg

In een relatief scherpe bocht zal in het eerste deel de stroomdraad tegen de binnenbocht aanliggen, omdat daar het langsverhang het grootst is. In het tweede deel van de bocht zal ten gevolge van de centrifugaalwerking de stroomdraad oversteken naar de buitenbocht.

Methode van aanpak

Het te toetsen gebied beperkt zich tot het Nauw van Bath, waar voor maximum eb en maximum vloed van elke dwarsraai de maximum stroomsnelheid is bepaald.

Stroomsnelheden zijn afkomstig van een SCALWEST berekening tijdens een gemiddelde springtij. Zie voor de figuren hiervan Bijlage 6 en Bijlage 7.

*Resultaten***Maximum eb**

De stelling klopt voor het Nauw van Bath. Na de bocht is een toename van de snelheid te zien van 0.10 m/s. Dit geldt voor zowel dood- als springtij. De lijn met maximale stroomsnelheid is in tegenstelling tot de hypothese in het midden van de geul gelegen.

Maximum vloed

In dit geval is in het Nauw van Bath met doottij geen toename van de snelheid te herkennen. Met springtij neemt de snelheid van de stroming ter hoogte van de Appelzak toe, met 0.10 m/s.

Conclusies

Voor springtij neemt de snelheid van de stroming na de bocht in het Nauw van Bath toe. Met doottij is minder toename van de snelheid te zien. Het belang voor de drempels van dit lokale effect is onduidelijk. Het zegt niets over toe- of afname van de snelheid op de drempel.

5.2.5 Hypothese W5; verschil in stroomsnelheid voor doottij en springtij

De hoofdstroming op een verdiepte drempel in de hoofdgeul vertraagt tijdens een springtij relatief meer dan tijdens een doottij.

Nadere uitleg

Bovenstaande hypothese is gebaseerd op het feit dat de gemiddelde en maximale stroomsnelheden tijdens een springtij groter zijn dan tijdens een doottij, omdat tijdens een springtij het getijvolume groter is. De afname van de stroomsnelheid op een verruimde drempel is dan ook groter tijdens een springtij.

Methode

Stroomsnelheidsgegevens zijn afkomstig van SCALWEST, tijdens een maximum eb en maximum vloed, van een doottij en een springtij. Per drempel is handmatig de maximale en de minimale stroomsnelheid bepaald.

Door per situatie het verschil in snelheid te delen door de gemiddelde stroomsnelheid wordt een waarde gekregen voor de relatieve snelheidsafname.

$$\frac{\max(v_i) - \min(v_i)}{\text{gem}(v)}$$

Resultaten

De waarden voor de relatieve stroomsnelheidsverandering zijn in Tabel 5-3 weergegeven. Markant is de waarde bij Bath eb doottij. De snelheidsfluctuatie is hier niet groot, maar omdat de gemiddelde stroomsnelheid zo laag is, is de relatieve snelheidsfluctuatie in verhouding groot. In 3 van de 4 situaties is de relatieve snelheidsverandering met doottij groter dan met springtij.

	springtij	doottij
Bath eb	0,29	0,61
Bath vloed	0,18	0,15
Valkenisse eb	0,15	0,16
Valkenisse vloed	0,29	0,36

Tabel 5-3: Relatieve snelheidsverschillen [-]

Conclusies

De hoofdstroming op een verdiepte drempel in de hoofdgeul neemt tijdens een doottij relatief meer in snelheid af dan tijdens een springtij.

5.3 Secundaire stroming

5.3.1 Hypothese Sec1; secundaire stroming en de aanpassingslengte

- Sec1a** Midden op de drempel is de secundaire stroming niet aanwezig.
- Sec1b** 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.
- Sec1c** De demping wordt versterkt doordat nevengeulen het tegen de oever opgebouwde dwarsverhang, de motor van de secundaire stroming, teniet doen.

Nadere uitleg

Met secundaire stroming die hier wordt bedoeld, is de secundaire stroming in dwarsrichting van de hoofdstroomrichting. Deze secundaire stroming ontstaat door centrifugaalkrachten in een bocht en door Coriolis-versnelling (zie paragraaf 0). Het bochtaandeel van de secundaire stroming zal na een bocht dempen, omdat centrifugaalkrachten daar geen rol meer spelen. De Coriolis invloed is aanwezig als het water beweegt, dus ook in rechte stukken geul.

Sec1a Midden op een drempel is de secundaire stroming niet aanwezig

Methode

Midden op de Drempels van Bath en Valkenisse zijn geen stroommetingen verricht. Wel zijn er gegevens bekend van raai 1, 2 en 3. Deze liggen echter op niet op de drempel. De beschikbare modelresultaten van SCALWEST 2DH zijn 2 dimensionaal, daaruit valt de secundaire stroming niet rechtstreeks uit af te leiden. Van het model SCALWEST 3D dat met 8 waterlagen rekent, zijn de resultaten nog niet geverifieerd, maar geven toch inzicht in de stroming.

Resultaten

Midden in het Nauw van Bath is de secundaire stroming met eb bijzonder sterk. Deze zijn bepaald uit AZTM gegevens van 1989. Door de 4 vertikalen rond maximum stroom te middelen is een gemiddelde stroomvertikaal gemaakt. Deze is weergegeven in Bijlage 9. De richting van de langsstroom is hierbij aangegeven, want deze is voor eb anders dan voor vloed. De dwarsstroom is de component haaks op de langsstroom. De dwarscomponent bij bedraagt maximaal 30cm/s. Zie ook het numerieke resultaat van SCALWEST 3D in Bijlage 10.

De secundaire stroming zal volgens de theoretische formule van Booij en Kalkwijk (1982) na 370m moeten zijn gedempt tot 37% van de waarde in de bocht. Op de drempel die op 600m van de bocht ligt zou nog rond 10cm/s aanwezig moeten zijn. Omdat de metingen ontbreken kan hierover geen uitspraak worden gedaan.

Een grafische methode waarmee de secundaire stroming kan worden aangetoond is het verschil in richting tussen de bovenste en de onderste waterlaag. Met het model SCALWEST 3D zijn voor eb en voor vloed kaarten gemaakt van de bovenste en de onderste laag. Door deze kaarten over elkaar heen te leggen is het mogelijk het verschil in stroming zichtbaar te maken. Zie Bijlage 11 en Bijlage 12

Conclusie

Midden op de drempel is secundaire stroming aanwezig. Deze is echter een orde kleiner dan in de maximale langsstroming in de bocht. De secundaire stroming op de drempel is in zoverre van belang voor de drempel, dat deze de richting van het sedimenttransport beïnvloedt.

Sec1b 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.

Methode

Om deze hypothese aan te tonen, moeten de relaxatielengte worden bepaald. Door deze vergelijking te vergelijken met de afmetingen van de geul in langsrichting kan een uitspraak worden gedaan.

Resultaten

De relaxatielengte van de spiraalstroom kan analytisch berekend worden.

De analytische methode is gebaseerd op de theorie van Booij en Kalkwijk (1986). De vereenvoudigde formule die zij geven voor het berekenen van de relaxatielengte is:

$$\lambda = 18.6 \cdot h = 18.6 \cdot 20 \approx 370m$$

Dit zou betekenen dat de intensiteit van de secundaire stroming ten gevolge van het bochtaandeel midden op de drempel 10% bedraagt van wat net na de bocht optreedt. Hieruit blijkt dat de stroming zich snel aanpast in verhouding met de lengte van de geul. Het aandeel van Coriolis blijft. De waarde van dit aandeel is ongeveer 7-8% van het bochtaandeel.

De bruikbaarheid van deze analytische methode is twijfelachtig, omdat in de Westerschelde de breedte diepte verhouding erg groot is. Deze stelling komt uit de rivierkunde waar deze verhouding kleiner is. Het relaxeren kan daarom verschillen van de berekende waarde.

Conclusie

Als voor de langsafmetingen de rechte tussen twee bochten wordt genomen, dan is de relaxatielengte gering ten opzichte van de langsafmeting van de hoofdgeulen.

Sec1c De demping wordt versterkt doordat nevengeulen het tegen de oever opgebouwde dwarsverhang, de motor van de secundaire stroming, teniet doen.

Nadere uitleg

De laatste subhypothese veronderstelt dat de nevengeulen de demping van de secundaire stroming vergroten wegens het verminderen van het dwarsverhang.

De enige plaats die voldoet aan het karakter van een aftakkende geul is de Zimmermangeul. Deze takt direct achter de bovenstroomse zijde van het Nauw van Bath af. Het debiet van de Zimmermangeul is met eb zeer beperkt ten opzicht van het getijvolume (3%). De invloed van deze geul is daarom klein.

5.3.2 Hypothese Sec2; na de drempel is er geen secundaire stroming

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

Nadere uitleg

Na de drempel zal de secundaire stroming vrijwel alleen door de Coriolis versnelling worden aangedreven. Versterking of verzwakking van de secundaire stroming treedt op na de drempel in de eerstvolgende bocht. Afhankelijk van de richting van de stroming en van de bocht, werkt Coriolis mee dan wel tegen (linksom mee, rechtsom tegen).

Methode

Om na de drempel secundaire stroming aan te tonen, moeten metingen worden verricht of 3D modelresultaten worden gebruikt. De enige methode waarmee dit kan zijn de grafische resultaten van het SCALWEST 3D model.

Resultaten

Bij gebrek aan metingen, worden alleen de grafische resultaten gebruikt van het SCALWEST model met meerdere lagen. Hieruit blijkt dat de secundaire stroming aanwezig is zowel op als na de drempel. De secundaire stroming dempt.

Conclusies

Zowel op als na een drempel kunnen secundaire stromingen aanwezig zijn.

5.3.3 Hypothese Sec3; dubbele spiraalstroom

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

Nadere uitleg

Het patroon van de cellen met secundaire stroming is van belang voor de verdeling van het sediment over de breedte van de geul en daarmee van invloed op patronen in het sedimenttransport en op drempelvorming.

Resultaten

De dubbele spiraal zou kunnen worden aangetoond met behulp van metingen. Deze worden op verschillende raaien periodiek gedaan. Bij sommige metingen is het op enkele momenten te zien. Bijvoorbeeld bij raai 3. Hier is volgens Jeuken (1992) een patroon te herkennen van een 2^e cel. Ook in de nog niet geverifieerde modelresultaten van SCALWEST 3D met meerdere lagen, komt een 2^e cel voor bij de bovenstroomse zijde van de Drempel van Hansweert. In de Nauw van Bath is nog geen 2^e cel te onderkennen uit de modelresultaten.

5.3.4 Hypothese Sec4; grootte van de secundaire stroming

De grootte van de secundaire stroming in de hoofdcel is in scherpe bochten circa 10 cm/s.

In meetraai 2 in het Nauw van Bath is met behulp van AZTM metingen secundaire stroming bepaald. Dit is gedaan door middeling van de dwarscomponent van 4 vertikalen rond maximum stroming. In Bijlage 9 zijn de vertikalen gegeven. Hieruit blijkt dat een dwarsstroom van meer dan 30cm/s aanwezig is.

In SCALWEST 3D is in raai 2 ook de dwarsstroming in de vertikaal bepaald. Zie Bijlage 10. Deze is niet geverifieerd, maar de waarde ligt ook rond de 30cm/s.

Conclusie

De waarde van de secundaire stroming in de hypothese wordt onderschat.

5.4 Sedimenttransport

Van de hypothesen die betrekking hebben op het sedimenttransport is er maar één getoetst. De meeste hypothesen zijn zo vanzelfsprekend dat deze niet worden uitgewerkt.

Na de hypothese staat een algemene conclusie met betrekking tot de sedimenttransportmeting die in raai 2 is gedaan.

De metingen die zijn gedaan zijn van een normale debietraaimeting en niet van een complete doodtij- springtijcyclus.

5.4.1 Hypothese Sed1; verschil in sedimentatie bij drempel door sec. stroming

Uitleg:

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 langsstroming veroorzaakt wordt op de stroomopwaartse zijde van een drempel.

Met andere woorden: Aan de binnenbocht zijde van de drempel zandt het harder aan dan aan de buitenbocht.

Uit de bodemverschilkaart (Zie Bijlage 14) blijkt dat de binnenbocht over een periode van 3 jaar behoorlijk is aangezand. De buitenbocht erodeert langzaam weg. Dit plaatje vertekent het werkelijke beeld, omdat de precieze baggerhoeveelheid niet bekend is. Deze hoeveelheid is waarschijnlijk vele malen groter dan de aanzanding.

Conclusie

Met behulp van de bodemverschilkaart is het aantoonbaar dat het aan de binnenbochtzijde op de drempel harder aanzandt dan aan de buitenbochtzijde.

5.4.2 Residueel sedimenttransport

Raai 2 ligt door het Nauw van Bath en de Schaar van de Noord (Zie Bijlage 13) Gedurende een springtij is hier een sedimenttransportmeting uitgevoerd. De transporten per getijfase zijn

in Tabel 5-4 weergegeven. Hieruit blijkt dat het Nauw van Bath eb gedomineerd is. De Schaar van de Noord is vloed gedomineerd.

Raai 3 ligt ter hoogte van de leidam bij de Nederlands-Belgische grens. Ook hier is gedurende een springtij een sedimenttransportmeting uitgevoerd. Het residuele transport is nihil ten opzichte van de transporten in raai 2.

Dit houdt voor de Drempel van Bath in, dat deze aanzandt met sediment uit de Schaar van de Noord. Het sediment dat per getijcyclus achterblijft op de drempel, wordt door de ebstroom richting het Nauw van Bath meegenomen of weggebaggerd.

De Drempel van Valkenisse krijgt residueel sediment aangevoerd van het Nauw van Bath en waarschijnlijk ook van de Overloop van Valkenisse. De Schaar van de Noord transporteert residueel sediment van de drempel af.

Het is markant dat de hoeveelheid sediment dat residueel naar de Drempel van Bath wordt getransporteerd ook wordt gebaggerd.

	eb [ton/getij]	vloed [ton/getij]	residueel (+=eb richting [ton/getij]	residueel (+=eb richting) [m ³ /getij]
Nauw van Bath	10800	7200	3600	2300
Schaar van de Noord	8300	11900	-3600	-2300

Tabel 5-4: Sedimenttransporten in raai 2

5.5 Bodemverschilkaarten

5.5.1 Bodemverschilkaarten van 1996-1993

Om inzicht te krijgen in de veranderingen van de afgelopen jaren, is een verschil berekening gemaakt voor de bodems van 1996-1993. Zie Bijlage 14.

Enkele markante punten zijn:

- Geuldieptes blijven constant ;
- Konstante diepte van de drempels ;
- Uitbochten van het Nauw van Bath en de Overloop van Valkenisse;
- Verondiepen van het beginpunt van de Schaar van de Noord aan de oostzijde van de Drempel van Valkenisse;
- Verondiepen van de rand van de Plaat van Saeftinge;
- Verdiepen van de plaat van Saeftinge.

Conclusie

De bodemligging van de vaarroute is zo goed als constant gebleven, mede dankzij het onderhoudsbaggerwerk. Buiten de vaarroute vindt voornamelijk aan de rand van de Plaat van Saeftinge sedimentatie plaats. De drempels zijn in de orde van dezelfde diepte gehandhaafd. Alleen aan de oostzijde van de Drempel van Valkenisse is er aanzanding.

5.5.2 Baggerwerk in relatie tot de 3 maandelijksse kuberingen

Om het nut van het baggerwerk aan te tonen zijn de baggergegevens gekoppeld aan de kuberingen van de Bath en Valkenisse. Dit is gedaan met een frequentie van 4x per jaar. Zie hiervoor Bijlage 15. In Bijlage 13 is de ligging van de polygonen gegeven waarin gekubeerd is.

Zowel bij Bath als Valkenisse is duidelijk het verband te zien tussen het baggerwerk en de toename van het natte volume boven de polygonen. Uit de grafieken blijkt dat het nat volume snel afneemt als er niet of weinig in de tussenliggende periode wordt gebaggerd.

	verschilkubering 1993-1996	baggervolume 1993-1996	netto aangezand in 3 jaar
Drempel van Bath	-0.36Mm ³	6.9Mm ³	6.6Mm ³
Drempel van Valkenisse	-0.13Mm ³	5.9Mm ³	5.7Mm ³

Tabel 5-5: Netto aanzanding drempels

Uit de getallen van Tabel 5-5 blijkt dat bij beide drempels 2Mm³ per jaar moeten worden gebaggerd om de drempels op diepte te houden. Dat is per drempel per getij 130 vrachtauto's.

6. Beschrijvend morfodynamisch model van de Drempels van Bath en Valkenisse

6.1 Beschrijvend morfodynamisch model van de Drempel van Bath

Eb; Zie Bijlage 6

Tijdens eb stroomt het water vanuit het Vaarwater boven Bath over de Drempel van Bath. Een deel van de stroming uit het Vaarwater boven Bath buigt af naar de Schaar van de Noord. Van het getijvolume wordt 40% door deze schaar afgetapt. De aftapping vindt voornamelijk plaats tijdens de eerste helft van de eb. De snelheid van het water dat uit het Vaarwater boven Bath de drempel opstroomt, is bijna gelijkmatig verdeeld over de breedte van de geul. De stroming uit het Vaarwater boven Bath divergeert als het de drempel bereikt. De stroomsnelheid op de Drempel van Bath is iets kleiner dan in de geul bovenstrooms van de drempel. De aftakkende Schaar van de Noord stroomt bij de aftakking van de drempel lokaal met een grotere stroomsnelheid, maar vertraagt direct naar 60% van de stroomsnelheid midden op de Plaat van Saeftinge. Aan de stroomafwaartse zijde van de drempel stroomt het water van de drempel naar de bocht bij Bath. De stroom draait hier naar het westen toe.

De sterkte van de secundaire stroming is onbekend door gebrek aan meet- en modelgegevens. Uit een grafische weergave van het SCALWEST 3D model is wel herkenbaar dat de bovenlaag van de ebstroming op de drempel rechtdoor stroomt, terwijl de onderlaag aftakt naar de Schaar van de Noord.

Vloed; Zie Bijlage 7

Met vloed stroomt 60% van het getijvolume over de Plaat van Saeftinge naar de Drempel van Bath. De hoofdstroom bereikt de drempel gespreid over de hele Plaat van Saeftinge en niet alleen door de Schaar van de Noord. De bodemlaag buigt af naar de geul. De bovenlaag van de stroom schiet voor een deel door naar de Appelzak, oostelijk gelegen van de Drempel van Bath. De stroming uit het Vaarwater boven Bath stroomt aan de noordzijde naar de drempel. Het deel van de stroming over de drempel aan de Saeftinge zijde is convergent. Het deel van de stroming aan de zijde van de Appelzak is divergent. Ten zuiden van de drempel convergeert de hele stroming naar het Vaarwater boven Bath.

De sterkte van de secundaire stroming ter plaatse van de drempel is onbekend. Uit een grafische weergave van het model SCALWEST 3D is herkenbaar, dat de bovenlaag vanwege de traagheid neigt door te schieten naar de Appelzak.

Maandelijks wordt op de Drempel van Bath gebaggerd om deze op diepte te houden voor de scheepvaart. Het sediment dat hier wordt gebaggerd wordt benedenstroom in de Westerschelde gestort en blijft hiermee in het estuarium aanwezig.

Over meerdere jaren is bij de Drempel van Bath aangroeiing aan de westzijde van de drempel te zien uit bodemverschilkaarten. In een periode van 3 jaar is de Plaat van Saeftinge met enkele tientallen meters gegroeid. Dit duidt op een substantiële aanzanding over deze periode.

Voor het morfodynamisch gedrag van de Drempel van Bath zijn de volgende factoren van belang:

- Divergentie van de ebstroom en van de oostzijde van de vloedstroom.
- Convergentie van de vloedstroom aan de westzijde van de drempel.
- Vertraging van de stroming. Zowel bij eb als bij vloed vertraagt de stroming als het drempel opstroomt. Hierdoor vermindert de sedimenttransportcapaciteit en zal aanzanding op de drempel optreden.
- Versnelling van de vloedstroom in het Vaarwater boven Bath. Dit is het effect van de leidam die een diepe geul forceert. De vloedstroom vindt hier de makkelijkste weg.
- Lokale versnelling van de stroming tijdens de ebstroom in de Schaar van de Noord.
- De Schaar van de Noord is vloedgedomineerd. Het Nauw van Bath is eb gedomineerd. Door deze residuele stromingen in de geul, treedt een residueel zandtransport op.
- Schijnbare secundaire stroming wordt veroorzaakt doordat de bovenste stroomlaag harder stroomt dan de onderste. De bovenste stroomlaag heeft meer dan de onderste stroomlaag de neiging om door te schieten bij een botsende geul. Dit effect treedt zowel bij eb als bij vloed op. Met eb takt de onderste laag van de stroming op de drempel eerder af naar de Schaar van de Noord dan de bovenste laag.
- Met vloed schiet de bovenste stroomlaag door naar de Appelzak.
- De morfologie op de drempel is van een 'botsende vloedgeul'-type. De stroomdraad met vloed komt van de Schaar van de Noord en botst op het Vaarwater boven Bath.
- De baggerwerkzaamheden zijn direct van invloed op de diepte van de drempel. Door aanzanding zal deze drempel zijn oorspronkelijke diepte terug willen krijgen. De maat van aanzanding wordt sterk bepaald door de vertraging die optreedt op de drempel.

6.2 Beschrijvend morfodynamisch model van de Drempel van Valkenisse

Eb; Zie Bijlage 6

Tijdens eb stroomt het water uit het Nauw van Bath (60% volumeaandeel) en uit de Schaar van de Noord (40% volumeaandeel) de drempel op. Dit water stroomt naar het zuidwesten de drempel af naar de Overloop van Valkenisse. De Zimmermangeul ten noordwesten van de drempel heeft een aandeel van minder dan 3% van de het getijvolume. De invloed van deze nevengeul is zeer beperkt voor de waterbeweging en de sedimentbeweging en wordt daarom verwaarloosd.

De stroming uit het Nauw van Bath sluit direct aan op de drempel, komend uit een (voor de ebstroom) linkerbocht. De buitenbochtstroom divergeert op de drempel. De stroomdraad met de maximum snelheid loopt voor de ebstroom via het midden van het Nauw van Bath recht over de drempel van Valkenisse naar het midden van de Overloop van Valkenisse. Deze stroomdraad versnelt bovenstrooms van de drempel, maar vertraagt op en na de drempel. Dit heeft tot gevolg dat een deel van het sediment, dat door de stroming in het Nauw van Bath wordt meegenomen op de drempel zal sedimenteren.

De stroming uit de Schaar van de Noord sluit in het oosten aan op de drempel. De stroom convergeert op de drempel. Vanaf de Drempel van Valkenisse liggen de stroomlijnen parallel aan elkaar.

In het Nauw van Bath ontwikkelt zich een sterke secundaire stroming. Deze heeft aan de bodem een component naar de binnenbocht van 0.30 m/s. Hierdoor heeft het Nauw van Bath een driehoekig bodemprofiel, waarbij de geul aan de buitenbochtzijde het diepst is. De sterkte van deze secundaire stroming neemt met de stroom mee af en is op de drempel nog voor 15% aanwezig. De invloed van de secundaire stroming op het bodemprofiel van de drempel is niet terug te vinden. Het profiel is tamelijk vlak.

Vloed; Zie Bijlage 7

Met vloed komt de stroming uit de Overloop van Valkenisse. De stroomdraad ligt daar aan de buitenbocht. De buitenbochtstroming verspreidt zich geleidelijk over de breedte van de stroomgeul. Deze stroomdraad loopt door naar de buitenbochtzijde van de Schaar van de Noord. De Schaar van de Noord verwerkt 60% van het getijvolume. Het Nauw van Bath transporteert de resterende 40% van de stroming. Op de drempel divergeert de stroming sterk. Dit divergeren zet door in de Schaar van de Noord, die het water over de Plaat van Saeftinge verdeelt. De lijn met maximale stroomsnelheid loopt van de buitenbocht van de Overloop van Valkenisse over de drempel naar de noordzijde van de Schaar van de Noord.

Maandelijks wordt de Drempel van Valkenisse gebaggerd, om deze op diepte te houden voor de scheepvaart. Het sediment dat hier wordt gebaggerd, wordt benedenstroom in de Westerschelde gestort en blijft hiermee in het estuarium aanwezig.

Over meerdere jaren is bij de Drempel van Valkenisse aangroeiing aan de oostzijde van de drempel te zien uit bodemverschilkaarten. In een periode van 3 jaar is de Plaat van Saeftinge met enkele tientallen meters gegroeid, evenals de Drempel van Bath. Dit duidt op een substantiële aanzanding over de gehele periode.

Voor het morfodynamisch gedrag van de Drempel van Valkenisse zijn de volgende factoren van belang:

- Divergeren van de buitenbochtstroom van het Nauw van Bath met eb. De stroming divergeert en vertraagt iets. De invloed op het sedimenttransport is onbekend. Met vloed treedt sterke divergentie op in heel het drempelgebied. Hierbij vertraagt de stroming, wat van belang is voor de aanzanding op de drempels.
- Vertragen van de stroomsnelheid zoals met eb gebeurt in de Schaar van de Noord en uit het Nauw van Bath. Vertraging treedt ook op bij de vloedstroom in heel het drempelgebied. Hiermee neemt de sedimenttransportcapaciteit af en zal een deel van het sediment neerslaan op de drempel.
- Versnellen van de ebstroom uit het Nauw van Bath, voordat het vertraagt op de Drempel van Valkenisse. Een deel van het sediment dat in het versnelgebied wordt meegenomen slaat neer in het vertraaggebied midden op de drempel.
- De secundaire stroming tijdens eb in de aanstroom van de drempel is sterk aanwezig en zal voor een deel de vorm van de bovenstroomse zijde van de drempel bepalen. Op de drempel zelf is de secundaire stroming beperkt en zal naar verwachting weinig van invloed zijn op de vorm. Met vloed treedt op de drempel geen secundaire stroming op.
- De Schaar van de Noord is vloedgedomineerd. Het Nauw van Bath is eb gedomineerd. Door deze residuele stromingen in de geul, zal ook een residueel zandtransport optreden.
- Bij de Drempel van Valkenisse is niet duidelijk sprake van een 'botsende'-geulentype, omdat de Schaar van de Noord een vloedgeul is. De stroomdraad met eb ligt meer naar het westen dan de stroomdraad met vloed. Dit is een 'ontwijkend' geulen gedrag. De Drempel van Valkenisse heeft eigenschappen van beide typen drempel.
- De baggerwerkzaamheden zijn direct van invloed op de diepte van de drempel. Door aanzanding zal deze drempel zijn oorspronkelijke diepte terug willen krijgen. De maat van aanzanding wordt sterk bepaald door de vertraging die optreedt op de drempel.

7. Conclusies en aanbevelingen

Een analyse van de stroom- en sedimentmetingen op de Drempel van Bath en Valkenisse levert de volgende inzichten op die van belang zijn voor het morfodynamisch gedrag van die drempels:

7.1.1 Conclusies met betrekking tot de waterbeweging bij de Drempel van Bath

- Als de ebstroming de drempel op stroomt, divergeert de stroming en vertraagt. Tijdens vloed convergeert de stroming op de drempel naar het Vaarwater boven Bath, waarbij vertraging optreedt.
- Op de drempel is het oppervlak van het doorstroomprofiel te ruim. Dit zorgt voor vertraging van de stroming.
- Secundaire stroming is alleen in geringe mate aanwezig als de stroming uit het Nauw van Bath de drempel opstroomt. Op de drempel zelf is de secundaire stroming nauwelijks aanwezig. De secundaire stroming heeft nagenoeg geen invloed op de vorm van de drempel.

7.1.2 Conclusies met betrekking tot het sedimenttransport bij de Drempel van Bath

- Er is geen sedimenttransport gemeten op de Drempel van Bath.
- Het sedimenttransport uit de Schaar van de Noord is vloedgedomineerd. Het sedimenttransport uit het Nauw van Bath is ebgedomineerd.

7.1.3 Conclusies met betrekking tot de morfologie bij de Drempel van Bath

- Gedurende 3 jaar is de drempel aan de westzijde enkele tientallen meters in breedterichting aangezand. Er is maandelijks gebaggerd om de drempel op vaardiepte te houden. Het op jaarbasis weggebaggerde volume op de drempel bedraagt $2\text{Mm}^3/\text{j}$. Dit geeft aan dat hier veel sedimentatie is.
- De drempel verandert nauwelijks als gevolg van baggeren.

7.1.4 Conclusies met betrekking tot de waterbeweging bij de Drempel van Valkenisse

- Zowel met eb als met vloed divergeert de stroming als deze de drempel op stroomt. Dit zorgt in beide gevallen voor vertraging op de drempel. De divergentie is het grootst met eb.
- De stroomdraden ontwijken elkaar. De stroomdraad van de vloedstroom ligt aan de oostzijde van de geul, aan de buitenbocht van de Overloop van Valkenisse. De ebstroom ligt aan de westzijde van de geul, aan de buitenbocht van het Nauw van Bath. Dit ontwijken van de stroomdraden heeft een breed geulprofiel tot gevolg.
- De drempel is een splitsingspunt. De Schaar van de Noord takt hier af. Aangezien het getijvolume met vloed door deze schaar 60% en met eb 40% bedraagt, kan hier niet worden gesproken van een nevengeul. Beter is om van een kortsluitgeul te spreken.
- De secundaire stroming is voor zowel eb als vloed sterk. Deze secundaire stromingen worden opgewekt in de bocht die voor de drempel ligt. De intensiteit van de secundaire stroming neemt af na de bocht, maar niet specifiek op de drempel. Op de drempel zelf is nog 10% van de secundaire stroming over. Deze secundaire stroming beïnvloedt de vorm van de drempel.

7.1.5 Conclusies met betrekking tot het sedimenttransport bij de Drempel van Valkenisse

Het sedimenttransport is niet gemeten, behalve in raai 2 (door het Nauw van Bath en de Schaar van de Noord) Hieruit volgt dat de Schaar van de Noord in vloedrichting een netto sedimenttransport heeft. De hoeveelheid zand die door de Schaar van de Noord moet worden getransporteerd is afkomstig van de Drempel van Valkenisse.

7.1.6 Conclusies met betrekking tot de morfologie bij de Drempel van Valkenisse

- Op de Drempel van Valkenisse treedt sterke aanzanding op. Dit kan geconcludeerd worden uit de maandelijkse baggeractiviteiten die plaatsvinden om de drempel op diepte te houden. Het op jaarbasis weggebaggerde volume bedraagt $2\text{Mm}^3/\text{j}$ Tevens wordt door de Schaar van de Noord sediment vanaf de drempel getransporteerd. Ondanks al deze sedimentonttrekkingen van de drempel treedt aan de oostzijde van de drempel aanzanding op. De rest van de drempel blijft op diepte.
- De secundaire stroming heeft invloed op de vorm van de drempel.

7.1.7 Algemene conclusie over Drempels van Bath en Valkenisse

- De drempels worden gevormd in de hoofdgeul waarop de Schaar van de Noord aansluit. Door vertraging van de stroming treedt sedimentatie op. De belangrijkste oorzaken van vertraging zijn:
 - divergentie
 - te ruim geulprofiel wegens kunstmatige verdieping van de drempel
- De morfodynamiek van de Drempels van Bath en Valkenisse lijkt niet op die in een rivier. De processen die in een rivier spelen hebben wel een modificerend effect op de vorm van de drempels in de Westerschelde.

7.2 Aanbevelingen

Om beter inzicht te krijgen in de morfodynamische processen die de geometrie van een drempel bepalen, zou gedetailleerder onderzoek gedaan moeten worden naar 3D stromingspatronen op en rond een drempel, waarbij tevens de sedimentconcentratievertikaal wordt meegenomen. Hiermee kan de over- en onderverzadiging of beter: het veranderen van de sedimenttransportcapaciteit nauwkeuriger worden berekend.

Morfologische computermodellen zijn goed toepasbaar bij verder onderzoek. Tevens kunnen met een dergelijk model alternatieven voor het baggerwerk worden berekend.

In het kader van mijn afstudeerwerk, zal ik proberen hieraan inhoud te geven.

8. Literatuur

Bestuurlijk Klankbordforum Westerschelde, *Beleidsplan Westerschelde*; Rijkswaterstaat, 1991.

R. Booij en J. Kalkwijk, 1982. *Secondary flow in estuaries due to the curvature of the main flow and to the rotation of the earth and its development*; Geomor nota 83.05

R Booij, J. Pennekamp en J. Kalkwijk, 1985. *Secundaire stroming in de Oosterschelde (eindverslag)*; rapport 16-85, Lab voor vloeistofmechanica Civiele Techniek TH Delft

M. Jansen, 1997. *Bouw, calibratie en verificatie SCALWEST*, Svašek B.V.

M. Jeuken, 1992. *Een analyse van stroom- en sedimenttransportmetingen in het oostelijk deel van de Westerschelde*; Nota NWL-92.17

J. Kalkwijk en R. Booij, 1986. *Adaptation of secondary flow in nearly-horizontal flow*, Waterloopkundig Laboratorium

T. Pieters, 1991. *Het Schelde-Estuarium, meer dan een vaarweg*; Nota GWWS-91.081

K. Storm et al., 1994. *Nauwkeurigheid zandbalans Westerschelde 1965-1990 en aanbevelingen ter optimalisatie*; rapport RIKZ-94.008

B. Blik, M De Ruiter, 1994. *Verklarend onderzoek drempels Westerschelde*; Svašek project nummer 940

F.T.G. Tank, 1995. *Het gedrag van drempels in de Westerschelde; Een verkennende studie*; IMAU R 95-18

F.T.G. Tank, 1996. *Het gedrag van drempels in de Westerschelde; Literatuurstudie en hypothesen*; IMAU R 96-07

J. Van Veen, 1950. *Eb- en vloedstelsystemen in de Nederlandse getijwateren*, Tijdschrift KNAG, 2e reeks deel 67, 303-325

H. De Vriend en N Struiksma. *Flow and bed deformation in river bends*, Journal of hydraulic research, vol 23, no 1

J. Vroon et al., *Westerschelde stram of struis?* Rijksinstituut voor Kust en Zee, RIKZ-97.023, 1997

Waterloopkundig Laboratorium, 1983, Akoestische Zandtransportmeter, type AZTM-1 Handboek. Waterloopkundig Laboratorium 096

9. Evaluatie van de stage

9.1 Motivatie

Voordat deze stageopdracht op de TU bekend was, leek het mij interessant om te gaan afstuderen op drempels in de Westerschelde. Dit is een afstudeeropdracht bij prof. dr. ir. De Vriend. Toen deze stage vrij kwam, was de beslissing snel genomen om voor het afstuderen deze stage te doen.

De stageopdracht is via de Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen van Universiteit Utrecht bij Faculteit Civiele Techniek van de TU Delft gekomen. In eerste instantie is het een stage voor een fysisch geograaf, omdat de stage erg beschrijvend van karakter is.

9.2 Stageopdracht

De stageopdracht bestond uit het generiek maken van kennis uit onderzoek naar de Drempel van Hansweert. De werkmethode was het toetsen van hypothesen die zijn opgesteld over de Drempel van Hansweert, met behulp van gegevens over de Drempel van Bath en Valkenisse. Met de kennis die zou worden opgedaan zou een beschrijvend morfodynamisch model moeten worden gemaakt.

9.3 Verloop van de stage

Het inlezen in de materie heeft een 3 weken geduurd. Hierbij werd gebruik gemaakt van algemene rapporten over de Westerschelde en specifieke literatuur over drempels en aanverwante processen die er spelen.

Voor het toetsen van de hypothesen zijn de beschikbare meetgegevens zeer beperkt. De modelgegevens zijn alleen 2 dimensionaal. Alleen in de laatste week heb ik niet geverifieerde 3 dimensionale waterbewegings resultaten gezien. De meetraaien zijn onbruikbaar, behalve enkele metingen in raai 2 van 1989. Bovendien zijn deze metingen op oninteressante punten gedaan.

Het verzamelen van de beschikbare gegevens die nodig zijn voor het toetsen van de hypothesen ging over het algemeen makkelijk. Alleen de digitale gegevens hebben enige tijd op zich laten wachten vanwege een computerstoring bij de Meetdienst Zeeland.

Het inzichtelijk maken van de modelgegevens heeft enige tijd geduurd. De digitale meetgegevens zijn met behulp van spreadsheets tot tastbaardere resultaten gemaakt. Bodemgegevens zijn met behulp van GIS verwerkt. Van de AML's (macro's onder GIS) wist ik het bestaan niet af. Dit zijn custom-made programma's die prima werken maar moeilijk toegankelijk zijn. Dit werk is door Fred Tank gedaan.

Aan het toetsen van de hypothesen met betrekking tot de waterbeweging heb ik lang gewerkt. De 2 dimensionale waterbewegingen als versnellen/vertragen en divergeren/convergeren zijn redelijk eenvoudig te toetsen aan de modelgegevens. Van de spiraalstroming weet ik alleen in raai 2 op springtij de intensiteit aan de randen van de vaargeul. De methode voor het berekenen van de spiraalstroom uit 2 DH modelgegevens heb ik afgewezen, omdat lokaal de stromingen zo afwisselend zijn dat dit een zeer grove benadering zou worden. De relaxatielengtes van de spiraalstromingen zijn te berekenen, maar daarmee toets je de hypothesen niet en kun je geen conceptueel morfodynamisch model maken.

De sedimenttransportgegevens zijn in meetraai 2 in 4 punten tijdens een springtij bekend, evenals een zandbalans die ooit eerder is gemaakt voor dit deel van de Westerschelde. Over de lokale transporten op een drempel zijn geen gegevens bekend. In tegenstelling tot de metingen van de Drempel van Hansweert, waar tijdens een doottij/springtijcyclus intensief is gemeten. De residuele sedimenttransporten kunnen alleen uit kuberingen en bodemverschilkaarten gehaald worden. Met transportformules het zandtransport berekenen met behulp van de dieptegemiddelde gegevens van het 2D model heb ik niet gedaan. Dit is achteraf terecht, want er treden daar sterke verschillen in stroomrichting op tussen de boven en onderlaag.

De hypothesen met betrekking tot de morfologie zijn goed getoetst. Deze gegevens zijn allemaal uit bodemverschilkaarten gehaald. De baggergegevens zijn ook voldoende bekend. Alleen is de precieze baggerlocatie op de drempel onbekend

Het maken van een Conceptueel Morfodynamisch Model verliep stroef. Met name omdat ik geen idee had hoe zoiets eruit moest zien, ben ik in eerste instantie erg schematiserend te werk gegaan. Dit bleek veel meer beschrijvend te moeten, waarna dit is herschreven.

9.4 Resultaat

De stage was erg leerzaam. Wat dat betreft is de doelstelling zeker gehaald. De stage geeft een goede indruk van het instituut. Tevens is het opzetten van een onderzoek en het verwerken en rapporteren van de resultaten een bijzonder goede oefening, omdat ik denk dat de opleiding in Delft daaraan tekort schiet (4 jarig programma).

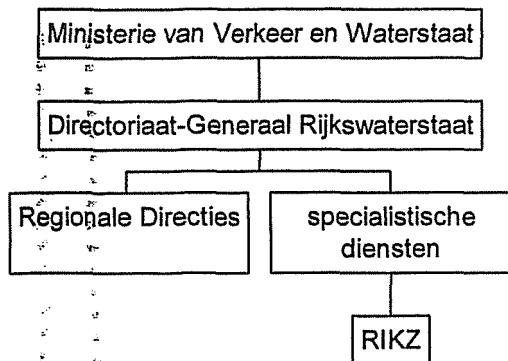
Wat betreft het eindresultaat van de stageopdracht vind ik de toegevoegde waarde aan het drempelonderzoek gering, mede omdat sommige hypothesen die belangrijk zijn voor de vorming van drempels niet getoetst konden worden. Het resultaat is veel meer beschrijvend geworden dan dat ik bij aanvang had verwacht.

9.5 Begeleiding

Het contact met mijn directe begeleider en kamergenoot Fred Tank vond ik aangenaam en leerzaam, evenals het contact met Harm Verbeek.

9.6 RIKZ Middelburg

Het Rijksinstituut voor Kust en Zee is een instelling met als doelstelling het genereren en in stand houden van kennis gericht op het duurzaam gebruik van de Nederlandse estuaria, kusten en zeeën. Met deze kennis wordt advies gegeven aan beleidsmakers van het Directoraat Generaal en aan de Regionale Directies



Van het RIKZ staat de hoofdvestiging in Den Haag. De twee dependances staan in Haren en Middelburg. De stage is uitgevoerd bij de afdeling onderzoek en strategie met de subafdeling fysica delta (OSFD).

Binnen het RIKZ is er een ongedwongen sfeer waarin veel aandacht is voor kennisoverdracht. Het personeel bestaat uit een vaste kern die veel met beleid bezig is, contractanten voor onderzoek en stagiaires. Hierdoor is er veel verloop. De mogelijkheden zijn er uitstekend, evenals de secundaire voorzieningen.

INHOUDSOPGAVE BIJLAGEN

Bijlage 1a: Kaart Westerschelde

Bijlage 1b: Detailkaart drempels

Bijlage 2: Fijn grid SCALWEST

Bijlage 3: Grof grid SCALWEST

Bijlage 4: Divergentie/convergentie eb

Bijlage 5: Divergentie/convergentie vloed

Bijlage 6: Snelheid eb

Bijlage 7: Snelheid vloed

Bijlage 8: Raaien waarin het profiel is gemeten

Bijlage 9: Spiraalstroming uit AZTM meting, raai 2, 1989, uit 4 gem. waarden op max stroming

Bijlage 10: Spiraalstroom in het Nauw van Bath; SCALWEST 3D, max ebstroom

Bijlage 11: Verschil in stroming tussen bovenlaag en onderlaag, max eb

Bijlage 12: Verschil in stroming tussen bovenlaag en onderlaag, max vloed

Bijlage 13: Ligging van de kuberpolygonen

Bijlage 14: Verschil in bodemligging 1993-1996

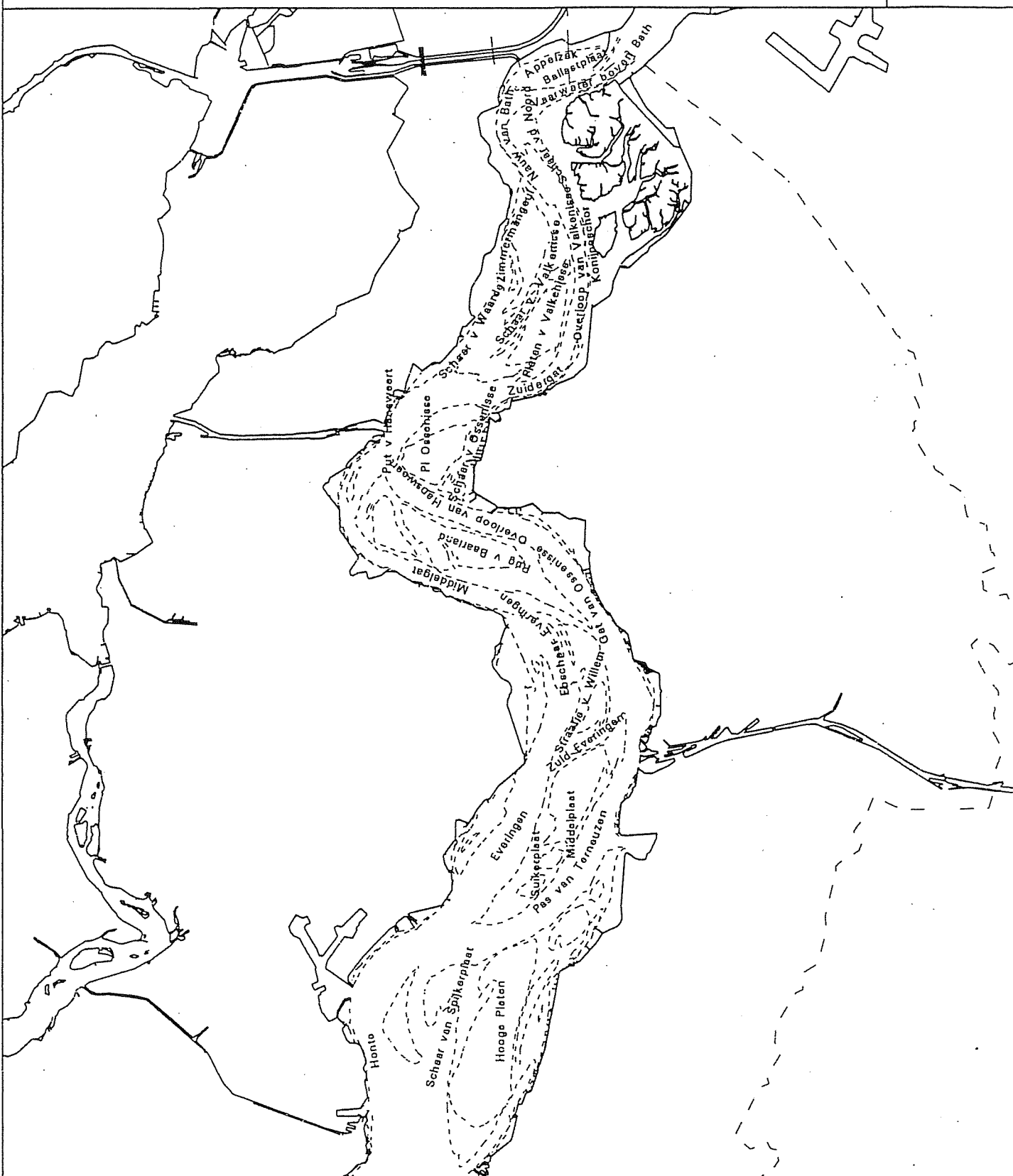
Bijlage 15: Baggergegevens/kuberingen

Westerschelde
Namen geulen en platen

Schaal: 1:225.000

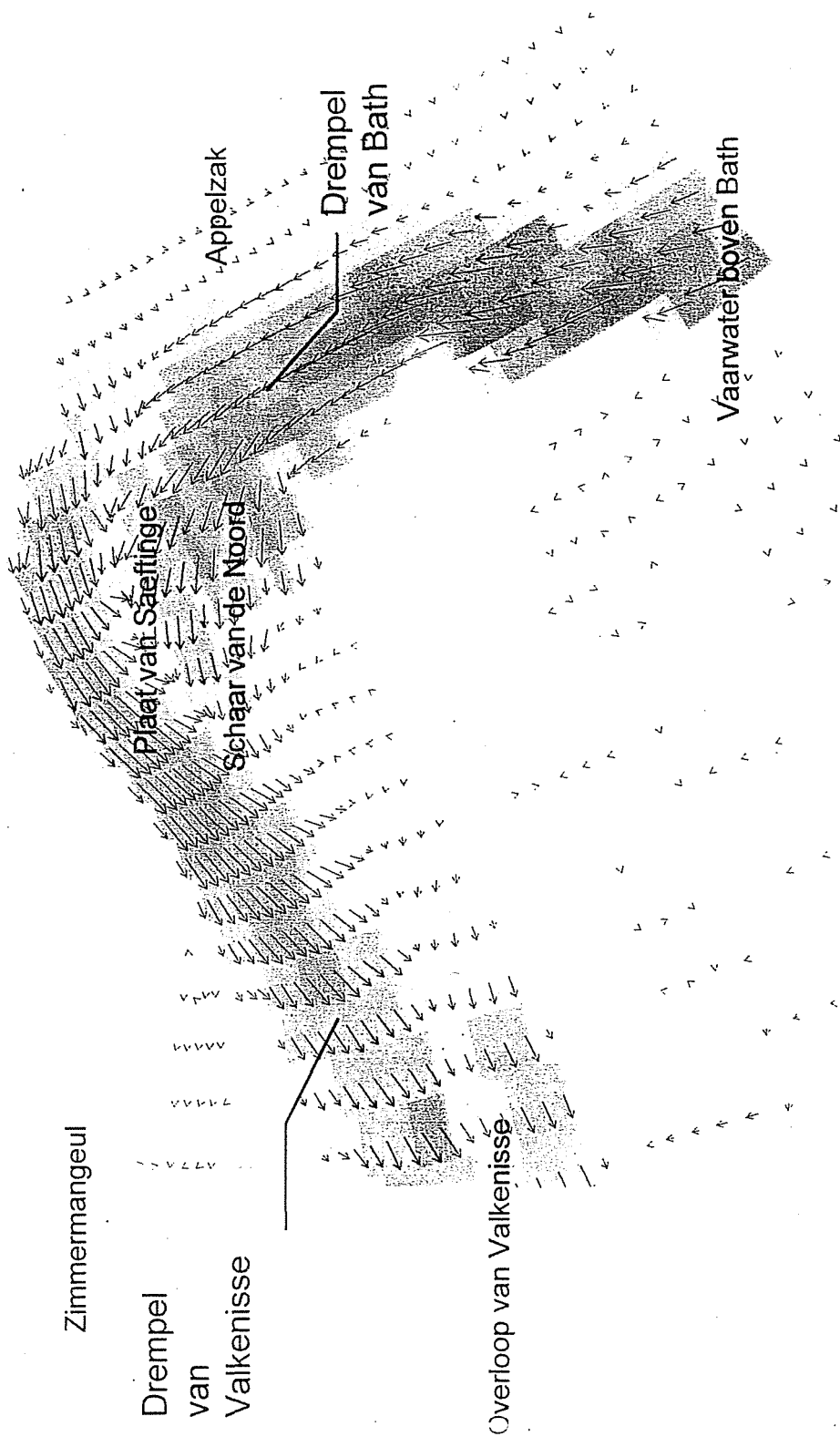
'MOVE'

Rijksinstituut voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat



Bijlage 1a: Kaart Westerschelde

Nauw van Bath

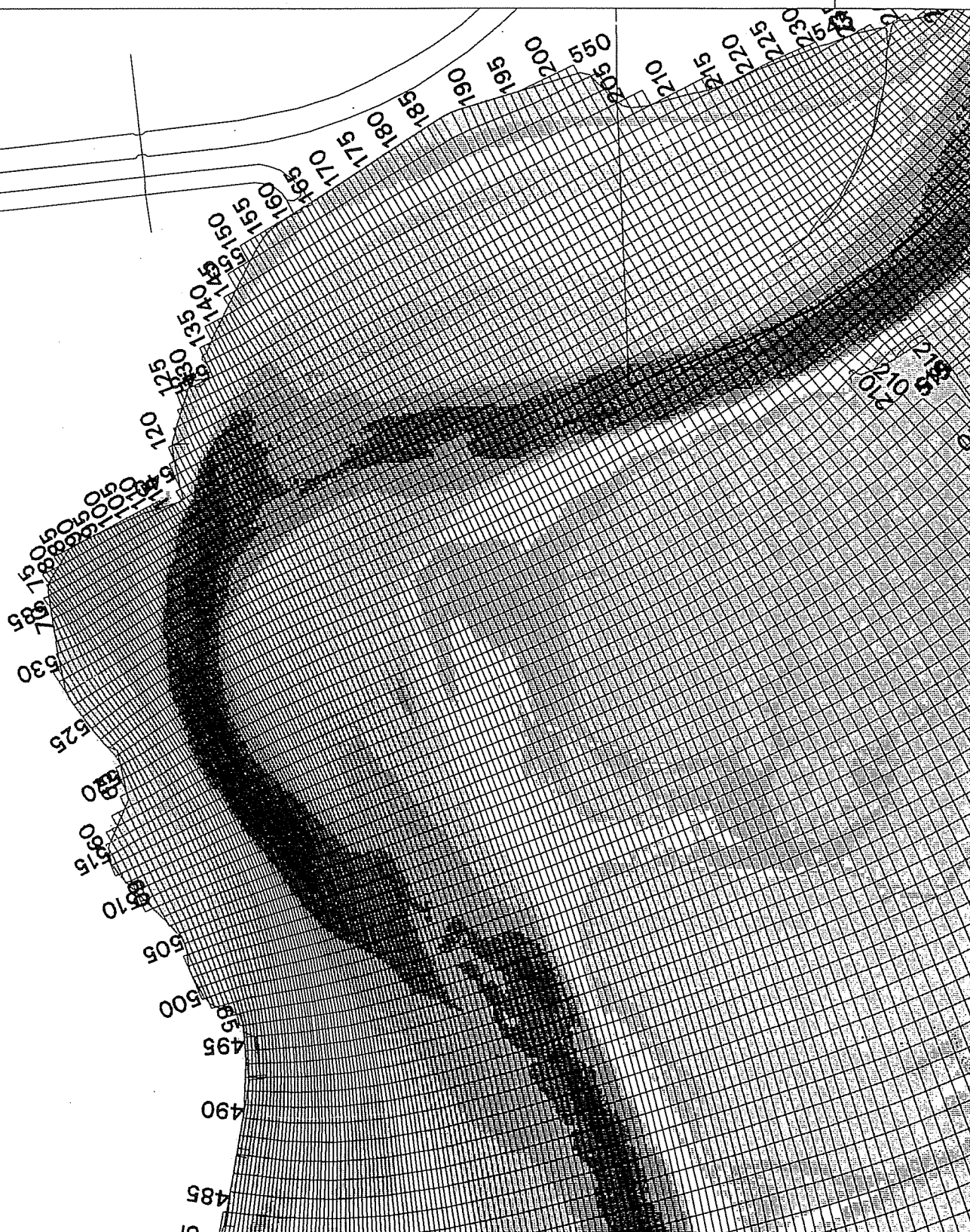


Westerschelde

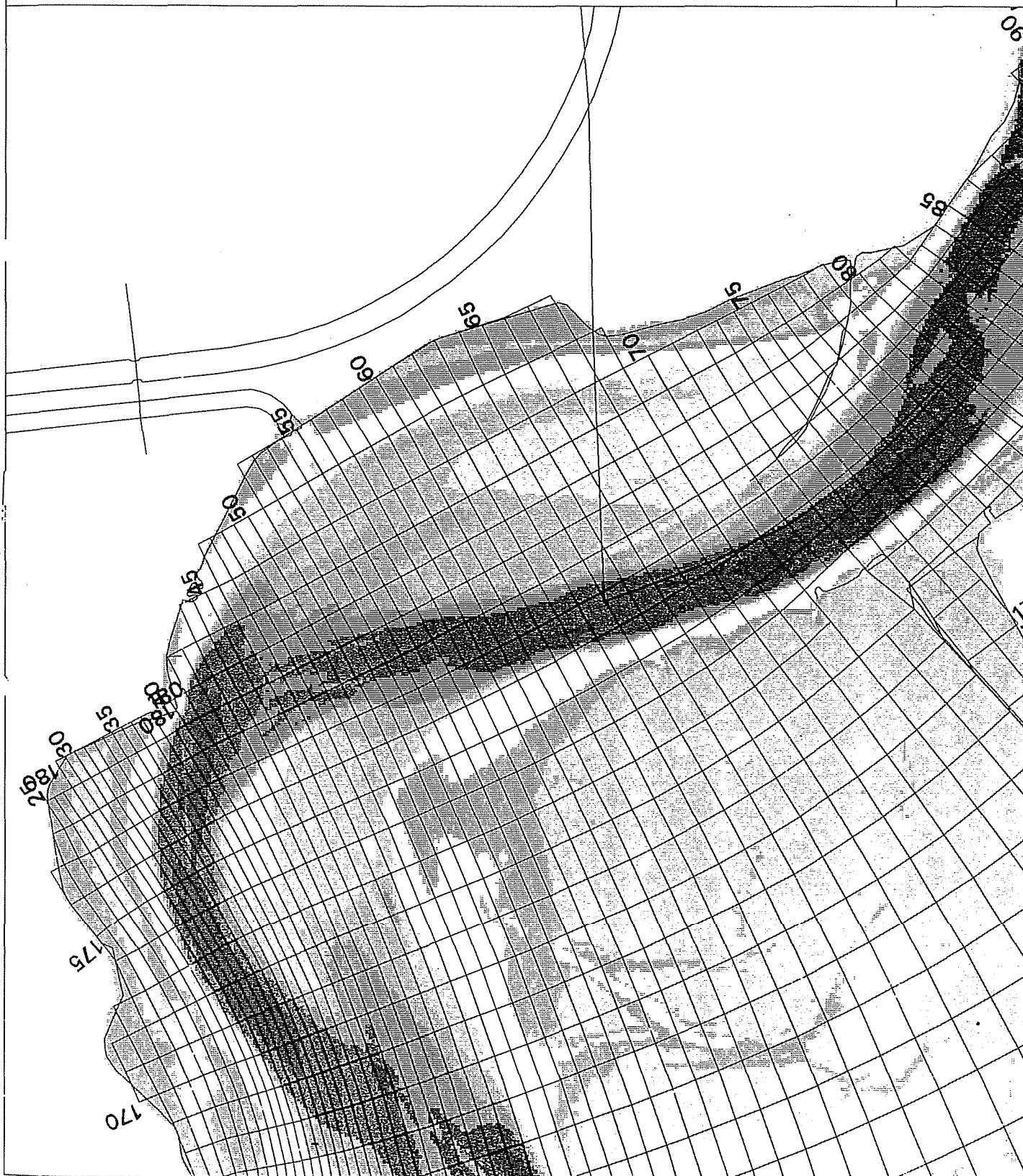
Schaal: 1:37.000

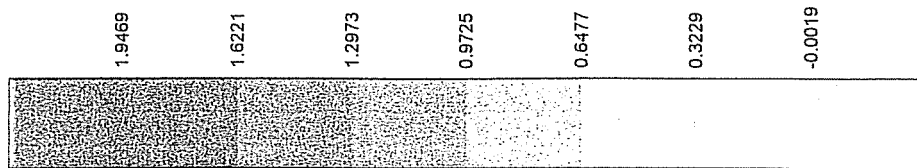
Oostwest

Rijksinstituut voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat

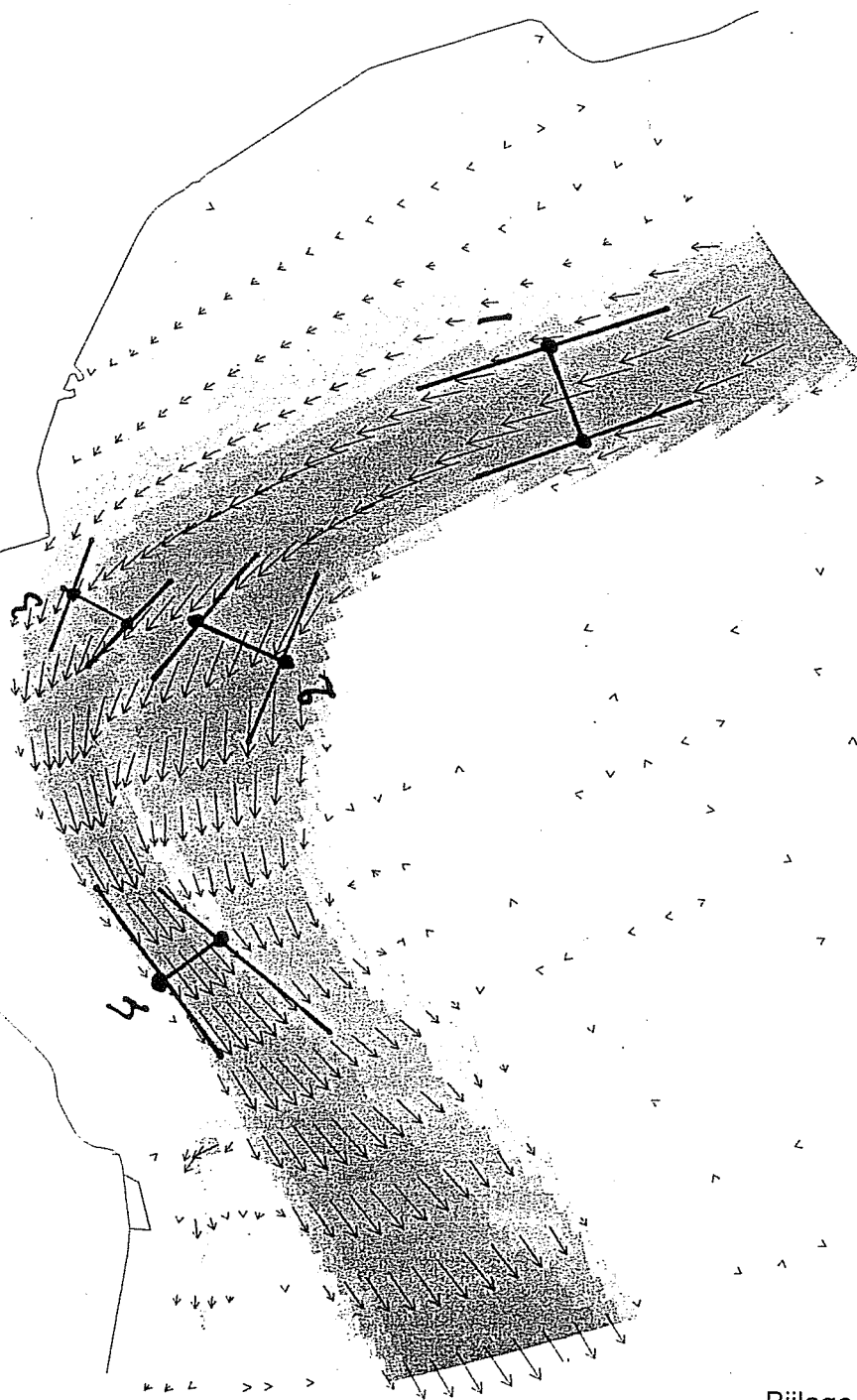


Bijlage 2: Fijn grid SCALWEST

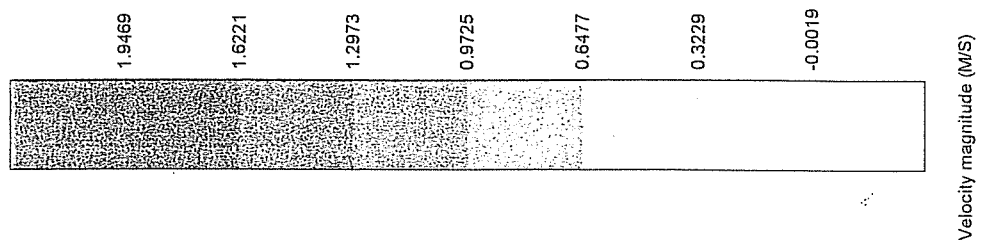




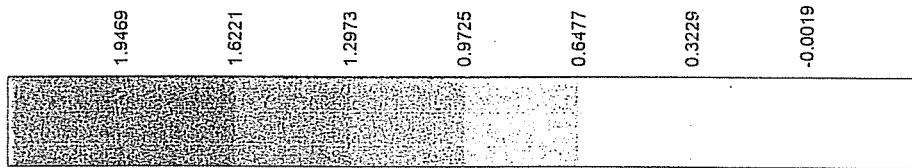
Velocity magnitude (M/S)



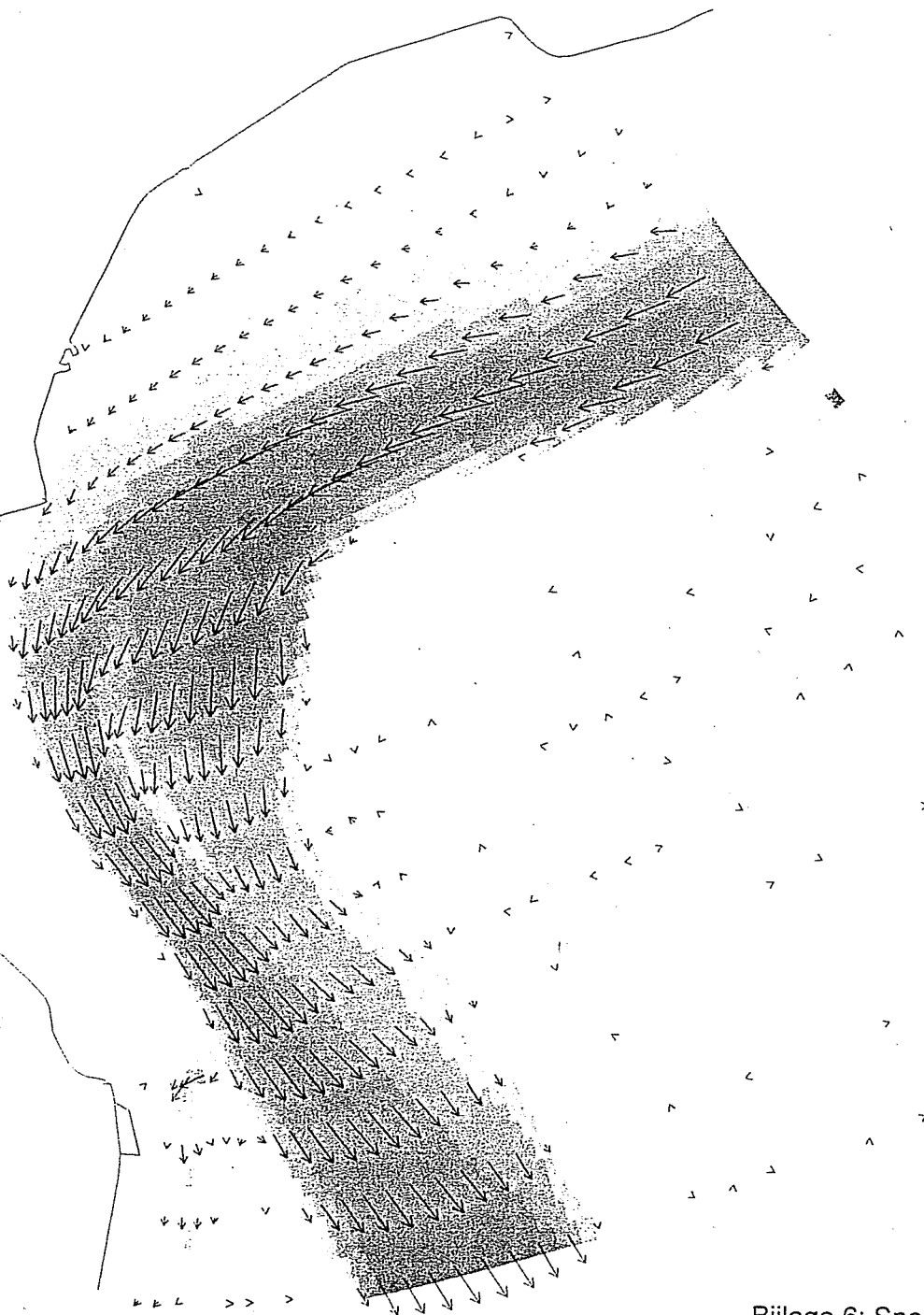
Bijlage 4: Divergentie/convergentie eb



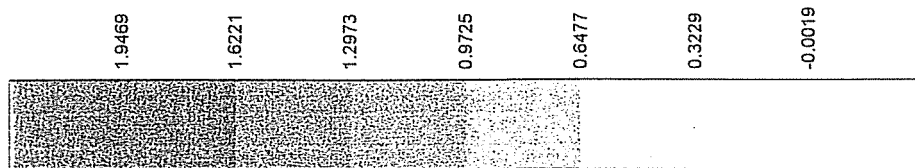
Bijlage 5: Divergentie/convergentie vloed



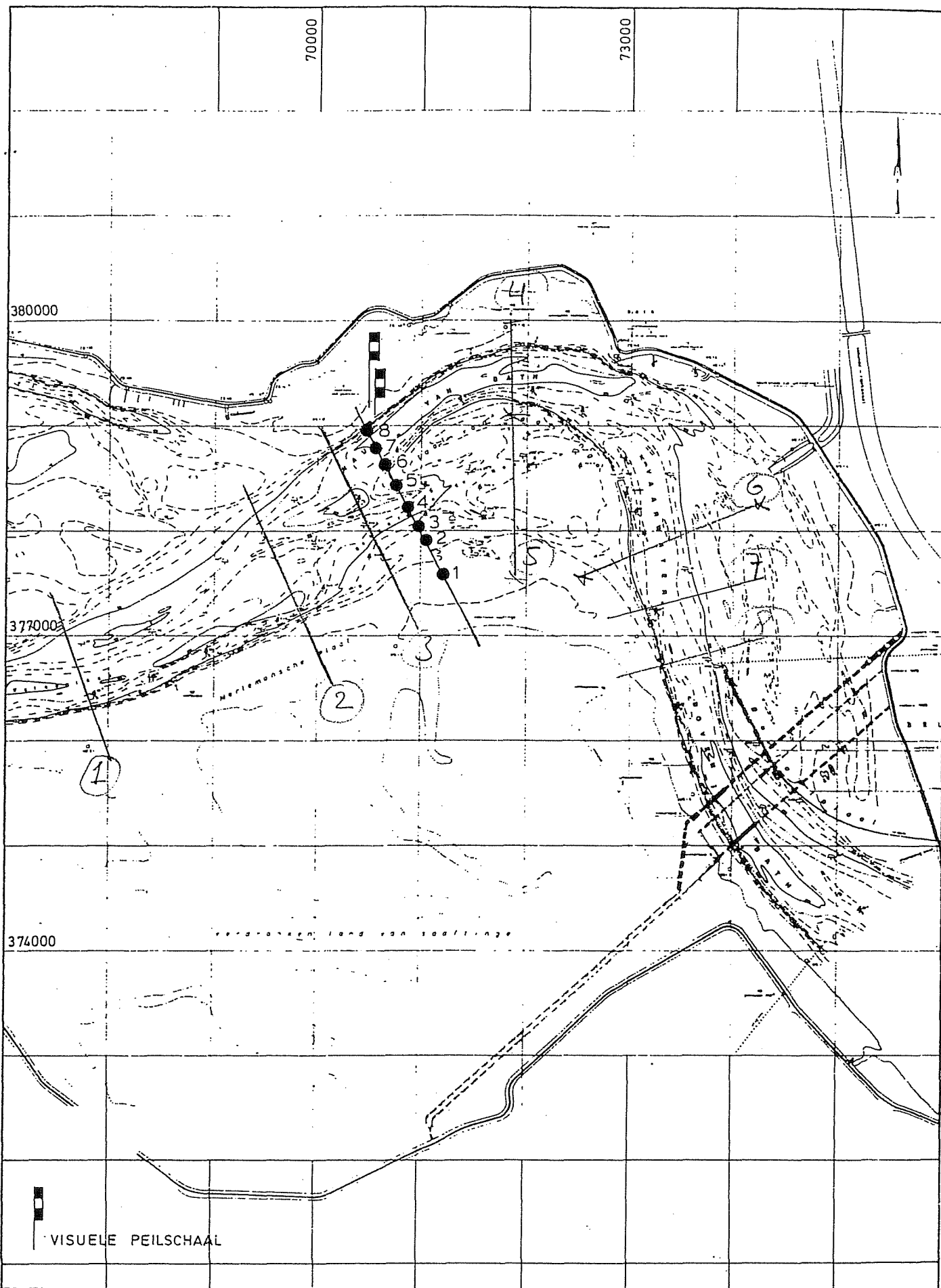
Velocity magnitude (M/S)



Bijlage 6: Snelheid eb



Bijlage 7: Snelheid vloed

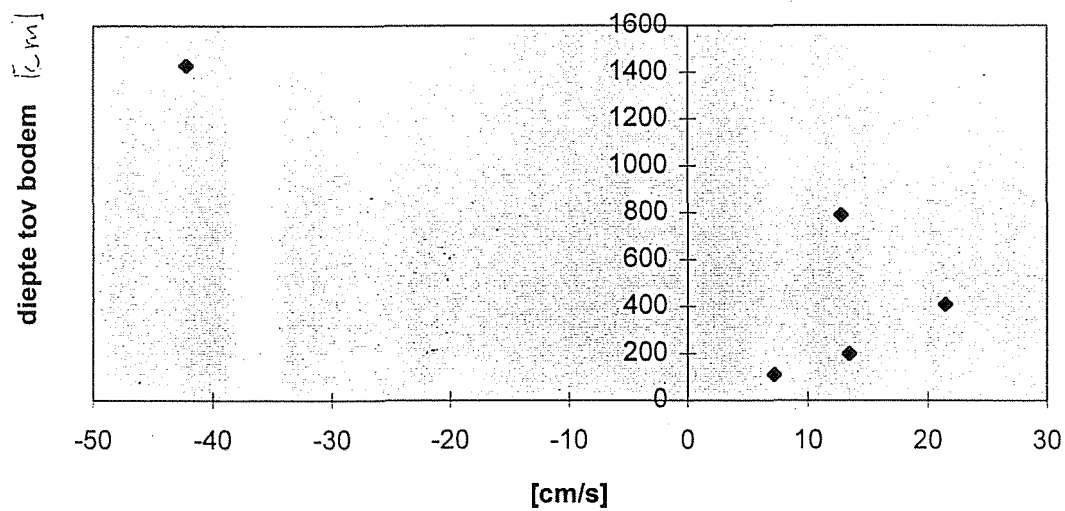


rijkswaterstaat
directie zeeland - meetdienst

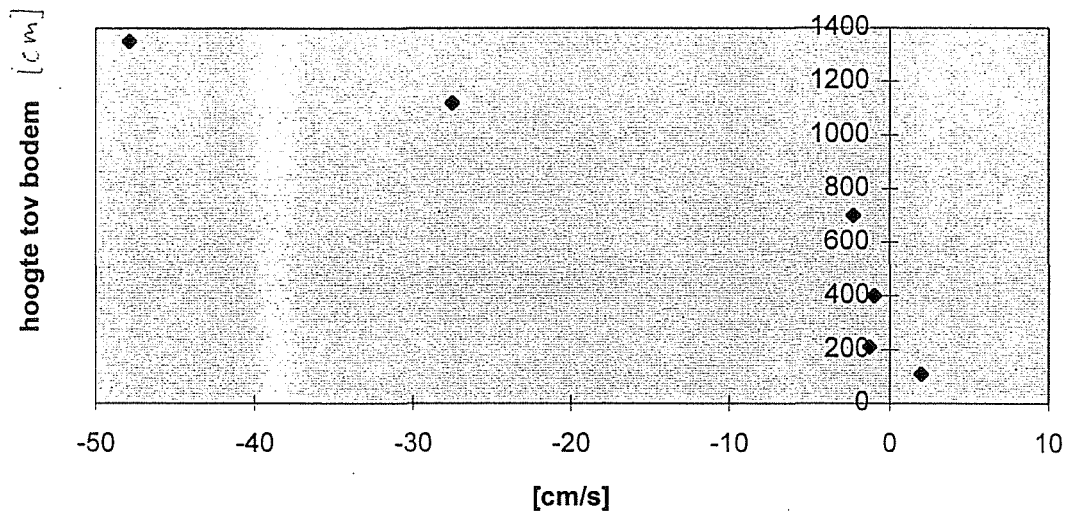
Bijlage 8: Raaien waarin het profiel is gemeten

get.		bijl. 1
gec.		code 0108 M.8901
gez.		schaal 1: 50000
akk.		nr.

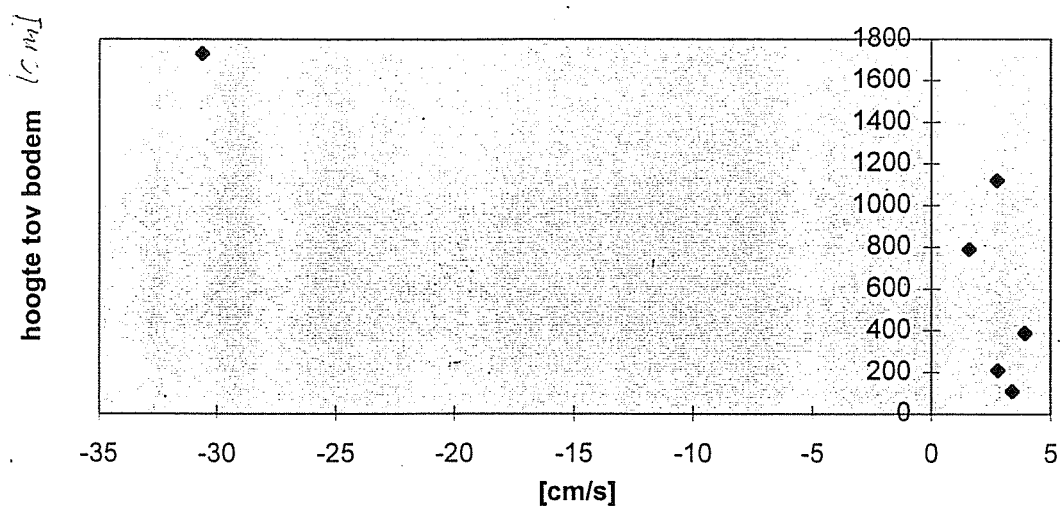
**dwarsstroming binnenbocht eb
tov 150 gr**



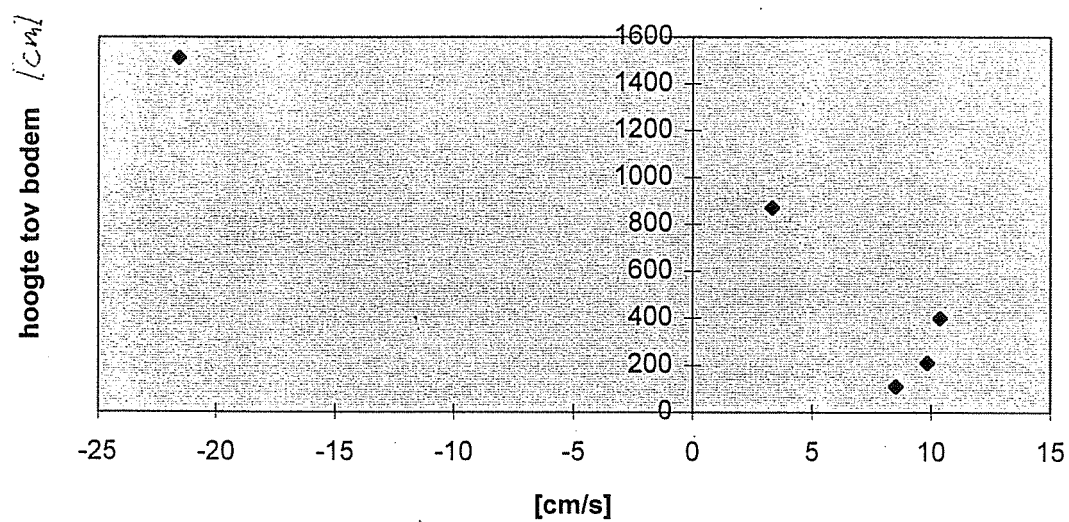
**dwarsstroming binnenbocht vloed
tov 130 gr**

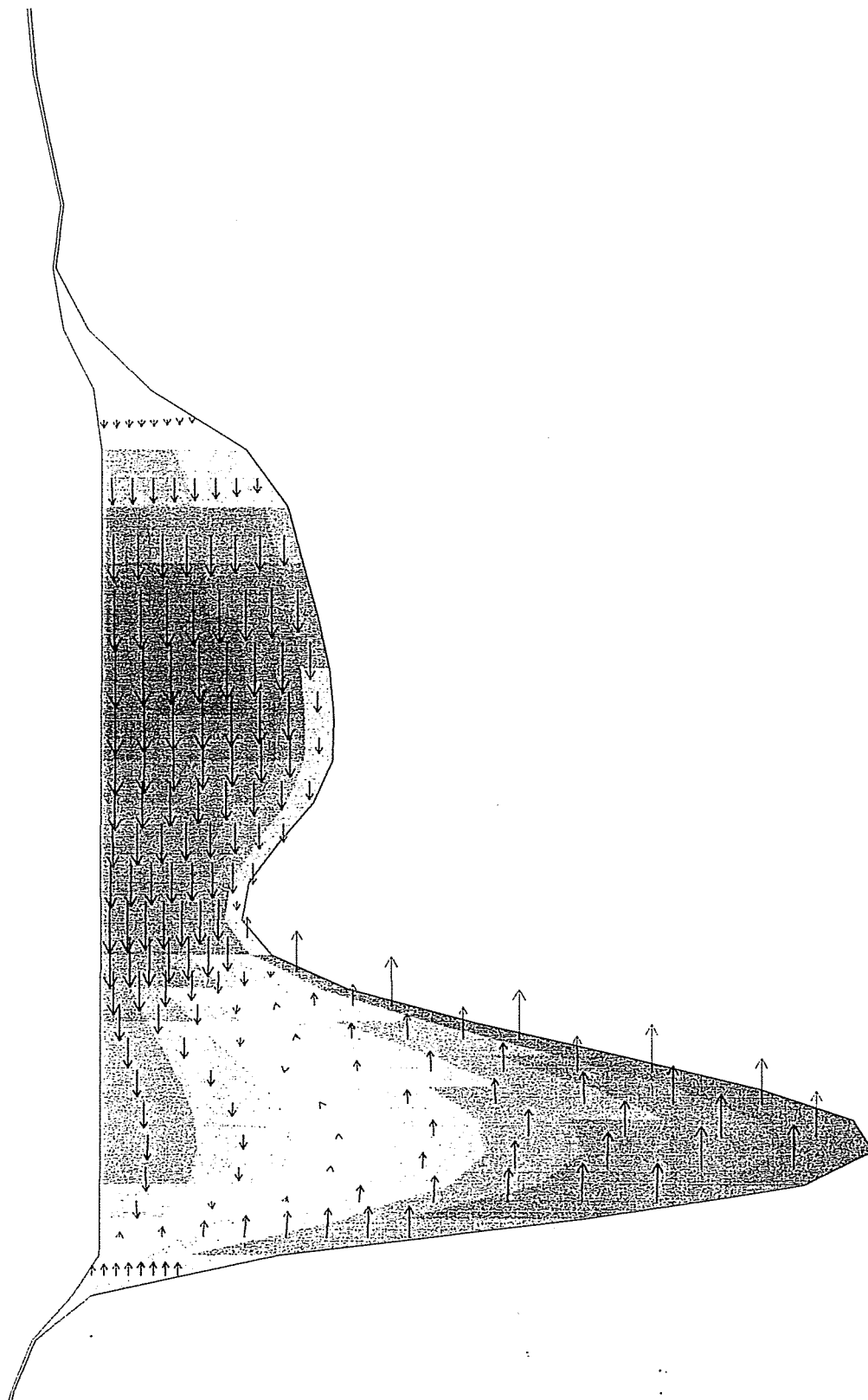
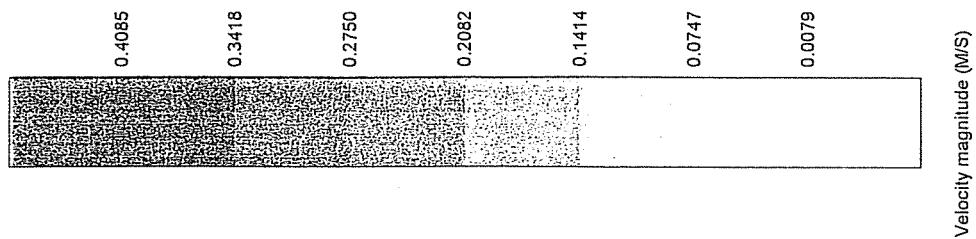


**dwarststroming buitenbocht eb
tov 150 gr**

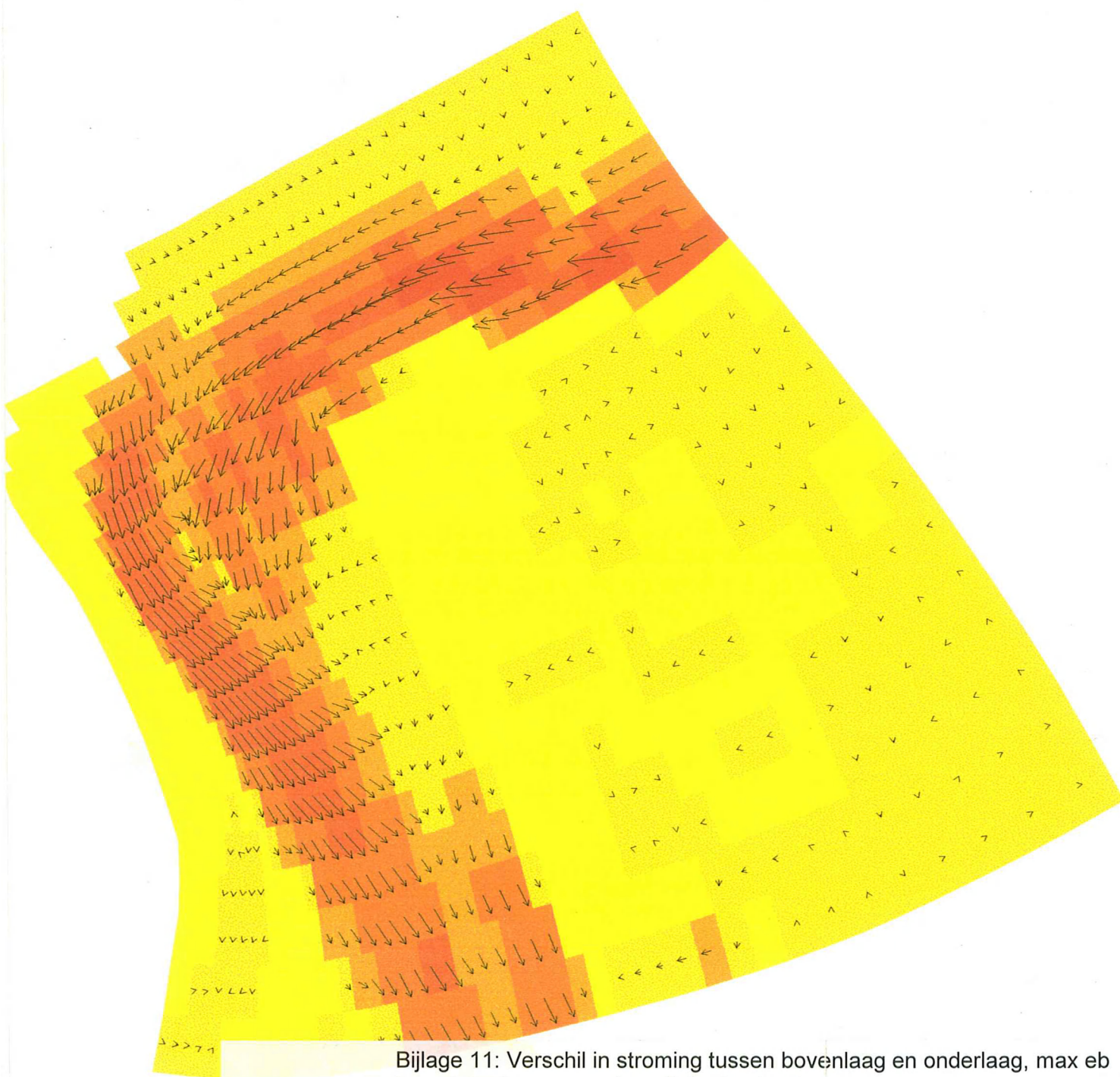
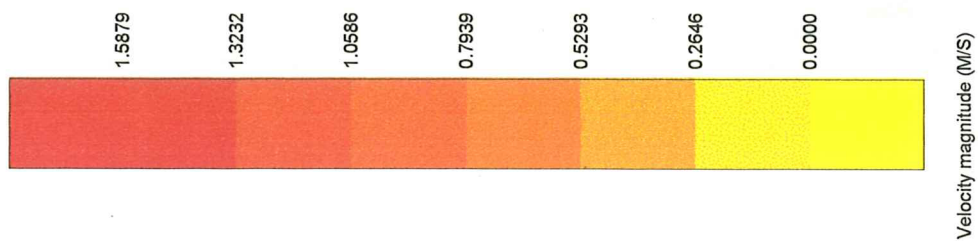


**dwarststroming buitenbocht vloed
tov 130 gr**

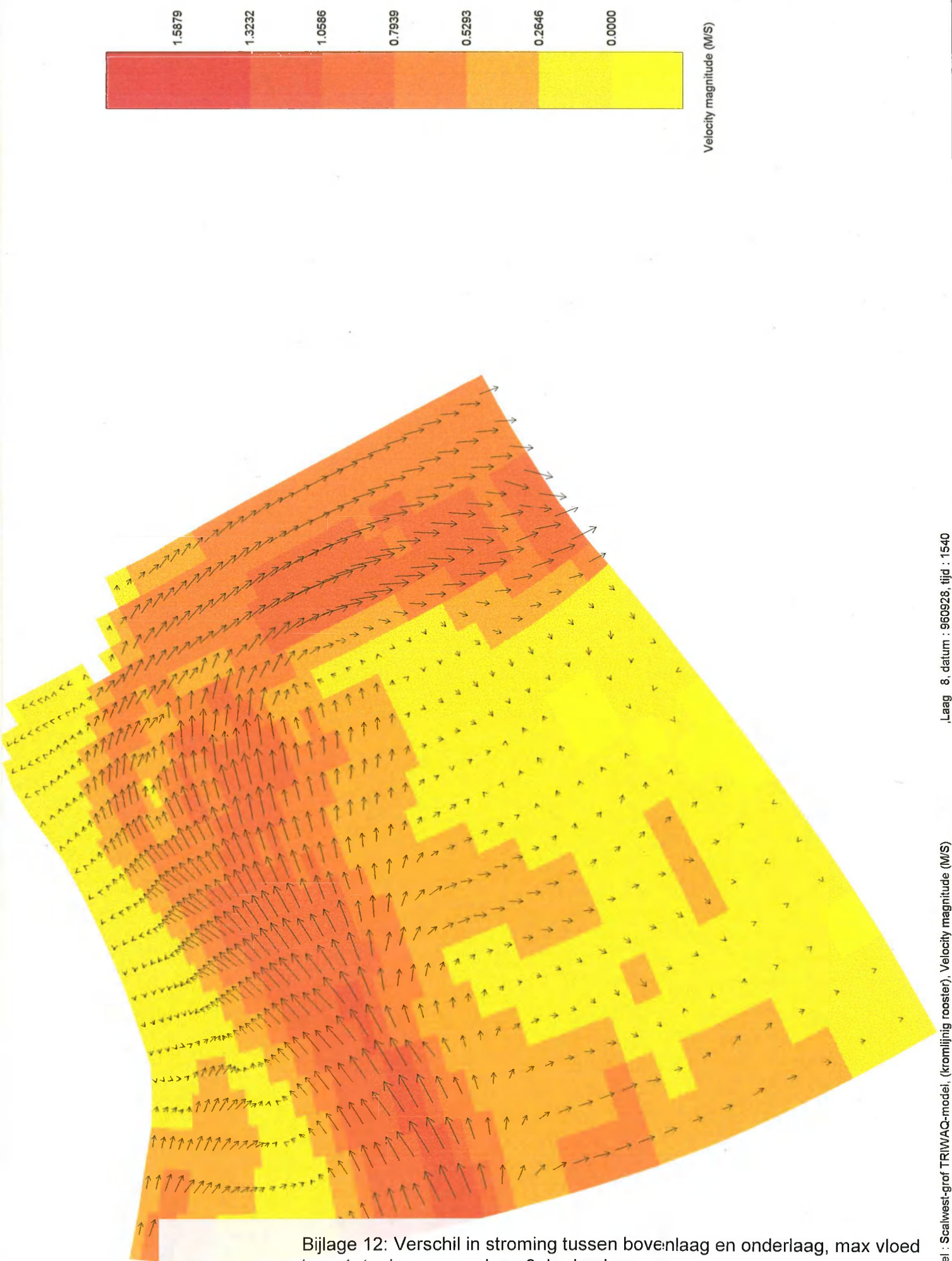




Bijlage 10: Spiraalstroom in het Nauw van Bath; SCALWEST 3D, max ebstroom



Bijlage 11: Verschil in stroming tussen bovenlaag en onderlaag, max eb
 laag 1: toplaag laag 8: bodemlaag

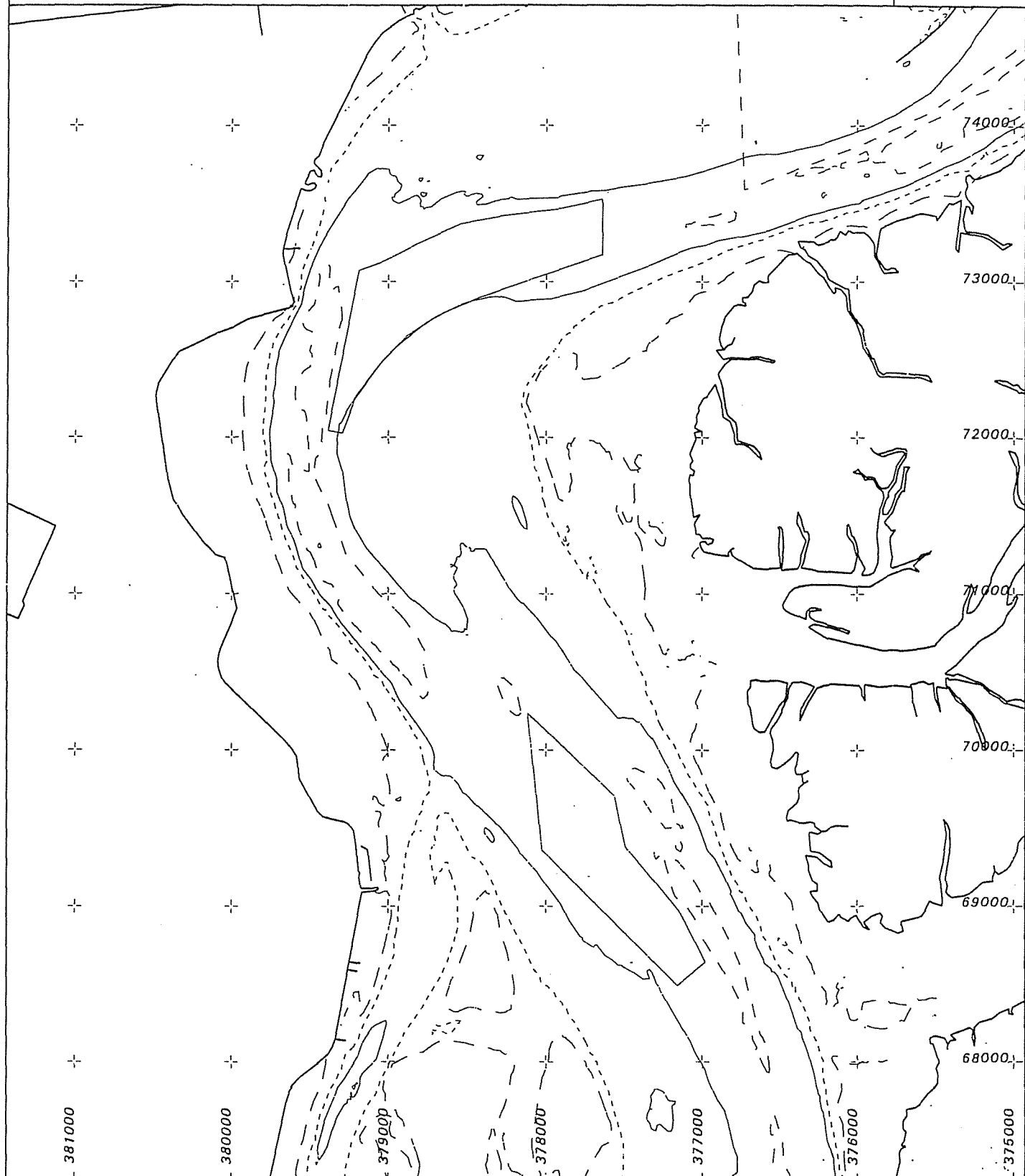


Drempels v Bath en
Valkenisse
Zandbalansvlakken

Schaal: 1:35.000

Verdieping

Rijksinstituut voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat



**Drempel v Bath en
Valkenisse**
Sedimentatie 1993 - 1996

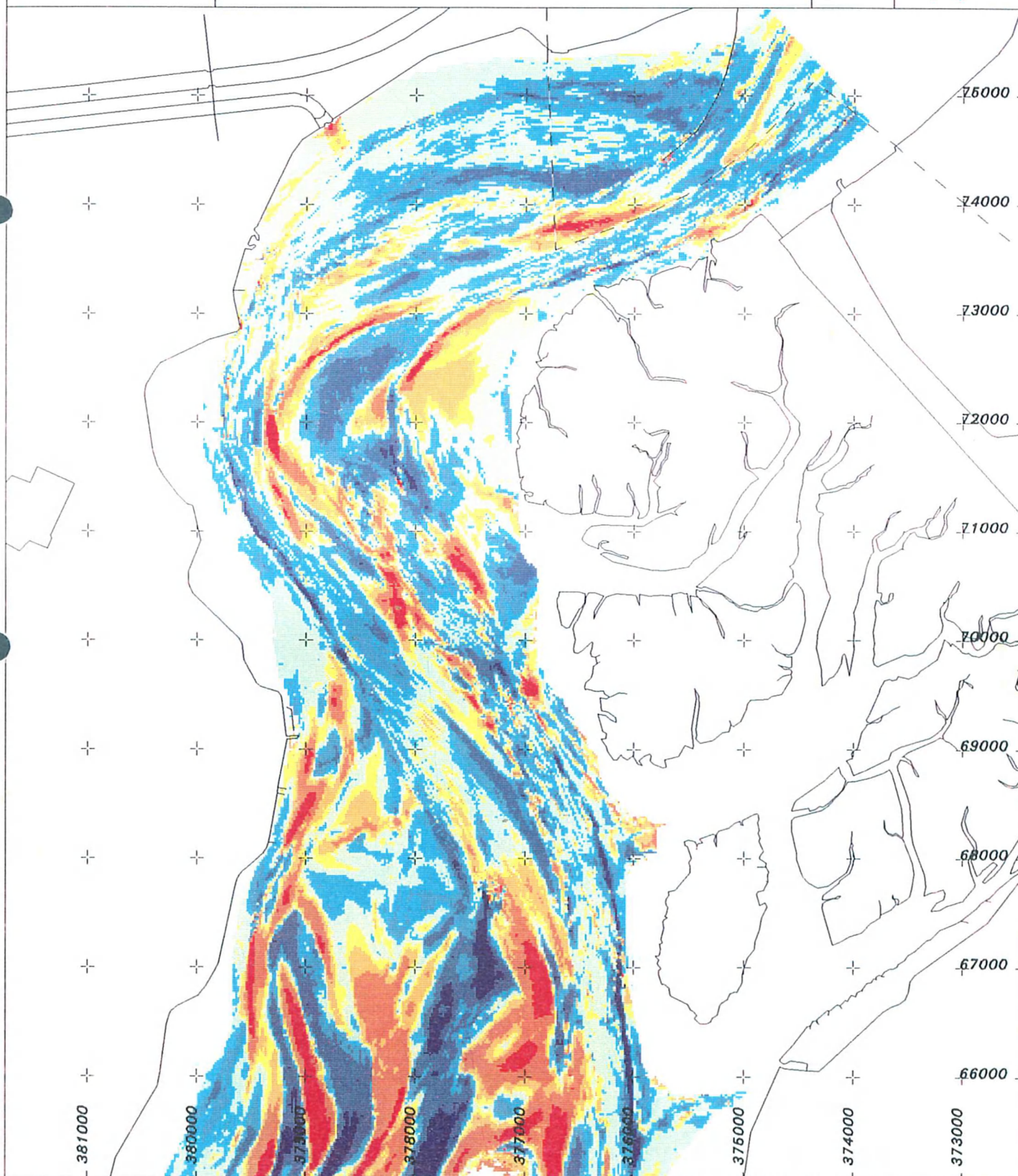
Legenda
meters



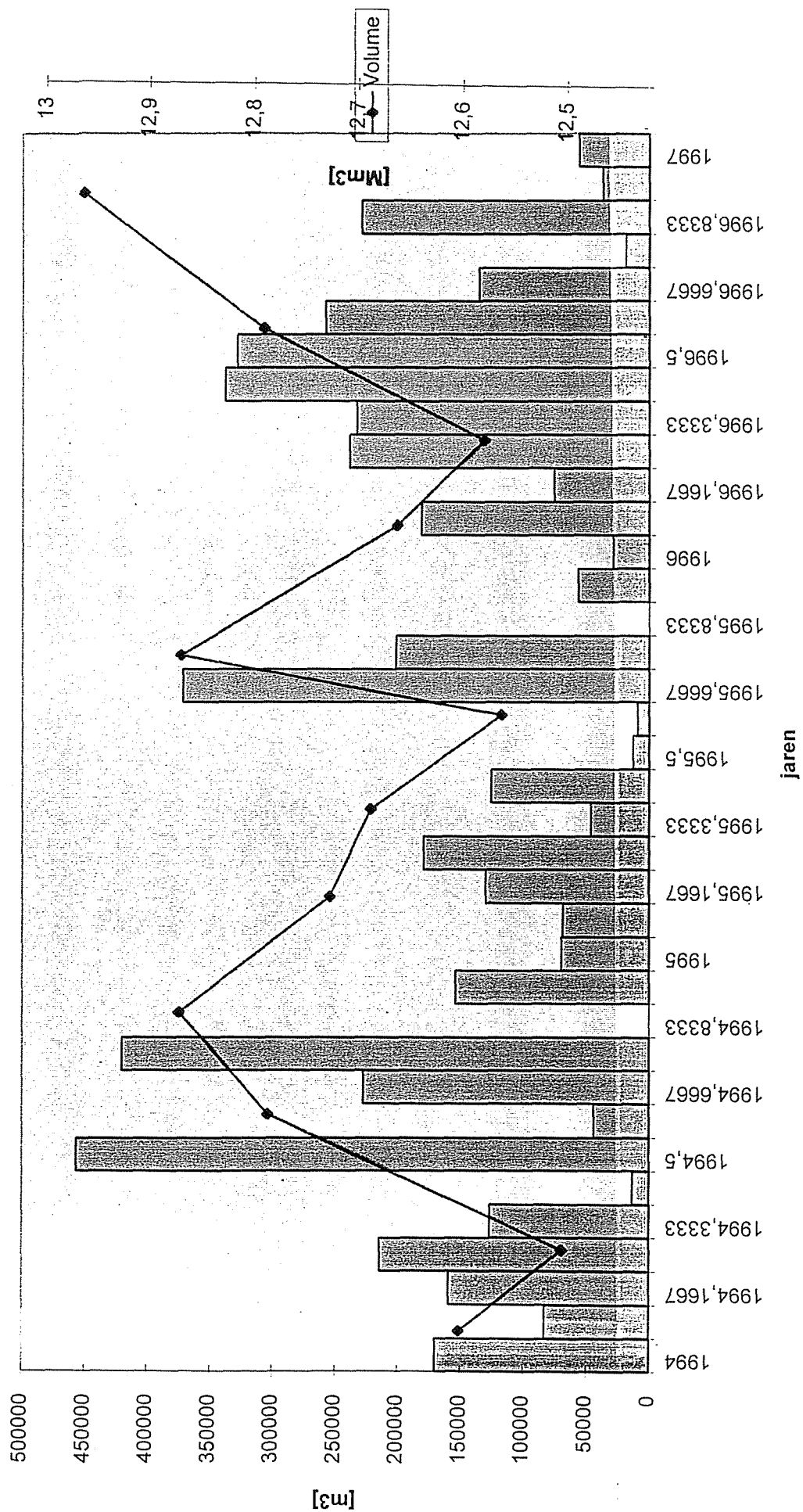
Schaal: 1:50.000

Verdlep

Rijksinstituut voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat



Nat volume onder NAP Bath
Baggervolume Bath



Nat volume onder NAP Valkenisse Baggervolume Valkenisse

