

Het gedrag van drempels in de Westerschelde
Een verkennende studie

Tekst

Rapport in opdracht van het
Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ) &
Directie Zeeland,
Rijkswaterstaat
Project Monitoring Verdieping (MOVE)

Augustus 1995

drs F.T.G. Tank
Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen
Vakgroep Fysische Geografie
Universiteit Utrecht

IMAU Rapport R 95-18

'Elke wilde geul van enige lengte wil zich splitsen, tenzij men door geleidingswerken of baggeren, de eenheid weet te bewaren. Het kost moeite een ebschaar en een vloedschaar te laten samengaan in één geul.'

Van Veen, 1950

Voorwoord

Dit onderzoek valt binnen het kader van het project MOVE (MONitoring Verdieping) dat in 1995 door Directie Zeeland is opgestart om de gevolgen op het systeem van de binnen afzienbare tijd te verwachten '48/'43 verdieping van de Westerschelde te kunnen monitoren en inschatten en zonodig te kunnen ingrijpen.

Een deel van het onderzoek binnen MOVE wordt door het RIKZ uitgevoerd en is door de Directie Zeeland en het RIKZ uitbesteed aan de Universiteit Utrecht. Het onderzoek gaat uit van de in het project OOSTWEST verkregen inzichten in het fysische systeem van de Westerschelde in het algemeen en het in 1994 gerapporteerde drempelonderzoek door het Ingenieursbureau Svasek in het bijzonder.

De volgende mensen ben ik erkentelijk voor hun assistentie en samenwerking: de begeleiders Ad Langerak (RIKZ) en Janrik Van den Berg (UU) en verder Paul Sistermans, Onno van Kleef (beiden Directie Zeeland), Kees Storm, Kees Van der Male (beiden RIKZ), Saskia Huijs en Leo Uit den Bogaard (beiden UU).

Middelburg, augustus 1995

Inhoud

Lijst met tabellen

1. Inleiding	1
2. Drempels in estuaria. Een literatuurstudie	3
2.1 Inleiding	3
2.2 Morfologie	3
2.3 Processen	6
2.3.1 Inleiding	6
2.3.2 Bochtwerking	6
2.3.3 Secundaire stroming	7
2.3.4 Onder- en oververzadiging	11
2.3.5 Getijgedreven residuele stroming	12
2.4 Conclusie	12
3. Morfologische ontwikkeling van drempels in de Westerschelde in de periode 1931- 1994	15
3.1 Inleiding	15
3.2 Drempeltypen	15
3.3 Beschrijving per drempel	17
3.4 Conclusie	29
4. Waterbeweging: stroomsnelheden en dwarsverhangen rondom drempels in de Westerschelde	31
4.1 Inleiding	31
4.2 Stroomsnelheden	32
4.2.1 Inleiding	32
4.2.2 Beschrijving en analyse per drempelgebied	32
4.2.3 Conclusie	36
4.3 Dwarsverhangen	36
4.3.1 Inleiding	36
4.3.2 Beschrijving en analyse per drempelgebied	37
4.3.3 Conclusie	41
4.4 Conclusie	42
5. Synthese	45
5.1 Inleiding	45
5.2 Mechanismen	45
5.2.1 Het gedrag van drempels	45
5.2.2 Discussie	48
5.3 Mechanismen per drempel	50
6. Conclusie	53
7. Literatuur	57

Lijst met tabellen

Tabel 4.1 Gemeten en berekende dwarsverhangen in de bochten in de Westerschelde, benevens berekende snelheden van de secundaire stroming

Tabel 5.1 Gevolgen voor verschillende parameters van veranderingen in de factoren die het gedrag van een drempel bepalen

1 Inleiding

Drempels, natuurlijke ondiepten, in geulen in de Westerschelde de vormen een probleem voor de scheepvaart naar Antwerpen. Om Antwerpen toegankelijk te houden voor de steeds grotere schepen dienen deze drempels gebaggerd te worden. De baggerwerkzaamheden, die vooral in het oosten van de Westerschelde geconcentreerd zijn, hebben jaarlijks een omvang van ongeveer 8 miljoen m³. Met de 48'/43'-verdieping, die naar verwachting in 1996 een aanvang zal nemen, zal deze omvang aanvankelijk bijna verdubbelen en op de lange termijn stabiliseren op 12 à 15 miljoen m³ per jaar. Deze toename van het bagger- en stortwerk betekent een vergrote ingreep op de fysische structuur van het estuarium met alle gevolgen van dien voor het ecologisch systeem van de Westerschelde.

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

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

Voorjaar 1995 is Directie Zeeland gestart met een meerjarig onderzoek naar het gedrag van drempels in de Westerschelde. Dit rapport is een eerste aanzet tot het vergroten van de kennis over drempels. Een primair doel van deze kennis is het gefundeerd opzetten van een meetcampagne najaar 1995 naar het gedrag van drempels.

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

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

Het onderzoek bestaat behalve uit een inventariserende literatuurstudie naar processen op en rondom drempels ook uit een empirische studie van de morfologie van en waterbeweging op vijf belangrijke drempels in de Westerschelde.

Het onderzoek wordt geleid door de volgende onderzoeksvragen:

- * Welke processen spelen volgens de literatuur een rol bij het gedrag van een drempel?
- * Hoe verloopt de morfologische ontwikkeling tussen 1931 en 1994 van enkele belangrijke drempels in de Westerschelde?

- * Hoe stroomt het water over een drempel?
- * Welke drempeltypen zijn er (in de Westerschelde) te onderscheiden?
- * Welke processen zijn bepalend voor het gedrag van de verschillende drempels in de Westerschelde?

In dit rapport worden vijf drempels in de Westerschelde nader onderzocht, te weten -van oost naar west- de Drempel van Bath, de Drempel van Valkenisse, de Drempel van Hansweert, de Drempel van Baarland en de Drempel van Borssele (figuur 1.1). Op de Drempel van Baarland wordt sinds halverwege de jaren '70 niet meer gebaggerd en de huidige ontwikkeling van de drempel verloopt min of meer natuurlijk. Op de overige drempels vindt op dit moment ongeveer 70 % van de totale onderhoudsbaggerwerkzaamheden in de Westerschelde plaats. Binnen deze groep spant de Drempel van Hansweert de kroon met bijna 30 % van de totale baggerwerkzaamheden in het estuarium.

Het onderhavige rapport is als volgt ingedeeld: in hoofdstuk 2 staan de processen die een drempel vormen opgesomd zoals die uit een literatuurstudie naar voren zijn gekomen, vervolgens komt in hoofdstuk 3 het morfologisch gedrag van enkele drempels aan de orde. In hoofdstuk 4 wordt de waterbeweging op en over de drempels in de Westerschelde beschreven en geanalyseerd. Hoofdstuk 5 wordt een synthese van de verkregen kennis over het gedrag van drempels in de Westerschelde gegeven en in hoofdstuk 6 staan de conclusies.

2 Drempels in estuaria. Een literatuurstudie

2.1 Inleiding

De Westerschelde is een trechtervormig estuarium met een complex stelsel van platen en meanderende geulen. In de richting van de mond van het estuarium nemen de dimensies van de geulen en platen toe. Tevens neemt in die richting, met het getijvolume, ook het aantal doorgaande hoofdgeulen toe: van één geul in het oosten tot drie in het mondingsgebied.

De geometrie van het stelsel van geulen en platen en de huidige hydrologie bepalen de hydraulica en daarmee de sedimentbeweging in een geul (Winkley, 1989). De water- en sedimentbeweging in een estuarium is bidirectioneel. De richting en grootte van het netto sedimenttransport is daarbij afhankelijk van kleine verschillen in de waterbeweging die vaak het gevolg zijn van geometrische effecten.

Kenmerkend voor de geulen of geuldelen is dat ze eb- dan wel vloedgedomineerd kunnen zijn. Dit houdt in dat in geulen of geuldelen een eb- dan wel vloedgericht transport overheerst. In de terminologie van Van Veen (1950) betreft het hier eb- en vloedscharen. Deze scharen kunnen zowel hoofd- als nevengeulen betreffen.

Op de overgang van twee of meer verschillend gedomineerde geulen of geuldelen komen drempels voor. Deze overgang kan bestaan uit een afsplitsing van geulen of uit een kruising van geulen. Op deze overgang komen tegengesteld gerichte transporten samen.

In rivieren, dus onder condities met uniforme stroming, komen op de overgang tussen twee tegengestelde geulbochten ook drempels voor (Richards, 1982). Ter hoogte van een drempel is het dwarsprofiel van een geul relatief breed en ondiep. In de Engelstalige literatuur worden deze 'bars', 'riffles' of 'crossings' genoemd. Waarschijnlijk zijn de mechanismen die in rivieren de drempel veroorzaken ook mede verantwoordelijk voor het ontstaan van drempels in estuaria. Naast deze mechanismen spelen in estuaria ook effecten van bidirectionele stroming een rol.

In dit hoofdstuk komen eerst de morfologische kenmerken van drempels en daarna processen die op drempels werkzaam zijn aan de orde. Over drempels in estuaria is, zoals na een literatuurstudie bleek, weinig bekend en daarom is dit literatuuronderzoek gebaseerd op enkele schaarse bronnen.

2.2 Morfologie

De geometrie van een langwerpig estuarium, zoals de Westerschelde, kan schematisch weergegeven worden door een meanderende ebgedomineerde hoofdgeul waar vloedgedomineerde nevengeulen (vloedscharen) van aftakken die doodlopen in

komgebieden (Van Veen, 1950; figuur 2.1). De vloedscharen in de komgebieden worden overigens vaak door ebgedomineerde geulen (ebscharen) kortgesloten met de bovenstroomse hoofdgeul. De geometrie van het geulenstelsel, van de eb- en vloedscharen, wordt, behalve door het meanderen, volgens Peters en Sterling mede bepaald door de dijkconfiguratie (figuur 2.2).

De drempel vormt een relatief ondiep en breed deel van een geul. Deze ten opzichte van geulbochten relatief kleine diepte en grote breedte veroorzaakt divergentie van de stroming, en daarmee snelheidsverlaging van de stroom, als deze de drempel opkomt. Deze divergentie is een belangrijk oorzaak van drempelvorming, omdat hierdoor het eroderend vermogen van de ebstroom op de drempel afneemt (Blik en Ruijter, 1994).

Het geulprofiel van een drempel is redelijk symmetrisch; stroomopwaarts en -afwaarts van een drempel is het geulprofiel bimodaal (Storm, 1995; figuur 2.3): het geulprofiel bestaat uit een duidelijk gescheiden eb- en een vloedgedomineerd deel, waarvan één van de twee in dwarsoppervlak veel groter is (Kjerfve, 1978).

Binnen de geometrie van een estuarium komen drempels voor aan het einde van ebgedomineerde geul, waar deze overgaat in een vloedgedomineerde geul (Blik en Ruijter, 1994). Een kenmerk van drempels is dat ze zich vaak op de overgang tussen twee tegengestelde geulbochten bevinden en wel ter hoogte van de afsplitsing van vloedscharen of ebgedomineerde kortsluitgeulen. Ten opzichte van de vloedstroom bevindt de vloedschaar zich stroomopwaarts van de drempel; de ebgedomineerde kortsluitgeul bevindt zich stroomafwaarts van de drempel (figuur 2.4).

Deze geometrie is kenmerkend voor een drempel. De nevengeulen tappen water af voordat het de drempel overstroomt: de vloedschaar tapt vloedwater af en de ebschaar/kortsluitgeul ebwater. Het maximale getijvolume door een geul heeft een sterke lineaire relatie met het doorstroomoppervlak van een geul (o.a. Gerritsen en de Jong, 1983; Blik en Ruijter, 1994) en is daarmee van invloed op de evenwichtsdiepte van een drempel. Aftapping beïnvloedt de grootte van het maximale getijvolume en daarmee de evenwichtsdiepte van een drempel. De mate van aftapping, en daarmee de hoeveelheid water die tijdens eb en vloed resulterend over een drempel gaat, is door Blik en Ruijter (1994) onderzocht met behulp van een impulsbalans voor de belangrijkste drempels in de Westerschelde. De impulsbalans is berekend door voor een dwarsprofiel voor eb en voor vloed de watermassa met de gemiddelde snelheid te vermenigvuldigen; de gemiddelde snelheid hangt daarbij af van de mate waarin een profiel in evenwicht is met het getijvolume.

De belangrijkste conclusie van Blik en Ruijter (1994) is dat het vermogen van de ebstroom niet in staat is het tijdens de vloed op de verdiepte drempel afgezette sediment te eroderen. In het geval van een onverdiepte drempel zou er sprake zijn van een dynamisch evenwicht tussen sedimentatie tijdens vloed en erosie tijdens eb (Blik en Storm, 1995). Overigens kan de mate van aftapping in de loop van de tijd ten gevolge van toe- of afname van het doorstroomoppervlak van de kortsluitgeul door migratie -dat weer door bochtwerking wordt

veroorzaakt- veranderen.

Naast de al eerder genoemde lokaties komen drempels ook voor aan het einde van scharen en worden daar schaardelta's genoemd (Van Veen, 1950). Dit laatste type drempel komt in dit onderzoek niet aan de orde omdat deze geen belemmering vormt voor de scheepvaart en dus ook geen baggeren behoeft.

Berben (1985) toont aan dat er in de Waddenzee en zuidwest-Nederland voor geulen in estuaria, net als in rivieren, een redelijk sterke lineaire empirische relatie bestaat tussen getijvolume enerzijds en meanderlengte en bochtstraal anderzijds. Dit houdt in dat met toenemend getijvolume de meanderlengte en de bochtstralen van de geulen ook toenemen. De aanpassing in estuariumgeulen vindt waarschijnlijk plaats volgens een kenmerkend erosie- en sedimentatiepatroon, zoals dat ook in rivierbochten optreedt: erosie in de buitenbocht en sedimentatie in de binnenbocht. In een rivierbocht namelijk treedt in het horizontale vlak het volgende patroon van snelheden, bodemschuifspanning en sedimenttransport op: in de binnenbocht, ter hoogte van de bochtapex, treedt een maximum op en in de stroomrichting treedt daarna een afname op van het transport; in de buitenbocht treedt het maximum een eind stroomafwaarts van de bochtapex op (figuur 2.5) (Bridge en Jarvis, 1982; Berben, 1985). Dit patroon wordt voor een groot deel veroorzaakt door de secundaire stromen. Bij toenemende debieten schuiven de maxima, dus ook de plaatsen met erosie en sedimentatie, stroomafwaarts op (figuur 2.6). Het gevolg van dit erosie- en sedimentatiepatroon is dat de meanderlengte- en de bochtstraal toeneemt. Overigens treden er in estuaria een erosie- en sedimentatiepatronen op die niet zouden worden verwacht volgens de empirische relatie tussen getijvolume en bochtstraal en meanderlengte. Dit wordt veroorzaakt door andere simultaan werkende erosie- en sedimentatieprocessen, dan wel door dijken of resistente oevers of bodemlagen die de aanpassing van de meandergeul afremmen (Berben, 1985).

Voor rivieren is door Winkley (1989) aangetoond dat de drempeldiepte ook afhangt van andere geometrische variabelen dan hierboven al genoemd, zoals de sinusoïteit van de geul, de hoek tussen de stroomdraden bij lage en hoge afvoeren, de breedte tijdens hoog en laag water. De bochtstraal van de bovenstroomse bocht heeft een verband met de omvang van de drempel.

Bij het vergelijken van drempels in rivieren en estuaria moet enige terughoudendheid worden betracht (Storm, 1994). Het blijkt dat drempels in rivieren andere eigenschappen hebben dan drempels in estuaria: juist de variatie in de grootte van de afvoeren in de loop van het jaar is bepalend voor de geometrie van rivierdrempels (Winkley, 1991 in: Storm, 1994). Daarnaast fungeren vooral in kleine rivieren drempels tijdens normale afvoeren als een soort overlaat met als gevolg stroomversnelling.

Een belangrijk verschil is er tussen ongebaggerde en gebaggerde drempels. Het geulprofiel van ongebaggerde drempels is weliswaar breed en ondiep maar het is

niet uit evenwicht met de getijvolumina die er door gaan. Volgens Van Veen (1950) komen op ongebaggerde drempels hoge snelheden en verhangen voor. Een gebaggerde drempel daarentegen is te ruim voor de getijvolumina. Dit heeft tot gevolg dat de stroomsnelheden ter hoogte van een gebaggerde drempel lager zijn dan in de aanpalende geulen.

Uit analyse van bodemvormen rondom de drempels van Valkenisse en Hansweert in het oosten van de Westerschelde door Reussink (1991) blijkt dat stroomopwaarts van de drempel de bodemribbels ebgeoriënteerd zijn en stroomafwaarts vloedgeoriënteerd. Op de drempel zelf is de bodem vlak. Aan beide zijden van de drempels, nemen de bodemvormen in de richting van de drempel in hoogte af en in lengte toe. Deze vormverandering wordt door Reussink toegeschreven aan een snelheidstoename. Bucx en Tobias (1989) maken melding van toename van de ribbelhoogte tot meer dan 1.0 m nabij de drempels van Bath, Valkenisse en Hansweert. Nabij deze lokaties slaat de dominantie om. Een verklaring voor de toename van de ribbelhoogte vinden zij eveneens in de versnelling van de stroming over een drempel.

2.3 Processen

2.3.1 Inleiding

In dit deel van het hoofdstuk worden de belangrijkste processen die van invloed zijn op het gedrag van drempels behandeld. Eerst komt een mechanisme aan de orde dat van grote invloed is op de geometrie van de geulen, n.l. bochtwerking. De secundaire stroming, die tezamen met de langsstroming de bochtwerking veroorzaakt, wordt vervolgens nader beschouwd. Daarna worden enkele voor de aanzanding van de drempels van belang geachte residuele transportmechanismen besproken, namelijk de onder- en oververzadiging en de getijgedreven residuele stroming.

2.3.2 Bochtwerking

In bochten in estuaria worden door centrifugaalkrachten en de Coriolisversnelling dwarsverhangen opgewekt die een secundaire stroming bewerkstelligen. Deze secundaire stroming heeft, samen met de primaire langsstroming, erosie van de buitenbocht tot gevolg. Dit verschijnsel, uitbochtting, is een belangrijk mechanisme dat door zijn uitwerking op de geometrie van de geulen verantwoordelijk is voor het ontstaan en het gedrag van drempels. Langsstroming en secundaire stroming spelen daarnaast ook een rol bij de aanzanding van een drempel. Dit wordt in de volgende paragraaf behandeld.

Uitbochten is het mechanisme dat het meanderen van geulen in estuaria veroorzaakt, zoals dat ook in rivieren optreedt. Het gevolg hiervan is een min of

meer sinusvormig geulpatroon in het horizontale vlak. Op de rechte overgangen tussen twee tegengestelde bochten ontstaan zowel in rivieren als estuaria de drempels. In rivieren bevinden die drempels zich op de plaats waar de stroomdraad met maximum snelheid (talweg) oversteekt van de ene oever naar de andere oever van de rivier (Richards, 1982; Bridge en Jarvis, 1982).

In een estuarium met bidirectionele stroming hebben twee tegenovergesteld bochten meestal een verschillende dominantie: de morfologie, die het gevolg is van bochtwerking, van de ene bocht wordt door de eb bepaald en die van de andere door de vloed. Het gevolg hiervan is dat op de plaats waar de verschillende gedomineerde geulen samen komen, deze elkaar ontwijken. Hierdoor ontstaat er een bimodaal geulprofiel dat breed en ondiep is: een drempel. Van Veen (1950) was een van de eersten die het ontwijkende gedrag van eb- en vloedgedomineerde geulen beschreven heeft (figuur 2.7).

Het lijkt er op dat het meanderen, zoals dat ook optreedt in rivieren, in estuaria versterkt wordt door de bidirectionele stroming waardoor twee verschillende gedomineerde geuldelen elkaar gaan ontwijken. Dit is een belangrijk fenomeen voor het ontstaan en gedrag van drempels.

Bochtwerking is ook van invloed op de migratie van kortsluitgeulen (zie ook paragraaf 2.2). De positie van een kortsluitgeul ten opzichte van een drempel is naast de omvang van de geul ook van invloed op de hoeveelheid water die over de drempel stroomt en daarmee van invloed op de drempeldiepte.

2.3.3 Secundaire stroming

De centrifugaalkrachten en de Coriolisversnelling zorgen in bochten ervoor dat water 'uit de bocht schiet'; het zwaartepunt van de stroming ligt in de buitenbocht. Als gevolg hiervan ontstaat, zoals paragraaf 2.3.2 al is aangegeven, in geulbochten een dwarsverhang. Dit dwarsverhang wekt weer een secundaire stroming op, dat wordt beschouwd als een belangrijk mechanisme voor de aanvang van drempels in rivieren (Bridge en Jarvis, 1982; Zimmermann en Kennedy, 1978 in: Kitandis en Kennedy, 1984) en ook in estuaria (Van Veen, 1950) van belang wordt geacht. Daarnaast kan een secundaire stroming aangedreven worden door een stroming dwars over de geul (Peters en Sterling, 1976; figuur 2.8).

De secundaire stroming, ook wel helicoïdale stroming genoemd, staat dwars op de hoofdstroming en vormt één of meerdere circulatiecellen in een geul. Meerdere circulatiecellen komen in brede, ondiepe geulen voor (Tsujimoto, 1989). In het geval van één cel gaat het water in een spiraalbeweging door de bocht, waarbij de secundaire stroming aan de bodem naar de binnenbocht is gericht en aan het oppervlak naar de buitenbocht (figuur 2.9). Door dit spiraalpatroon wordt het in de buitenbocht geërodeerde materiaal nabij de bodem richting de binnenbocht getransporteerd en daar verder stroomafwaarts afgezet.

In een rivier kan er in geval van meerdere cellen met secundaire stroming een 'put-drempel'-sequentie ontstaan (Richards, 1982). Deze sequentie komt overeen met punten van convergentie en divergentie van de cellen met secundaire stro-

ming (figuur 2.10). In de Oosterschelde is uit metingen het voorkomen van meerdere circulatiecellen in een geul aangetoond (Louisse en Van den Berg, 1984). Een oorzaak van het ontstaan van meerdere cellen met secundaire stroming in een geul zijn dichtheidsverschillen veroorzaakt door verschillen in temperatuur, zoutgehalte of sedimentlast.

Dwarsverhangen zijn het gevolg van centrifugaalkrachten die werken in de richting van de buitenbocht. De centrifugaalkrachten worden weer opgewekt door het traagheidseffect in een bocht. De grootte van dit dwarsverhang is evenredig met het kwadraat van de langssnelheid en omgekeerd evenredig met de kromtestraal van de bocht (Van Bendegom, 1943 in: Allersma, 1994). Tevens is de richting van de centrifugaalkracht onafhankelijk van de richting van de stroming. De grootte van de secundaire stroming ten gevolge van centrifugaalkrachten (V_n^b) is volgens Booij en Kalkwijk (1983):

$$V_n^b = \frac{\overline{u_s}}{\kappa^2} \frac{h}{R} \cdot f_b\left(\frac{z}{h}, \alpha\right)$$

waarin:

- u_s = verticaal gemiddelde stroomsnelheid in de richting van de hoofdstroom (m/s)
- κ = Von Karman constante (0.4)
- h = waterdiepte (m)
- R = bochtstraal (m).
- f_b = complexe functie van de verticale coördinaat (z/h) en de wrijvingsparameter (α). In figuur 2.11 zijn enkele curven voor variërende waarden van de ruwheid (C) weergegeven ter bepaling van de frictie-coëfficiënt volgens De Vriend (1976, in: Booij en Kalkwijk, 1983).
- C = Chézy-coëfficiënt ($m^{1/3}/s$)

Allersma (1994) berekent de secundaire stroomsnelheid ten gevolge van centrifugaalkrachten als volgt (deze vereenvoudigde vergelijking is toegepast bij de analyse van de dwarsverhangen in hoofdstuk 4):

$$V_n^b = \beta \overline{V} \frac{h}{R}$$

waarin:

- β = waarde die volgens Rozofskii (1961 in: Allersma, 1994) varieert met de -dimensieloze- diepte zoals aangegeven in figuur 2.12.

De Coriolisversnelling is een gevolg van de rotatie van de aarde. Op het noordelijk halfrond wordt een versnelling opgewekt naar rechts die loodrecht staat op de hoofdstroomrichting. De grootte van het door de Coriolisversnelling opgewekte dwarsverhang is afhankelijk van de geografische breedte. Verder is ze evenredig met de waterdiepte en de snelheid van de hoofdstroom. De grootte van de door de Coriolisversnelling opgewekte secundaire stroming (V_n^o) is volgens Booij en Kalkwijk (1983):

$$V_n^o = -(\overline{u_s}) \cdot \frac{\Omega \cdot h}{\kappa^2} \cdot f_c\left(\frac{z}{h}, \alpha\right)$$

waarin:

$$\Omega = \pm 2\omega \sin\phi = \text{Coriolis-parameter} \approx 1.14 \cdot 10^{-4} \text{ rad/s.}$$

De richting van de Coriolisversnelling wisselt in een estuarium bij eb en vloed. Een gevolg van dit laatste is dat per getijfase de invloed van Coriolisversnelling op de centrifugaalkrachten wisselt: in een bocht kunnen ze elkaar versterken bij het ene getij en tegenwerken bij het andere (Allersma, 1994). Gezien de diepte in estuaria als de Westerschelde is de invloed ervan niet te verwaarlozen. De secundaire stromingen die door beide krachten worden opgewekt zijn sommeerbaar, omdat deze elkaar niet beïnvloeden (Booij en Kalkwijk, 1983), dus:

$$V_n = V_n^b + V_n^o$$

waarin:

$$V_n = \text{secundaire stroming; resultante van de secundaire stroming opgewekt door centrifugaalkrachten en Coriolisversnelling (m/s)}$$

De verhouding tussen de dwarsstroomsnelheden hierdoor opgewekt is als volgt te berekenen (Booij en Kalkwijk, 1983):

$$\left| \frac{V_n^o}{V_n^b} \right| = \left| \frac{\Omega \cdot R}{\overline{u_s}} \right| \cdot \left| \frac{f_c}{f_b} \right| = \frac{1}{2} \cdot \left| \frac{\Omega \cdot R}{\overline{u_s}} \right|$$

waarin:

$$V_n^b = \text{secundaire stroming door centrifugaalkrachten (m/s)}$$

v''_n = secundaire stroming door Coriolisversnelling (m/s)
R = bochtstraal (m)

Bij een bochtstraal van 3-8 km en stroomsnelheden van 0.5-1.0 m/s, dit zijn normale omstandigheden in de Westerschelde, zijn de dwarsnelheden opgewekt door de centrifugaalkrachten en de Coriolisversnelling van ongeveer gelijke grootte (Allersma, 1994). In de Westerschelde treden deze snelheden over een groot deel van een getijfase op. De snelheden veroorzaakt door centrifugaalkrachten en de Coriolisversnelling zijn dan ongeveer even groot. Ten tijde van maximum stroom is het aandeel van de centrifugaalkrachten in het genereren van de secundaire stromen echter relatief groot (Allersma, 1992).

De stroomsnelheden van de secundaire stroming aan de bodem hebben een grootte van enkele centimeters, d.w.z. 1 à 5 % van de hoofdstroom (Allersma, 1994)

De secundaire stroming in een rivierbocht is maximaal enigszins stroomafwaarts van de positie met maximaal dwarsverhang. Dit is een gevolg van vertragingseffecten. In een rivierbocht van enkele meters diep valt de locatie met de maximale dwarsstroom vrijwel samen met die van het maximale dwarsverhang, zoals bleek uit natuurmetingen door Bridge en Jarvis (1982). Door de veel grotere watermassa's in diepe geulen in estuaria als de Westerschelde zal door vertragingseffecten de maximale secundaire stroming stroomafwaarts van de plaats van het maximale dwarsverhang liggen. Booij en Kalkwijk (1986) hebben berekend dat de aanpassingslengte van secundaire stroming in bochten als volgt gekwantificeerd kan worden:

$$L = \frac{1-2\alpha}{2\alpha\kappa^2} \cdot h$$

waarin:

L = aanpassingslengte (m)
h = waterdiepte (m)
 α = frictie parameter: $g''/C \cdot \kappa$
C = Chézy-coëfficiënt ($m^{1/2}/s$)
 κ = Von Karman-constante (0.4)
g = gravitatie-versnelling (m/s^2).

Uit deze vergelijking blijkt dat de aanpassingslengte evenredig is met de waterdiepte. Voor de bodemweerstand geldt dat hoe groter de weerstand hoe korter de aanpassingslengte zal zijn. Voor een estuarium als de Westerschelde met een Chézy-factor van circa $C = 60 m^{1/2}/s$, geldt (Booij en Kalkwijk, 1986):

$$\frac{L}{h} = ca. 18$$

Bij een diepte van 20 m is de aanpassingslengte van de secundaire stroming bijna 400 m.

2.3.4 Onder- en oververzadiging

Een mogelijk belangrijk mechanisme voor aanzanding en erosie van verdiepte drempels is de onder- en oververzadiging van de langsstroming. Onder- en oververzadiging ontstaat doordat het momentane zandtransport met enige vertraging reageert op veranderingen in de stroomsnelheid en dus op veranderingen in de transportcapaciteit.

Het principe van onder- en oververzadiging wordt beschreven in de onderstaande tekst die ontleend is aan Storm (1995).

Het geulprofiel op een verdiepte drempel is te ruim voor de getijvolumina, die de drempel passeren, waardoor de stroom richting drempel divergeert en de snelheden afnemen. Na het passeren van de drempel convergeert de stroming en nemen de snelheden weer toe. Het gevolg hiervan is dat bij afnemende snelheid de waterkolom oververzadigd is met sediment (getransporteerde hoeveelheid sediment te groot voor de afnemende transportcapaciteit) en dus sedimentatie optreedt; bij toenemende snelheid is de waterkolom onderverzadigd (getransporteerde hoeveelheid sediment is te klein voor de toenemende transportcapaciteit) en dus erosie het geval. Gegeven de ruimtelijke consistentie van het te ruime profieldeel, en dus van de snelheidsveranderingen, leidt dit tot het ontstaan van gebieden met oververzadiging tijdens de ene getijfase en onderverzadiging tijdens de andere getijfase. Het gevolg hiervan is dat de -te ruime- drempel aanzandt en de geul aan weerszijden van de drempel erodeert: er treedt uitvlakking op van de verstoring. Het is daarmee een natuurlijk 'feedback'-mechanisme. Dit mechanisme werkt ook bij een volledig symmetrisch getij en is tot nu toe nog grotendeels theoretisch van aard.

Met behulp van figuur 2.13 zal dit transportmechanisme nader verklaard worden. De stroming van links naar rechts, hier als vloedstroming gedefinieerd, gaat van een geulprofiel in evenwicht naar een profiel dat te ruim is. Omdat het debiet constant is neemt de snelheid in vloedrichting af. Hierdoor neemt ook de transportcapaciteit in deze richting af. Omdat het momentane zandtransport met enige vertraging reageert op veranderingen in de stroomsnelheid vindt sedimentatie plaats op de overgang naar het te ruime geulprofiel. Tijdens eb neemt op dezelfde overgang de stroomsnelheid evenals de transportcapaciteit toe. Door de vertraging waarmee het transport reageert op de verandering in transportcapaciteit is de verticaal onderverzadigd en vindt op de overgang erosie plaats. Dit patroon -sedimentatie in het te ruime geulprofiel en erosie

van de geul in evenwicht- leidt tot uitvlakking van de verstoring.

Uit berekeningen blijkt dat een geulverruiming van 10 à 20 % een residueel zandtransport door over- en onderverzadiging opwekt dat tussen de 5 en 30 % ligt van het totale transport in de geulsectie. Dit residuele transport varieert overigens met de aanpassingslengte en de afstand van de geul in evenwicht tot de verstoring.

2.3.5 Getijgedreven residuele stroming

Getijgedreven residuele stroming (GRS) zijn circulatiepatronen in het horizontale vlak die ontstaan ten gevolge van de interactie tussen het horizontale getij en de geometrie (Storm, 1995). Het betreft hier horizontale circulatiepatronen zoals door eb- en vloedscharen, eb- en vloedgedomineerde geuldelen, horizontale neren in de luwte van obstakels en reststromingen rondom obstakels of intergetijdegebieden. Deze horizontale circulatiepatronen zijn, hoewel een factor 10 à 100 kleiner dan de maximale stroomsnelheden, door hun ruimtelijke consistentie van groot belang voor het residuele zandtransport in een dwarssectie.

Van Veen (1950) beschrijft een zandneer rondom een plaat: netto stroomopwaartse verplaatsing van zand in de vloodschaar en stroomafwaarts in de ebschaar (figuur 2.14). In figuur 2.15 en 2.16 is dit ook goed te zien. In deze figuren zijn voor de gehele Westerschelde de Euleriaanse reststromen weergegeven die berekend zijn met het numerieke waterbewegingsmodel DETWES. DETWES is een tweedimensionaal, verticaal geïntegreerd model met een maaswijdte van 100 m (Van der Male, 1993). Goed zichtbaar zijn de horizontale circulatiepatronen rondom de drempels. Tevens valt te zien hoe ter hoogte van de drempels de eb- en vloedtransporten binnen de geul duidelijk van elkaar gescheiden zijn.

2.4 Conclusie

Net als in rivieren bestaan de drempels in estuaria uit de relatief brede en ondiepe delen van een geul. Daarnaast is het bimodale geulprofiel ook kenmerkend voor veel drempels in een estuarium: er zijn binnen een geul duidelijk eb- en vloedgedomineerde geulsecties te onderscheiden.

Uit de literatuur blijkt dat vooral bochtwerking in combinatie met bidirectionele stroming belangrijk elementen zijn voor het gedrag van drempels. Hieronder worden een drietal factoren die van belang zijn voor het ontstaan en het gedrag van drempels in estuaria opgesomd.

Drempels in estuaria als de Westerschelde komen net als in rivierdrempels vaak voor op de overgang tussen twee bochten, die meestal bestaat uit een rechte geul. Op deze plaats steekt in rivieren de talweg van de ene oever over naar de andere en gaat het driehoekige geulprofiel uit een bocht over naar een rechthoekig geulprofiel. Deze overgang van geulprofiel is het gevolg van het

dempen van de secundaire stroming na een bocht. Mogelijk is deze factor ook van belang in estuaria.

De scheiding van de eb- en vloedstroming op een drempel in verschillende delen van de geul is een tweede factor die het relatief brede en ondiepe karakter van drempels verklaart. De scheiding van eb- en vloedstroom op een drempel, het ontwijkende gedrag van de eb- en vloedgedomineerde geuldelen, wordt veroorzaakt door de bochtwerking, het uitbochten, van twee tegengestelde geulbochten. In bochten veroorzaken centrifugaalkrachten en Coriolisversnelling een dwarsverhang. Daardoor wordt een secundaire stroming opgewekt, die samen met de langsstroming de uitbochting veroorzaakt.

De derde factor die van belang is voor het gedrag van een drempel is de divergentie van de stroming op een drempel. Divergentie van de stroming wordt veroorzaakt door de aftapping door nevengeulen van water voordat het de drempel overstroomt en door het brede en ondiepe karakter van de drempelgeul. Door aftapping neemt het maximale getijvolume dat over een drempel stroomt af. Gezien de empirische relatie die bestaat tussen maximaal getijvolume en geuldoorsnede leidt de aftapping tot een afname van de geuldoorsnede en dus tot een geringere evenwichtsdiepte van de drempel. Divergentie van de stroming door het brede en ondiepe karakter van de drempelgeul kan in het geval van een niet verruimde, in evenwicht zijnde, drempel een versnelling van de stroom tot gevolg hebben. Divergentie van de stroming in het geval van een verdiepte drempel leidt tot het ontstaan van een snelheidsgradiënt over een drempel: eerst vertragende stroom en vervolgens versnellende stroom. Hierdoor ontstaat boven een drempel een ruimtelijke consistent patroon van over- en onderverzadiging van de waterkolom, die leidt tot aanzanding van een verdiepte drempel. Belangrijke mechanismen die de aanzanding van drempels volgens de literatuur veroorzaken zijn secundaire stroming, de getijgedreven residuele stroming en op verdiepte drempels de onder- en oververzadiging ten gevolge van versnellen- de en vertragende stroom te zijn.

3 Morfologische ontwikkeling van drempels in de Westerschelde in de periode 1931 - 1994

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de ontwikkeling van vijf drempels in de Westerschelde in de periode 1931 - 1994 beschreven. De nadruk daarbij komt te liggen op de belangrijkste factoren die het gedrag van de drempel bepalen zoals invloed van nabij gelegen eb- en vloedscharen. De morfologische ontwikkeling is beschreven aan de hand van veertien dieptekaarten uit de periode 1931 - 1994. Met name de dieptekaarten van 1931 en 1955 geven een goede indruk van de vorm van de drempels in een vrijwel ongestoorde situatie. De drempels van Bath, Valkenisse, Hansweert, Baarland en Borssele komen hierbij aan de orde.

Tevens wordt een overzicht gegeven van de hoeveelheden die op een drempel worden gebaggerd en van de gestorte hoeveelheden op de nabijgelegen stortlokaties. De bagger- en stortcijfers zijn afkomstig uit Van den Berg et al. (1994), Van Dam en Quartel (1992) en Blik en Ruijter (1994). Er wordt getracht deze gegevens, evenals andere menselijke ingrepen, in verband te brengen met de ontwikkeling van het drempelgebied.

De in de tekst genoemde drempeldiepten betreffen 'minste diepte middenvaarwaters' (M.D.M.V.) zoals gegeven in Van Dam en Quartel (1992) en welke zijn omgerekend van waarden ten opzichte van GLLWS naar waarden ten opzichte van NAP. Alvorens over te gaan tot de beschrijving van de morfologische ontwikkeling per drempel worden eerst drie hoofdtypen, zoals deze in de Westerschelde voorkomen, gedefinieerd.

3.2 Drempeltypen

In de Westerschelde zijn in de hoofdvaargeul drie hoofdtypen drempels te onderscheiden: het 'ontwijkende geulen'-type, het 'botsende geulen'-type en het 'parallele-geulen'-type (figuur 3.1). Het 'botsende geulen'-type-drempel is onderverdeeld in een 'botsende ebgeul'-type en een 'botsende vloedgeul'-type. Deze hoofdtypen zijn de uiterste verschijningsvormen waarbinnen de drempels in de Westerschelde voorkomen, met dien verstande dat de overgang tussen het 'ontwijkende geulen'-type en het 'parallele type'-type en vice versa niet is waargenomen.

Drempels van het 'ontwijkende geulen'-type komen voor op de overgang tussen twee tegengestelde bochten, daar waar de geulen niet op elkaar aansluiten. De oorzaak dat de geulen niet op elkaar aansluiten ligt in het feit dat één bocht eb- en de andere vloedgedomineerd is. Hierdoor werkt de bochtwerking in beide bochten in tegenovergestelde richting.

Aan de stroomafwaartse kant van de drempel bevindt zich een vloedschaar, die

verantwoordelijk is voor aftapping van het vloedwater. Aan de stroomopwaartse zijde van de drempel is een ebschaar aanwezig die, meestal door kortsluiting met een stroomafwaarts gelegen vloodschaar, verantwoordelijk is voor aftapping van ebwater vóór de drempel.

Ter hoogte van de drempel is de geul breed en is het dwarsprofiel bimodaal: d.w.z. er is in het dwarsprofiel een eb- en vloedgedomineerde deel aanwezig. Door Van Veen (1950) wordt dit type drempel ook genoemd: drempel ten gevolge van het elkaar vermijden van een eb- en vloodschaar met flankaanval.

Drempels van het 'botsende geulen'-type komen voor waar geulen, of scharen, onder een duidelijke hoek op elkaar invallen (figuur 3.1). Er zijn twee subtypen: het 'botsende ebgeul'-type en het 'botsende vloedgeul'-type. Deze hoofdtypen worden gevormd aan het eind van een eb- respectievelijk vloedgedomineerde geul waar deze overgaan in een volgend geuldeel. Deze overgang is scherp: de geul met de drempel is veel ondieper en smaller dan de geul waar deze op uit komt.

Evenals bij het 'ontwijkende geulen'-type bevindt zich stroomafwaarts van de drempel een vloodschaar die het vloedwater aftapt. Stroomopwaarts van de drempel is een ebschaar aanwezig die ebwater voor de drempel aftapt.

Het 'botsende vloedgeul'-type drempel komt in de Westerschelde, in tegenstelling tot het 'botsende ebgeul'-type-drempel, in het hoofdvaarwater niet voor.

De drempels van het 'parallele geulen'-type komen voor op plekken waar twee hoofdgeulen parallel aan elkaar lopen en de wateruitwisseling tussen beide hoofdgeulen gering is. Dit houdt impliciet in dat dit type drempel alleen voor kan komen op plaatsen waar het debiet is verdeeld in twee of meer hoofdgeulen. In de Westerschelde komen ten westen van Hansweert twee of meer hoofdgeulen voor.

De eigenlijke drempel bevindt zich aan het eind van de ebgedomineerde geul. De mate waarin de ebkortsluit geul, die ter hoogte van de drempel ligt, water aftapt, is van belang voor de hoeveelheid water die over de drempel stroomt en daarmee de drempeldiepte.

De drempels in de Westerschelde kunnen alle getypeerd worden binnen de 'range' van de bovengenoemde uiterste verschijningsvormen. De ene vorm kan in de andere overgaan. De overgang van een drempel van een 'botsende ebgeul'-type naar een 'ontwijkende geulen'-type en vice versa evenals de overgang van een 'botsende ebgeul'-type naar een 'parallele geulen'-type en vice versa treedt in de Westerschelde in de loop der tijd op. De eerste overgang, die van het 'botsende ebgeul'-type naar het 'ontwijkende geulen'-type drempel, vindt op de oostelijke drie drempels plaats. De tweede overgang, van het 'botsende ebgeul'-drempel naar 'parallele geulen'-type, vindt op de westelijke twee drempels plaats. De overgang tussen het 'ontwijkende geulen'-type naar het 'parallele geulen'-type of vice versa is in de Westerschelde niet waargenomen.

Het lijkt erop dat het 'ontwijkende geulen'-type drempel op termijn door natuurlijke processen overgaat in een 'botsende geulen'-type: door voortgaande uitbochtting komen de geulen min of meer haaks op elkaar te staan. Deze ontwikkeling kan ook in tegenovergestelde richting optreden: van 'botsende ebgeul'-naar 'ontwijkende geulen'-drempel. Deze laatste ontwikkeling is in de gegevens van de afgelopen 25 jaar in het oosten van de Westerschelde veelvuldig waar te nemen en is hoogst waarschijnlijk het gevolg van de bagger- en stortstrategie waardoor grotere watervolumes door de hoofdgeulen worden gedwongen.

De interne dominantie, het verschil in eb- en vloeddebiet binnen een geul (Van Kleef, 1994), van 'botsende ebgeul'-drempel is klein; de externe dominantie, het verschil tussen het eb- en vloeddebiet per geul, van dit type drempel is groot (figuur 3.2). Van een 'ontwijkende geulen'-type drempel is de interne dominantie groot en de externe dominantie klein. De ontwikkelingen binnen de 'range' van een 'botsende geulen'- naar een 'ontwijkende geulen'-type drempel en vice versa komen dus overeen met veranderingen in de interne en de externe dominantie, die een natuurlijke oorzaak kunnen hebben of door menselijke ingrepen worden bewerkstelligd.

De ontwikkeling van de Drempel van Hansweert is een goed voorbeeld van het continuüm tussen deze typen drempels. In 1931 is deze drempel van het 'botsende geulen'-type; in 1994 van het 'ontwijkende geulen'-type (figuur 3.3). De oorzaak van deze verschuiving ligt hoogstwaarschijnlijk de toename van de watermassa's door de hoofdgeul ten gevolge van het baggeren waardoor de aftappende functie van de vloodschaar (Schaar van Waarde) is verminderd. Op de overgang tussen twee tegengestelde bochten gaan de eb- en vloedgedomineerde geulen elkaar ontwijken.

Het 'botsende ebgeul'-type drempel kan in het deel van het estuarium met twee hoofdgeulen overgaan in het 'parallele geulen'-type en vice versa. De oorzaak van deze overgang ligt in grootschalige morfologische ontwikkelingen waardoor de debietverdeling tussen de hoofdgeulen verandert. De overgang van 'botsende ebgeul'-type drempel naar een 'parallele geulen'-type drempel gaat gepaard met een verkleining van de externe dominantie en waarschijnlijk ook van de interne dominantie.

De ontwikkeling tussen 1931 en 1994 van de Drempel van Borsssele is hiervan een goed voorbeeld. In 1931 was deze drempel een 'botsende ebgeul'-type en in 1994 een 'parallele geulen'-type (figuur 3.4). In deze periode is de omvang van de Schaar van de Spijkerplaat sterk toegenomen waardoor deze steeds meer ebdebiet uit de Pas van Terneuzen aftapt. Hierdoor raakt het Schaar van de Spijkerplaat/Pas van Terneuzen- en het Honte/Everingen-systeem steeds meer van elkaar gescheiden.

3.3 Beschrijving per drempel

Van elke drempel is in bijlage A de bodemligging van 1931, 1955, 1967/8,

1977/8, 1986 en 1994 te vinden zodat een globaal beeld gekregen kan worden van de morfologische ontwikkeling van de verschillende drempels sinds 1931. Overigens is de beschrijving hieronder gebaseerd op meerdere jaren in de periode 1931 - 1994 met gegevens van de bodemligging. De klasse-indeling van de verschillende dieptezones is aangepast aan de diepten -tussen NAP -10 en -20 m- waarop drempels voorkomen, zodat een goed beeld verkregen wordt van de morfologie van de drempels.

Ter verduidelijking van de beschrijving van de morfologische ontwikkeling zijn in figuur 3.5 de namen van de belangrijkste geulen en platen die in de beschrijving van de morfologische ontwikkeling (en in het volgende hoofdstuk ook van de waterbeweging) ter sprake komen aangeduid. De lokaties van de bagger- en stortgebieden zijn in de kaartjes van de figuren 3.6 en 3.7 samengevat.

Drempel van Bath

Algemeen

De Drempel van Bath ligt in het oosten van de Westerschelde aan het einde van het ebgedomineerde Vaarwater boven Bath, stroomopwaarts van de plek waar deze over gaat in het Nauw van Bath. De bochten van het Nauw van Bath en het Vaarwater boven Bath sluiten niet goed op elkaar aan. De drempel bevindt zich in de doorgaande ebgedomineerde geul waar stroomopwaarts de vloedgedomineerde Schaar van de Noord uitmondt en stroomafwaarts de vloedgedomineerde Appelzak aftakt.

Op de Drempel van Bath wordt sinds 1920 fors gebaggerd. Voor 1950 is dat gemiddeld ruim 1 miljoen m³/j; na 1950 wordt gemiddeld 2 miljoen m³/j gebaggerd (figuur 3.8). De baggerwerkzaamheden vonden vooral plaats in de bocht op de overgang van het Nauw van Bath naar het Vaarwater boven Bath; sinds enkele jaren breiden de baggerwerkzaamheden zich uit naar zuidelijker delen van de drempel. Nabijgelegen stortlokaties bevinden zich in het Schaar van de Noord (1 miljoen m³/j in de periode 1950 - 1980; sindsdien gemiddeld 0.3 miljoen m³/j) en de Appelzak (aflopend van 0.5 tot 0.3 miljoen m³/j in 1985; daarna is de Appelzak niet meer als stortlokatie in gebruik). Het overige gebaggerde materiaal, op dit moment circa 4 miljoen m³/j, wordt tegen de zuidelijke oever van het Zuidergat/Overloop van Valkenisse tussen Baalhoek en Konijnenschor gestort.

Korte beschrijving van de morfologische ontwikkeling (Bijlage A.1)

De Drempel van Bath is in 1931 van het 'botsende ebgeul'-type. Vanaf het begin

van de jaren '70 krijgt de drempel meer het karakter van een 'ontwijkende geulen'-type, zij het dat de vorm in hoofdzaak een 'botsend' karakter blijft behouden.

De drempel ontwikkelt zich in de loop van de periode 1931 - 1994 van nauw en ondiep tot relatief breed en diep. De breedte op NAP 0 m neemt toe van 200 m tot 400 m; de diepte loopt op van gemiddeld NAP -10.5 m in 1950 tot een constante diepte van NAP -14.6 m vanaf 1980 (figuur 3.8). Ook de aanpalende geulen worden aanzienlijk ruimer: de bodem van het gehele lodingsvak 1, waar de Drempel van Bath in ligt, is in de periode 1955 - 1994 met gemiddeld circa 2 m verlaagd (figuur 3.9; Uit den Bogaard, 1995). Met name na 1970 is er een sterke verruiming van het drempelprofiel opgetreden. Sindsdien staat het Nauw van Bath minder haaks op het Vaarwater boven Bath en sluiten beide geulsystemen vloeiender op elkaar aan.

De Schaar van de Noord migreert van zuid naar noord over de Plaat van Saeftinghe. De uitloop van deze schaar ligt derhalve tussen het zuidelijk en het noordelijke deel van de drempel. Tussen het eind van de jaren '70 en begin jaren '90 is deze schaar in belang afgenomen. In 1994 is er weer sprake van een nieuwe kortsluiting van de Schaar van de Noord, net ten Noorden van de radartoren voor het Verdrongen land van Saeftinghe. De Appelzak neemt in de loop van de tijd in omvang eerst af, vervolgens weer toe en uiteindelijk weer af: sinds het begin van de jaren '70 is een duidelijke verondieping van deze vloedschaar zichtbaar.

Factoren bepalend voor de morfologische ontwikkeling

Primair lijkt de overgang van een 'botsende ebgeul'-drempel naar een tussen-vorm tussen het 'botsende ebgeul'- en het 'ontwijkende geulen'-drempel veroorzaakt te zijn door het baggeren (figuur 3.8). Dit geldt ook voor de verdieping en verbreding van het drempelgebied. Hierdoor wordt meer water gedwongen door de hoofdgeul te stromen. Ook de stortstrategie werkt dit in de hand. Door stortingen in de Schaar van de Noord en de Appelzak werd meer water gedwongen via de hoofdgeul en over de drempel te stromen.

De 'natuurlijke' ontwikkeling van met name de Schaar van de Noord, maar ook van de Appelzak, is van belang voor het gedrag van de Drempel van Bath, omdat deze voor een deel bepaalt hoeveel water er over de drempel gaat. De geuldoorsnede van de Schaar van de Noord blijkt omgekeerd evenredig met de geuldoorsnede van het Nauw van Bath (De Looff, 1982).

De monding van de Schaar van de Noord, een vloedschaar, wordt door de ebstroom naar het noorden gedrukt, waar deze op den duur afsterft. Ondertussen is in het zuiden van het gebied van de Plaat van Saeftinghe een nieuwe vloedschaar, een nieuwe Schaar van de Noord, ontstaan die zich vervolgens ook weer in noordelijke richting verplaatst. Het doorstroomvermogen en de ligging van de Schaar van de Noord zijn van sterke invloed op de hoeveelheid water die over de Drempel van Bath stroomt. In het geval van een ten opzichte van de drempel

zuidelijke ligging van de schaar tapt deze schaar veel ebwater af, dat niet over de drempel gaat. Ook bereikt dan relatief veel vloedwater het Vaarwater boven Bath via de Schaar van de Noord zonder dat dit over de drempel stroomt. Dit heeft een relatief ondiepe drempel tot gevolg. Een ten opzichte van de drempel noordelijke ligging van de Schaar van de Noord heeft juist een gunstige invloed op de drempeldiepte. Voor de verdieping van de jaren '70 was het ontstaan, verplaatsen en afsterven van het Schaar van de Noord een cyclisch proces met een periode van 6 à 7 jaar. Na de verdieping is de invloed van de Schaar van de Noord afgenomen door afname van het getijvolume door de schaar en door stortingen. Dit had als gevolg dat de Schaar van de Noord min of meer is gestabiliseerd. Het hele gebied van de Plaat van Saeftinge, waar het Schaar van de Noord in ligt, is verlaagd in de loop der tijd.

De Appelzak is vloedgedomineerd: een deel van het water dat tijdens vloed door het Nauw van Bath komt 'haalt' de scherpe bocht naar het Vaarwater niet en schiet rechtdoor de Appelzak in. Door stortingen in de loop der tijd en de aanleg van 1968 tot en met 1971 van de leidam op het zuidelijke deel van de Ballastplaat, waardoor minder ebwater door de schaar stroomt, is de Appelzak gedeeltelijk opgevuld. De leidam is aan het rivierwaartse einde gelegen op NAP -2.40 m en loopt geleidelijk op tot NAP 1.65 m nabij de vaste oever (De Looff en Van Malde, 1976). Hierdoor wordt meer eb- en vloedwater gedwongen over de Drempel van Bath te stromen.

De uitbocht van het Nauw van Bath wordt belemmerd door het vaste punt Bath, waardoor een goede aansluiting op het Vaarwater bevorderd wordt: verdere uitbocht zou als gevolg hebben dat beide geulen, het Nauw van Bath en het Vaarwater boven Bath, in een nog grotere hoek op elkaar komen te staan. Echter, door de aanleg van geulrandverdediging zal dit worden voorkomen.

Samenvatting

De Drempel van Bath ontwikkeld zich tussen 1931 en 1994 van een 'botsende eb-geul'-type naar een meer 'ontwijkende geulen'-type. Deze ontwikkeling van de Drempel van Bath wordt primair bepaald door bagger- en stortwerkzaamheden en de veranderingen in het getijvolume over de drempel. Daarnaast spelen er 'natuurlijke' factoren, zoals het doorstroomoppervlak en de oriëntatie/ligging ten opzichte van de drempel van de vloed- en ebscharen, die de diepte van Drempel van Bath op de korte termijn beïnvloeden. Baggeren en storten hebben zeer waarschijnlijk de invloed van deze scharen voor een groot deel verlamd.

Drempel van Valkenisse

Algemeen

De Drempel van Valkenisse is gelegen op de overgang tussen de twee tegengestelde bochten, in geulen die niet goed op elkaar aansluiten: het Zuidergat en het Nauw van Bath. Ter hoogte van deze overgang monden de (vloed-) scharen Schaar van Valkenisse en de Zimmermangeul uit in respectievelijk de Overloop van Valkenisse en het Nauw van Bath. Ter hoogte van deze overgang takt ook de vloedgedomineerde Schaar van de Noord af van de hoofdgeul. Er is hier sprake van een overgang van vloedgedomineerde geulen (Schaar van Valkenisse/Zimmermangeul en Schaar van de Noord) en van ebgedomineerde geulen (Overloop van Valkenisse en Nauw van Bath).

Op de drempel werd voor 1950 sporadisch gebaggerd. In de periode 1950 - 1970 werd gemiddeld ca. 1 miljoen m³/j gebaggerd. Na de laatste verdieping, die begin jaren '70 een aanvang nam, nam dit aanvankelijk toe tot 4 miljoen m³/j in 1979 om vervolgens weer af te nemen tot 1.5 miljoen m³/j in 1993 (figuur 3.8). De omvang van het baggergebied is in de loop van de tijd in grootte toegenomen.

Stortingen vinden plaats langs de zuidoever van het Zuidergat tussen het Kojnenschor en de Marlemonsche Plaat (voor 1975 1 miljoen m³/j; daarna 4 miljoen m³/j); in de Schaar van Waarde gemiddeld 1 miljoen m³/j en in de Schaar van de Noord (1 miljoen m³/j tussen 1950 en 1980; sindsdien 0.3 miljoen m³/j).

Korte beschrijving van de morfologische ontwikkeling (Bijlage A.1)

In 1931 is de Drempel van Valkenisse van het 'botsende ebgeul'-type, zij het dat de mate van het botsende karakter niet zeer hoog is. Vervolgens krijgt de drempel in de loop van de tijd een meer ontwijkende vorm. Na 1982 is er sprake van een 'ontwijkende geulen'-type drempel.

In 1931 is goed te zien dat de drempel uit twee delen bestaat: een deel aan het eind van het Nauw van Bath waar deze uitkomt op de Overloop van Valkenisse -dat als de feitelijke drempel wordt beschouwd- en een deel ten westen daarvan op de plaats waar de Schaar van Valkenisse in de Overloop van Valkenisse uitmondt. Vanaf 1973 is dit laatstgenoemde deel van het drempelgebied moeilijker te herkennen. Daar waar het Nauw van Bath aansluit op de Overloop van Valkenisse, schiet de Overloop van Valkenisse als het ware rechtdoor de Schaar van de Noord in. Tot 1973 was dit duidelijk te zien; daarna neemt de Schaar van de Noord in betekenis af.

Vanaf het eind van de jaren '70 sluit de Overloop van Valkenisse beter aan bij het Nauw van Bath, zij het dat ze door een smalle rug gescheiden blijven. De diepte en de breedte van het drempelprofiel neemt, evenals de die van Overloop

van Valkenisse en het Nauw van Bath, toe. In de ontwikkeling van de diepte en ook breedte van de drempel is duidelijk rond 1970 een trendbreuk te zien. Tussen 1950 en 1970 is de diepte gemiddeld NAP -10.5 m; daarna is de diepte toegenomen tot een constante waarde van NAP -14.6 m (figuur 3.8).

In de loop van de hele periode 1931 - 1994 bocht het Nauw van Bath met ongeveer 150 m in noordelijke richting uit. De Overloop van Valkenisse/Zuidergat doet dat in zuidelijke richting met ruim 500 m. Beide bochten worden duidelijker scherper vanaf de jaren '70.

In de loop van de tijd is de positie van de monding van de (vloedgedomineerde) Zimmermangeul op een min of meer vaste plaats gebleven: deze lag 'vast' tegen de oever. De (eveneens vloedgedomineerde) Schaar van Valkenisse heeft zijn monding vaak verlegd: aanvankelijk, tussen 1931 en 1967, verplaatst de geul zich oostwaarts, vervolgens mondde de schaar van Valkenisse uit in de Zimmermangeul ter hoogte van de Drempel van Valkenisse (1967-1977), waarna de monding van de schaar zich westwaarts verplaatste. Deze migratie zet zich ook nu nog door, zij het langzamer dan enkele jaren geleden. Momenteel bevindt deze schaar delta zich 1.5 km ten westen van de drempel.

Factoren bepalend voor de morfologische ontwikkeling

Baggerwerkzaamheden en daardoor de vergroting van het getijvolume lijken de ontwikkeling van de drempel te domineren (figuur 3.8) en verklaren de overgang van de drempel in de loop van de periode 1931 - 1982 naar een 'ontwikkende geulen'-drempel.

De vergroting van het getijvolume door het Zuidergat/Overloop van Valkenisse gaat ten koste van het getijvolume door het Valkenissegebied: de verdeling van het (naar gemiddeld jaartij herleidde) vloedvolume door het Zuidergat en de Schaar van Waarde is respectievelijk 31 % en 69 % in 1957 en respectievelijk 45 % en 55 % in 1988 (gebaseerd op gegevens uit De Jong, 1989). De verandering in de verhouding tussen de getijvolumes heeft waarschijnlijk een grote invloed gehad op de Drempel van Valkenisse. Naast een toename van de getijvolumes over de drempel had deze verandering in de verdeling van de getijvolumes waarschijnlijk als gevolg dat de zijdelingse invloed van de Schaar van Valkenisse en de Zimmermangeul, die ter hoogte van de drempel in de Overloop van Valkenisse uitmondde, verminderd is.

De ligging van de Schaar van Valkenisse en de Zimmermangeul is bepalend voor de hoeveelheid water die over de drempel gaat en is daarmee van invloed op de drempeldiepte. Toen de Schaar van Valkenisse nog via de Zimmermangeul in de Overloop van Valkenisse uitmondde was dit waarschijnlijk ongunstig voor het watervolume tijdens eb en vloed dat over de drempel moest stromen. Ook de ligging en het doorstroomvermogen van de Schaar van de Noord heeft de hoeveelheid water die over de Drempel van Valkenisse moest stromen beïnvloed. Bij een noordelijke ligging werd meer water over de drempel gestuurd dan bij een zuidelijke. Waarschijnlijk heeft de oriëntatie van de Schaar van de Noord ook

invloed gehad op de mate van aansluiting tussen de Overloop van Valkenisse en het Nauw van Bath; hoe noordelijker de ligging van de schaar, hoe dichter de schaar bij het Nauw van Bath lag en hoe gunstiger de aansluiting tussen beide met als gevolg een diepere evenwichtsligging van de drempel (zie ook Drempel van Bath).

Samenvatting

De Drempel van Valkenisse ontwikkelt zich van een 'botsende ebgeul'-type naar een 'ontwijkende geulen'-type. De ontwikkeling van de Drempel van Valkenisse lijkt is eerste instantie bepaald door de bagger- en stortstrategie en de daardoor opgewekte vergroting van het getijvolume, waardoor de elkaar ontwijkende geulen van het Nauw van Bath en de Overloop van Valkenisse beter op elkaar gaan aansluiten. Daarnaast is de ontwikkeling van de positie en doorstroomvermogen van de Schaar van Valkenisse, en voorheen ook van de Schaar van de Noord, van invloed op de drempelgeometrie.

Drempel van Hansweert

Algemeen

De Drempel van Hansweert ligt ten oosten van de Plaat van Ossenissee stroomopwaarts van de kruising van de vloedgedomineerde Overloop van Hansweert en de Schaar van Waarde met het ebgedomineerde Middelgat en Zuidergat. De geometrie van de Drempel van Hansweert wordt ook beïnvloed door de Schaar van Ossenissee, die ebgedomineerd is.

Op de drempel is tussen 1930 en 1969 gemiddeld ongeveer 0.75 miljoen m³/j gebaggerd; daarna nam dit fors toe tot een gemiddelde van ca. 3.75 miljoen m³/j in de periode 1970 - 1993 (figuur 3.8). De baggerwerkzaamheden waren aanvankelijk in de periode 1950 - 1971 geconcentreerd aan de uiteinden van de langwerpige drempel. Sinds 1972 wordt er in het gehele drempelgebied gebaggerd; na 1986 heeft er nog een uitbreiding naar het noordwesten van het baggergebied plaatsgevonden. Andere baggerwerkzaamheden en stortingen in de omgeving:

- Overloop van Hansweert: sinds 1975 gemiddeld 0.3 miljoen m³/j gebaggerd;
- Rand Plaat van Walsoorden: sinds 1932 al baggerwerkzaamheden; na 1955 gemiddeld 0.6 miljoen m³/j gebaggerd;
- Schaar van Waarde: in de periode 1971-1975 stortingen tot maximaal 3 miljoen m³/j; daarna (tot 1992) gemiddeld 1 miljoen m³/j gestort;
- Plaat van Ossenissee (ostrand): gemiddeld 0.5 miljoen m³/j sinds 1979 gestort.

Korte beschrijving van de morfologische ontwikkeling (Bijlage A.2)

De Drempel van Hansweert wordt door twee grootschalige ontwikkelingen in zijn omgeving beïnvloed:

1. de verandering in eb- en vloedvolumina tussen het Middelgat en het Gat van Ossenissee/Overloop van Hansweert sinds de jaren dertig van deze eeuw. De verdeling van het totale (naar gemiddeld jaargetij herleid) vloedvolume tussen het Gat van Ossenissee en het Middelgat is in 1932 respectievelijk 45 % en 55 % en in 1989 respectievelijk 60 % en 40 % (naar gegevens uit De Jong, 1989).
2. de afname van het getijvolume door de Schaar van Waarde ten gunste van het Zuidergat in de laatste 30 jaar

De vorm van de Drempel van Hansweert laat tussen 1931 en 1994 een duidelijke metamorfose zien van een 'botsende ebgeul'-type-drempel in 1931, tot een tussenvorm in 1973 en een 'ontwijkende geulen'-type-drempel in 1994.

De Drempel van Hansweert is in de loop de tijd dieper en breder geworden. De diepte liep op van NAP -10.5 m in de periode 1950 - 1970 tot een constante waarde van NAP -14.3 m (figuur 3.8). Dit is het gevolg van de baggerwerkzaamheden na 1970. Daarnaast is de oriëntatie van de drempel meer noord-zuid geworden: in de loop van de periode 1931 - 1994 is deze ongeveer 15 graden met de klok mee gedraaid. Tevens is de drempel, evenals de oostelijke rand van de Plaat van Ossenissee met ongeveer 750 m in oostelijke richting verplaatst.

In 1931 bestond de drempel uit een langwerpige smalle, ondiepte -ongeveer NAP -10.5 m- aan het benedenstroomse eind van het Zuidergat, tussen het Oude hoofd van Walsoorden en de monding in de Schaar van Waarde. Deze vorm bleef bestaan tot het eind van de jaren '60. Er traden wel kleine veranderingen op in de positie en oriëntatie van de drempel: de drempel is enkele honderden meters oostwaarts verplaatst en heeft een meer noord-zuid oriëntatie gekregen. Ondertussen is de Overloop van Hansweert meer water gaan voeren ten koste van het Middelgat (Van Kleef, 1994). Hierdoor heeft in de Put van Hansweert sterke uitbochtting, van ongeveer 450 m van de NAP -10 m dieptelijn ten oosten van Hansweert, plaatsgevonden, vrijwel tot aan de dijk. De Plaat van Ossenissee is hoger en groter geworden.

Na 1970 neemt de Drempel van Hansweert in breedte en diepte toe; de Schaar van Waarde daarentegen verondiept. De langwerpige NW-ZO lopende rug die tot dan toe de scheiding heeft gevormd tussen het Zuidergat en de Schaar van Waarde erodeert langzaam maar zeker; de scheiding wordt diffuser. Eind jaren '70 zijn er in het drempelgebied duidelijk twee elkaar 'ontwijkende' geulen te zien, die door een NW-ZO lopende ondiepte gescheiden worden.

In de jaren '80 en '90 blijft de Schaar van Waarde zich verondiepen en wordt de geul in het drempelgebied dieper. De NW-ZO lopende geulsectie in het drempelgebied heeft aan beide uiteinden een drempel: in het zuiden op de overgang met het Zuidergat en één in het noorden op de overgang met de Put van Hansweert. De noordelijke drempel raakt vooral in de jaren '90 goed ontwikkeld: de

baggerwerkzaamheden breiden zich dan ook uit naar dit gebied.

Factoren bepalend voor de morfologische ontwikkeling

De diepte van de drempel wordt vooral bepaald door bagger- en stortwerkzaamheden. Deze werkzaamheden hebben weer invloed op de volgende factoren:

- de verhouding tussen de getijvolumes door de Schaar van Waarde en het Zuidergat. Deze veranderingen zijn waarschijnlijk vooral het gevolg van de bagger- en stortstrategie, immers: op de drempel werd gebaggerd en de Schaar van Waarde verondiepte door stortingen, waardoor als het ware meer getijvolume door het Zuidergat moest. Dit verklaart waarschijnlijk ook de overgang van een 'botsende ebgeul'-type-drempel in 1931 naar een 'ontwijkende geulen'-type-drempel in 1994.
- het doorstroomvermogen van de Schaar van Ossensisse; dit bepaalt de mate van onttrekking van de watervolumes van zowel eb als vloed aan de drempel. In de loop van de tijd lijkt dit vermogen afgenomen te zijn.

De rolverwisseling tussen het Middelgat en de Overloop van Hansweert lijkt niet direct bepalend te zijn voor de geometrie van de Drempel van Hansweert; door deze rolverwisseling zou eerder een toename van het getijvolume door het Schaar van Waarde te verwachten zijn, omdat dit een minder scherpe bocht, dus minder weerstand, zou op leveren dan de bocht van de Overloop van Hansweert, via de Put van Hansweert naar het Zuidergat.

Samenvatting

De Drempel van Hansweert gaat tussen 1931 en 1994 over van een 'botsende ebgeul'-type naar een 'ontwijkende geulen'-type. Vooral sinds het begin van de jaren '70 is deze ontwikkeling manifest. Het intensieve baggeren op de Drempel van Hansweert en daardoor de vergroting van het getijvolume over de drempel domineert waarschijnlijk de ontwikkeling van de drempel in de tweede helft van deze eeuw. Hierdoor is de verdeling van de getijvolumes tussen de Schaar van Waarde en het Zuidergat veranderd, waardoor meer water door het Zuidergat, en dus over de drempel, wordt gedwongen.

Drempel van Baarland

Algemeen

De Drempel van Baarland ligt op het punt waar het Middelgat (ebgedomineerd) en de Everingen (vloedgedomineerd) contact maken met het Gat van Ossensisse (vloedgedomineerd) en de Pas van Terneuzen (ebgedomineerd). Er komen daar twee

schaardelta's samen: de vloed-schaardelta van de Everingen en de ebschaardelta van het Middelgat, waarvan de laatste de Drempel van Baarland vormt.

Op de Drempel van Baarland is in de periode 1969 - 1975 per jaar gemiddeld ongeveer 1.8 miljoen m³ gebaggerd. Deze cijfers staan niet in figuur 3.8. Na 1975 is het baggerwerk hier gestopt in verband met de verlegging van het hoofdvaarwater. In de omgeving van de drempel is baggerspecie gestort:

- Platen van Hulst: gemiddeld 1 miljoen m³/j in de periode 1971- 1975 en gemiddeld 2 miljoen m³/j in de periode 1976 -1990;
- Ebschaar van de Everingen: gemiddeld 1 miljoen m³/j sinds 1971;
- Everingen: gemiddeld 1.2 miljoen m³/j van 1973 tot 1979; gemiddeld 0.6 miljoen m³/j van 1980 tot 1990.

Korte beschrijving van de morfologische ontwikkeling (Bijlage A.3)

In 1931 is de Drempel van Baarland van het 'botsende ebgeul'-type. Sindsdien verandert de vorm drempel en vanaf 1967 is er sprake van het 'parallele geulen'-type. In 1931 bestaat de drempel uit een smalle, ondiep geuldeel aan het stroomafwaartse einde van het Middelgat. De geul is maximaal NAP -14 m diep. In de loop van de tijd neemt de drempel in breedte en diepte af. Deze tendens is ook waarneembaar in het Middelgat. In 1986 kruist de geul met de drempel de rug tussen de beide grote geulsystemen, Middelgat/Everingen en Pas van Terneuzen, niet langer en is verbonden met het Straatje van Willem. De drempel ligt dan op ongeveer NAP -9 m. In 1994 is de verbinding met het Straatje van Willem verbroken en het Middelgat is weer door de rug gebroken; de diepte is toegenomen tot NAP -11.5 m. Met de doorbraak heeft de drempel, die dan van het 'parallele geulen'-type is, weer een iets hoger 'botsend' karakter gekregen. Aan het einde van de vloedgedomineerde Everingen bevinden zich ten westen van de Drempel van Baarland de in elkaar grijpende delta's van vloed- en ebscharen, van respectievelijk de Everingen en het Middelgat. Net onder de Rug van Baarland ontstaan ebscharen die in de loop van de tijd in zuidwestelijke richting verplaatsen en daarbij platen eroderen. In 1931, 1971 en 1990 sluit een ebschaar uit het Middelgat en een vloed-schaar uit de Everingen goed op elkaar aan. In die tijd is de drempel relatief ondiep.

Factoren bepalend voor de morfologische ontwikkeling

In de periode 1931 - 1994 vindt een wisseling plaats van de verdeling van de debieten tussen het Middelgat en de Overloop van Hansweert. Tussen 1931 en 1955 breekt de Overloop van Hansweert door de Platen van Ossensisse en voert in de periode daarna steeds meer water af. Dit gaat ten koste van het Middelgat. De achteruitgang van het Middelgat is van invloed op de algemene ontwikkeling van de drempeldiepte, omdat het watervolume dat over de drempel gaat afneemt,

met als gevolg een verminderde drempeldiepte.

De mate van contact van de eb- en vloedscharen in het schaaldeltagebied is bepalend voor de hoeveelheid water die tussen de Everingen en het Middelgat wordt uitgewisseld, en dus voor de hoeveelheid water die over de Drempel van Baarland stroomt. In de jaren '50 en '60 was de verbinding tussen Everingen en Middelgat vrij slecht waardoor de drempeldiepte toenam. In de jaren '70 en '80 verbeterde de verbinding tussen beide geulen met als gevolg een ondiepere drempel.

Samenvatting

De Drempel van Baarland gaat tussen 1931 en 1994 over van het 'botsende ebgeul'-type naar het 'parallele geulen'-type. Deze overgang lijkt bepaald te worden door de lange termijn ontwikkeling die het gevolg is van een wisseling in de debieten tussen het Middelgat en het Gat van Ossenissee. Op de middellange termijn wordt de geometrie van de drempel bepaald door de mate waarin de Everingen en het Middelgat via het eb- en vloedscharendeltagebied in het oosten van de Everingen met elkaar in contact staan.

Drempel van Borsselle

Algemeen

De Drempel van Borsselle bevindt zich aan het eind van de (ebgedomineerde) Pas van Terneuzen, op de plaats waar de (ebgedomineerde) Honte en de Pas van Terneuzen, én de (vloedgedomineerde) Schaar van de Spijkerplaat en de Everingen contact maken met elkaar. De drempel wordt gevormd door het ondiepe stroomafwaartse einde van de Pas van Terneuzen. Ten westen van deze drempel bevindt zich de vloedschaardelta van de Schaar van de Spijkerplaat.

Op deze drempel wordt sinds 1972 gemiddeld ca. 1.25 miljoen m³/j gebaggerd (figuur 3.8). Het gebied waar gebaggerd wordt heeft een constante omvang. Stortingen vinden plaats in de nabijgelegen Schaar van de Spijkerplaat en de Everingen. In de Schaar van de Spijkerplaat wordt sinds 1979 per jaar gemiddeld 0.5 miljoen m³/j gestort. In de Everingen wordt sinds 1973, ongeveer 3 km ten oosten van de drempel, in het zuiden van de geul gestort: aanvankelijk gemiddeld 1.5 miljoen m³/j en na 1979 gemiddeld 0.6 miljoen m³/j.

Korte beschrijving van de morfologische ontwikkeling (Bijlage A.4)

In 1931 is de Drempel van Borsselle van het 'botsende ebgeul'-type. In 1994 is

de drempel van het 'parallele geulen'-type, een vorm die de drempel vanaf het eind van de jaren '60 heeft aangenomen.

In 1931 wordt de drempel gevormd door het ondiepe afwaartse uiteinde van de Pas van Terneuzen. Van 1931 tot en met 1972 wordt de drempel ondieper en ook smaller; de diepte neemt af van NAP -14.5 m in 1950 tot -12.3 m in 1971; de breedte van 600 m naar 250 m. Daarna neemt de diepte van de drempel weer toe tot ongeveer NAP -15.5 m in 1980 waarna vervolgens weer een verondieping plaats vindt tot NAP -14.5 terwijl de breedte verder afneemt. Na 1986 blijft de diepte constant (figuur 3.8). Na 1982 neemt de breedte weer toe van ongeveer 250 m tot 400 m.

Ten westen van de drempel ligt het Schaar van de Spijkerplaat en de Spijkerplaat. In 1931 is de Spijkerplaat nog een plaat van redelijke omvang, maar sindsdien is zijn bestaan marginaal. De Schaar van de Spijkerplaat is in het begin van deze eeuw een vloedschaar die in noordelijke richting migreert, waarna deze weer verdwijnt terwijl ondertussen zuidelijk ervan een nieuwe is ontstaan. De schaar is in de loop van de tijd in omvang toegenomen. Aan het begin van een nieuwe cyclus rond 1968 tapte deze schaar veel ebwater af, hetgeen ongunstig was voor de diepte van de drempel. Later, door de noordelijker positie van de schaar, werd door zowel eb als vloed meer water over de drempel gestuurd. In 1994 ligt de Schaar van de Spijkerplaat ondertussen ten noorden van de drempel; hierdoor schiet veel vloedwater uit de Schaar voorbij de drempel de Everingen in. Ook het ebwater uit de Pas van Terneuzen wordt momenteel hoofdzakelijk via de Schaar afgevoerd en stroomt daarbij niet meer over de drempel.

De Pas van Terneuzen is ter hoogte van de Drempel van Borsssele in de periode 1931 - 1994 met ongeveer 1 km in westelijke richting verplaatst. De invloed hiervan op de drempel is onduidelijk, mogelijk is hierdoor de aansluiting met de Honte verbeterd wat ten gunste van de drempel kan zijn geweest.

Factoren van belang voor de morfologische ontwikkeling

De morfologie van de Drempel van Borsssele wijzigt in de loop van deze eeuw onder invloed van grootschalige veranderingen in de morfologie: door toename het getijvolume door de Schaar van de Spijkerplaat, ten koste van het getijvolume door de Honte (Blik, 1995). De waterbeweging in beide hoofdgeulen wordt hierdoor steeds meer van elkaar gescheiden.

Op de korte termijn, van ongeveer 25 jaar, worden kleine veranderingen in de morfologie van de Drempel van Borsssele bepaald door veranderingen van de omvang en ligging van de Schaar van de Spijkerplaat, daar deze het volume van het water dat over de drempel wordt gestuurd beïnvloeden.

De huidige drempel die op de overgang tussen de Pas van Terneuzen en de Honte ligt voert steeds minder water af en wordt alleen door baggerwerkzaamheden in stand gehouden. De overgang tussen de Pas van Terneuzen en de Schaar van de Spijkerplaat voert daarentegen steeds meer water en daar heeft zich momenteel

een nieuwe drempel ontwikkeld, die ten westen ligt van wat de Drempel van Borsselle genoemd wordt.

Samenvatting

De Drempel van Borsselle gaat tussen 1931 en 1994 over van het 'botsende ebgeul'-type naar het 'parallele geulen'-type. Deze overgang is het gevolg van de ontwikkeling van de Schaar van de Spijkerplaat die ten koste van de Honte steeds meer debiet is gaan voeren. Hierdoor is de waterbeweging in beide hoofdgeulen, waartussen de drempel ligt, meer gescheiden geraakt.

3.4 Conclusie

Alle vijf hier beschouwde drempels in de hoofdvaargeul van de Westerschelde waren in de jaren dertig van deze eeuw van het 'botsende ebgeul'-type. Dit type kan omschreven worden als een drempel van een geul die min of meer loodrecht staat op een grotere geul. Ter hoogte van dit type drempel is de externe dominantie hoog. In de loop van de tijd zijn alle drempels, in meer of mindere mate, van type veranderd.

De drie oostelijke drempels, te weten Bath, Valkenisse en Hansweert, zijn, vooral sinds het begin van de jaren '70, overgegaan in het 'ontwijkende geulen'-type. Bij dit type drempel sluiten de doorgaande hoofdgeulen ter plekke van de drempel redelijk goed op elkaar aan. Met de verandering van een 'botsend ebgeul'-type drempel naar een 'ontwijkende geulen'-type drempel is de externe dominantie van de rivier ter hoogte van de drempel sterk afgenomen.

De belangrijkste oorzaak van de verandering van het karakter van de oostelijke drie drempels lijkt het gevolg te zijn van bagger- en stortactiviteiten die sinds 1970 daar fors in omvang toenamen. Door de bagger- en stortwerkzaamheden werd meer water gedwongen over de drempels te stromen, waardoor de drempel verdiepte en verbreedde.

De drempels van Baarland en Borsselle zijn in de loop van de tijd overgegaan van een 'botsende ebgeul'-type in een drempel van het 'parallele geulen'-type. Deze drempels worden tegenwoordig gevormd door een rug tussen twee hoofdgeulen, op de plek waar enig debiet wordt uitgewisseld. In de loop van de tijd neemt de uitwisseling van water tussen beide hoofdgeulen af: de stroming raakt sterker gescheiden. Deze scheiding wordt veroorzaakt door grootschalige morfologische ontwikkeling waardoor de debietverdeling tussen de hoofdgeulen is veranderd.

De ontwikkeling van de Drempel van Baarland wordt momenteel niet door baggerwerkzaamheden verstoord. De Drempel van Borsselle wordt door intensief baggeren op diepte gehouden. De invloed van het baggeren lijkt de morfologische ontwikkeling van de drempel niet te domineren, zoals bij de oostelijke drie drempels. De oorzaak hiervan ligt vermoedelijk in het getijvolume en daarmee de

dimensies van het systeem, die in het westen veel groter zijn dan in het oosten. De invloed van het baggeren zal hier naar verhouding van minder groot zijn.

4 Waterbeweging: stroomsnelheden en dwarsverhangen rondom drempels in de Westerschelde

4.1 Inleiding

Met het numerieke waterbewegingsmodel Scaldis100 zijn voor een volledig getij voor een gemiddeld springtij en een gemiddeld doottij stroomsnelheden en waterstanden in de Westerschelde berekend. De resultaten van de berekeningen zijn per half uur beschikbaar.

De stroombeelden en de dwarsverhangen rond de vijf drempels in de Westerschelde, voor maximum stroom tijdens eb en vloed, zijn beschreven en geanalyseerd. De beschrijving van de stroombeelden betreft die voor spring- en doottij; de dwarsverhangen alleen voor springtij. De vijf drempels zijn die van Bath, Valkenisse, Hansweert, Baarland en Borssele.

Scaldis100 is een twee-dimensionaal, numeriek waterbewegingsmodel dat is gebouwd voor het Schelde-estuarium. Het model maakt gebruik van het programma-pakket WAQUA (Dekker et al., 1994). De stroomsnelheden zijn over de diepte geïntegreerd, d.w.z. dat het model alleen diepte gemiddelde snelheden weergeeft.

Scaldis100 heeft ten westen van Baalhoek een rechthoekig netwerk met een maaswijdte van 100 m (figuur 4.1). Ten oosten van Baalhoek is het netwerk kromlij-nig met een maaswijdte die varieert tussen de 30 m en 100 m. De berekeningen van de stroomsnelheden zijn verricht met de bodemligging van 1988. De bodemligging is met cellen van 100 x 100 m geschematiseerd. Het gemiddeld springtij dat is berekend is het getij van 25 november 1988; het gemiddeld doottij dat van 3 juli 1990. De getijcoëfficiënt bij Vlissingen van een gemiddeld springtij is 1.16 en van een gemiddeld doottij 0.79.

Tijdens een gemiddeld springtij neemt het getijverschil van west naar oost in het estuarium van 4.75 m in Vlissingen tot 5.74 m in Bath. Het verloop van de hoogwaters is van NAP 2.41 m in Vlissingen tot NAP 3.22 m in Bath. De laagwaters verlopen van NAP -2.28 m in Vlissingen tot -2.58 in Bath (figuur 4.2).

De afwijking van de maximale stroomsnelheden tussen de modelberekening en de natuur bedraagt in de geulen 10 à 20 % en aan de randen en op de platen zijn de afwijkingen hoger en kunnen oplopen tot maximaal ruim 100 % op enkele punten (Van der Male, 1993). Tijdens maximum stroom worden de snelheden door het model onderschat. De gemiddelde afwijking van de waterstanden tussen de modelberekeningen en de natuur loopt van west naar oost op: in Vlissingen is die -0.01 m en in Bath 0.05 m (Dekker et al., 1994).

In dit hoofdstuk worden eerst de stroombeelden en vervolgens de dwarsverhangen van de vijf drempelgebieden beschreven en geanalyseerd.

4.2 Stroomsnelheden

4.2.1 Inleiding

Bij de beschrijving en analyse van deze stroombeelden (Bijlage B) is vooral gelet op het patroon van de -diepte gemiddelde- stroomsnelheden bij maximum eb en vloed op en rondom een drempel, omdat verondersteld wordt dat dit de morfologie bepaalt (o.a. Allersma, 1994; Bliet en Ruijter, 1994; Gerritsen en De Jong, 1983). Gezien het mogelijke belang van onder- en oververzadiging in de aanzanding van een drempel (zie paragraaf 2.4.4) werd gelet op de gradiënt in de stroomsnelheden boven een drempel. Het bleek dat globaal het stromingspatroon bij doottij niet sterk verschilde van dat bij springtij. Wel waren de maximum stroomsnelheden bij doottij 30 à 40 % lager dan bij springtij. Aangezien wordt aangenomen dat de omstandigheden tijdens springtij in sterke mate bepalend zijn voor de morfologie, zijn de doottij berekeningen niet nader geanalyseerd. Een nauwkeurig analyse van de verschillen in de stroompatronen tijdens doot- en springtij, d.w.z. een snelheidstoename, zou inzicht kunnen geven in een verdere snelheidstoename door een eventuele kombergingsvergroting van het estuarium. Een dergelijke analyse is hier niet verricht, maar is wel aanbevelenswaardig.

Naast de stroombeelden van Scaldis100 zijn voor de drempels van Bath en Valkenisse ook de stroombeelden tijdens een gemiddeld springvloed van het fysisch model van het Waterbouwkundig Laboratorium Borgerhout (WLB) geanalyseerd (Waterbouwkundig Laboratorium Borgerhout, 1994). Het betreft hier oppervlakte snelheden. Het algemene stroombeeld op beide drempels van het fysische model sloot goed aan bij dat van Scaldis100. De WLB-resultaten worden daarom niet nader in de beschrijving en analyse betrokken (Dekker, 1995; Bijlage D).

Hieronder wordt per drempel het stroombeeld beschreven en geanalyseerd.

4.2.2 Beschrijving en analyse per drempelgebied

Drempel van Bath (Bijlage B.1 en B.2)

De maximum stroomsnelheden tijdens eb nemen in het Vaarwater boven Bath in de richting van de drempel af van ongeveer 1.30 m/s naar 0.90 m/s; vlak voor de drempel buigt een deel van de stroom af richting de Schaar van de Noord. In de Schaar van de Noord trekt de snelheid weer aan tot maximale waarden van 1.30 m/s. In de Appelzak zijn de snelheden relatief laag (0.50 m/s). Op de drempel zelf stroomt het met relatief lage snelheden, ca. 0.8 m/s in noordelijke richting. Na de drempel draait het water naar het westen, het Nauw van Bath in. Tijdens maximum vloed zijn de hoogste snelheden te vinden in de Schaar van de Noord: 1.50 m/s. De stroom neemt in de richting van de drempel in snelheid af-

van 1.50 m/s tot 0.90 m/s- en draait zodra het hoofdvaarwater bereikt is bij in zuidelijke richting, waar de stroom weer aantrekt. Een gedeelte van stroming uit de Schaar van de Noord buigt stroomopwaarts van de drempel het Vaarwater boven Bath in en neemt dan vervolgens weer in snelheid toe. Over de drempel is een gradiënt van eerst afnemende en vervolgens na de drempel weer toenemende stroomsnelheden. De stroomsnelheden in het Nauw van Bath zijn relatief laag en een groot gedeelte van het water haalt de bocht naar het Vaarwater boven Bath niet. Daardoor stroomt een aanzienlijke hoeveelheid water vóór de drempel langs de Appelzak in.

Belangrijke elementen uit de waterbeweging in de omgeving van de Drempel van Bath zijn de afnemende snelheid van de ebstroming uit het Vaarwater boven Bath richting drempel en de aftapping van een deel van water voor de drempel door de Schaar van de Noord. Tijdens vloed schiet het water uit het Nauw van Bath gedeeltelijk voor de drempel langs naar de Appelzak. De stroming uit de Schaar van de Noord die ter hoogte van de drempel sterk afneemt is mogelijk van groot belang voor de aanvoer van sediment vanuit het gebied van de Plaat van Saeftinge, dat uiteindelijk weer afkomstig is van de stortlokatie bij het Konijnschor (Storm, 1995).

Drempel van Valkenisse (Bijlage B.1 en B.2)

Bij maximum eb nemen de stroomsnelheden uit het Nauw van Bath in de richting van de drempel af van maximaal 1.50 m/s tot 1.20 m/s. Voorbij de drempel neemt de stroomsnelheid in de Overloop van Valkenisse weer toe tot 1.30 m/s. De maximum snelheden zijn stroomopwaarts van de drempel te vinden en wel tegen de noordoever aan van de Overloop van Valkenisse. Ter hoogte van de drempel steekt de stroomdraad (lijn van maximum stroom) over naar de zuidoever van de Overloop. Dit is in analogie met het gedrag van rivieren. Net voor de drempel vindt enige afbuiging van de stroming uit het Nauw van Bath naar de Zimmermangeul plaats. In de Schaar van de Noord zijn de snelheden tijdens maximum eb ook hoog (max. 1.40 m/s). Uit de Schaar van de Noord stroomt ter hoogte van de drempel water in de in de Overloop van Valkenisse.

Tijdens maximum vloed is er een gradiënt te zien in de stroomsnelheden. Vóór de drempel een afname met ongeveer 0.60 m/s, van 1.90 m/s tot 1.30 m/s. Na de drempel trekt de stroom in de Schaar van de Noord weer aan tot 1.50 m/s. De hoogste stroomsnelheden zijn geconcentreerd tegen de zuidelijke oever van de Overloop van Valkenisse; aan de noordelijke oever komen relatief lage snelheden voor. Ter hoogte van de drempel divergeert de stroming en voor een deel gaat de stroming 'recht door' de Schaar van de Noord in. In de Schaar van de Noord worden maximale stroomsnelheden bereikt van ca. 1.50 m/s.

Van belang voor de aanwezigheid van de drempel is dat de eb- en de vloedstroom geconcentreerd zijn in twee afzonderlijke geuldelen. Daarnaast dalen zowel

tijdens eb als tijdens vloed de stroomsnelheden in de richting van de richting drempel door divergentie; na het passeren van de drempel nemen de snelheden weer toe. Verder zorgt de onttrekking van water tijdens eb door de Zimmerman-geul en vooral tijdens vloed door de Schaar van de Noord voor lagere debieten over de drempel.

Drempel van Hansweert (Bijlage B.3 en B.4)

Tijdens maximum eb neemt ter hoogte van de Schaar van Ossenissee, d.w.z. net voor de drempel, de stroming die uit het Zuidergat kom in snelheid af van ongeveer 1.50 m/s tot 1.10 m/s. De stroming die uit het Zuidergat komt divergeert. De stroombanen zijn daarbij ruwweg noord-zuid georiënteerd. Aan het begin van de bocht bij Hansweert, d.w.z. na de drempel, neemt de stroomsnelheid weer toe tot 1.50 m/s. Er is dus sprake van een gradiënt -eerst afnemend en vervolgens toenemend- van de stroomsnelheden over de drempel. De maximale stroomsnelheden zijn geconcentreerd aan de westelijke, ebgedomineerde kant, van de drempel. Aan het begin van de eb treden hoge snelheden op in de Schaar van Ossenissee.

Tijdens maximum vloed nemen de snelheden in de richting van de drempel eerst af van 1.90 m/s tot 1.10 m/s en vervolgens, na de drempel, nemen ze weer toe tot ca. 1.50 m/s. De stroom uit de Put van Hansweert is noord-west zuid-oost georiënteerd en een deel 'loopt' de Schaar van Waarde in. Een ander deel, in de binnenbocht, buigt af richting het Zuidergat. De maximale stroomsnelheden op de drempel komen op het oostelijk deel van de drempel voor, in het vloedgedomineerde deel. In de Schaar van Ossenissee treden hoge snelheden op ten tijde van maximum vloed, die oplopen tot 1.30 m/s.

Kenmerkend voor de drempel is dat de maximale stroomsnelheden tijdens eb en vloed in afzonderlijke, parallel aan elkaar liggende, delen van de geul optreden. In de richting van de drempel vertraagt de stroming, voor zowel eb als vloed, door afname van de stroomsnelheden en divergentie van de stroombanen plaats als gevolg van aftapping van water tijdens eb vóór de drempel door de Schaar van Ossenissee. Van meer belang is de aftapping tijdens vloed door de Schaar van Waarde, waardoor veel verlies aan debiet over de drempel optreedt.

Drempel van Baarland (Bijlage B.5 en B.6)

De Drempel van Baarland bevindt zich op de grens tussen twee parallel lopende hoofdgeulen.

Tijdens maximum eb blijven de stroombanen van de beide grote hoofdgeulsystemen min of meer gescheiden: de stroming uit het Middeldgat gaat de Everingen in en de stroming uit de Overloop van Hansweert gaat de Pas van Terneuzen in. Kruising van water treedt er wel op doordat water uit het Middeldgat over de drem-

pel de Pas van Terneuzen instroomt. Vanuit het Middeldgat nemen de snelheden toe in de richting van de Ebschaar van de Everingen, waar een maximum waarde optreedt. In dit gebied worden maximum stroomsnelheden bereikt van 1.60 m/s. In de Overloop van Hansweert nemen de snelheden in de richting de drempel af met ca. 0.20 m/s naar 1.40 m/s, waarna de snelheden in de Pas van Terneuzen weer toe nemen.

Ook bij vloed loopt de waterbeweging in de beide hoofdgeulen vrij sterk 'langs elkaar'. Er stroomt enige water van de Everingen naar de Overloop van Hansweert. De stroming daar is min of meer dwars op de drempel. Net als bij maximum eb is er een afnemende snelheid te zien. Voorbij het drempelgebied, dus niet over de drempel, trekken de snelheden aan in de Pas van Terneuzen en de Overloop van Hansweert. In het gebied van de Ebschaar van de Everingen treden hoge snelheden op, van maximaal 2.00 m/s. In de richting van het Middeldgat nemen deze snelheden weer af.

Kenmerkend voor de Drempel van Baarland zijn de -in vrij sterke mate- langs elkaar lopende stroming in de hoofdgeulen. Er is een geringe component dwars op de drempel waarneembaar, die min of meer uit een ondiepe rug in het verlengde van het platengebied van de Rug van Baarland bestaat.

Drempel van Borsssele (Bijlage B.7 en B.8)

Met eb volgen de stroombanen min of meer de afzonderlijke hoofdgeulen: water uit de Everingen gaat langs de drempel de Honte in en water uit de Pas van Terneuzen buigt voor de drempel af naar het gebied van de Schaar van de Spijkerplaat. Een klein gedeelte van het water uit de Pas van Terneuzen stroomt via de drempel de Honte in. Tijdens maximum eb nemen gaande van de Pas van Terneuzen naar het gebied van de Schaar van de Spijkerplaat de stroomsnelheden van 1.70 m/s met 0.20 m/s licht af tot circa 1.50 m/s boven de drempel. Tijdens eb 'loopt' al een gedeelte van het water uit de Pas van Terneuzen via kortsluitgeulen als het Stoombotengat of de Geul van de Suikerplaat naar de Everingen en bereikt op deze wijze de Honte. Bij de overgang van de Everingen naar de Honte is ook een lichte afname van de snelheid van ca. 0.20 m/s te zien en vervolgens weer een toename. Voor alle duidelijkheid: deze gradiënt treedt niet op over de drempel maar ter hoogte van de drempel in de hoofdgeul. Op de drempel zelf is er sprake van een geringe afname van de stroomsnelheid met circa 0.20 m/s vanuit de Pas van Terneuzen.

Tijdens vloed zijn de stroombanen in beide hoofdgeulen ook vrij sterk gescheiden. Water uit de Schaar van de Spijkerplaat stroomt gedeeltelijk voor de drempel langs en gedeeltelijk dwars over de drempel de Everingen in. Vanuit de Honte is er geen stroming via de drempel naar de Pas van Terneuzen waarneembaar: alles verdwijnt in de Everingen. De vloedstroming uit de Schaar van de Spijkerplaat neemt ter hoogte van de drempel licht af van 1.30 m/s naar 1.10 m/s om vervolgens in de Everingen weer aan te trekken.

Kenmerkend voor de Drempel van Borsssele zijn de sterk gescheiden stroombanen in beide hoofdgeulen. Er is een component van de ebstroom uit de Pas van Terneuzen over de drempel. Ook de vloedstroming uit de Schaar van de Spijkerplaat dwars over de drempel is van invloed op het gedrag van de drempel in dat deze waarschijnlijk zorgt voor aanvoer en afzetting van zand.

4.2.3 Conclusie

Kenmerkend in het stroombeeld op de drie oostelijke drempels, Bath, Valkenisse en Hansweert is divergentie van de stroming en de gescheiden stroombanen tijdens maximum eb en maximum vloed waardoor eb en vloed in verschillende delen van het geul optreden.

Door de divergentie neemt zowel de eb- als de vloedstroming richting de drempel in snelheid af. Na het passeren van de drempel neemt de snelheid vervolgens weer toe. Hierdoor ontstaat een gradiënt van eerst afnemende en vervolgens toenemende snelheid over de drempel. De divergentie van de stroming wordt veroorzaakt door drie fenomenen:

1. de aftappende werking van eb- en vloodscharen voordat het water de drempel over stroom;
2. het breder worden van de geul ter hoogte van de drempel en
3. het te ruime dwarsprofiel van verdiepte drempels.

De stroombanen van maximum eb en maximum vloed zijn gelegen in respectievelijk het eb- en het vloedgedomineerde deel van de drempelgeul. Doordat de eb en de vloed over een drempel in min of meer afzonderlijke banen stromen is de geul ter plekke relatief breed. De relatief grote breedte van de geul is, naast aftapping door eb- of vloodscharen, één van de oorzaken van divergentie van de stroming.

De twee westelijke drempels, Baarland en Borsssele, liggen in het deel van het estuarium met twee parallelle doorgaande hoofdgeulen. Ter hoogte van beide drempels zijn beide hoofdgeulen niet gescheiden door platen. De stroming in de hoofdgeulen is vrij sterk gescheiden, zij het dat ter hoogte van beide drempels enige kruising optreedt. Op beide drempels gaat tijdens maximum eb enig water over de drempel; tijdens maximum vloed is er een waterbeweging dwars over de drempel, die waarschijnlijk voor de aanzanding van de drempel zorgt.

4.3 Dwarsverhangen/secundaire stroming

4.3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de dwarsverhangen in een aantal bochten rondom de drempels beschreven en geanalyseerd. De beschrijving en de analyse blijven beperkt tot maximum eb en maximum vloed gedurende een gemiddeld springtij. De beschrijving en analyse vindt plaats met behulp van de kaartjes (bijlage C) en

tabel 4.1. De dwarsverhangen tijdens doottij zijn niet beschreven omdat de omstandigheden tijdens springtij bepalend worden geacht voor de morfologische ontwikkeling.

De berekeningen van de dwarsverhangen en snelheden van de secundaire stroming ten gevolge van zowel centrifugaalkrachten als de Coriolisversnelling zijn uitgevoerd met vergelijkingen van Booij en Kalkwijk (1983) en Allersma (1994) (zie paragraaf 2.4.3). De waarden van parameters als bochtstraal, diepte, breedte zijn afgelezen uit lodingskaarten. De stroomsnelheid van de hoofdstroom en de verhangen zijn afkomstig van Scaldis100 berekeningen.

De maatgevende waterdiepte en de stroomsnelheid in het dwarsprofiel zijn lastig te bepalen omdat het niet eenduidig is wat de maatgevende waarden van die parameters zijn. Bij de berekeningen is rekening gehouden met de invloed van het getij: dus met de variërende waterstanden. Dit is nodig omdat de breedte van de geulen waarover het dwarsverhang staat groter is tijdens maximum vloed dan tijdens maximum eb. Ook is de waterstand tijdens vloed 4 á 5 m hoger dan tijdens eb, hetgeen overigens een vrij grove schematisatie van de werkelijkheid is: in de natuur is het waterstandsverschil tussen die waterstanden bij maximum ebstroom en vloedstroom ongeveer 2.5 m (Jeuken, 1992).

In tabel 4.1. zijn naast de met het model berekende maximale dwarsverhangen en de geometrische parameters, ook de met de vergelijkingen van Booij en Kalkwijk (1983)/Allersma (1994) berekende dwarsverhangen ten gevolge van centrifugaalkrachten en Coriolisversnelling opgenomen. De resulterende (maximum) dwarsstroming (U_s) (aan de bodem en het oppervlak) in de laatste kolom van de tabel is afgeleid van de 'gemeten' dwarsverhangen. In bijlage E staat een voorbeeld van de berekeningen voor tabel 4.1.

Benadrukt moet worden dat de berekende dwarsverhangen en dwarsstroomsnelheden door de onnauwkeurigheden hooguit een indicatief karakter hebben.

4.3.2 Beschrijving en analyse per drempelgebied

Bij de beschrijving per drempelgebied wordt bij eb en bij vloed alleen de bocht stroomopwaarts van de drempel beschouwd. Elke bocht is dus alleen beschreven tijdens die getijfase die van belang is voor het gedrag van een drempel.

Drempel van Bath (Bijlage C.1 en C.2)

Tijdens maximum eb treden in de Appelzak dwarsverhangen van enkele cm's per km op. Het dwarsverhang is voor 80 % het gevolg van centrifugaalkrachten. Deze dwarsverhangen genereren slechts een geringe dwarsstroom in de orde van 0.01

Lokatie	max. str.	ws (cm)	B (km)	R (km)	I_z (cm/km)	I_b (cm/km)	I_c (cm/km)	h (m)	U (m/s)	v^b/v^c (-)	U_t (m/s)
Vaarwater boven Bath	eb	3	1.75	3.2	1.7	4.5	-1.4	18	1.2	-0.15	0.03
	vloed	8	2.15		3.7	4.5	1.4	22	1.2	0.15	0.06
Appelzak	eb	4	2.00	2.9	2.0	2.3	0.9	10	0.8	0.21	0.01
	vloed	10	2.25		4.4	5.2	-1.4	14	1.2	-0.14	0.03
Nauw van Bath	eb	10	1.00	1.7	10	8.9	1.4	23	1.2	0.08	0.09
	vloed	10	1.60		6.3	11.5	-1.6	27	1.4	-0.07	0.10
Overloop van Valkensluis	eb	0	1.50	5.8	0	3.5	-1.6	18	1.4	-0.24	0.02
	vloed	6	2.10		0.4	5.9	2.1	21	1.8	0.18	0.04
Zuidergat	eb	6	1.10	2.0	5.5	13.4	-1.8	23	1.6	-0.07	0.08
	vloed	9	1.75		5.1	13.4	1.8	27	1.6	0.07	0.11
Bocht bij Huisenveert	eb	9	1.25	2.2	7.2	12.2	1.8	23	1.6	0.08	0.09
	vloed	11	1.50		7.3	15.5	-2.1	27	1.8	-0.07	0.10
Overloop van Huisenveert	eb	9	1.35	2.3	6.7	6.6	1.4	18	1.2	0.11	0.06
	vloed	13	1.75		7.4	15.2	-1.9	22	1.7	-0.08	0.07
Middelgat	eb	8	0.75	2.5	10.7	6.0	1.4	23	1.2	0.12	0.06
	vloed	6	1.00		6.0	6.0	-1.4	27	1.2	-0.12	0.05
Oet van Ossenisse (Pl. van Hulst)	eb	4	1.75	6.3	2.3	2.0	-1.3	18	1.1	-0.33	0.01
	vloed	12	2.85		4.2	4.8	1.9	22	1.7	0.21	0.04
Pas van Terneuzen (Terneuzen)	eb	6	1.90	6.6	3.2	1.3	-1.0	23	0.9	-0.42	0.01
	vloed	10	2.25		4.4	3.1	1.6	27	1.4	0.27	0.04
Pas van Terneuzen (west)	eb	2	3.00	9.0	0.7	2.6	-1.7	18	1.5	-0.34	0.01
	vloed	7	3.75		1.9	2.0	1.5	22	1.3	0.39	0.01
Schar van de Spijkerplaat	eb	-	-	3.3	-	7.2	1.7	22	1.5	0.13	0.03
	vloed	-	-		-	7.2	-1.7	18	1.5	-0.13	0.04
Honds	eb	10	2.75	4.8	3.6	4.9	1.7	28	1.3	0.18	0.03
	vloed	11	3.00		3.7	4.9	-1.7	32	1.5	-0.18	0.04

Tabel 4.1. Gemeten en berekende dwarsverhangen in de bochten in de Westerschelde, benevens berekende snelheden van de secundaire stroming. (ws = waterstandsverschil loodrecht op geulas; B = breedte geul; R = bochtstraal; I_z = 'gemeten' dwarsverhang uit Scaldis100; I_b = berekend dwarsverhang door centrifugaalkracht volgens Allersma (1994); I_c = berekend dwarsverhang door Coriolisversnelling volgens Allersma (1994); h = gemiddelde waterdiepte in bocht; U = diepte gemiddelde stroomsnelheid; v^b = stroomsnelheid dwarsstroming door centrifugaalkrachten op 0.1 h volgens Allersma (1994); v^c = stroomsnelheid dwarsstroming door Coriolisversnelling op 0.1 h; U_t = totale dwarsstroming ($v^b + v^c$) op 0.1 h) volgens Booij en Kalkwijk (1983)

m/s.

Het dwarsverhang in het Nauw van Bath tijdens maximum vloed is 6 cm/km waarbij berekende dwarsstromen in de orde van 0.10 m/s horen. De secundaire stroming in zowel het Nauw van Bath als de Appelzak voert materiaal in de richting van de binnenbocht, dus naar de Drempel van Bath, aan.

Tijdens maximum vloed is goed waarneembaar hoe de hoogste waterstanden cirkelvormig ten opzichte van een centraal, laag punt voorkomen: dit centrale punt ligt ter hoogte van de Plaat van Saeftinge; de maximale waterstanden treden tegen de oevers van het Nauw van Bath en de Appelzak op. Ter hoogte van de drempel zijn de dwarsverhangen en ook de dwarsstroomsnelheden maximaal, respectievelijk ruim 5 cm/km en 0.1 m/s. Het dwarsverhang wordt voor het overgrote deel, 85%, opgewekt door centrifugaalkrachten. In de vloedrichting -richting Appelzak- nemen de dwarsverhangen en snelheden af.

Drempel van Valkenisse (Bijlage C.1 en C.2)

Tijdens maximum eb treden in het Nauw van Bath dwarsverhangen op van 10 cm/km en dwarsstromen met snelheden van 0.10 m/s op. De dwarsverhangen in het Nauw van Bath nemen in westelijke richting af en zijn ter hoogte van de drempel minimaal. De aanpassingslengte van de secundaire stroming is bij een diepte van 20 m ongeveer 400 m (zie paragraaf 2.3.3). Gezien de afstand van ongeveer 1000 m tussen het maximum dwarsverhang en de drempel is het waarschijnlijk dat ter hoogte van de drempel de secundaire stroming nog niet is uitgedempt.

De dwarsverhangen tijdens maximum vloed in de Overloop van Valkenisse zijn klein, door een geringe bochtstraal: ca. 0.5 cm/km. De opgewekte dwarsstroming is daardoor ook relatief klein: 0.04 m/s maar niet zonder effect. De secundaire stroming zorgt samen met de secundaire stroming tijdens eb in het Nauw van Bath voor aanvoer van zand naar het midden van de geul waar het wordt gesedimenteerd en de rug, de drempel, vormt. Een soortgelijk verschijnsel treedt op tijdens vloed in de omgeving van de Overloop van Valkenisse, waar een soortgelijk fenomeen als bij Bath te zien is. Dit maal ligt het centrum met de laagste waterstand in het gebied van de Platen van Valkenisse en de rand met de maximale waterstanden aan de linkeroever van de Overloop van Valkenisse.

Zowel tijdens maximum eb als vloed is het aandeel van de Coriolisversnelling in het dwarsverhang gering: 10 % tijdens eb en 20 % tijdens vloed.

Drempel van Hansweert (Bijlage C.3 en C.4)

Tijdens maximum eb is de dwarsstroming uit het Zuidergat van belang voor de drempel. De dwarsverhangen in het Zuidergat zijn in de orde van 6 cm/km en de dwarsstromen 0.08 m/s. Het aandeel van de Coriolisversnelling is gering. Voor ruim 90 % wordt het dwarsverhang veroorzaakt door centrifugaalkrachten. Het dwarsverhang neemt gaande van de bocht naar de drempel af. Op de drempel zelf

zijn de dwarsverhangen te verwaarlozen. Dit laatste is mogelijk veroorzaakt door de Schaar van Ossenissee die het dwarsverhang dat in het Zuidergat ontstaan is door aftapping te niet doet (mondelinge mededeling Van Kleef). Mogelijk is aftapping van een schaar als de Schaar van Ossenissee van minder belang voor het gedrag van een drempel dan de gevolgen die een schaar kan hebben voor het dwarsverhang.

Tijdens maximum vloed bedraagt het dwarsverhang in de bocht bij Hansweert ongeveer 7 cm/km en de bijbehorende dwarsstroomsnelheden zijn 0.10 m/s. Het dwarsverhang is voor 90 % het gevolg van centrifugaalkrachten. Ook hier is er een lokaal waterstandsmimum. Dit ligt ter hoogte van de kop van de Plaat van Ossenissee. Op de drempel zijn de dwarsverhangen nauwelijks waarneembaar omdat het dwarsverhang wordt verknald door het westelijke havenhoofd van de haven van Hansweert. Het langsverhang overheerst daar.

Drempel van Baarland (Bijlage C.5 en C.6)

De dwarsstromen in het Gat van Ossenissee en de Pas van Terneuzen lijken niet van direct belang voor de ontwikkeling de Drempel van Baarland. Meer van belang voor de drempel lijkt de migratie van de verschillende eb- en vloedscharen op de overgang tussen Everingen en Middelgat.

Tijdens maximum ebstroom zijn vooral de dwarssnelheden van belang die in de Ebschaar van de Everingen en de zuidelijke uitloop van het Middelgat optreden. De dwarsverhangen zijn door de geringe schaal van de geulen niet uit de modelresultaten af te lezen. Ook berekeningen van de dwarsverhangen zijn lastig omdat de 'oevers' van de geulen zich onder water bevinden waardoor ze niet vergelijkbaar zijn met andere bochten.

Tijdens maximum vloed zijn vooral de dwarssnelheden die in de vloedscharen (o.a. Straatje van Willem) van belang. Ook hier zijn de dwarsverhangen niet uit de modelresultaten af te lezen en zijn de berekeningen van de dwarsverhangen lastig omdat de 'oevers' van de geulen zich onderwater bevinden.

Dat ondanks het geringe dwarsverhang in de eb- en vloedscharen toch snelle uitbocht plaatsvindt kan verklaard worden door de stroming, vooral tijdens vloed, dwars over de geul. Hierdoor wordt een secundaire stroming opgewekt (zie paragraaf 2.3.3; figuur 2.8).

Drempel van Borssele (Bijlage C.7 en C.8)

In de Pas van Terneuzen zijn de dwarsverhangen en -stromen tijdens maximum eb -naast zandaanvoer op de drempel- verantwoordelijk voor uitbocht van de Pas in westelijke richting. De dwarsverhangen in de Pas van Terneuzen zijn gering: ca. 1 cm/km. De dwarssnelheden zijn in de orde van grootte van 0.01 m/s. De ondanks deze berekeningen snelle uitbocht, dus grote secundaire stromen, van de Pas kan verklaard worden met het hierboven genoemd mechanisme van stro-

ming dwars over de geul: tijdens vloed stroomt vanuit het Spijkerplaatgebied water dwars op de Pas van Terneuzen. De dwarsverhangen in de Schaar van de Spijkerplaat (ebgedomineerd) zijn niet uit de modelresultaten te halen. Volgens de berekeningen zullen in deze schaar tijdens eb dwarsverhangen optreden van ruim 7 cm/km; bijbehorende dwarssnelheden zijn 0.05 m/s. Overigens zijn in de modelberekeningen niet duidelijk dwarsverhangen waarneembaar. De 'oever' van de schaar bevindt zich grotendeels onder water en is daarom niet te vergelijken met andere bochten.

In de Honte treden tijdens maximum vloed dwarsverhangen op van maximaal 4 cm/km; de dwarssnelheden zijn in de orde van 0.05 m/s. Het centrale minimum in de waterstanden treedt ter hoogte van de Spijkerplaat op.

4.3.3 Conclusie

In de bochten in de Westerschelde treden tijdens maximum stroom voor een gemiddeld springtij aantoonbaar dwarsverhangen op. De dwarsverhangen zoals die door Scaldis100 berekend zijn variëren tussen 0 en 11 cm/km. Over het algemeen zijn de dwarsverhangen tijdens maximum vloed groter dan tijdens maximum eb. Dit geldt evenzo voor de secundaire stroomsnelheden. Verder zijn de dwarsverhangen in bochten met een kleine bochtstraal groter dan die met een grote bochtstraal.

Het aandeel van de dwarsstroomsnelheden opgewekt door de Coriolisversnelling ten opzichte van centrifugaalkrachten blijkt relatief klein te zijn: gemiddeld ca. 15 %. De bijdrage blijkt nergens hoger te zijn dan 40 %. Allersma (1994) daarentegen vermeldt een verhouding van 50% - 50 % tussen beide krachten, overigens voor gemiddelde omstandigheden met snelheden van 0.5 - 1.0 m/s. Er geldt immers -en dat is inherent aan de vergelijking van Booij en Kalkwijk (1983)- : hoe groter de bochtstraal, hoe groter het relatieve aandeel van de Coriolisversnelling in de secundaire stroming. De dwarsverhangen zoals berekend met Booij en Kalkwijk (1983) zijn over het algemeen groter (enkele cm/km) dan die waargenomen uit de Scaldis100-resultaten.

Op de oostelijke drie drempels lijkt de secundaire stroming een grotere rol te spelen in het gedrag van de drempels dan van de westelijke twee, aangezien in het oosten de snelheden van de berekende secundaire stroming groter zijn. Hierdoor is de aanzanding van drempels en ook de bochtwerking -dus de mate van niet op elkaar aansluiten van de eb- en vloedgedomineerde geulen- groter. Op de westelijke twee drempels (de drempels van Baarland en Borssele) wordt het gedrag van de drempels veel meer bepaald door de ontwikkeling van ebkortsluitgeulen -de ebschaar van de Everingen en de kortsluitgeul van de Schaar van de Spijkerplaat- die de mate van aftapping van water dat over de drempel stroomt bepalen. De rechtstreekse aanzanding van de drempel door de secundaire stroming speelt een kleinere rol. Kortsluitgeulen kunnen ook belangrijk zijn in die zin dat aftapping ook tot gevolg kan hebben dat een dwarsverhang en daarmee de secundaire stroming te niet wordt gedaan.

Secundaire stroming kan ook ontstaan door stroming dwars over een geul (zie figuur 2.8) zonder dat daar er dwarsverhang ontstaat. Waarschijnlijk kan dit mechanisme in het westen de snelle uitbocht, ondanks de geringe dwarsverhangen, verklaren.

In de Westerschelde zijn de negatieve bochten (bochten met de buitenbocht aan de rechter oever) over het algemeen veel scherper dan de positieve bochten. Een mogelijke verklaring voor dit fenomeen is dat in negatieve bochten de secundaire stroming tijdens de vloed relatief laag is ten gevolge van de interactie tussen centrifugaalkrachten en de Coriolisversnelling. Tijdens eb is de resulterende secundaire stroming juist relatief hoog. Het gevolg hiervan is dat er tijdens eb en vloed secundaire stromen van ongeveer gelijke grootte ontstaan. In de positieve bochten is dit precies andersom en lopen de grootte van de stroomsnelheden van de secundaire stroming tijdens eb en vloed enigszins uit elkaar. Het gevolg hiervan is dat in negatieve bochten de secundaire stromen zowel bij eb als bij vloed een geulgeometrie willen veroorzaken die niet sterk bimodaal is, waardoor de bocht mogelijk sterk gekromd kan raken. In positieve bochten ontlopen de eb- en vloedgedomineerde geulgeometrie elkaar sterk, waardoor er mogelijk een bocht ontstaat met een grote bochtstraal.

Het kenmerkende patroon in de waterstand van putten boven de platen en daar omheen cirkelvormig oplopende waterstanden in buitenbochten van geulen in het oosten wordt mogelijk niet alleen veroorzaakt door bochtwerking die de waterstanden in de bochten opstuwt. Op de plaat kan mogelijk ook een verlaging van de waterstand optreden die mogelijk door een neer of een versnelling van de stroom op een plaat verklaard zou kunnen worden. Een andere verklaring is de lagere voortplantingssnelheid van de getijgolf in ondiepe gebieden waardoor deze gebieden later en trager onderstromen.

4.4 Conclusie

Kenmerkend voor de drie oostelijke drempels, de drempels van Bath, Valkenisse en Hansweert, is de vertraging van en de eb- en vloedstroom in de richting van de drempel en de versnelling van de stroom nadat de drempel is gepasseerd. De gradiënt, van eerst afnemende en vervolgens toenemende stroomsnelheid, is een gevolg van divergentie van de stroming. Deze divergentie ontstaat door de relatief grote dwarsdoorsnede ter plekke van de drempel en de aftappende werking van eb- en vloedscharen. Over een drempel ontwijken de eb- en de vloedstroom elkaar; ze stromen in van elkaar gescheiden delen van de geul over deze drempels.

Op de drempels van Baarland en Borssele, de westelijke drempels, stroomt de vloed dwars over de drempel. De hoeveelheid ebwater die via de drempel stroomt is gering. De drempels liggen op de grens tussen twee hoofdgeulen. Er wordt relatief weinig water uitgewisseld tussen beide hoofdgeulen.

In de Westerschelde komen tijdens maximum eb- en vloedstroom volgens bereke-

ningen met het model Scaldis100 in bochten dwarsverhangen voor die gemiddeld 5 cm/km groot zijn. De dwarsverhangen kunnen oplopen tot 11 cm/km in scherpe, negatieve bochten. De dwarsverhangen tijdens vloed zijn groter dan die tijdens eb. De dwarsverhangen wekken secundaire stromingen op met snelheden die liggen in de orde van enkele cm/s. De verhangen kunnen toenemen tot maximaal 11 cm/s. Dwarsverhangen kunnen door eb- en vloedscharen of havenhoofden teniet gedaan worden. Dwarsverhangen spelen vermoedelijk een niet te verwaarlozen rol in het gedrag van een drempel. Ook secundaire stromingen aangedreven door stroming dwars over geul, kunnen vermoedelijk een belangrijke rol spelen. Secundaire stroming veroorzaakt namelijk, in combinatie met de langsstroming, uitbochting van de geulen, waardoor ter hoogte van een drempel eb- en vloedgedomineerde geulen elkaar gaan ontwijken. Daarnaast is de secundaire stroming waarschijnlijk ook van belang voor de aanzanding van drempels: de secundaire stroming vervoert sediment van de buitenbocht, waar erosie plaatsvindt, naar de binnenbocht, waar sedimentatie optreedt.

Het gedrag van drempels in de Westerschelde
Een verkennende studie
.....

5 Synthese

5.1 Inleiding

Dit hoofdstuk presenteert een synthese van de tot nog toe verkregen inzichten over het gedrag van drempels in de Westerschelde. Deze -vooral uit de empirie afkomstige- inzichten worden eerst samengevat in paragraaf 5.2.1. Vervolgens worden deze inzichten geconfronteerd met wat in de literatuur bekend is over drempels in het algemeen en drempels in estuaria in het bijzonder.

Daarna volgt in paragraaf 5.3 per drempel een synthese van de belangrijkste mechanismen die in de Westerschelde het gedrag beïnvloeden.

5.2 Mechanismen

5.2.1 Het gedrag van drempels

Het gedrag van drempels in de Westerschelde lijkt na de literatuurstudie en de analyse van de morfologische ontwikkeling en van de waterbeweging door de volgende mechanismen verklaard te kunnen worden:

- 1 het uitdempfen van de secundaire stroming in de rechte overgang tussen twee tegengestelde bochten en het oversteken van de stroomdraad van de ene oever naar de tegenoverliggende;
- 2 het uiteenlopen van eb- en vloedgedomineerde geulen in het drempelgebied als gevolg van uitbochting;
- 3 vertraging van de stroming door de divergentie van de stroming door aftapping van water en door het brede, ondiepe karakter van de drempels met sterk uiteenlopende geulen en -in het geval van verdiepte drempels- door het te ruime geulprofiel.

Hieronder worden de mechanismen nader toegelicht:

- ad 1 de secundaire stroming veroorzaakt in een bocht een driehoekig geulprofiel dat in de buitenbocht het diepst is. In het rechte geuldeel op de overgang naar de volgende bocht, dempt de secundaire stroming uit en het geulprofiel wordt breed en ondiep. Ter hoogte van deze ondiepte steekt de stroomdraad van de buitenbocht over naar de buitenbocht van de tegenbocht. Dit is analoog aan de situatie in rivieren met 'pools' en 'riffles', oftewel diepe bochten en ondiepe rechte stukken. Dus door het uitdempfen van de secundaire stroming gaat het diepe driehoekige dwarsprofiel weer over in een breed en ondiep dwarsprofiel. De secundaire stromingen worden aangedreven door dwarsverhangen en op sommige plaatsen zeer waarschijnlijk ook door stroming dwars over een geul.
- In paragraaf 4.3 is voor de Westerschelde aangetoond dat er gedurende

een springtij in scherpe bochten dwarsverhangen, van maximaal 10 cm/km, en secundaire stromingen, van maximaal 10 cm/s, tijdens maximum stroom kunnen optreden.

De secundaire stroming zorgt waarschijnlijk voor aanzanding van de drempels. De secundaire stroming transporteert zand in het onderste deel van de verticaal naar de binnenbocht, waar sedimentatie plaatsvindt. Na de apex van een bocht neemt de secundaire stroming in grootte af en afhankelijk of de stroming vertraagd of versnelt kan dan sedimentatie respectievelijk erosie plaatsvinden.

- ad 2 ten gevolge van de bochtwerking in twee tegenovergestelde bochten die verschillend gedomineerd zijn, ontwijken eb- en vloedgedomineerde geulen, afkomstig uit de twee bochten, elkaar op de overgang tussen de beide bochten. Hierdoor ontstaat een relatief breed en ondiep geulprofiel met een eb- en een vloedgedomineerd gedeelte.

Behalve de secundaire stroming, die samen met de langsstroming verantwoordelijk is voor bochtwerking, zorgt de getijgedreven residuele stroming, vaak in de vorm van rond drempels draaiende neren, voor transport van sediment naar de drempel.

- ad 3 de divergentie van de stroming door aftapping zorgt voor een lager maximaal getijvolume over de drempel. De hoeveelheid eb- en vloedwater die over een drempel gaat, wordt bepaald door de hoeveelheid water die vóór de drempel door eb- dan wel vloedscharen wordt afgetapt. Deze hoeveelheid is bepalend voor de verhouding tussen de erosie en sedimentatie op een drempel gedurende een getij.

Volgens Blik en Ruijter (1994) is het de achterblijvende erosiekracht van de ebstroom, waardoor vloedsedimentatie niet wordt geërodeerd, de oorzaak van het ontstaan en in stand blijven van drempels.

Daarnaast is ook de snelheidsgradiënt van het water dat tijdens eb en vloed over de drempel stroomt van belang. De snelheidsgradiënt is vooral afhankelijk van de mate waarin een geulprofiel in evenwicht is met de heersende waterbeweging. Een te ruim profiel van een verdiepte drempel leidt eerst tot stroomvertraging gevolgt door een versnelling. Op een gebaggerde, dus te ruime drempel wordt een deel van de aanzanding van de drempels waarschijnlijk veroorzaakt door onder- en oververzadiging die weer een gevolg is van versnelling en vertraging van de stroming.

Bovenstaande mechanismen komen niet alle in dezelfde verhouding op de verschillende drempels voor. Dit hangt in eerste instantie vanaf of de drempel ontstaan is in het deel van het estuarium met één dan wel twee hoofdgeulen en in tweede instantie of op de drempel al dan niet wordt gebaggerd.

De invloed van de oversteek van de stroomdraad van de ene oever naar de andere en het uitdempen van de secundaire stroming van de bocht naar het rechte geulstuk is waarschijnlijk in het deel van de Westerschelde met twee hoofdgeulen voor de drempels niet van belang. De drempels daar, de Drempels van Baarland en Borssele, zijn van een geheel ander type dan die in het oosten en op deze

drempels speelt vooral de mate waarin beide hoofdstromen gescheiden zijn een rol. De scheiding van de waterbeweging in beide hoofdgeulen wordt beïnvloed door de mate van aftapping door eb- en vloedkortsluitgeulen. In het deel van het estuarium met één hoofdgeul, in het oosten, speelt het uitdempen van de secundaire stroming en de ligging op de overgang tussen twee bochten wel een belangrijke rol.

Indien er op een drempel gebaggerd is, waardoor deze een te ruim geulprofiel heeft, is het te ruime profiel, samen met de mate van aftapping door scharen van water vóórdat het water de drempel over gaat, van invloed op de snelheidsgradiënt over de drempel en dus op de aanzandingssnelheid op een drempel.

De gevolgen van veranderingen in de bovengenoemde factoren die verschillende parameters en uiteindelijk de minimale drempeldiepte bepalen worden hieronder nader toegelicht. De redeneringen betreffen een bocht-drempel-bocht systeem met een gesloten zandbalans. In tabel 5.1 worden de redeneringen samengevat.

- a. Een toename van de secundaire stroming, ongeacht het gevolg, heeft in een systeem met een vaste geulgeometrie, dus als er geen uitbocht plaatsvindt, en zonder aftapping, uiteindelijk een onduidelijk gevolg voor de minimale drempeldiepte. Door de toegenomen secundaire stroming zal het driehoekige profiel in de bocht uitdiepen. Het zand dat hierbij vrijkomt moet binnen het bocht-drempel-bocht systeem blijven en zal waarschijnlijk in de binnenbocht c.q. op de drempel sedimenteren. Ook de verhoogde concentraties en het transport van materiaal door de secundaire stroming richting drempel leiden waarschijnlijk tot een kleinere minimale diepte van de drempel.
- b. De geulgeometrie ligt echter meestal niet vast en door de vergroting van de secundaire stroom vindt uitbocht plaats. Dit heeft behalve vergrote concentraties en vergrote aanzanding van de drempel door erosie van de buitenbocht, ook toenemende ontwijking van de eb- en vloedgedomineerde geul in het drempelgebied als consequentie. Hierdoor raken eb- en vloedstroom sterker van elkaar gescheiden -de interne dominantie van de geul bij de drempel neemt toe- en het geulprofiel wordt breder en ondieper. Een bredere en ondiepere drempel heeft ook gevolgen voor de divergentie van de stroming op de drempel. Deze wordt vergroot. Waarschijnlijk leidt dit ook tot een kleinere minimale diepte van de drempel.
- c. Indien de divergentie van de stroom door de aftapping van eb- en vloodscharen wordt verminderd, wordt meer water gedwongen over de drempel te stromen. Gegeven de empirische relatie tussen getijvolume en doorstroomoppervlak zal het zand op de drempel zodanig herverdeeld worden dat de geul ter plekke minder breed en dieper wordt. Dit heeft dus een grotere minimale diepte van de drempel tot gevolg.
Vermindering van de divergentie van de stroom door vermindering van het baggeren waardoor het drempelprofiel minder uit evenwicht is heeft op den duur verminderende aanzanding van de drempel tot gevolg. De minimale diepte van de drempel wordt kleiner.

	h_b	$u_{l,d}$	c	i.d.	sed_d	$h_{d,min}$
a $U_s \uparrow$ (vaste geulgeometrie)	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	0	$\uparrow$	?
b $U_s \uparrow$ (géén vaste geulgeometrie)	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\downarrow$
c aftapping $\downarrow$	-	$\uparrow$	$\uparrow$	?	$\downarrow$	$\uparrow$
waarin:	U_s	= secundaire stroming				
	$h_{d,min}$	= minimale diepte drempel				
	h_b	= diepte bocht				
	c	= zandconcentratie				
	$u_{l,d}$	= langastroming over drempel				
	sed_d	= sedimentatie op drempel				
	i.d.	= interne dominantie drempel				

Tabel 5.1 Gevolgen voor verschillende parameters van veranderingen in de factoren die het gedrag van een drempel bepalen

Aangetekend moet worden dat de hierboven geponeerde gevolgen op de evenwichts-
diepte van een drempel, door veranderingen in de factoren die de het gedrag
van een drempel sturen indicatief zijn, aangezien nog onbekend is hoe de di-
verse mechanismen elkaar onderling beïnvloeden.

5.2.2 Discussie

De in hoofdstuk 2 samengevatte kennis over drempels in de literatuur wordt
over het algemeen niet tegengesproken door de waarnemingen van de morfologi-
sche ontwikkeling van de Westerschelledrempels en de berekeningen van de stro-
ming op de drempels. Het belang dat in de literatuur wordt gehecht aan m.n.
secundaire stroming voor het gedrag van drempels wordt bevestigd evenals het
belang van de mechanismen als uitbocht, ontwijking van verschillend gedomi-
neerde geulen, divergentie van de stroom over een drempel.
Hieronder worden nog vier mechanismen die onduidelijk zijn besproken. Vervol-
gens wordt de invloed van baggeren op de drempels nader beschouwd.

- (1) De stroombanen uit Scaldis100 laten op de oostelijke drie drempels de
oversteek van de stroomdraad van de ene naar de andere oever zien. Op de

westelijke drempels is dat niet het geval. Op de westelijke drempels speelt de oversteek van de stroomdraad en het overgaan van een driehoekig geulprofiel naar een rechthoekig geulprofiel dan ook geen rol in het gedrag van deze drempels. Overigens is niet goed in te schatten welk deel van de geometrie van de oostelijke drempels bepaald wordt door het oversteken van de stroomdraad en het uitdempen van de secundaire stroming en welk deel door andere mechanismen.

- (2) Door Reussink (1991) werd uit de bodemvormen afgeleid dat op twee gebag-gerde drempels drempelopwaarts zowel de eb- als de vloedstroom zullen ver-snellen. Uit de analyse van de stroombeelden blijkt echter dat op deze drempels de eb- en de vloedstroom juist drempelopwaarts vertragen. Dit is tegenstrijdig en kan verklaard worden doordat de verandering van de bodem-ribbels drempelopwaarts mogelijk een gevolg is van afname van de geuldiep-te. Overigens is de relatie tussen versnellende en vertragende stroom met de duinvorm speculatief. Uit fossiele afzettingen blijkt dat bij vertra-gende stroom de duinen langer en hoger worden. Waarom is onbekend (monde-linge mededeling Van den Berg).
- (3) In Allersma (1994) wordt gesteld dat de dwarsstroming ten gevolge van Co-riolisversnelling tijdens gemiddelde condities ongeveer van gelijke groot-te zijn als die door centrifugaalkrachten opgewekt. Echter de geometrie van een estuarium wordt bepaald door de maximum stroomsnelheden tijdens een springtij (o.a. Allersma, 1994; Blik en Ruijter, 1994; Gerritsen en De Jong, 1983). Uit de analyse van de dwarsverhangen blijkt dat juist dan de Coriolisversnelling van weinig belang is. De secundaire stroming ten gevolge van de Coriolisversnelling is ongeveer 15 % van die door centrfu-gaalkrachten opgewekte secundaire stroming. De Coriolisversnelling heeft hooguit een modificerende invloed op de resultante van de centrifugaal-krachten en de Coriolisversnelling. Dus de invloed van secundaire stromen op de morfologie wordt voornamelijk bepaald door de centrifugaalkrachten.
- (4) De aanzanding van de drempels door aanzanding in de binnenbocht, die ge-suggereerd wordt in de literatuur (o.a. Van Veen, 1950; Bridge en Jarvis, 1982), lijkt te worden bevestigd door de vorm van de drempels. Op de Drem-pel van Hansweert bijvoorbeeld, bestaat de drempel deels uit de binnen-bocht van de vloedgedomineerde geul en deels uit de binnenbocht van de ebgedomineerde geul.

Behalve door min of meer natuurlijke mechanismen als uitbochtting en divergen-tie van de stroming wordt de geometrie van vooral de oostelijke drie drempels de laatste 25 jaar sterk bepaald door bagger- en stortwerkzaamheden. Waar-schijnlijk hebben deze werkzaamheden tot gevolg gehad dat de oostelijke drem-pels van een 'botsende geulen'-type naar een meer 'ontwijkende geulen'-type zijn overgegaan.

Het baggeren vindt plaats op of in de omgeving van de drempel en het storten in nevengeulen of langs eroderende geuloevers. Door het baggeren werd de weer-stand ten opzichte van de nevengeulen sterk verminderd waardoor het water bij-

voorkeur door de hoofdgeul wordt getrokken. Het gevolg van het storten in nevengeulen is mogelijk de vermindering van de aftapping van water vóór dat het de drempel overstroomt. Deze bagger- en stortstrategie kan de invloed van de bidirectionele stroming niet verhinderen: de eb- en vloedgedomineerde geulen blijven elkaar nabij de drempel ontwijken.

Het is lastig om de gevolgen van baggeren en storten op de oostelijke drempels te onderscheiden van andere 'natuurlijke' factoren zoals de 18.6 jarige getijcyclus, toename van het getijverschil of grootschalige geulontwikkelingen. Toch lijken deze factoren ondergeschikt aan de effecten van het baggeren en storten.

Dat de baggerwerken grote invloed hebben, kan met een voorbeeld van de Drempel van Hansweert worden aangetoond. In de jaren '30 toen de baggerwerkzaamheden op deze drempel nog minimaal waren en de drempel van het 'botsende ebgeul'-type was, kwam het merendeel van het vloedwater uit het Middelgat en stroomde grotendeels vóór de drempel langs, de Schaar van Waarde in.

Sindsdien is, tot op het huidige moment, het Middelgat steeds minder water gaan voeren ten gunste van de Overloop van Hansweert. Omdat het vloedwater vanuit de Overloop van Hansweert een veel scherpere bocht om de Plaat van Ossensisse moet nemen dan toen het voornamelijk nog uit het Middelgat kwam, zou verwacht mogen worden dat het merendeel van het vloedwater de neiging heeft de Schaar van Waarde in te stromen omdat de bocht naar het Zuidergat via de Drempel van Hansweert veel scherper is (kleinere bochtstraal). Dit is echter niet het geval. De verhouding tussen het getijvolume dat door het de Schaar van Waarde en het Zuidergat stroomt is juist veranderd ten gunste van het Zuidergat. De min of meer natuurlijke neiging van het water om uit de bocht te schieten, de Schaar van Waarde in, vindt niet plaats. Dit wordt hoogstwaarschijnlijk veroorzaakt door de baggerwerkzaamheden op de Drempel van Hansweert en de stortingen in de Schaar van Waarde.

5.3 Mechanismen per drempel

Drempel van Bath

Het ontstaan van deze drempel is waarschijnlijk vooral het gevolg van het elkaar ontwijkende Nauw van Bath en het Vaarwater boven Bath, waardoor de eb en de vloed elkaar sterk ter plekke van de drempel ontlopen.

Een deel van de aanzanding van deze -verdiepte- drempel wordt mogelijk veroorzaakt door aanvoer van zand door de Schaar van de Noord tijdens vloed. Dit sediment bezinkt zodra het snel stromende water uit de Schaar van de Noord het Vaarwater boven Bath bereikt en vertraagd. De ebstroming is niet in staat dit materiaal op te ruimen. Het is zelfs waarschijnlijk dat tijdens eb ook sedimentatie plaats vindt door de vertragende ebstroming boven de drempel. Zowel tijdens eb als vloed vindt sedimentatie plaats ten gevolge van vertraging van de stroomsnelheden.

Aanzanding van de binnenbocht door de secundaire stroming zal voor de drempel

alleen tijdens vloed een, overigens vergeleken met de andere aanzandingsmechanismen een geringe, rol spelen.

Drempel van Valkenisse

De drempel dankt zijn ontstaan aan het elkaar ontwijken van de Overloop van Valkenisse en het Nauw van Bath en de daarmee gepaard gaande aftapping van vloedwater door de Schaar van de Noord en van ebwater door de Zimmermangeul. Aanzanding op deze -verdiepte- drempel lijkt momenteel vooral een gevolg van een vertragende en een versnellende stroom over de drempel. Mogelijk zorgt de, stroomafwaarts van de drempel gelegen, vloedgedomineerde Schaar van Valkenisse nog voor enige aanvoer van zand op de drempel.

Drempel van Hansweert

Het gedrag van de drempel, de evenwichtsdiepte, wordt primair bepaald door het maximale getijvolume dat over de drempel stroomt; dus door de mate van aftapping door nevengeulen vóór de drempel.

De aanzanding op deze drempel wordt veroorzaakt door de secundaire stroming. Dit veroorzaakt tijdens eb en vloed sedimentatie in de binnenbocht. Daarnaast zal op deze verdiepte drempel aanzanding door vertraging en versnelling van de stroming een belangrijke rol spelen: de eb- en de vloedstroom vertragen drempelopwaarts. Een gedeelte van deze vertraging wordt veroorzaakt door de aftappende werking van het vloedwater door de Schaar van Waarde en van ebwater door de Schaar van Ossenissee.

Drempel van Baarland

De Drempel van Baarland wordt gevormd door de ondiepe rug tussen de twee hoofdgeulen Middelgat/Everingen en Gat van Ossenissee/Pas van Terneuzen. De mate waarin de hoofdstromen langs elkaar stromen, dus de mate van aftapping, bepaald de morfologische ontwikkeling van de drempel. De divergentie van de stroming door aftapping en daarmee de grootte van het maximale getijvolume over de drempel is een belangrijk mechanisme voor het gedrag van de drempel. De mate van aftapping wordt bepaald door het uitbochten van verschillende nevengeulen in de delta.

Secundaire stroming lijkt voor de aanzanding hier geen belangrijke rol te spelen. Deze drempel is niet verdiept en daarom zal aanzanding door onder- en oververzadiging geen rol van betekenis hebben.

Drempel van Borssele

De Drempel van Borssele ligt aan het eind van de ebgedomineerde Pas van Terneuzen, op de ondiepe rug tussen de twee hoofdstromen Everingen/Honte en Pas van Terneuzen/Schaar van de Spijkerplaat. Evenals bij de Drempel van Baarland

is de mate waarin beide hoofdstromen langs elkaar stromen, dus de mate van aftapping, bepalend voor de morfologie van de drempel.

Er stroomt, door aftapping door de ebkortsluitgeul in het gebied van de Schaar van de Spijkerplaat weinig ebwater over de drempel. Ook het vloedvolume is gering, waardoor het doorstroomoppervlak van de drempelgeul ook gering is.

De aanzanding van de drempel wordt voor een groot deel veroorzaakt door de vloed die vanuit het Schaar van de Spijkerplaatgebied dwars over de drempel stroomt. Boven de drempel vertraagt de stroom en er treedt sedimentatie op. Op deze -verdiepte- drempel vindt waarschijnlijk een deel van de aanzanding plaats door middel van residueel transport ten gevolge van onder- en oververzadiging.

6 Conclusies

De belangrijkste conclusies uit het verkennende onderzoek naar het gedrag van drempels in de Westerschelde zijn:

- * er zijn drie hoofdtypen drempels te onderscheiden: het 'ontwijkende geulen'-type, het 'botsende geulen'-type en het 'parallele geulen'-type. Het 'botsende geulen'-type is weer onderverdeeld in het 'botsende ebgeul'-type en het 'botsende vloedgeul'-type, waarvan het laatste type niet in het hoofdvaaarwater in de Westerschelde voorkomt.
De drempels in de Westerschelde hebben alle drempels in het deel van het estuarium met een hoofdgeul een vorm die zich bevindt tussen de uiterste verschijningsvormen het 'ontwijkende geulen'-type en het 'botsende ebgeul'-type. In het deel van het estuarium met twee of meer hoofdgeulen bevinden de vormen van de drempels zich tussen de uiterste verschijningsvormen 'parallele geulen'-type en 'botsende ebgeul'-type.
Het 'ontwijkende geulen'-type en het 'parallele geulen'-type hebben vergeleken met het 'botsende geulen'-type een kleine externe dominantie en een hoge interne dominantie. Externe dominantie is het verschil tussen eb- en vloed debiet per geul; interne dominantie is het verschil tussen eb- en vloeddebiet binnen een geul. De drie typen drempels komen voor aan het einde van een ebgedomineerde geul waar eb- en vloedgedomineerde geulen samenkomen.
- * de drempels in het oosten van de Westerschelde, de drempels van Bath, Valkenisse en Hansweert, hebben sedert halverwege deze eeuw allen een verandering van 'botsende ebgeul'- naar een meer 'ontwijkende geulen'-type ondergaan. Deze ontwikkeling was met name sterk sinds het begin van de jaren '70. De oorzaak hiervan ligt in de baggerwerkzaamheden die de geulen beter op elkaar laat aansluiten en de interne dominantie van de drempelgeul verlagen.
- * de drempels in het westen, de drempels van Baarland en Borsselle, zijn van het 'botsende ebgeul'-type overgegaan in het 'parallele geulen'-type. In de loop van de tijd is de waterbeweging in de hoofdgeulen steeds meer gescheiden geraakt waardoor de drempels ondieper werden. De oorzaak van de wijziging in de debietverdeling tussen de hoofdgeulen is het gevolg van groot-schalige morfologische veranderingen. Baggerwerkzaamheden hebben op deze drempels niet een allesoverheersende invloed zoals in het oosten. Dit komt door de schaal van het systeem die in het westen veel groter is dan in het oosten en daardoor moeilijker te beïnvloeden is, en door de naar verhouding geringe baggerwerkzaamheden op met name de Drempel van Baarland.
- * modelberekeningen laten een op de oostelijke drie drempels divergentie van de stroming zien bij het aanstromen van de drempel: de stroming die uitspreidt en vertraagt is duidelijk in een deel van de drempelgeul geconcentreerd. Bij het afstromen van de drempel convergeert en versnelt de stroming. Daarnaast vindt aftapping door nevengeulen van water plaats voor het de drempel overstroomt.
- * op de westelijke drempels stroomt het water in de hoofdgeulen sterk geschei-

den van elkaar; de drempels bevinden zich tussen beide hoofdgeulen. Tijdens vloed stroomt het water dwars over de beide drempels en heeft waarschijnlijk sterke aanzanding tot gevolg. Tijdens eb stroomt het water in lengterichting over de drempel. Een belangrijke factor voor het gedrag van deze drempels is aftapping van water van vooral eb- en vloedscharen vóór het de drempel overstroomt. De aftappende werking van eb- en vloedscharen kan ook een dwarsverhang die in een bocht is ontstaan opheffen en daarmee de secundaire te niet doen.

- * uit modelberekeningen blijkt dat er vooral in bochten die een kleine bochtstraal hebben en tegen de rechteroever van de rivier liggen grote dwarsverhangen kunnen optreden. Deze dwarsverhangen kunnen bij maximum stroom tijdens een gemiddeld springtij oplopen tot ongeveer 10 cm/km. De bijbehorende dwarsstromen zijn in de orde van 10 cm/s.
- * secundaire stroming wordt ook opgewekt door stroming dwars over een geul en is daar zeer waarschijnlijk van belang voor de bochtwerking

De volgende hypothesen zijn opgesteld om het gedrag van drempels te verklaren:

- * Analooq aan een rivier dempt na een bocht de secundaire stroming uit en het bijbehorende dwarsprofiel van de geul gaat over van driehoekig naar rechthoekig; op de plaats nu waar de stroomdraad van de ene oever naar de andere oever oversteekt bevindt zich een drempel. Dit mechanisme wordt geacht de basis te zijn voor het optreden van drempels in het oosten van de Westerschelde;
- * Ten gevolge van bochtwerking in twee verschillend gedomineerde bochten ontlopen de eb- en de vloedgedomineerde geul elkaar op de overgang tussen beide bochten. Hierdoor ontstaat een breed, ondiep geulprofiel met sterk gescheiden stroombanen voor eb- en vloed. De bochtwerking wordt veroorzaakt door secundaire stroming in combinatie met de primaire langestroming. De secundaire stroming is weer het gevolg van een samenspel van de Coriolisversnelling en vooral de centrifugaalkrachten.
- * Divergentie van de stroming, ten gevolge van aftapping van de eb- en vloedstroom door nevengeulen, beïnvloedt het maximale getijvolume over een drempel en daarmee, gegeven de empirische relatie tussen het maximale getijvolume en de dwarsdoorsnede, de evenwichtsdiepte van de drempel.
- * Divergentie van de stroom ontstaat ook door het breder en ondieper worden van geul drempelopwaarts. In het geval van een verdiepte drempel leidt deze divergentie tot een vertraging drempelopwaarts en versnelling drempelafwaarts van zowel de eb- als de vloedstroom. Deze snelheidsgradiënt zorgt mede voor de aanzanding van de drempel.

De aanzanding van drempels vindt plaats door de volgende mechanismen:

- * de secundaire stroming veroorzaakt een component van het zandtransport in de

richting van de drempel;

- * in het geval van te ruime, verdiepte drempels vertraagt de stroming richting een drempel; na de drempel versnelt deze weer: er is een gradiënt in de snelheid ontstaan. Ten gevolge van deze snelheidsgradiënt kan aanzanding van de drempel plaatsvinden door onder- en oververzadiging.
- * Getijgedreven residuele stroming (GRS), horizontale circulatiepatronen, die vaak in de vorm van neren rondom platen voorkomen en ter hoogte van drempels goed ontwikkeld zijn.

Het gedrag van drempels in de Westerschelde
Een verkennende studie
.....

Literatuur

- Allersma, E., 1992. Studie inrichting oostelijk deel Westerschelde. Analyse van het fysische systeem. Waterloopkundig Laboratorium/WL Z368.
- Allersma, E., 1994. Geulen in estuaria. 1-D modellering van evenwijdige geulen. Waterloopkundig Laboratorium/WL H 1828, 59 pp.
- Berben, F., 1985. Meandergeometrie en morfodynamisch gedrag van estuariumgeulen (onderzoek aan de hand van literatuur en andere documentatie). Rijkswaterstaat, DGW, Nota GEOMOR 862, 128 pp.
- Bestuurlijk Klankbordforum Westerschelde, 1991. Beleidsplan Westerschelde, Rijkswaterstaat, Directie Zeeland, 92 pp.
- Bliek, A.J., 1995. Autonome ontwikkeling Westerschelde. Ingenieursbureau Svasek, project 976 (concept).
- Bliek, A.J. en M.N. Ruijter, 1994. Verklarend onderzoek drempels Westerschelde. Ingenieursbureau Svasek, project 940.
- Bliek, A.J. en C. Storm, 1995. Bars and maintenance dredging in the Western Scheldt. Ingezonden t.b.v. World Dredging Congress, Amsterdam, november 1995.
- Booij, R. en J.P.Th. Kalkwijk, 1983. Secondary flow in estuaries due to the curvature of the main flow and to the rotation of the earth and its development. Rijkswaterstaat, GEOMOR-nota 83.05, 37 pp.
- Booij, R. en J.P.Th. Kalkwijk, 1986. Adaptation of secondary flow in nearly-horizontal flow. *Journ. of Hydraulic Research*, Vol. 24 (1), pp. 19-37.
- Bucx, T.H.M. en Tobias, F.C., 1989. Een onderzoek naar de bodemmorfologie van het oostelijk deel van de Westerschelde 1985 - 1986. Stageverslag Fysische Geografie RUU/Rijkswaterstaat, 78 p.
- Bridge, J.S. en J. Jarvis, 1982. The dynamics of a river bend: a study in flow and sedimentary processes. *Sedimentology*, 29, 4, pp. 499 - 451
- De Jong, H., 1989. Debietgegevens van de Westerschelde vanaf 1932 (voorlopige versie). Rijkswaterstaat, DGW, Nota GWA0-89.1004.
- Dekker, L., P. Lieveense en C. Van der Male, 1994. Calibratie en verificatie Scaldis100, Rijkswaterstaat, RIKZ, Werkdocument RIKZ/AB-94.839X
- Dekker, L., 1995. Westerschelde Scaldissimulatie 29 juni 1992. Rijkswaterstaat, Directie Zeeland. Memo
- De Looff, D., 1982. Ontwikkeling Vaarwater boven Bath en Nauw van Bath c.a. in samenhang met uitgevoerde drempelverlaging en afvoer van specie. Rijkswaterstaat, Directie waterhuishouding en waterbeweging, Adviesdienst Vlissingen, WWKZ 82.V006., 24 pp.
- De Looff, D. en J. Van Malde, 1976. Over de cyclus der zogenaamde drempelgeulen in de oostelijke uitloop van de Zimmermangeul. Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en waterbeweging. Studiedienst Vlissingen, Rijkswaterstaatserie 22, 64 pp.
- Garritsen, F. en H. de Jong, 1983. Stabiliteit van doorstroomprofielen in de Westerschelde. Rijkswaterstaat, Nota WWKZ-83.V008.
- Jeuken, M.C.J.L., 1992. Een analyse van stroom- en sedimenttransportmetingen

- in het oostelijke deel van de Westerschelde. Rijkswaterstaat, Directie Zeeland, Nota NWL-92.17.
- Kitanidis, P.K. en J.F. Kennedy, 1984. Secondary current and river-meander formation. *J. Fluid Mech.*, 144, pp. 217-229.
- Kjerfve, B., 1978. Bathymetry as an indicator of net circulation in well mixed estuaries. *Limnol. Oceanogr.*, 23 (4), pp. 816 - 821.
- Louisse, C.J. en J.H. Van den Berg, 1984. Grootschalige slibtransportpatronen in de Oosterschelde. Rijkswaterstaat, Deltadienst, 84-FA-115.
- Peters, J.J. en A. Sterling, 1976. Hydrodynamiques et transports de sediments de l'estuaire de l'Escaut. In: *L'estuaire de l'Escaut*. Nihoul, C.L. en R. Wollast (eds.) Rapport Final Project Mer, Volume 10. Bruxelles, Belgique.
- Reussink, G., 1991. De bodemmorfologie in de geulen van het oostelijk deel van de Westerschelde. In: *Ribbelpatronen en zandtransporten in de Westerschelde*. Stagerapport RUU Fysische Geografie/Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, DGW Werkdocument 92-808X.
- Richards, K., 1982. *Rivers. Form and process in alluvial channels*. Methuen, London and New York, 357 pp.
- Storm, C., 1994. Geometrie versus hydrodynamica rondom drempels (voorstel vervolgdrempelonderzoek). Rijkswaterstaat, RIKZ, Werkdocument Zand Oostwest II, ZA-94.114.
- Storm, C., 1995. Residuele zandtransporten in de Westerschelde. Rijkswaterstaat, RIKZ Werkdocument 95...X, in voorbereiding.
- Tsujiimoto, T., 1989. Longitudinal stripes of sorting due to cellular secondary currents. *Journ. of Hydrosience and Hydraulic Engineering*, 7.
- Vit den Bogaard, L.A., 1995. Resultaten zandbalans Westerschelde 1955 - 1993. Universiteit Utrecht, IMAU R 95-8, 48 pp.
- Van Dam, D. en C.J. Quartel, 1992. Zandhuishouding en drempeldiepten in de Westerschelde 1985 t/m 1990. Rijkswaterstaat, Directie Zeeland, NWL-92.19.
- Van den Berg, J.H., M.C.J.L. Jeuken en A.J.F. Van der Spek, 1994. Hydraulic and morphological evolution of the Westerschelde estuary (concept). In: *Estuarium shores: Hydrological, geomorphological and ecological interaction*. C.T. Romack en K.F. Nordstrom (eds.)
- Van der Male, C., 1993. Euleriaanse reststromen op de Westerschelde berekend met DETWES. Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, GWWS-93.839x/ZA-93.77, 7 p.
- Van der Male, C., 1993. 2DH-waterbewegingsmodel DETWES. Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, Werkdocument GWWS-93.868X.
- Van Kleef, A.W., 1994. Verklaring voor de veranderingen in de grootschalige zandbalans van het gebied rond het Middellgat, Westerschelde. Rijkswaterstaat, Directie Zeeland, afdeling NWL (concept)
- Van Rijn, L.C., 1990. *Principles of fluid flow and surface waves in rivers, estuaries, seas and oceans*. Aqua publications, Amsterdam, 335 pp.
- Van Veen, J., 1950. Eb- en vloodschaar systemen in de Nederlandse getijdewateren. *Tijdschrift KNAG*, 2e reeks, deel 67, p. 303-325.
- Waterbouwkundig Laboratorium Borgerhout, 1994. MOD. 500-2 Overzichtsmodel Was-

terschalde. Bouw en ijking van het model. 94-3.
Winkley, B.R., 1989. The cause and cure of low water navigation problems on
alluvial rivers. P.I.A.N.C. Bulletin, 64, pp. 188 - 197.

Het gedrag van drempels in de Westerschelde
Een verkennende studie

Figuren en Bijlagen

Rapport in opdracht van het
Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ) &
Directie Zeeland,
Rijkswaterstaat
Project Monitoring Verdieping (MOVE)

Augustus 1995

drs F.T.G. Tank
Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen
Vakgroep Fysische Geografie
Universiteit Utrecht

IMAU Rapport R 95-18

Lijst van figuren

- Figuur 1.1 Westerschelde. Belangrijkste drempels
- Figuur 2.1 Schema van een ideaal systeem van een ebgeul en vloodschaar (Westerschelde)
- Figuur 2.2 Invloed van de dijken op de geulconfiguratie
- Figuur 2.3 Bimodale geulprofielen afwaarts en opwaarts van de Drempel van Valkenisse en een redelijk symmetrisch profiel, zij het breed en ondiep, op de drempel zelf (let op de verticale schaal!)
- Figuur 2.4 Kenmerkende geulconfiguratie ten opzichte van een drempel: vloodschaar stroomafwaarts en ebkortsluitgeul stroomopwaarts van de drempel
- Figuur 2.5 Erosie en sedimentatie in een bocht
- Figuur 2.6 Verschuiving van de lokatie van maximale erosie (-) en sedimentatie (+) met het veranderen van het debiet (stromingsrichting van links naar rechts)
- Figuur 2.7 Ontwijkend gedrag van eb- en vloed gedomineerde geulen door bochtwerking
- Figuur 2.8 Secundaire stroming aangedreven door stroming dwars over geul
- Figuur 2.9 Primaire en secundaire stroomprofielen
- Figuur 2.10 Schema van het ontstaan van put-drempel/'pool-riffle'-sequentie ten gevolge van meerdere cellen met secundaire stroming
- Figuur 2.11 Curves van de secundaire stroming ten gevolge van centrifugaalkrachten voor variërende waarden van de frictie-coëfficiënt
- Figuur 2.12 Curve van de secundaire stroming opgewekt door centrifugaalkrachten met de variatie van $\beta (= v_e R / v_h)$ met de diepte
- Figuur 2.13 Schematische weergave van onder- en oververzadigde getijstromen in de aanloop naar een sterk verruimd geuldeel (bijv. drempel)
- Figuur 2.14 Schema van een zandneer rondom een plaat
- Figuur 2.15 Euleriaanse reststromen voor een gemiddeld getij voor het westen van de Westerschelde
- Figuur 2.16 Euleriaanse reststromen voor een gemiddeld getij voor het oosten van de Westerschelde
- Figuur 3.1 Drempeltypen in de Westerschelde
- Figuur 3.2 Interne dominantie
- Figuur 3.3 Overgang van een 'botsende ebgeul'-type drempel naar een 'ontwijkende geulen'-type drempel. Drempel van Hansweert
- Figuur 3.4 Overgang van een 'botsende ebgeul'-type drempel naar een 'parallelle geulen'-type drempel. Drempel van Borssele
- Figuur 3.5 Westerschelde. Namen van geulen en platen
- Figuur 3.6 Westerschelde. Baggergebieden
- Figuur 3.7 Westerschelde. Stortgebieden
- Figuur 3.8 Jaarlijkse baggerhoeveelheden op en minimale diepte van de drempels van Bath (I), Valkenisse (II), Hansweert (III) en Borssele (IV). Diepte van drempels tov. GLLWS

Figuur 3.9 Verloop van de gemiddelde geuldiepte (beneden NAP 2 m) in het oosten van de Westerschelde (lodingsvak 1)

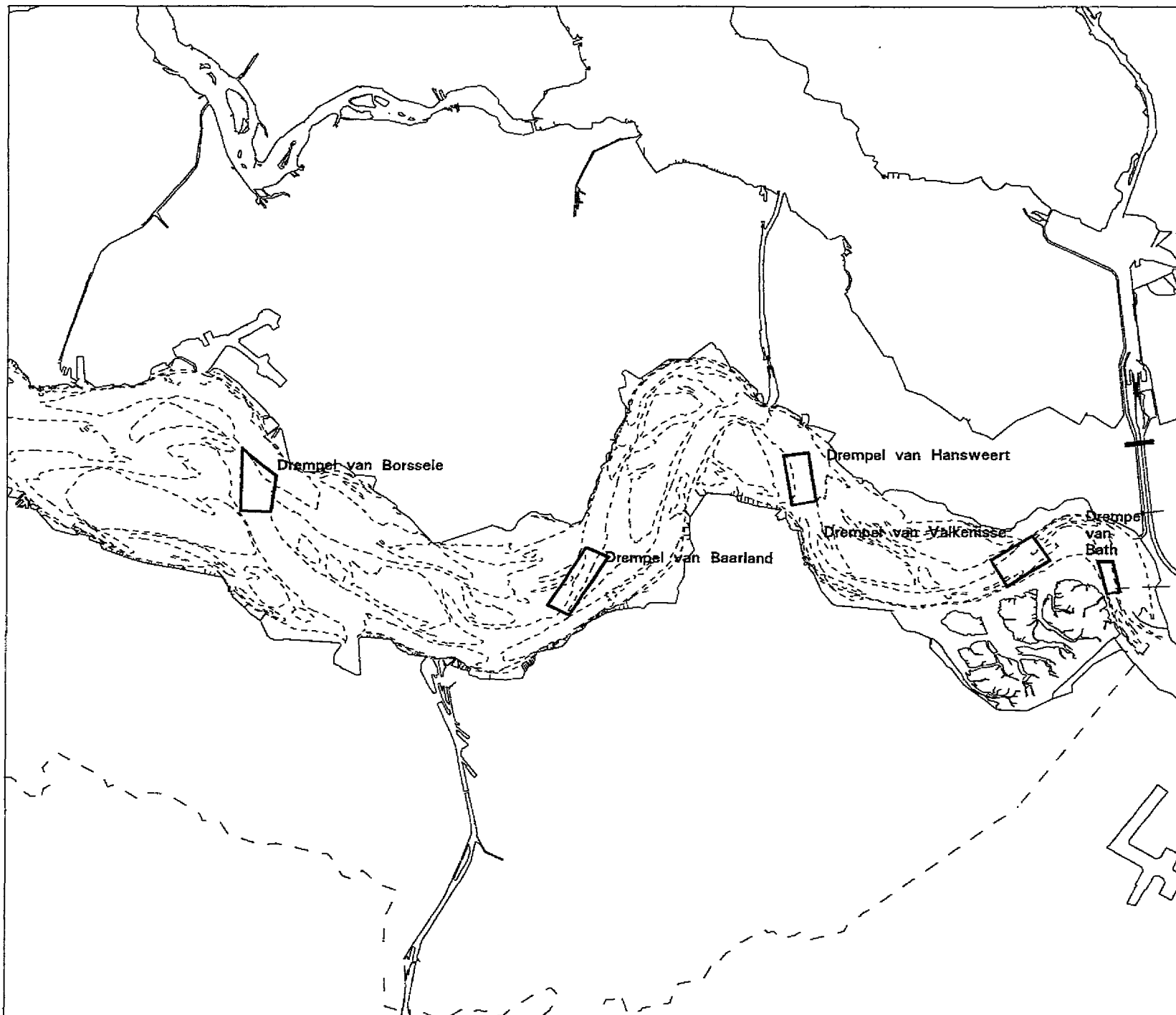
Figuur 4.1 Netwerk Scaldis100: ten westen van Baalhoek rechthoekig en een vaste maaswijdte en ten oosten van Baalhoek kromlijinig en een variërende maaswijdte

Figuur 4.2 Verloop HW en LW tijdens een gemiddeld springtij op 10 april 1989 van Vlissingen tot Antwerpen

Lijst van bijlagen

- Bijlage A. Bodemligging van de drempels van Bath, Valkenisse, Hansweert, Baarland en Borssele in de jaren 1931
- Bijlage B. Gemiddelde stroomsnelheden op de drempels van Bath, Valkenisse, Hansweert, Baarland en Borssele tijdens maximum eb- en vloedstroom ten tijde van een gemiddeld springtij (25 november 1988) berekend met Scaldis100
- Bijlage C. Waterstanden in het oostelijk, midden en westelijk deel van de Westerschelde tijdens maximum eb- en vloedstroom ten tijde van een gemiddeld springtij (25 november 1988) zoals berekend met Scaldis100
- Bijlage D. Oppervlakte stroomsnelheden op de drempels van Bath, Valkenisse, Hansweert, Baarland en Borssele tijdens maximum eb- en vloedstroom ten tijde van een gemiddelde springtij (29 juni 1992) uit het model van het WLB
- Bijlage E. Voorbeeld van berekening van dwarsverhangen en secundaire stroomsnelheden zoals gebruikt in tabel 4.1

Figuren



Westerschelde

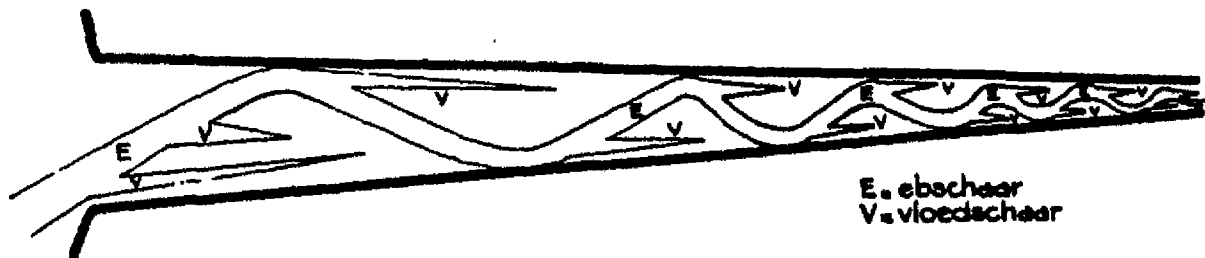
Belangrijke drempels

Schaal: 1:225.000

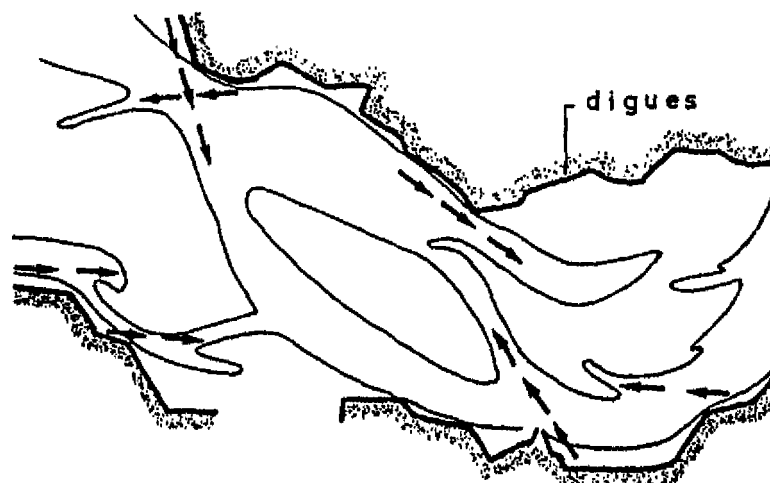
Oostwest * MOVE



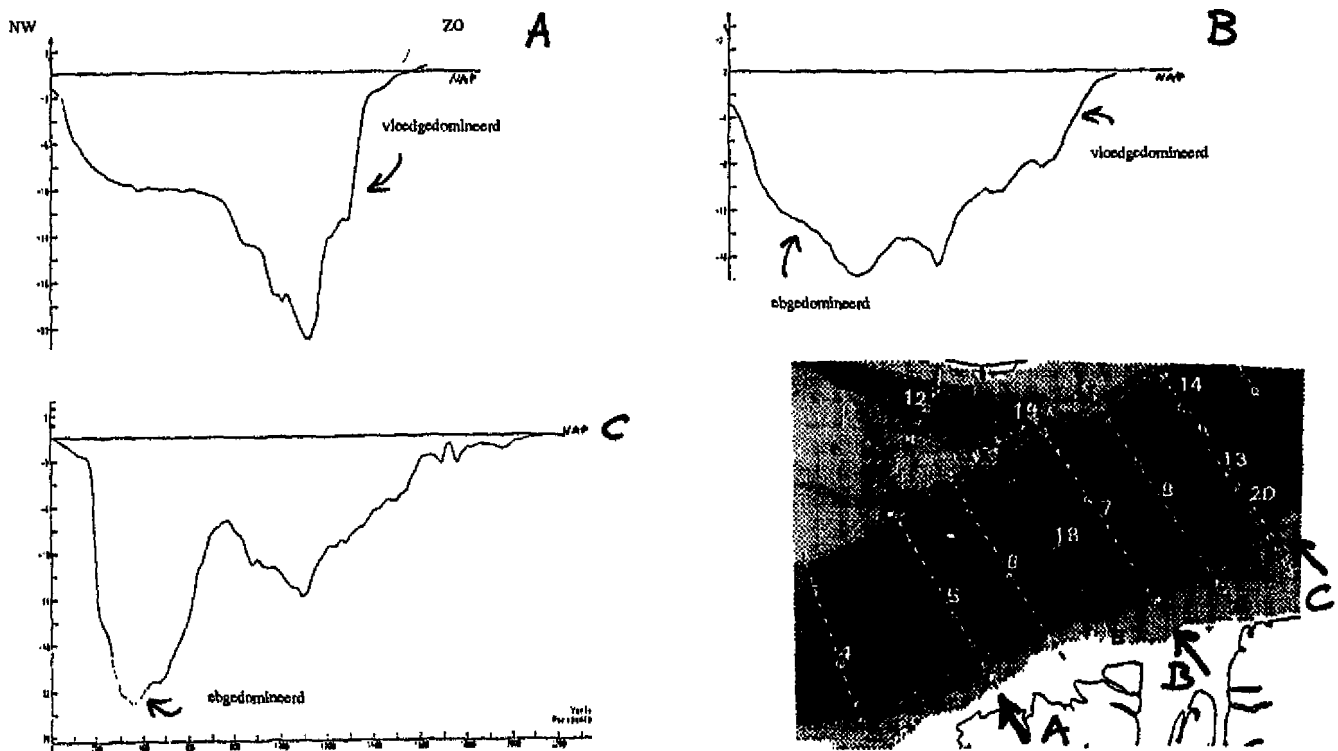
Rijksinstituut voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat



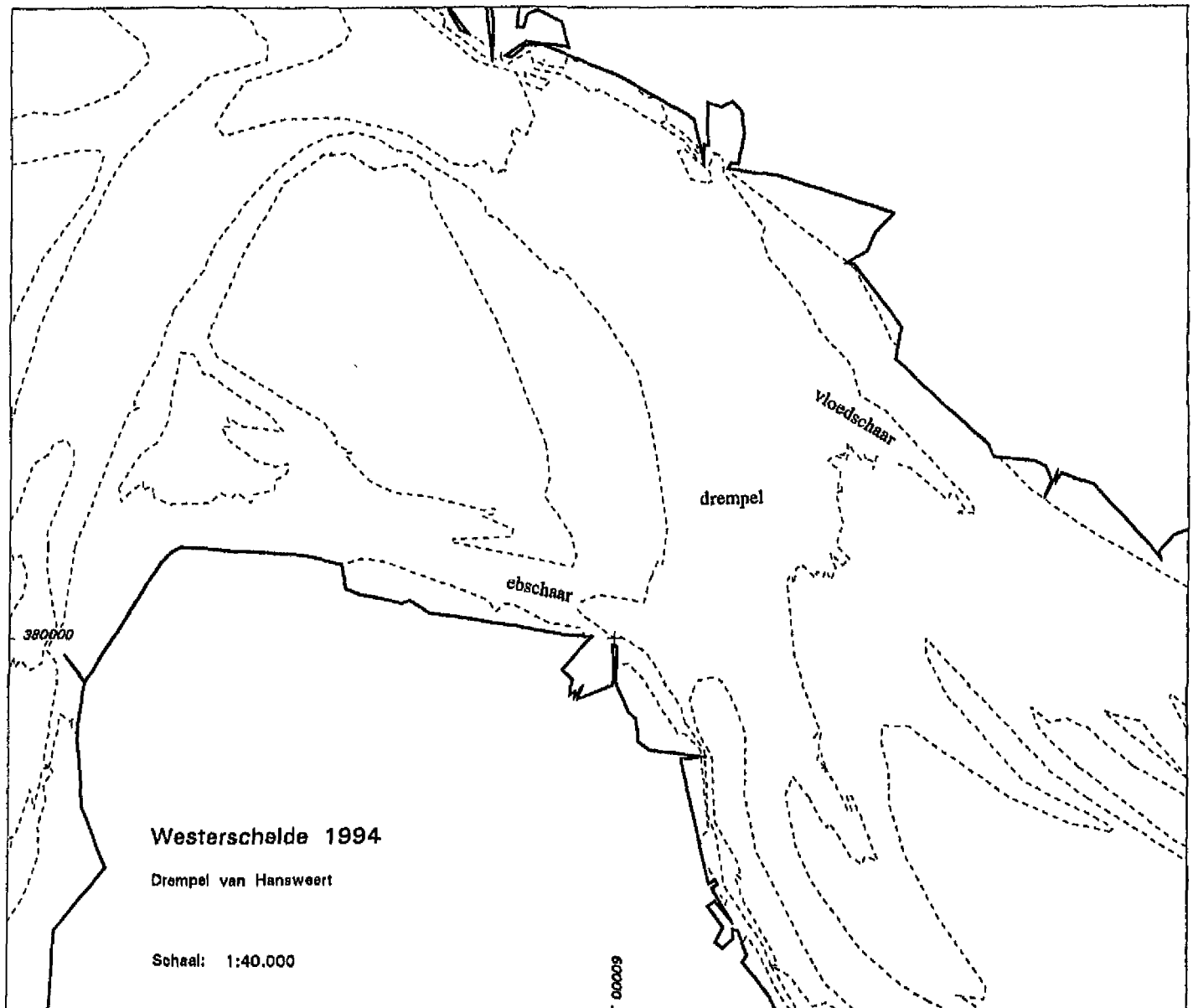
Figuur 2.1 Schema van een ideaal systeem van een ebgeul en vloedscharen (Westerschelde) (uit: Van Veen, 1950)



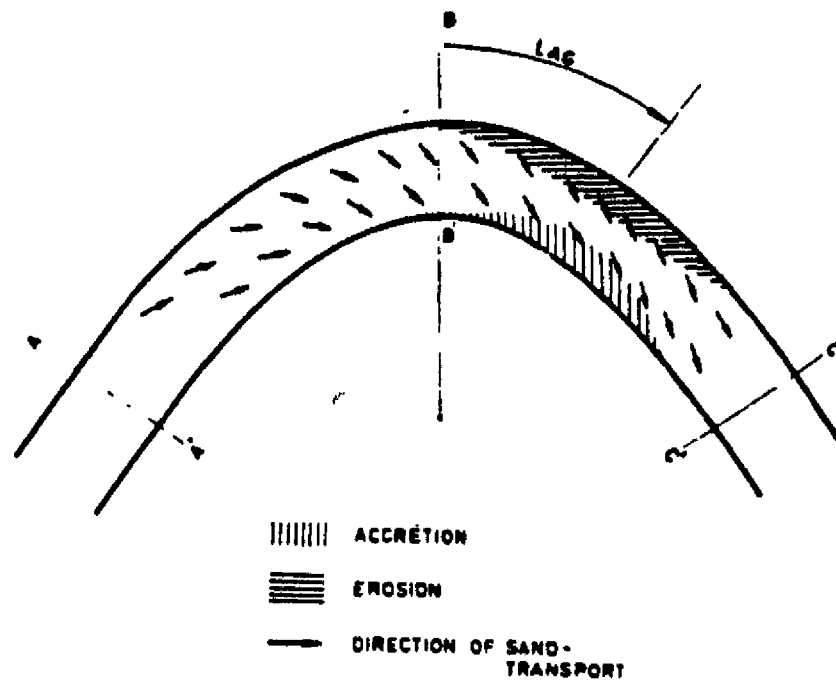
Figuur 2.2 Invloed van de dijken op de geulconfiguratie (uit: Peters en Sterling, 1976)



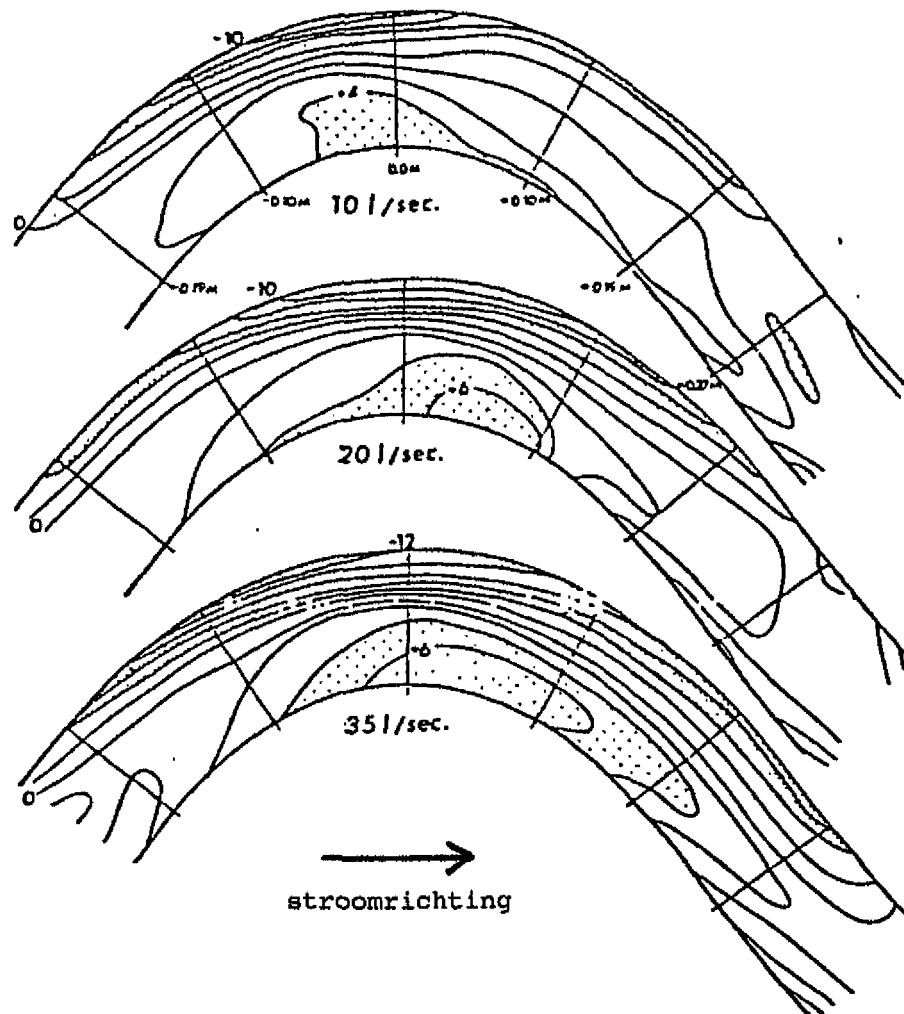
Figuur 2.3 Bimodale geulprofielen afwaarts en opwaarts van de Drempel van Valkenisse en een redelijk symmetrisch profiel, zij het breed en ondiep, op de drempel zelf (let op de verticale schaal!) (uit: Storm, 1995)



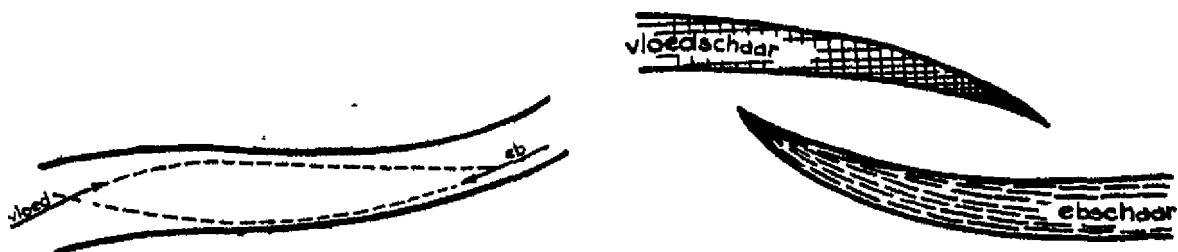
Figuur 2.4 Kenmerkende geulconfiguratie ten opzichte van een drempel: vloed-schaar stroomafwaarts en ebkortsluitgeul stroomopwaarts van de drempel



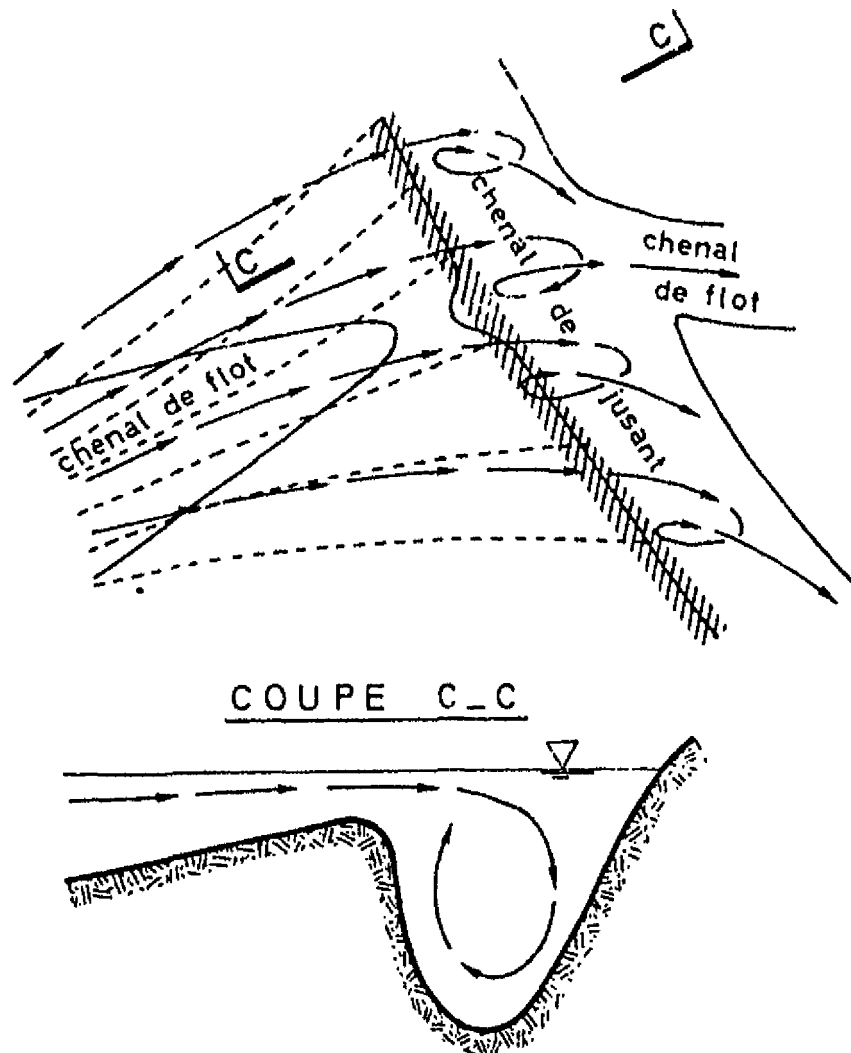
Figuur 2.5 Erosie en sedimentatie in een bocht (uit: Berben, 1985)



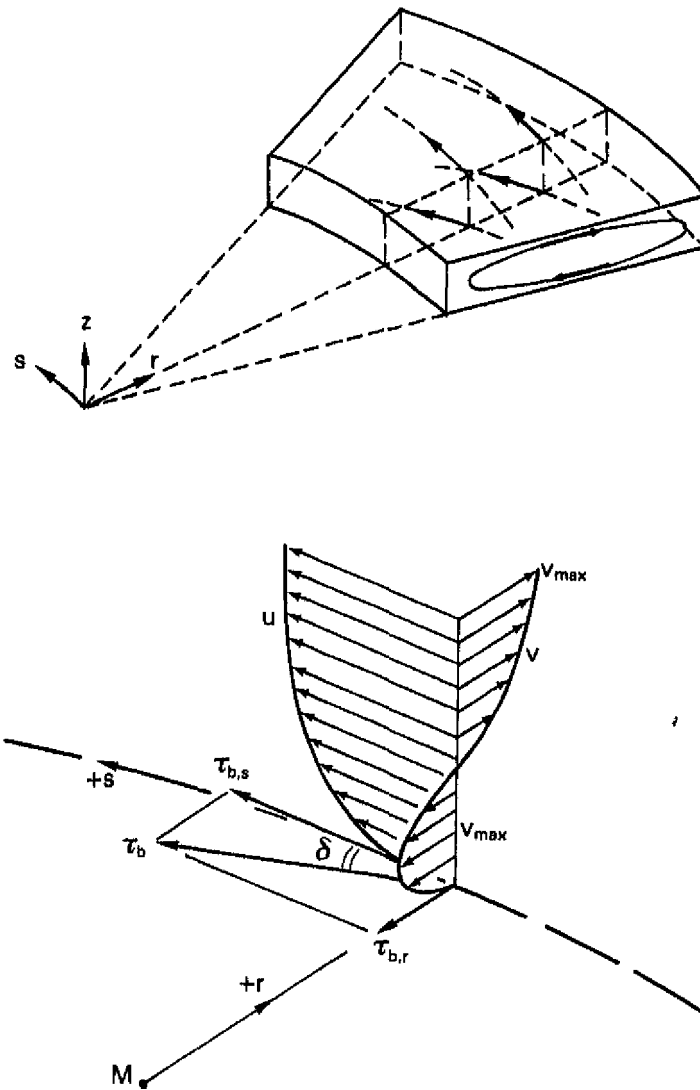
Figuur 2.6 Verschuiving van de lokatie van maximale erosie (-) en sedimentatie (+) bij toename van het debiet (uit: Hooke, 1975 in: Berben, 1985)



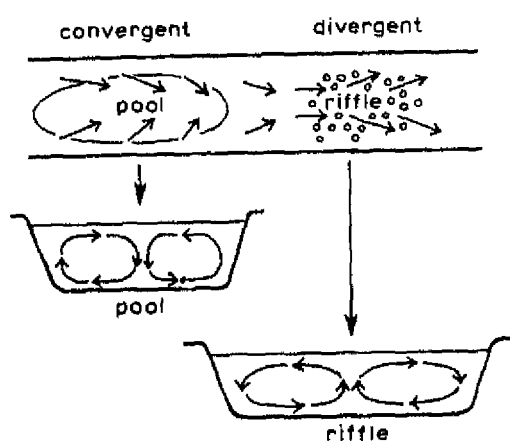
Figuur 2.7 Ontwikkend gedrag van eb- en vloed gedomineerde geulen door bochtwerking (uit: Van Veen, 1950)



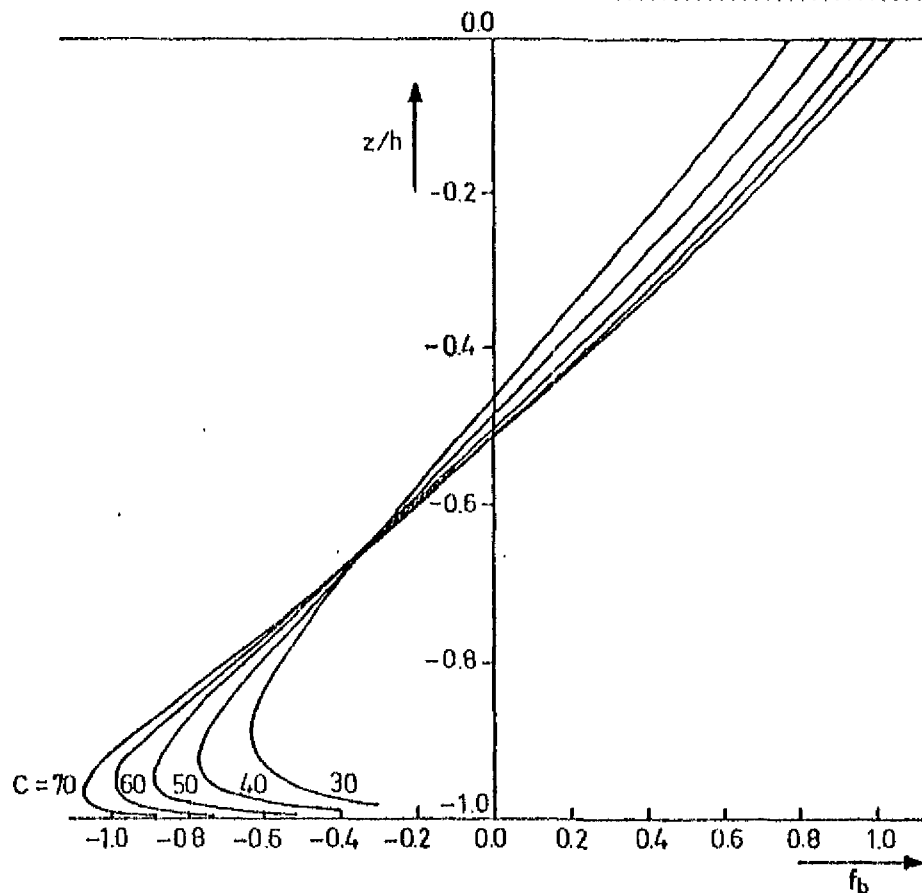
Figuur 2.8 Secundaire stroming aangedreven door stroming dwars over de geul (tijdens vloed) (uit: Peters en Sterling, 1976)



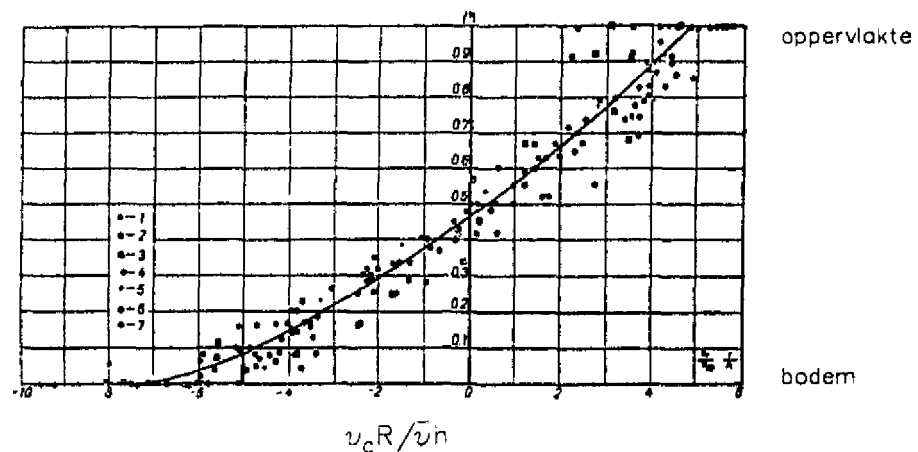
Figuur 2.9 Primaire en secundaire stroomprofielen in een rivierbocht (uit: Van Rijn, 1990)



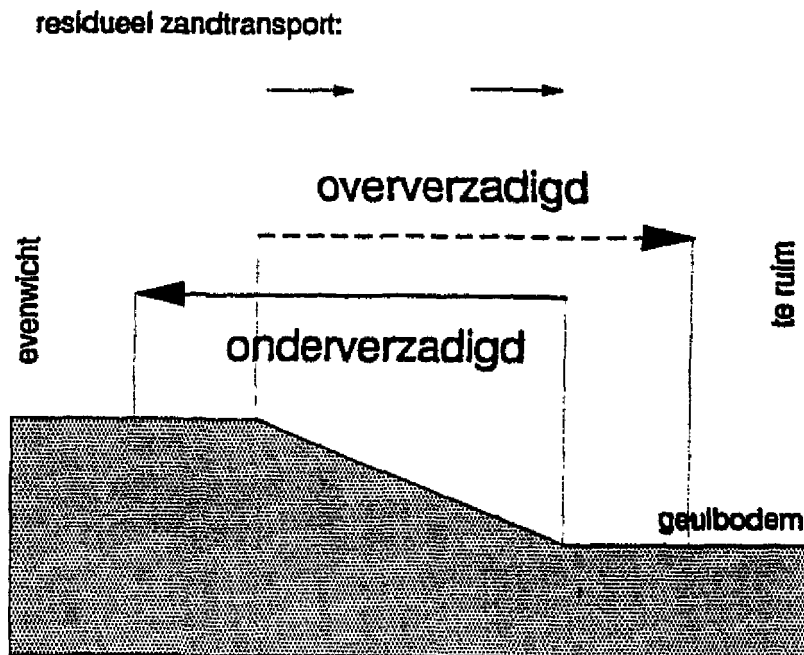
Figuur 2.10 Schema van het ontstaan van put-drempel/'pool-riffle'-sequentie ten gevolge van meerdere cellen met secundaire stroming (uit: Richards, 1982)



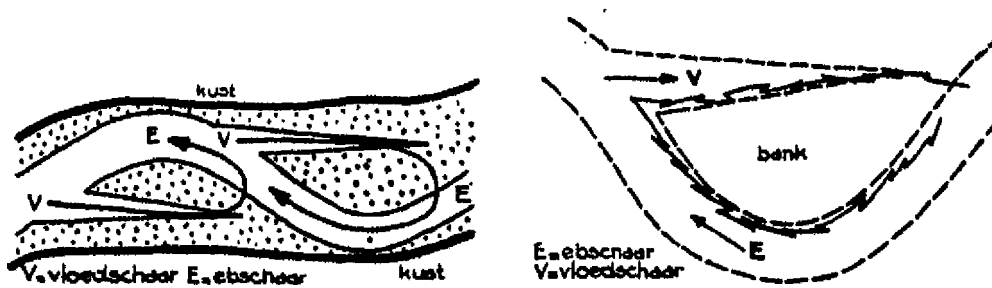
Figuur 2.11 Curves van de secundaire stroming ten gevolge van centrifugaalkrachten voor variërende waarden van de frictie-coëfficiënt (uit: De Vriend, 1976 in: Booij en Kalkwijk, 1983)



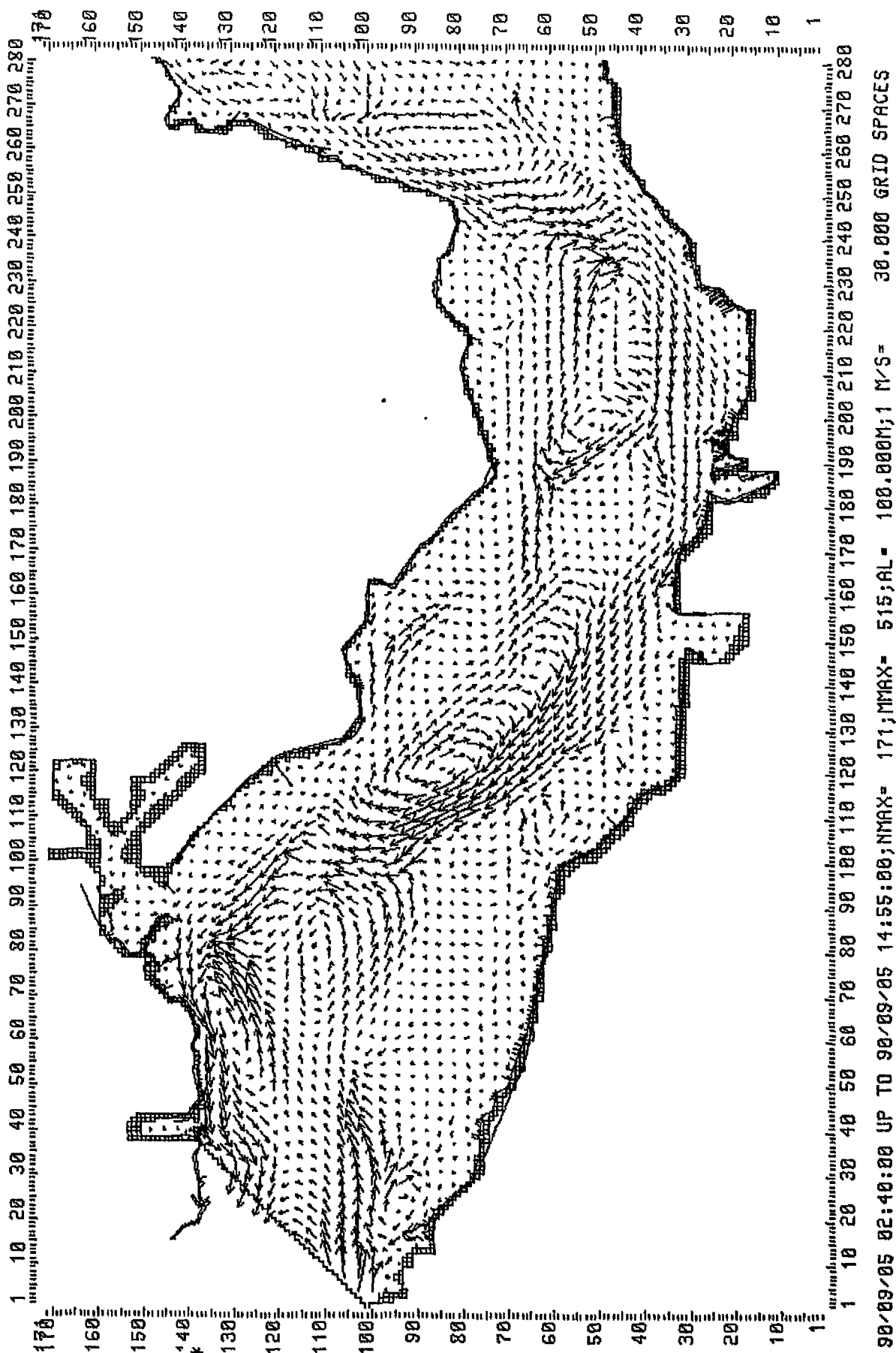
Figuur 2.12 Curve van de secundaire stroming opgewekt door centrifugaalkrachten met de variatie van β ($= v_c R / \bar{v} h$) met de diepte (uit: Rozofskii, 1961 in: Allersma, 1994)



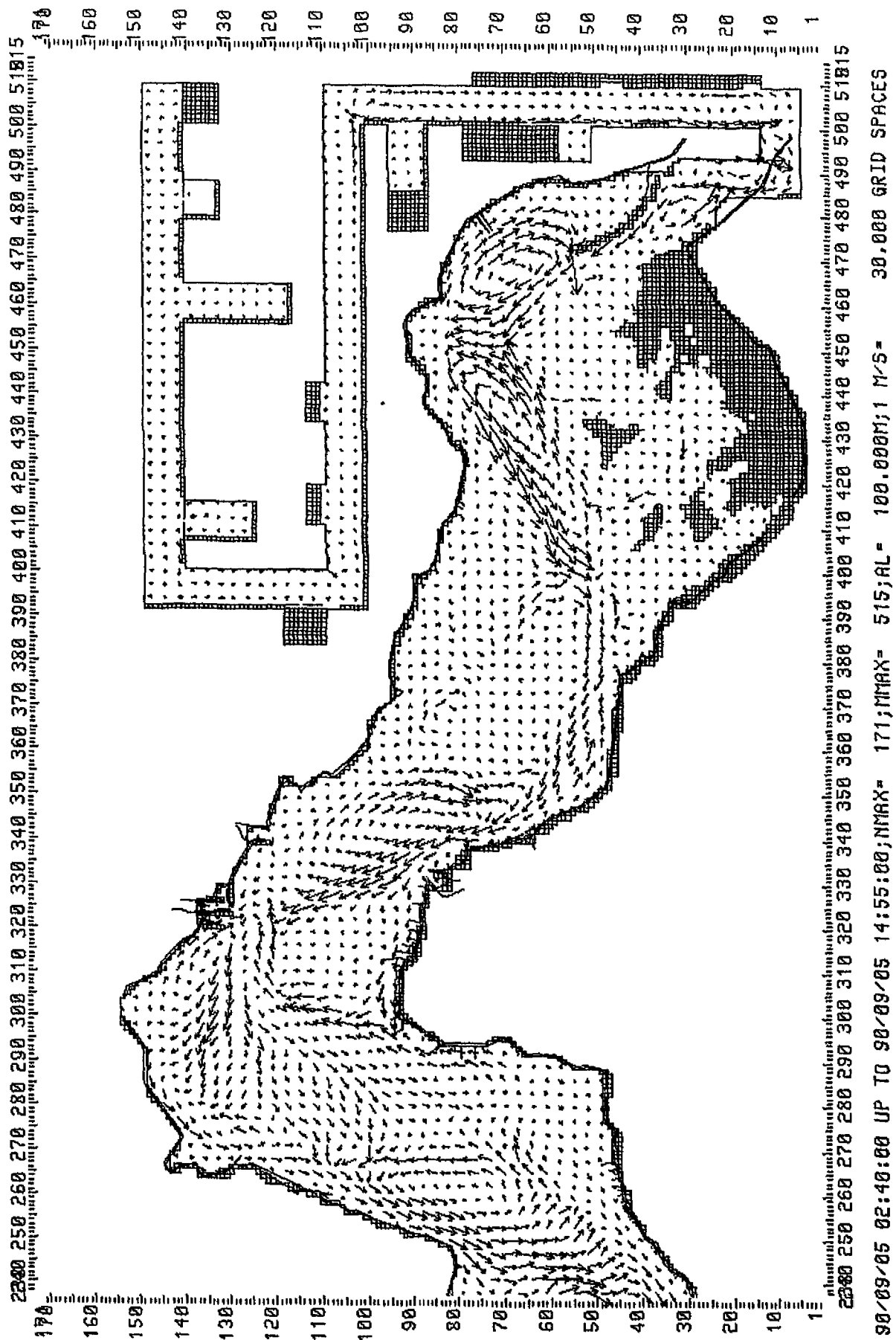
Figuur 2.13 Schematische weergave van onder- en oververzadigde getijstroom in de aanloop naar een sterk verruimd geuldeel (bijv. drempel) (uit: Storm, 1995)



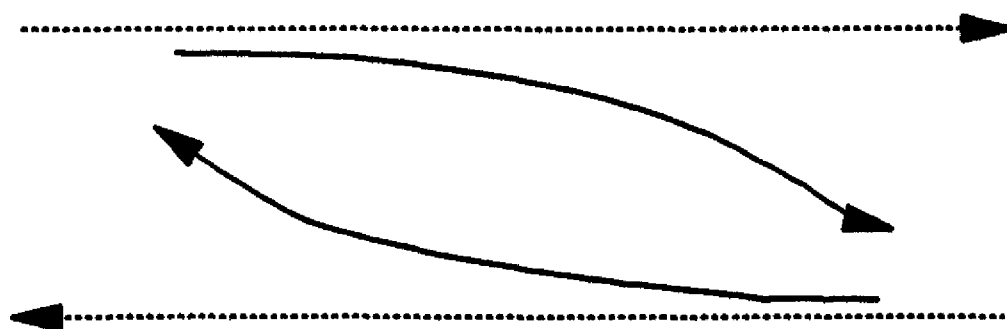
Figuur 2.14 Schema van een zandneer rondom een plaat (uit: Van Veen, 1950)



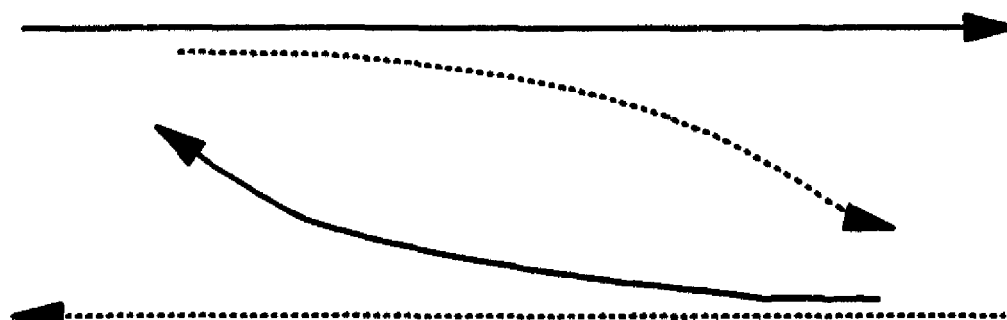
Figuur 2.15 Euleriaanse reststromen voor een gemiddeld getij voor het westen van de Westerschelde (1 netwerkmaas = 0.05 m/s) (Van der Male, 1993)



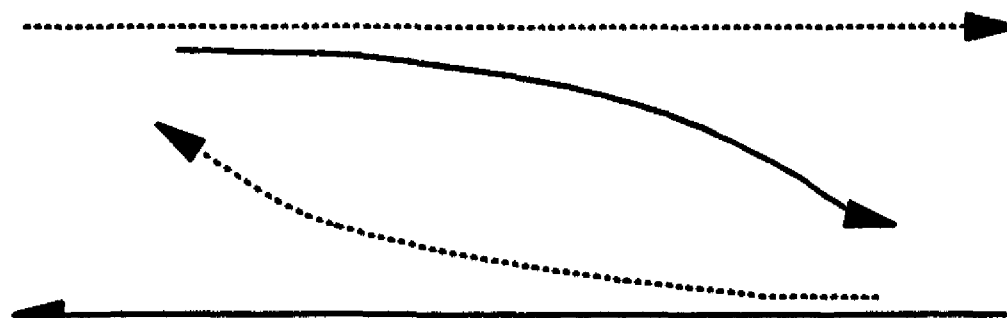
Figuur 2.16 Euleriaanse reststromen voor een gemiddeld getij voor het oosten van de Westerschelde (1 netwerkmaas = 0.05 m/s) (Van der Male, 1993)



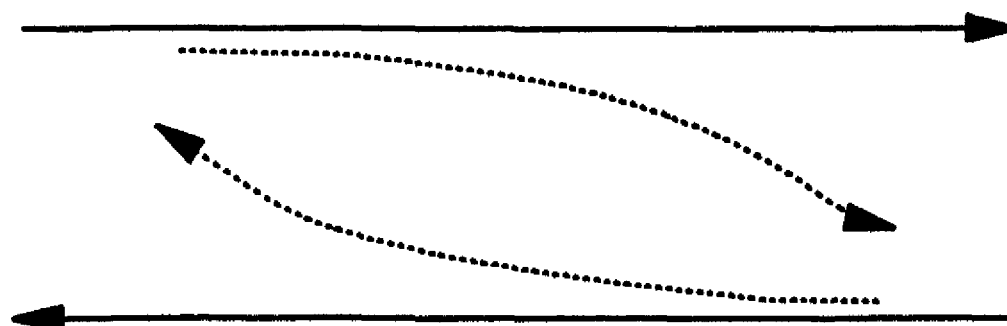
Ontwijkende geulen-drempel



Botsende ebgeul-drempel



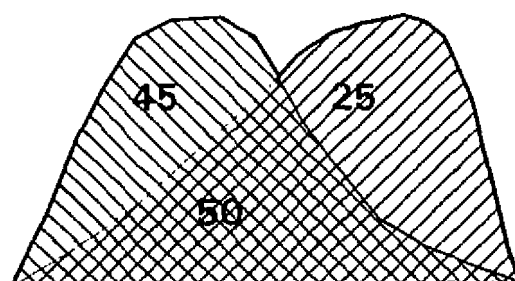
Botsende vloedgeul-drempel

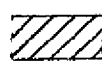


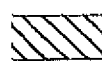
Parallele geulen-drempel

Figuur 3.1 Drempel-typen in de Westerschelde
ononderbroken lijn = hoofdstroom; onderbroken lijn = nevenstroom

Debietverdeling dwars over een geul



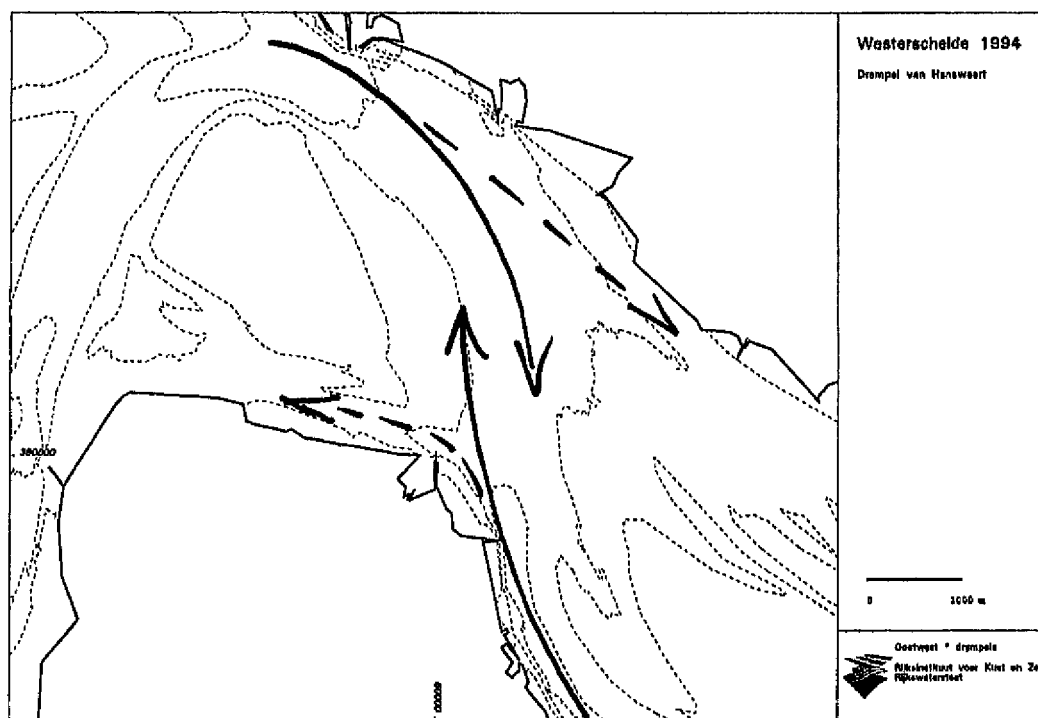
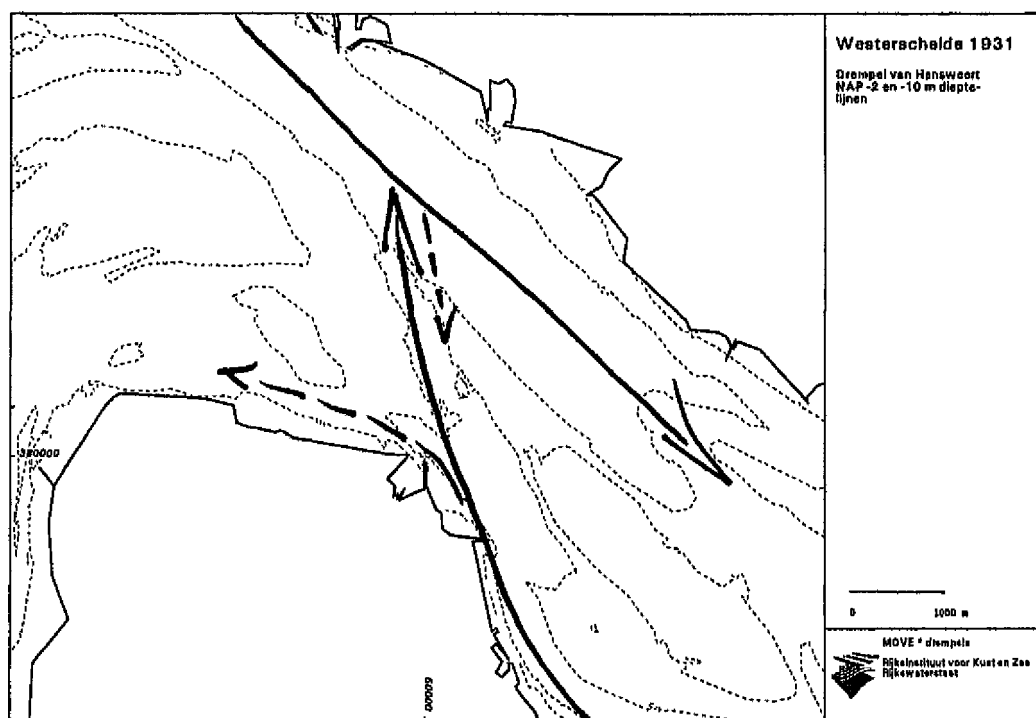
 vloeddebiet

 ebdebiet

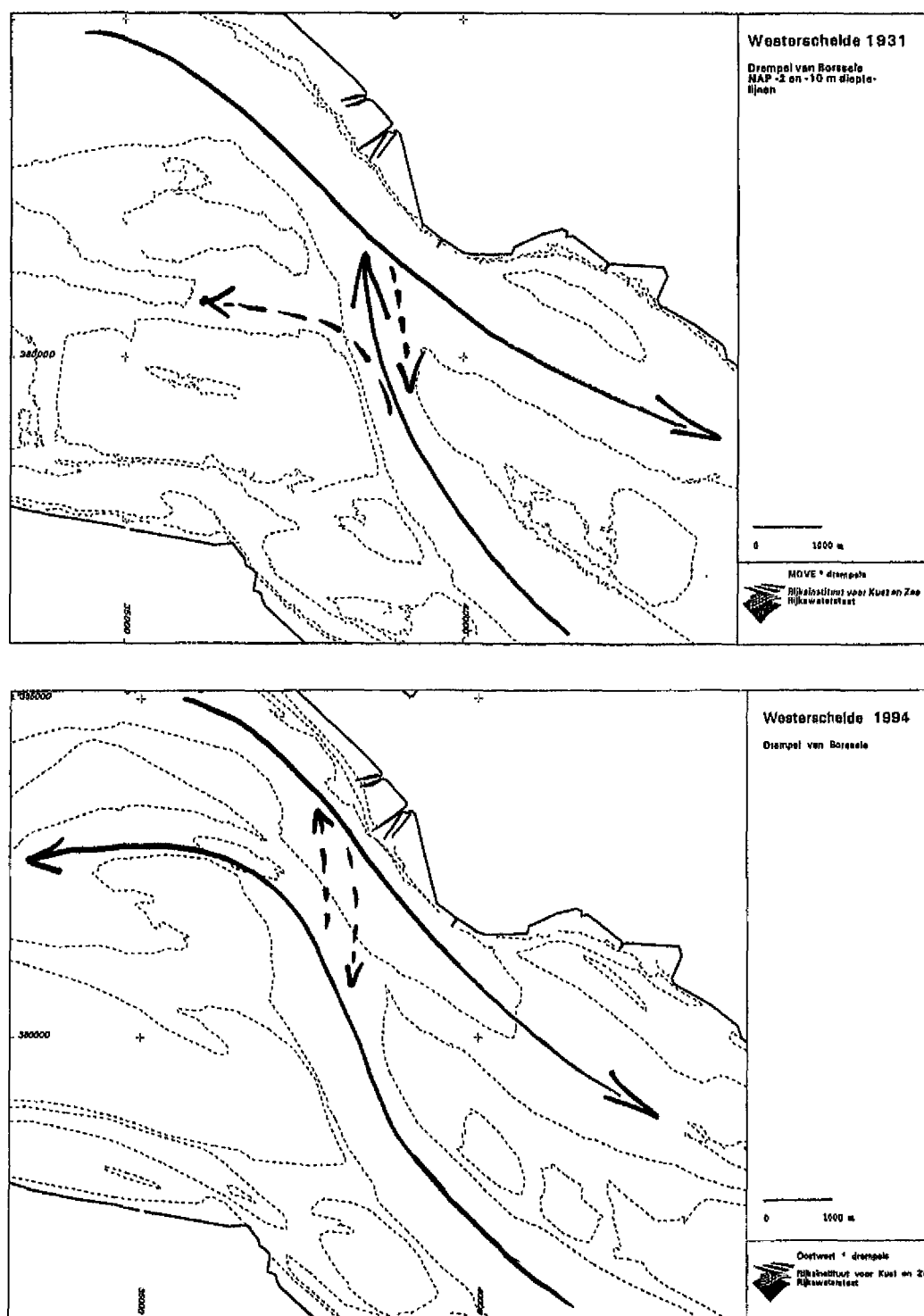
$$\text{dominantie} \approx \text{vloed/eb} = 95/75 = 1.27$$

$$\begin{aligned} \text{interne dominantie} &= \text{totaal} / \text{gem. vloed en eb} \\ &= 120/85 = 1.41 \end{aligned}$$

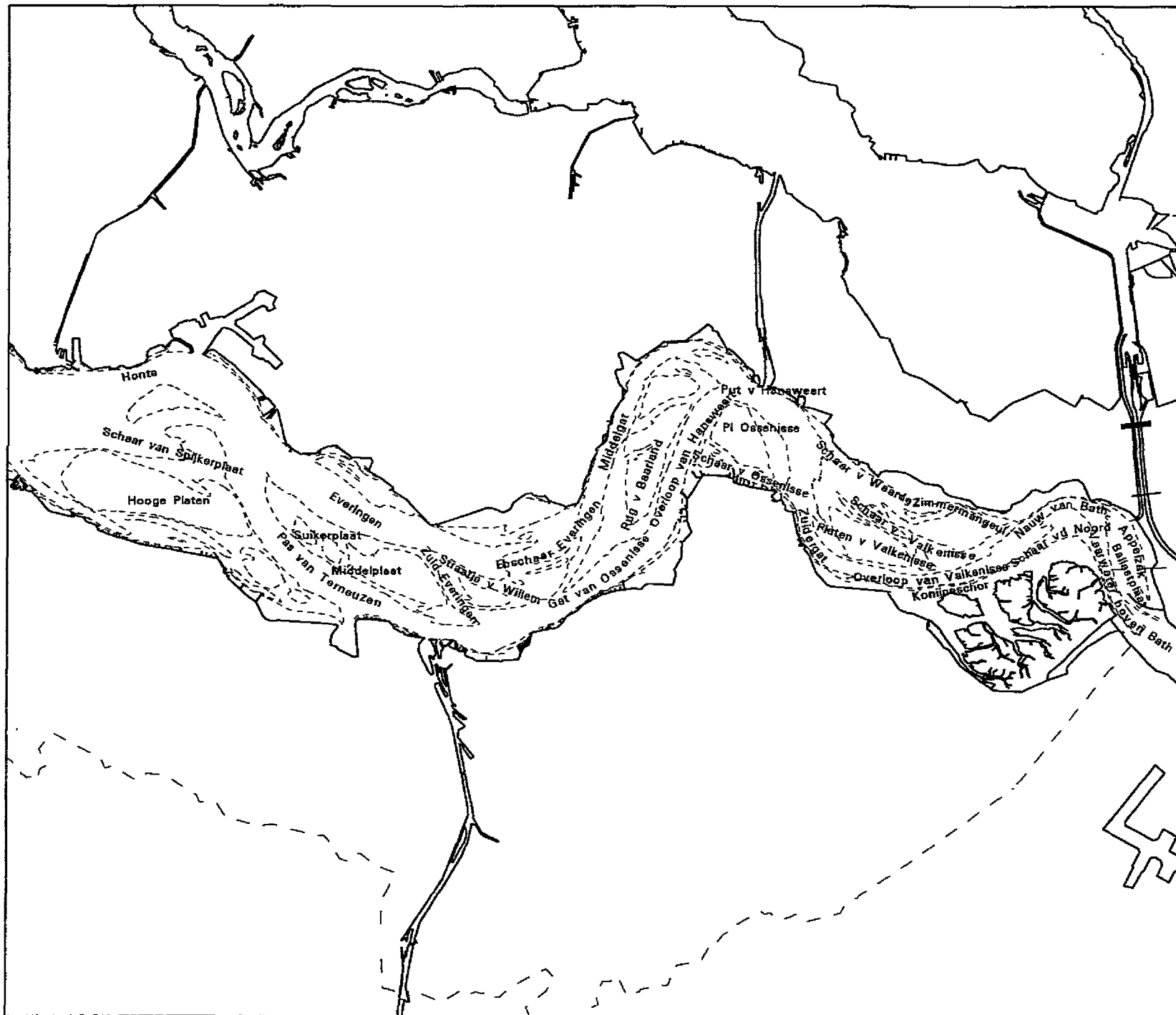
Figuur 3.2 Interne dominantie (uit: Van Kleef, 1994)



Figuur 3.3 Overgang van een 'botsende ebgeul'-type drempel (1931) naar een 'ontwikkende geulen'-type drempel (1994). Drempel van Hansweert



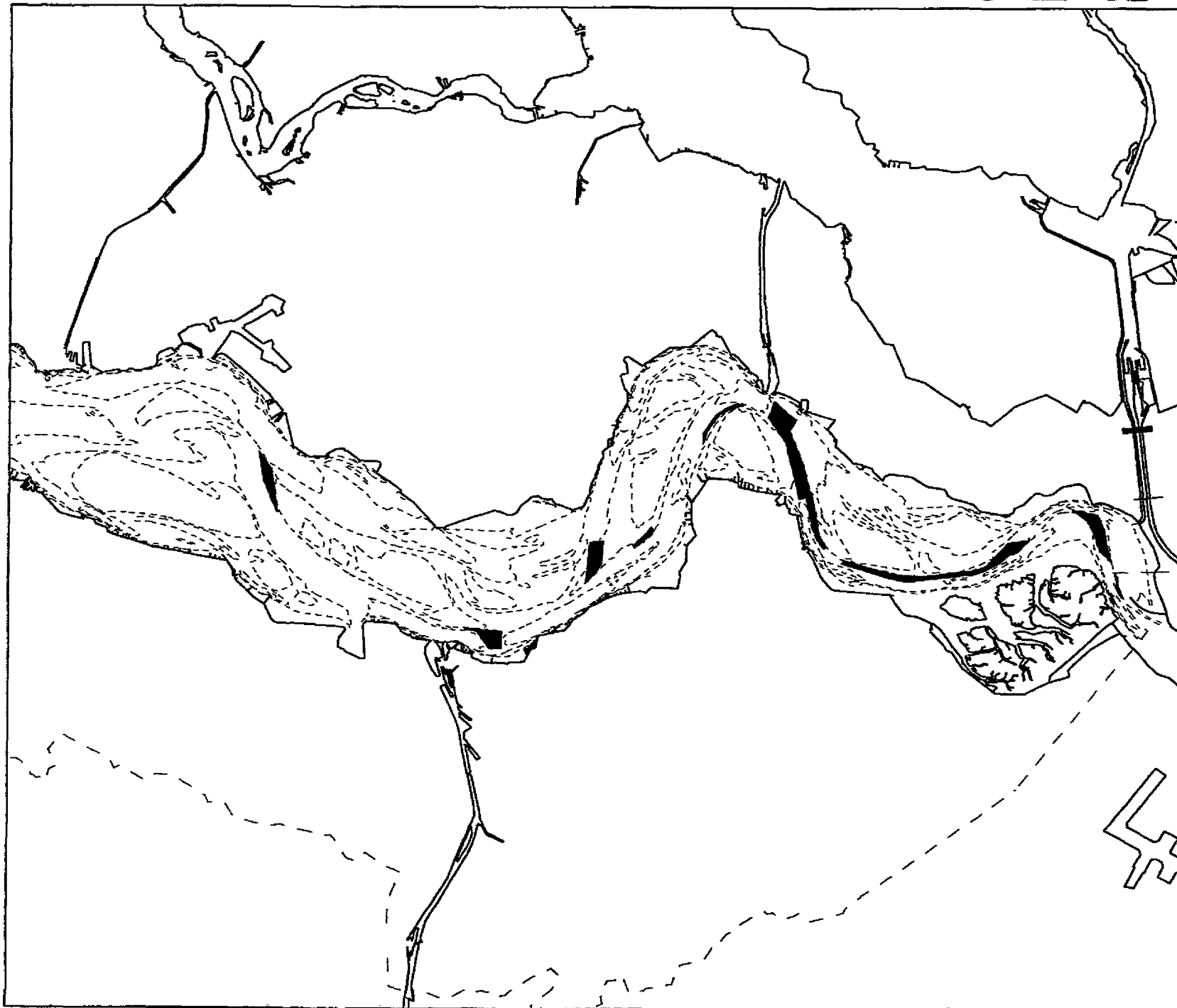
Figuur 3.4 Overgang van een 'batsende ebgeul'-type drempel (1931) naar een 'parallele geulen'-type drempel (1994). Drempel van Borsselle



Westerschelde

Namen geulen en platen

Schaal: 1:225.000



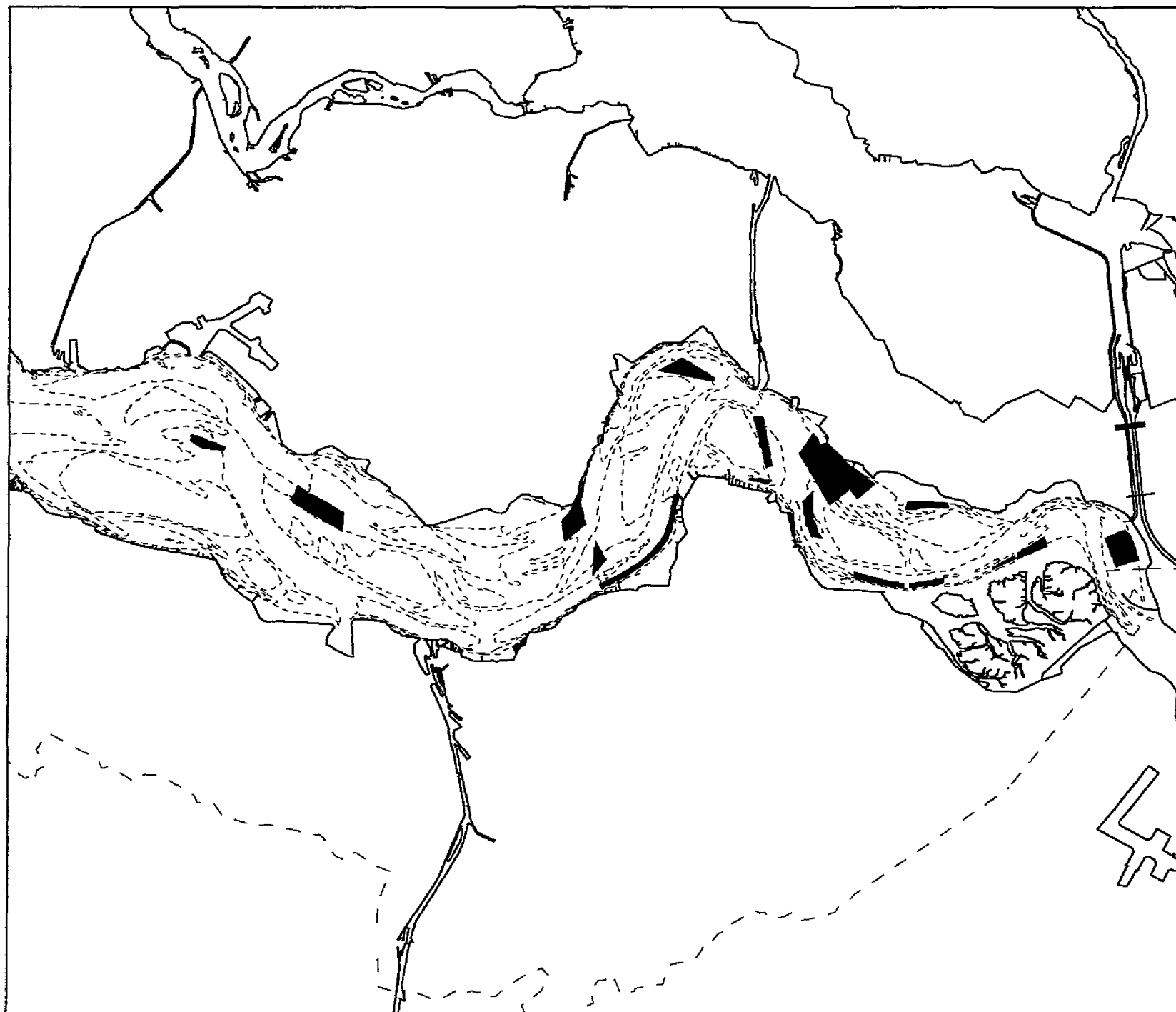
Westerschelde

Baggergebieden

Schaal: 1:225.000

Oostwest * drempels
Rijksinstituut voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat



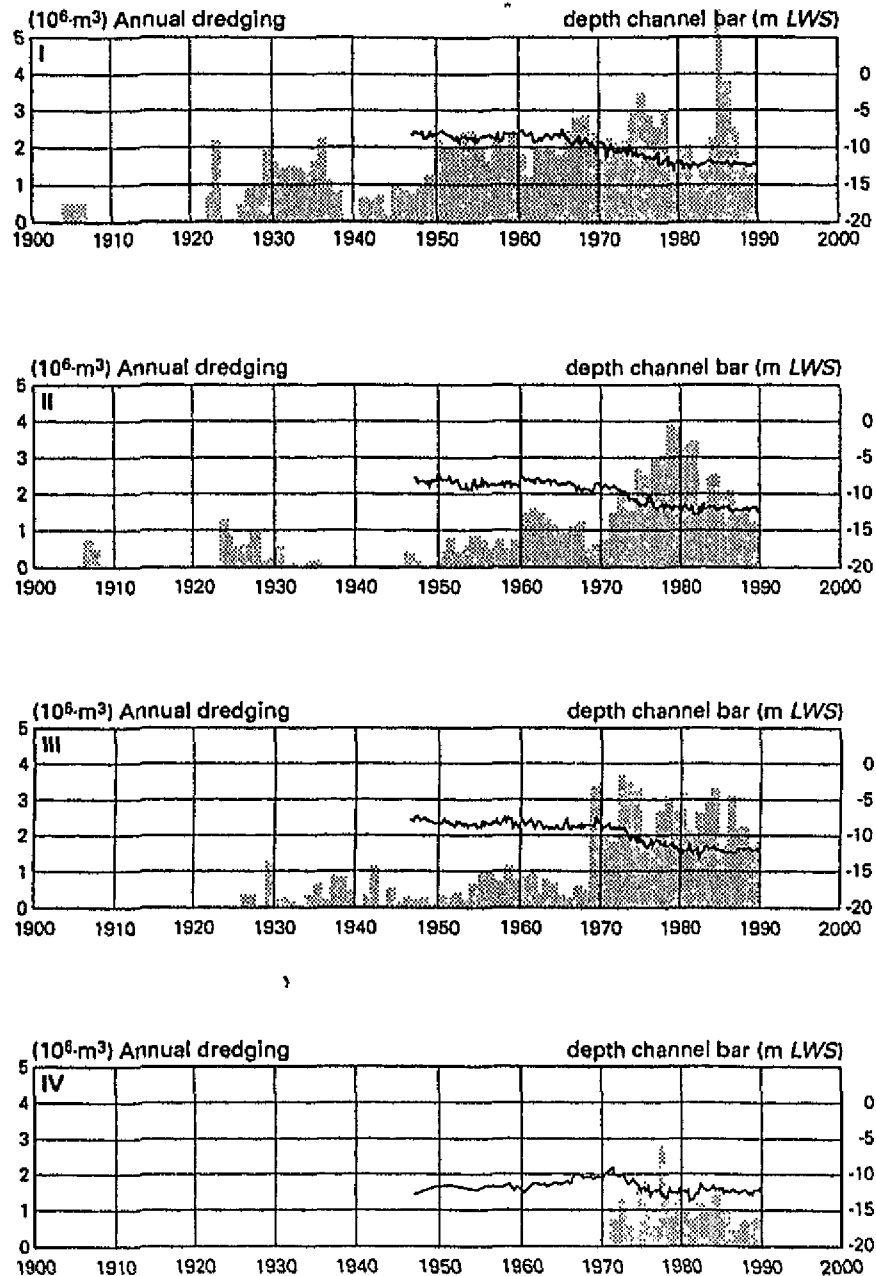


Westerschelde

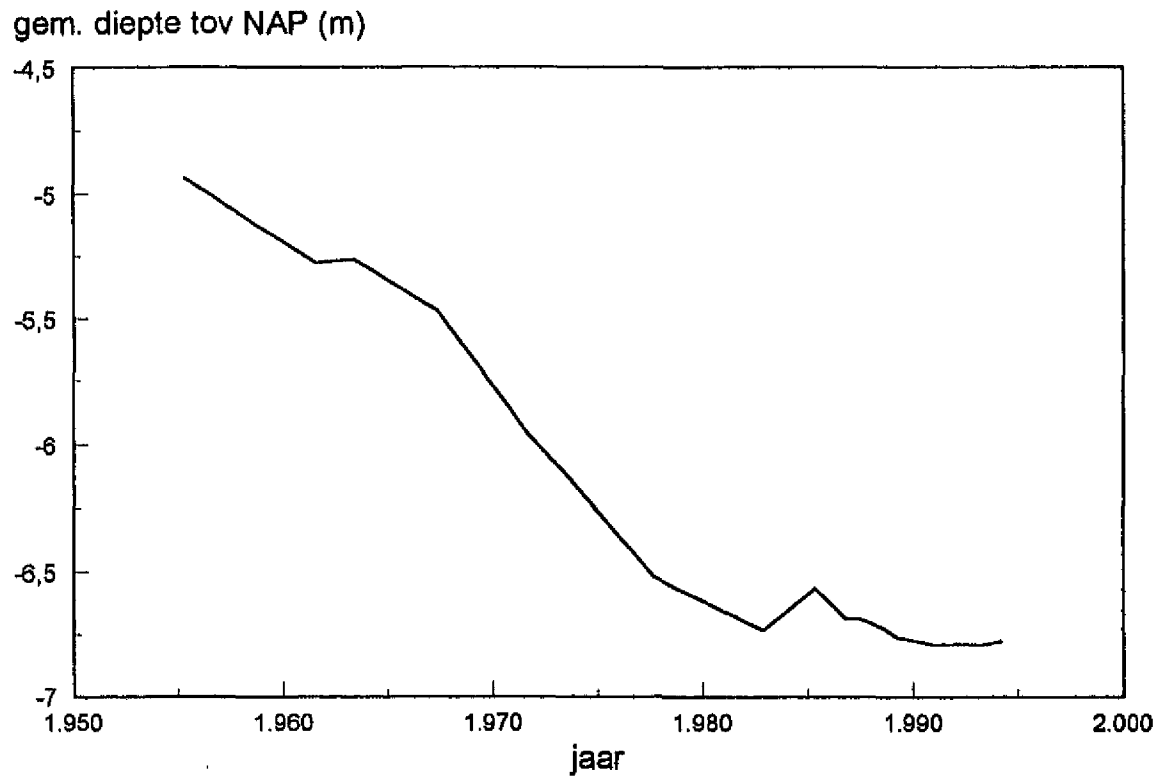
Stortgebieden

Schaal: 1:225.000

Oostwest * drempels
Rijksinstituut voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat

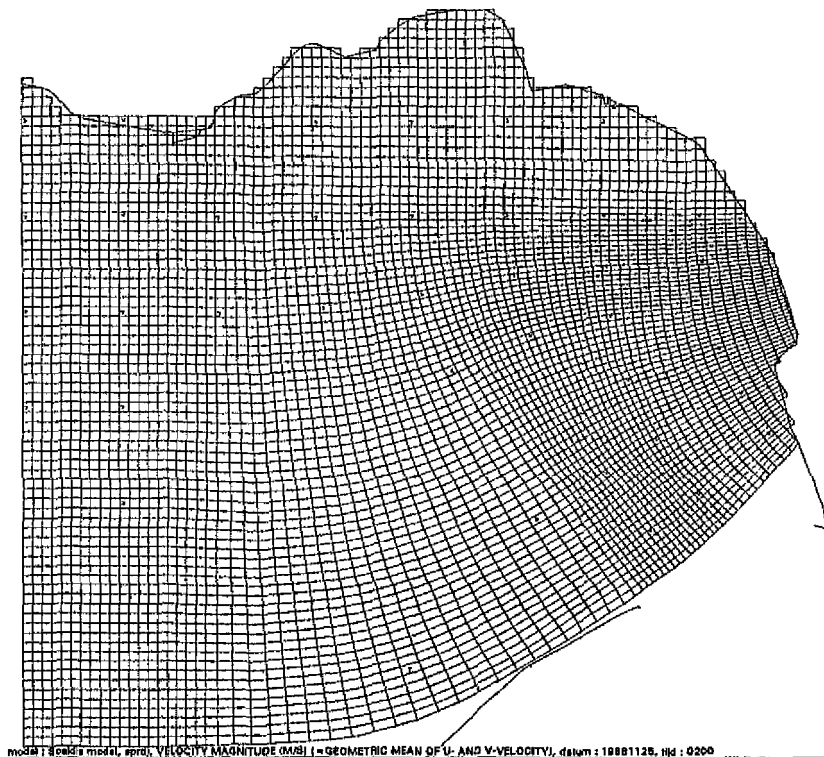


Figuur 3.8 Jaarlijkse baggerhoeveelheden op en minimale diepte van de drempels van Bath (I), Valkenisse (II), Hansweert (III) en Borssele (IV). Diepte van drempels tov GLLWS (uit; Van den Berg et al., 1994)



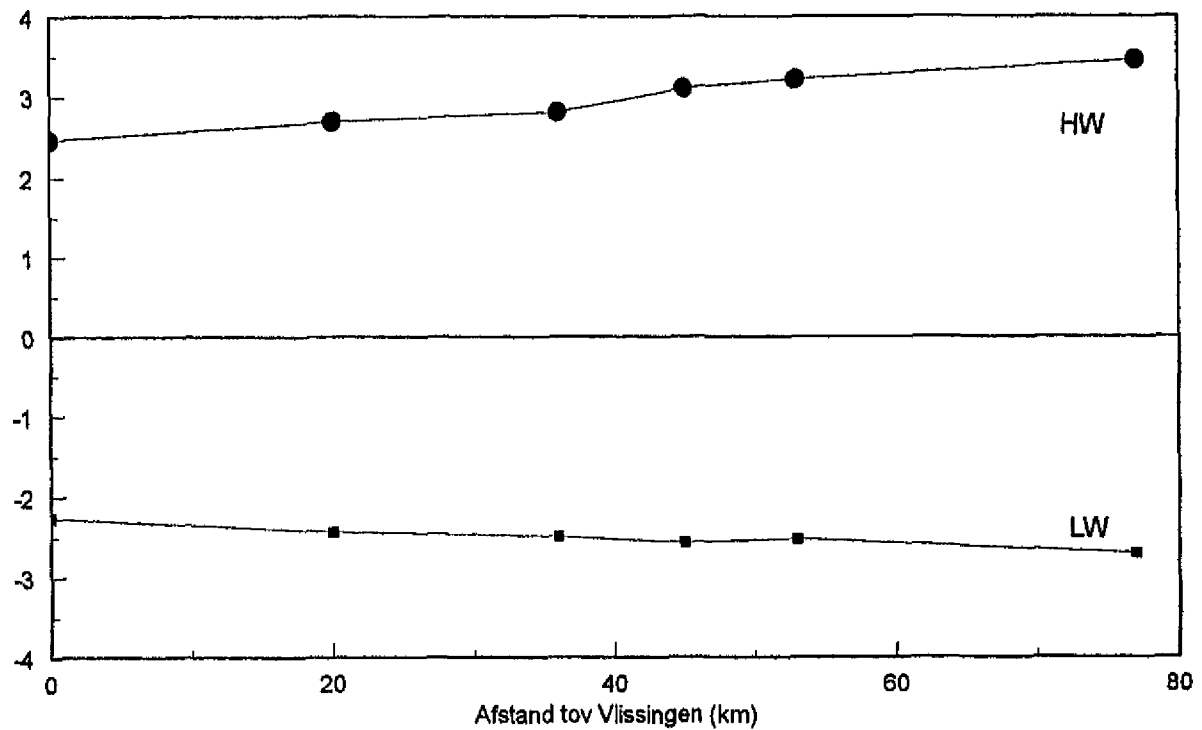
Figuur 3.9 Verloop van de gemiddelde geuldiepte (beneden NAP 2 m) in het oosten van de Westerschelde (lodingsvak 1)

• • • • •



Figuur 4.1 Netwerk Scaldis100: ten westen van Baalhoek rechthoekig en een vaste maaswijdte en ten oosten van Baalhoek kromlijinig en een variërende maaswijdte (uit: Dekker et al., 1994)

Waterstand tov NAP (m)



Vlissingen

Bath

Antwerpen

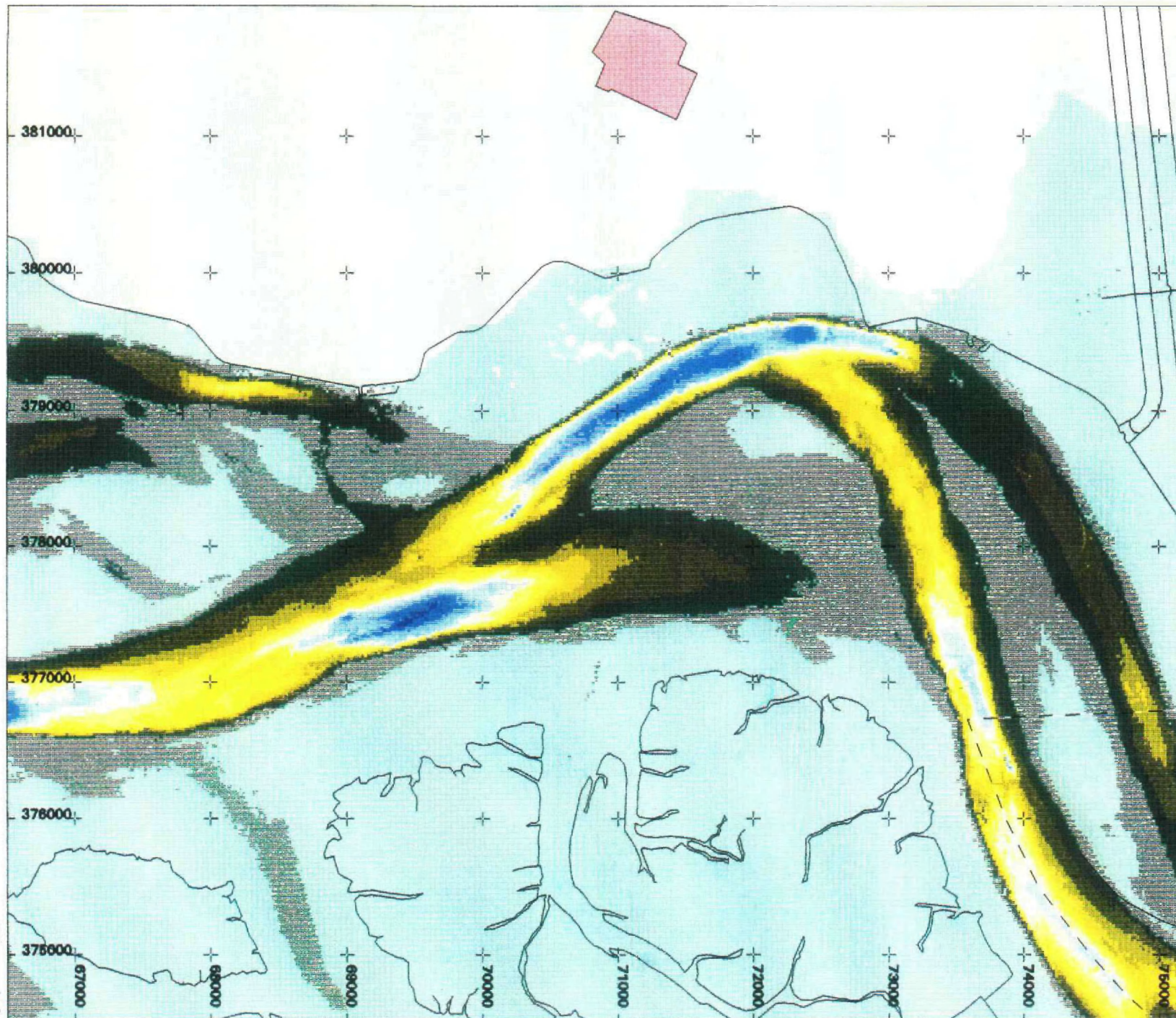
Figuur 4.2 Verloop HW en LW tijdens een gemiddeld springtij op 10 april 1989 van Vlissingen tot Antwerpen (bron: Dekker et al., 1994)

Het gedrag van drempels in de Westerschelde
Een verkennende studie
.....

Bijlagen

Bijlage A. Bodemligging van de drempels van Bath, Valkenisse, Hansweert,
Baarland en Borssele in de jaren 1931

- Bijlage A.1 Drempels van Bath en Valkenisse
- Bijlage A.2 Drempel van Hansweert
- Bijlage A.3 Drempel van Baarland
- Bijlage A.4 Drempel van Borssele

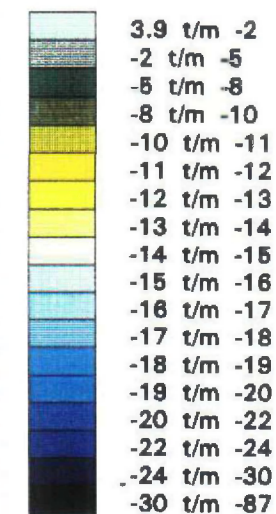


Westerschelde 1931

Drempels van Bath en
Valkenisse

Legenda

Hoogte tov. NAP (m)



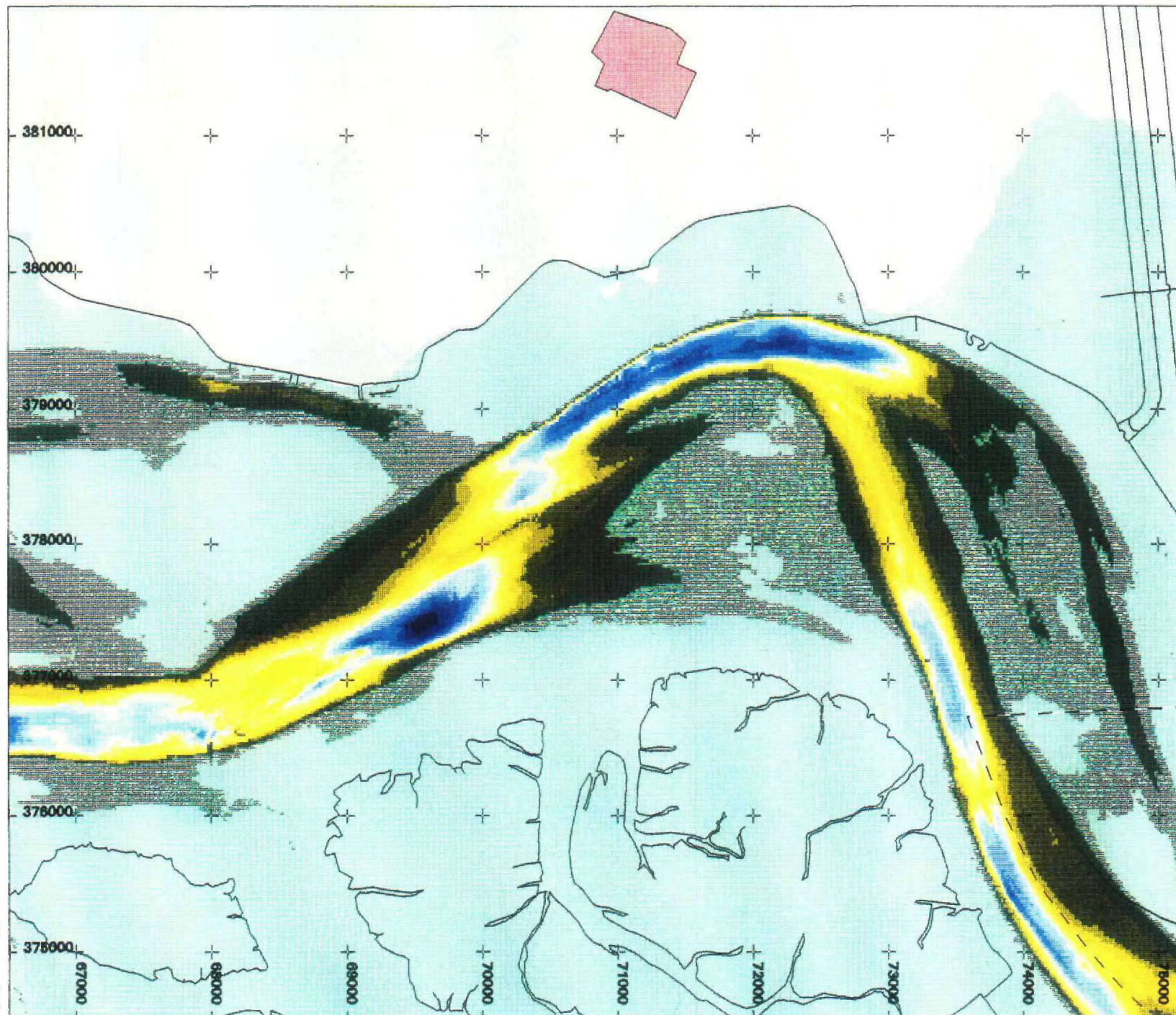
Schaal: 1:40.000

Oortweest



Rijkswaterstaat
Rijksinstituut voor Kust en Zee

Arc-Info applicatie PlotGIS
Drs. L.A. Uit den Bogaard

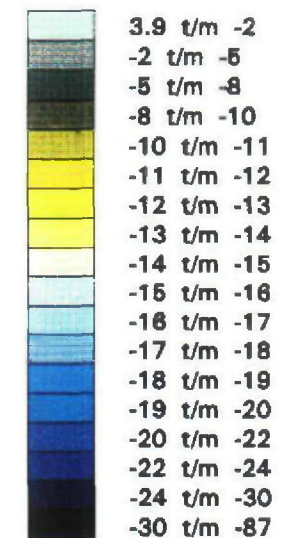


Westerschelde 1955

Drempels van Bath en
Valkenisse

Legenda

Hoogte tov. NAP (m)



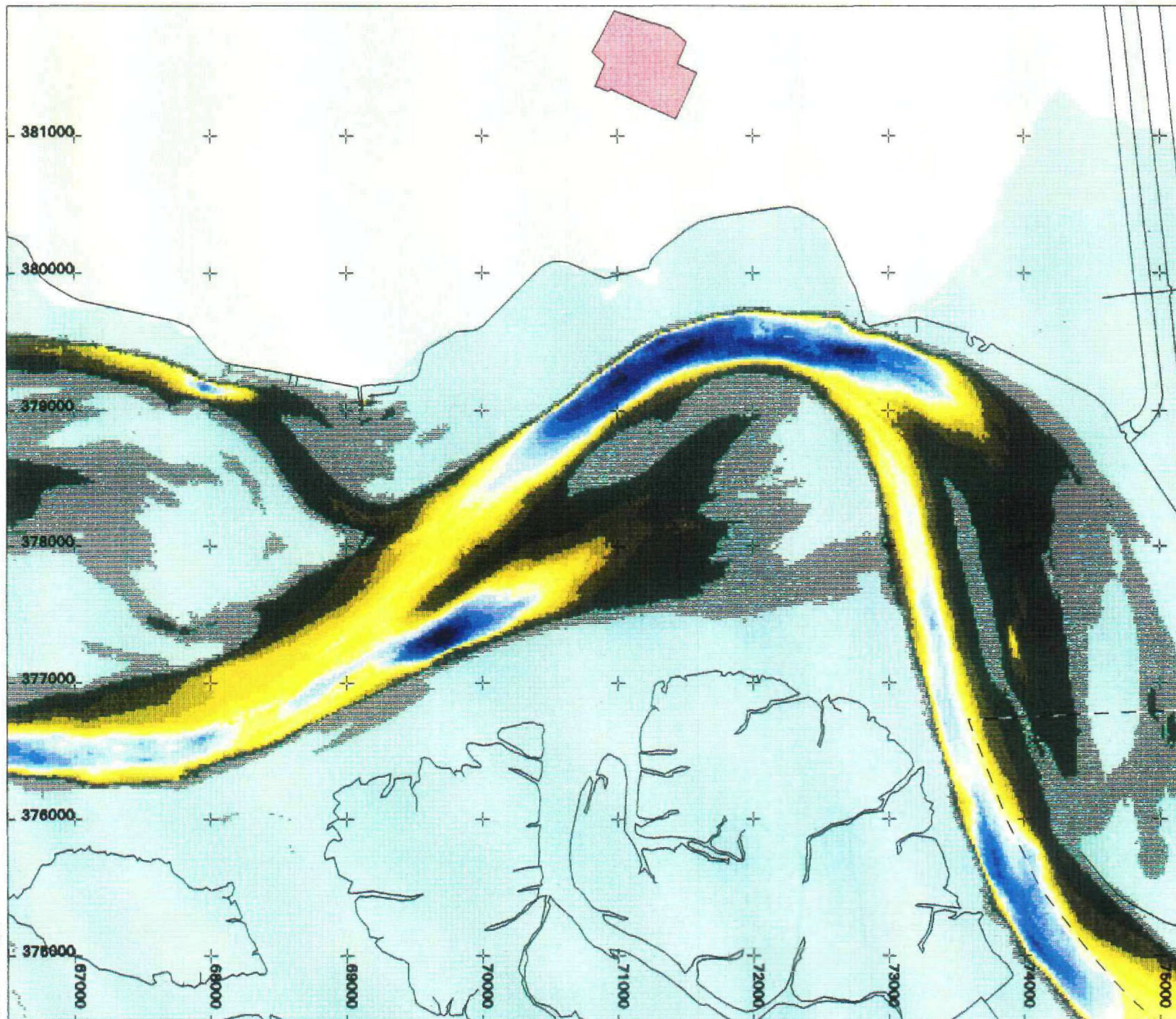
Schaal: 1:40.000

Oostwest



Rijkswaterstaat voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat

Arc-Info applicatie PlotGIS
Drs. L.A. Uit den Bogaard

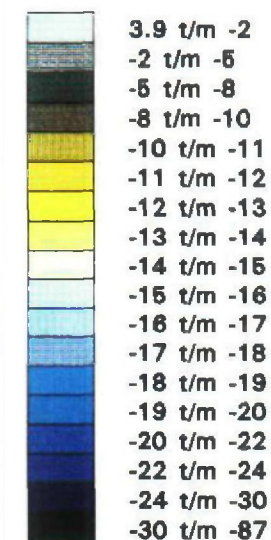


Westerschelde 1967

Drempels van Bath en
Valkenisse

Legenda

Hoogte tov. NAP (m)



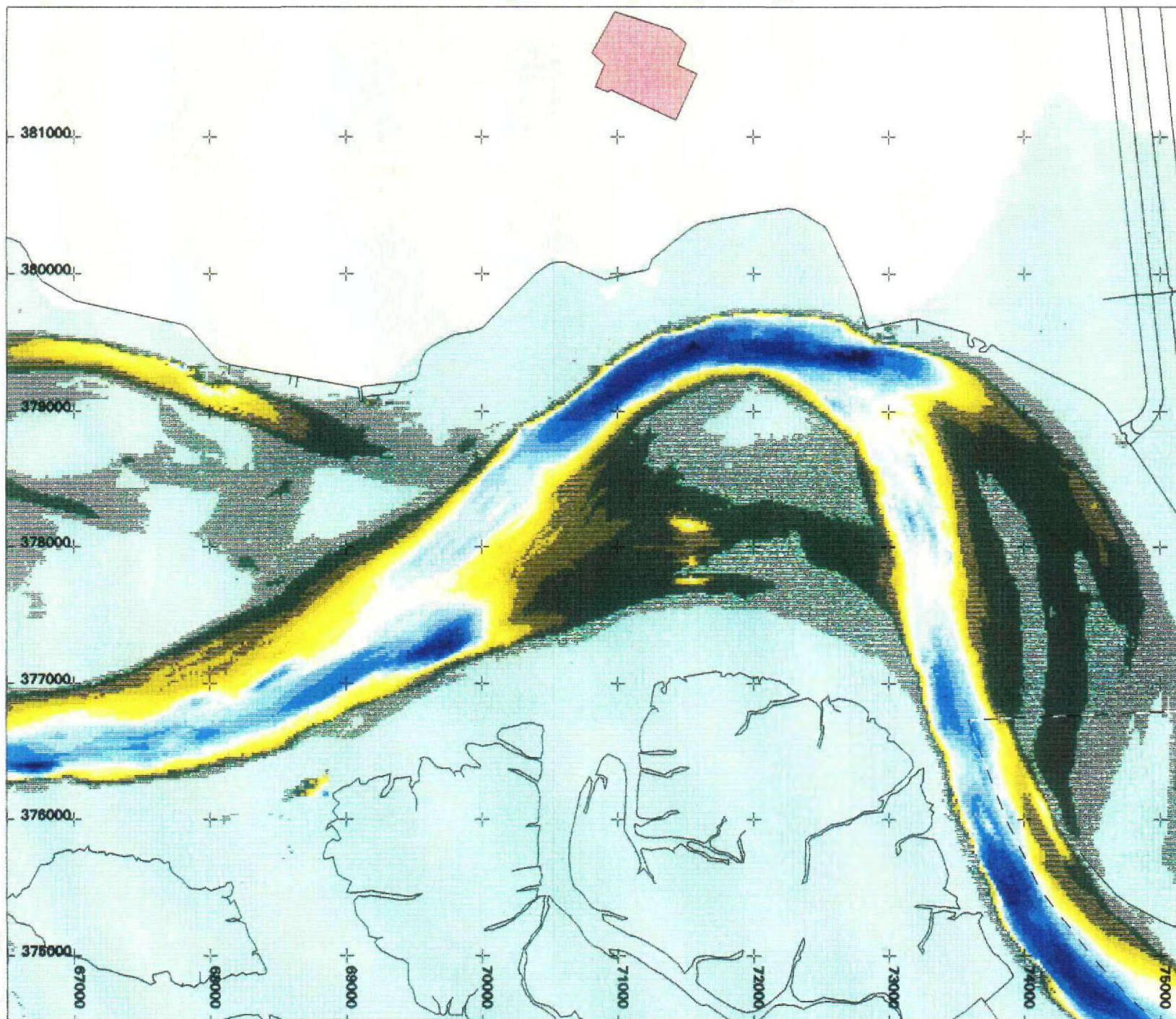
Schaal: 1:40.000



Oostwaart

Rijkswaterstaat voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat

Arc-Info applicatie PlotGIS
Drs. L.A. Uit den Bogaard

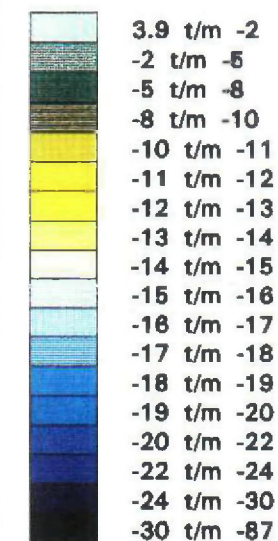


Westerschelde 1977

Drampels van Bath en
Valkenisse

Legenda

Hoogte tov. NAP (m)



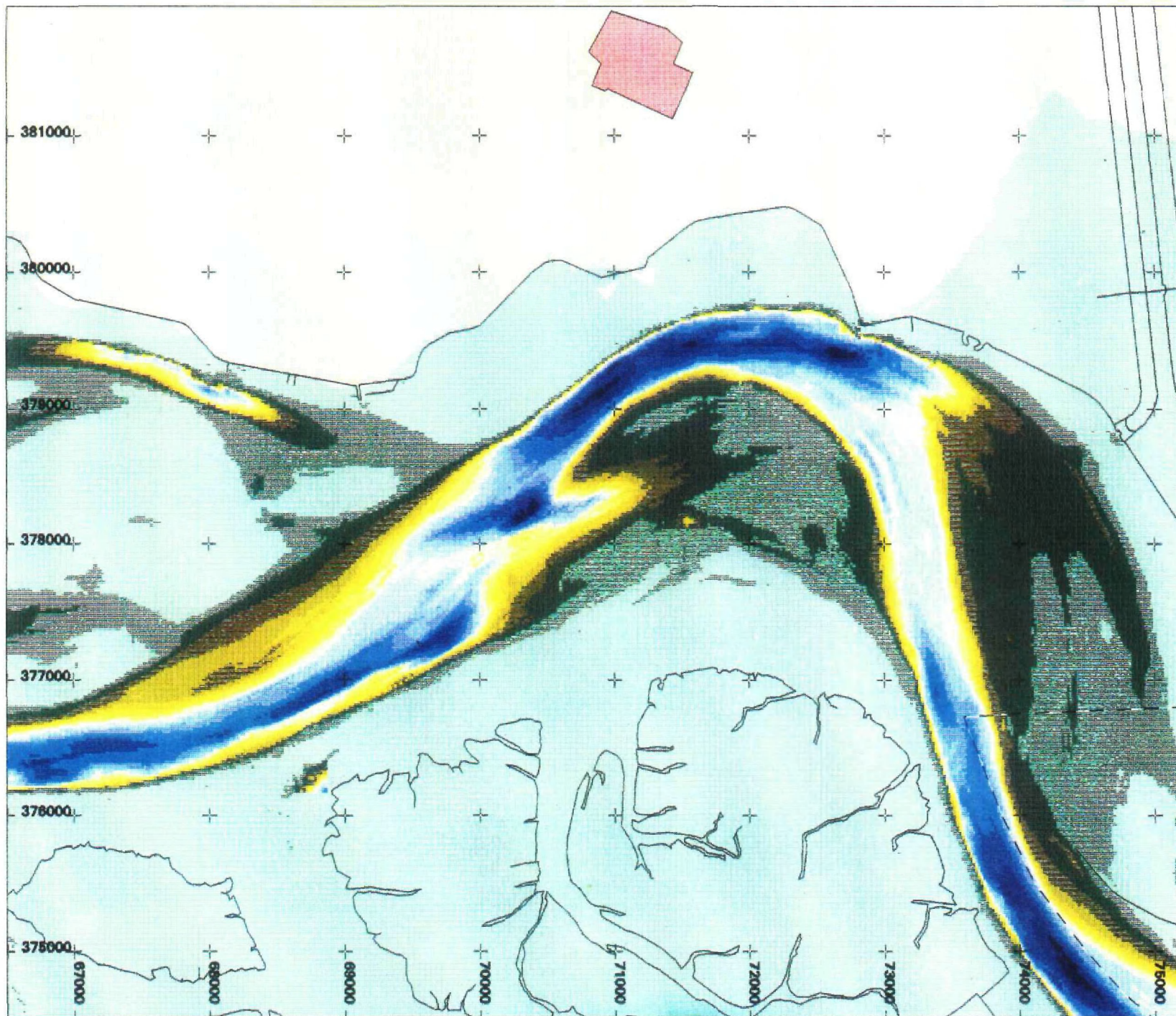
Schaal: 1:40.000



Oostwest

Rijkswaterstaat voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat

Arc-Info applicatie PlotGIS
Drs. L.A. Uit den Bogaard

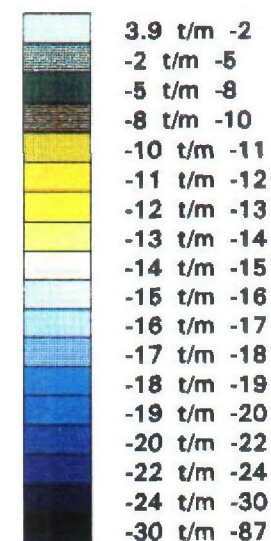


Westerschelde 1986

Drempels van Bath en
Valkenisse

Legenda

Hoogte tov. NAP (m)



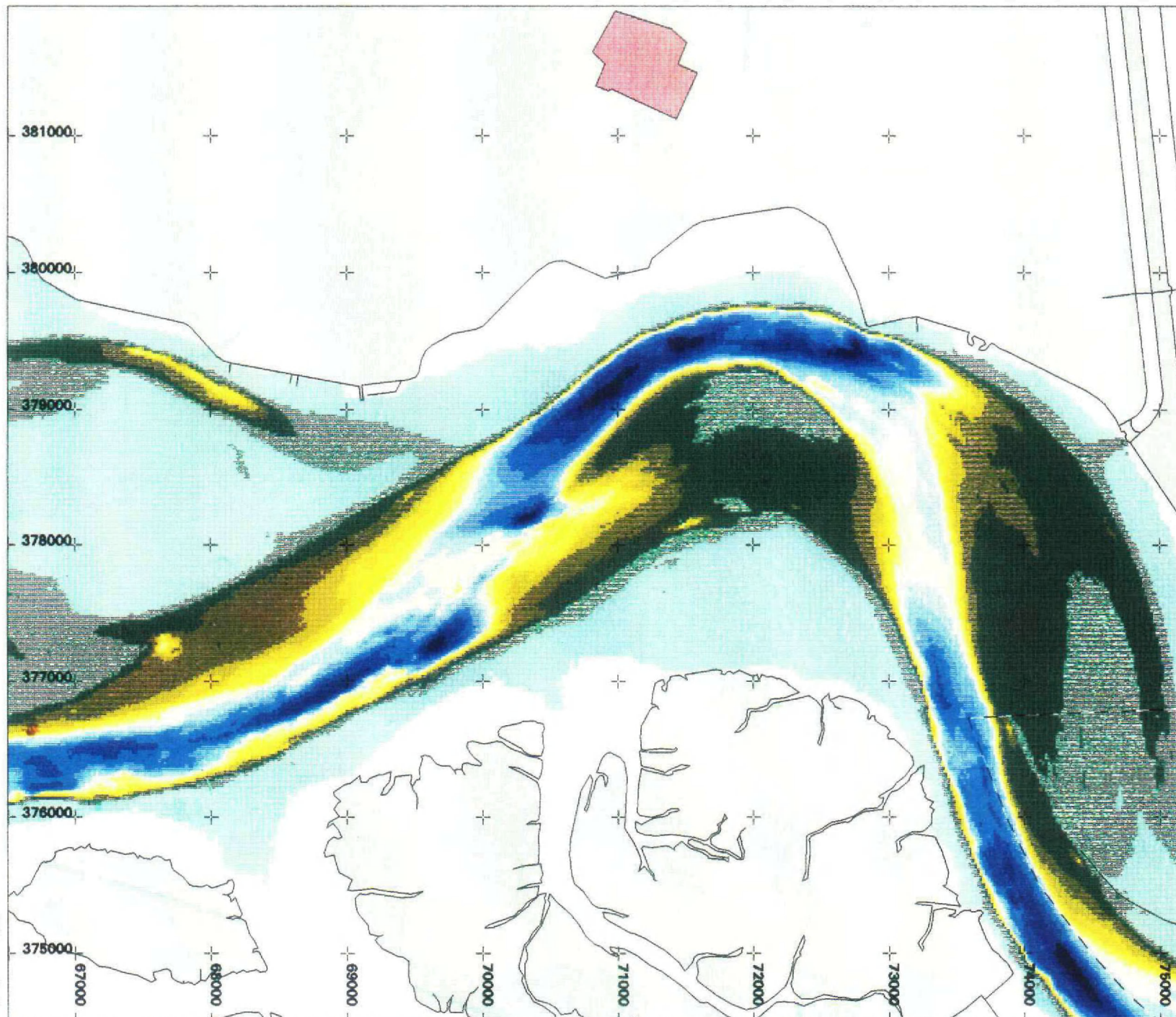
Schaal: 1:40.000



Oostweert

Rijkswaterstaat voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat

Arc-Info applicatie PlotGIS
Drs. L.A. Uit den Bogard

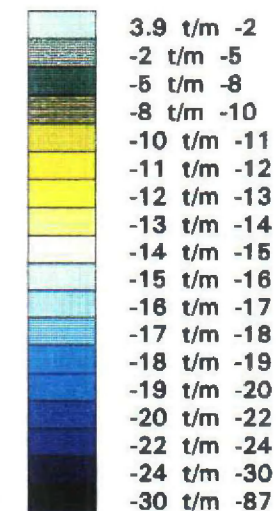


Westerschelde 1994

Drempels van Bath en
Valkenisse

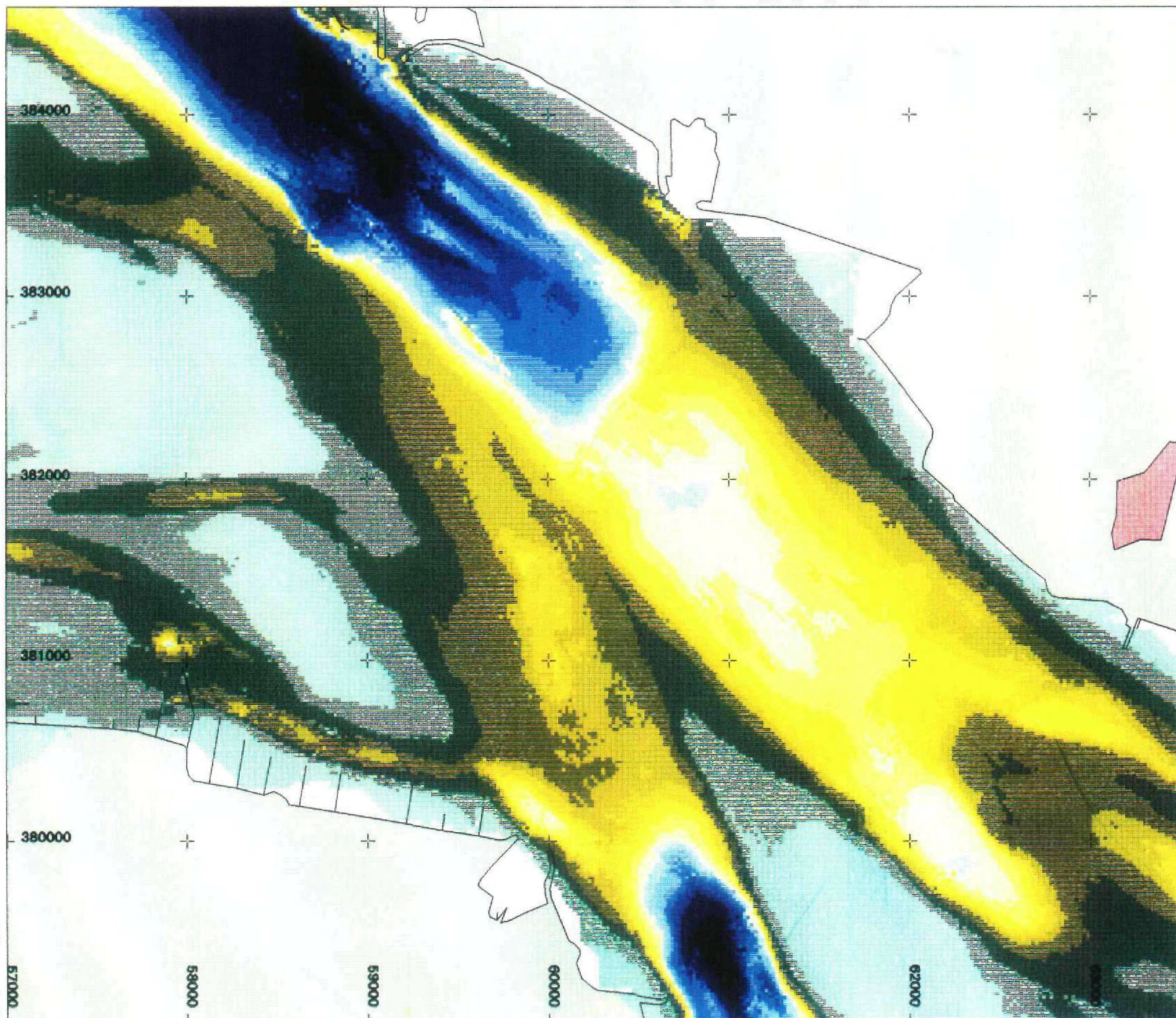
Legenda

Hoogte tov. NAP (m)



Schaal: 1:40.000

Oostwest
Rijksinstituut voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat
Arc-Info applicatie PlotGIS
Drs. L.A. Uit den Bogaard

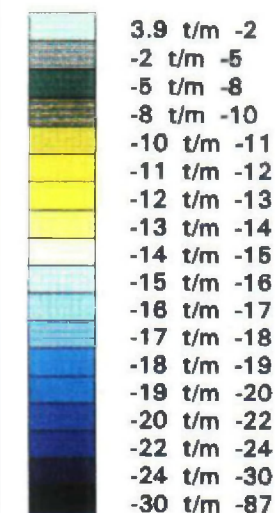


Westerschelde 1931

Drempel van Hansweert

Legenda

Hoogte tov. NAP (m)



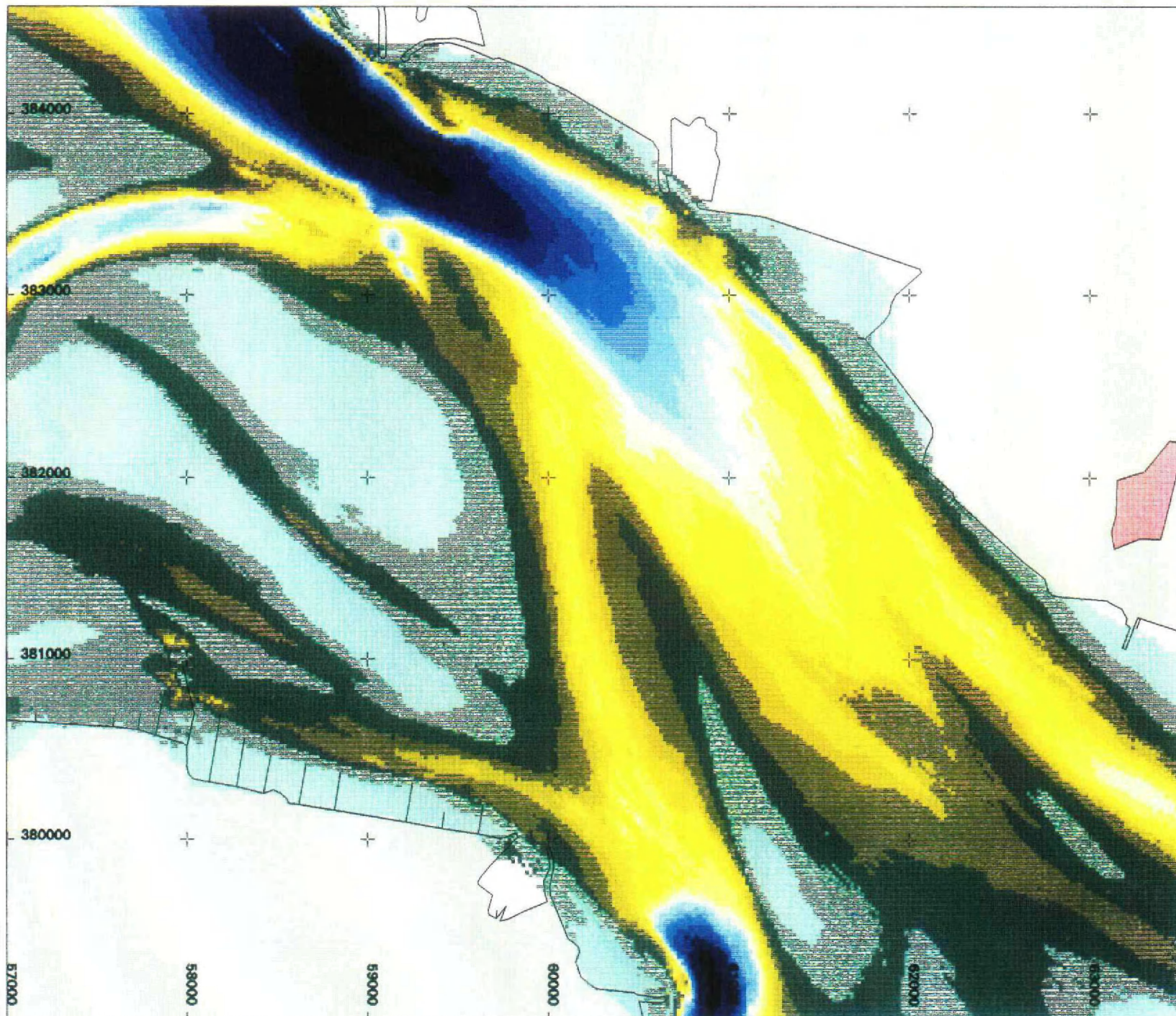
Schaal: 1:30.000

Oostwest



Rijkswaterstaat
Rijksinstituut voor Kust en Zee

Arc-Info applicatie PlotGIS
Drs. L.A. Uit den Bogaard



Westerschelde 1955

Drempel van Hansweert

Legenda

Hoogte tov. NAP (m)

	3.9 t/m -2
	-2 t/m -5
	-5 t/m -8
	-8 t/m -10
	-10 t/m -11
	-11 t/m -12
	-12 t/m -13
	-13 t/m -14
	-14 t/m -15
	-15 t/m -16
	-16 t/m -17
	-17 t/m -18
	-18 t/m -19
	-19 t/m -20
	-20 t/m -22
	-22 t/m -24
	-24 t/m -30
	-30 t/m -87

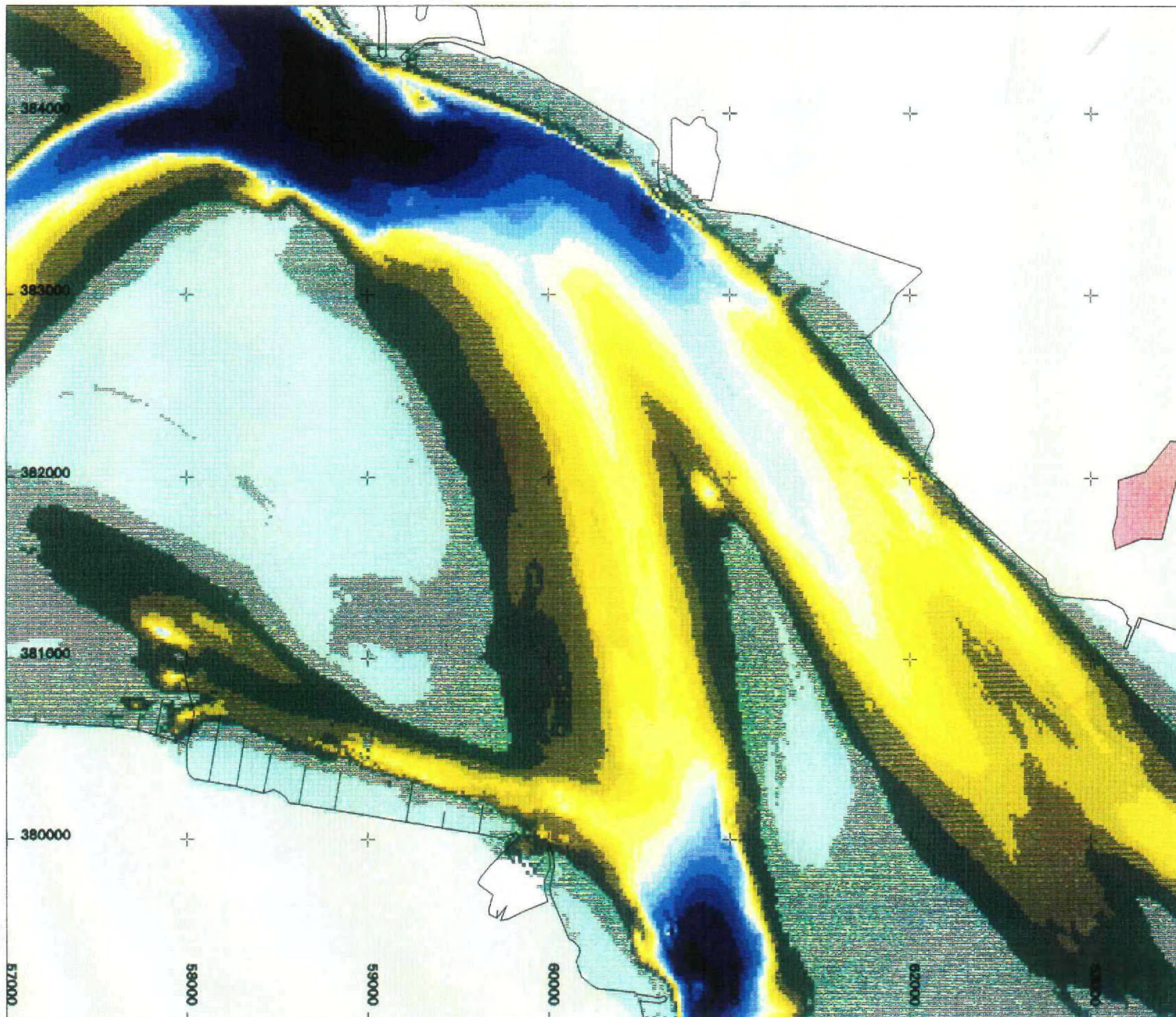
Schaal: 1:30.000



Oostwaart

Rijksinstituut voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat

Arc-Info applicatie PlotGIS
Drs. L.A. Uit den Bogaard



Westerschelde 1967

Drempel van Hansweert

Legenda

Hoogte tov. NAP (m)

	3.9 t/m -2
	-2 t/m -5
	-5 t/m -8
	-8 t/m -10
	-10 t/m -11
	-11 t/m -12
	-12 t/m -13
	-13 t/m -14
	-14 t/m -15
	-15 t/m -16
	-16 t/m -17
	-17 t/m -18
	-18 t/m -19
	-19 t/m -20
	-20 t/m -22
	-22 t/m -24
	-24 t/m -30
	-30 t/m -87

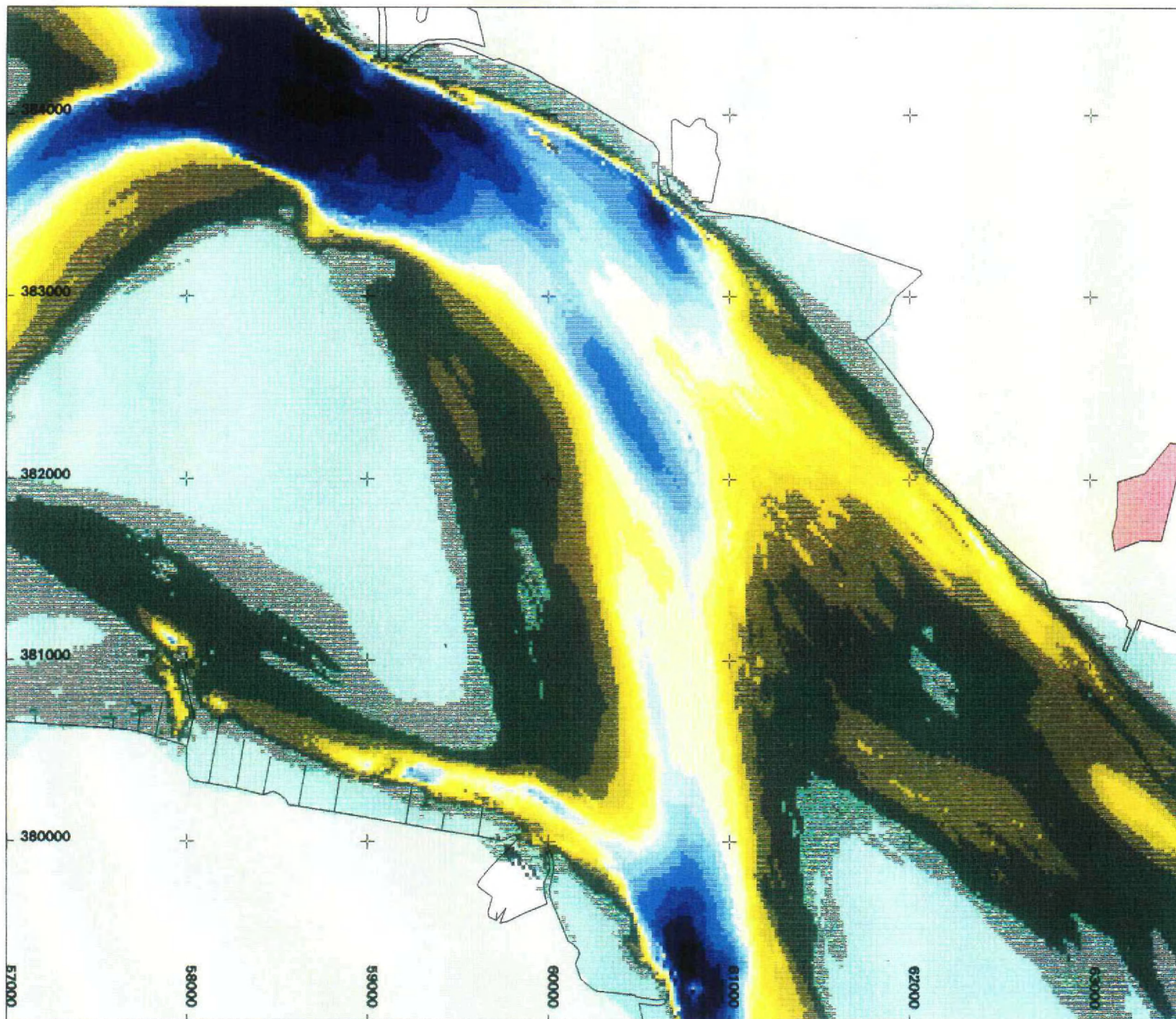
Schaal: 1:30.000

Oostweest



Rijkswaterstaat voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat

Arc-Info applicatie PlotGIS
Drs. L.A. Uit den Bogaard

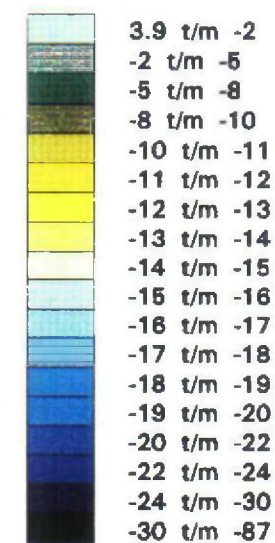


Westerschelde 1977

Drampel van Hansweert

Legenda

Hoogte tov. NAP (m)



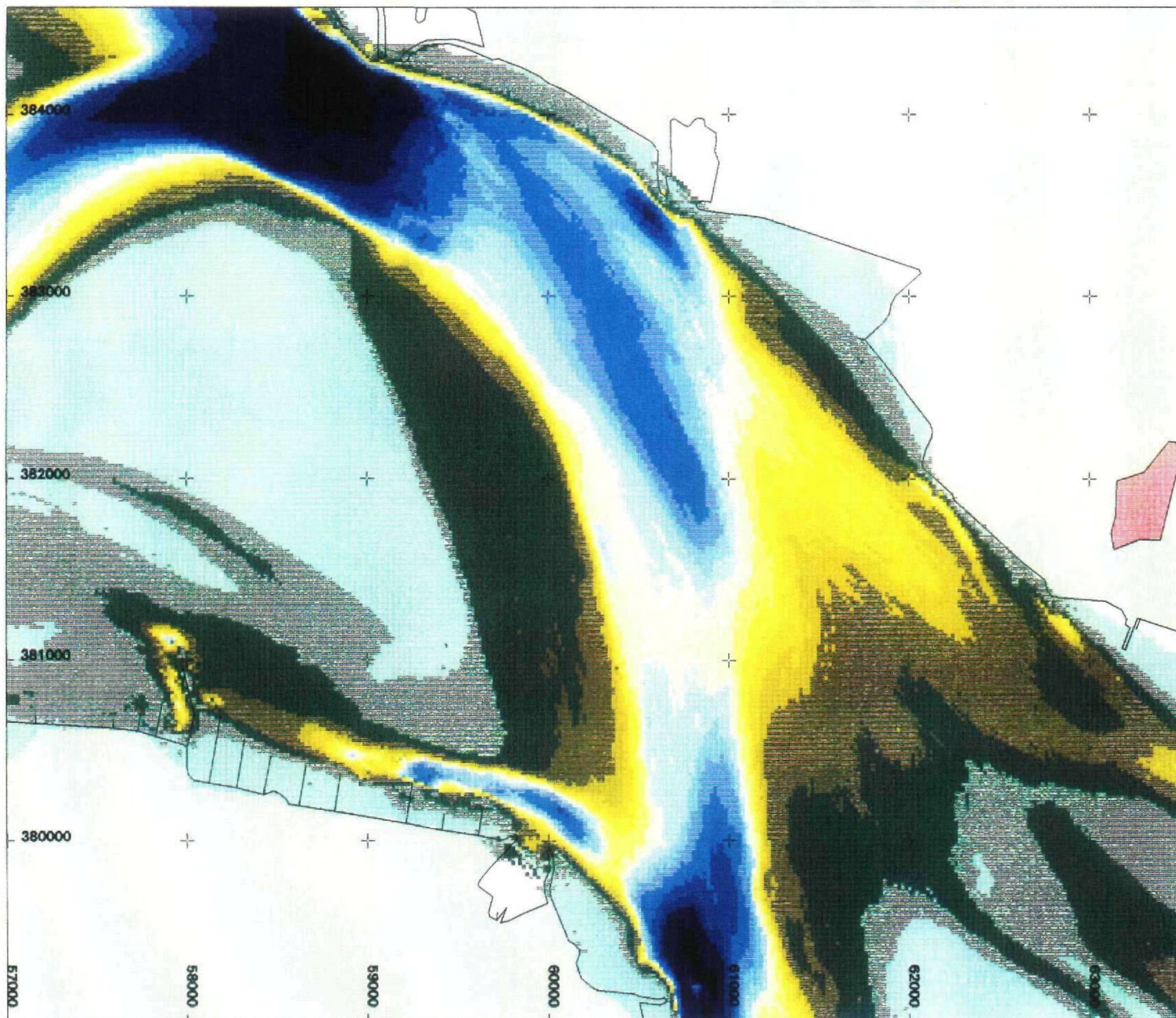
Schaal: 1:30.000

Oostweert



Rijkswaterstaat
Rijkswaterstaat

Arc-Info applicatie PlotGIS
Drs. L.A. Uit den Bogaard



Westerschelde 1986

Drempel van Hanswaert

Legenda

Hoogte tov. NAP (m)

	3.9 t/m -2
	-2 t/m -5
	-5 t/m -8
	-8 t/m -10
	-10 t/m -11
	-11 t/m -12
	-12 t/m -13
	-13 t/m -14
	-14 t/m -15
	-15 t/m -16
	-16 t/m -17
	-17 t/m -18
	-18 t/m -19
	-19 t/m -20
	-20 t/m -22
	-22 t/m -24
	-24 t/m -30
	-30 t/m -87

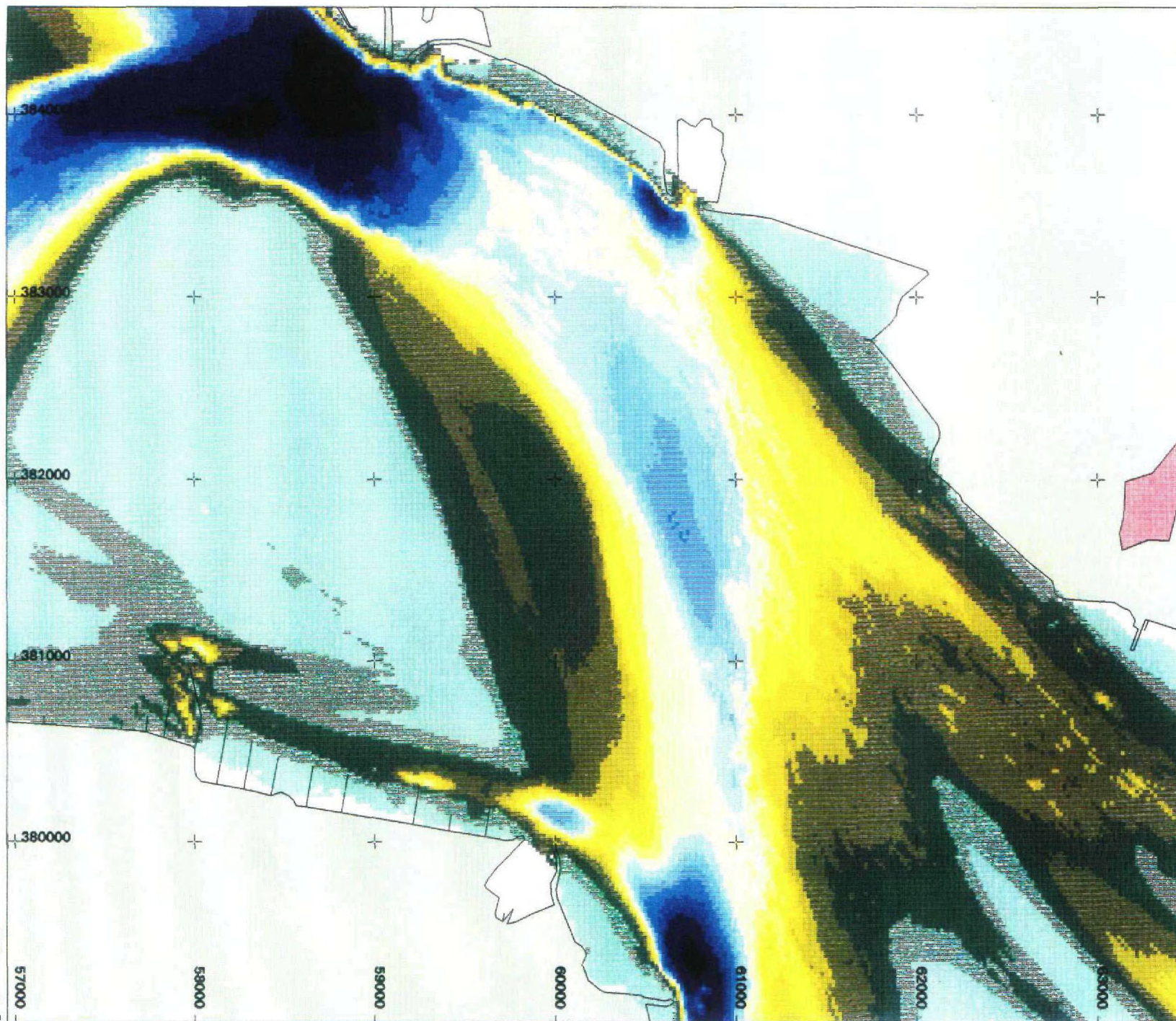
Schaal: 1:30.000

Oostweest



Rijkswaterstaat
Rijksinstituut voor Kust en Zee

Arc-Info applicatie PlotGIS
Drs. L.A. Uit den Bogaard

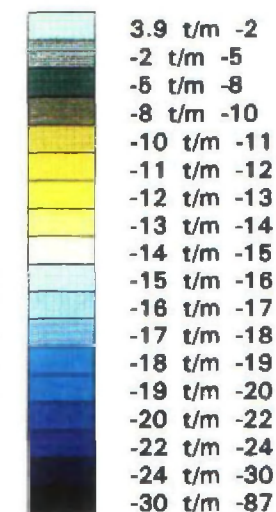


Westerschelde 1994

Drempel van Hansweert

Legenda

Hoogte tov. NAP (m)



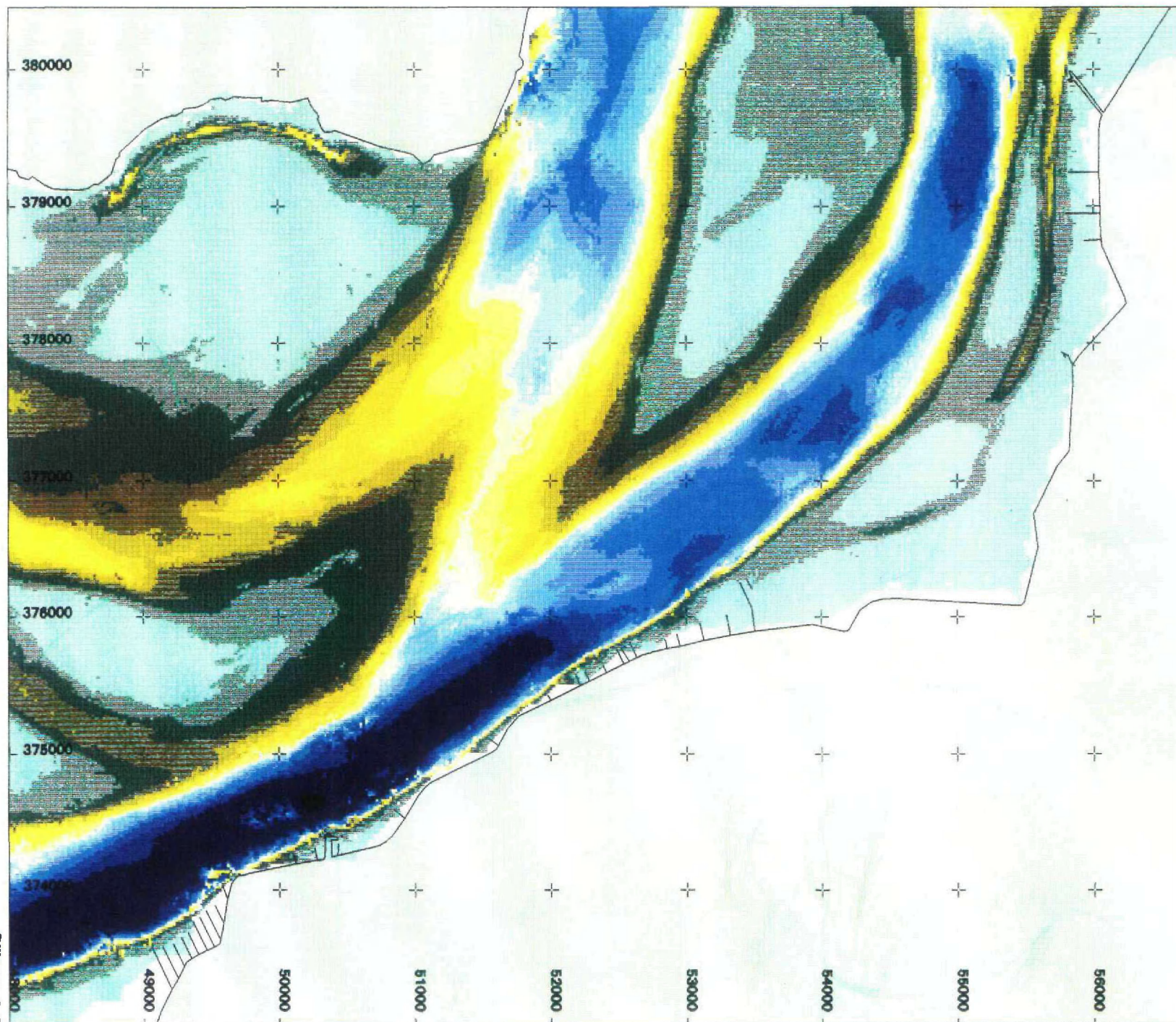
Schaal: 1:30.000



Oostweert

Rijkswaterstaat voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat

Arc-Info applicatie PlotGIS
Drs. L.A. Uit den Bogaard



Westerschelde 1931

Drempel van Baarland

Legenda

Hoogte tov. NAP (m)

	3.9 t/m	-2
	-2 t/m	-5
	-5 t/m	-8
	-8 t/m	-10
	-10 t/m	-11
	-11 t/m	-12
	-12 t/m	-13
	-13 t/m	-14
	-14 t/m	-15
	-15 t/m	-16
	-16 t/m	-17
	-17 t/m	-18
	-18 t/m	-19
	-19 t/m	-20
	-20 t/m	-22
	-22 t/m	-24
	-24 t/m	-30
	-30 t/m	-87

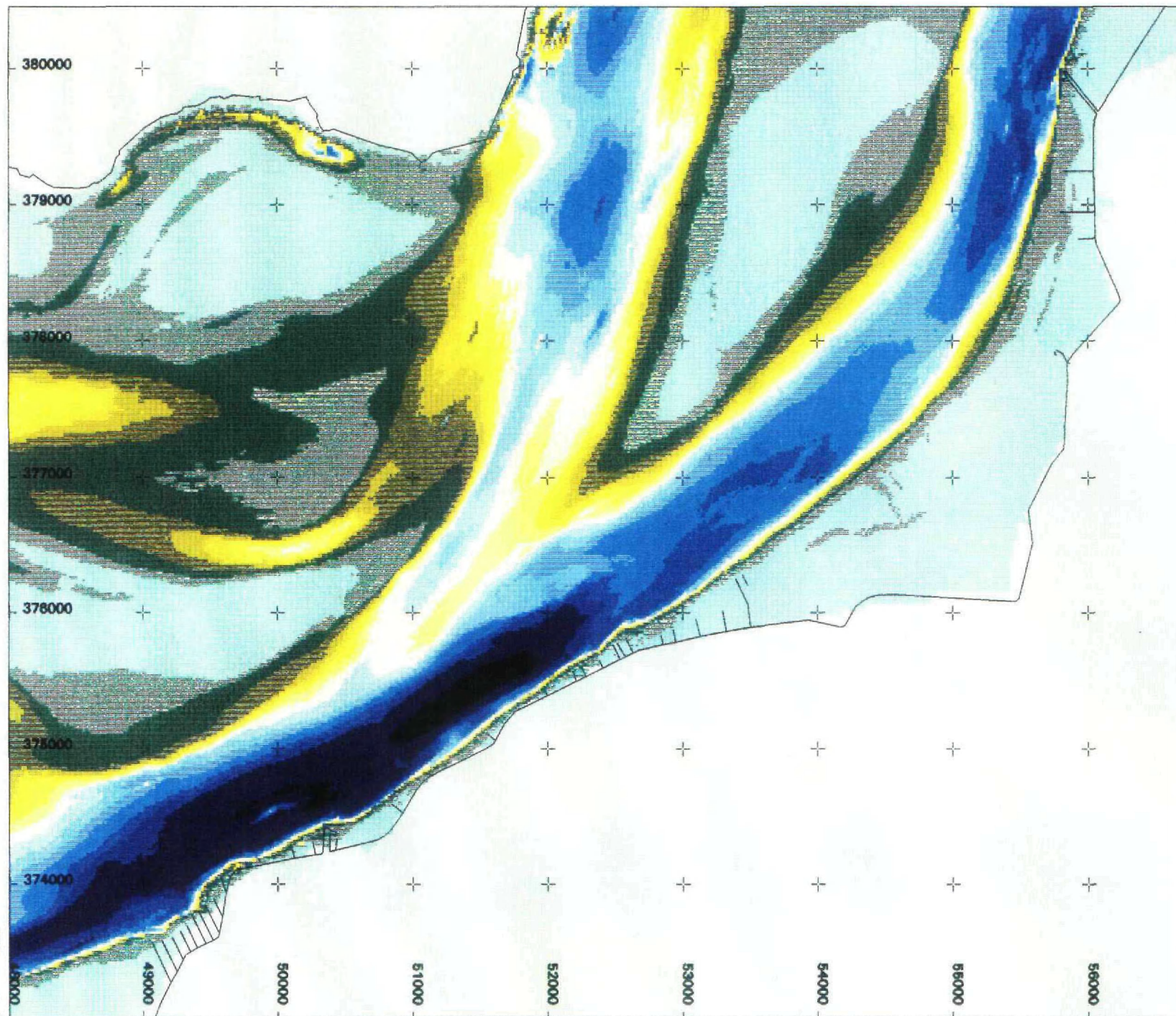
Schaal: 1:40.000



Oostwest

Rijkswaterstaat voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat

Arc-Info applicatie PlotGIS
Drs. L.A. Uit den Bogaard



Westerschelde 1955

Drempel van Baarland

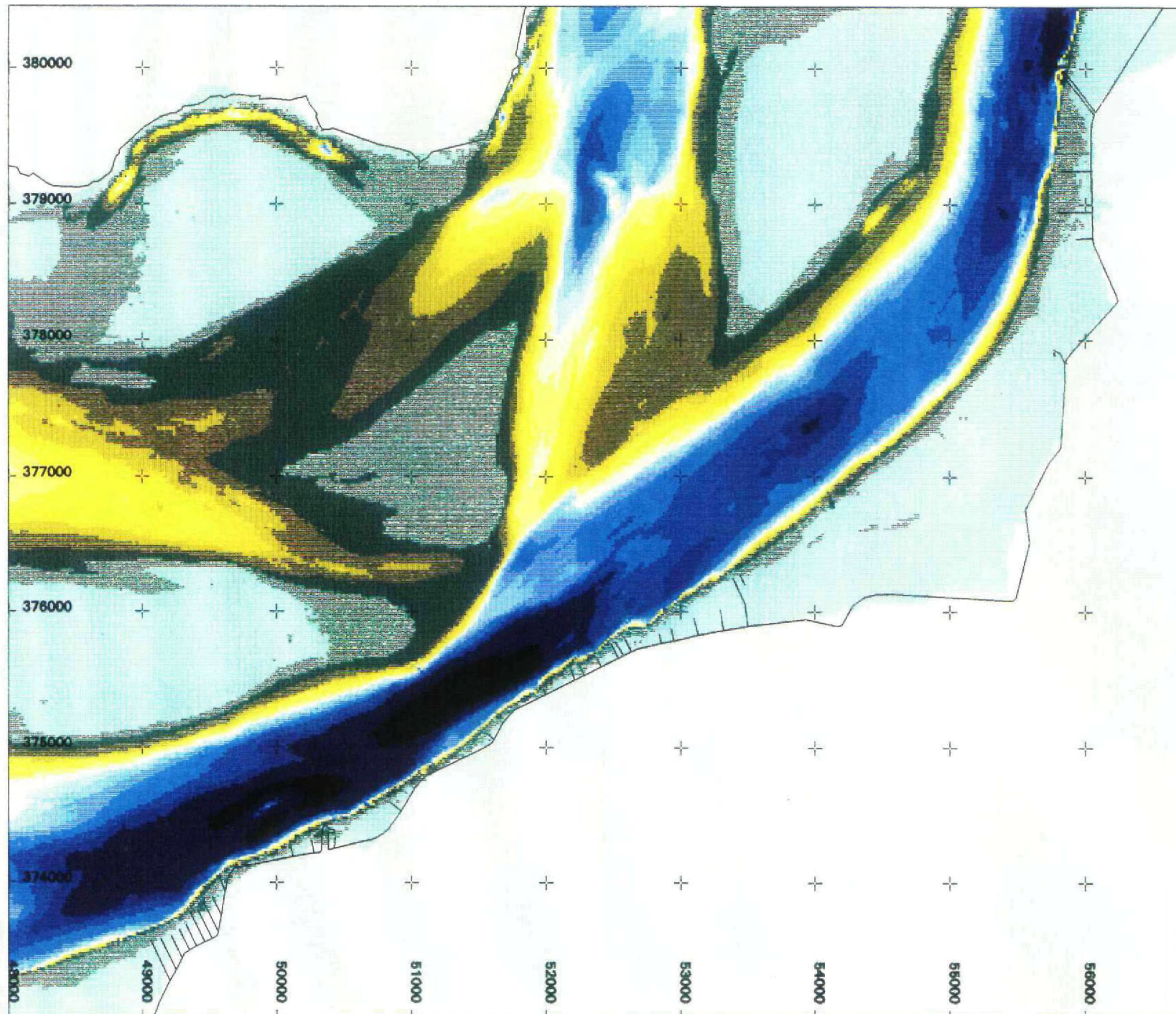
Legenda

Hoogte tov. NAP (m)

	3.9 t/m -2
	-2 t/m -5
	-5 t/m -8
	-8 t/m -10
	-10 t/m -11
	-11 t/m -12
	-12 t/m -13
	-13 t/m -14
	-14 t/m -15
	-15 t/m -16
	-16 t/m -17
	-17 t/m -18
	-18 t/m -19
	-19 t/m -20
	-20 t/m -22
	-22 t/m -24
	-24 t/m -30
	-30 t/m -87

Schaal: 1:40.000

Oostwest
 Rijksinstituut voor Kust en Zee
 Rijkswaterstaat
 Arc-info applicatie PlotGIS
 Drs. L.A. Uit den Bogaard



Westerschelde 1967

Drempel van Baarland

Legenda

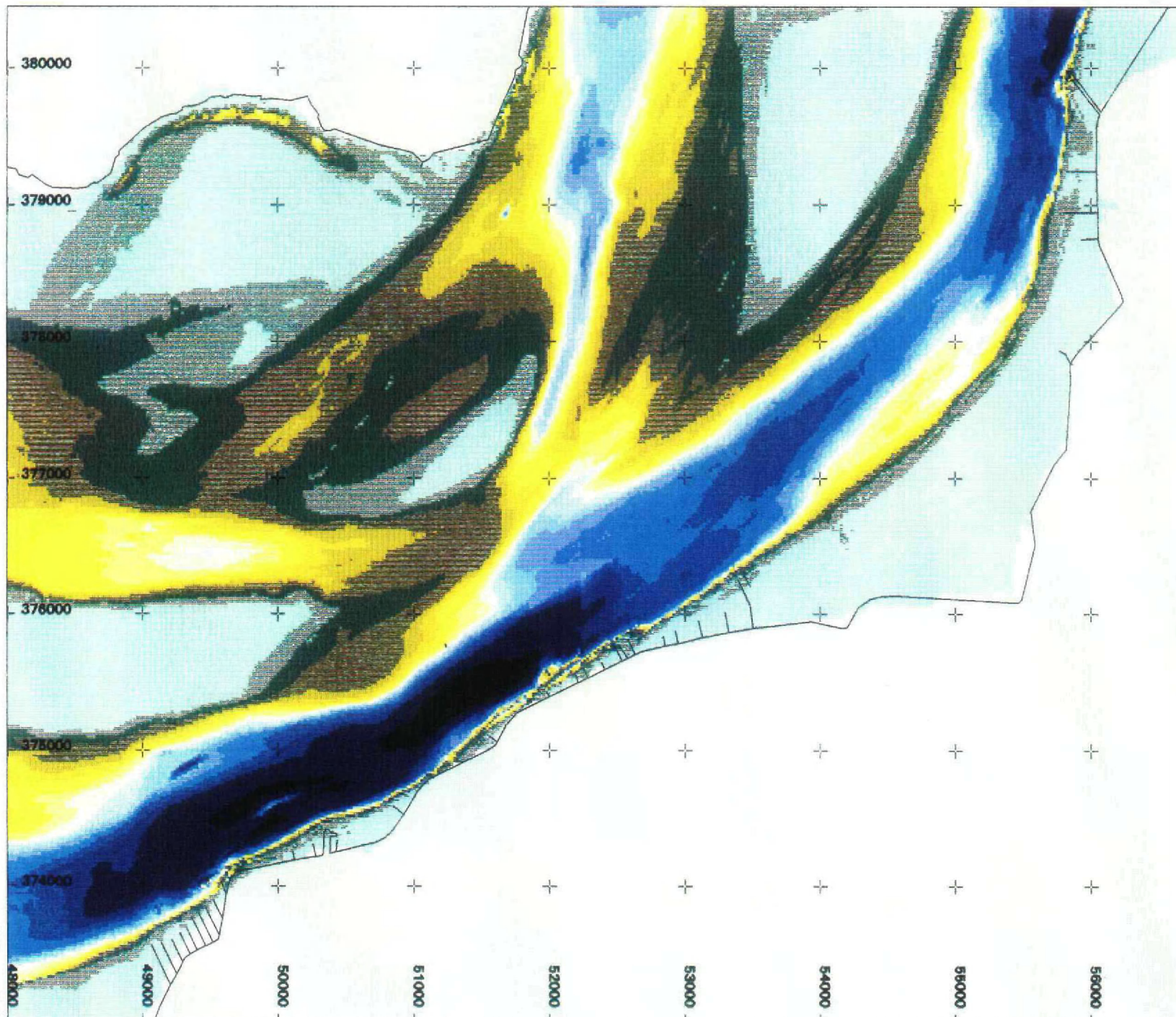
Hoogte tov. NAP (m)

	3.9 t/m -2
	-2 t/m -5
	-5 t/m -8
	-8 t/m -10
	-10 t/m -11
	-11 t/m -12
	-12 t/m -13
	-13 t/m -14
	-14 t/m -15
	-15 t/m -16
	-16 t/m -17
	-17 t/m -18
	-18 t/m -19
	-19 t/m -20
	-20 t/m -22
	-22 t/m -24
	-24 t/m -30
	-30 t/m -87

Schaal: 1:40.000

Oostwest

 Rijkswaterstaat
 Arc-Info applicatie PlotGIS
 Drs. L.A. Uit den Bogaard

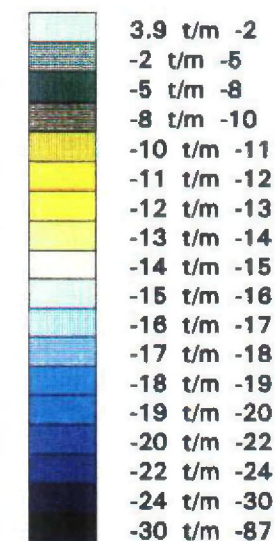


Westerschelde 1977

Drempel van Baarland

Legenda

Hoogte tov. NAP (m)



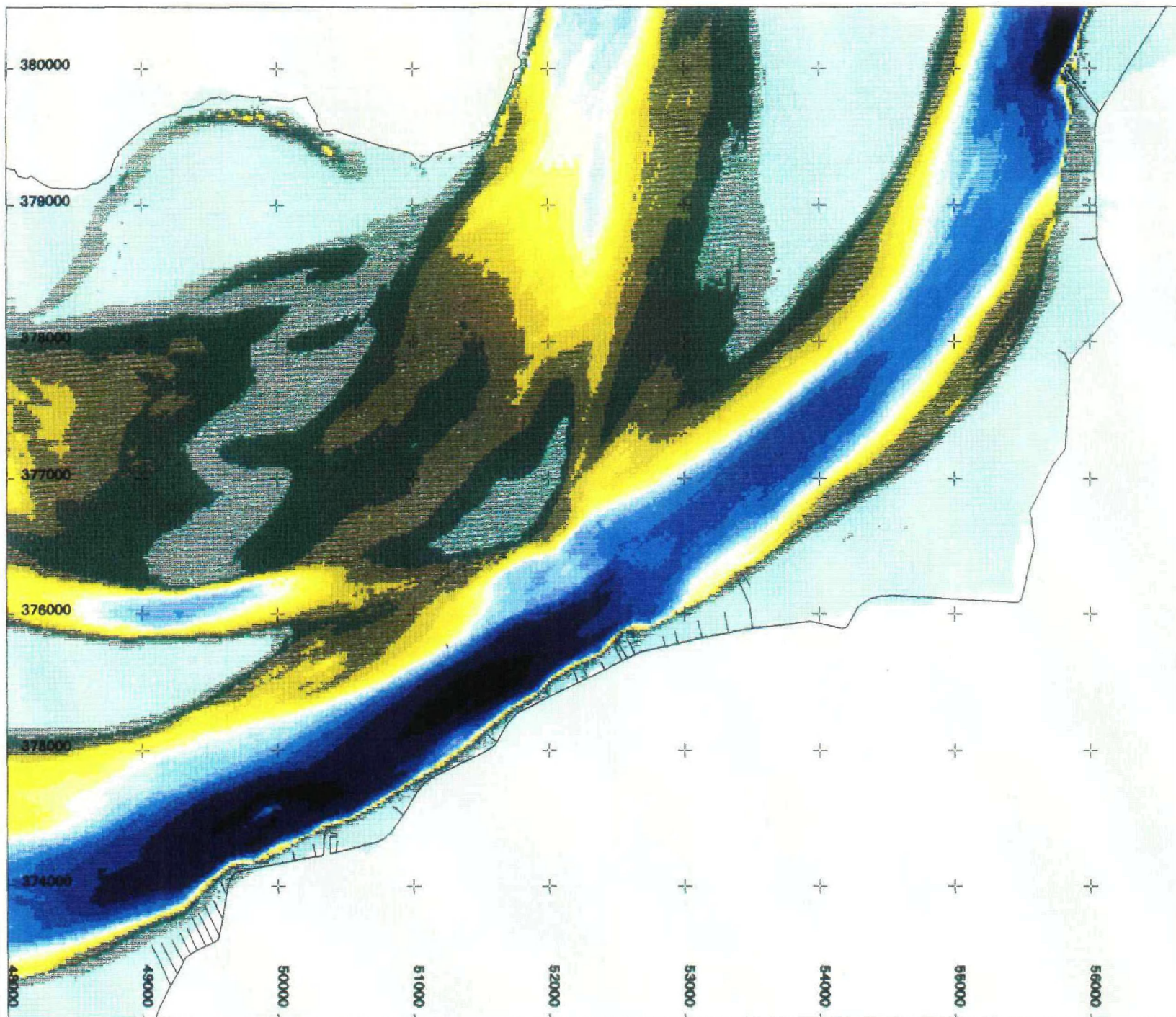
Schaal: 1:40.000



Oostweert

Rijkswaterstaat
Rijksinstituut voor Kust en Zee

Arc-Info applicatie PlotGIS
Drs. L.A. Uit den Bogaard



Westerschelde 1986

Drempel van Baarland

Legenda

Hoogte tov. NAP (m)

	3.9 t/m -2
	-2 t/m -5
	-5 t/m -8
	-8 t/m -10
	-10 t/m -11
	-11 t/m -12
	-12 t/m -13
	-13 t/m -14
	-14 t/m -15
	-15 t/m -16
	-16 t/m -17
	-17 t/m -18
	-18 t/m -19
	-19 t/m -20
	-20 t/m -22
	-22 t/m -24
	-24 t/m -30
	-30 t/m -87

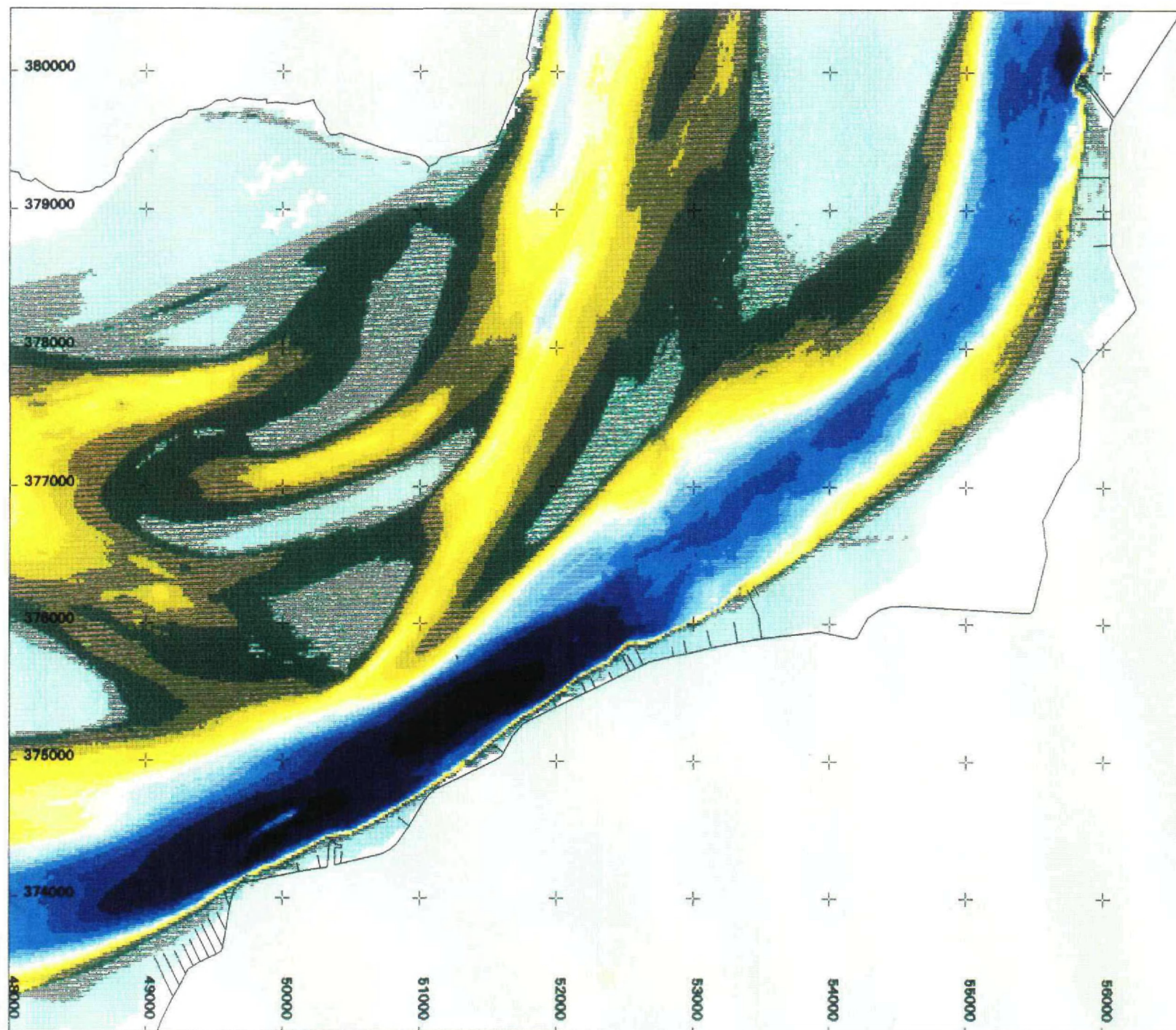
Schaal: 1:40.000



Oostwest

Rijkswaterstaat
Rijksinstituut voor Kust en Zee

Arc-Info applicatie PlotGIS
Drs. L.A. Uit den Bogaard



Westerschelde 1994

Drempel van Baarland

Legenda

Hoogte tov. NAP (m)

3.9 t/m	-2
-2 t/m	-5
-5 t/m	-8
-8 t/m	-10
-10 t/m	-11
-11 t/m	-12
-12 t/m	-13
-13 t/m	-14
-14 t/m	-15
-15 t/m	-16
-16 t/m	-17
-17 t/m	-18
-18 t/m	-19
-19 t/m	-20
-20 t/m	-22
-22 t/m	-24
-24 t/m	-30
-30 t/m	-87

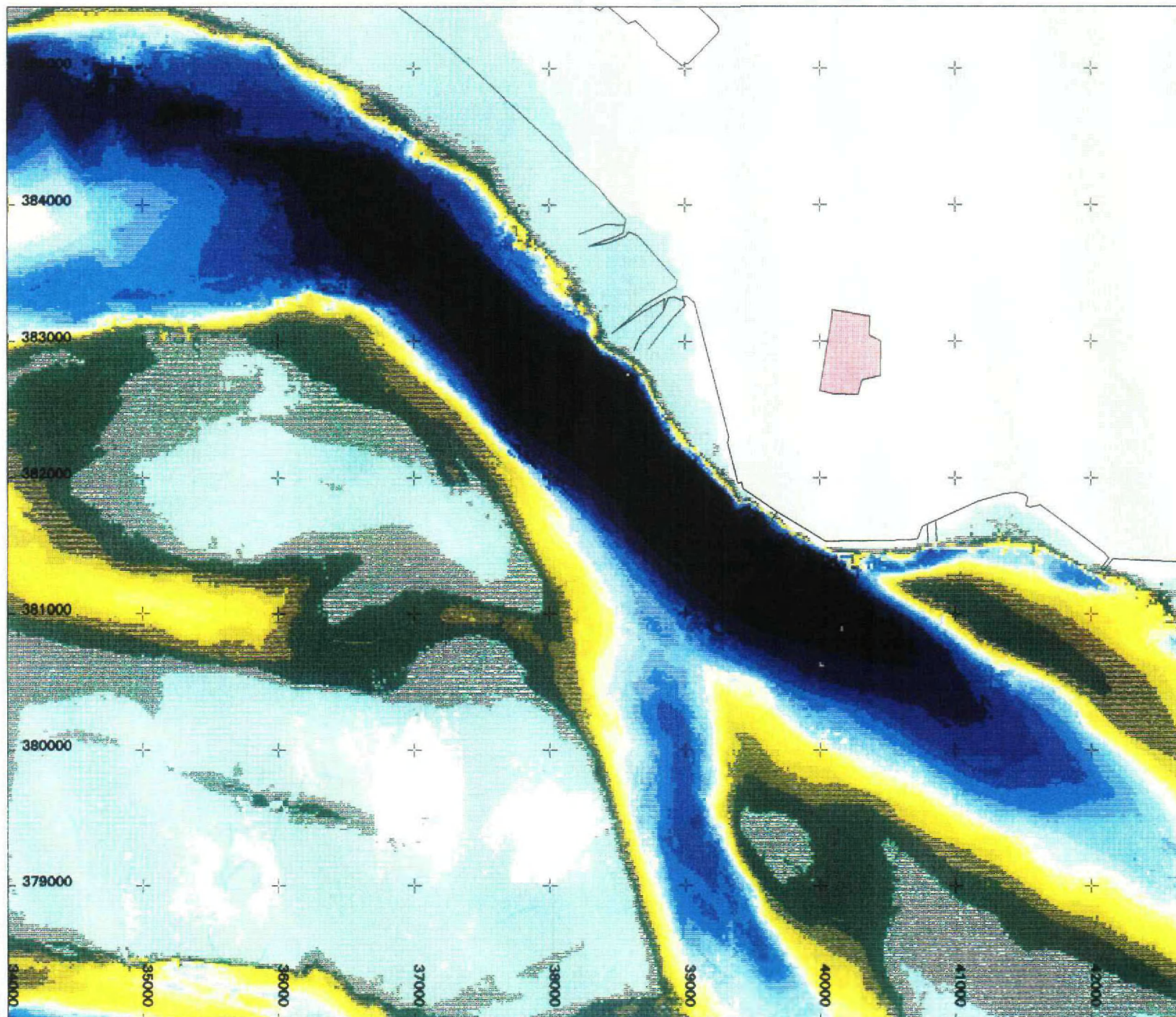
Schaal: 1:40.000



Grootwest

Rijkswaterstaat voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat

Arc-Info applicatie PlotGIS
Drs. L.A. Uit den Bogaard

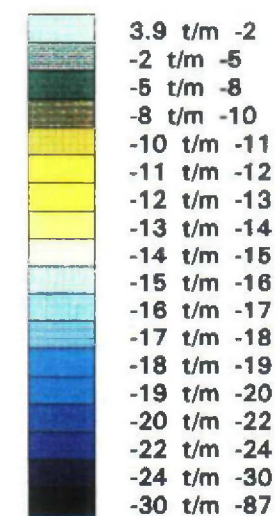


Westerschelde 1931

Drempel van Borssele

Legenda

Hoogte tov. NAP (m)



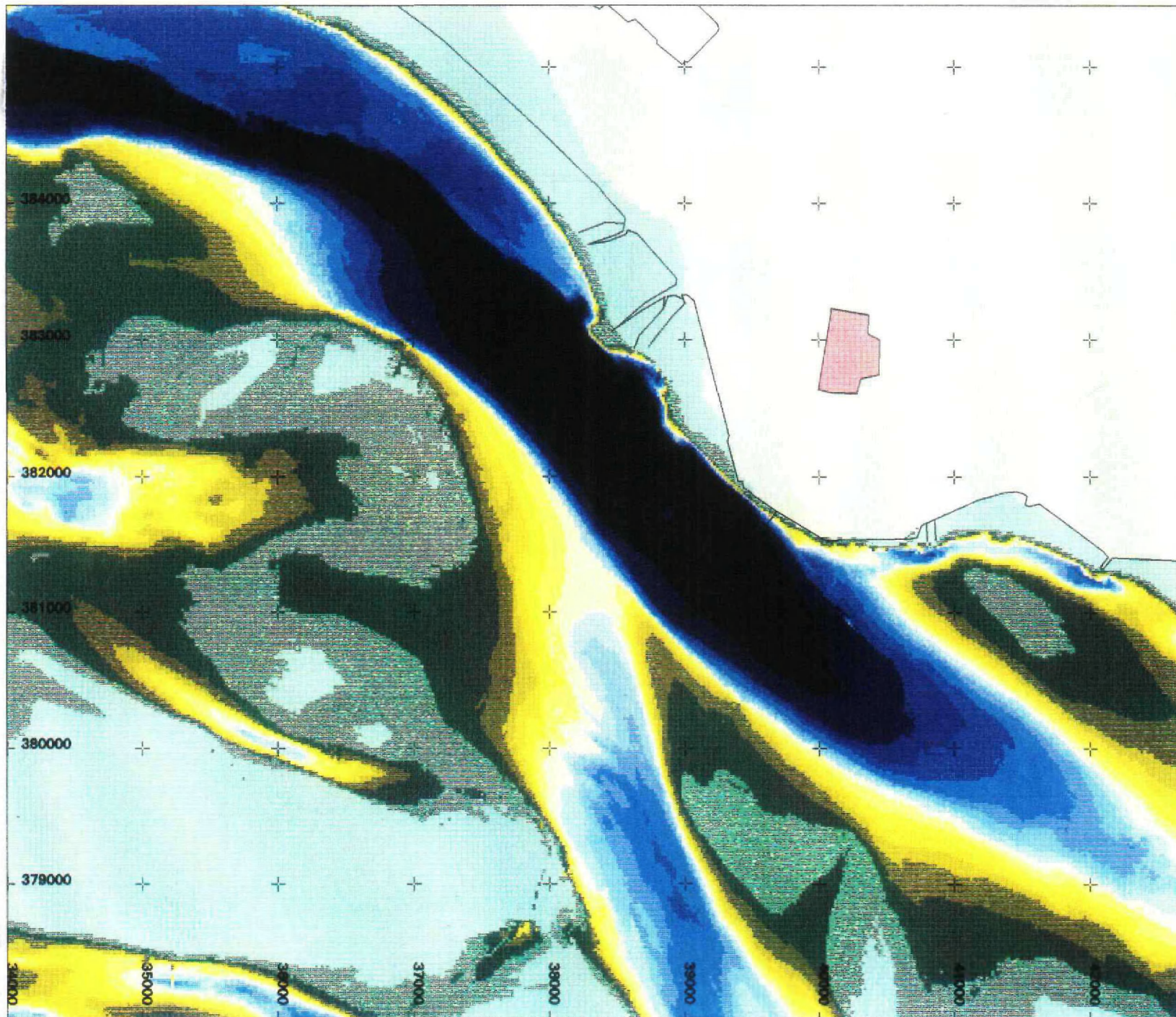
Schaal: 1:40.000



Oostwest

Rijkswaterstaat
Rijksinstituut voor Kust en Zee

Arc-Info applicatie PlotGIS
Drs. L.A. Uijt den Bogaard

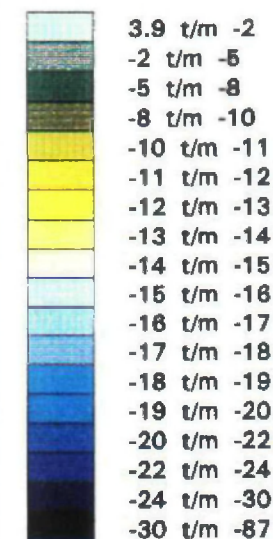


Westerschelde 1955

Drempel van Borsselle

Legenda

Hoogte tov. NAP (m)



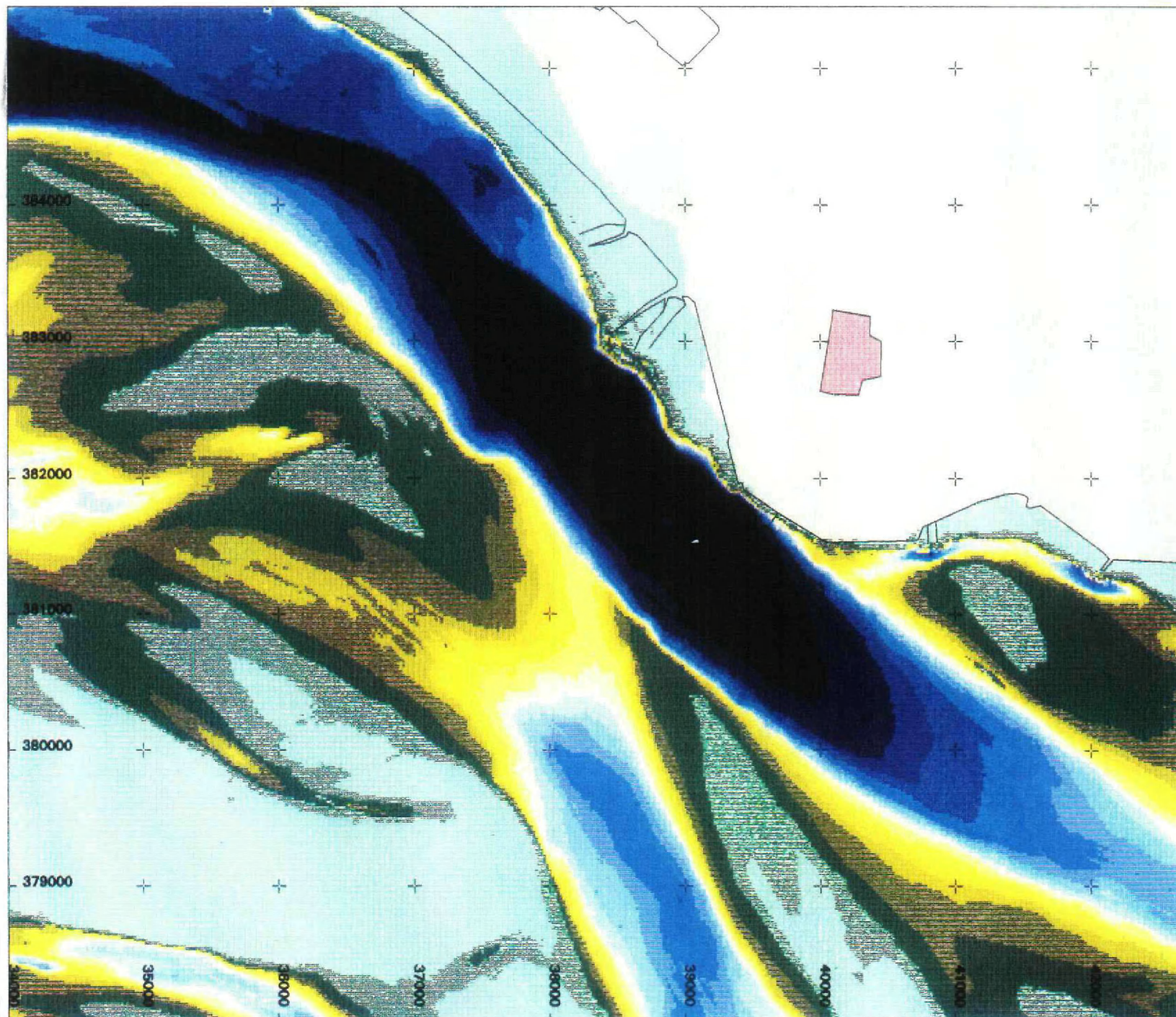
Schaal: 1:40.000

Oostwest



Rijkswaterstaat
Rijksinstituut voor Kust en Zee

Arc-Info applicatie PlotGIS
Drs. L.A. Uit den Bogaard

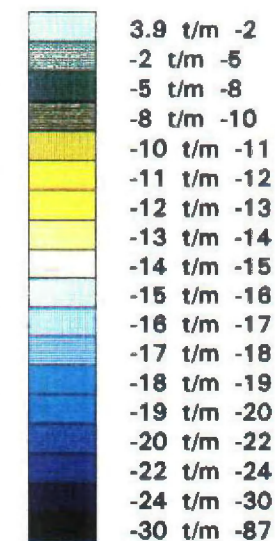


Westerschelde 1968

Drempel van Borssele

Legenda

Hoogte tov. NAP (m)



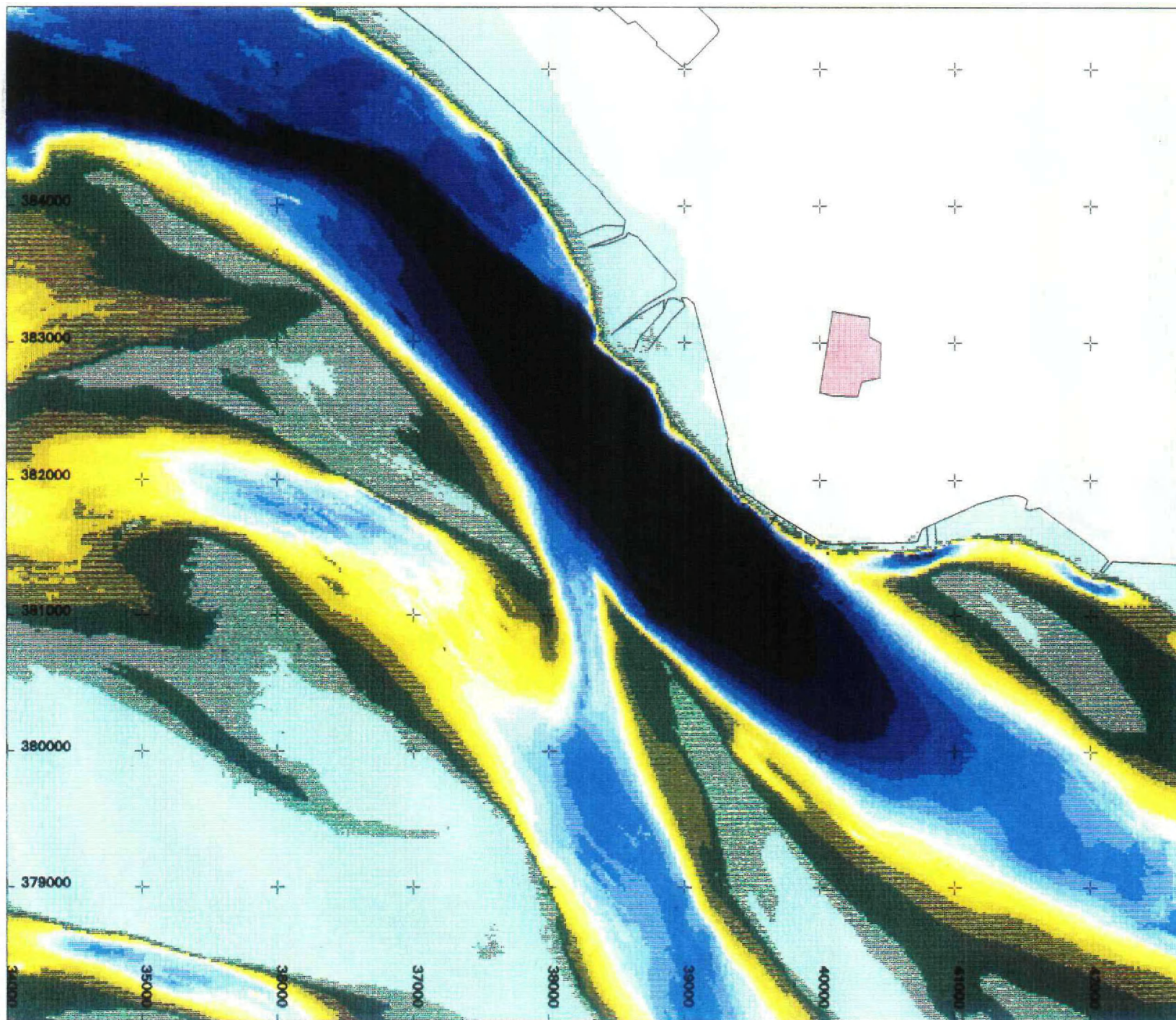
Schaal: 1:40.000

Oostwest



Rijkswaterstaat
Rijksinstituut voor Kust en Zee

Arc-Info applicatie PlotGIS
Drs. L.A. Uit den Bogaard



Westerschelde 1978

Drempel van Borssela

Legenda

Hoogte tov. NAP (m)

	3.9 t/m -2
	-2 t/m -5
	-5 t/m -8
	-8 t/m -10
	-10 t/m -11
	-11 t/m -12
	-12 t/m -13
	-13 t/m -14
	-14 t/m -15
	-15 t/m -16
	-16 t/m -17
	-17 t/m -18
	-18 t/m -19
	-19 t/m -20
	-20 t/m -22
	-22 t/m -24
	-24 t/m -30
	-30 t/m -87

Schaal: 1:40.000

Oostwest



Rijksinstituut voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat

Arc-Info applicatie PlotGIS
Drs. L.A. Uik den Bogaard

Westerschelde 1986

Drempel van Borssele

Legenda

Hoogte tov. NAP (m)

	3.9 t/m -2
	-2 t/m -5
	-5 t/m -8
	-8 t/m -10
	-10 t/m -11
	-11 t/m -12
	-12 t/m -13
	-13 t/m -14
	-14 t/m -15
	-15 t/m -16
	-16 t/m -17
	-17 t/m -18
	-18 t/m -19
	-19 t/m -20
	-20 t/m -22
	-22 t/m -24
	-24 t/m -30
	-30 t/m -87

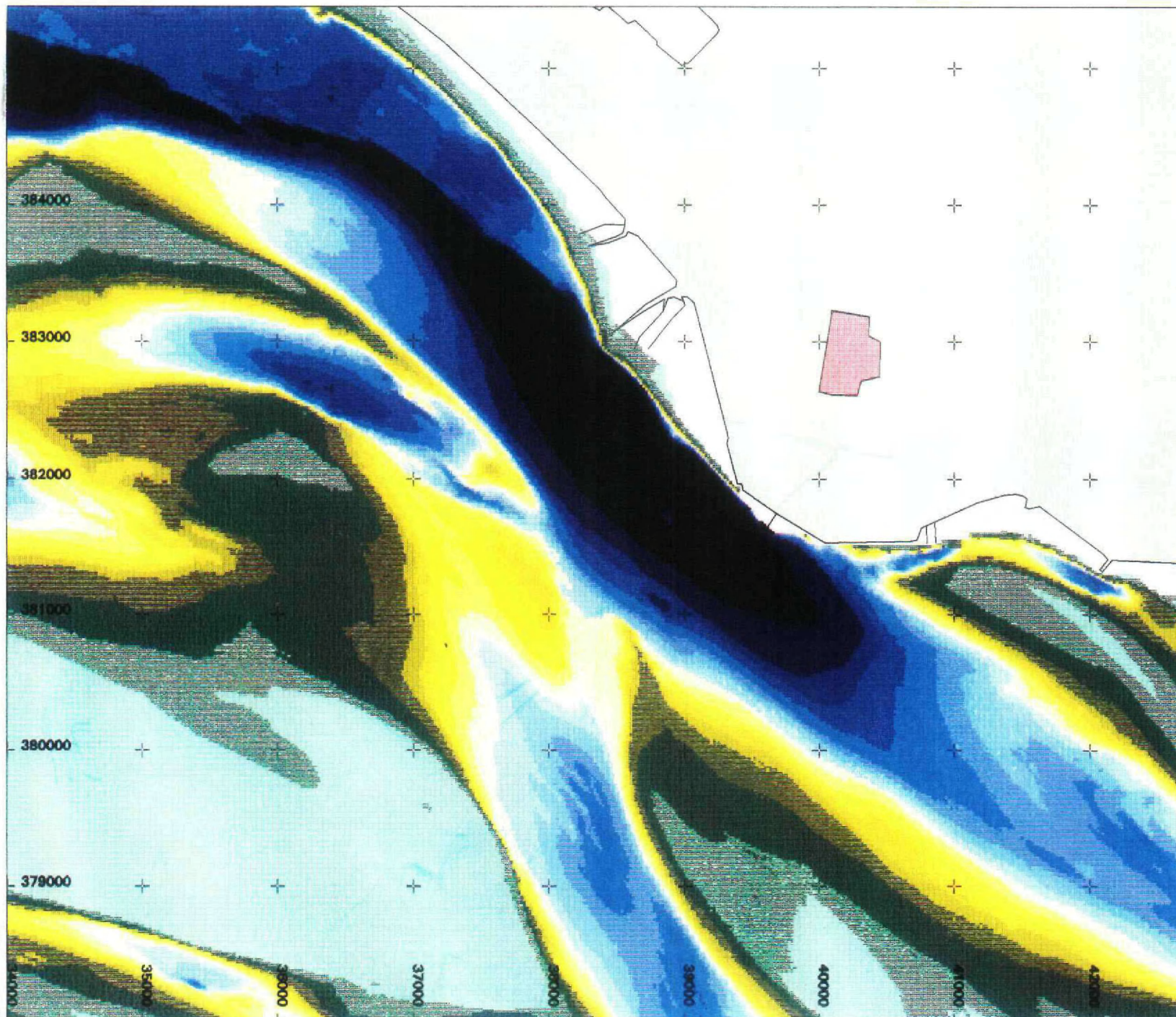
Schaal: 1:40.000

Oostwest



Rijkswaterstaat voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat

Arc-Info applicatie PlotGIS
Drs. L.A. Uit den Bogaard

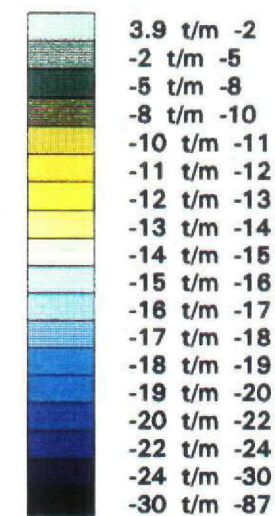


Westerschelde 1994

Drempel van Borssele

Legenda

Hoogte tov. NAP (m)



Schaal: 1:40.000

Oostwest



Rijkswaterstaat
Rijksinstituut voor Kust en Zee

Arc-Info applicatie PlotGIS
Drs. L.A. Uit den Bogaard

Bijlage B. Gemiddelde stroomsnelheden op de drempels van Bath, Valkenisse, Hansweert, Baarland en Borssele tijdens maximum eb- en vloedstroom ten tijde van een gemiddeld springtij (25 november 1988) berekend met Scaldis100

Morfologie 1988
NAP -2, -10 en -20 m dieptelijnen

Bijlage B.1 Drempels van Bath en Valkenisse
Maximum eb

Bijlage B.2 Drempels van Bath en Valkenisse
Maximum vloed

Bijlage B.3 Drempel van Hansweert
Maximum eb

Bijlage B.4 Drempel van Hansweert
Maximum vloed

Bijlage B.5 Drempel van Baarland
Maximum eb

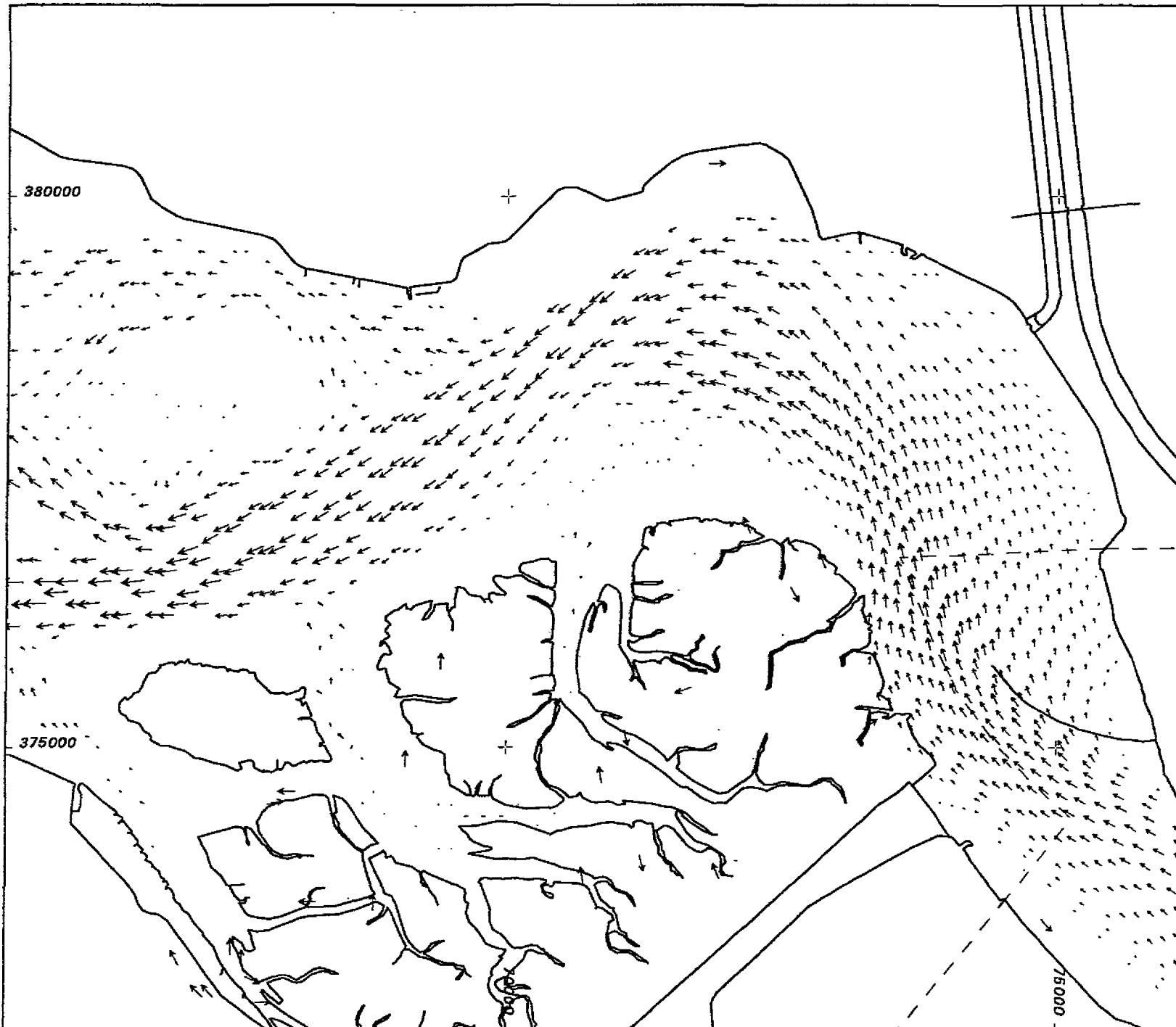
Bijlage B.6 Drempel van Baarland
Maximum vloed

Bijlage B.7 Drempel van Borssele
Maximum eb

Bijlage B.8 Drempel van Borssele
Maximum vloed

Westerschelde

Drempels van Bath en
Valkenisse
stroomsnelheden springtij
max. eb 0800 u



pijlen:
0.5 cm = 1 m/s

Schaal: 1:50.000

MOVE



Rijkswaterstaat
Rijkswaterstaat



Westerschelde

Schaal: 1:50.000

MOVE
Rijksinstituut voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat

385000

380000

375000

65000

70000

75000

Westerschelde

Drempels van Bath en
Valkenisse
stroomsnelheden springtij
max. vloed 0330 u

pielen:
0.5 cm = 1 m/s

Schaal: 1:75.000

MOVE



Rijkswaterstaat voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat



Westerschelde

Schaal: 1:75.000

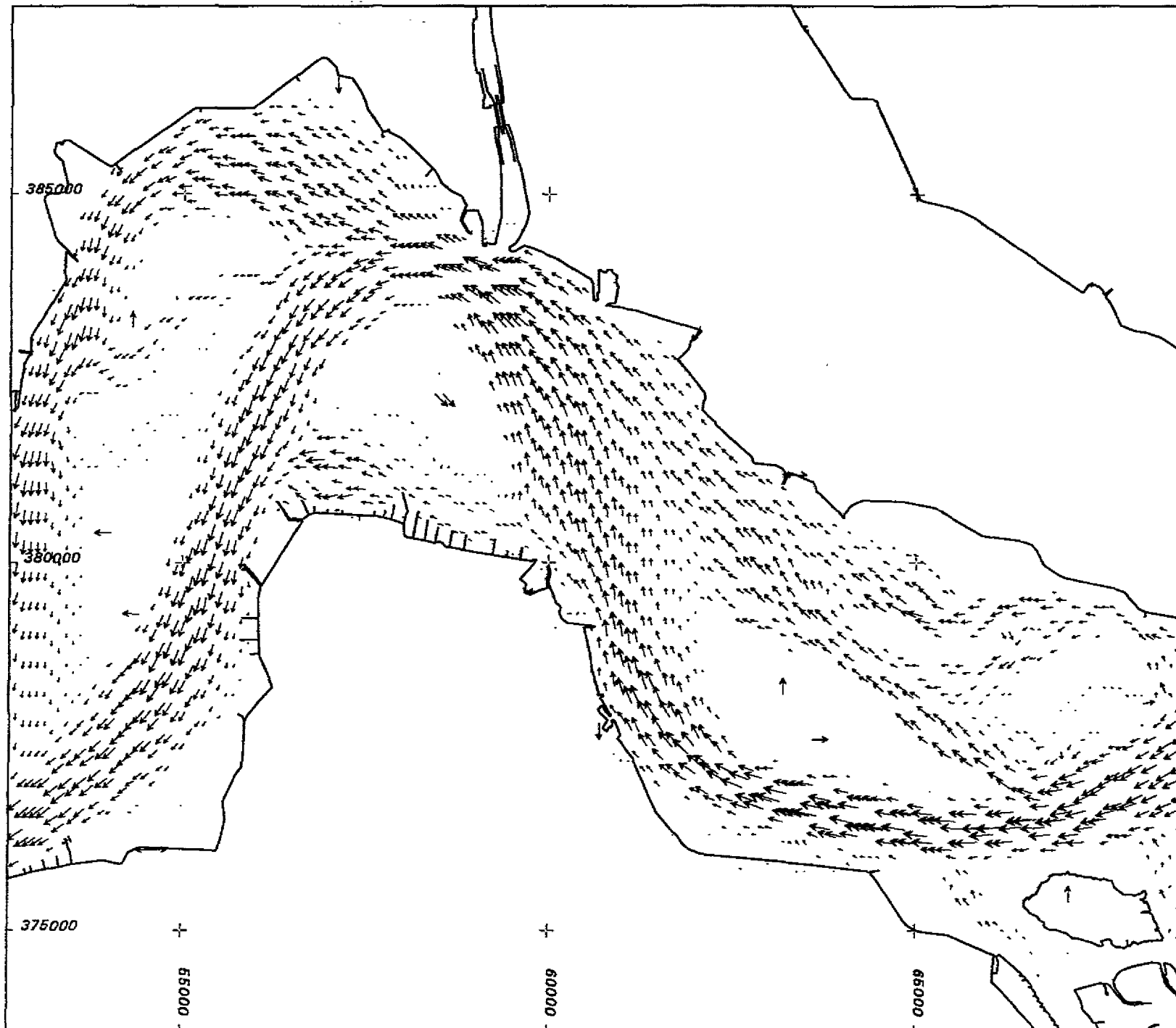
MOVE

Rijksinstituut voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat

Westerschelde

Drempel van Hansweert

stroomsnelheden springtij
max. eb 0800 u

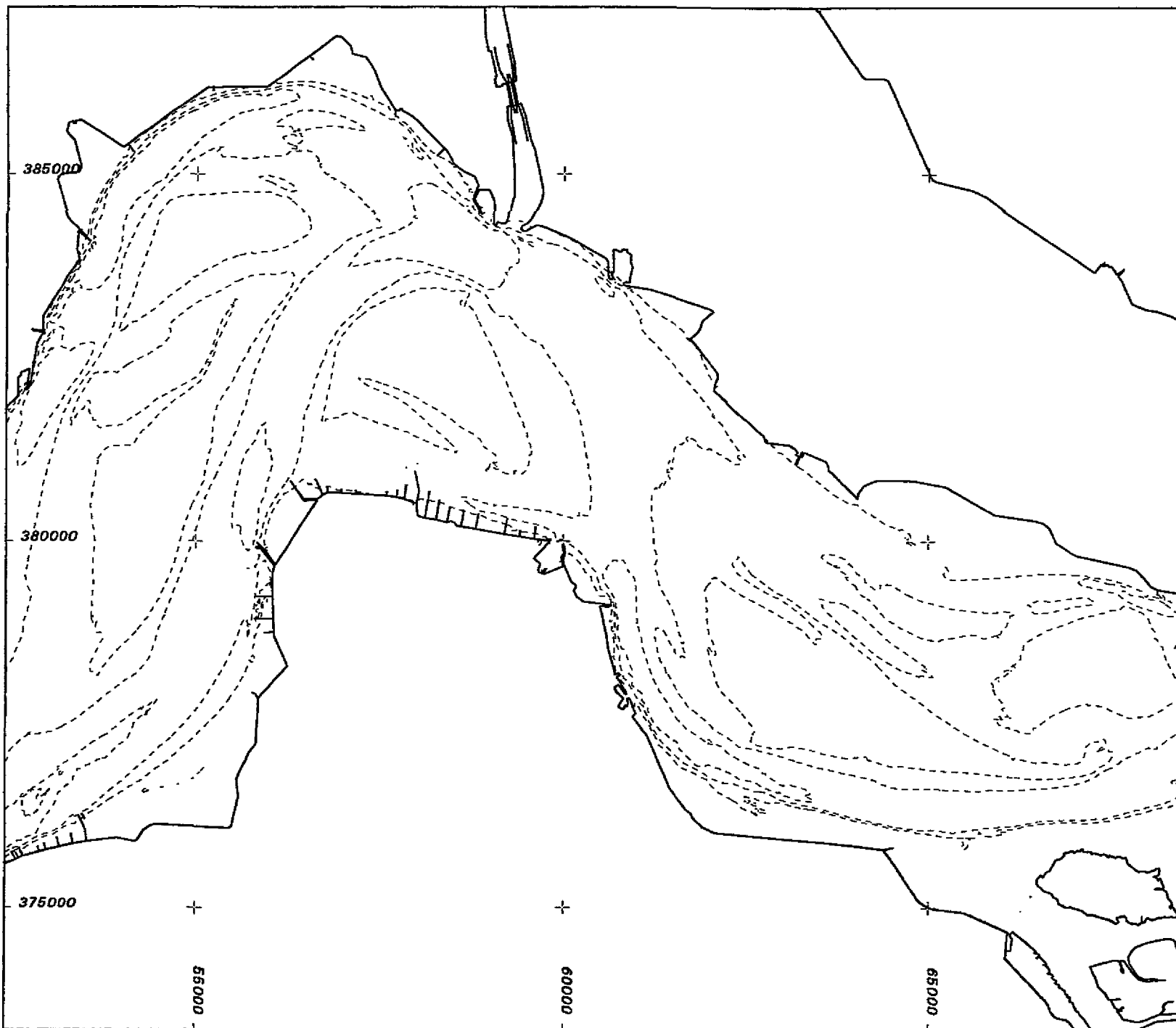


pijlen:
0.5 cm = 1 m/s

Schaal: 1:75.000

MOVE

Rijksinstituut voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat



Westerschelde

Schaal: 1:75.000

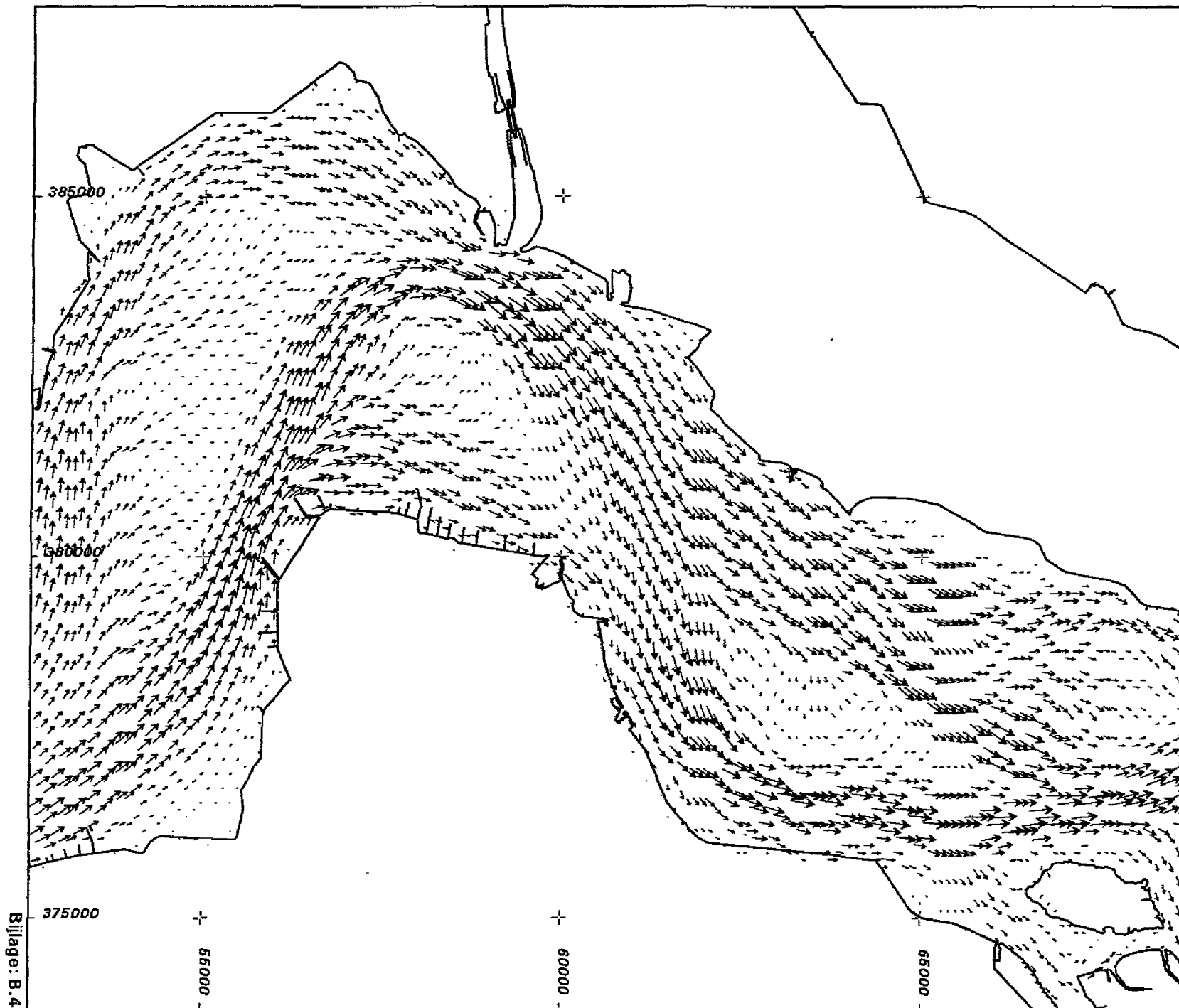
MOVE



Rijksinstituut voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat

Westerschelde

Drempel van Hansweert
stroomsnelheden springtij
max. vloed 0300 u



pijlen:
0.5 cm = 1 m/s

Schaal: 1:75.000

MOVE

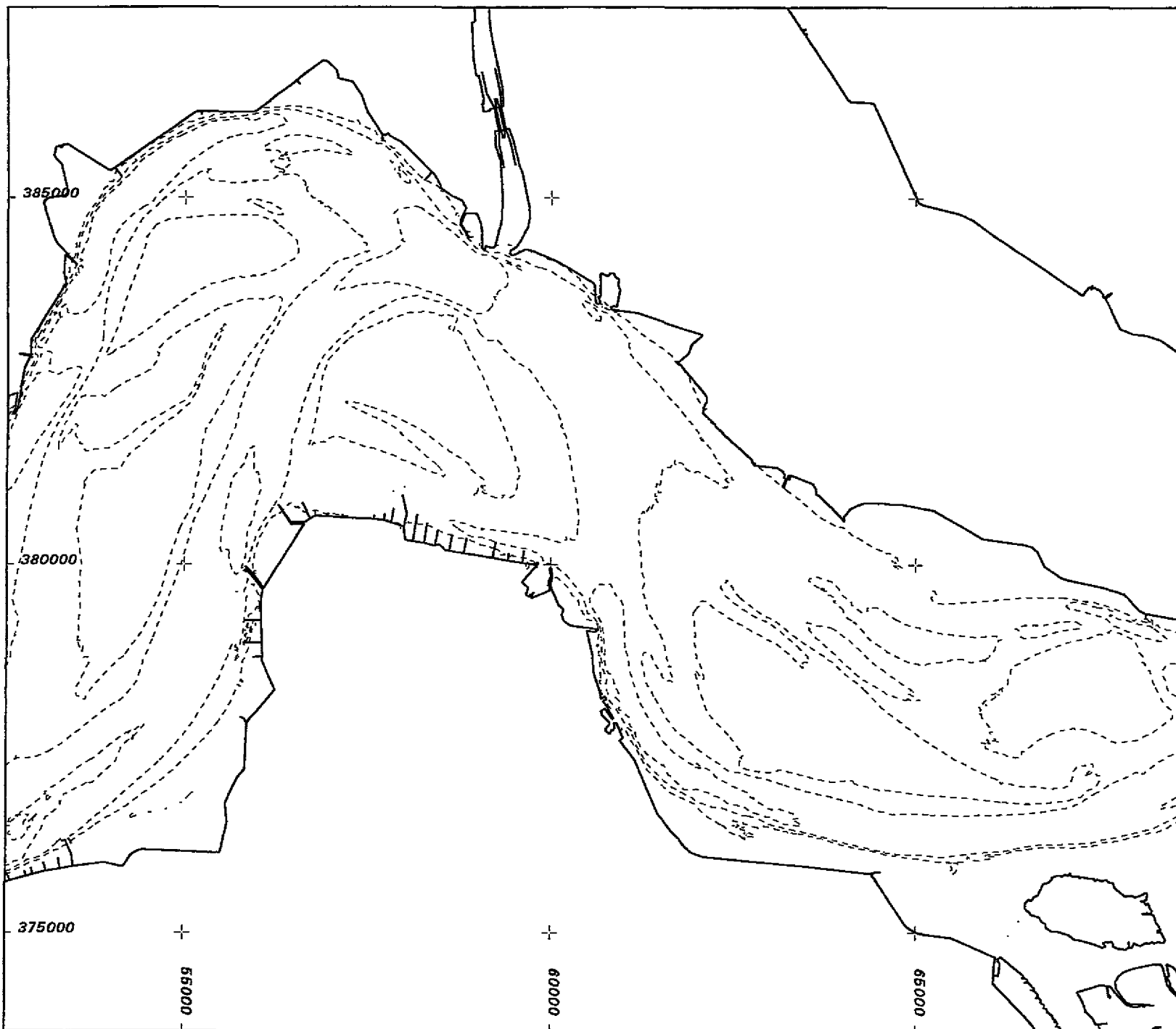
Rijksinstituut voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat

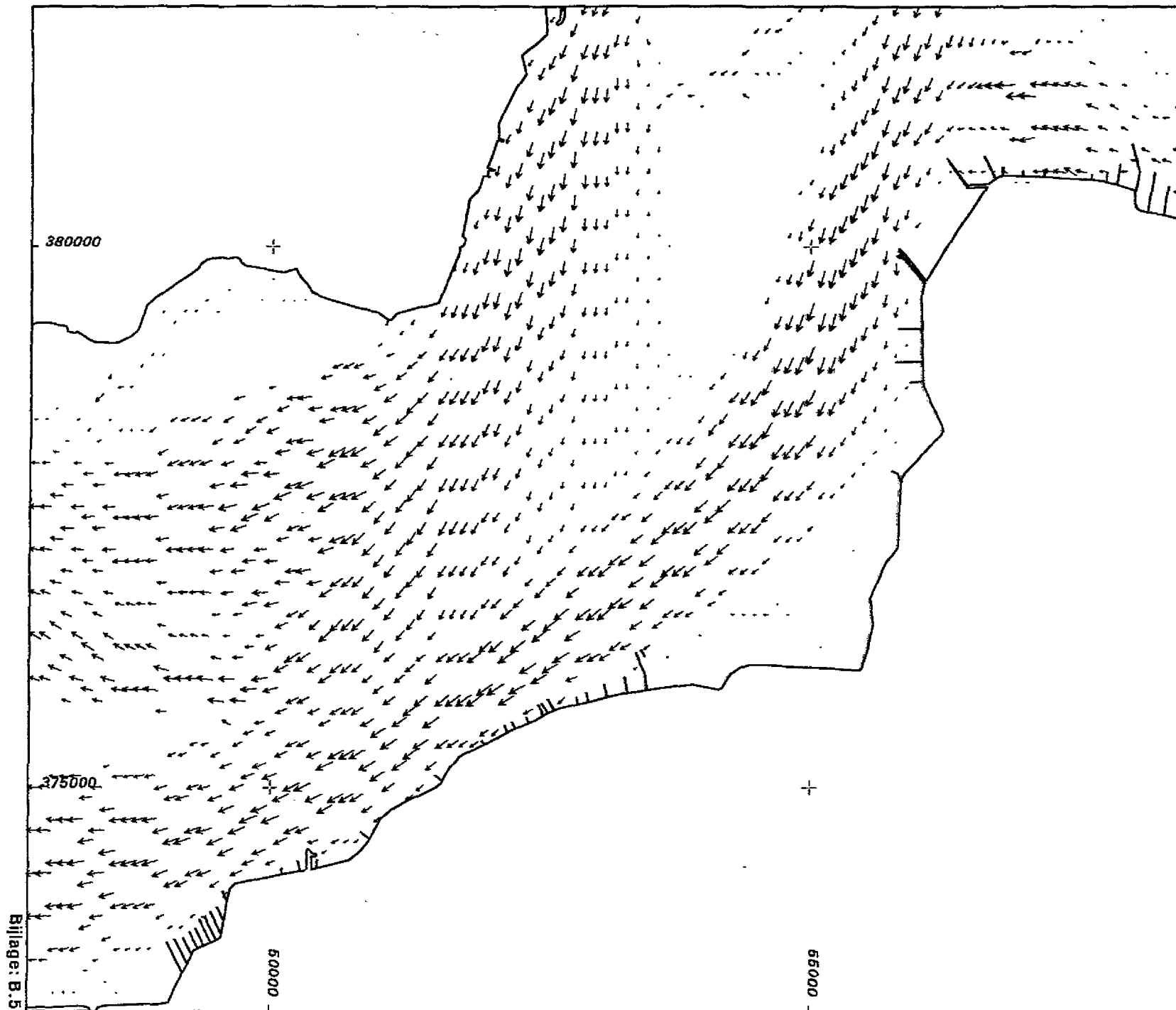
Westerschelde

Schaal: 1:75.000

MOVE

Rijksinstituut voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat





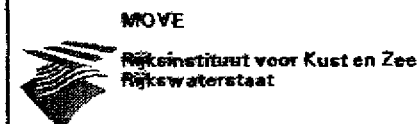
Westerschelde

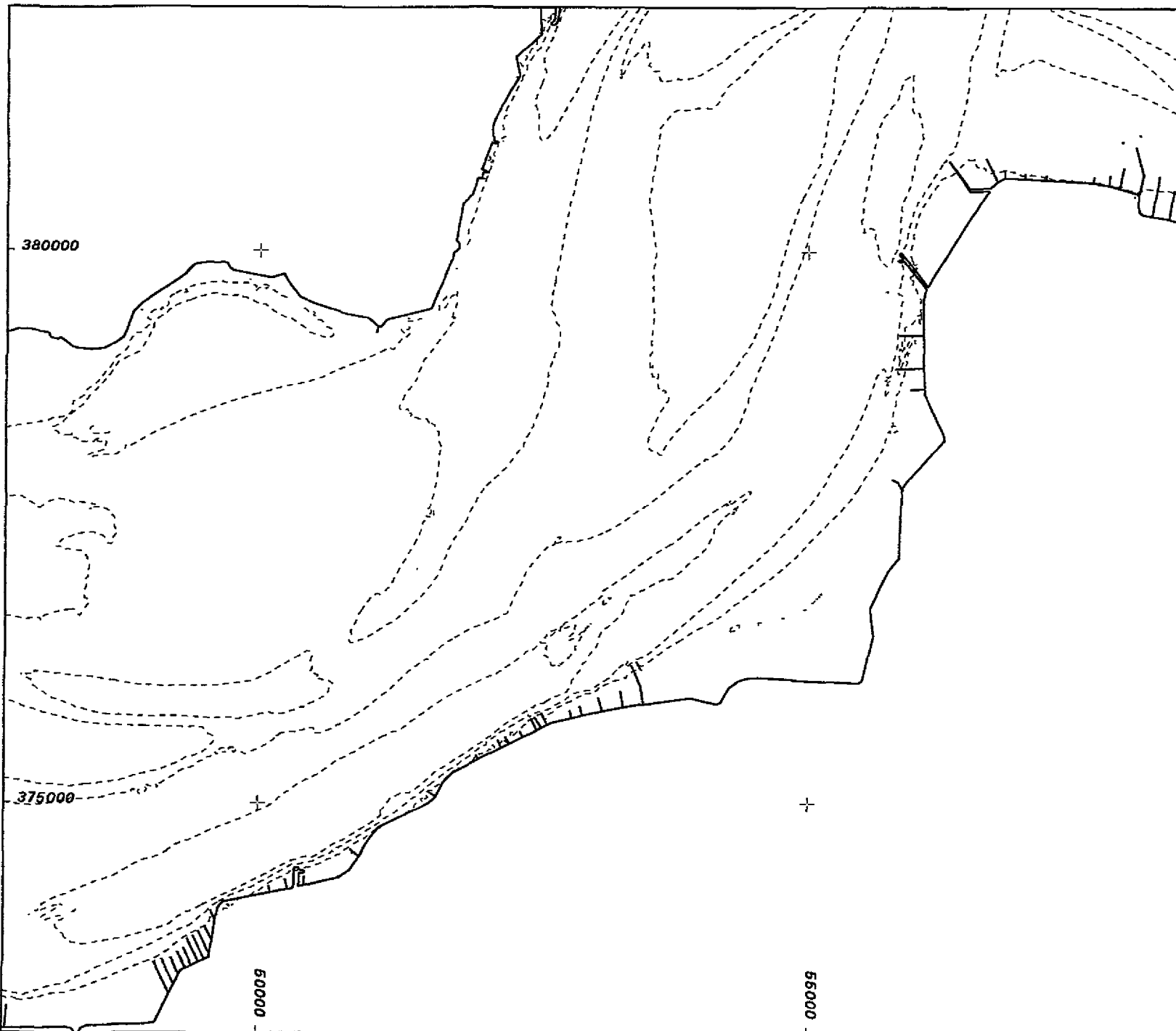
Drempel van Baarland

stroomnelheden springtij
max. eb 0730 u

pijlen:
0.5 cm = 1 m/s

Schaal: 1:50.000





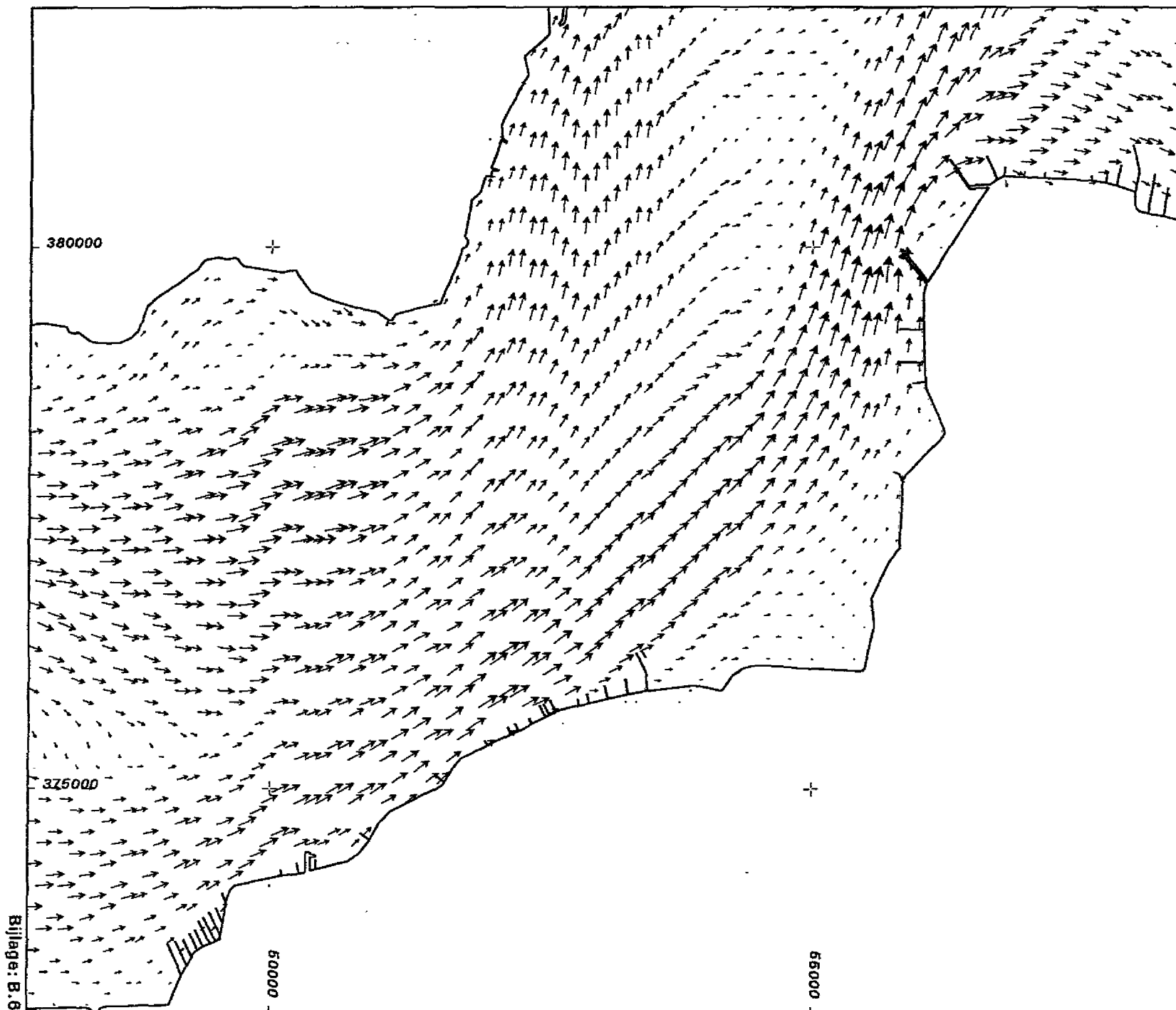
Westerschelde

Schaal: 1:50.000

MOVE



Rijksinstituut voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat



Westerschelde

Drempel van Baarland

stroomsnelheden springtij
max. vloed 0230 u

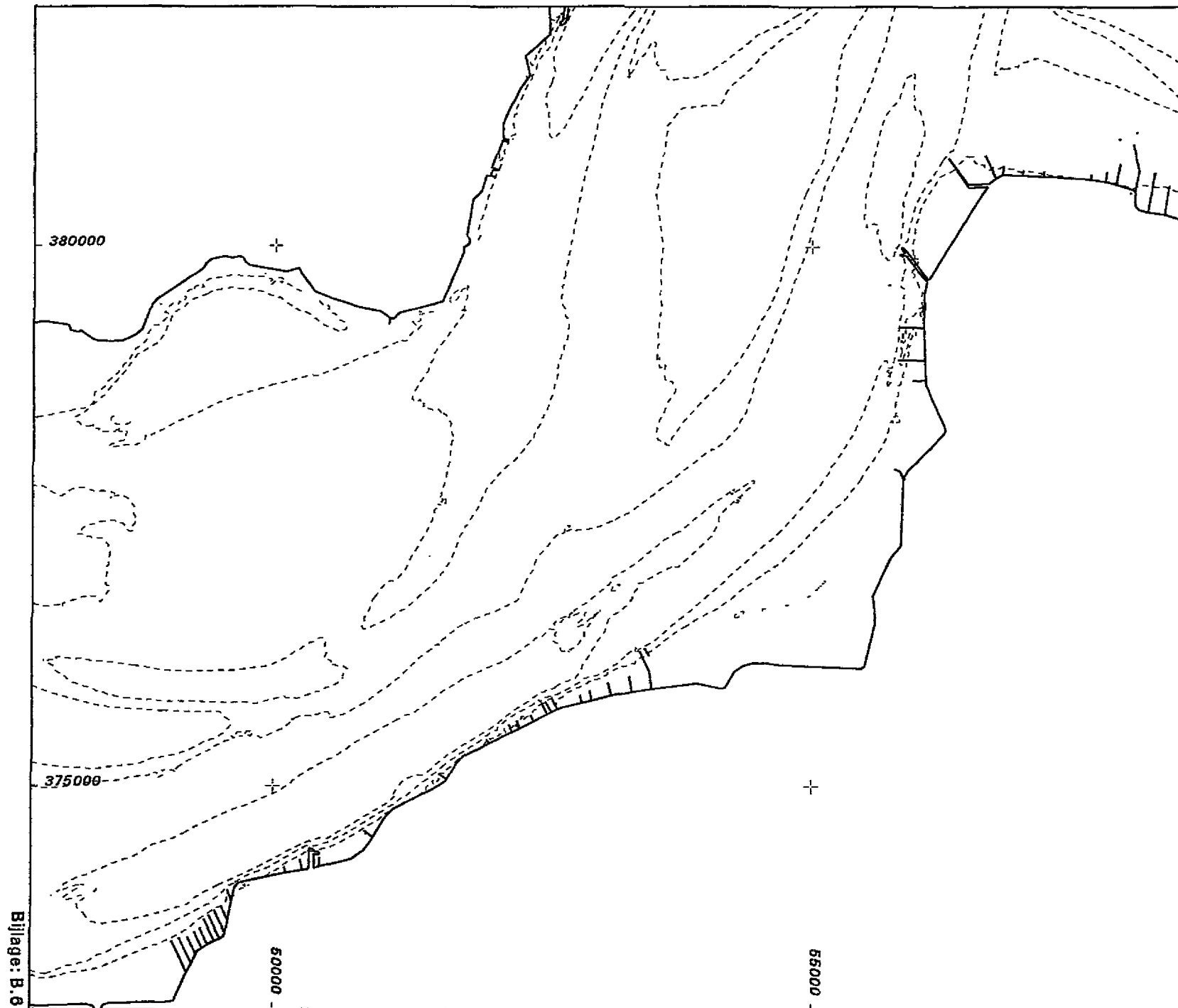
pijlen:
0.5 cm = 1 m/s

Schaal: 1:50.000

MOVE



Rijkswaterstaat voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat



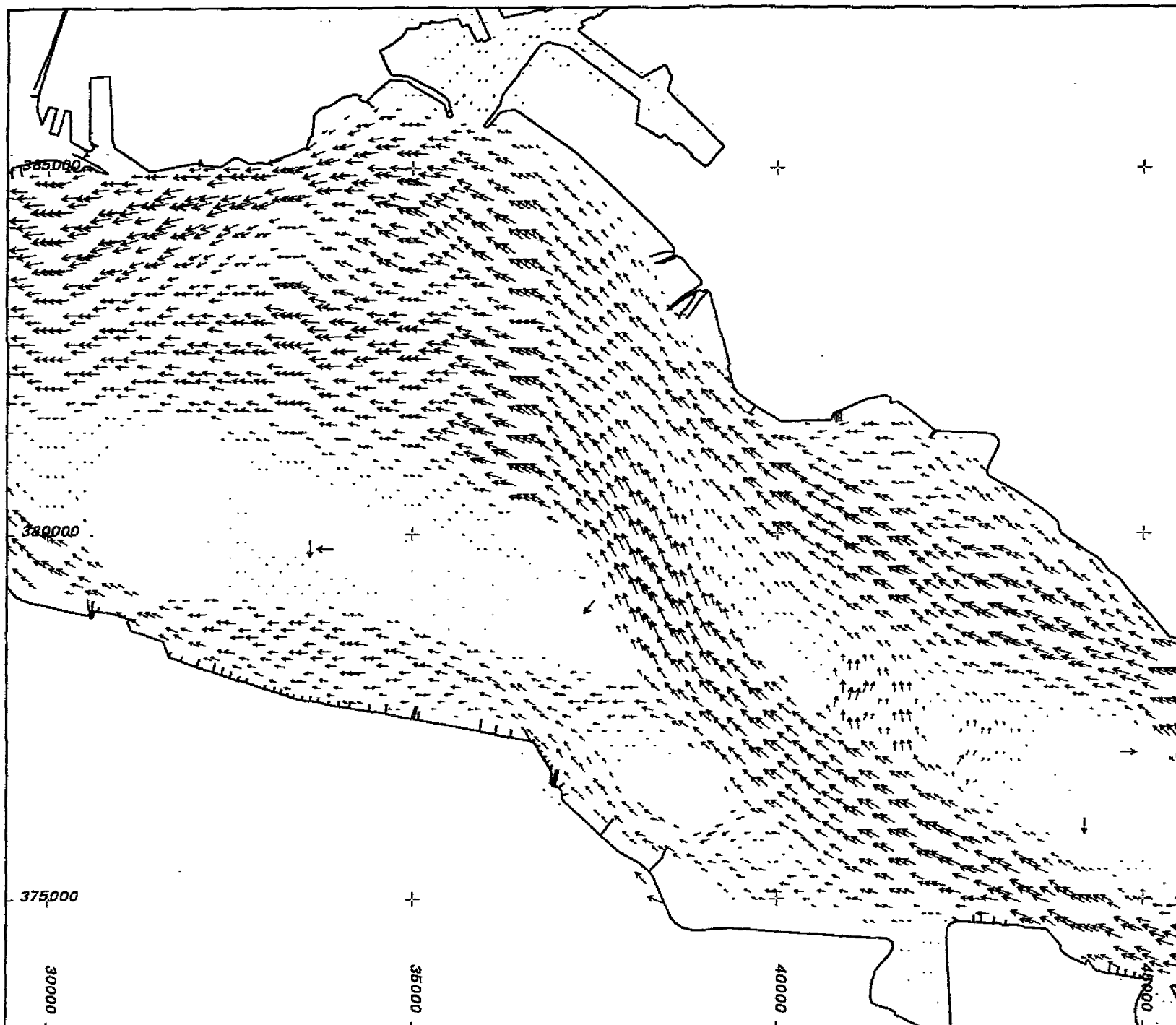
Westerschelde

Schaal: 1:50.000

MOVE



Rijkswaterstaat
Rijksinstituut voor Kust en Zee



Westerschelde

Drempel van Borssele

stroomsnelheden springtij
max. eb 0700 u

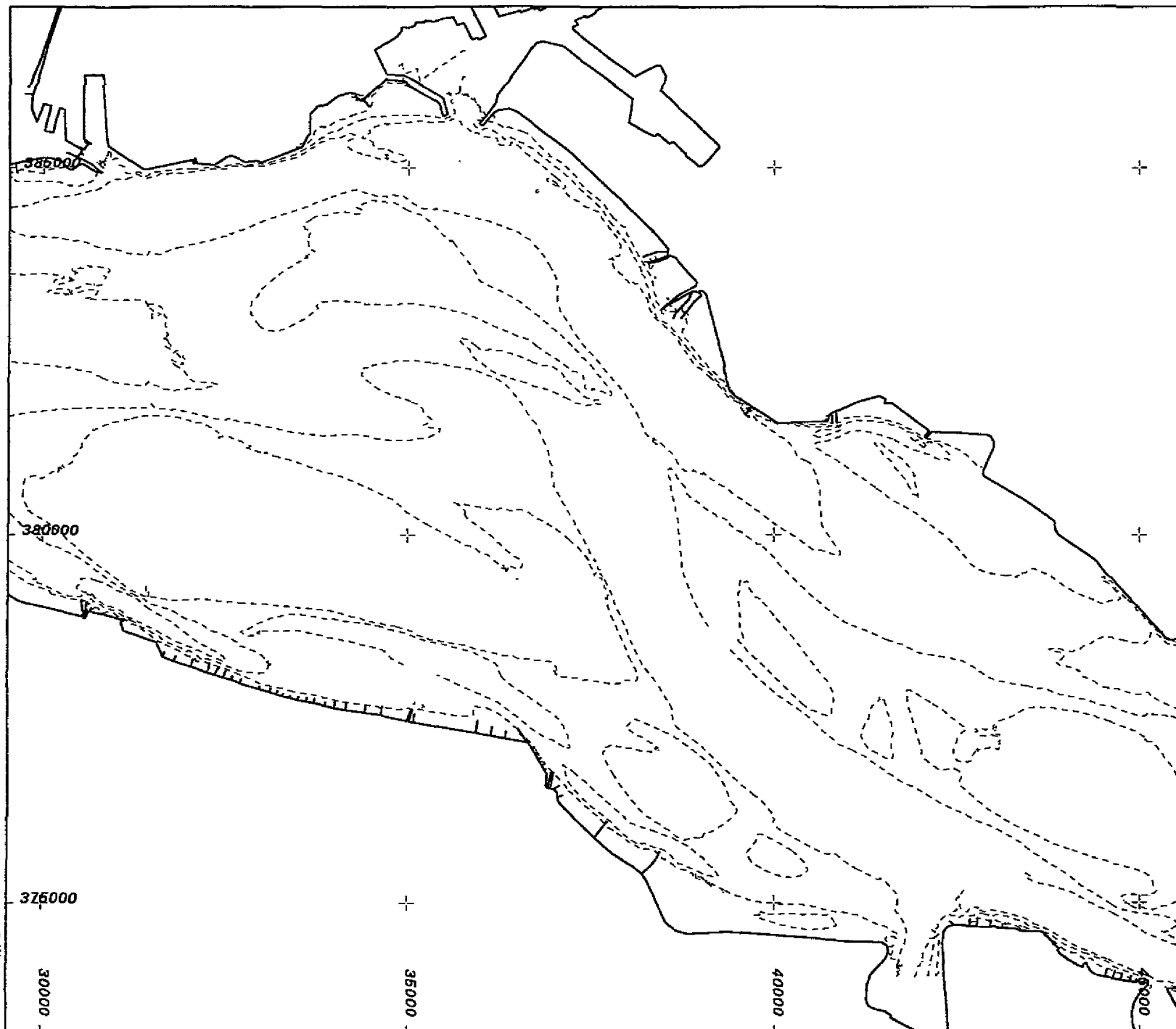
pijlen:
0.5 cm = 1 m/s

Schaal: 1:75.000

MOVE



Rijkswaterstaat
Rijkswaterstaat



Westerschelde

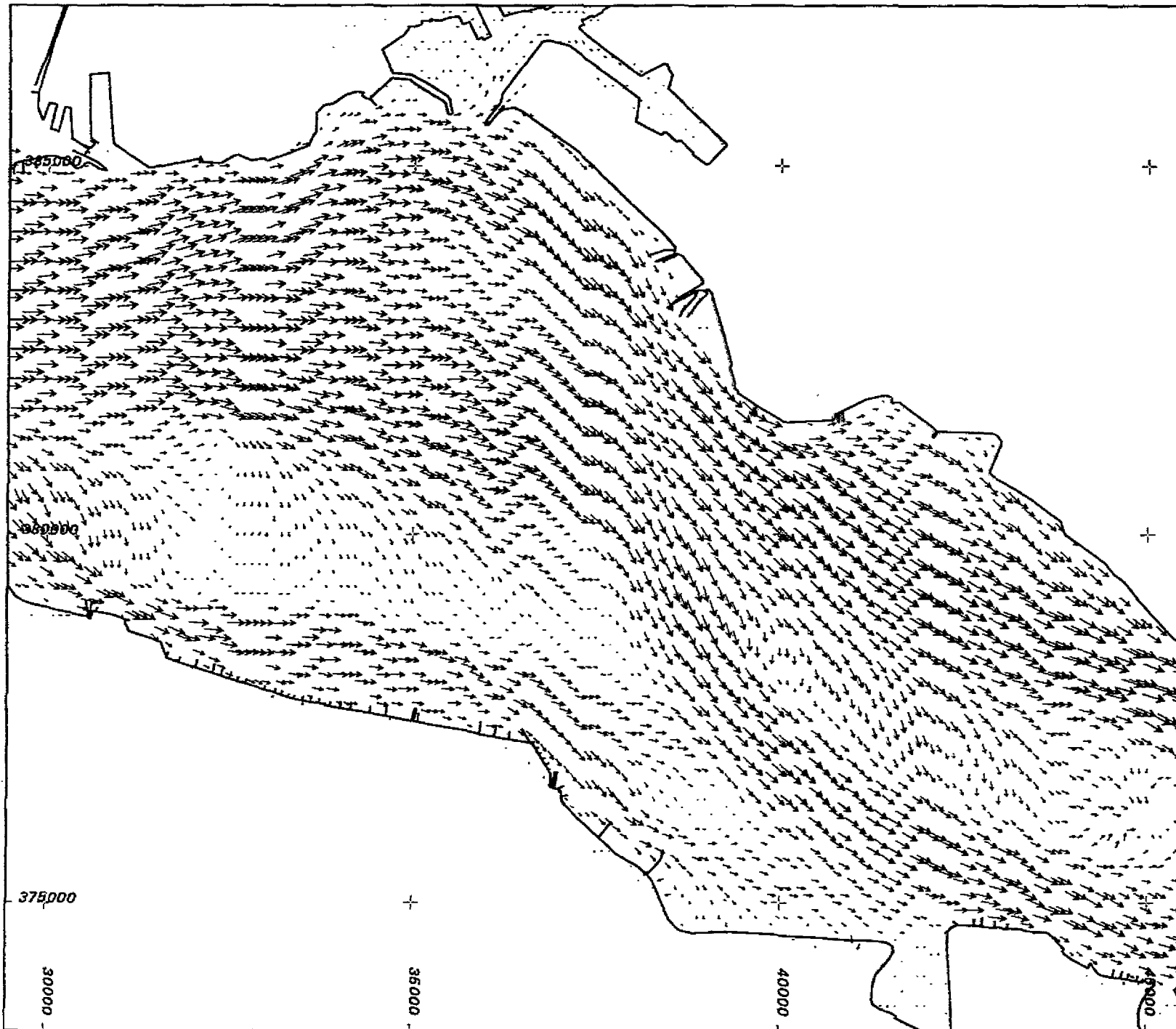
Schaal: 1:75.000

MOVE
Rijksinstituut voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat

Westerschelde

Drempel van Borssele

stroomsnelheden springtij
max. vloed 0200 u



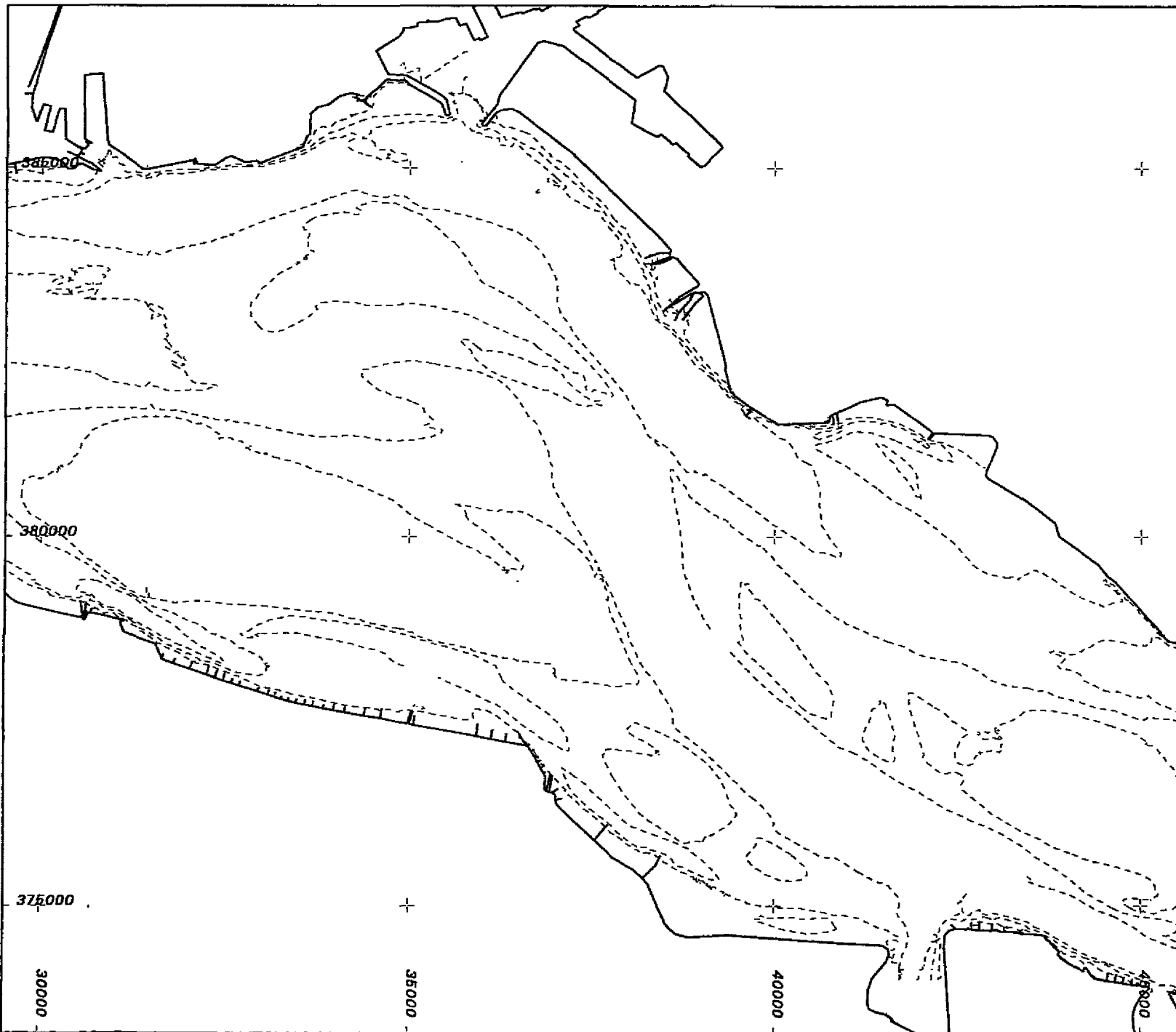
pijlen:
0.5 cm = 1 m/s

Schaal: 1:75.000

MOVE



Rijksinstituut voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat



Westerschelde

Schaal: 1:75.000

MOVE
Rijksinstituut voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat

Bijlage C Waterstanden in het oostelijk, midden en westelijk deel van de Westerschelde tijdens maximum eb- en vloedstroom ten tijde van een gemiddeld springtij (25 november 1988) zoals berekend met Scaldis100

Bijlage C.1 Drempels van Bath en Valkenisse
Waterstanden maximum eb

Bijlage C.2 Drempels van Bath en Valkenisse
Waterstanden maximum vloed

Bijlage C.3 Drempel van Hansweert
Waterstanden maximum eb

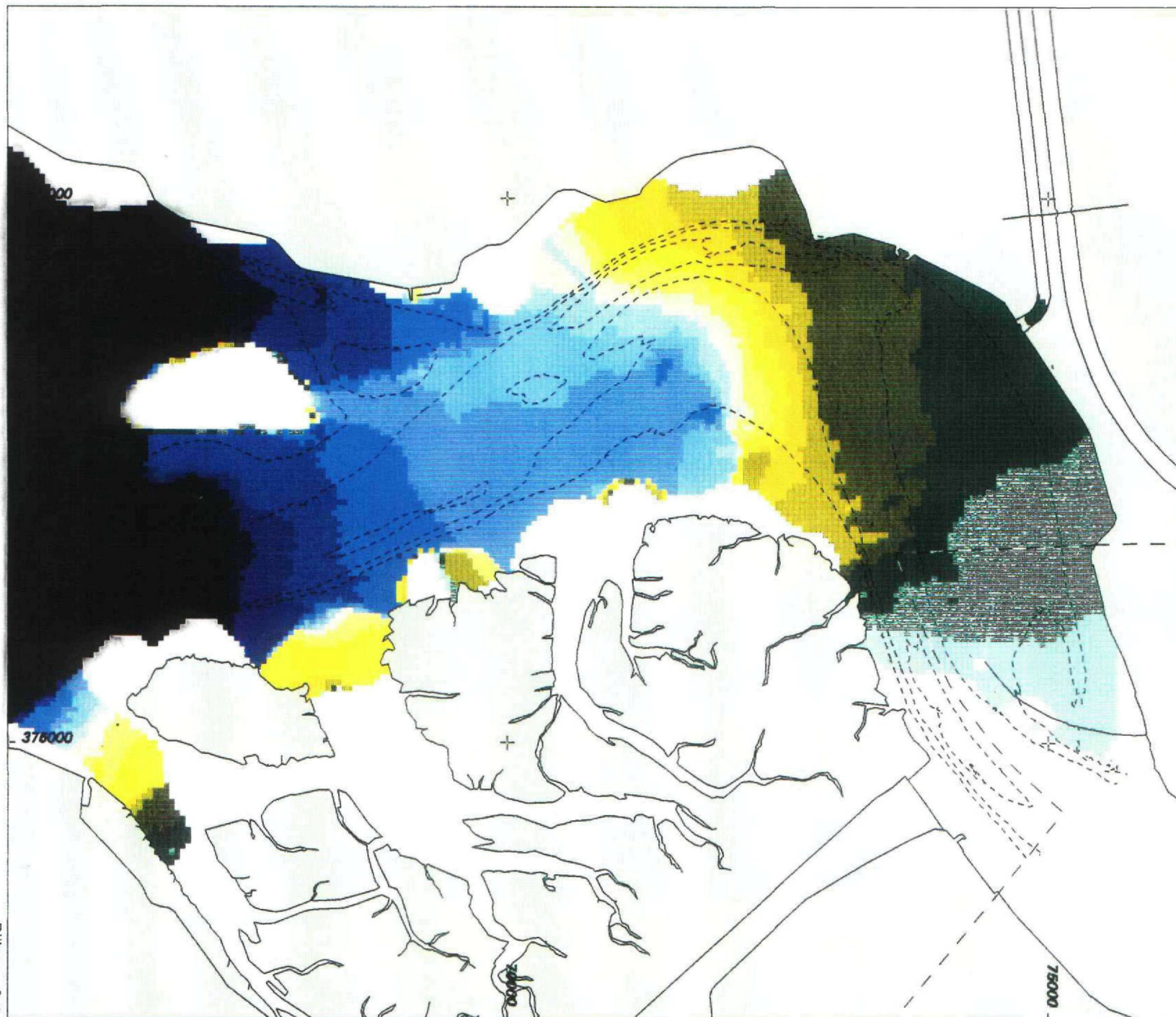
Bijlage C.4 Drempel van Hansweert
Waterstanden maximum vloed

Bijlage C.5 Drempel van Baarland
Waterstanden maximum eb

Bijlage C.6 Drempel van Baarland
Waterstanden maximum vloed

Bijlage C.7 Drempel van Borssele
Waterstanden maximum eb

Bijlage C.8 Drempel van Borssele
Waterstanden maximum vloed



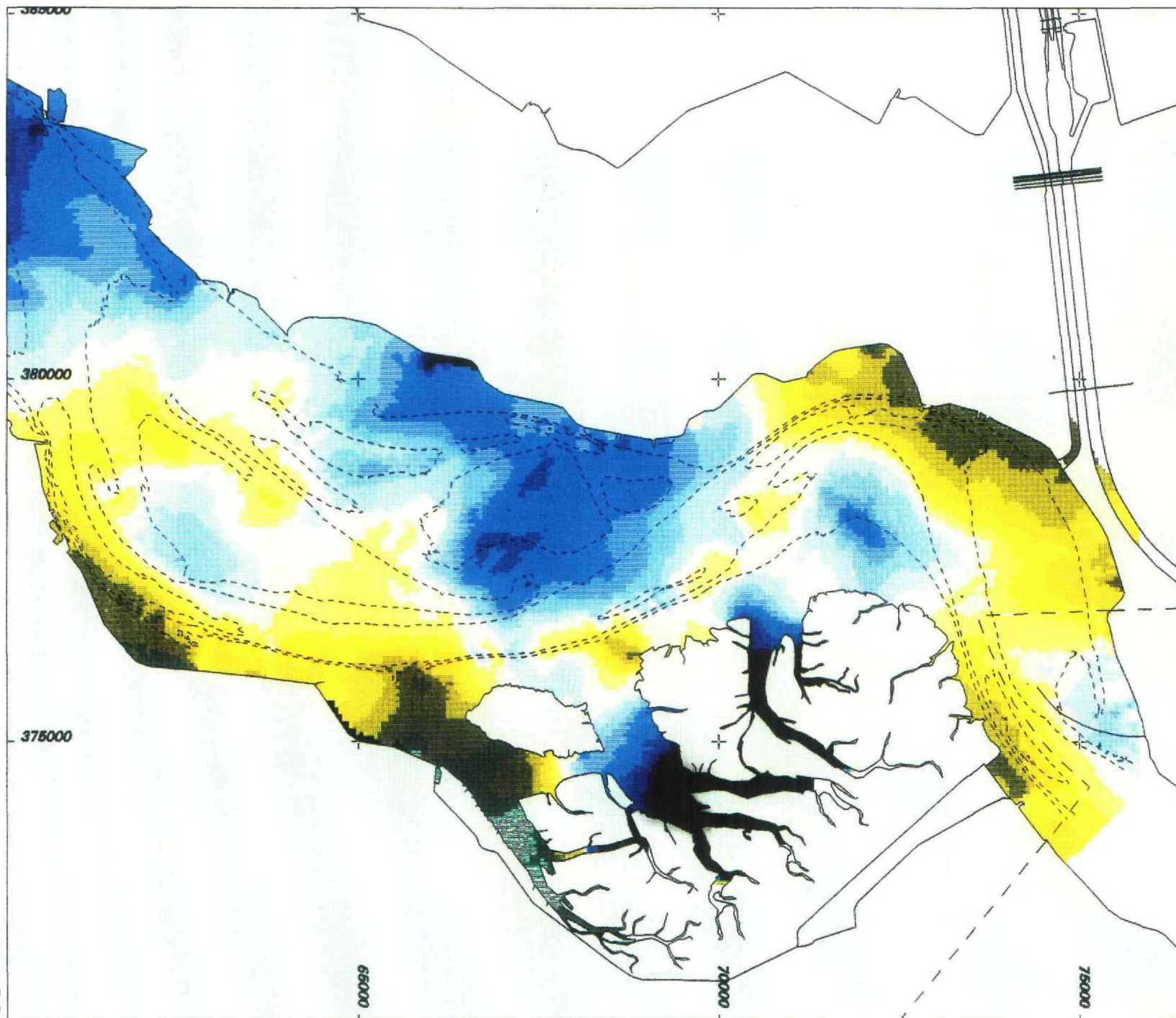
Westerschelde

Drempels van Bath en
Valkenisse
waterstanden springtij
max. eb 0800 u

Legenda meters

	-0.28 t/m -0.29
	-0.3 t/m -0.31
	-0.32 t/m -0.33
	-0.34 t/m -0.35
	-0.36 t/m -0.37
	-0.38 t/m -0.39
	-0.4 t/m -0.41
	-0.42 t/m -0.43
	-0.44 t/m -0.45
	-0.46 t/m -0.47
	-0.48 t/m -0.49
	-0.5 t/m -0.51
	-0.52 t/m -0.53
	-0.54 t/m -0.55
	-0.56 t/m -0.57
	-0.58 t/m -0.59
	-0.6 t/m -0.61
	-0.62 t/m -0.63

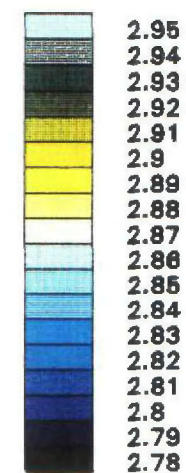
Schaal: 1:50.000



Westerschelde

Drampels van Bath en
Valkenisse
waterstanden springtij
max. vloed 0330 u

Legende meters



Schaal: 1:75.000

Westerschelde

Drempel van Hansweert
waterstanden springtij
max. eb 800 u

Legenda meters

	-0.86 t/m -0.87
	-0.88 t/m -0.89
	-0.9 t/m -0.91
	-0.92 t/m -0.93
	-0.94 t/m -0.95
	-0.96 t/m -0.97
	-0.98 t/m -0.99
	-1 t/m -1.01
	-1.02 t/m -1.03
	-1.04 t/m -1.05
	-1.06 t/m -1.07
	-1.08 t/m -1.09
	-1.1 t/m -1.11
	-1.12 t/m -1.13
	-1.14 t/m -1.15
	-1.16 t/m -1.17
	-1.18 t/m -1.19
	-1.2 t/m -1.21

Schaal: 1:75.000

MOVE

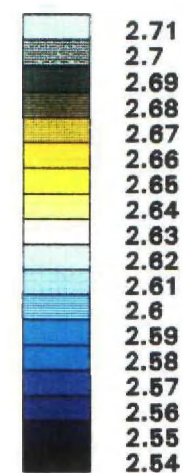


Rijkswaterstaat
Rijkswaterstaat

Westerschelde

Drempel van Hanaweert
waterstanden springtij
max. vloed 0300 u

Legenda meters

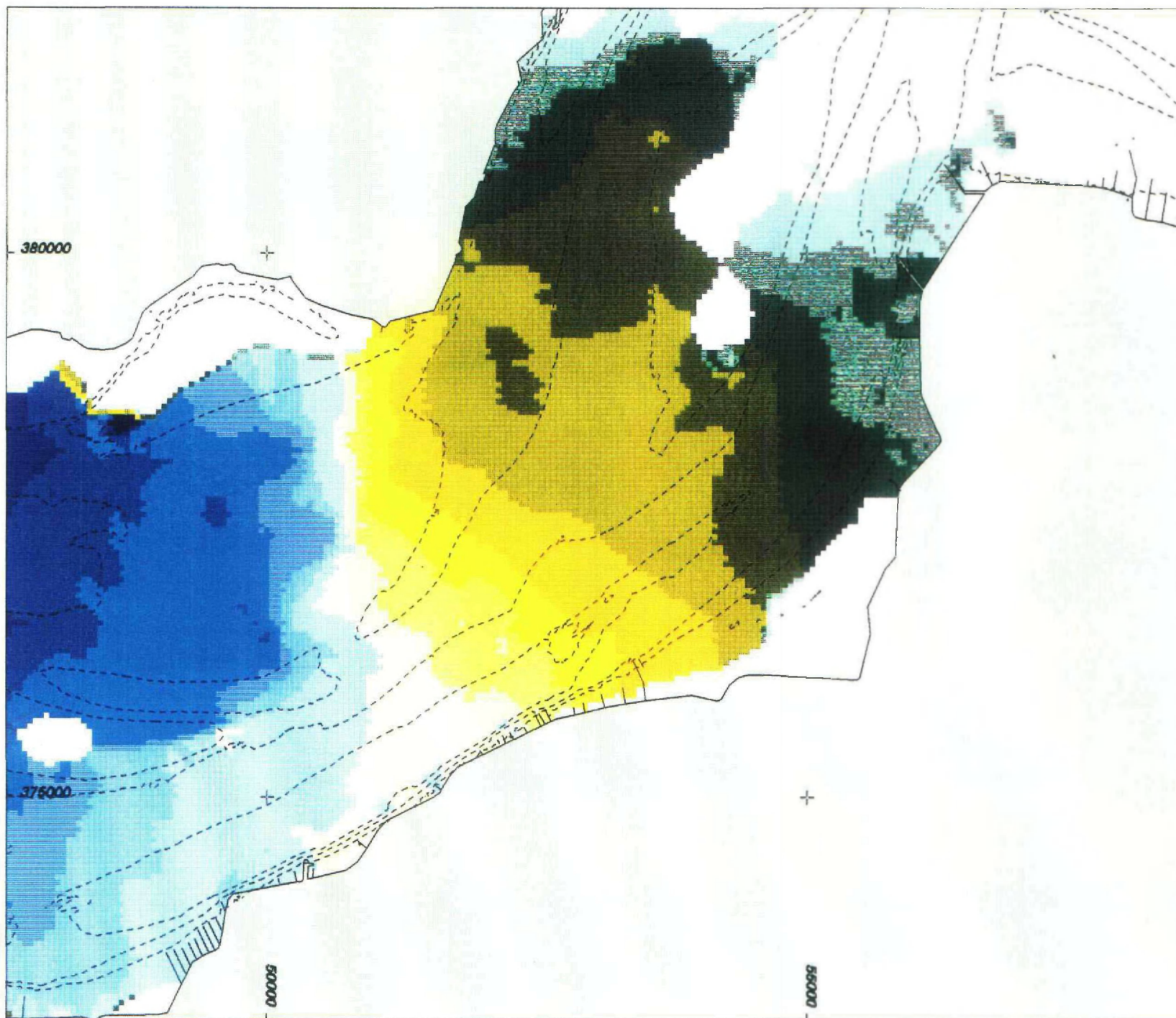


Schaal: 1:75.000

MOVE



Rijksinstituut voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat



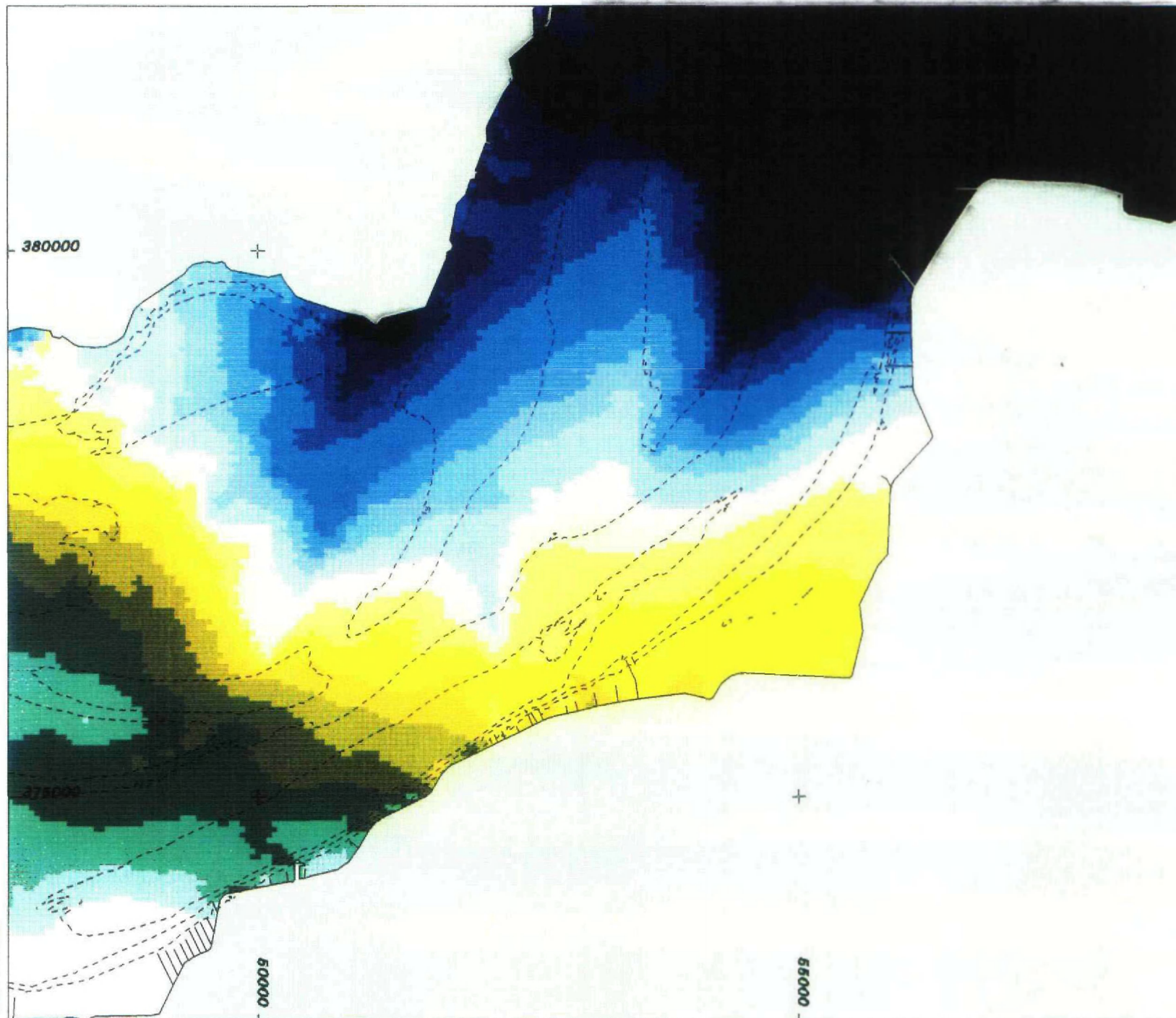
Westerschelde

Drempel van Baarland
waterstanden springtij
max. eb 0730 u

Legenda meters

	-0.74 t/m	-0.75
	-0.76 t/m	-0.77
	-0.78 t/m	-0.79
	-0.8 t/m	-0.81
	-0.82 t/m	-0.83
	-0.84 t/m	-0.85
	-0.86 t/m	-0.87
	-0.88 t/m	-0.89
	-0.9 t/m	-0.91
	-0.92 t/m	-0.93
	-0.94 t/m	-0.95
	-0.96 t/m	-0.97
	-0.98 t/m	-0.99
	-1 t/m	-1.01
	-1.02 t/m	-1.03
	-1.04 t/m	-1.05
	-1.06 t/m	-1.07
	-1.08 t/m	-1.09

Schaal: 1:50.000



Westerschelde

Drempel van Baarland
waterstanden springtij
max. vloed 0230 u

Legenda meters

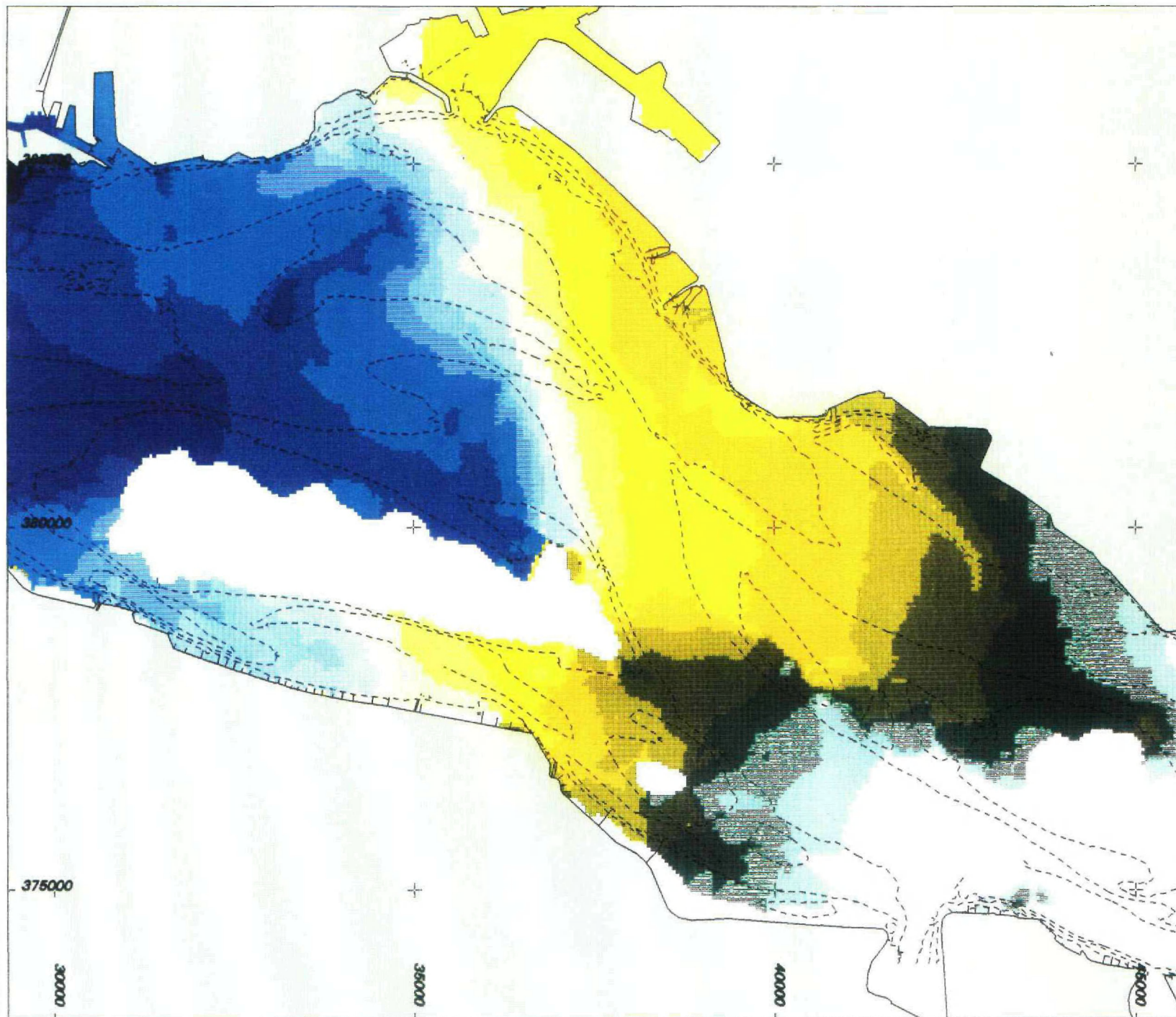
	2.5 t/m	2.49
	2.48 t/m	2.47
	2.46 t/m	2.45
	2.44 t/m	2.43
	2.42 t/m	2.41
	2.4 t/m	2.39
	2.38 t/m	2.37
	2.36 t/m	2.35
	2.34 t/m	2.33
	2.32 t/m	2.31
	2.3 t/m	2.29
	2.28 t/m	2.27
	2.26 t/m	2.25
	2.24 t/m	2.23
	2.22 t/m	2.21
	2.2 t/m	2.19
	2.18 t/m	2.17
	2.16 t/m	2.15

Schaal: 1:50.000

'MOVE'



Rijkswaterstaat
Rijksinstituut voor Kust en Zee



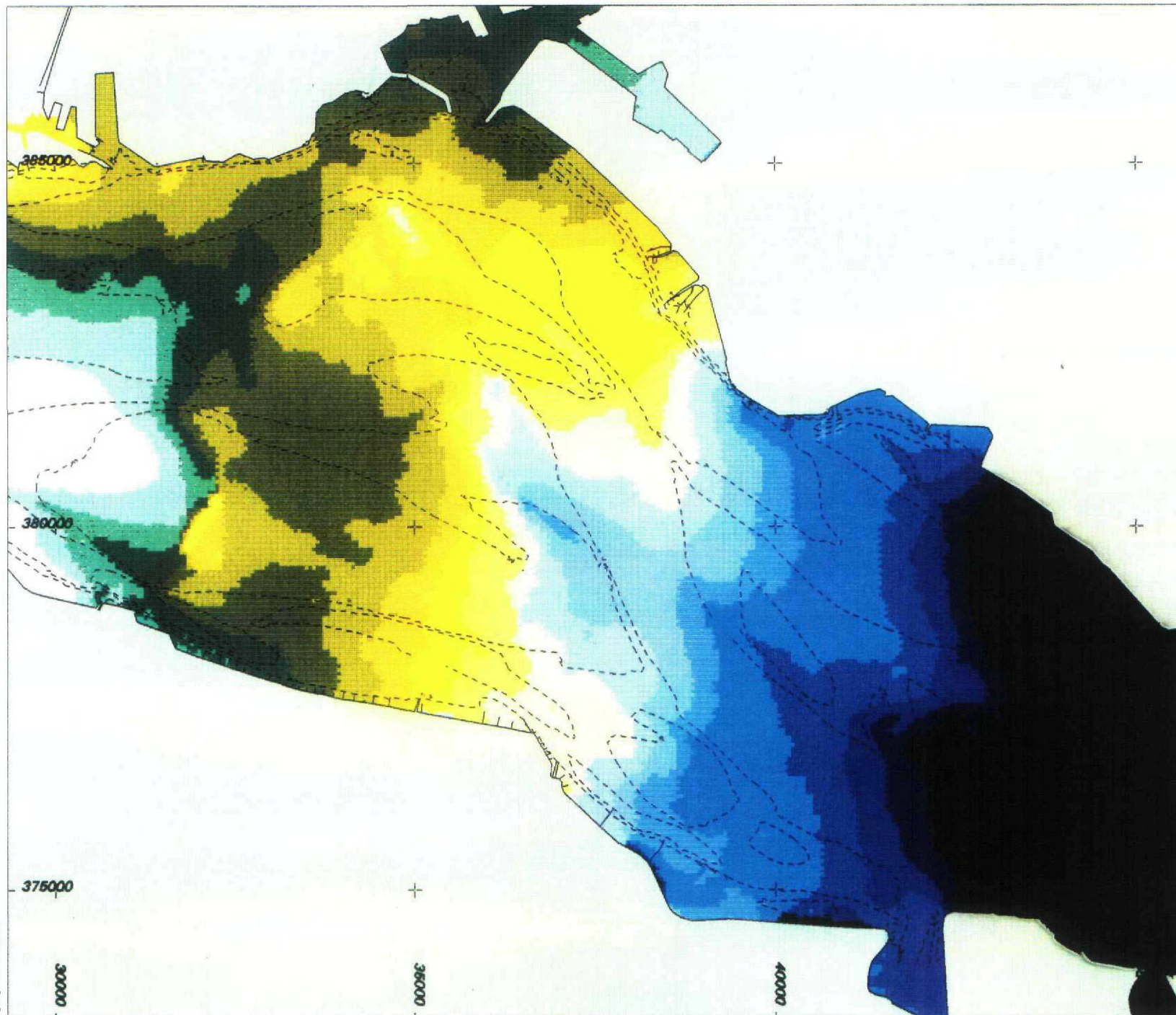
Westerschelde

Drempel van Borssele
waterstanden springtij
max. eb 0700 u

Legenda meters

	-0.56 t/m	-0.57
	-0.58 t/m	-0.59
	-0.6 t/m	-0.61
	-0.62 t/m	-0.63
	-0.64 t/m	-0.65
	-0.66 t/m	-0.67
	-0.68 t/m	-0.69
	-0.7 t/m	-0.71
	-0.72 t/m	-0.73
	-0.74 t/m	-0.75
	-0.76 t/m	-0.77
	-0.78 t/m	-0.79
	-0.8 t/m	-0.81
	-0.82 t/m	-0.83
	-0.84 t/m	-0.85
	-0.86 t/m	-0.87
	-0.88 t/m	-0.89
	-0.9 t/m	-0.91

Schaal: 1:75.000



Westerschelde

Drampel van Borsselle
waterstanden springtij
max. vloed 0200 u

Legenda meters

	2.2 t/m	2.19
	2.18 t/m	2.17
	2.16 t/m	2.15
	2.14 t/m	2.13
	2.12 t/m	2.11
	2.1 t/m	2.09
	2.08 t/m	2.07
	2.06 t/m	2.05
	2.04 t/m	2.03
	2.02 t/m	2.01
	2 t/m	1.99
	1.98 t/m	1.97
	1.96 t/m	1.95
	1.94 t/m	1.93
	1.92 t/m	1.91
	1.9 t/m	1.89
	1.88 t/m	1.87
	1.86 t/m	1.85

Schaal: 1:75.000

Bijlage D Oppervlakte stroomsnelheden op de drempels van Bath, Valkenisse,
Hansweert, Baarland en Borssele tijdens maximum eb- en vloedstroom
ten tijde van een gemiddelde springtij (29 juni 1992) uit het mo-
del van het WLB

Bijlage D.1 Drempel van Bath
Maximum eb

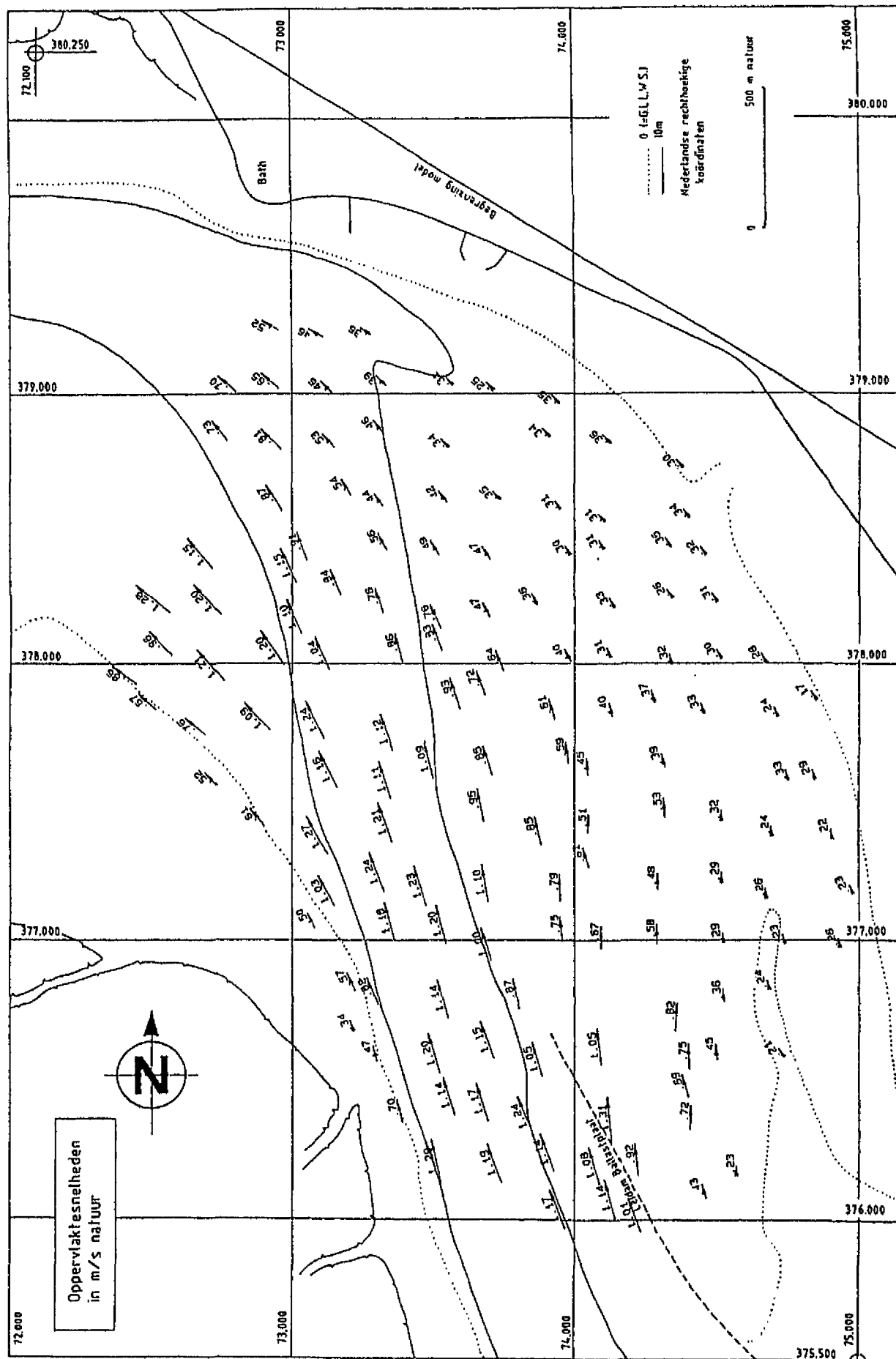
Bijlage D.2 Drempel van Bath
Maximum vloed

Bijlage D.3 Drempel van Valkenisse
Maximum eb

Bijlage D.4 Drempel van Valkenisse
Maximum vloed



OPPERVLAKTESNELHEDEN : DREMPEL VAN BATH
TOESTAND T0 - SPRINGTIJ : 17h00 Maximum eb

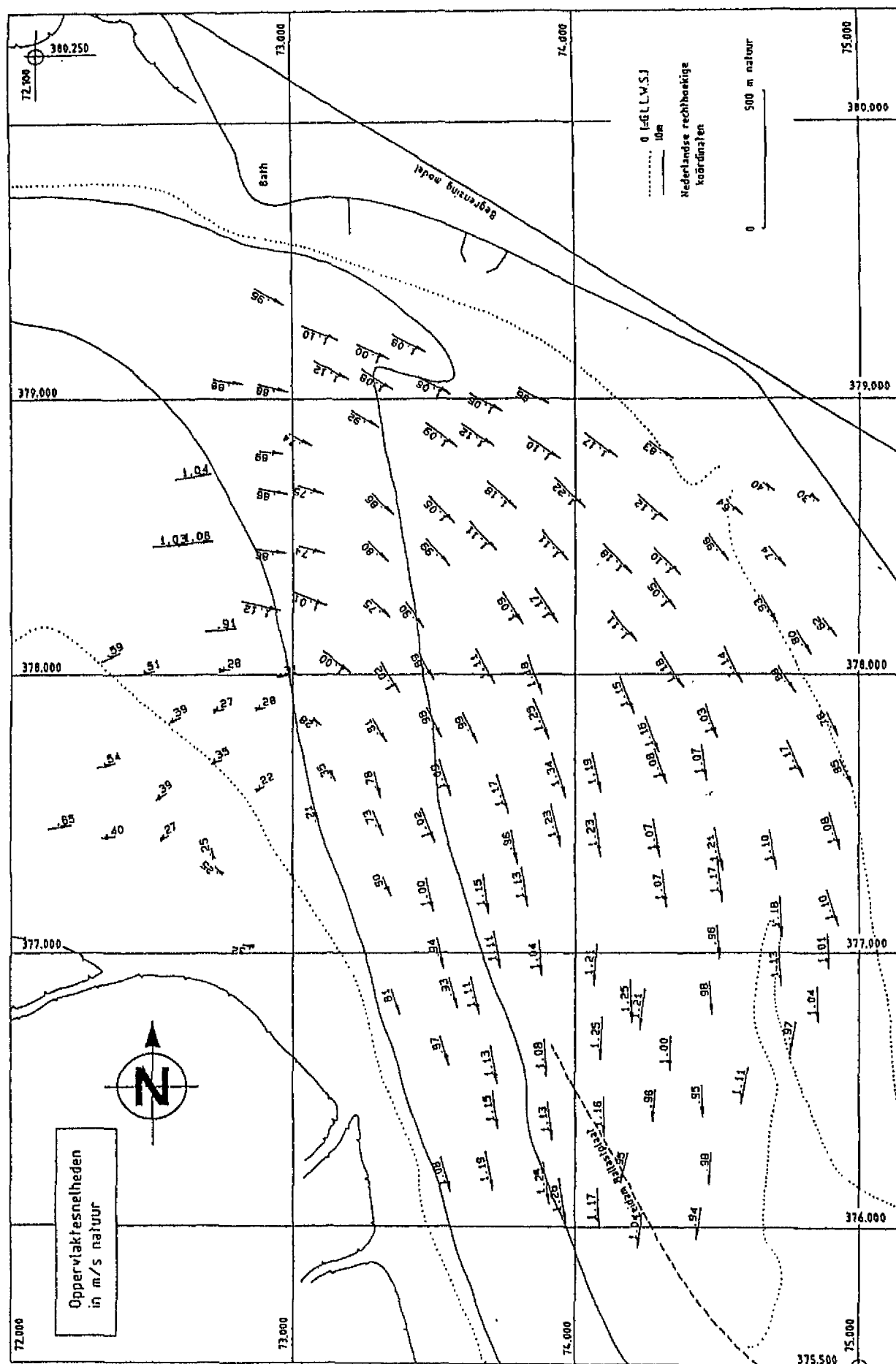




OPPERVLAKTESNELHEDEN : DREMPEL VAN BATH

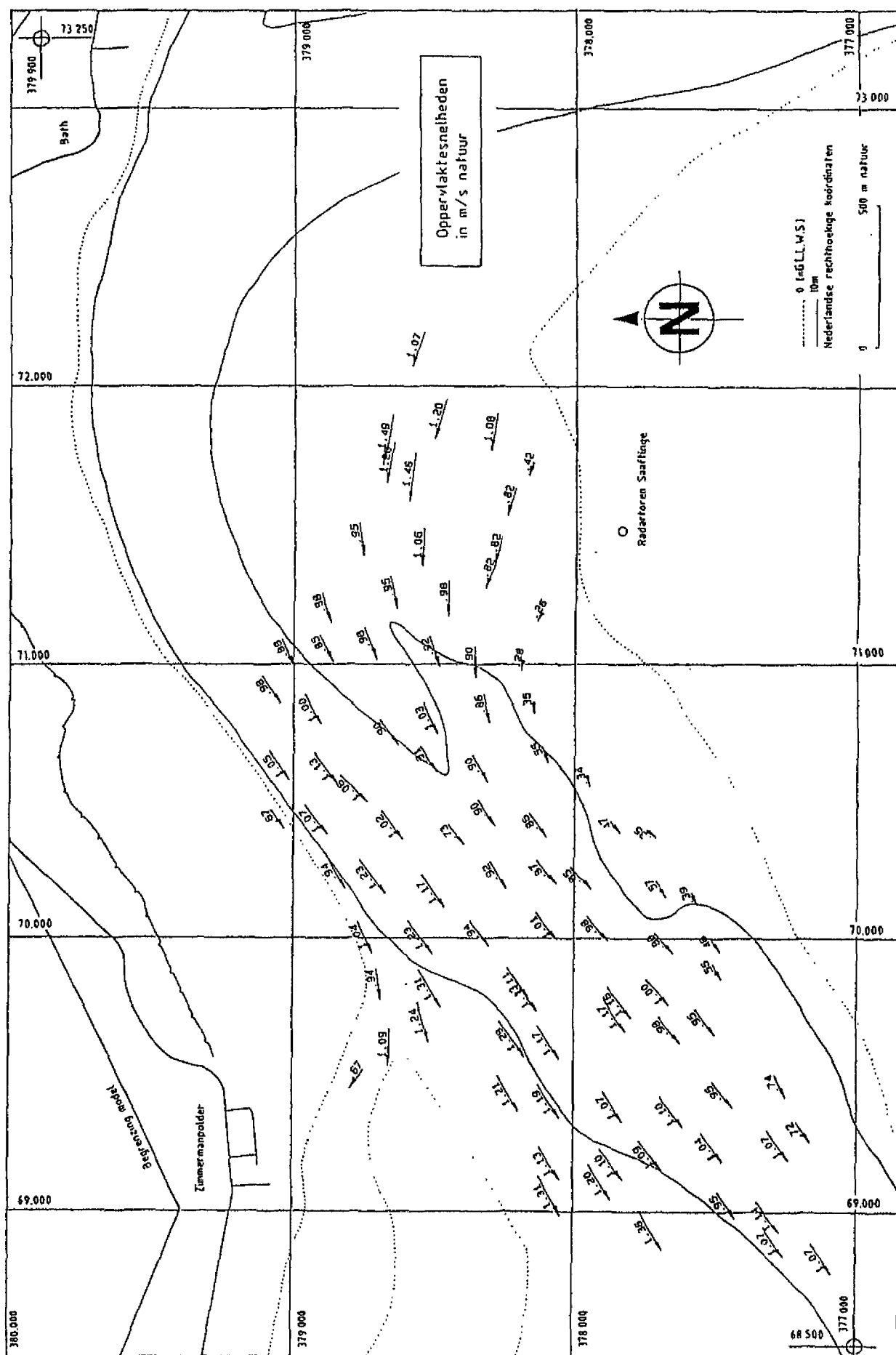
TOESTAND T0 - SPRINGTIJ : 13h30

Maximum vloed

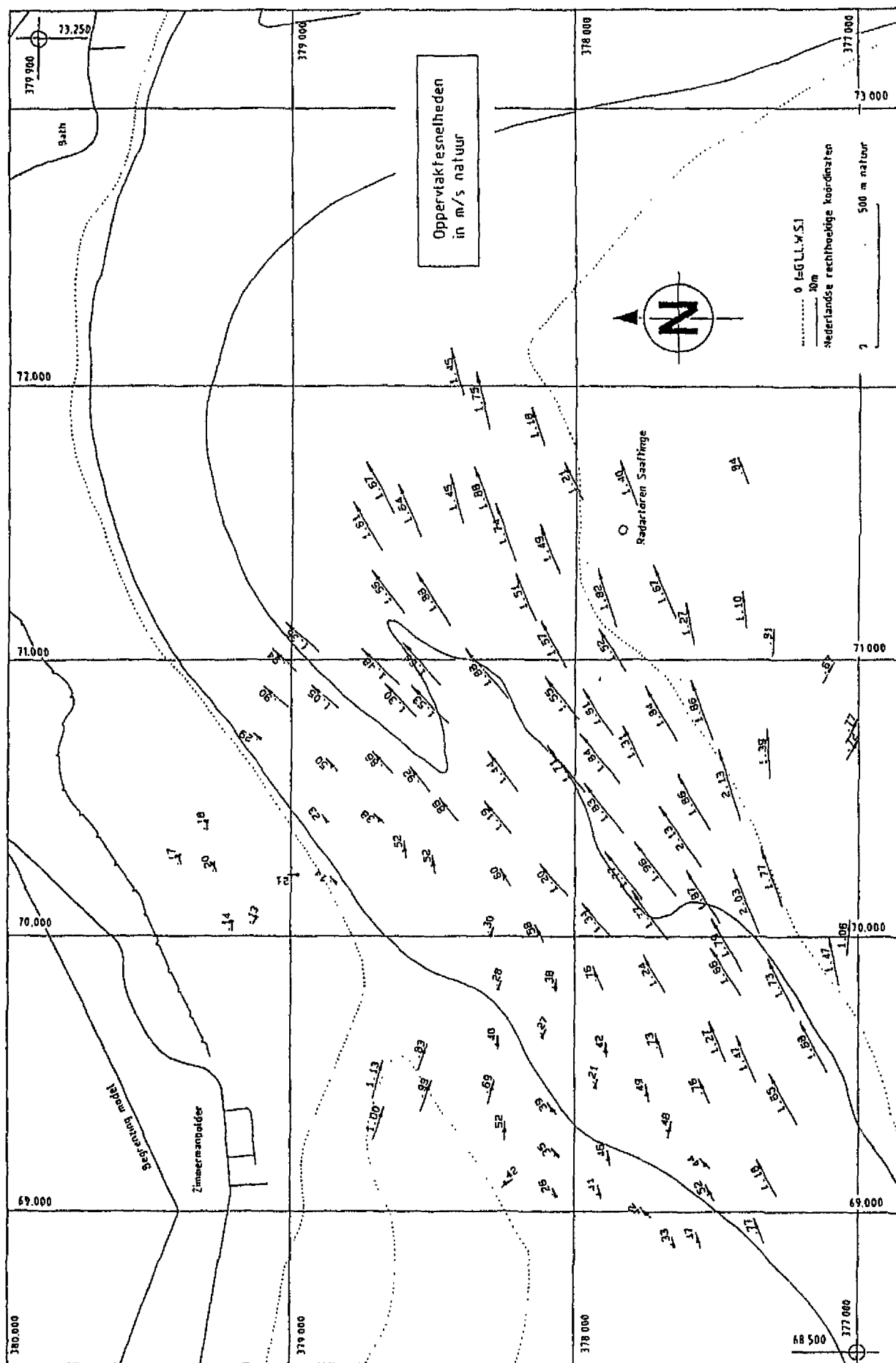




OPPERVLAKTESNELHEDEN : DREMPEL VAN VALKENISSE
TOESTAND T0 - SPRINGTIJ : 17h00 Maximum eb



OPPERVLAKTESNELHEDEN : DREMPEL VAN VALKENISSE
TOESTAND T0 - SPRINGTIJ : 13h30 **Maximum vloed**



Bijlage E. Voorbeeld van berekening van dwarsverhangen en secundaire stroom-
snelheden zoals gebruikt in tabel 4.1

Nauw van Bath

maximum eb

waterstandsverschil (ws) uit bijlage D.1 = 10 cm

breedte tijdens max. eb (B) = 1.00 km

bochtstraal (R) (tov van middenlijn geul) = 1.7 km

'gemeten' dwarsverhang uit Scaldis100

$$I_b = ws/B = 10 \text{ cm/km}$$

dwarsverhang door centrifugaalkracht

$$I_b = \alpha u^2 / (g \cdot R) \text{ (Allersma, 1994)} = 8.9 \text{ cm/km}$$

dwarsverhang door Coriolisversnelling

$$I_c = \Omega u / g \text{ (Allersma, 1994)} = 1.4 \text{ cm/km}$$

maatgevende waterdiepte (h) tijdens max. eb = 23 m

diepte gemiddelde langsstroomsnelheid u = 1.2 m/s

verhouding tussen secundairesnelheden opgewekt door

centrifugaalkrachten en Coriolisversnelling

$$v_n^c / v_n^b = 0.5 (\Omega R / u) \text{ (Booij en}$$

Kalkwijk, 1983)

$$= 0.08 (-)$$

snelheid secundaire stroming door centrifugaal-

$$\text{krachten } v_n^b = \beta u h / R \text{ (Allersma, 1994)}$$

$$= 0.08 \text{ m/s}$$

snelheid secundaire stroming door

$$\text{Coriolisversnelling } v_n^c = 0.08 v_n^b$$

$$= 0.01 \text{ m/s}$$

snelheid secundaire stroming $v_n = v_n^b + v_n^c$

(Booij en Kalkwijk, 1983)

$$= 0.09 \text{ m/s}$$

waarin: α = constante 1.05 (-)

Ω = $\pm 2\omega \sin\phi$ = Coriolis-parameter $\approx 1.14 \cdot 10^{-4}$ rad/s

β = waarde die varieert volgens Rozofski (1961 in: Allersma, 1994; zie figuur 2.12) ≈ 4.8 op hoogte ≈ 0.1 m boven bodem