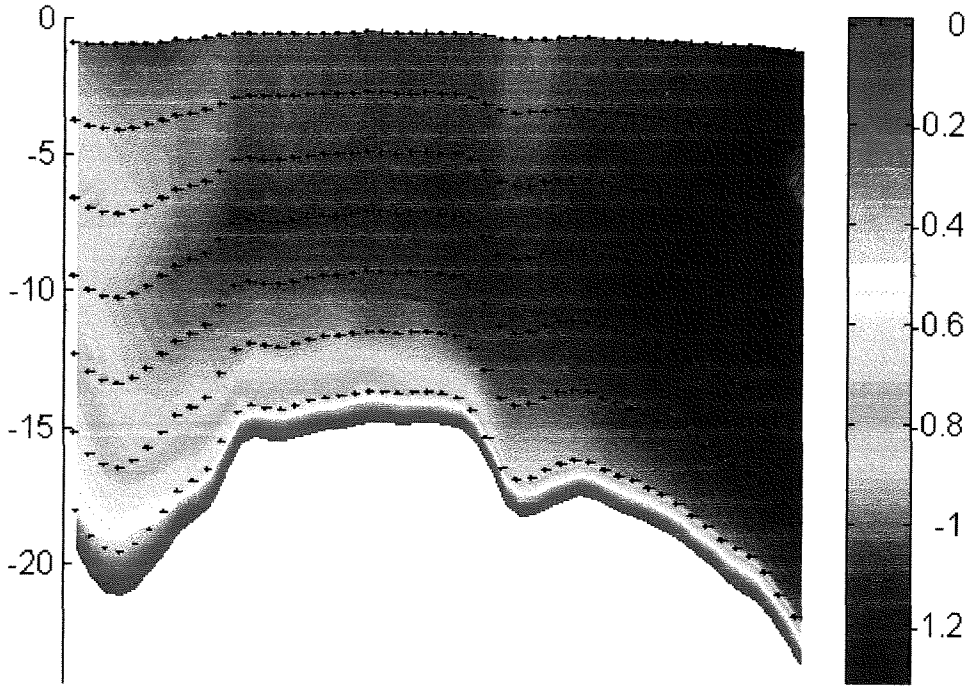
Drempel van Valkenisse

afstudeeronderzoek naar mechanismen die bijdragen
aan de vorming van de Drempel van Valkenisse



februari 1998
C.A.H. Wouters

TU Delft
Technische Universiteit Delft

Faculteit der Civiele Techniek

Drempel van Valkenisse

afstudeeronderzoek naar mechanismen die bijdragen
aan de vorming van de Drempel van Valkenisse

Koen Wouters

Februari 1998

Afstudeercommissie:
Prof. Dr. Ir. H.J. de Vriend (Technische Universiteit Delft)
Dr. Ir. Z.B. Wang (Technische Universiteit Delft)
Drs. H. Verbeek (Rijksinstituut voor Kust en Zee, Middelburg)

Voorwoord

In verband met de huidige verdieping van de Westerschelde, wordt onderzoek gedaan naar de vorming van drempels in de vaargeul. In dit afstudeerwerk is onderzoek gedaan naar waterbewegingsmechanismen die bijdragen aan drempelvorming. Er is vooral gekeken naar de effecten van secundaire stromingen en divergentie.

Dit afstudeeronderzoek is een opdracht van de Technische Universiteit Delft, faculteit Civiele techniek, vakgroep Waterbouwkunde en is uitgevoerd bij het Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ) in Middelburg. Dit afstudeerwerk loopt parallel aan het drempelonderzoek binnen het RIKZ, dat onderdeel is van het project Verdieping.

Vanaf deze plaats wil ik de mensen bedanken die mij hebben geholpen, voor hun ideeën, kritiek en prettige samenwerking. Met naam wil ik noemen mijn afstudeercommissie: Prof. Dr. Ir. H.J. De Vriend, Dr. Ir. Z.B. Wang en Harm Verbeek. Naast deze ook Maarten Jansen, Annemieke van der Slikke en kamergenoot Fred Tank.

Middelburg, februari 1998

Samenvatting

De Westerschelde is een drukke vaarroute voor schepen die vanaf de Noordzee de havens van Antwerpen, Vlissingen en Terneuzen aandoen. Om de havens van Antwerpen in de toekomst bereikbaar te maken voor schepen met een grotere diepgang, wordt de vaargeul in de Westerschelde verdiept. Dit is voornamelijk nodig op de drempels.
Drempels zijn natuurlijke ondiepe delen in een vaargeul in een estuarium of getijdebekken, die door de waterstroming worden gevormd. Meestal ligging deze drempels op de overgang tussen twee tegengestelde bochten in een estuarium, ongeveer zoals een crossing in een rivier.

Om beter inzicht te krijgen in de fysische mechanismen bij de vorming van drempels, zijn in dit onderzoek enkele mechanismen onderzocht op de Drempel van Valkenisse. Dit is gedaan met resultaten van een 3 dimensionaal waterbewegingsmodel (TRISCAL).
Uit de resultaten van één springtij blijkt dat de drempels worden gevormd door afname van het sedimenttransport over de drempel, wat het gevolg is van afname van de stroomsnelheid, secundaire stroming in dwarsrichting en secundaire stroming in langsrichting. De afname van de stroomsnelheid heeft hierin een aandeel van 60%. De secundaire stroming in dwarsrichting heeft een aandeel van 30% en de secundaire stroming in langsrichting een aandeel van 10%.
De afname van de stroomsnelheid is het gevolg van de divergentie, ten gevolge van de spreiding van de stroomlijnen uit de smalle diepe buitenbocht over de volledige breedte van de geul.

De secundaire stroming in dwarsrichting is het gevolg van de invloed van Coriolis, de stroomlijnkromming en een restterm, met in de restterm onder andere de naijling van de secundaire stroming en de invloed van de geometrie. Op de drempel blijkt de invloed van Coriolis de grootste term te zijn. Daarbij komt de invloed van de geometrie. De secundaire stroming uit stroomlijnkromming van de voorgaande bocht is op de drempel bijna volledig uitgedempt.

De secundaire stroming in langsrichting draagt nauwelijks bij aan de groei van de Drempel van Valkenisse. De secundaire stroming ontstaat voornamelijk door meevoering van impulsie in de onderste lagen van de stroming vanuit de buitenbocht richting de binnenbocht. Deze secundaire stroming dempt bijna volledig uit op de drempel.
Naijling geeft een rustiger verloop van de concentratie, waarmee het transport minder sterk fluctueert. Dit heeft echter nauwelijks gevolgen voor de drempel.

Inhoudsopgave

Voorwoord i
Samenvatting ii

1. Inleiding 1
1.1 Aanleiding 1
1.2 Doelstelling 1
1.3 Afbakening 1
1.3.1 Randvoorwaarden 2
1.3.2 Uitgangspunten 2
1.4 Leeswijzer 2
2. Beschrijving van de Drempel van Valkenisse 3
3. Beschrijving van waterbewegingsmodel TRIWAQ 5
4. Waterbeweging 8
4.1 Indeling waterbeweging 8
4.1.1 Stroombeeld tijdens maximum eb 8
4.1.2 Stroombeeld tijdens maximum vloed 8
4.1.3 Beschrijving van de reststroming 9
4.2 Primaire waterbeweging 9
4.2.1 Divergentie 9
4.3 Secundaire waterbeweging 10
4.3.1 Secundaire stroming in dwarsrichting 10
4.3.2 Secundaire stroming in langsrichting 15
5. Sedimenttransport 19
5.1 Bodemtransport 19
5.2 Suspensietransport met het Rouse concentratieprofiel 20
5.3 Suspensietransport met naijling 25
5.4 Bodemverandering 26
6. Resultaten van de waterbewegingsmechanismen 27
6.1 Primaire waterbeweging 27
6.1.1 Divergentie 27
6.2 Secundaire waterbeweging 27
6.2.1 Secundaire stroming in dwarsrichting 28
6.2.2 Secundaire stroming in langsrichting 29
7. Resultaten van de sedimenttransportberekeningen 31
7.1 Resultaten van het sedimenttransport met het Rouse concentratieprofiel 31
7.2 Restpatronen van het sedimenttransport 32
7.3 Resultaten van het sedimenttransport met naijling 32
7.4 Resultaten van de bodemverandering 32

8. Synthese 34
9. Conclusies 36
10. Aanbevelingen 37
11. Literatuurlijst 38

Lijst van figuren

Figuur 1: Overzicht van het drempelgebied 3
Figuur 2: Situatie 1931 4
Figuur 3: Situatie 1994 4
Figuur 4: Waterstanden/debieten drempelgebied Valkenisse 6
Figuur 5: Divergentie/convergentie aantonen door normaallijnkromming 10
Figuur 6: Vormfunctie secundaire stroming door stroomlijnkromming 12
Figuur 7: Secundaire stroming door randeffecten 13
Figuur 8: Afwijking gefit profiel/model waarden 15
Figuur 9: Secundaire stroming in langsrichting 15
Figuur 10: Secundaire stroming in langsrichting door diepteverandering 17
Figuur 11: Fout door discretisatie 18
Figuur 12: Rouse concentratieverdeling 21
Figuur 13: Vergelijking suspensietransport gemeten/berekend 23
Figuur 14: Dwarsstroming eb 28
Figuur 15: Dwarsstroming vloed 28
Figuur 16: Langsstroming eb 30
Figuur 17: Langsstroming vloed 30

Lijst van tabellen

Tabel 1: Verschil in getijslag tussen waterstandstations 6
Tabel 2: Verschil in debiet tussen gemodelleerde raaien 7

Lijst van bijlagen

Bijlage 1: Overzichtskaart Westerschelde
Bijlage 2: Diepte, maximum ebstroom
Bijlage 3: Diepte, maximum vloedstroom
Bijlage 4: Dieptegemiddelde stroomsnelheid, maximum ebstroom
Bijlage 5: Dieptegemiddelde stroomsnelheid, maximum vloedstroom
Bijlage 6: Reststroming, na een springtij
Bijlage 7: Normaallijnkromming, maximum ebstroom
Bijlage 8: Normaallijnkromming, maximum vloedstroom
Bijlage 9: Secundaire stroming in dwarsrichting, maximum ebstroom
Bijlage 10: Secundaire stroming door Coriolis, maximum ebstroom
Bijlage 11: Secundaire stroming door stroomlijnkromming, maximum ebstroom
Bijlage 12: Resterende secundaire stroming, maximum ebstroom
Bijlage 13: Standaardafwijking secundaire stroming in dwarsrichting, maximum ebstroom
Bijlage 14: Secundaire stroming in dwarsrichting, maximum vloedstroom
Bijlage 15: Secundaire stroming door Coriolis, maximum vloedstroom
Bijlage 16: Secundaire stroming door stroomlijnkromming, maximum vloedstroom
Bijlage 17: Resterende secundaire stroming, maximum vloedstroom
Bijlage 18: Standaardafwijking secundaire stroming in dwarsrichting, maximum vloedstroom
Bijlage 19: Secundaire stroming in langsrichting, maximum ebstroom
Bijlage 20: Secundaire stroming in langsrichting, maximum vloedstroom
Bijlage 21: Standaardafwijking secundaire stroming in langsrichting, maximum ebstroom
Bijlage 22: Standaardafwijking secundaire stroming in langsrichting, maximum vloedstroom
Bijlage 23: Sedimenttransport 2DH, maximum ebstroom
Bijlage 24: Sedimenttransport 2DH, maximum vloedstroom
Bijlage 25: Sedimenttransport door secundaire stroming in dwarsrichting, maximum ebstroom
Bijlage 26: Sedimenttransport door secundaire stroming in dwarsrichting, maximum vloedstroom
Bijlage 27: Sedimenttransport door secundaire stroming in langsrichting, maximum ebstroom
Bijlage 28: Sedimenttransport door secundaire stroming in langsrichting, maximum vloedstroom
Bijlage 29: Resttransport 2DH waterbeweging
Bijlage 30: Resttransport door secundaire stroming in dwarsrichting
Bijlage 31: Resttransport door secundaire stroming in langsrichting
Bijlage 32: Concentratie op hoogte (a)
Bijlage 33: Correctie op de concentratie op hoogte (a), wegens naijling
Bijlage 34: Bodemverandering na 1 springtij
Bijlage 35: Bodemhoogteverschil 1993-1996

1. Inleiding

1.1 Aanleiding

De Schelde is een langgerekt estuarium, dat druk wordt bevaren door zeeschepen tussen de Noordzee en de havens van Antwerpen, Vlissingen en Terneuzen. Vanwege de steeds groter wordende zeeschepen en daarmee toenemende diepgang, vormen de drempels in de vaargeul een toenemend probleem voor de bevaarbaarheid. De havens zijn daardoor in een smaller getijvenster bereikbaar.

Op verschillende drempels wordt maandelijks gebaggerd om de toegang tot de havens van Antwerpen te garanderen. Om de havens in de toekomst bereikbaar te maken voor grotere schepen is in 1997 besloten om de vaargeul verder te verdiepen. Deze '48/'43-verdieping is in augustus 1997 van start gegaan. Dit gaat gepaard met een forse toename van de baggerinspanning.

Door Rijkswaterstaat wordt onderzoek gedaan naar onder andere de morfologische gevolgen van deze verdieping. Dit onderzoek vindt plaats binnen het project Verdieping Een deel van het project Verdieping, is het onderzoek naar het gedrag van drempels, waarbij de Drempel van Hansweert centraal staat. Dit onderzoek wordt ondersteund door uitgebreide metingen (Tank, 1997[a,b,c] / Verbeek, Tank en Groenewoud, 1998).
Daarnaast is er onderzoek gedaan naar beheersalternatieven die het baggerbezwaar verminderen. Dit is gedaan met het morfologisch computermodel DELFT 2D-MOR (Groenewoud, 1997/Groenewoud en Tank, 1997).
Behalve deze onderzoeken is er ook een monitoring programma van start gegaan (MOVE) waar gedurende de verdieping de waterbeweging en de morfologie nauwlettend in de gaten worden gehouden (Mol, et al, 1997).

1.2 Doelstelling

De fysische mechanismen die bij de vorming van drempels een rol spelen, worden niet voldoende doorgrond, waardoor de hoeveelheid baggerwerk die nodig is om ze te verwijderen en de vaargeul op diepte te houden moeilijk te schatten is.

Het doel van dit afstudeeronderzoek is na te gaan wat de mechanismen zijn die aanleiding geven tot drempelvorming. Dit wordt gedaan aan de hand van modelresultaten van de waterbeweging.

In dit onderzoek wordt een antwoord gegeven op de volgende onderzoeksvraag:
Door welke fysische mechanismen wordt de intensiteit van de sedimentatie/erosie op de drempel beïnvloed?

1.3 Afbakening

Het onderzoek wordt beperkt tot de volgende onderdelen:

- Onder fysische mechanismen wordt verstaan de primaire- en secundaire waterbeweging en hun invloed op het sedimenttransport.

- Het doel van het berekenen van het sedimenttransport is het afschatten van de invloed van de verschillende waterbewegingsmechanismen op het sedimenttransport. Het is dus niet de bedoeling om zo nauwkeurig mogelijk het transport te bepalen.

1.3.1 Randvoorwaarden

- In dit onderzoek is de morfodynamiek van de Drempel van Valkenisse beschouwd. Deze drempel is gekozen, omdat er geen nevengeulen aansluiten, zoals bij de Drempel van Hansweert.

- Het onderzoek is gebaseerd op de modelresultaten van TRISCAL. Dit is een 3D waterbewegingsmodel van het oostelijk deel van de Westerschelde.

- Het hele onderzoek is gebaseerd op één springtij. Modelresultaten van een doodtij zijn niet beschikbaar. Het genereren van deze gegevens zou teveel tijd hebben gekost binnen het kader van dit afstudeerproject.

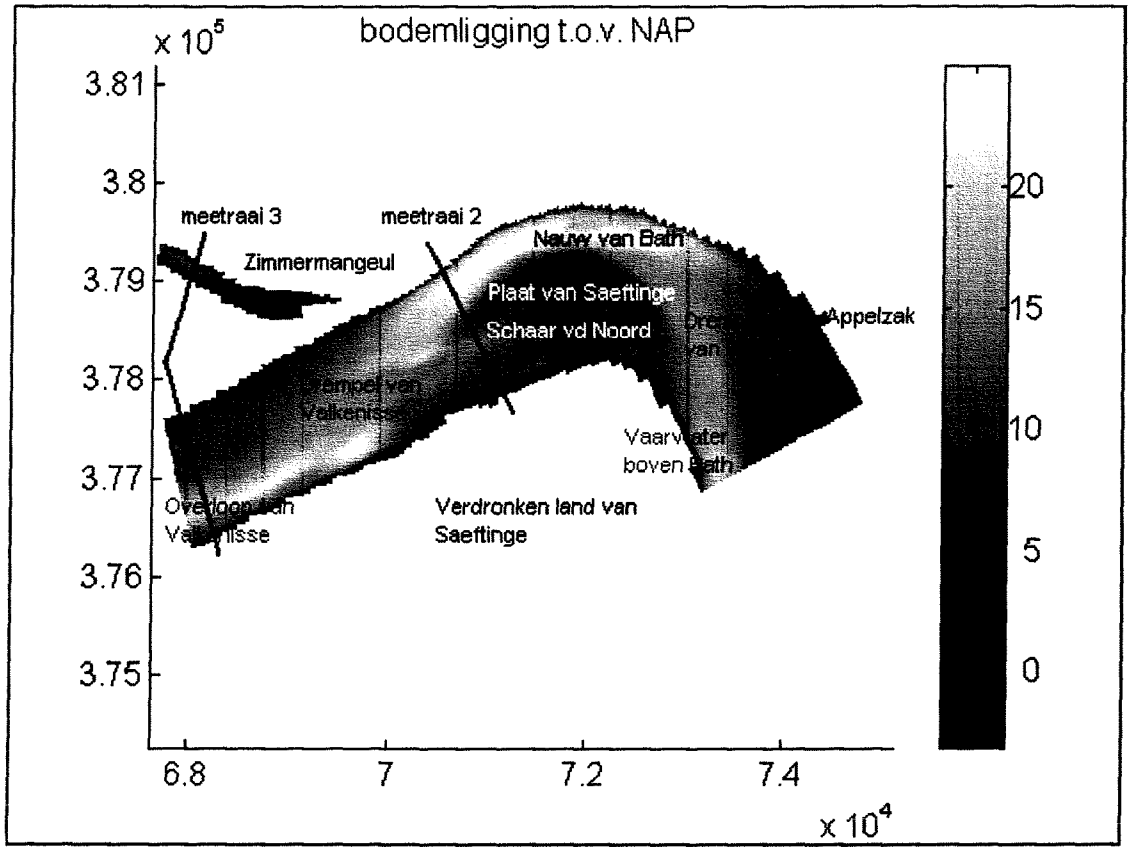
1.3.2 Uitgangspunten

- In dit rapport is er van uitgegaan dat de resultaten van het TRISCAL waterbewegingsmodel goed overeenkomen met de werkelijkheid. Voor een volledige verificatie van het waterbewegingsmodel wordt verwezen naar Jansen (1997 en 1998), waarin de modelresultaten worden vergeleken met onder andere HF-radar metingen en ADCP (acoustic doppler current profiler) metingen.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 staat een korte beschrijving van de Drempel van Valkenisse. Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 het gebruikte waterbewegingsmodel beschreven. De waterbewegingsmechanismen waarvan werd verwacht dat deze bijdragen aan drempelvorming, zijn uitgewerkt in hoofdstuk 4. In hetzelfde hoofdstuk is de methode aangegeven waarmee de intensiteit van de waterbewegingsmechanismen is berekend uit de modelresultaten. De berekening van het sedimenttransport is in hoofdstuk 5 uitgewerkt, waarin tevens de invloed van de secundaire waterbeweging op het sedimenttransport is aangetoond. De resultaten van deze berekeningen staan in hoofdstuk 6, respectievelijk in hoofdstuk 7. In hoofdstuk 8 zijn de resultaten van de berekeningen geïnterpreteerd, waarna in hoofdstuk 9 de conclusies volgen.

2. Beschrijving van de Drempel van Valkenisse



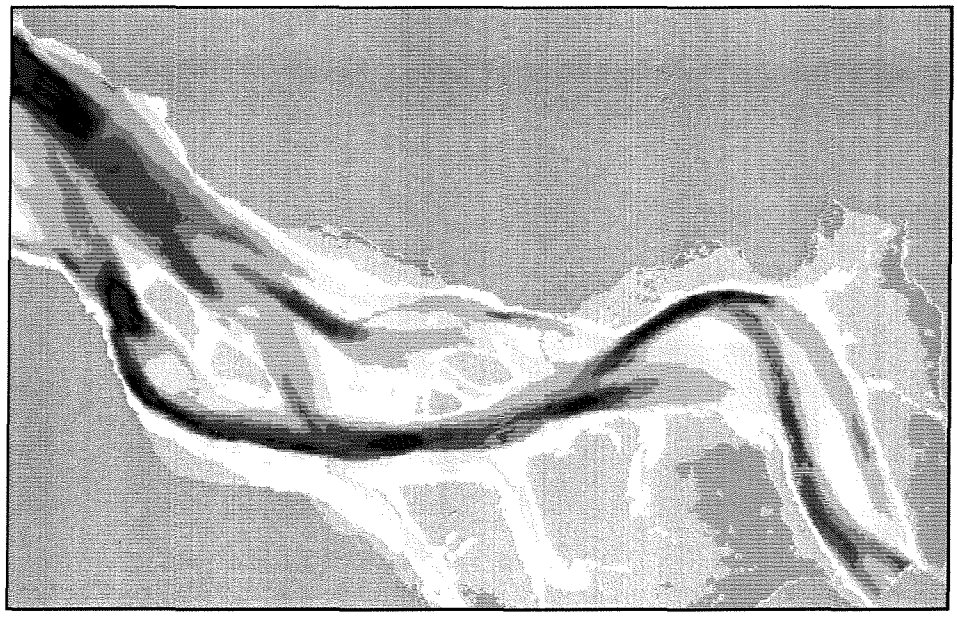
Figuur 1: Overzicht van het drempelgebied

De Drempel van Valkenisse ligt in het oostelijk deel van de Westerschelde (Zie Bijlage 1). Op de drempel sluiten de Overloop van Valkenisse en Het Nauw van Bath op elkaar aan. De ligging is weergegeven in Figuur 1. In het oosten ligt de Schaar van de Noord. Dit is een ondiepe vloedschaar, die met vloed 60% van het getijvolume transporteert. Met eb is dit beperkt tot 40% van het getijvolume. Het grootste eb debiet vindt plaats gedurende het eerste deel van de ebfase, als de waterstand op de Plaat van Saeftinge nog hoog is.
In het noordoosten sluit het Nauw van Bath aan op de drempel. Dit is een ebgedomineerde geul die met eb 60% van het getijvolume transporteert en met vloed 40%. Het Nauw van Bath is in tegenstelling tot de Schaar van de Noord diep. In de buitenbocht midden in het Nauw van Bath is het dieper dan 25m.
In het noordwesten sluit de Zimmermangeul aan, deze heeft een aandeel van 3% van het getijvolume. De invloed van deze geul wordt verder in dit onderzoek verwaarloosd.

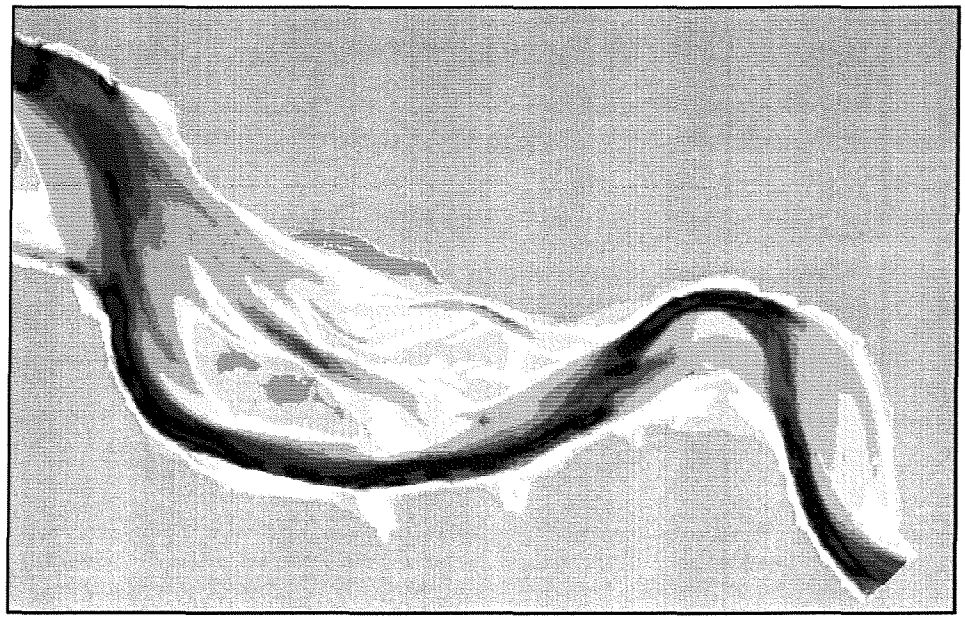
Voor 1950 was de Drempel van Valkenisse diep genoeg voor de scheepvaart. Door de schaalvergroting van de scheepvaart kwam er behoefte aan een diepere vaargeul. Daarom is de vaargeul tussen 1950 en 1970 verdiept. In deze periode bedroeg het onderhoudsbaggerwerk 1 Mm^3/j. Na de laatste verdieping die in begin jaren '70 aanving, nam de baggerinspanning aanvankelijk toe tot 4 Mm^3/j, om vervolgens af te nemen tot 1.5 Mm^3/j.
De stortplaatsen waren voornamelijk de zuidoever van het Zuidergat, dat ligt 7km ten westen van de drempel, waar tijdens het verdiepen 4 Mm^3/j werd gestort. In de Schaar van

Waarde werd gemiddeld 1 Mm^3/j gestort. Aanvankelijk werd ook 1 Mm^3/j gestort in de Schaar van de Noord, maar dit is sinds 1980 teruggebracht tot 0.3 Mm^3/j.

Sinds 1931 is de ligging van de geulen ten opzichte van elkaar gewijzigd. In die periode was de drempel van een 'botsend' karakter. Dat wil zeggen dat de ebgeul onder een hoek aansluit op de vloedgeul. In de huidige ligging van de geulen, zijn de vloedgeul en de ebgeul naar elkaar toe getrokken. Ze ontwijken elkaar daarbij nog steeds, maar botsen niet meer. Op de overgang tussen de vloedgeul en de ebgeul ligt de drempel. Uit de verschillen tussen Figuur 2 en Figuur 3 blijkt, dat het botsende karakter van zowel de Schaar van de Noord als de Schaar van Waarde is afgenomen.



Figuur 2: Situatie 1931



Figuur 3: Situatie 1994

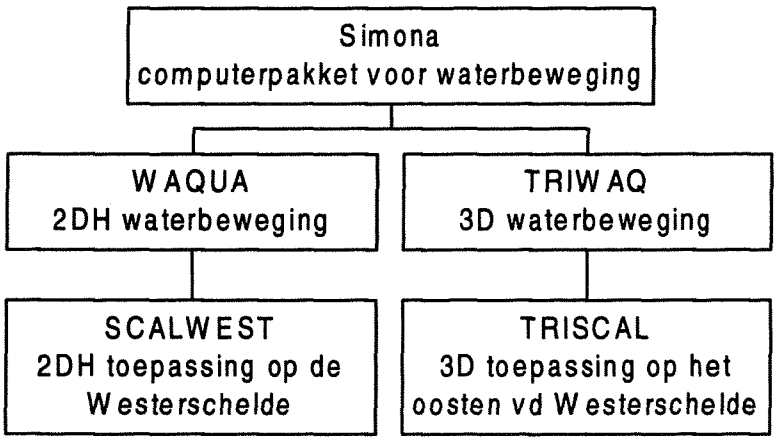
3. Beschrijving van waterbewegingsmodel TRIWAQ

Voor de berekening van de waterbeweging wordt het SIMONA pakket van Rijkswaterstaat gebruikt. De toepassing die in dit onderzoek wordt gebruikt, is gemaakt door Jansen (1997) en heet TRISCAL. Deze toepassing is gemaakt om inzicht te verkrijgen in de 3-dimensionale waterbeweging.

Het model omvat het gebied tussen Baarland en Nederlands-Belgische grens (Zie Bijlage 1). In dit deel van de Westerschelde liggen de drempels van Hansweert, Valkenisse en Bath.
Het kromlijnige grid waarvan gebruik gemaakt is, heeft een grootte van 265 bij 236 punten (nmax x mmax) en heeft 7 lagen in vertikale richting. Dit zijn zogenaamde sigma-lagen, wat inhoudt, dat in elk punt de diepte wordt opgedeeld in een aantal lagen die elk dezelfde relatieve dikte hebben.

De waterbeweging in het SIMONA pakket wordt berekend in TRIWAQ. De turbulente overdracht van impulsie tussen de verschillende lagen wordt bepaald met behulp van een ingebouwd turbulentiemodel (k-ε model). Het k-ε turbulentiemodel is ontwikkeld door het Waterloopkundig Laboratorium voor het model TRISULA en is later ingebouwd in TRIWAQ. Voor een beschrijving hiervan wordt verwezen naar De Goede et al., 1995.

Het TRISCAL model is genest in het SCALWEST model. SCALWEST is een 2DH waterbewegingsmodel, gebaseerd op WAQUA en omvat de hele Westerschelde en de Zeeschelde tot aan Gent. Het grid van TRISCAL is een uitsnede van het grid van SCALWEST.



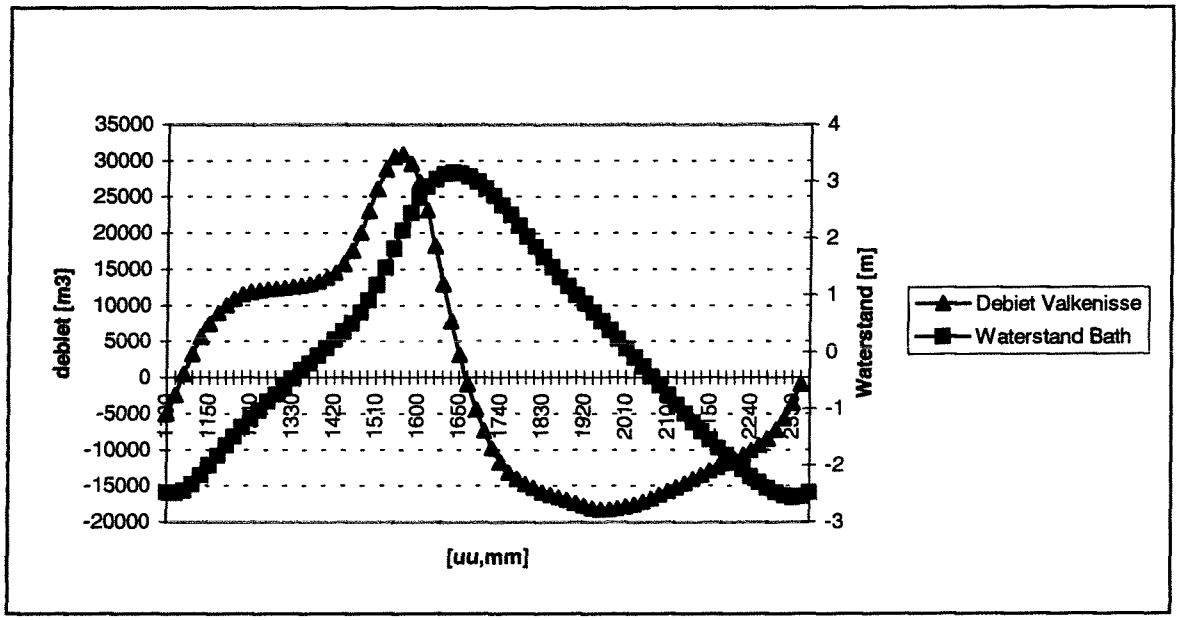
De randvoorwaarden van het model is een springtij (4-5 mei 1996). De getijcoëfficiënt bedroeg 1.23, dat is de verhouding van het opgetreden getijamplitude met de gemiddelde getijamplitude. De afvoer van de Schelde was 60m^3/s. In deze periode was er weinig wind (2-3 Bft. uit het noordwesten).
Er is gerekend met een initieel zoutveld dat hoort bij een Schelde-afvoer van 40m^3/s en hoogwater bij Terneuzen. Deze is in het verleden berekend met het E-WESTII model (Dekker, 1993)
De modelresultaten zijn om de 30 minuten weggeschreven in de periode van 5 mei 1996 van 11:00 uur tot 23:30 uur.

In Figuur 4 staat het verloop van de waterstand en het debiet van 5-5-1996.

De resultaten van het TRISCAL model zijn minder nauwkeurig dan het 2DH waterbewegingsmodel SCALWEST. Dit komt door het nesten, waardoor de fouten die worden gemaakt in het 2DH model, via de randvoorwaarden doorwerken in het TRISCAL model. Daarbij komen de fouten van het TRISCAL model zelf.

In Tabel 1 en Tabel 2 staan de vergelijkingen van de getijslag en de debieten. De grootste fout tussen TRISCAL en de opgetreden getijslag bedraagt 18cm (3,2%) nabij Bath. Dit is een vrij grote fout. De gevolgen voor dit onderzoek zijn echter beperkt, omdat onderzoek wordt gedaan naar de mechanismen en niet in kwantitatieve zin naar de waterbeweging.

Vergelijking van de gemodelleerde waterbeweging met ADCP (acoustic doppler current profiler) metingen zijn voor de Drempel van Valkenisse niet gemaakt, bij gebrek aan metingen. Voor 2 raaien op de Drempel van Hansweert is er wel een vergelijking gemaakt, hieruit blijkt, dat de modelresultaten redelijk betrouwbaar zijn (Jansen, 1998).



Figuur 4: Waterstanden/debieten drempelgebied Valkenisse

	getijslag gemeten [m]	getijslag SCALWEST [m]	verschil SCALW./ gemeten	getijslag uitsnede [m]	getijslag TRISCAL [m]	verschil TRISCAL/ gemeten
Vlissingen	4,77/4,76	4,75/4,73	-0,6%	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Terneuzen	5,15/5,13	5,18/5,15	+0,6%	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Hansweert	5,32/5,30	5,41/5,37	+1,5%	5,40/5,37	5,43/5,40	2,0%
Baalhoek	5,65/5,63	5,57/5,54	-1,5%	5,63/5,60	5,74/5,70	1,4%
Bath	5,79/5,76	5,75/5,72	-0,54%	5,90/5,86	5,98/5,94	3,2%
Antwerpen	6,2/5,88	6,26/5,92	+0,57%	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.

Tabel 1: Verschil in getijslag tussen waterstandstations

	2DH-uitsnede		TRISCAL		verschil 2DH/ TRISCAL	
	vloedvolume [m^3]	ebvolume [m^3]	vloedvolume [m^3]	ebvolume [m^3]	vloedvolume [m^3]	ebvolume [m^3]
Vw.b.Bath	344936	-345064	344572	-346159	-0,11%	0,32%
Overl.Valkenisse	514327	-495426	519627	-498877	1,03%	0,70%
Zimmermangeul	42646	-56369	43653	-57961	2,36%	2,82%
Zuidergat	464317	-501686	463889	-509687	-0,09%	1,59%
Sch v Waarde	305020	-260335	317607	-264297	4,13%	1,52%
Middelgat	470294	-522167	477832	-539789	1,60%	3,37%
Gat v Ossenisse	669555	-605212	677943	-603788	1,25%	-0,24%

Tabel 2: Verschil in debiet tussen gemodelleerde raaien[1]

[1] Overgenomen uit Jansen, 1997

4. Waterbeweging

4.1 Indeling waterbeweging

Drempels ontstaan door verandering van het sedimenttransport in het drempelgebied. Deze verandering van het sedimenttransport is meestal het gevolg van de verandering van de waterbeweging over dit traject. In dit hoofdstuk worden de waterbewegingsmechanismen beschreven, waarvan wordt verwacht dat deze invloed hebben op de vorming van drempels. Tevens wordt bij iedere mechanisme de berekeningswijze gegeven, waarmee de intensiteit wordt bepaald.

De waterbeweging op de drempel is in dit rapport opgedeeld in de primaire stroming en secundaire stroming. Mechanismen die betrekking hebben op de primaire stroming zijn toegelicht in paragraaf 4.2. De mechanismen van de secundaire stromen zijn toegelicht in paragraaf 4.3. In paragraaf 4.1 wordt begonnen met een beschrijving van de stroming op maximum snelheid tijdens eb en tijdens vloed.

4.1.1 Stroombeeld tijdens maximum eb

De maximale stroomsnelheid gedurende eb treedt op bij een lage waterstand in het drempelgebied. Deze waterstand verschilt aanzienlijk van die op het moment van maximum vloed. Zie hiervoor Bijlage 2 en Bijlage 3. Omdat de waterdiepte in de Schaar van de Noord bijna verdubbelt, heeft dit gevolgen voor het stroombeeld.

Met eb stroomt het water vanuit het Vaarwater boven Bath richting de drempels (Zie Bijlage 4). Net buiten het beschouwde gebied ligt een leidam die ervoor zorgt, dat het lokaal harder stroomt dan even verder stroomafwaarts. Ter hoogte van de Schaar van de Noord takt een deel van de stroming af. Het aftakkende debiet is het grootst tijdens het begin van de eb, wanneer de waterstand nog hoog is. Het stroomt hier harder (tot 1,60m/s) dan in het Nauw van Bath, vanwege het grotere verhang over deze schaar. Naarmate de waterstand zakt, neemt het debiet door de Schaar van de Noord snel af. Het Nauw van Bath neemt 60% van het getijvolume tijdens eb, de Schaar van de Noord 40%.
Voorbij het Nauw van Bath, waar de Drempel van Valkenisse begint, is de stroomsnelheid groot. De meetkundige plaats met de grootste snelheid per raai loopt langs de Drempel van Valkenisse. Gaande langs deze lijn neemt de maximum snelheid geleidelijk af. Midden op de drempel is de stroomsnelheid lager dan in het ondiepere deel daarnaast. Voorbij de Drempel van Valkenisse is de stroomsnelheid weer gelijkmatig over de breedte van de geul verdeeld.

4.1.2 Stroombeeld tijdens maximum vloed

Bij vloed stroomt het water vanuit de Overloop van Valkenisse richting de Drempel van Hansweert. (Zie Bijlage 5) De grootste stroomsnelheid treedt op aan de buitenbochtzijde. Evenals met eb ligt de stroomlijn met de grootste stroomsnelheid naast de drempel. Deze stroomlijn vervolgt zijn weg in een rechte lijn naar de Schaar van de Noord. Tijdens vloed neemt de Schaar van de Noord 60% van het getijvolume en het Nauw van Bath neemt 40%. Voorbij de Schaar van de Noord stroomt het water uit op de Drempel van Bath. Het deel van getijvolume dat uit het Nauw van Bath komt, bereikt aan de noordzijde de Drempel van Bath en stroomt hier recht overheen. Het deel van het getijvolume dat door de Schaar van de Noord uitstroomt op de drempel, schiet door de traagheid voor een deel door naar de Appelzak. Deze stroming kruist de stroming vanuit het diepe Nauw van Bath. De stroming vanaf de plaat stroomt hier overheen. Vanaf de Drempel van Bath stroomt alles richting de leidam net buiten het beschouwde gebied.

4.1.3 Beschrijving van de reststroming

Reststroming is het patroon van de som van alle stromingen over een doodtij-springtijcyclus. Dit wordt gepresenteerd in een vectorplot, waarin de reststroomsnelheid wordt uitgezet. De reststroming geeft van de geuldelen de dominantie aan.
De reststroomsnelheid wordt berekend door per gridpunt bij te houden hoeveel water er passeert. Het netto volume moet hierna nog worden gedeeld door de tijd en de gemiddelde diepte om een reststroomsnelheid te krijgen.

Bij gebrek aan resultaten van een volledige doodtij-springtijcyclus, is in Bijlage 6 de reststroomsnelheid gegeven van het springtij van 5 mei 1996. Hieruit blijkt de vloed-dominantie van het Overloop van Valkenisse, de eb-dominantie van het Nauw van Bath. Ook blijkt dat de vloedstroming en de ebstroming elkaar ontwijken op de Drempel van Valkenisse.

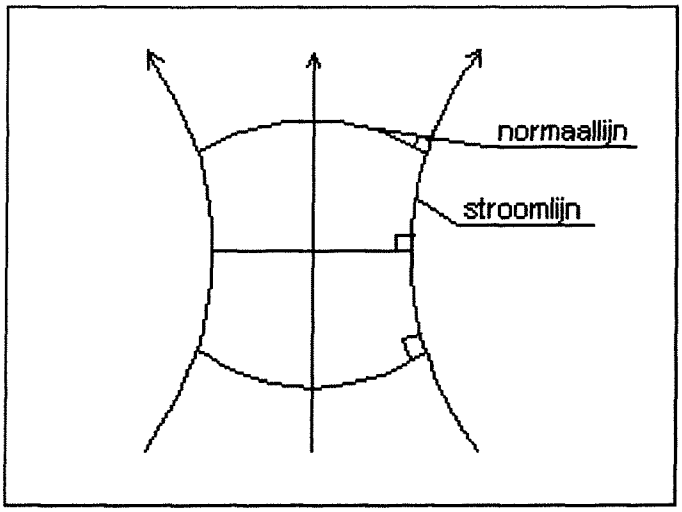
4.2 Primaire waterbeweging

De primaire waterbeweging in de Westerschelde komt voort uit het getij. Dit dubbeldaags getij heeft bij Vlissingen een gemiddeld getijverschil van 3.86m en bij Bath 4.83m. Over dit traject is er dus een toename van 25%.
Het getijvolume ter hoogte van de Drempel van Valkenisse bedraagt 280 miljoen m^3 (bij een getijcoëfficiënt van 1.23).
De aanvoer vanaf de rivier de Schelde bedraagt in dit waterbewegingsmodel $60m^3/s$ en is gering (0.5%) ten opzichte van het getijvolume. De reststroom die hierdoor ontstaat is in de orde van millimeters per seconde en kan daarom worden verwaarloosd.

4.2.1 Divergentie

Divergentie houdt in dat de stroomlijnen uit elkaar wijzen. Een gevolg hiervan is dat het debiet per meter breedte afneemt. Bij een stationaire stroming zou op den duur een evenwicht ontstaan voor de bodemligging en de waterdiepte, wat in een vaargeul een drempel kan zijn. In de Westerschelde, waar de stroming onderhevig is aan getij, mag deze vergelijking met stationaire stroming niet worden gemaakt. De diepte zal variëren tussen de evenwichtssituaties die horen bij een doodtij en die van een springtij. Of de evenwichtstoestand ook werkelijk wordt bereikt, is afhankelijk van de morfologische tijdschaal van de drempelvorming.

Divergentie kan worden aangetoond door middel van normaallijnkromming. In het geval dat de normaallijn van de stroomlijnen recht is, is er geen divergentie. Bij uit elkaar wijzende stroomlijnen, is de normaallijn gekromd. Zie Figuur 5.



Figuur 5: Divergentie/convergentie aantonen door normaallijnkromming

Deze kromming wordt berekend met de volgende formulering:

$$\frac{1}{R_n} = \frac{1}{\left(u^2 + v^2\right)^{3/2}} \left[u\left(u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} \right) + v\left(u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} \right) - \left(u^2 + v^2\right)\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right]$$

waarin:
$1/R_n$ normaallijnkromming [m^{-1}]

Deze formulering is alleen geldig voor een cartesiaans assenstelsel. Omdat de modelgegevens op een kromlijnig assenstelsel staan, worden deze geïnterpoleerd naar een rechthoekig grid met dezelfde afmetingen als het kromlijnige grid. Dit wordt gedaan met behulp van de triangulatiemethode.
Om een beter fysisch inzicht in het resultaat te krijgen, wordt de normaallijnkromming vermenigvuldigd met de snelheid en de diepte. Hiermee worden randeffecten voor een deel weg gefilterd, zoals neren in het Verdronken land van Saeftinge.

4.3 Secundaire waterbeweging

De secundaire waterbeweging is de afwijking ten opzichte van het 2DH logaritmisch snelheidsprofiel. De componenten van de snelheid dwars op de hoofdrichting is de secundaire stroming in dwarsrichting. De afwijking van de stroming ten opzichte van het logaritmisch snelheidsprofiel is de secundaire stroming in langsrichting.
In deze paragraaf wordt ingegaan op de oorzaken van deze secundaire stromingen en de berekening van deze uit de modelresultaten. Hoe de verschillende oorzaken van de secundaire stromingen zich ten opzichte van elkaar verhouden wordt toegelicht in hoofdstuk 6.

4.3.1 Secundaire stroming in dwarsrichting

De secundaire stroming in dwarsrichting is van belang voor het ontstaan van drempels, omdat deze een richting geeft aan het sedimenttransport nabij de bodem. De hoek die de resultante van het transport maakt met de richting van de hoofdstroming kan oplopen tot meer dan 10 graden en is vrijwel altijd naar de drempel gericht.

De secundaire stroming in dwarsrichting ontstaat voornamelijk door 3 oorzaken:
- Coriolis
- Bochtverhang
- Randeffecten bij platen

In deze paragraaf zullen de oorzaken kort worden toegelicht. Tevens wordt aangegeven hoe deze worden berekend uit de modelresultaten.

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

Dit is afgeleid voor een logaritmisch snelheidsprofiel. Waarbij is aangenomen dat de diepte-breedteverhouding veel kleiner dan 1 is. De situatie op en rond de Drempel van Valkenisse ligt op de grens waarbij deze formulering mag worden toegepast.

De formulering is overgenomen uit De Vriend 1976 en luidt:

$$u_{nc} = -sign(\overline{u_s})\frac{fh}{\kappa^2} f_c\left(\frac{z}{h},\alpha\right)$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{g}}{\kappa C}$$

$$f_c\left(\frac{z}{h},\alpha\right) = \int_{-1}^{z/h} \frac{h}{z}\ln\left(1+\frac{z}{h}\right)d\left(\frac{z}{h}\right) + \left(\frac{\pi^2}{6}-1\right) - \alpha\left(1+\ln\left(1+\frac{z}{h}\right)\right)$$

waarin:

u_{nc}	secundaire snelheid door Coriolis, op hoogte (z/h) [m/s]
f_c	vormfunctie [-]
α	bodemwrijvingsterm [-]
f	Coriolis term $2\omega \sin\phi$

Secundaire stroming door bochtverhang
In een bochtstroom verandert de stroming van richting. Hier treedt een dwarsverhang op. Deze oppervlaktehelling brengt een drukgradiënt mee die de stroming de bocht om duwt. De grotere stroomsnelheden boven in de vertikaal vereisen echter een grotere drukgradiënt voor dezelfde kromming, zodat een secundaire snelheid naar de buitenbocht overblijft. Onderin is de drukgradiënt te groot voor de kleinere stroomsnelheid, zodat een secundaire stroming naar de binnenbocht resulteert. Ruimtelijk gezien zal een waterdeeltje een spiraalvormige baan afleggen.

Dit is afgeleid voor onder andere een logaritmisch snelheidsverloop. Hierbij gelden dezelfde aannamen als bij de berekening van de dwarsintensiteit door Coriolis invloed. Tevens moet gelden dat de breedte-bochtstraalverhouding kleiner is dan 0,2. De gebruikte formulering wordt hier ook gebruikt op de grens van het geldigheidsgebied.

De formulering luidt:

$$u_{nb} = 2\frac{\overline{|u_s|}h}{\kappa^2 R_s} f_b\left(\frac{z}{h},\alpha\right)$$

$$\frac{1}{R_s} = \frac{1}{\left(u^2+v^2\right)^{3/2}}\left[v\left(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right)-u\left(u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}\right)\right]$$

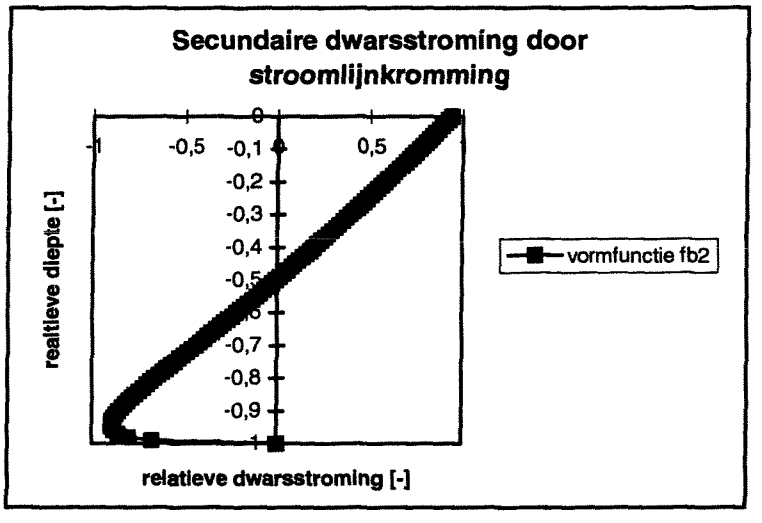
$$f_b\left(\frac{z}{h},\alpha\right) = f_c\left(\frac{z}{h},\alpha\right)+\frac{\alpha}{2}f_{b2}\left(\frac{z}{h},\alpha\right)$$

$$f_{b2}\left(\frac{z}{h},\alpha\right) = 2+2\alpha+2\alpha\ln\left(1+\frac{z}{h}\right)+\int_{-1}^{z/h}\frac{h}{z}\ln^2\left(1+\frac{z}{h}\right)d\left(\frac{z}{h}\right)$$

waarin:

u_{nb}	secundaire snelheid door stroomlijnkromming en Coriolis [m/s]
$1/R_s$	stroomlijnkromming, berekend in een cartesiaans assenstelsel [m^{-1}]
f_b	vormfunctie voor stroomlijnkromming en Coriolis [-]
f_{b2}	vormfunctie voor stroomlijnkromming [-]

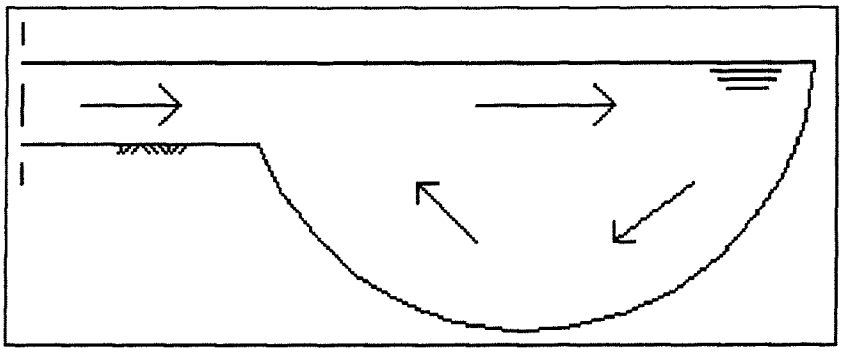
In Figuur 6 is de vormfunctie f_{b2} getekend.



Figuur 6: Vormfunctie secundaire stroming door stroomlijnkromming, f_{b2}

Secundaire stroming door randeffecten bij platen

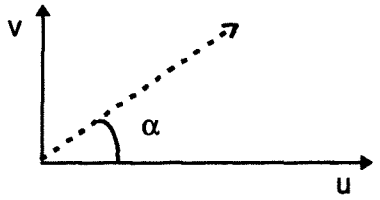
Het uitstromen van een ondiepe geul op een diepe geul heeft secundaire stroming tot gevolg. Dit ontstaat doordat de impulsie van de ondiepe geul uitkomt op het bovenste deel van de diepe geul. Door deze asymmetrie wordt een circulatiecel aangedreven. De sterkte van deze circulatie is afhankelijk van diverse faktoren, zoals de verhouding van de diepte van de aansluitende geul en van de hoofdgeul, de stroomsnelheden van beide geulen, breedte van beide geulen, etc.



Figuur 7: Secundaire stroming door randeffecten

Berekening van de secundaire stroming in dwarsrichting
Voor het toetsen van de modelresultaten op secundaire stroming in dwarsrichting is de volgende strategie gebruikt:
Eerst wordt per gridpunt de richting van de dieptegemiddelde stroming berekend.

$$\alpha = \arctan\left\{\frac{\sum_{1}^{7} v_i}{\sum_{1}^{7} u_i}\right\}$$



Vervolgens worden de dwarscomponenten berekend, door de stromingsvectoren in iedere laag te ontbinden dwars op de dieptegemiddelde stroming, waarbij de som van alle dwarscomponenten per definitie nul is.

$$d_i = u_{s,i} \sin(\varphi_i - \alpha)$$

waarin:

d_i	dwarssnelheid in laag i [m/s]
$u_{s,i}$	stroomsnelheid laag i [m/s]
φ_i	richting stroming laag i [Rad]

De grootte van de secundaire stroming wordt bepaald door een vormfunctie te fitten door de dwarscomponenten. Bij het fitten is het doel de afwijkingen tussen het veronderstelde model en de meetpunten te minimaliseren door een optimale keuze van de parameter. In dit geval is het veronderstelde model de vormfunctie van het secundaire snelheidsprofiel door stroomlijnkromming.

$$\chi^2 = \min \sum_{i=1}^{7} \{y_i - Af(x_i)\}^2$$

de kleinste fout wordt gemaakt bij de oplossing van $\frac{\delta(\chi^2)}{\delta A} = 0$

$$\frac{\delta(\chi^2)}{\delta A} = 2\sum_{i=1}^{7} \{(y_i - Af(x_i))(-f(x_i))\} = 0$$

dit omgeschrijven naar A levert:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^{7} \{y_i f(x_i)\}}{\sum_{i=1}^{7} \{(f(x_i))^2\}}$$

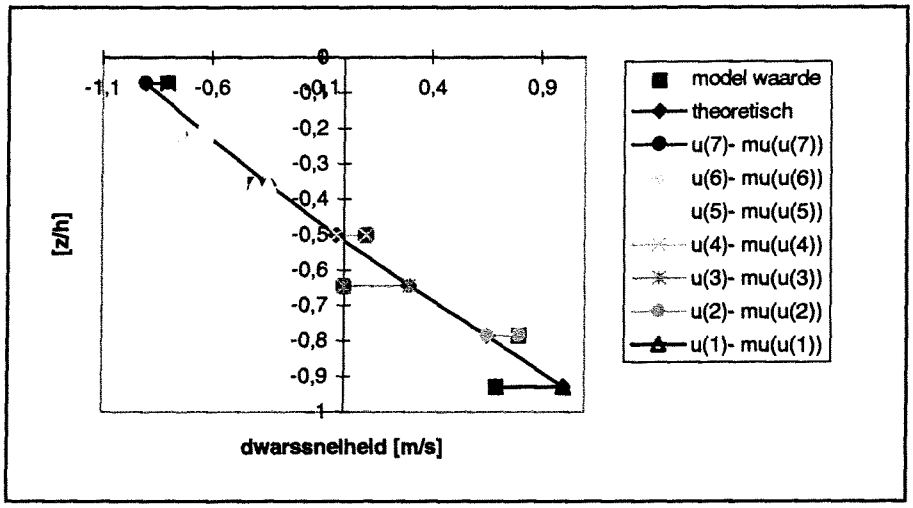
De waarde van A is de factor waarmee het theoretische dwarsprofiel moet worden vermenigvuldigd om het best passende secundaire snelheidsprofiel te krijgen. Deze waarde is nagenoeg gelijk aan de secundaire snelheid aan het wateroppervlak.

Om inzicht te krijgen in de betrouwbaarheid van de gefitte lijnen van de secundaire stromen ten opzichte van de modelresultaten, wordt de standaardafwijking berekend. De werkwijze voor de langs- en dwarsstroming is gelijk. In Figuur 8 is dit weergegeven.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\left(\sum_{i=1}^{7} \left(u(\frac{2i-1}{14}) - \mu(u(\frac{2i-1}{14})) \right)^2 \right)}{7-1}}$$

waarin:

σ	standaardafwijking [m/s]
$\mu(u(z/h))$	snelheid volgens de vormfunctie op hoogte z [m/s]
$u(z/h)$	snelheid uit de modelgegevens op hoogte z (kan langssnelheid of dwarssnelheid zijn, afhankelijk van de bekeken resultaten) [m/s]

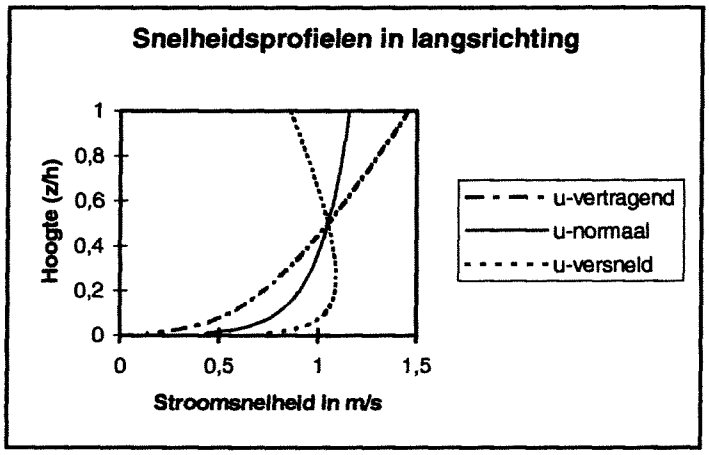


Figuur 8: Afwijking gefit profiel/model waarden

4.3.2 Secundaire stroming in langsrichting

De secundaire stroming in langsrichting is de afwijking van de stroomsnelheidsvertikaal ten opzichte van het theoretisch snelheidsprofiel bij eenparige stroming. Dit is van belang voor de vorming van drempels, omdat de secundaire stroming in langsrichting invloed heeft op de grootte van het sedimenttransport. Verandering van deze secundaire stroming in het drempelgebied zorgt voor een verandering van het sedimenttransport.

De secundaire stroming in langsrichting kan worden onderscheiden in een profiel met aan het wateroppervlak een te grote snelheid ten opzichte van het logaritmische profiel en een profiel met aan het wateroppervlak een te kleine snelheid voor het logaritmische profiel.



Figuur 9: Secundaire stroming in langsrichting

De secundaire stroming in langsrichting ontstaat voornamelijk door 3 oorzaken:

- Versnelling en vertraging
- Herverdeling van impulsie door secundaire stroming in dwarsrichting
- Verandering van de diepte

Hieronder zijn deze oorzaken kort uitgelegd.

Versnelling en vertraging

Bij een vertragende stroming, waarvan de vertraging wordt veroorzaakt door wrijving met de bodem, zal de bovenste laag harder stromen dan logaritmische evenwichtssnelheid in die situatie. Bij een versnellende stroming is dit precies omgekeerd. De stroming aan de bovenzijde zal hier te traag stromen ten opzichte van het logaritmische profiel. Dit is in Figuur 9 weergegeven.
De secundaire stroming in langsrichting als gevolg van een versnelling kan met de onderstaande formulering worden berekend.

$$u_s\left(\frac{z}{h}\right) = -h\frac{\partial \bar{u}_s}{\partial s}\frac{1}{\kappa^2} f_{b2}\left(\frac{z}{h},\alpha\right)$$

waarin:

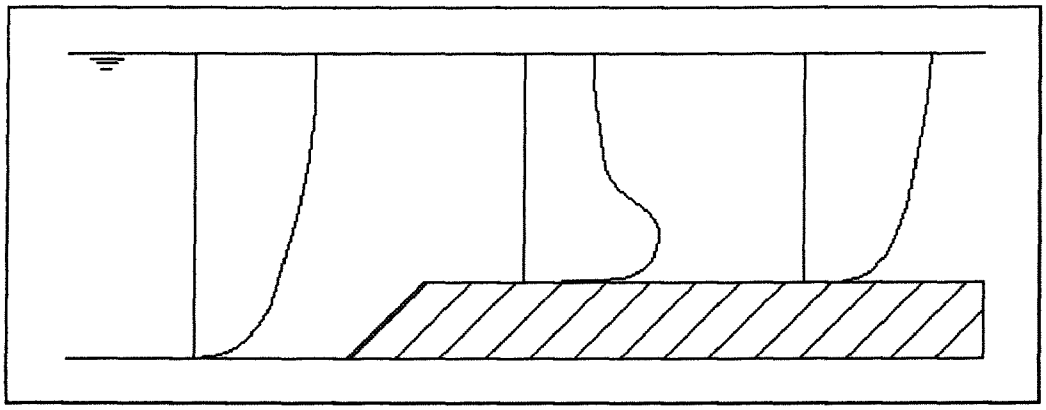
$u_s(z/h)$	secundaire stroomsnelheid [m/s]
$\frac{\partial \bar{u}_s}{\partial s}$	versnelling dieptegemiddelde stroming [m/s^2]
h	waterdiepte [m]
κ	Von Karman constante (0,4)

Meevoering van impulsie door secundaire stroming in dwarsrichting

Bij een scheve stroomsnelheidsverdeling in een geul, bijvoorbeeld bij een buitenbocht en een binnenbocht, kan het zijn, dat door de secundaire stroming in dwarsrichting, van het snel stromende deel, aan de onderzijde van de stroming, impulsie wordt meegenomen, naar het langzaam stromende deel. Hierdoor gaat de onderste laag van het langzaam stromende deel harder stromen. Het snelheidsprofiel van het langzaam stromende deel van de geul, zal zodanig zijn dat de stroming aan de onderzijde te hard stroomt ten opzichte van het logaritmische profiel. Voor het snelheidsprofiel van het snelstromende deel geldt precies het omgekeerde.

Verandering van diepte

Bij een snelle verandering van de diepte kan het zijn, dat de stroming aan de onderzijde lokaal versnelt (Zie Figuur 10). Dit is vooral het geval bij steile bodemhellingen, zoals bij plaatranden en diepe putten.



Figuur 10: Secundaire stroming in langsrichting door diepteverandering

Berekening van de secundaire stroming in langsrichting
Het toetsen van de modelresultaten op secundaire stroming in langsrichting is met de volgende aanpak gedaan:
Eerst wordt de richting en snelheid van de dieptegemiddelde stroming berekend.
Hieruit kan een logaritmische snelheidsverdeling worden berekend die de richting heeft van de dieptegemiddelde stroming. Ten opzichte van deze richting worden de snelheidsvectoren in de vertikaal ontbonden in de dieptegemiddelde richting.
Het verschil van de ontbonden componenten en het logaritmische profiel, is de secundaire stroming.

$$u_{verschil,i} = u\left(\frac{z_i}{h}\right) - u_i$$

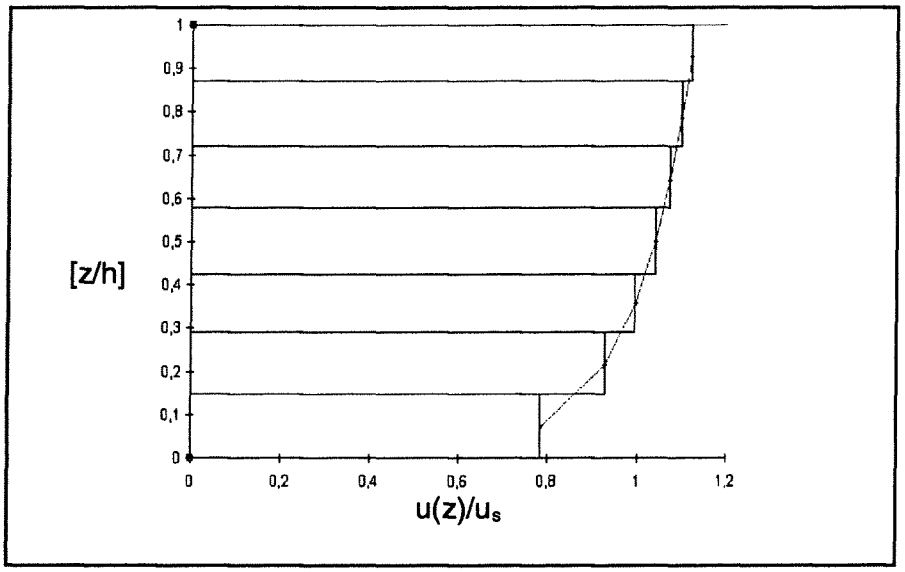
$$u\left(\frac{z}{h}\right) = \bar{u}\left(1 + \alpha + \alpha \ln\left(\frac{z}{h}\right)\right)$$

$$\alpha = \frac{n\sqrt{g}}{\kappa h^{1/6}}$$

waarin:
$u_{verschil,i}$ verschil logaritmische profiel op hoogte z_i en de langsstroming op hoogte z_i. [m/s]
$u(z/h)$ snelheid op hoogte z [m/s]
u_i langsstroming op hoogte z [m/s]
$\bar{u}$ dieptegemiddelde snelheid in langsrichting [m/s]
κ Von Karman constante [0.4]
n Manningwaarde [$m^{(1/3)}s$]
α wrijvingsparameter [-]
$\bar{u}$ dieptegemiddelde snelheid in langsrichting [m/s]

Door de verschilwaarden wordt, op dezelfde wijze als bij de secundaire stroming in dwarsrichting, een lijn gefit.

Naast de fout die wordt geïntroduceerd door het fitten, ontstaat een fout omdat het logaritmische profiel gediscretiseerd wordt. In Figuur 11 is dat het verschil tussen het gediscretiseerde oppervlak en het oppervlak dat door de logaritmische lijn wordt opgespannen. Deze fout is het grootst in de onderste laag, omdat hier de kromming het grootst is.



Figuur 11: Fout door discretisatie

De totale fout door discretisatie is als volgt berekend:

$$1-\sum_{i=1}^{7}\frac{1}{7}\left(1+\alpha+\alpha\ln\left(\frac{2i-1}{14}\right)\right)$$

en bedraagt 1,4% van het passerende debiet (α=0.12). Deze fout wordt verder verwaarloosd.

5. Sedimenttransport

Om het suspensietransport vanuit de waterbeweging te berekenen zijn verschillende formuleringen voorhanden met elk een eigen toepassingsgebied. Zij zijn meestal opgebouwd uit een formulering voor de snelheidsverticaal en een formulering voor de concentratieverdeling. Door vermenigvuldiging van deze twee verticalen wordt het transport berekend. Hier is gekozen voor een Rouse concentratieverdeling.
Naast het suspensietransport is er ook bodemtransport. Hier is de formulering van Van Rijn (1984a) voor gekozen.

Bij de berekening van het sedimenttransport zijn diverse aannamen en verwaarlozingen gedaan. De belangsrijkste aannames zijn hieronder opgesomd.

- Bodemhellingseffecten worden niet meegenomen, evenals directionele ruwheid.
- Het sediment is niet-cohesief en bestaat voornamelijk uit zand. Het aandeel slib is klein.
- Bestortingen, pleisterlagen veenbanken en dergelijke worden niet meegenomen in de transportberekening.
- De invloed van dichtheidsverschillen op de mechanismen die drempelvorming veroorzaken wordt niet meegenomen. Dit is een redelijke aanname, omdat de verandering van de saliniteit plaatsvindt over een traject van meer dan 10 kilometer. Hier wordt uitgegaan van de een vertikaal homogeen verdeelde dichtheid van 1018kg/m^3 .
- Er wordt gerekend met één korreldiameter in plaats van een korrelspectrum. De gebruikte korreldiameter is de d_{50} van het zand op de drempel van Valkenisse en bedraagt 180μm.

In paragraaf 5.1 wordt de berekening van het bodemtransport uitgelegd. Vervolgens wordt in paragraaf 5.2 de rekenwijze beschreven, voor het suspensietransport aan de hand van het Rouse concentratieprofiel. Paragraaf 5.3 betreft de werking van het naijleffect van het sedimenttransport.

5.1 Bodemtransport

Het bodemtransport is het transport direct aan de bodem van rollend, schuivend en springend sediment. Er wordt vanuit gegaan dat het bodemtransport niet naijlt.
Er is hier gekozen voor de formulering van Van Rijn (1984a). Deze formulering is gebaseerd op de bodemlaag dikte, de concentratie en de snelheid. De formulering luidt:

$$q_{b,c} = 0.1(s-1)^{0.5} g^{0.5} d_{50}^{1.5} D_*^{-0.3} T^{1.5} \qquad voor\ T > 3$$

$$s = \frac{\rho_s}{\rho_w}$$

$$D_* = d_{50}\left((s-1)\frac{g}{\nu^2}\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$C' = 18\log\left(\frac{12h}{3d_{90}}\right)$$

$$\tau'_b = \rho g\left(\bar{u}/C'\right)^2$$

$$\tau_{b,cr} = \theta_{cr}(\rho_s - \rho_w)gd_{50}$$

$$T = \frac{\left(\tau'_b - \tau_{b,cr}\right)}{\tau_{b,cr}}$$

waarin:

s	relatieve dichtheid [-]
ρ_s	soortelijke massa sediment [kg/m^3]
ρ_w	soortelijke massa estuariumwater [kg/m^3]
ν	kinematische viscositeit [m^2/s]
u	dieptegemiddelde snelheid [m/s]
g	gravitatie [m/s^2]
h	waterdiepte [m]
θ_{cr}	mobiliteit parameter (volgt uit Shields) [-]
C'	korrel gerelateerde Chezy parameter [m$^{1/2}$/s]
T	bodem gerelateerde schuifspanning parameter [-]
D_*	sediment parameter [-]
$\tau'_{b,c}$	effectieve bodemschuifspanning [N/m^2]
$\tau_{b,cr}$	kritieke bodemschuifspanning [N/m^2]
$q_{b,c}$	volumetrisch bodemtransport [m^2/s]

Voor de snelheid wordt de dieptegemiddelde waarde gebruikt, omdat de waarde aan de bodem enigszins fluctueert. Dit is het gevolg van het model, waardoor de waarde van het bodemtransport onbetrouwbaar wordt.

Deze formulering voor het bodemtransport wordt hier gebruikt bij de 2DH en 3D berekening van het sedimenttransport. Omdat de dieptegemiddelde stroming in beide gevallen gelijk is, varieert alleen de richting. De richting van het bodemtransport voor de 2DH berekening is gekozen als de richting van de dieptegemiddelde stroming. Voor de berekening met 7 lagen is gekozen voor de richting van de waterbeweging in de bodemlaag.

Deze berekening geldt voor T>3, maar wordt toch voor alle T waarden gebruikt. Hoewel de T varieert tussen 0-20, is in het drempelgebied de T veel groter dan 3. Op plaatsen waar T<3, wordt het bodemtransport met een factor 2 onderschat.

Het bodemtransport bedraagt minder dan 10% van het suspensietransport. In de berekening van het totaaltransport wordt het bodemtransport meegenomen, maar wordt verder niet toegelicht.

5.2 Suspensietransport met het Rouse concentratieprofiel

Het suspensietransport wordt berekend door een Rouse concentratieprofiel te vermenigvuldigen met een snelheidsprofiel. Om de verschillen tussen de 2D en 3D waterbeweging te kunnen aantonen wordt de volgende strategie gebruikt:
Allereerst wordt de Rouse concentratieverdeling berekend op basis van de dieptegemiddelde stroming. Met behulp van de dieptegemiddelde stroming wordt een logaritmische snelheidsverdeling gemaakt. Deze wordt gediscretiseerd in 7 lagen. Door deze aanpak zijn de resultaten te vergelijken met de 3D waterbeweging die ook in 7 lagen worden gegeven.
Door de gediscretiseerde logaritmische snelheidsvertikaal te vermenigvuldigen met de concentratieverdeling wordt het suspensietransport berekend voor de dieptegemiddelde stroming, waarbij dit transport als het 2D transport wordt aangenomen.
Het 3D suspensietransport wordt berekend door de Rouse concentratieverdeling te vermenigvuldigen met de werkelijk opgetreden snelheden in de verschillende lagen.

De Rouse concentratieverdeling

De Rouse verdeling is een concentratieverdeling over de vertikaal, waarbij wordt uitgegaan van een parabolisch verloop van de diffusiecoëfficiënt. De formulering is overgenomen uit Van Rijn (1993) en luidt:

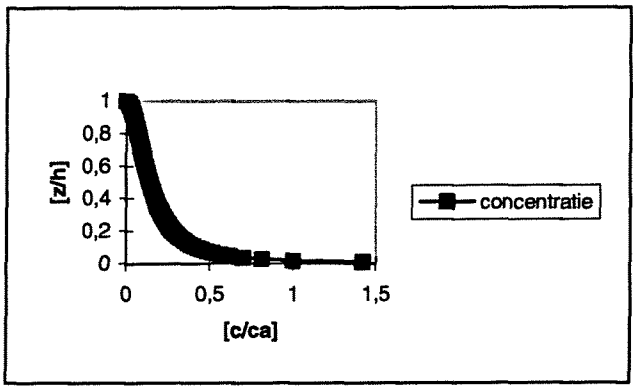
$$c(z) = c_a\left(\frac{h-z}{z}\cdot\frac{a}{h-a}\right)^Z$$

$$Z = \frac{w_s}{u_*\kappa\beta}$$

$$\beta = 1+\left(\frac{w_s}{u_*}\right)^2 \le 2$$

$$u_* = \frac{\sqrt{g}}{C}\bar{u}$$

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



Figuur 12: Rouse concentratieverdeling

waarin:

c(z)	concentratie op diepte z [kg/m^3]
c_a	referentieconcentratie op diepte a [kg/m^3]
h	waterdiepte [m]
a	diepte waarop de referentieconcentratie wordt opgegeven [m]
κ	Von Karman constante [-]
g	gravitatieversnelling [m/s^2]
C	Chezy waarde [m$^{1/2}$/s]
w_s	valsnelheid van d_{50} [m/s]
n	Manningwaarde van het model [m$^{1/3}$s]

Het suspensiegetal *Z* is een maat voor de 'volheid' van het concentratieprofiel. Bij een hoge waarde van *Z* hoort een concentratievertikaal, waarin het gesuspendeerde materiaal zich nabij de bodem bevindt. Bij een lage waarde van *Z* is het gesuspendeerde materiaal beter over de vertikaal verdeeld.
De maximum waarde die aan β wordt gesteld berust op een fysische beperking.
De referentieconcentratie is de concentratie op hoogte a, waarin a wordt gekozen als de helft van de gemiddelde bodemvorm hoogte. In dit geval is gekozen om voor alle punten de referentieconcentratie op te geven op 20cm boven de bodem. Dit is de helft van het gemiddelde van de bodemribbels. De referentieconcentratie wordt berekende met een formulering van Van Rijn (1984b). Deze luidt:

$$c(a) = 0.015\frac{d_{50}}{a}\frac{T^{1.5}}{D_*^{0.3}}$$

Vanuit de dieptegemiddelde waterbeweging wordt een logaritmische snelheidsverdeling berekend.

$$\bar{u} = \frac{1}{7}\sum_{i=1}^{7} u_i$$

$$\bar{v} = \frac{1}{7}\sum_{i=1}^{7} v_i$$

$$u_s = \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{g}n}{h^{1/6}\kappa}$$

$$u_s\left(\frac{z}{h}\right) = u_s\left(1 + \alpha + \alpha \ln\left(\frac{z}{h}\right)\right)$$

waarin:

κ	Von Karman constante (0.4) [-]
n	Manningwaarde [$m^{1/3}s$]
h	waterdiepte [m]
α	wrijvingsparameter [-]
u_s	dieptegemiddelde snelheid [m/s]
$u_s(z/h)$	snelheid op hoogte z [m/s]

Het 2DH suspensietransport volgt uit:

$$q_s = \frac{h_a}{7}\left[\sum_{i=1}^{7} c(\frac{z_i}{h})\, u_s(\frac{z_i}{h})\right]$$

waarin:

q_s	volumetrisch sedimenttransport in stroomlijnrichting [m^2/s]
$c(z/h)$	concentratie op basis dieptegemiddelde snelheid op hoogte (z/h) [kg/m^3]
u_s	snelheid volgens het logaritmische snelheidsprofiel op hoogte (z/h) [m/s]

en het 3D suspensietransport volgt uit:

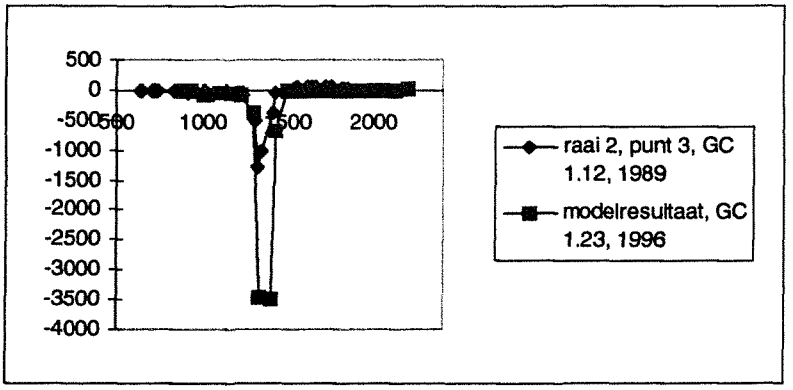
$$q_s = \frac{h}{7}\left[\sum_{i=1}^{7} c\left(\frac{z_i}{h}\right) u_s\left(\frac{z_i}{h}\right)\right]$$

$$q_n = \frac{h}{7}\left[\sum_{i=1}^{7} c\left(\frac{z_i}{h}\right) u_n\left(\frac{z_i}{h}\right)\right]$$

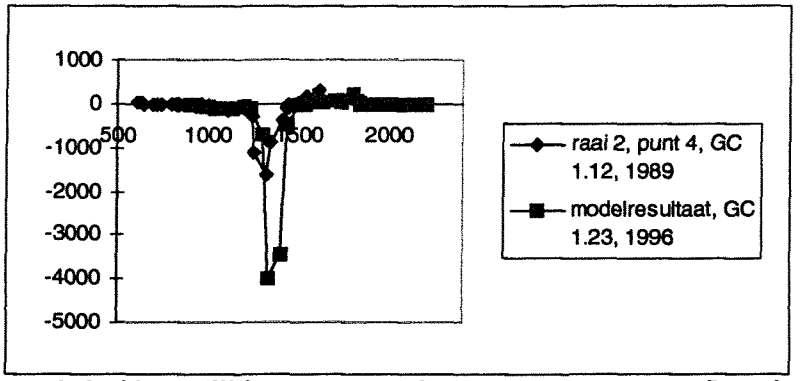
waarin:

q_s	volumetrisch sedimenttransport in stroomlijnrichting [m^2/s]
q_n	volumetrisch sedimenttransport in dwarsrichting [m^2/s]
u_s	opgetreden snelheid in laag i in stroomlijnrichting [m/s]
u_n	opgetreden dwarssnelheid in laag i [m/s]

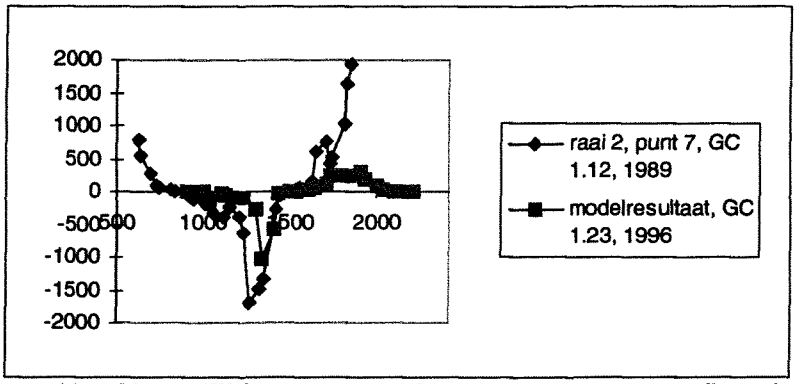
Van de gemodelleerde periode zijn er geen sedimenttransport gegevens. Daarom zijn de berekende waarden niet te verifiëren. Van enkel jaren eerder zijn er wel AZTM metingen (acoustische zandtransport meter) beschikbaar. In Figuur 13 zijn op verschillende punten in raai 2 en op een punt in raai 3 de berekende waarde vergeleken met de gemeten waarden. De positie van de meetpunten en de modelpunten komen met elkaar overeen. Ondanks de verschillende getijcoëfficiënten is deze bewerking uitgevoerd om de grootteorde van het sedimenttransport te kunnen vergelijken.



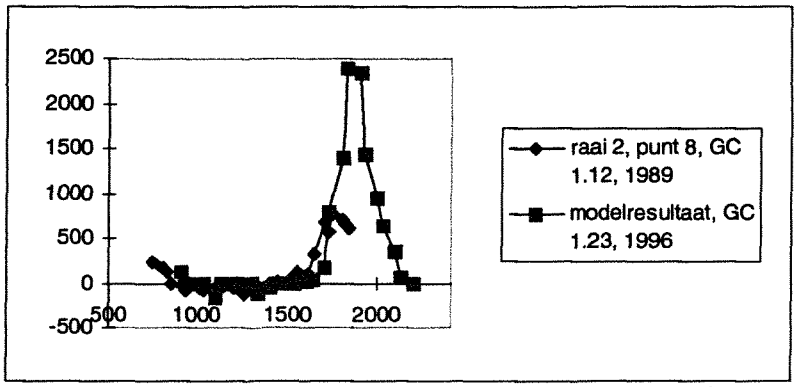
Figuur 13a: Vergelijking suspensietransport gemeten/berekend



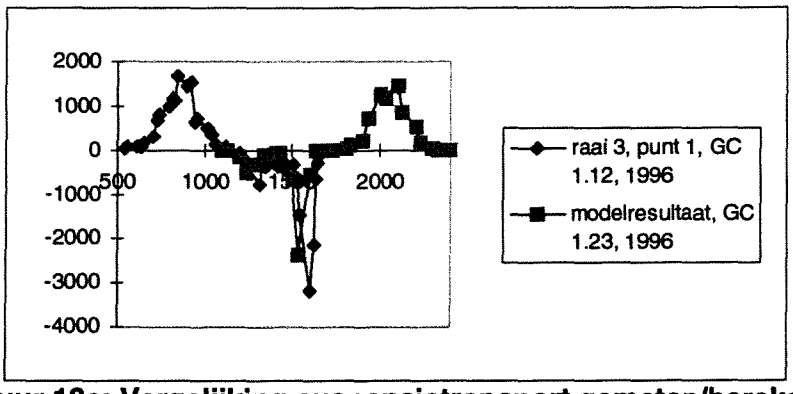
Figuur 13b: Vergelijking suspensietransport gemeten/berekend



Figuur 13c: Vergelijking suspensietransport gemeten/berekend



Figuur 13d: Vergelijking suspensietransport gemeten/berekend



Figuur 13e: Vergelijking suspensietransport gemeten/berekend

5.3 Suspensietransport met naijling

Het evenwichtstransport is een goede eerste aanzet in de berekening van het sedimenttransport. Echter de naijleffecten worden op deze wijze niet meegenomen. Op een eenvoudige wijze kan een schatting worden gemaakt van de naijleffecten.

Het suspensietransport werd in paragraaf 5.2 berekend door een evenwichtsconcentratieprofiel te vermenigvuldigen met een snelheidsprofiel. Dit concentratieprofiel is berekend aan de hand van een vormfunctie en een concentratie op een referentiehoogte. Door deze referentieconcentratie aan te passen aan de verandering van de concentratie in de tijd en in de afstand, wordt een eenvoudig naijleffect verkregen.

De gebruikte formulering luidt:

$$T_a = \gamma \frac{h}{w_s}$$

$$L_a = \gamma \frac{h\overline{u_s}}{w_s}$$

$$C(a) = C_e(a) - L_a \frac{\partial C(a)}{\partial s} - T_a \frac{\partial C(a)}{\partial t}$$

waarin:

T_a	tijdschaal aanpassing [s]
L_a	lengteschaal aanpassing [m]
γ	1/3; geschatte waarde [-]
h	diepte [m]
a	hoogte waarop de referentieconcentratie wordt gegeven [m]
w_s	valsnelheid sediment [m/s]
$\overline{u}$	dieptegemiddelde snelheid [m/s]
$C(a)$	gecorrigeerde concentratie op hoogt a [kg/m^3]
$C_e(a)$	evenwichtsconcentratie op hoogte a [kg/m^3]
$\frac{\partial C(a)}{\partial s}$	maat voor de verandering van de concentratie over de afstand [kg/m^4]
$\frac{\partial C(a)}{\partial t}$	maat voor de verandering van de concentratie in de tijd [kg/sm^3]

De afgeleide van de concentratie in de stroomlijnrichting wordt berekend met behulp van de centrale differentie methode. Door voor 15 meter verder in stroomrichting en 15 meter terug de concentratie te berekenen en het verschil dit te delen door de afstand, wordt de discrete afgeleide berekend. De maaswijdte bedraagt in het drempelgebied ongeveer 25m. De concentraties ten behoeve van de differentie worden geïnterpoleerd.

$$\frac{\partial C}{\partial s} \approx \frac{C_{s+15} - C_{s-15}}{30}$$

De lengteschaal waarop de concentratie zich aanpast is ongeveer 300m. De Δs is gekozen op 30m en is klein ten opzichte van de lengteschaal.
De discrete afgeleide van de concentratie in de tijd kan niet worden berekend. De tijdschaal waarop de concentratie zich aanpast (1000s), is korter dan de duur tussen twee tijdstappen van het model (1800s). Daarmee wordt de oplossing inconsistent.

$$\frac{\partial C}{\partial t} \approx \frac{\Delta C}{\Delta t} = \frac{C_t - C_{t-\Delta t}}{\Delta t}$$

5.4 Bodemverandering

Bodemverandering ontstaat door de verandering van het sedimenttransport over een traject. Dit volgt uit het behoud van massa over een volume-element. In formulevorm is dit:

$$\Delta h = \frac{1}{1-p}\left(\frac{\partial s_x}{\partial x} + \frac{\partial s_y}{\partial y}\right)\Delta t$$

waarin:

p	porositeit [-]; geschat op 0,4
$\frac{\partial s_x}{\partial x}$	verandering van het volumetrisch sedimenttransport over afstand dx [m^3/s]
$\frac{\partial s_y}{\partial y}$	verandering van het volumetrisch sedimenttransport over afstand dy [m^3/s]
Δh	verandering van de bodemhoogte na tijdsduur Δt [m]

Door voor opeenvolgende tijdstappen de bodemverandering te sommeren kan voor een korte periode de bodemverandering worden berekend. Dit is de initiële bodemverandering, wat inhoudt dat de waterbeweging en sedimenttransport voor de volgende tijdstap worden berekend met de oude bodemligging.

Aan de resultaten van de bodemverandering over een springtij, kan niet veel waarde worden gehecht. Toch geeft het inzicht in de aanzandingspatronen op de drempel.

6. Resultaten van de waterbewegingsmechanismen

6.1 Primaire waterbeweging

6.1.1 Divergentie

De divergentie/convergentie is berekend voor maximum ebstroomsnelheid en maximum vloedstroomsnelheid. Deze twee tijdstippen zijn gekozen, omdat op die momenten de sedimenttransportcapaciteit het grootst is. In de plots is de normaallijnkromming geschaald weergegeven ($\frac{\overline{uh}}{R_n}$ [m/s]). Dit geeft een duidelijk beeld waar divergentie en convergentie optreed. Door de schaling worden bijvoorbeeld kleine neren in het Verdronken land van Saeftinge onderdrukt. De plot van eb staat in Bijlage 7 en de plot van vloed staat in Bijlage 8. Blauw geeft aan dat de stroming divergeert, rood geeft aan dat het convergeert.

Divergentie op maximum ebstroomsnelheid.
Vanuit het vaarwater boven Bath waar de stroming vanwege de leidam zo goed als divergentieloos stroomt, komt deze bij de Drempel van Bath. Hier takt een deel van de stroming af naar de Schaar van de Noord. In dit gebied treedt divergentie op. In het Nauw van Bath convergeert de stroming. Vanaf de noordzijde van de Drempel van Valkenisse treedt over een groot gebied sterke divergentie op. Bij het uitstromen van de Schaar van de Noord op de drempel treedt lichte convergentie op.
In de plot treedt er sterke convergentie op aan de rand van de Plaat van Saeftinge. Dit is een plaatrand effect, waar het water van de plaat af stroomt het Nauw van Bath in.
Op het midden van de Drempel van Valkenisse is de stroming divergentieloos.
Ten zuiden van de drempel ligt de Overloop van Valkenisse. Een deel van het water op de drempel buigt naar dit diepere deel, wat in de figuur te zien is als convergentie.

Divergentie op maximum vloedstroomsnelheid
Bij maximum vloed stroomt het water vanuit de Overloop van Valkenisse richting de Drempel van Valkenisse. Nabij de drempel treedt er divergentie op. Dit is voor een deel het gevolg van het aftakken van een geul naar het Verdronken land van Saeftinge. Op de drempel zelf divergeert de stroming nauwelijks. In de Schaar van de Noord treedt een lichte divergentie op. De stroming verspreidt zich over de gehele Plaat van Saeftinge. Voorbij deze plaat, in het Vaarwater boven Bath, treedt een plaatrandeffect op. Hier convergeert de stroming plaatselijk sterk in de richting van de geul. De convergentie is het sterkst bij het einde van de Schaar van de Noord. Op de Drempel van Bath is de stroming licht convergent. Ten oosten van deze drempel, in de Appelzak is er nauwelijk convergentie, vanwege de geringe stroomsnelheden.

6.2 Secundaire waterbeweging

Om het relatieve belang van de invloed van Coriolis, stroomlijnkromming en overige effecten aan te tonen, worden de invloed van Coriolis en stroomlijnkromming berekend uit de 2DH-waterbeweging. Door het verschil te bepalen tussen de secundaire stroming die in het model optreedt en de berekende waarden, kan een maat worden gegeven voor sterkte van de overige mechanismen. In formulevorm:

$$D_{model} = D_{coriolis} + D_{stroomlijnkromming} + D_{resttermen}$$

6.2.1 Secundaire stroming in dwarsrichting

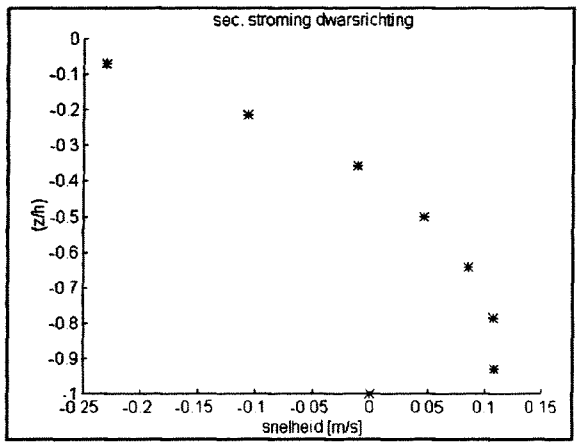
Maximum ebstroomsnelheid

De plot voor de secundaire stroming in dwarsrichting tijdens maximum ebstroomsnelheid is weergegeven in Bijlage 9. In de legenda staat de dwarssnelheid uitgezet aan het wateroppervlak. De positieve richting is voor de toplaag met de stroming mee naar links en voor de bodemlaag, met de stroming mee naar rechts (linksomdraaiende spiraal).

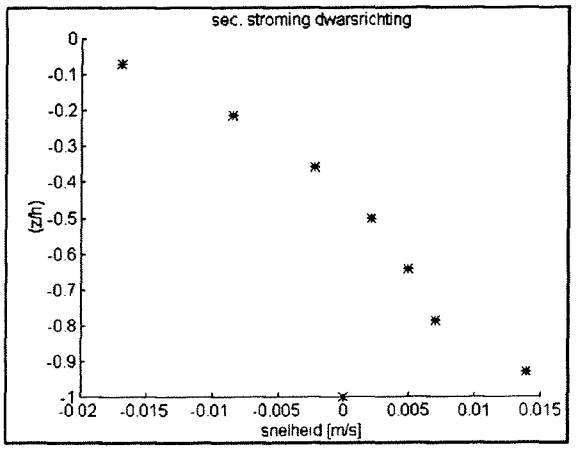
In het Vaarwater boven Bath nabij de leidam is er een kleine secundaire stroming. Dit is het gevolg van een bocht net buiten het beschouwde gebied, waarvan de secundaire stroming nog niet is gedempt. Op de Drempel van Bath is er weinig of geen secundaire stroming. Op de Plaat van Saeftinge is er ook nauwelijks secundaire stroming. In het Nauw van Bath treedt er een bijzonder sterke secundaire stroming op, waarbij uiteraard de stroming aan de onderzijde naar de binnenbocht wijst. Aan de noordzijde van de Drempel van Valkenisse is deze secundaire stroming nog steeds sterk. Dit neemt af op de Drempel van Valkenisse. Na de drempel wisselt de secundaire stroming van richting. Hier wordt de secundaire stroming veroorzaakt door de bocht in de Overloop van Valkenisse.
Wat hierbij opvalt is dat de secundaire stroming in dwarsrichting op de drempels gedurende maximum eb van richting wisselt. Om een voorbeeld te geven van de secundaire stroming in een punt op de overgang van het Nauw van Bath naar de Drempel van Valkenisse is in Figuur 14 een vertikaal gegeven.

De relatieve aandelen in de secundaire stroming door Coriolis, stroomlijnkromming en resttermen kunnen uit de figuren in Bijlage 10 tot Bijlage 12 worden opgemaakt. Hieruit blijkt dat het aandeel door Coriolis groot is. Het aandeel door stroomlijnkromming is vooral in het Nauw van Bath en de monding van de Schaar van de Noord aanwezig.
Het aandeel door de resttermen, waarin onder andere naijling en geometrie vertegenwoordigd zijn, is in de zelfde grootteorde als de eerdere termen. De grootste waarden worden bereikt in het Nauw van Bath en als plaatrandeffect tussen de Plaat van Saeftinge en de Drempel van Valkenisse. Dit geeft aan dat er meer mechanismen meespelen.

De standaardafwijking is een maat voor de betrouwbaarheid van de fit. Hieruit blijkt dat de fit minder nauwkeurig is in het Nauw van Bath. (Zie Bijlage 13). Op de plaatrand tussen de Schaar van de Noord en de Drempel van Valkenisse is ook een afname van de betrouwbaarheid. Dit heeft waarschijnlijk te maken met de plaatrand. Op de Drempel van Valkenisse is de fit redelijk.



Figuur 14: Dwarsstroming eb [m/s]



Figuur 15: Dwarsstroming vloed [m/s]

Maximum vloedstroomsnelheid
De secundaire stroming in dwarsrichting op het moment van maximum vloedstroomsnelheid wordt weergegeven in de plot in Bijlage 14.
Vanuit de Overloop van Valkenisse is er in het hele drempelgebied een lichte secundaire stroming waarvan de laag aan de bodem gericht is naar de Drempel van Valkenisse. Nabij de aftakking van de Schaar van de Noord neemt de secundaire stroming af tot nul. Ook voorbij de Drempel van Valkenisse is de secundaire stroming gering. Aan de oostrand van de Plaat van Saeftinge is een plaatrand effect te zien. De stroming vanaf het Nauw van Bath stroomt onder de stroming vanaf de Plaat van Saeftinge door. Ruimtelijk is dit ook secundaire stroming. Op de Drempel van Bath is deze secundaire stroming afgenomen tot een derde van het plaatrand effect. Ten opzichte van de secundaire stroming met eb is de grootte hiervan beperkt. In Figuur 15 is een punt gegeven aan de benedenstroomse zijde van de drempel.

De secundaire stroming in dwarsrichting wordt ook tijdens vloed voor het grootste deel veroorzaakt door Coriolis. Dit aandeel is sterker dan tijdens de maximum ebstroom, omdat de waterdiepte groter is. Deze term heeft op de drempel een aandeel van 0,12 m/s. De stroomlijnkromming is in de Overloop van Valkenisse met ongeveer 0,05 m/s aanwezig en in het Nauw van Bath is deze bijzonder sterk aanwezig. In het Nauw van Bath heffen de invloed van Coriolis en van de stroomlijnkromming elkaar op. De invloed van de stroomlijnkromming nabij de rand van de Plaat van Saeftinge is ook zichtbaar. De resttermen zorgen voor een aandeel van maximaal 0,05 m/s en zijn daarmee veel kleiner dan gedurende eb.

De standaardafwijking van de gemodelleerde dwarssnelheden met het theoretische profiel laat zien, dat het fitten tijdens vloed redelijk verloopt. Alleen nabij Bath neemt de betrouwbaarheid enigszins af (Zie Bijlage 18).

6.2.2 Secundaire stroming in langsrichting

De secundaire stroming in langsrichting door de verandering van de snelheid kan worden berekend met de onderstaande formulering.

$$u_s\left(\frac{z}{h}\right) = -h\frac{\partial \bar{u}_s}{\partial s}\frac{1}{\kappa^2} f_{b2}\left(\frac{z}{h}, \alpha\right)$$

Door een ruwe aanname te doen voor de parameters blijkt dat deze weinig invloed heeft op het secundaire snelheidsprofiel in langsrichting.

Stel:

$$\frac{\partial \overline{u_s}}{\partial s} \approx \frac{\Delta \overline{u_s}}{\Delta s} = \frac{0.2}{1000} = 2 \cdot 10^{-4}$$

$$h = 20$$

$$f_{b2} = 1$$

$$\kappa = 0.4$$

dan volgt voor de secundaire snelheid:

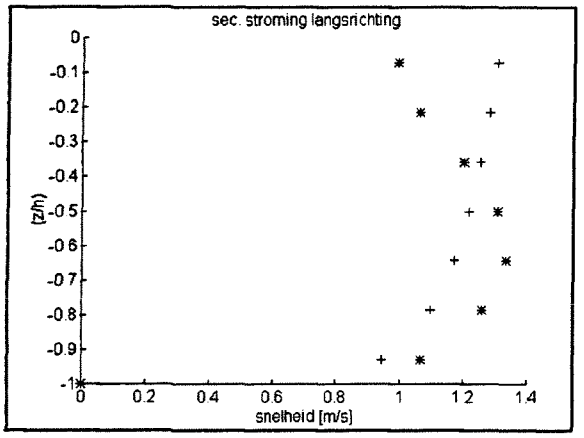
$\overline{u_s} = 0.026$ [m/s]

In vergelijk met de opgetrede secundaire stroming in langsrichting is dit weinig.

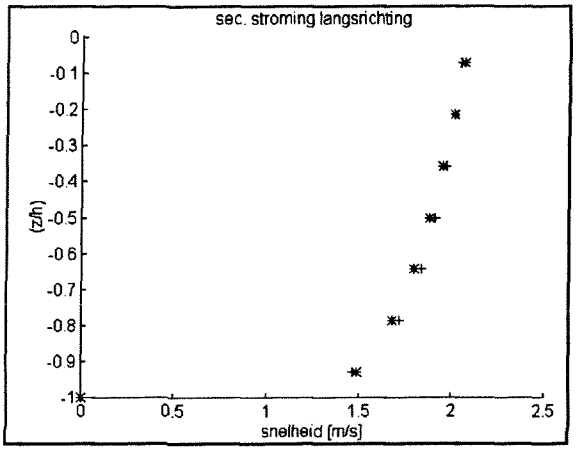
Maximum ebstroomsnelheid
De secundaire stroming in langsrichting tijdens maximum ebstroomsnelheid wordt weergegeven in Bijlage 19. In de legenda staat de snelheid uitgezet die bij de snelheid aan

het wateroppervlak moet worden opgeteld om de werkelijke snelheid te krijgen. Bij de bodem moet deze snelheid er vanaf worden getrokken.
Vanuit het Vaarwater boven Bath heeft de toplaag van stroming een snelheid die iets te groot is ten opzichte van het evenwichtsprofiel. Deze secundaire stroming dempt iets uit op de Drempel van Bath, maar neemt fors toe bij het ingaan van de bocht in het Nauw van Bath. Deze toename is waarschijnlijk toe te schrijven aan potentiaal effecten.
Midden in de bocht is de stroming weer in evenwicht.
Aan het uiteinde van het Nauw van Bath, waar de diepte begint af te nemen, tot op de Drempel van Valkenisse, is de secundaire stroming in langsrichting zodanig dat de stroomsnelheid aan de bodem te hoog is ten opzichte van het evenwichtsprofiel. Deze secundaire stroming is zelfs iets groter dan de secundaire stroming in dwarsrichting op die plaats op het zelfde tijdstip. In Figuur 16 is voor een punt aan de benedenstroomse zijde van de drempel het logaritmisch snelheidsprofiel uitgezet (plusjes). Tevens staat hierin de langscomponent uitgezet (sterretjes). Om de vertikale as staat het verschil tussen beide.

De betrouwbaarheid van de fit tijdens eb is redelijk (Zie Bijlage 21), behalve op de plaatrand van de Plaat van Saeftinge en het Nauw van Bath. Tevens is de fit minder betrouwbaar op de overgang van het Nauw van Bath naar de Drempel van Valkenisse.



Figuur 16: Langsstroming eb



Figuur 17: Langsstroming vloed

Maximum vloedstroomsnelheid
Tijdens maximum vloed is de secundaire stroming in langsrichting gering. Op de Drempel van Valkenisse is de stroming aan de bodem 10cm/s te traag ten opzichte van het evenwichtssnelheidsprofiel. Ook hier is aan de oostzijde van de Plaat van Saeftinge de plaatrandeffect duidelijk zichtbaar. Deze blijft echter beperkt tot de directe omgeving van de rand. Op de Drempel van Bath is geen secundaire stroming in langsrichting. In Figuur 17 is een punt gegeven aan de benedenstroomse zijde van de drempel.

Tijdens vloed is de betrouwbaarheid van de fit redelijk (Zie Bijlage 22). Op plaatsen waar de diepte snel verandert, is de fit minder betrouwbaar, daar is de standaardafwijking groter.

7. Resultaten van de sedimenttransportberekeningen

7.1 Resultaten van het sedimenttransport met het Rouse concentratieprofiel

Voor alle tijdstippen is het sedimenttransport berekend. Hier wordt alleen het sedimenttransport gegeven op de maximale ebsnelheid en de maximale vloedsnelheid. De transporten zijn gegeven in kg/s/m.

Maximum stroomsnelheid eb

Transport door logaritmische snelheidsvertikaal

De grootste transporten treden op in de Schaar van de Noord (Zie Bijlage 23). Hier treedt vanwege het kortsluiteffect een hoge stroomsnelheid op. Nabij de Drempel van Valkenisse treedt het grootste transport op naast de drempel in het verlengde van de buitenbocht. Op de Drempel zelf treden transporten op tussen 0,5-1 kg/s/m. Ook hier komen de berekende waarden redelijk overeen met de gemeten waarden.

Transport door secundaire dwarsstroming

Door de secundaire stroming in dwarsrichting wordt tot 0,1 kg/m/s sediment getransporteerd in de richting van de drempel (Zie Bijlage 25). Vooraan op de drempel is dit transport maximaal. Midden op de drempel is het transport door deze secundaire dwarsstroming nul. Voorbij de drempel blijft het transport door de secundaire dwarsstroming gering tot aan de bocht in de Overloop van Valkenisse. Hier wordt sediment naar de binnenbocht getransporteerd.

Transport door secundaire langsstroming

Door de secundaire stroming in langsrichting wordt vanuit de binnenbocht van het Nauw van Bath tot 0,1 kg/s/m getransporteerd (Zie Bijlage 27). Deze stroomlijnen lopen over de Drempel van Bath. In het traject vanaf de bocht tot midden op de drempel neemt het transport af van 0,1 kg/s/m tot bijna -0,07 kg/s/m.
In het verlengde van de bocht, langs de drempel, wordt door een vertragend profiel tot 0,15 kg/m/s "te weinig" getransporteerd.

Maximum stroomsnelheid vloed

Transport door logaritmische snelheidsvertikaal

De grootste transporten treden op in de buitenbocht van de Overloop van Valkenisse (Zie Bijlage 24). De waarde van 18 kg/s/m is misschien niet reëel vanwege naijling. De grootte van het transport op de Drempel van Valkenisse komt overeen met de gemeten waarde (tot circa 3kg/s/m). In het Schaar van de Noord treedt vanwege de hoge stroomsnelheid ook een fors transport op.

Transport door secundaire dwarsstroming

Dit transport vindt hoofdzakelijk plaats aan de rand van de Overloop van Valkenisse (Zie Bijlage 26). Het transport is 0,6 kg/m/s aan het begin van de drempel. Midden op de drempel bedraag het transport door de secundaire dwarsstroom 0,2 kg/m/s. Na de drempel is het nihil. Het transport is naar de binnenbocht gericht. In de Schaar van de Noord vindt ook transport plaats van 0,3 kg/m/s en is naar het Land van Saeftinge gericht. Met name aan het eind van de schaar waar de stroming naar het Vaarwater boven Bath buigt.

Transport door secundaire langsstroming

Door de secundaire stroming in langsrichting wordt in de Overloop van Valkenisse 0,1 kg/m/s getransporteerd (Zie Bijlage 28). In het diepe deel dat daar aanwezig is, is transport door de secundaire stroming sterk. In het trajekt van de benedenstroomse zijde naar het midden van de drempel, neemt het transport door de secundaire stroming in langsrichting

toe, in het trajekt van de het midden van de drempel naar de Schaar van de Noord neemt het transport af. Dit verschil is in vergelijk met het totale transport ter plaatse (4kg/m/s) nihil.

7.2 Restpatronen van het sedimenttransport

De restpatronen geven aan waarheen het netto sedimenttransport is gericht, gedurende een springtij. Zie Bijlage 29. Hieruit blijkt dat de Drempel van Valkenisse aanzandt. Dit volgt uit de afname van de grootte van het resttransport. Midden op de Drempel van Valkenisse is geen netto sedimenttransport. Het resttransportpatroon veroorzaakt door de primaire stroming geeft in de Overloop van Valkenisse een vloed gedomineerd transport en in het Nauw van Bath een eb gedomineerd transport.

Het resttransportpatroon veroorzaakt door de secundaire stroming in dwarsrichting geeft een transport naar de drempel gericht. Zie Bijlage 30. Dit resttransport is ongeveer de helft van het resttransport door de primaire stroming.

Het resttransportpatroon veroorzaakt door de secundaire stroming in langsrichting geeft een gering transport naar de drempel gericht. Zie Bijlage 31.Dit resttransport heeft een aandeel van 10% in de aanzanding van de drempel. Opmerkelijk is het patroon naast de drempel. Deze wijst op een tegengesteld transport in de eb- en vloed gedomineerde geulen. Dit is te verklaren uit het vertragende snelheidsprofiel, waardoor er ten opzichte van het logaritmische snelheidsprofiel minder sediment wordt getransporteerd.

7.3 Resultaten van het sedimenttransport met naijling

De resultaten van het sedimenttransport met naijling zijn nagenoeg identiek aan die zonder naijling. Om een voorbeeld te geven van de grootste naijlterm is in Bijlage 32 de concentratie aan de bodem weergegeven op maximum vloed en in Bijlage 33 de correctie op de concentratie nabij de bodem voor de naijling.
Vooral in de Schaar van de Noord is te zien dat de concentratie aan de bodem wordt onderdrukt bij het instromen van de Schaar van de Noord. Bij het uitstromen van de Schaar van de Noord wordt de concentratie hoger aangehouden, waardoor het berekende transport daar groter is dan zonder de correctie voor de naijling.
In de Overloop van Valkenisse zitten enkele punten die minder betrouwbaar zijn. Dit komt door een combinatie van grote snelheid en grote diepte. Hierdoor is de lengteschaal voor de aanpassing groot, waardoor de correctieterm in de zelfde orde van grootte komt als de concentratie zelf.
In de situaties waarbij de stroomsnelheid minder groot is, is de naijlterm in maximaal 10% van de concentratie aan de bodem zonder naijling. In het voorbeeld is de naijlterm extreem groot.
Op de Drempel van Valkenisse is er nauwelijks sprake van naijling.

7.4 Resultaten van de bodemverandering

De bodemverandering is alleen berekend voor sedimenttransport zonder naijling (Zie Bijlage 34). De duur waarover deze bodemverandering plaatsvond, was een springtij.
De patronen van aanzanding en erosie komen redelijk overeen met de patronen die uit de bodemhoogteverschilkaart (Bijlage 35) volgen. Hieruit blijkt dat de Drempel van Valkenisse circa 2cm aanzandt. De aansluitende geulen eroderen. In de Overloop van Valkenisse zijn twee punten die sterk eroderen en aanzanden. Deze komen in werkelijkheid ook voor, maar fluctueren minder sterk. De bodemverandering in de Schaar van de Noord komt ook terug in de bodemhoogteverschilkaart.

De patronen van aanzanding en erosie zijn hiermee herkenbaar. De bodemverandering die is gebaseerd op 1 springtij mag niet direct worden doorgetrokken naar langetermijn morfologische veranderingen. Het zou te voorbarig zijn omdat tijdens een doodtij een andere waterbeweging optreedt. Extrapoleren van deze gegevens mag dus niet worden gedaan.

8. Synthese

In de voorgaande hoofdstukken zijn van verschillende waterbewegingsmechanismen de intensiteit berekend en is hun invloed op het sedimenttransport bepaald. In dit hoofdstuk is uitgewerkt hoe deze bijdragen aan de vorming van drempels.

De tijdschaal waarop drempels zich aanpassen aan hun omgeving is veel korter dan de tijdschaal waarop geulen migreren. Dit volgt uit de bodemhoogteverschilkaart van 1993-1996 (Zie Bijlage 35) In de tussenliggende periode is 6 miljoen m^3 van de Drempel van Valkenisse gebaggerd, maar de aansluitende geulen nagenoeg even diep zijn gebleven.

Drempels worden gevormd door de verandering van het sedimenttransport in het drempelgebied. Deze verandering van het sedimenttransport is vrijwel volledig afhankelijk van de waterbeweging. Om inzicht te verkrijgen in de waterbeweging is deze gesplitst in een primaire en een secundaire stroming. De invloed van deze primaire en secundaire stromingen op het sedimenttransport zijn eveneens berekend. Hiermee zijn resttransporten bepaald waaruit de aanzanding van de drempel over die periode te berekenen is.

Uit deze resttransporten blijkt dat de Drempel van Valkenisse voor 60% aanzandt door de invloed van de primaire waterbeweging. Dit komt door de afname van de snelheid over het drempelgebied, wat een gevolg is van divergentie. Deze afname van de snelheid is zeer beperkt, maar omdat het sedimenttransport tot de 3^e macht gerelateerd is aan de stroomsnelheid, werkt deze afname sterk door in het sedimenttransport.

De Drempel van Valkenisse zandt voor 30% aan door de secundaire stroming in dwarsrichting. Dit komt doordat de secundaire waterbeweging in dwarsrichting sediment meevoert naar een deel van de doorsnede waar er minder sedimenttransportcapaciteit is. Deze secundaire stroming in dwarsrichting is op de Drempel van Valkenisse voor een groot deel bepaald door de invloed van Coriolis. Deze zorgt ervoor dat er zowel bij eb als bij vloed een netto transport naar de drempel is gericht. De invloed van stroomlijnkromming is op de Drempel van Valkenisse verwaarloosbaar, omdat de stroomlijnen op de Drempel van Valkenisse nauwelijks zijn gekromd en omdat de demping van de secundaire stroming die is opgewekt in de bochten op deze afstand groot is. De relaxatielengte bedraagt ongeveer 400m, waardoor er theoretisch 6% van de secundaire stroming van de voorliggende bocht op de drempel over is.
De restterm is in de zelfde grootteorde als de Coriolis term. Deze restterm komt vooral voor op plaatsen met een sterke verandering van de geometrie, dat wil zeggen met name bij de rand van de Plaat van Saeftinge en de overgang naar het diepe deel van de buitenbocht van de Overloop van Valkenisse.

De secundaire stroming in langsrichting zorgt voor een bijdrage van 10% in de aanzanding van de Drempel van Valkenisse. Deze ontstaat door meevoering van impulsie van een sneller stromend deel via de laag aan de bodem naar de drempel. Hierdoor ontstaat ten opzichte van de het logaritmische snelheidsprofiel een toename van de snelheid aan de bodem, waardoor de sedimenttransportcapaciteit groter is dan op basis van de dieptegemiddelde gegevens zal worden verwacht.
Eventuele versnelling en vertraging van de stroming heeft rond de drempel nauwelijks invloed op de secundaire stroming in langsrichting, evenmin als de geometrie.

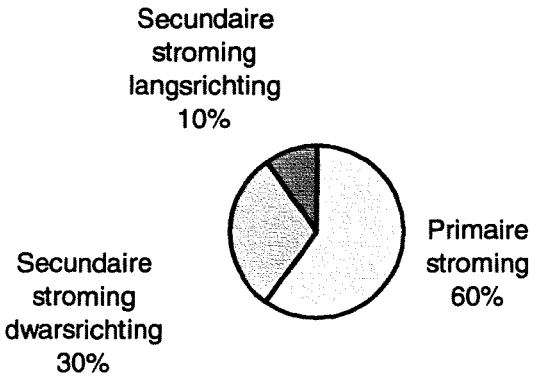
Naijlingseffecten hebben volgens de vereenvoudigde benadering een kleine invloed op het sedimenttransport. Deze heeft een dempende werking op de grootte van het sedimenttransport. Naijling is voornamelijk aanwezig op plaatsen waar de stroomsnelheid over een korte afstand veranderd, zoals in de Schaar van de Noord.

Bodemhellingseffecten zijn niet meegenomen in de berekening van het sedimenttransport. Dit zou eigenlijk wel moeten worden meegenomen. Hierdoor zal de aanzanding in de binnenbocht van de Overloop van Valkenisse en het Nauw van Bath minder sterk zijn. Het effect voor de Drempel van Valkenisse zal beperkt zijn, omdat deze relatief vlak is.

9. Conclusies

Drempels ontstaan door verandering van het sedimenttransport in het traject over de drempel. De veranderingen in het sedimenttransport ontstaan door veranderingen van de waterbeweging en geometrie.

Uit dit onderzoek naar de fysische mechanismen die bijdragen aan drempelvorming op de Drempel van Valkenisse zijn de volgende mechanismen belangrijk gebleken:



- De hoofdoorzaak van het ontstaan van drempels is de vertraging van de stroming in het drempelgebied. Deze vertraging komt voort uit het divergeren van de stroming.

- Een tweede reden voor aanzanding is de secundaire stroming in dwarsrichting. Deze geeft een richting aan het sedimenttransport, die vrijwel altijd naar de drempel gericht is. In het traject dat de stroming aflegt over de drempel neemt de secundaire stroming in dwarsrichting af, met aanzanding tot gevolg.

- Een derde reden voor aanzanding is de secundaire stroming in langsrichting. Deze geeft ten opzichte van het sedimenttransport dat volgt uit een evenwichtssnelheidsprofiel, een toe- of afname. Voornamelijk tijdens eb, is in het traject over de drempel een afname van de secundaire stroming in langsrichting. Dit zorgt voor extra aanzanding. Echter naast de drempel is het effect van de secundaire stroming in langsrichting veel sterker, maar deze draagt niet bij aan de vorming van de drempel.

Bij dit onderzoek moeten de volgende kanttekeningen worden geplaatst:

- Het hele onderzoek is gefundeerd op modelresultaten die redelijk overeenkomen met de werkelijkheid. Deze modelresultaten zijn beter te gebruiken dan de metingen, omdat deze op elk tijdstip en op elke plaats berekend zijn.

- De gebruikte gegevens zijn van 1 springtij en dus niet representatief voor een volledige doodtij-springtijcyclus.

10. Aanbevelingen

In dit afstudeerwerk zijn veel vragen onbeantwoord gebleven. Voor eventuele nauwkeurigere berekeningen worden hier enkele ideeën aangedragen.

- Dit onderzoek is gebaseerd op één springtij. Omdat de drempel een dynamisch evenwicht is tussen de uitersten die de waterbeweging opleggen in een doodtij-springtijcyclus, is het nuttig om dit zelfde onderzoek te doen voor doodtij modelresultaten. Eventueel ook voor een gemiddeld getij.
- De waterbeweging is in vertikale richting opgedeeld in 7 lagen. Dit is misschien wat weinig voor de diepe delen. Het is een idee om het aantal lagen op te verdubbelen of te verdrievoudigen. Hiermee zijn de secundaire waterbewegingen ook nauwkeuriger te berekenen. Het grote nadeel hiervan is de benodigde rekencapaciteit/dataopslag.
- Er zou een vergelijk kunnen worden gemaakt tussen drempels die in evenwicht zijn en drempels die uit evenwicht (verdiept) zijn.
- Bij de sedimenttransportberekening worden forse aannames gedaan. Om dit betrouwbaarder te maken worden de volgende ideeën aangedragen.
    * Bodemhellingseffecten meenemen in het sedimenttransport
    * Meer tijdstappen dan halfuur gegevens voor de berekening van de bodemverandering
    * Invloed onderzoeken van pleisterlagen/biologische afpleistering. Dit is waarschijnlijk nuttig, omdat de bochten zoals het Nauw van Bath en de Overloop van Valkenisse zijn beschermd tegen erosie. Hierdoor kan in deze gebieden geen sediment in suspensie worden gebracht. Hierdoor wordt de intensiteit van het transport afgevlakt.
    * De naijlingseffecten met een betere methode berekenen. De methode die hier is gebruikt is ruw. Een betere methode om naijling te implementeren is het sedimenttransport op basis van advectie-diffusie. Dit vergt echter meer rekencapaciteit en een ander model systeem.
    * De invloed onderzoeken van andere korreldiameters. Hier is alleen gerekend met één korreldiameter. De invloed van een geringe afwijking van de korrelgrootte zal beperkt zijn. Het gedrag van een spectrum van korrelgroottes kan echter geheel andere resultaten opleveren.

11. Literatuurlijst

Dekker, L., 1993, *Scaldis: Modeloriëntatie, randvoorwaarden, beginvoorwaarden en metingen.* Memo. Rijkswaterstaat Directie Zeeland,

Goede, E.D. De en J.A.Th.M van Kester, 1995, *Het inbouwen van een operationeel k-ε turbulentiemodel in TRIWAQ.* Rapportnummer Z844.50 Waterloopkundig Laboratorium (WL).

Groenewoud, M.D., 1997, *Modellering morfodynamisch gedrag van de Drempel van Hansweert. Fase 1 Modelbouw en simulatie huidige situatie,* TU Delft, Faculteit der Civiele Techniek, Vakgroep waterbouwkunde.

Groenewoud, M.D. en Tank, F.T.G., 1997, *Modellering morfodynamisch gedrag van de Drempel van Hansweert. Fase 2: Alternatieven voor baggerwerk,* TU Delft, Faculteit der Civiele Techniek, Vakgroep Waterbouwkunde.

Jansen, M.H.P., 1997, *Bouw en validatie TRISCAL, rapportage activiteit B,* projectnummer 97420/1011, Ingenieursbureau Svašek B.V.

Jansen, M.H.P., 1998, *Validatie TRISCAL en aanzet sedimenttransport, rapportage activiteit C,* projectnummer 97420/1011, Ingenieursbureau Svašek B.V.

Mol, G., 1997, *De toestand van de Westerschelde,* Rijksinstituut voor Kust en Zee.

Rijn, L.C. Van, 1993, *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas.*

Tank, F.T.G., 1997a, *Het gedrag van drempels in de Westerschelde. Beschrijving en analyse van metingen van de waterbeweging op en rondom de Drempel van Hansweert,* Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, IMAU R 97-01

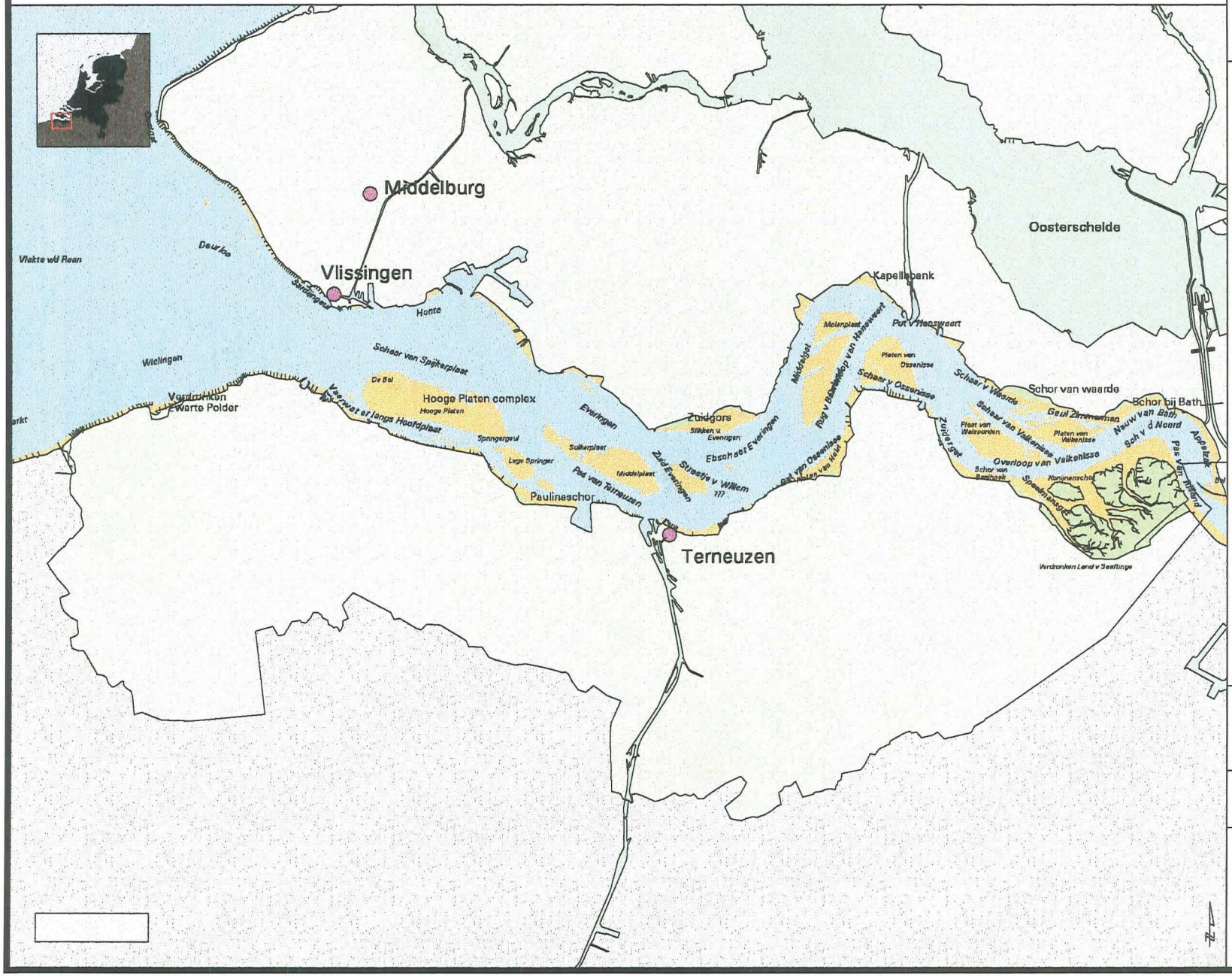
Tank, F.T.G., 1997b, *Het gedrag van drempels in de Westerschelde. Beschrijving en analyse van zandtransportmetingen op en rondom de Drempel van Hansweert,* Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, IMAU R 97-08

Tank, F.T.G., 1997c, *Het gedrag van drempels in de Westerschelde. Beschrijving en analyse van metingen van de morfologie op en rondom de Drempel van Hansweert.* Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, IMAU R 97-09

Verbeek, H. Tank, F.T.G., Groenewoud, M.D., 1998, *Drempels in de Westerschelde, natuur en mens samen aan het werk,* RIKZ conceptrapport.

Vriend, H.J. de, 1976, *A mathematical model of steady flow in curved shallow channals,* Journal of Hydraulic Research, 15.

Namen van geulen, platen, schorren etc.



Gebruik
Westerschelde -
totale gebied

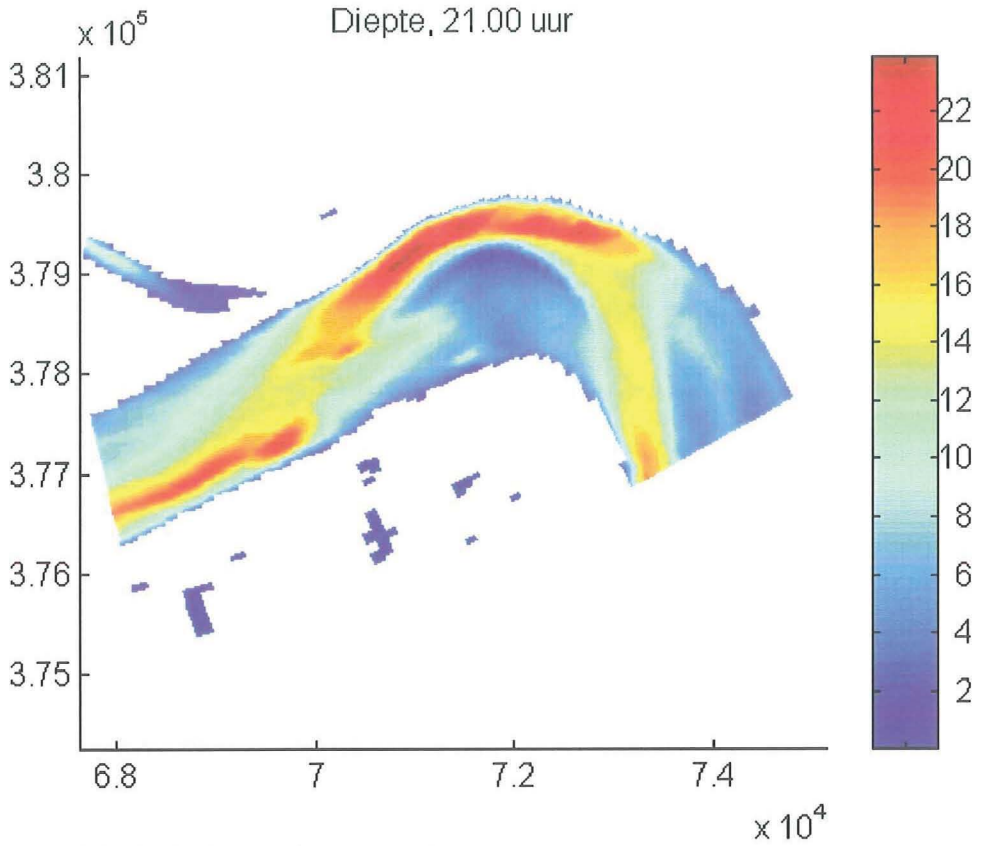
Legenda

- lager dan NAP -2m
- hoger dan NAP -2m

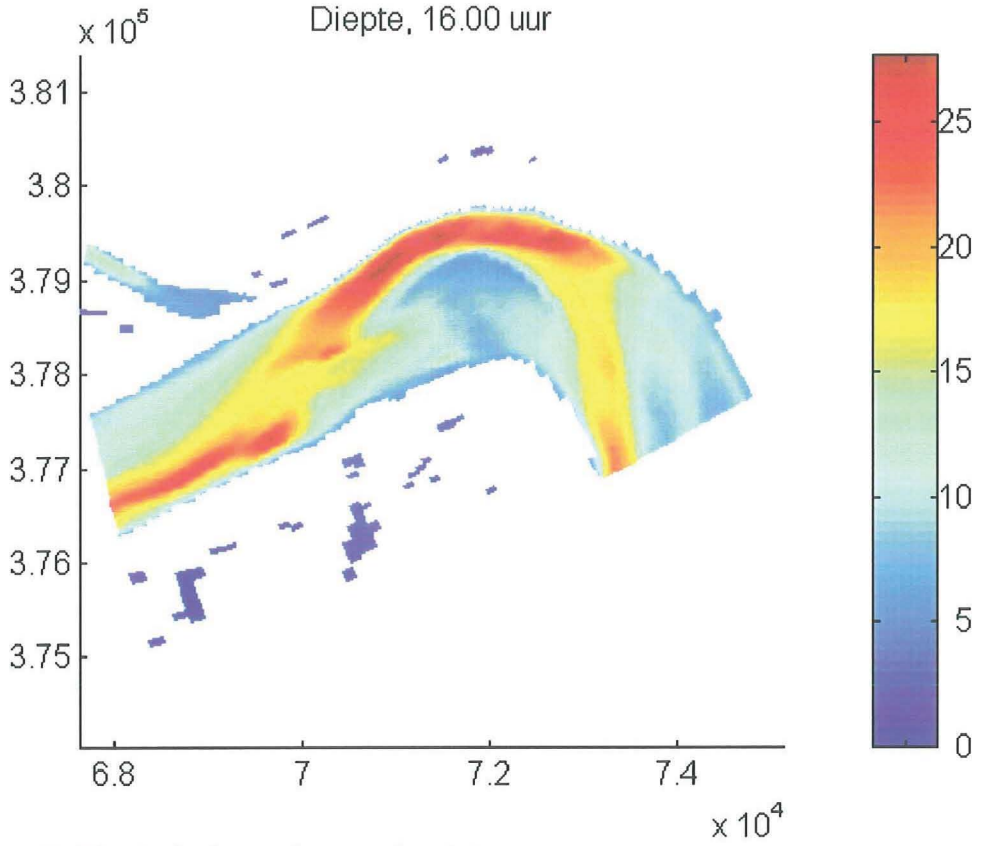
Datum: 27-JAN-1998

0 5 10 km

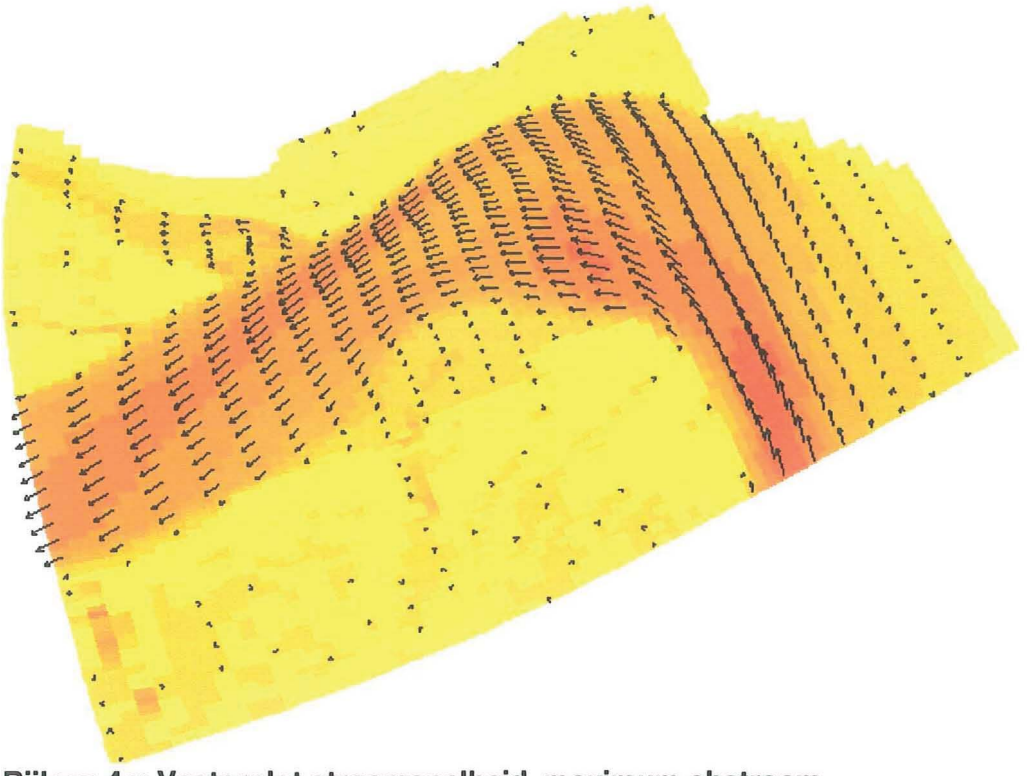
H.T. de Haan
Ministerie van Verkeer en Waterstaat
Rijksinstituut voor Kust en Zee / RIKZ Middelburg



Bijlage 2: Diepte [m], maximum ebstroom

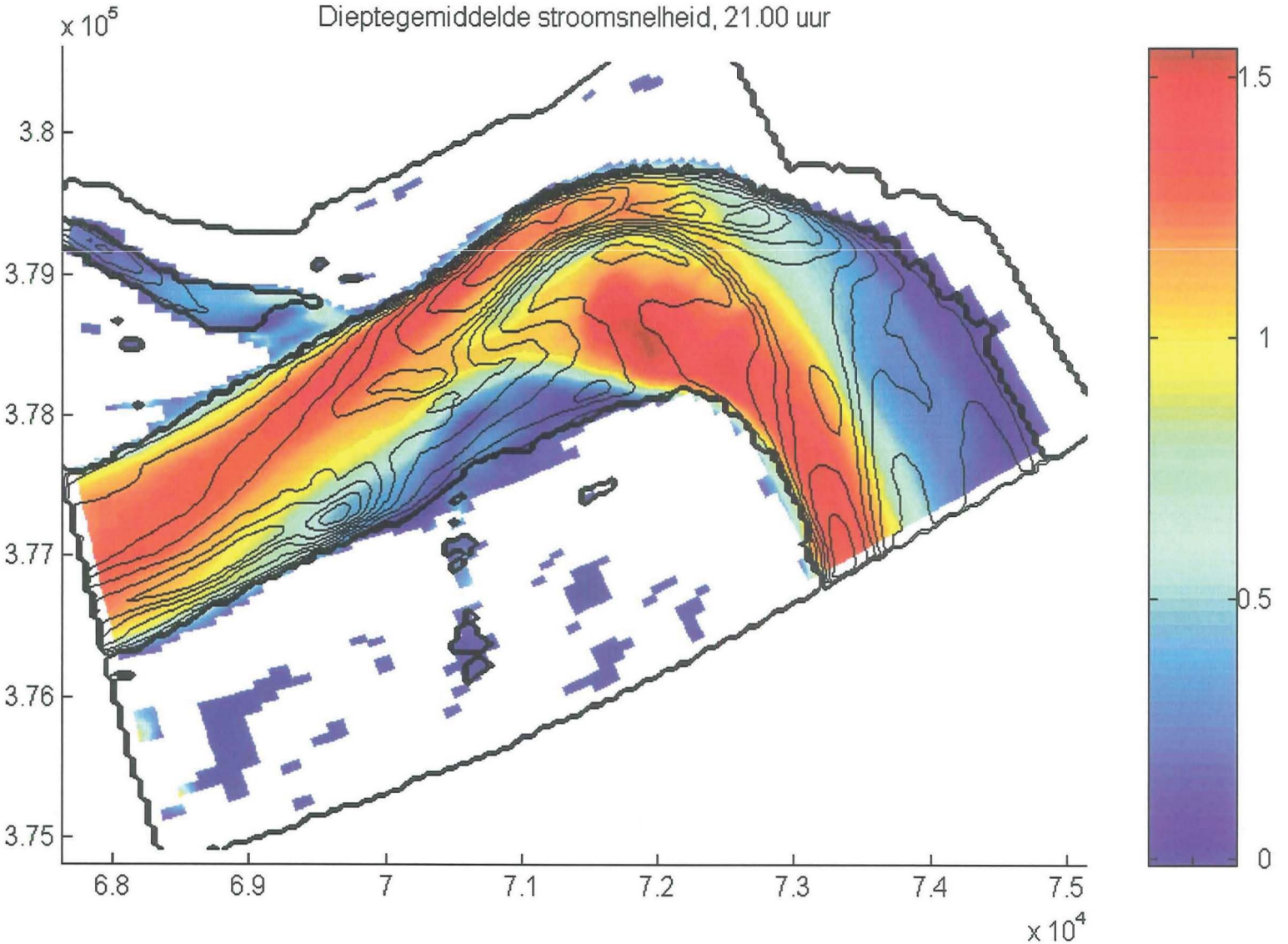


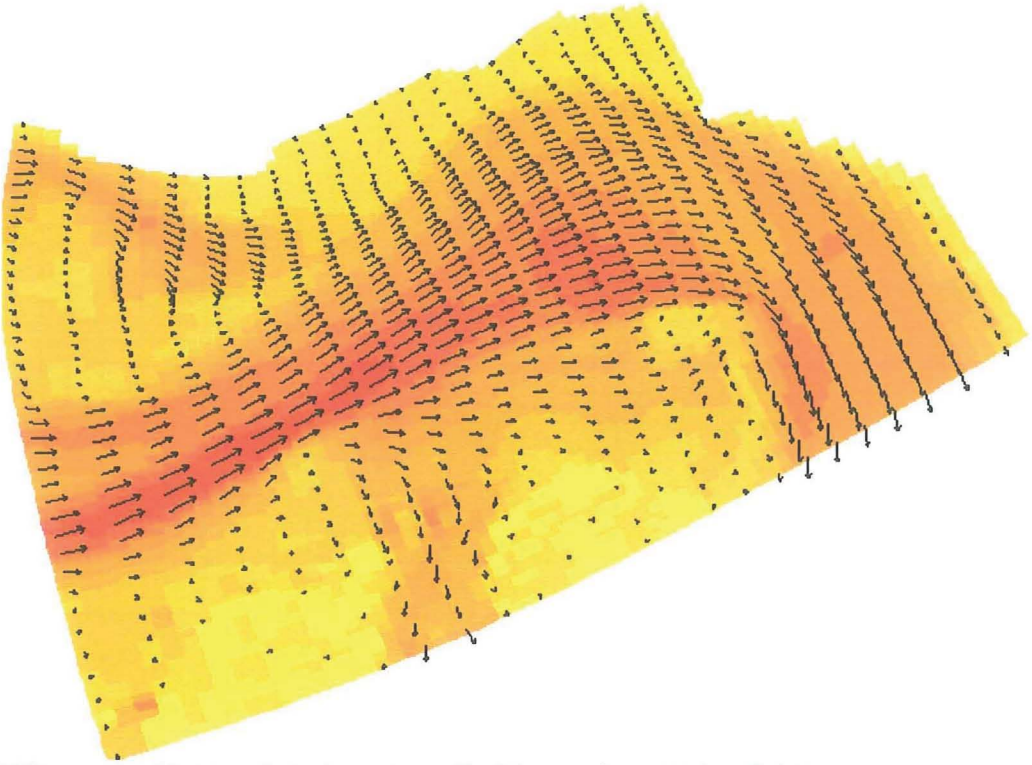
Bijlage 3: Diepte [m], maximum vloedstroom



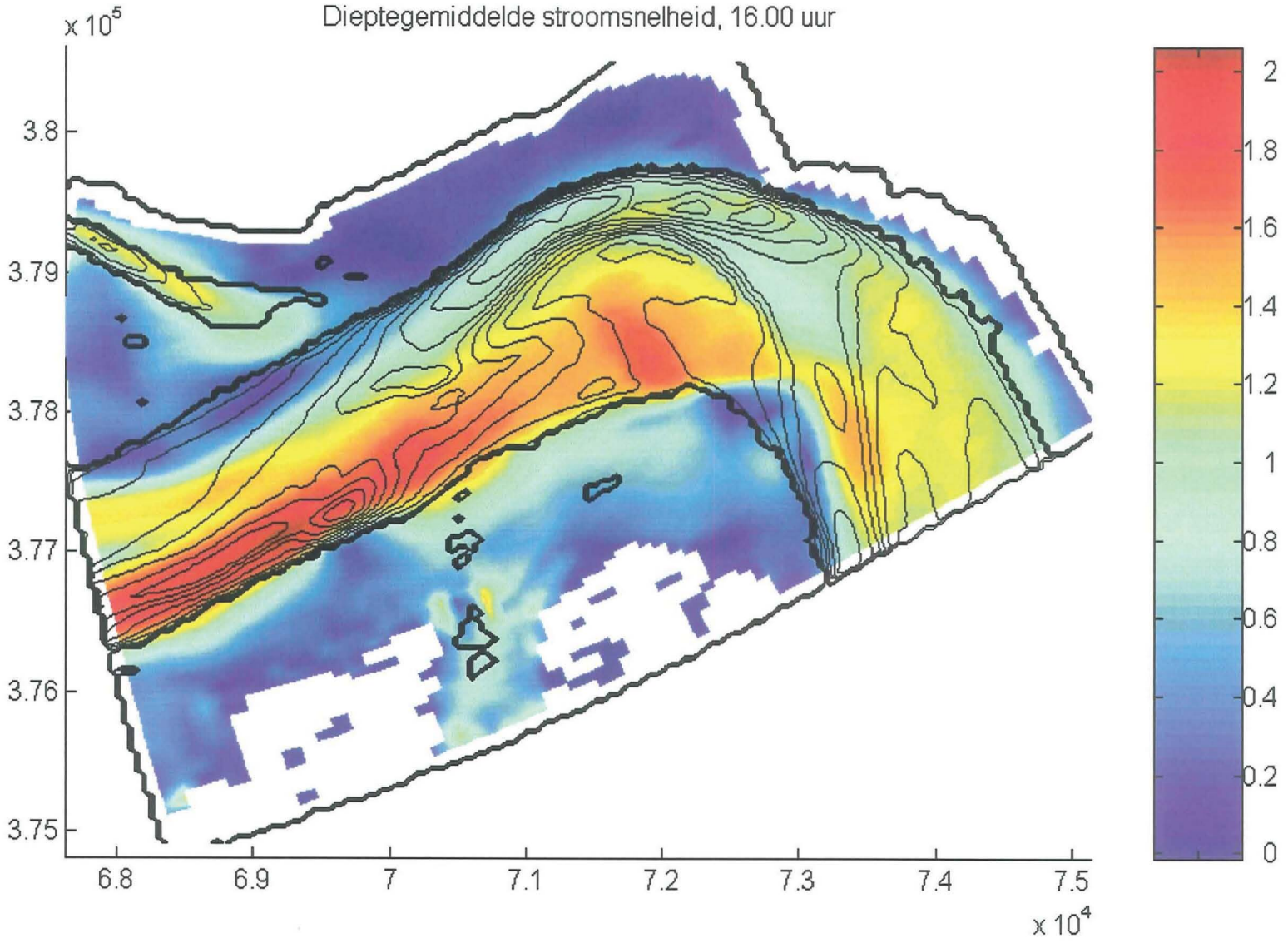
Bijlage 4a: Vectorplot stroomsnelheid, maximum ebstroom

Bijlage 4b: Dieptegemiddelde stroomsnelheid [m/s], maximum ebstroom

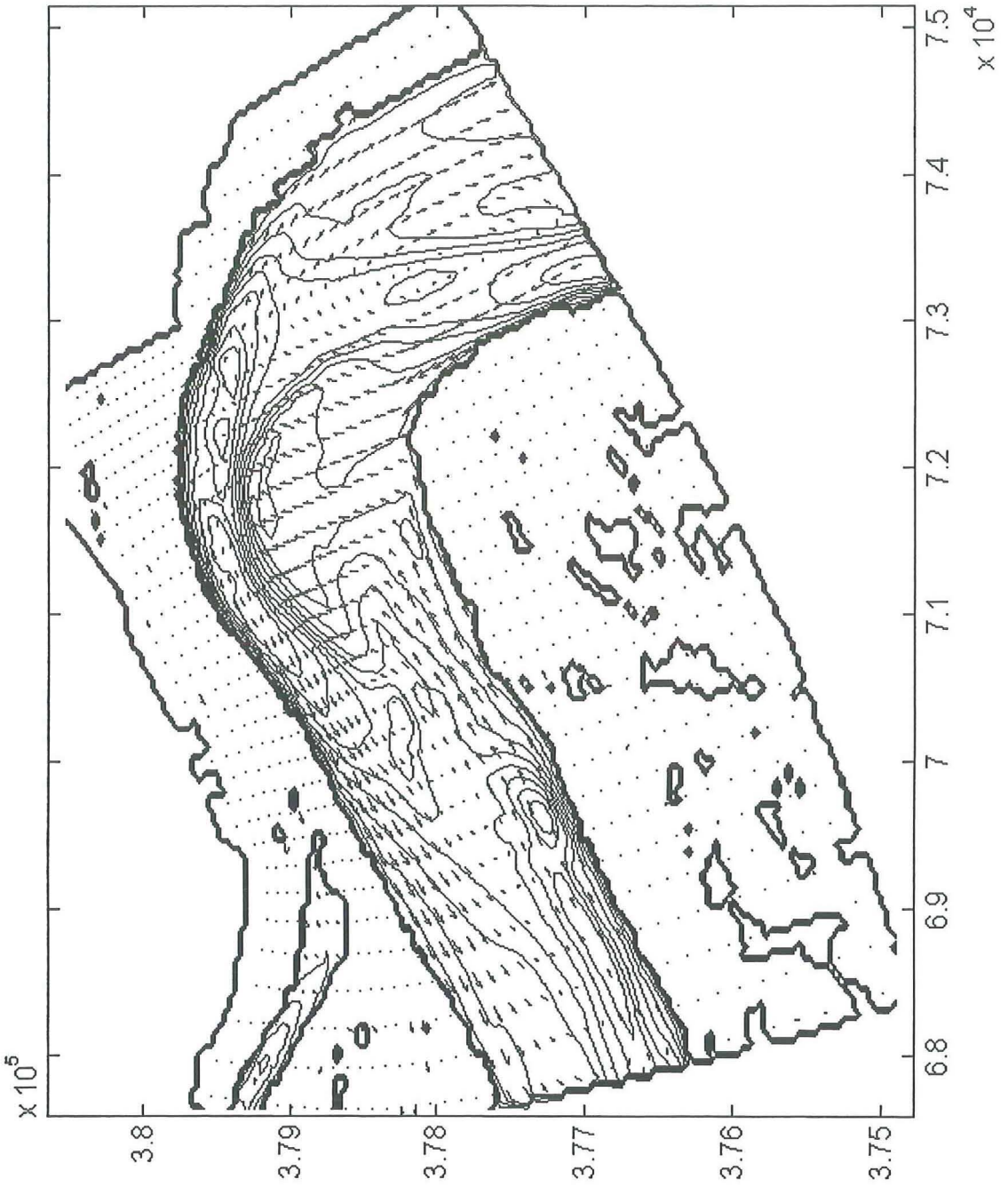




Bijlage 5a: Vectorplot stroomsnelheid, maximum vloedstroom

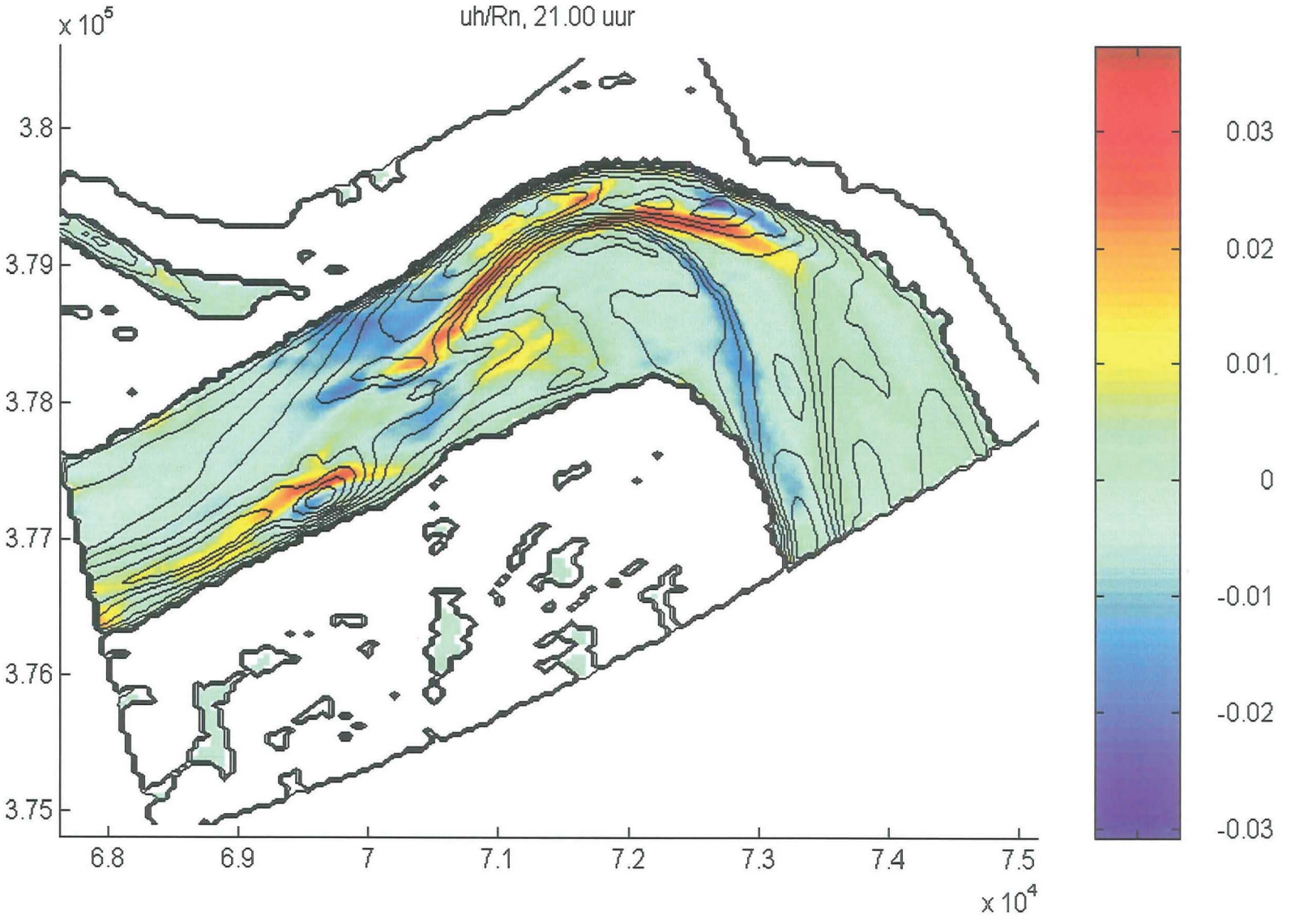


Bijlage 5b: Dieptegemiddelde stroomsnelheid [m/s], maximum vloedstroom

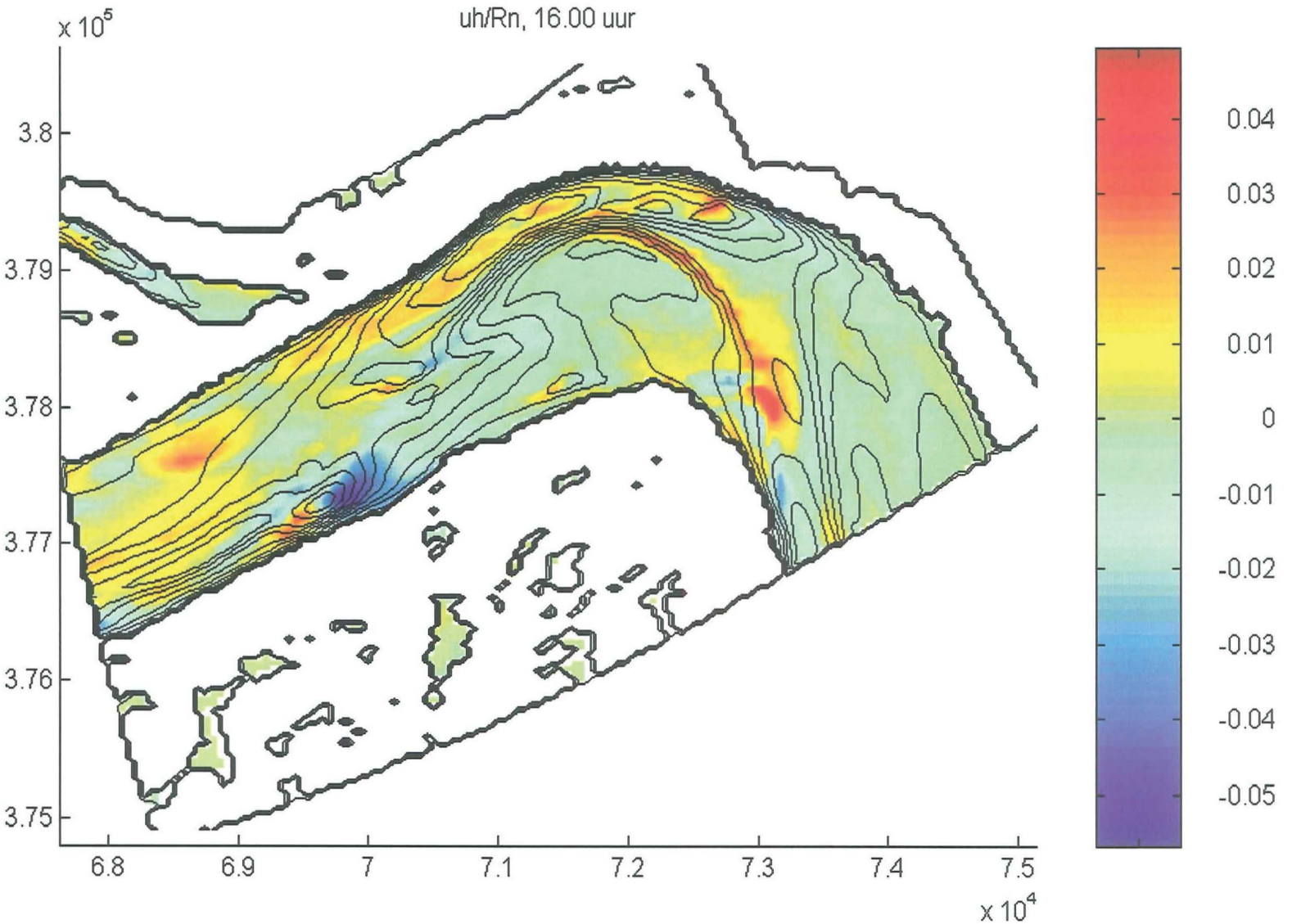


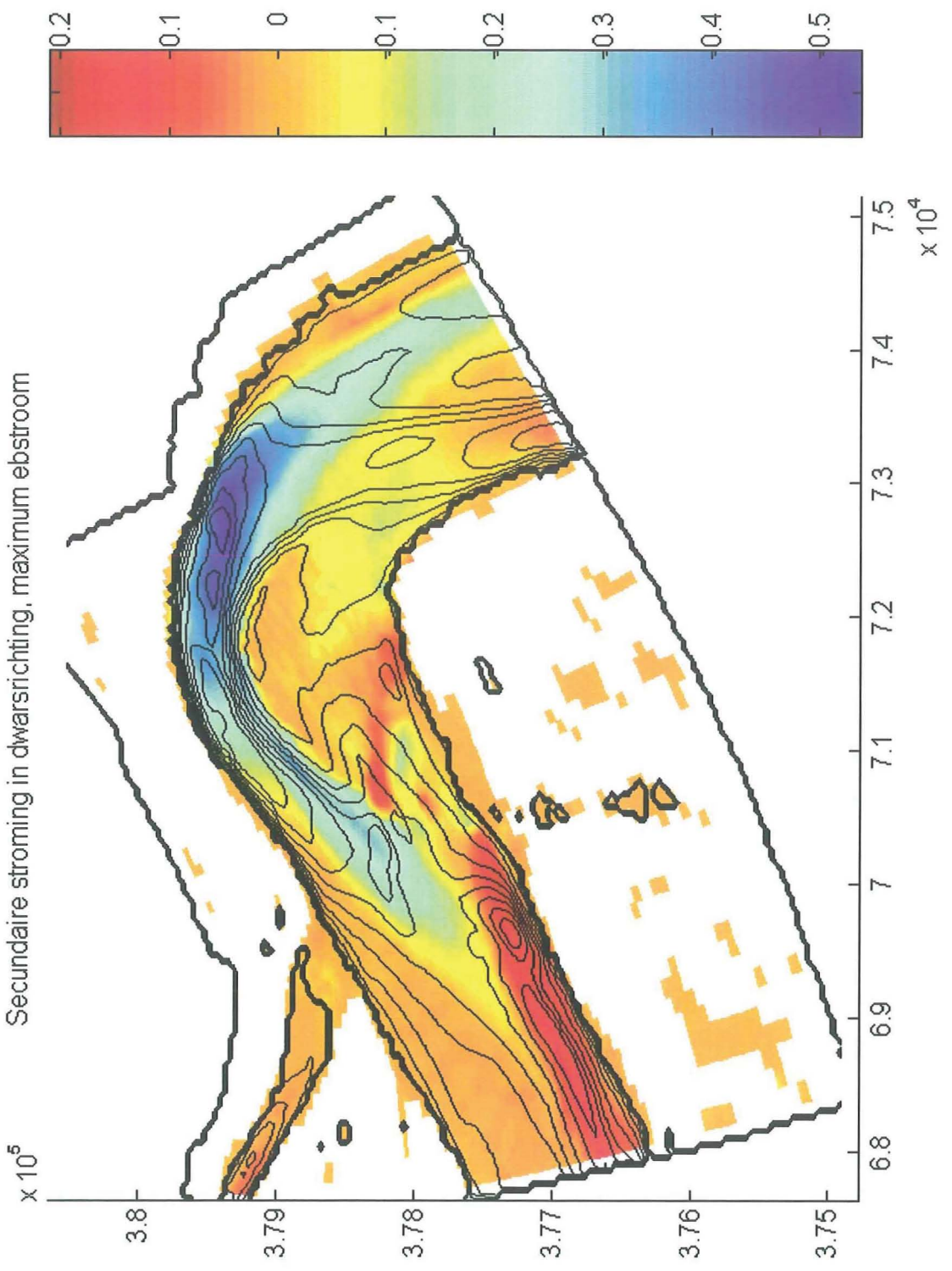
Bijlage 6: Reststroming na een springtij
De grootste pijl komt overeen met een reststroming van 0,40 m/s

Bijlage 7: Divergentie/convergentie [m/s], maximum ebstroom
Blauw = divergentie; Rood = convergentie

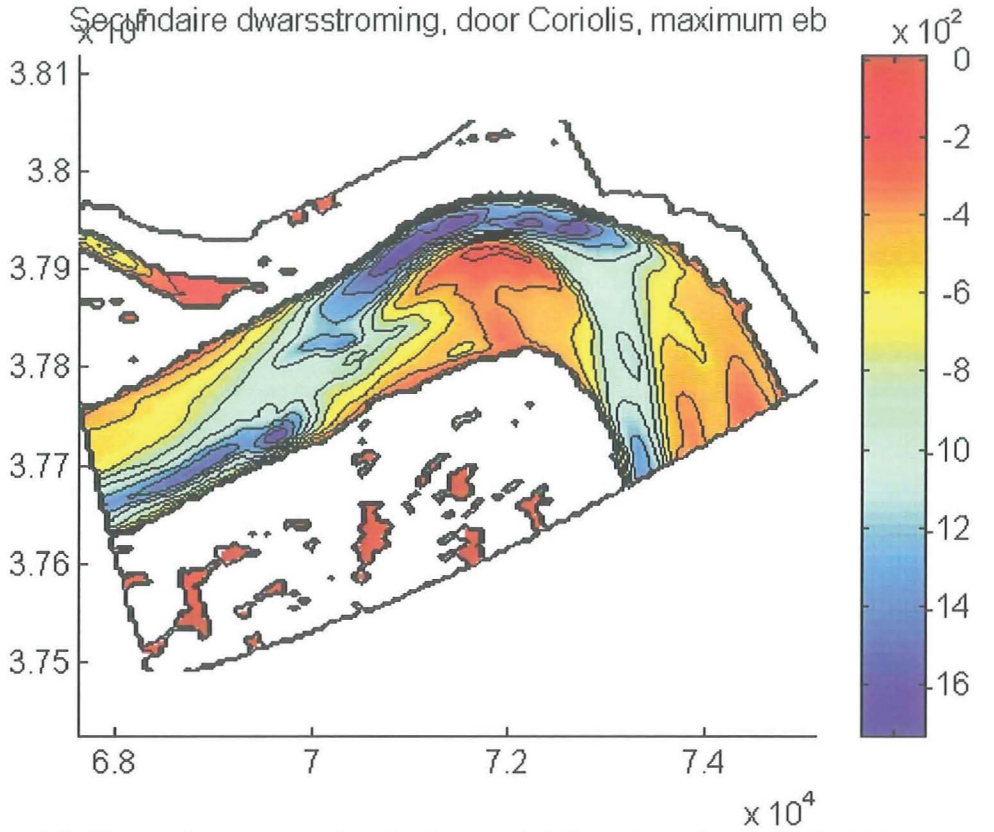


Bijlage 8: Divergentie/convergentie [m/s], maximum vloedstroom
Blauw = divergentie; Rood = convergentie

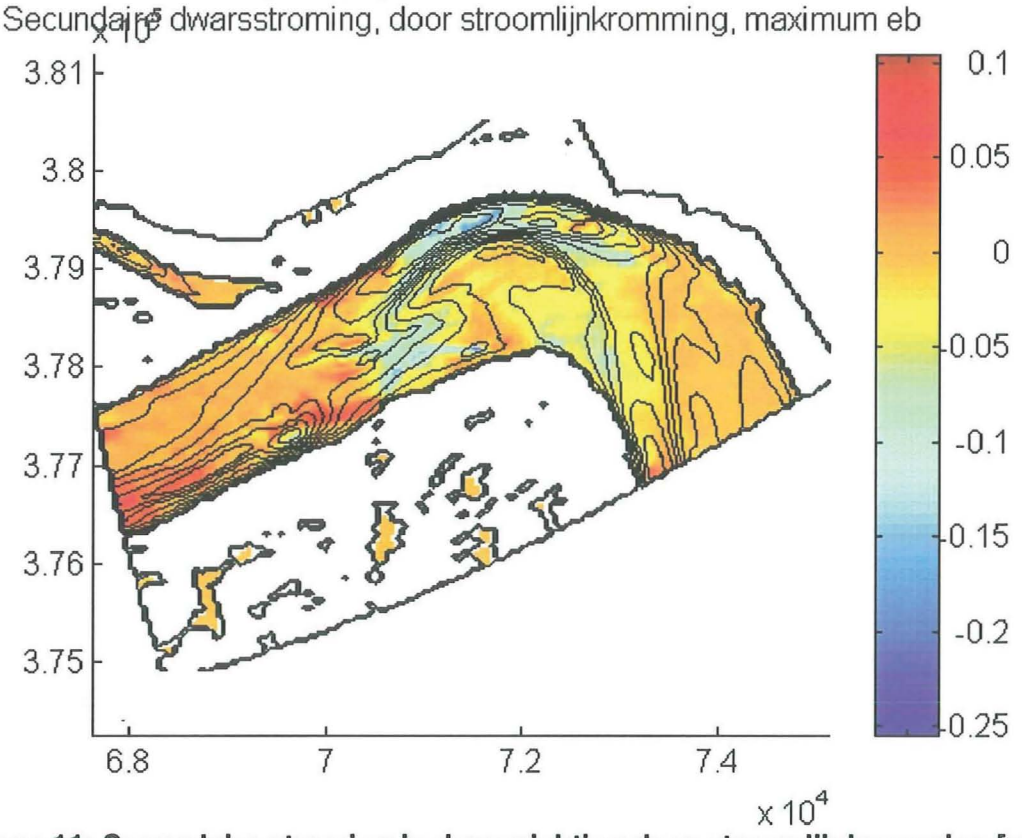




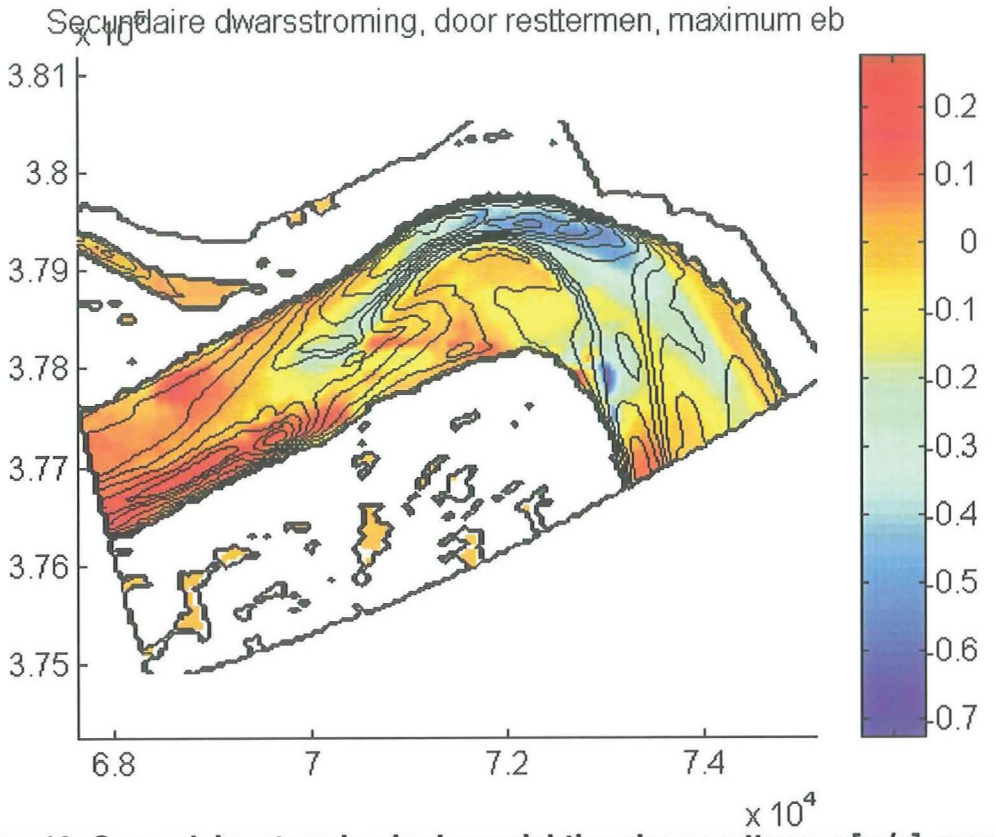
Bijlage 9: Secundaire stroming in dwarsrichting [m/s], maximum ebstroom
Blauw = met de stroming mee, bij de bodem naar links



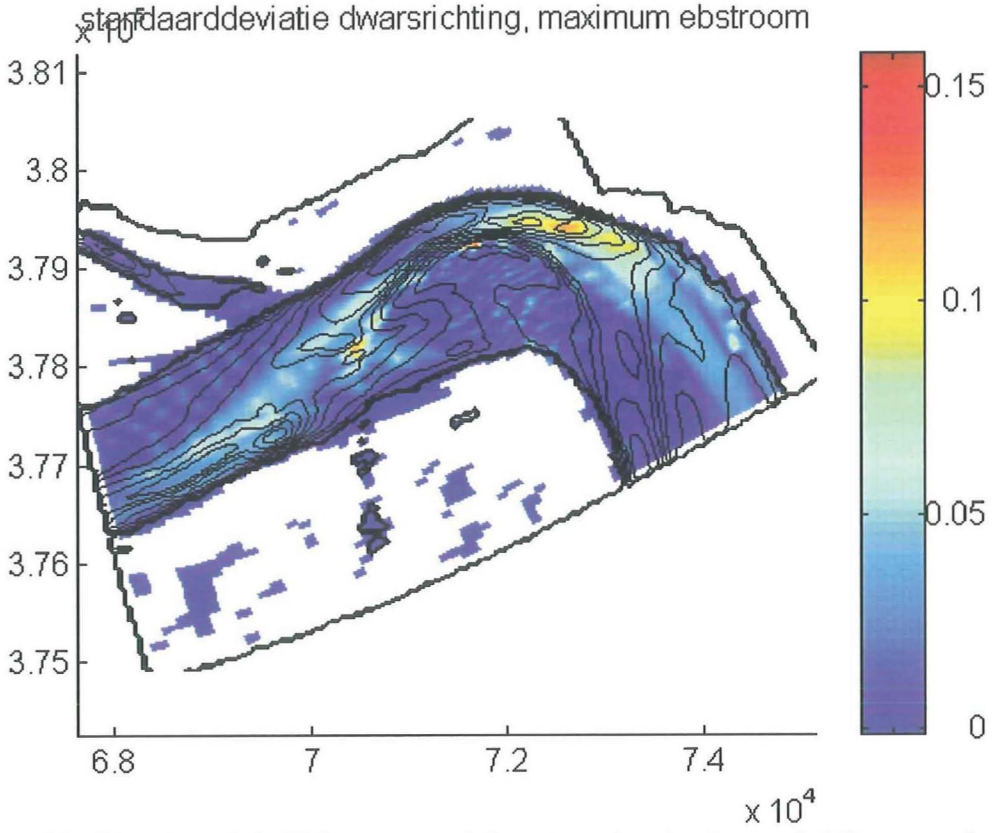
Bijlage 10: Secundaire stroming in dwarsrichting door Coriolis [m/s], max. ebstroom
Blauw = met de stroming mee, bij de bodem naar links



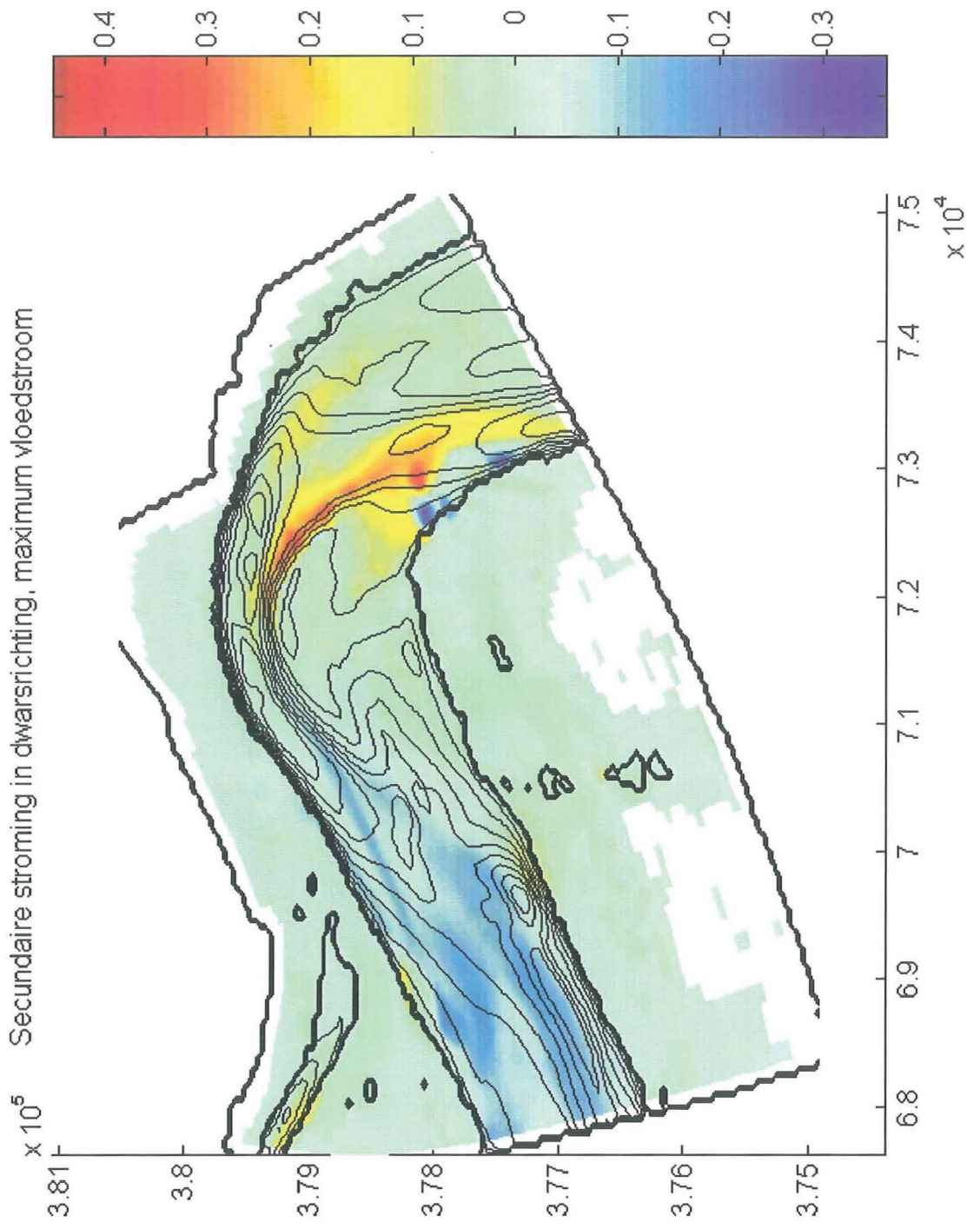
Bijlage 11: Secundaire stroming in dwarsrichting door stroomlijnkromming [m/s], maximum ebstroom
Blauw = met de stroming mee, bij de bodem naar links



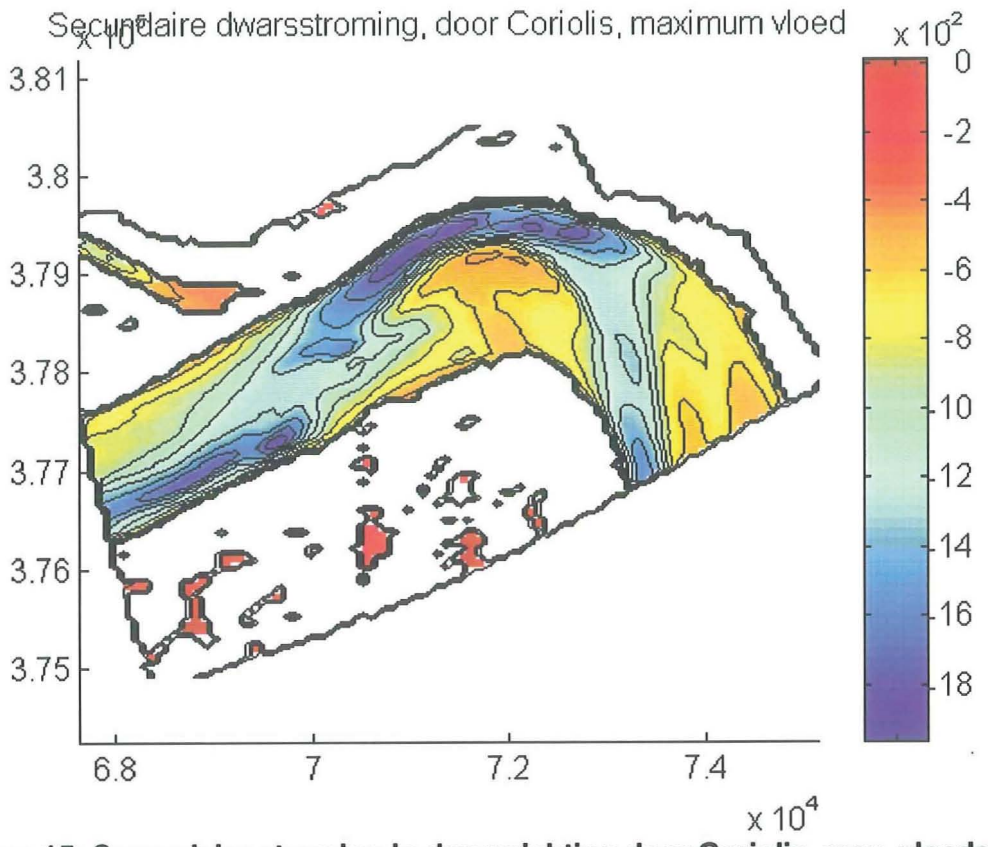
Bijlage 12: Secundaire stroming in dwarsrichting door resttermen[m/s], max. ebstroom
Blauw = met de stroming mee, bij de bodem naar links



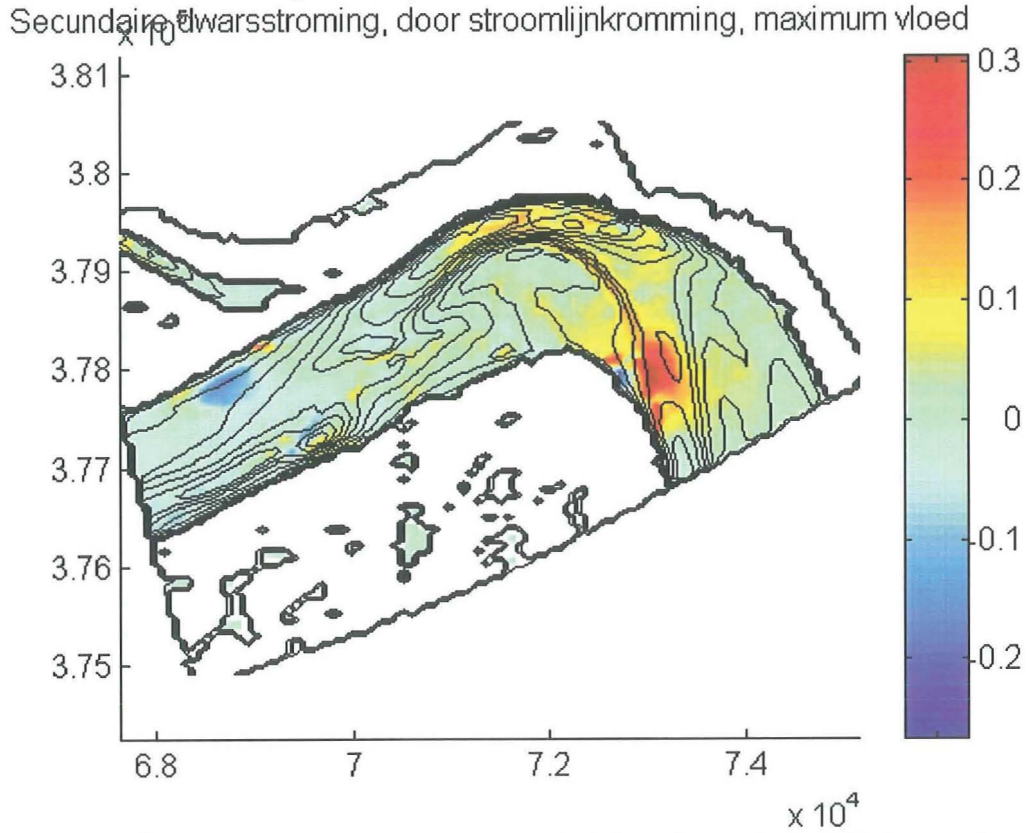
Bijlage 13: Standaardafwijking secundaire stroming in dwarsrichting, maximum ebstroom



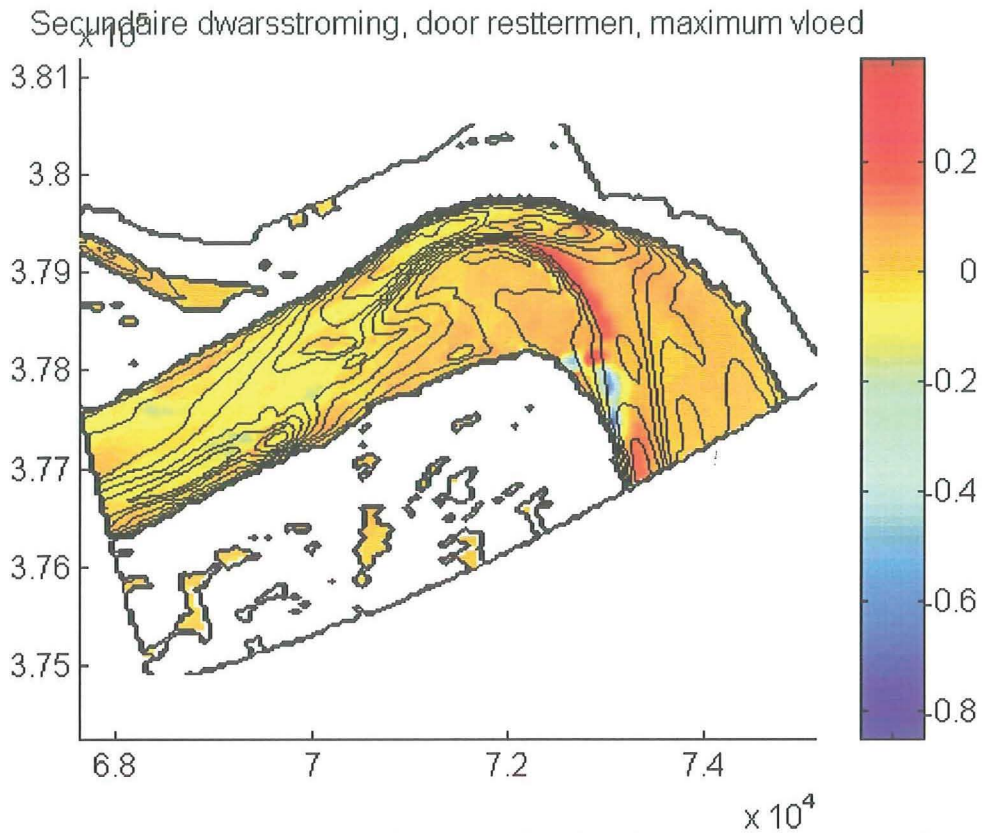
Bijlage 14: Secundaire stroming in dwarsrichting [m/s], maximum vloedstroom
Blauw = met de stroming mee, bij de bodem naar links



Bijlage 15: Secundaire stroming in dwarsrichting door Coriolis, max. vloedstroom
Blauw = met de stroming mee, bij de bodem naar links

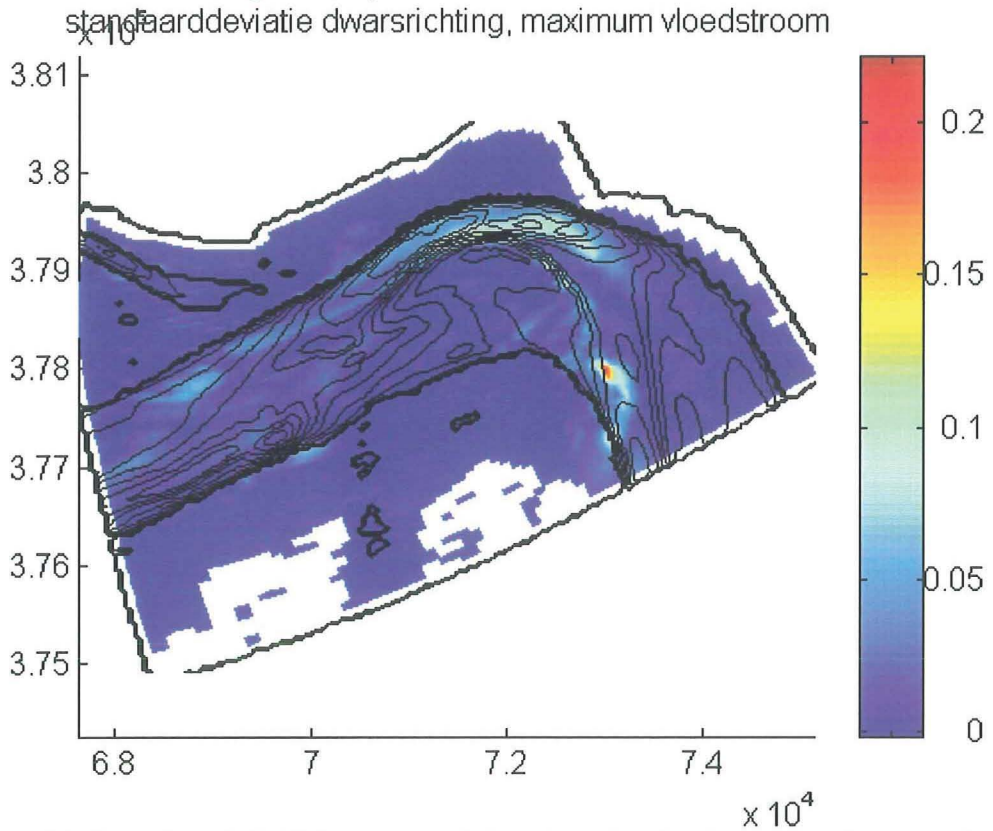


Bijlage 16: Secundaire stroming in dwarsrichting door stroomlijnkromming, maximum vloedstroom
Blauw = met de stroming mee, bij de bodem naar links

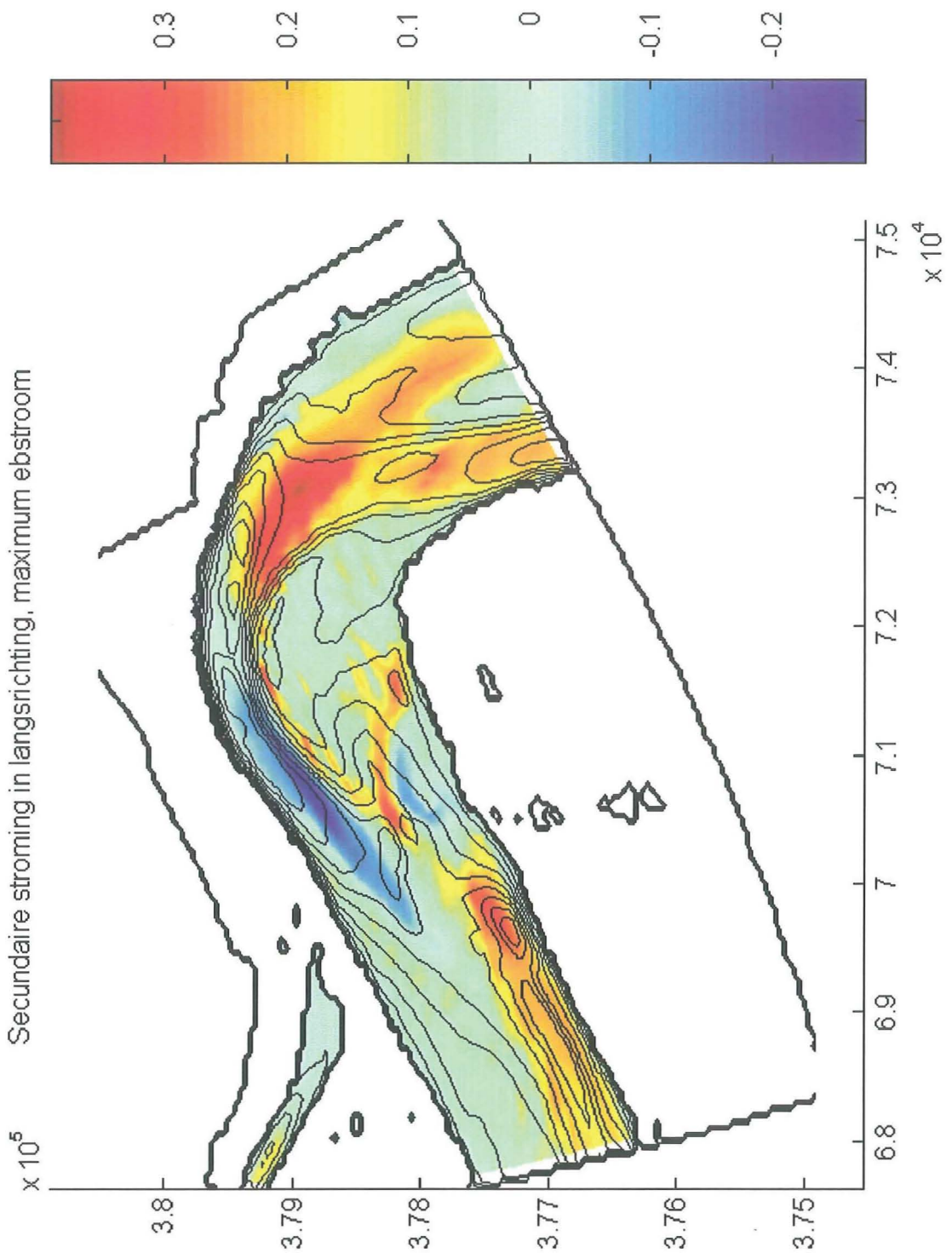


Bijlage 17: Secundaire stroming in dwarsrichting door resttermen, maximum vloedstroom

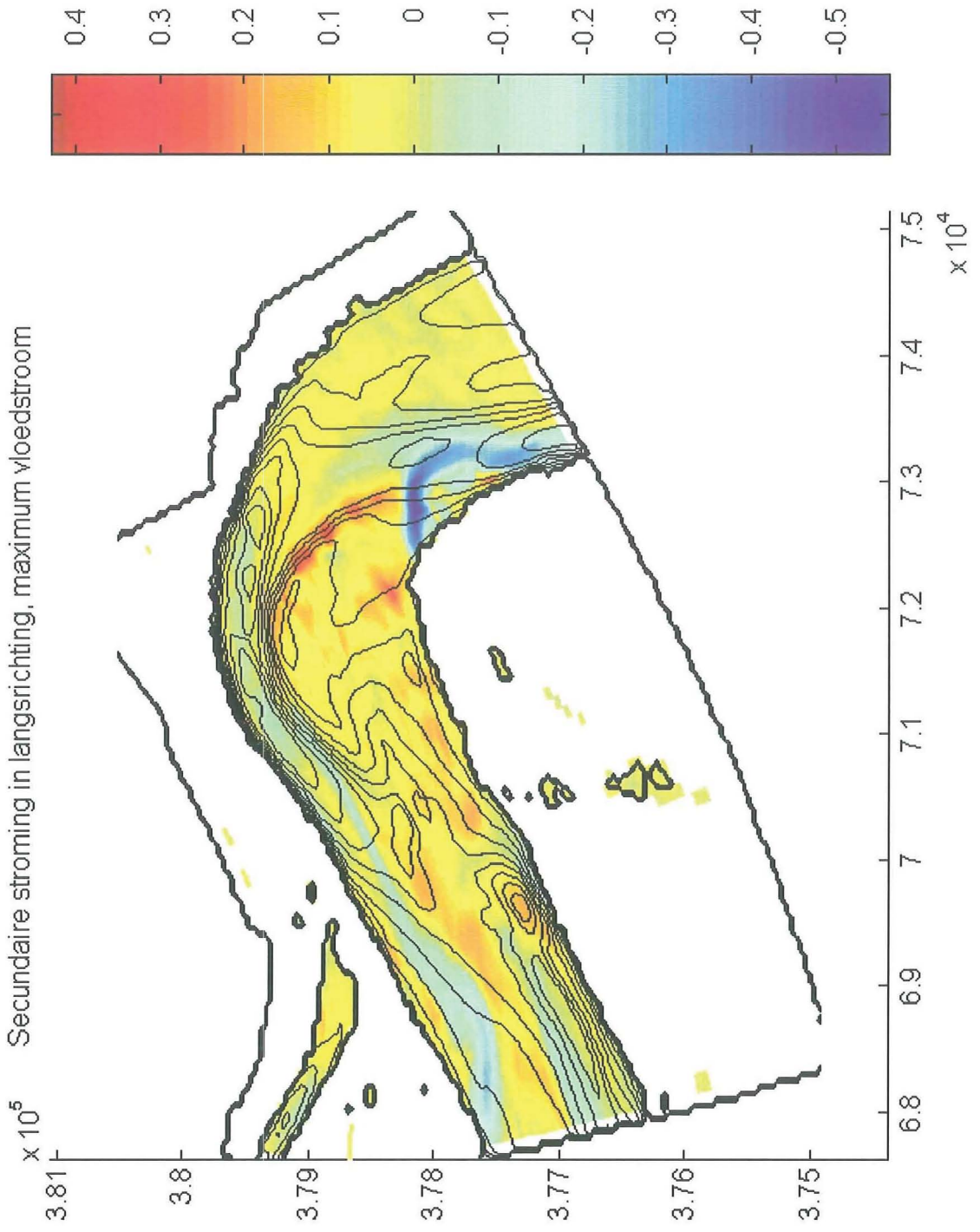
Blauw = met de stroming mee, bij de bodem naar links



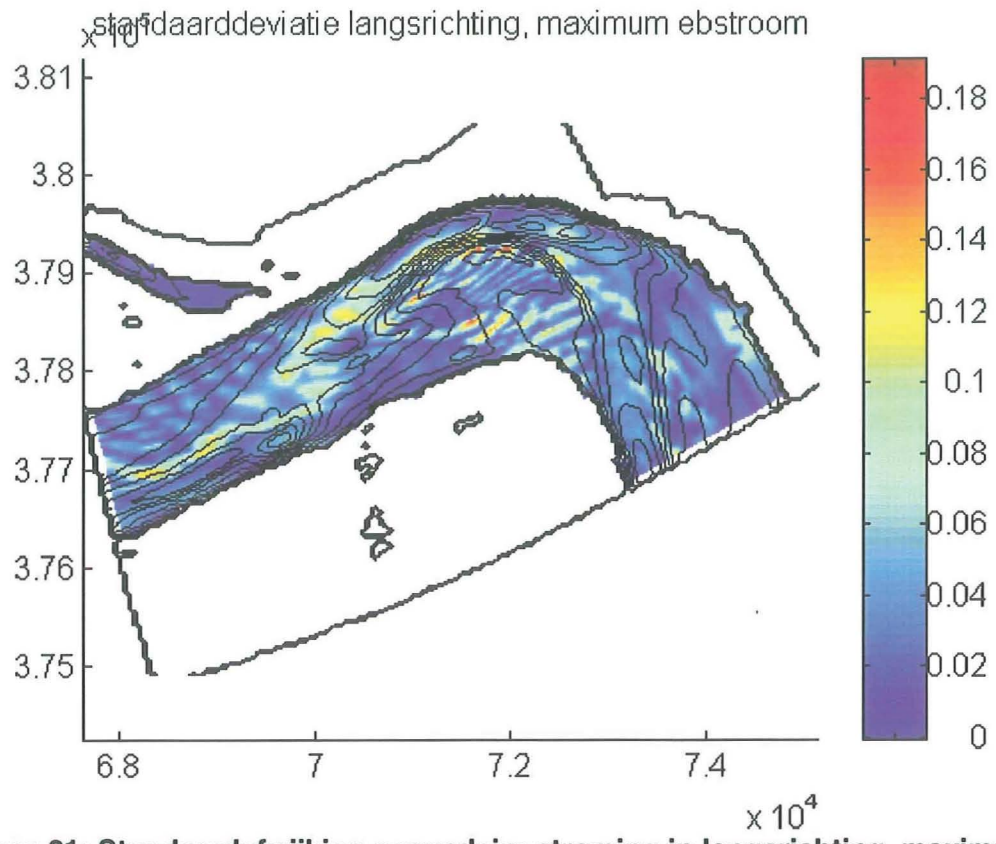
Bijlage 18: Standaardafwijking secundaire stroming in dwarsrichting, maximum vloedstroom



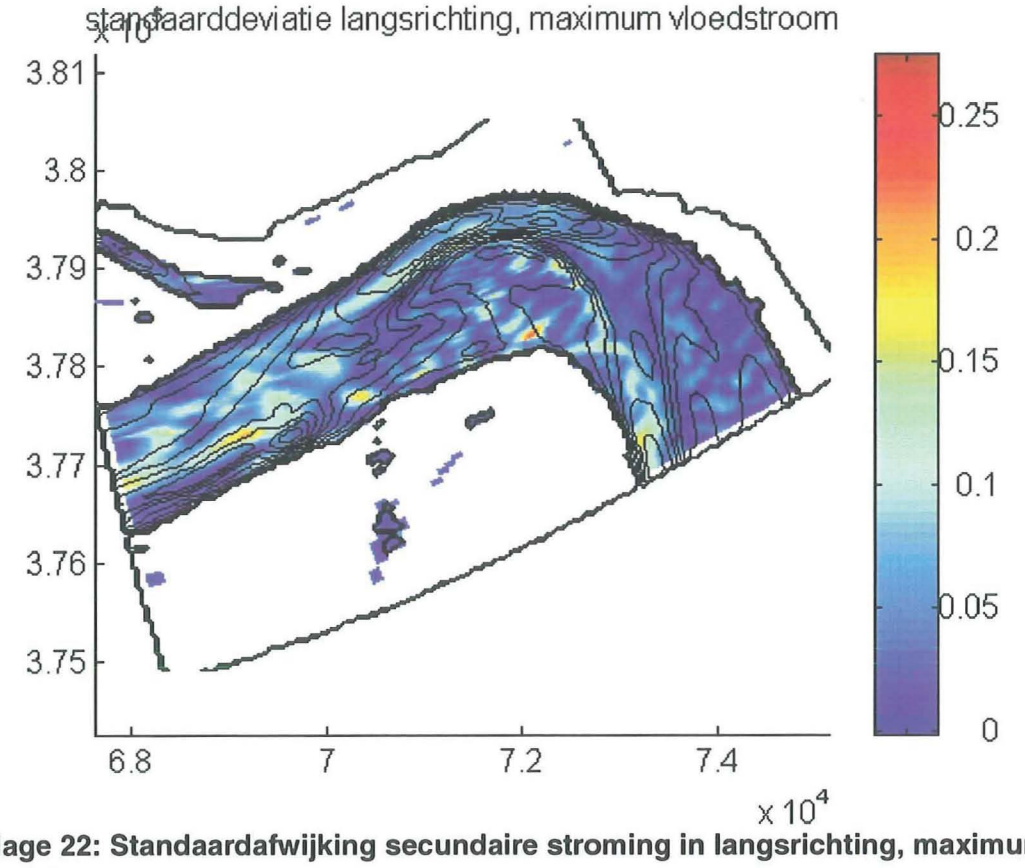
Bijlage 19: Secundaire stroming in langsrichting [m/s], maximum ebstroom
Snelheidsafwijking t.o.v. logaritmisch snelheidsprofiel. Deze moet nabij het wateroppervlak bij de snelheid worden opgeteld en bij de bodem worden afgetrokken van het log. snelheidsprofiel.



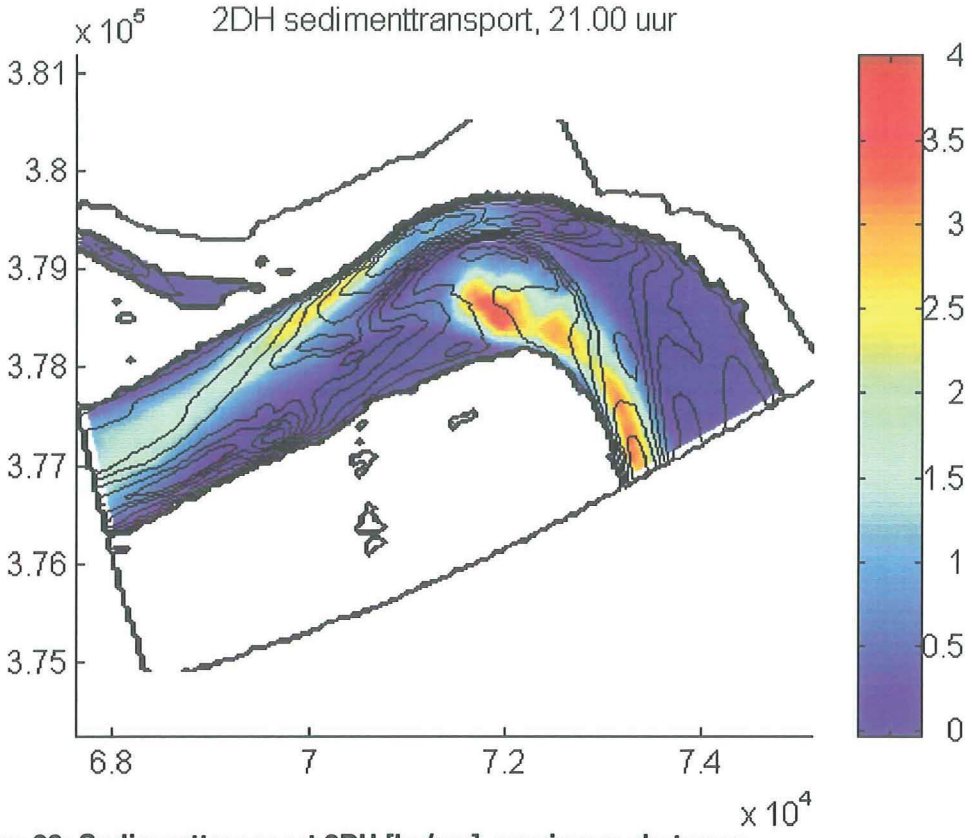
Bijlage 20: Secundaire stroming in langsrichting [m/s], maximum vloedstroom
Snelheidsafwijking t.o.v. logaritmisch snelheidsprofiel. Deze moet nabij het wateroppervlak bij de snelheid worden opgeteld en bij de bodem worden afgetrokken van het log. snelheidsprofiel.



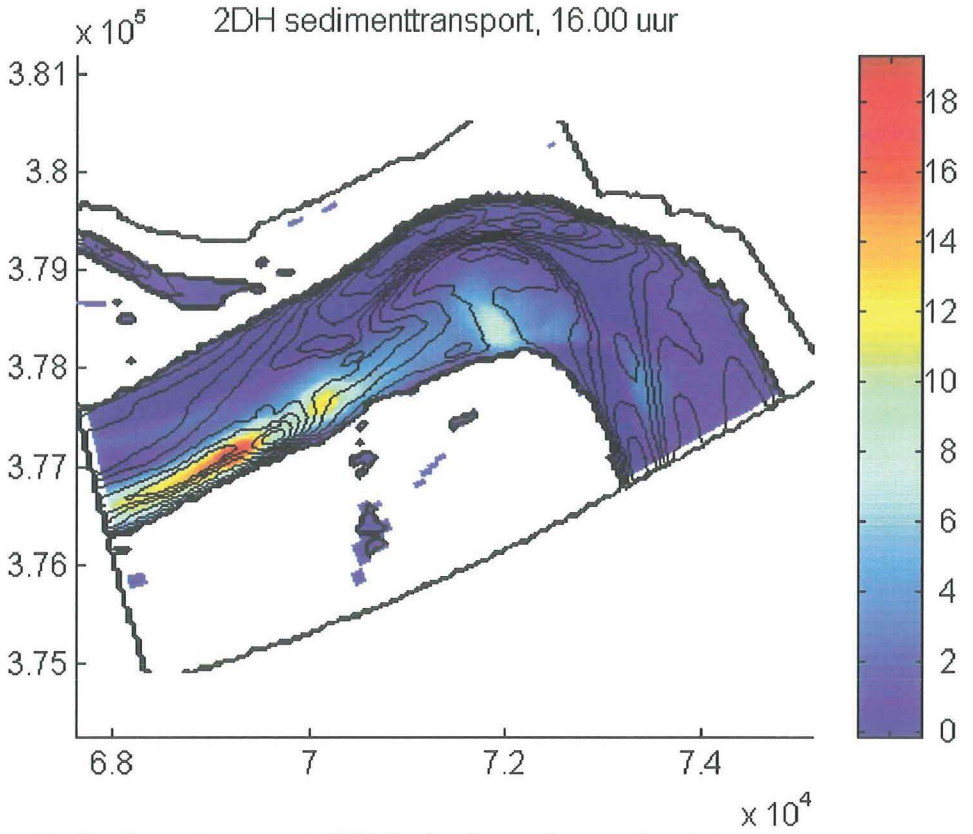
Bijlage 21: Standaardafwijking secundaire stroming in langsrichting, maximum ebstroom



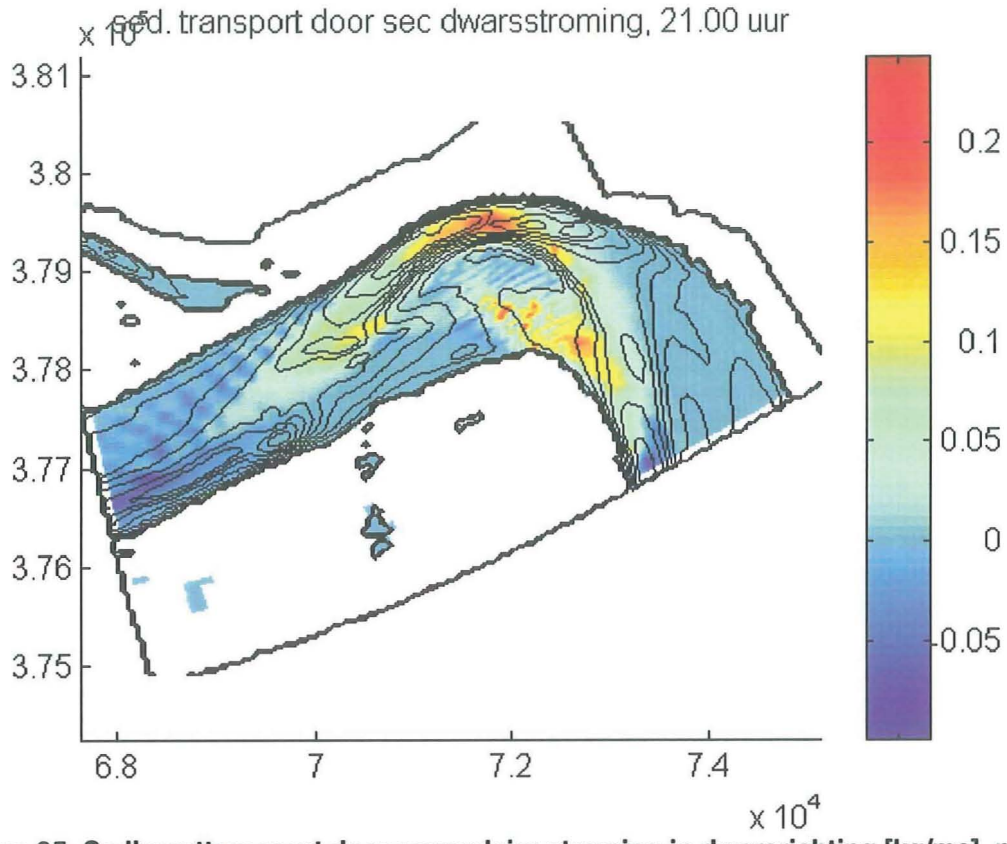
Bijlage 22: Standaardafwijking secundaire stroming in langsrichting, maximum vloedstroom



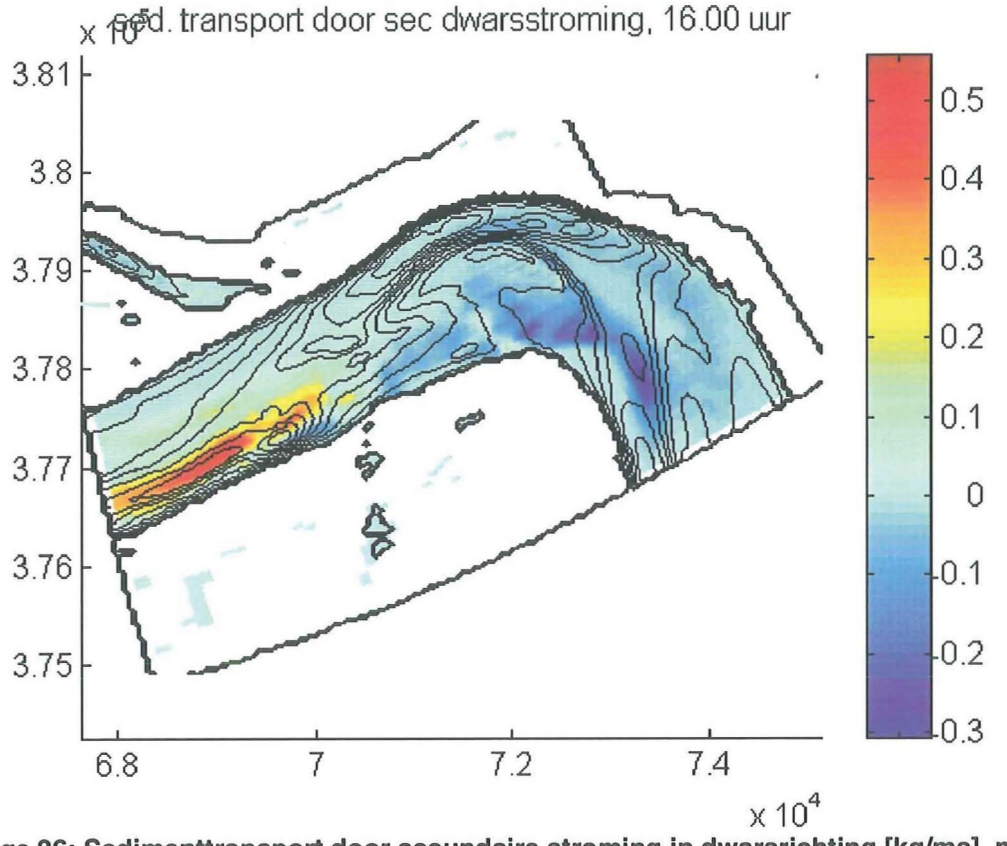
Bijlage 23: Sedimenttransport 2DH [kg/ms], maximum ebstroom



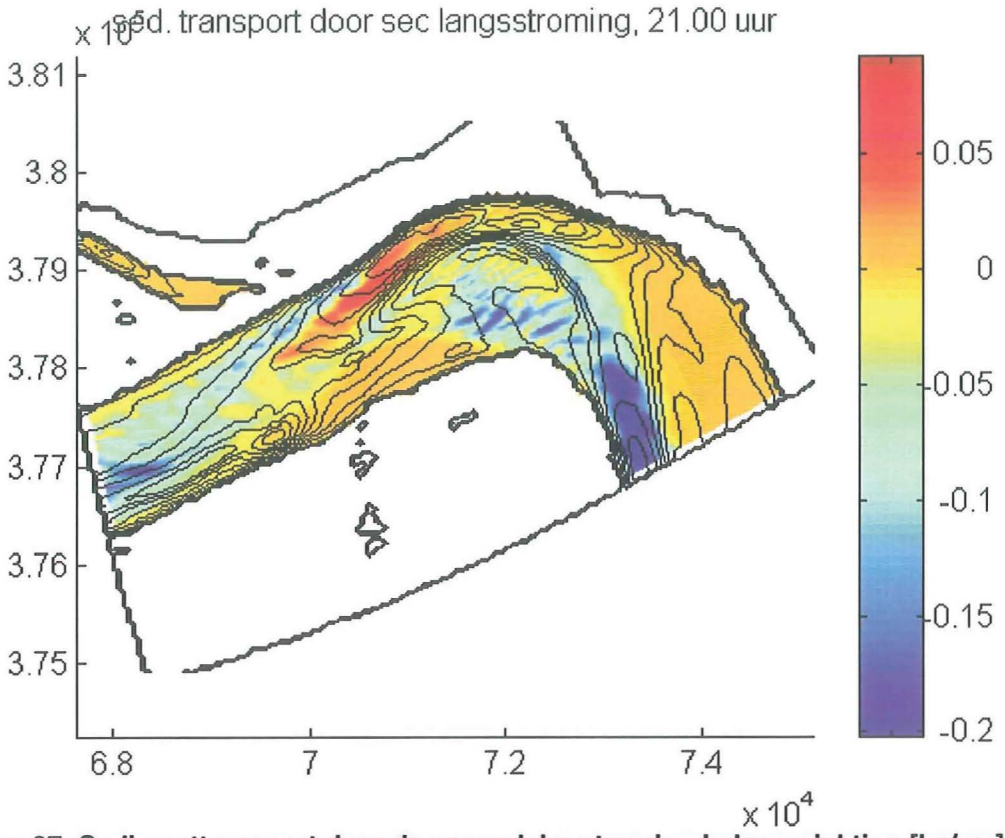
Bijlage 24: Sedimenttransport 2DH [kg/ms], maximum vloedstroom



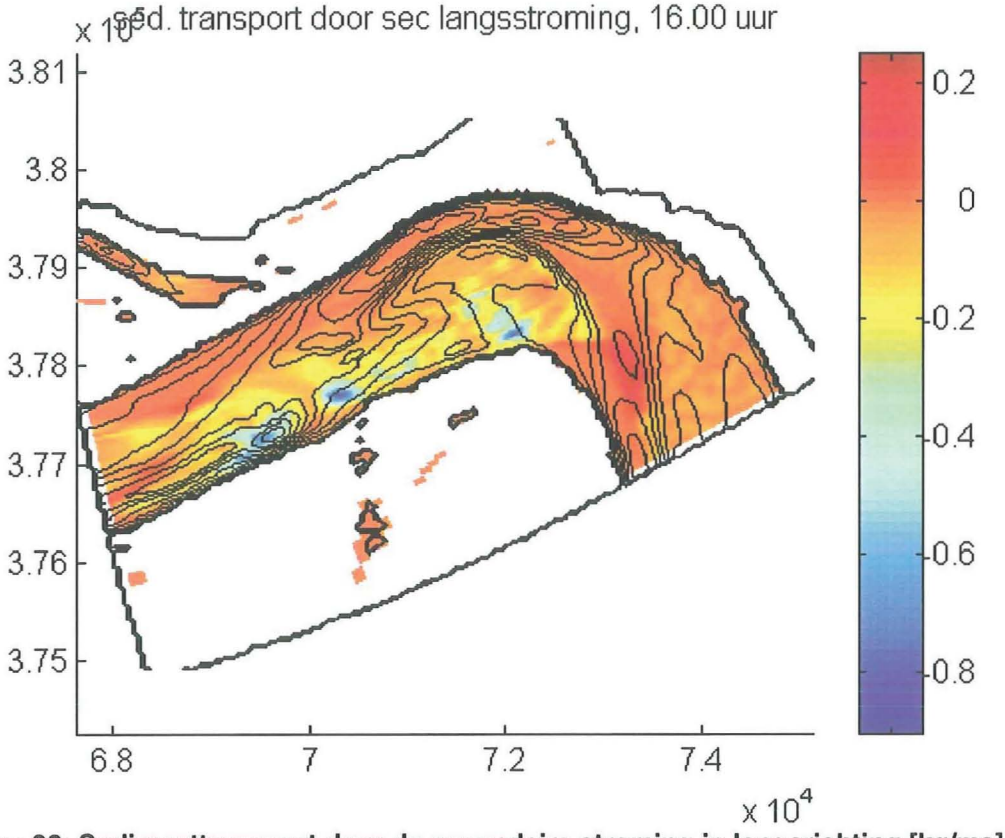
Bijlage 25: Sedimenttransport door secundaire stroming in dwarsrichting [kg/ms], maximum ebstroom



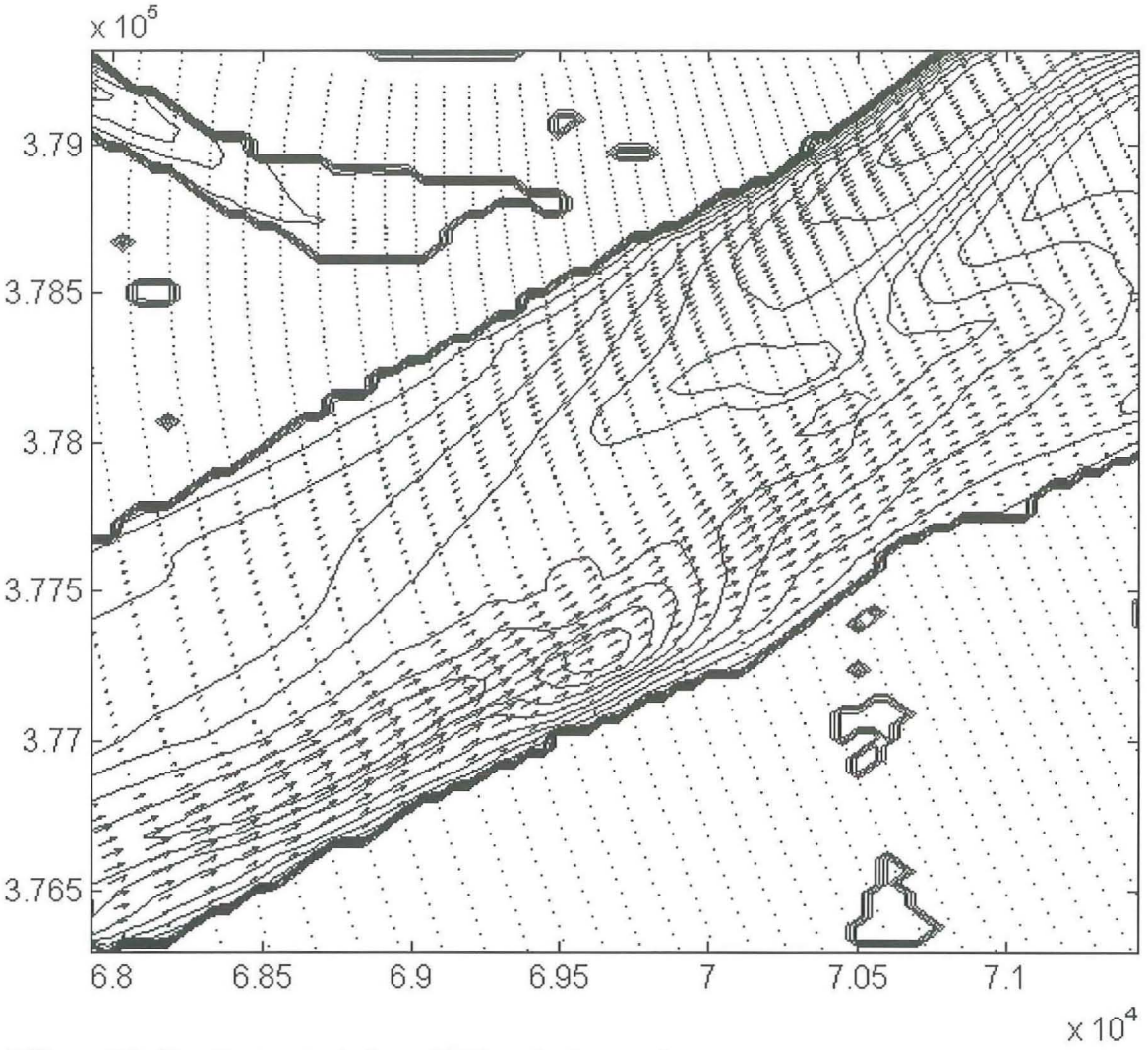
Bijlage 26: Sedimenttransport door secundaire stroming in dwarsrichting [kg/ms], maximum vloedstroom



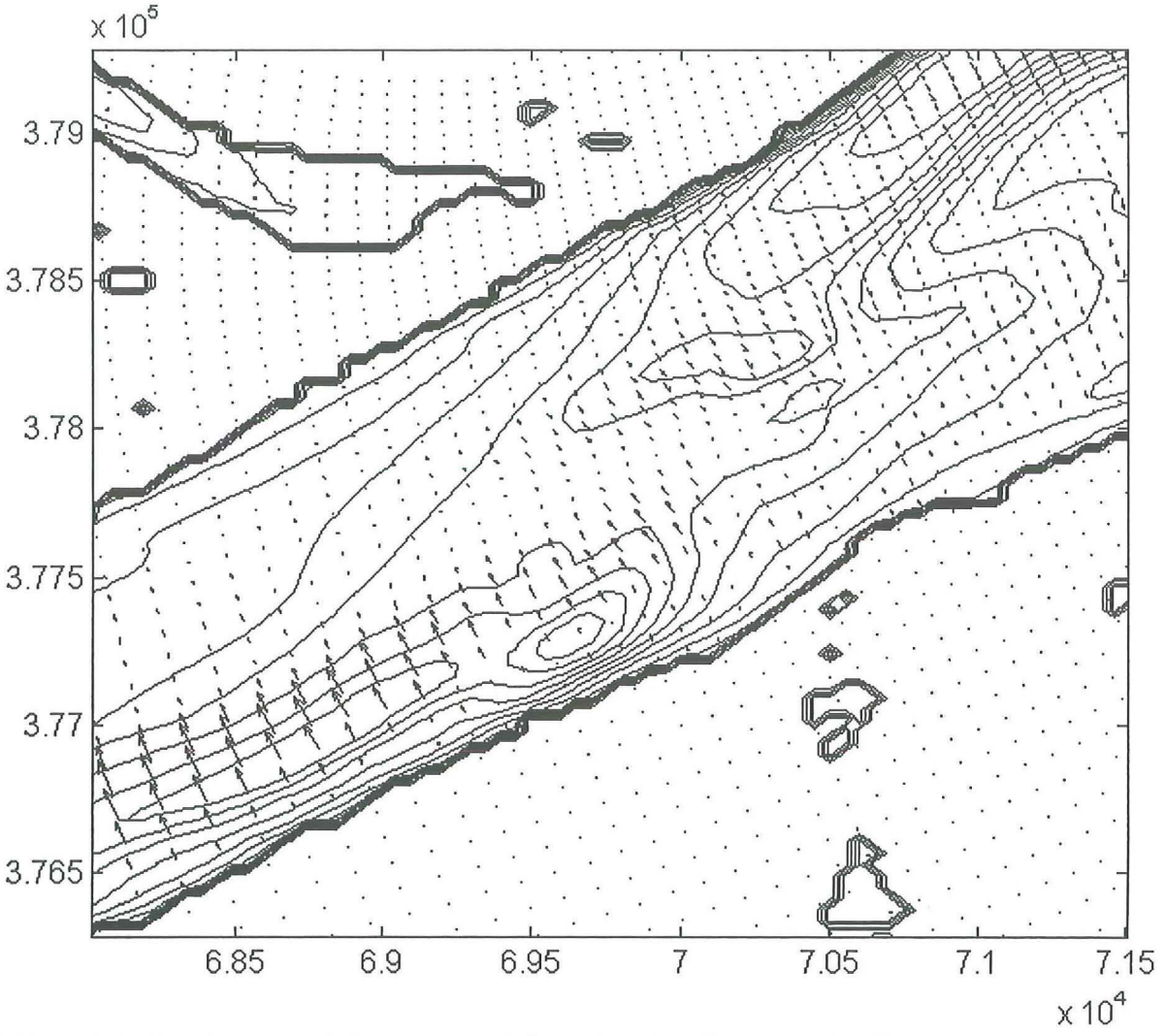
Bijlage 27: Sedimenttransport door de secundaire stroming in langsrichting [kg/ms], maximum ebstroom



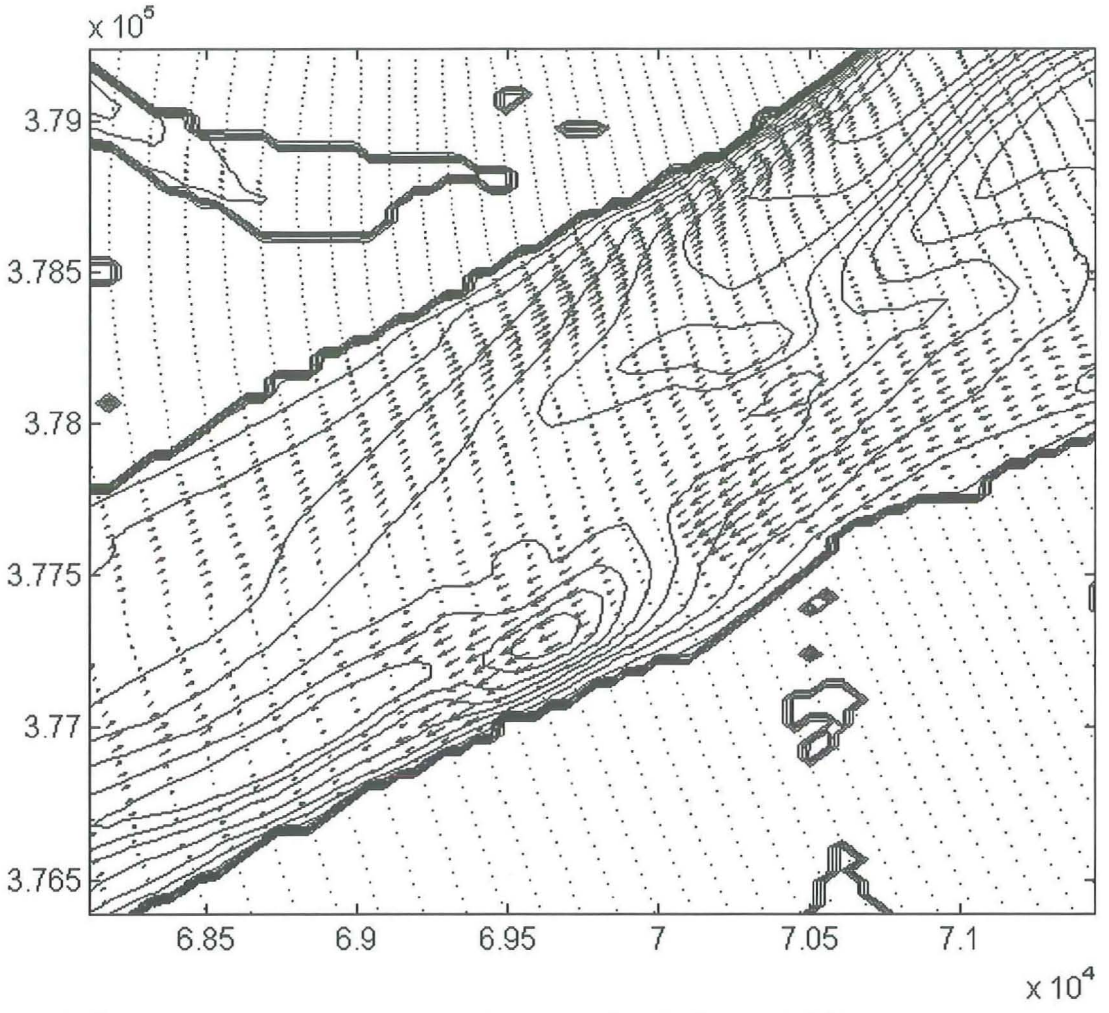
Bijlage 28: Sedimenttransport door de secundaire stroming in langsrichting [kg/ms], maximum vloedstroom



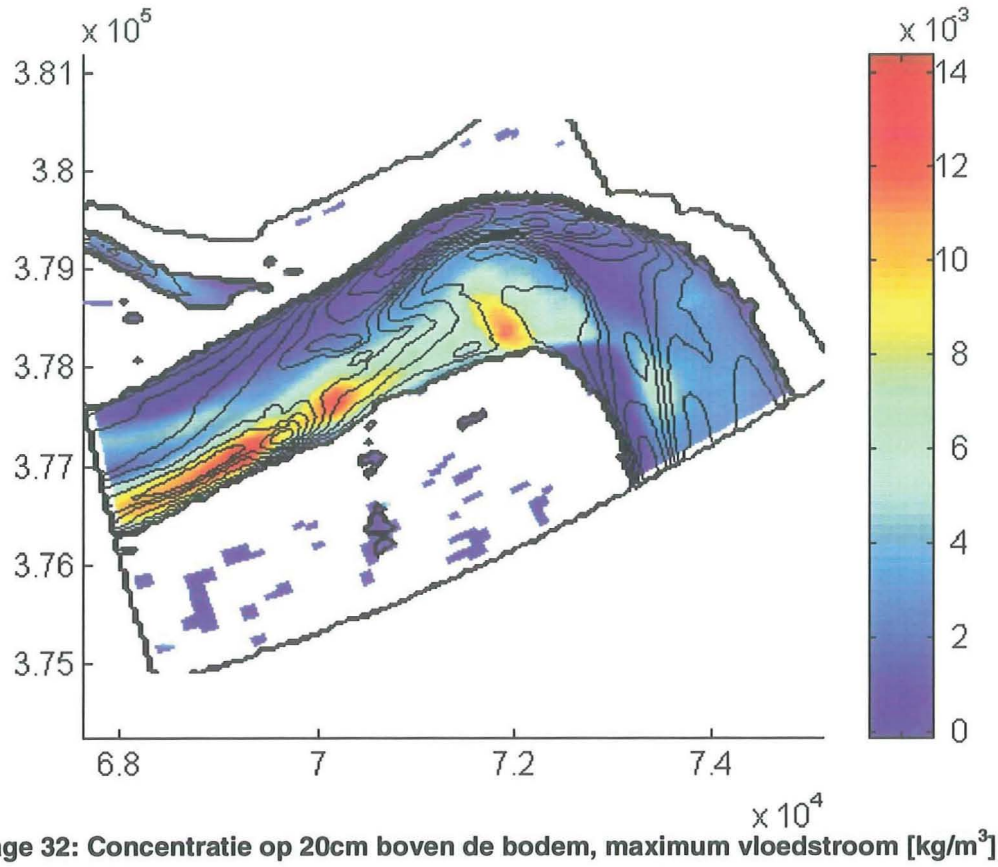
Bijlage 29: Resttransport door 2DH waterbeweging
De grootste pijl komt overeen met een resttransport van 1,5 kg/ms



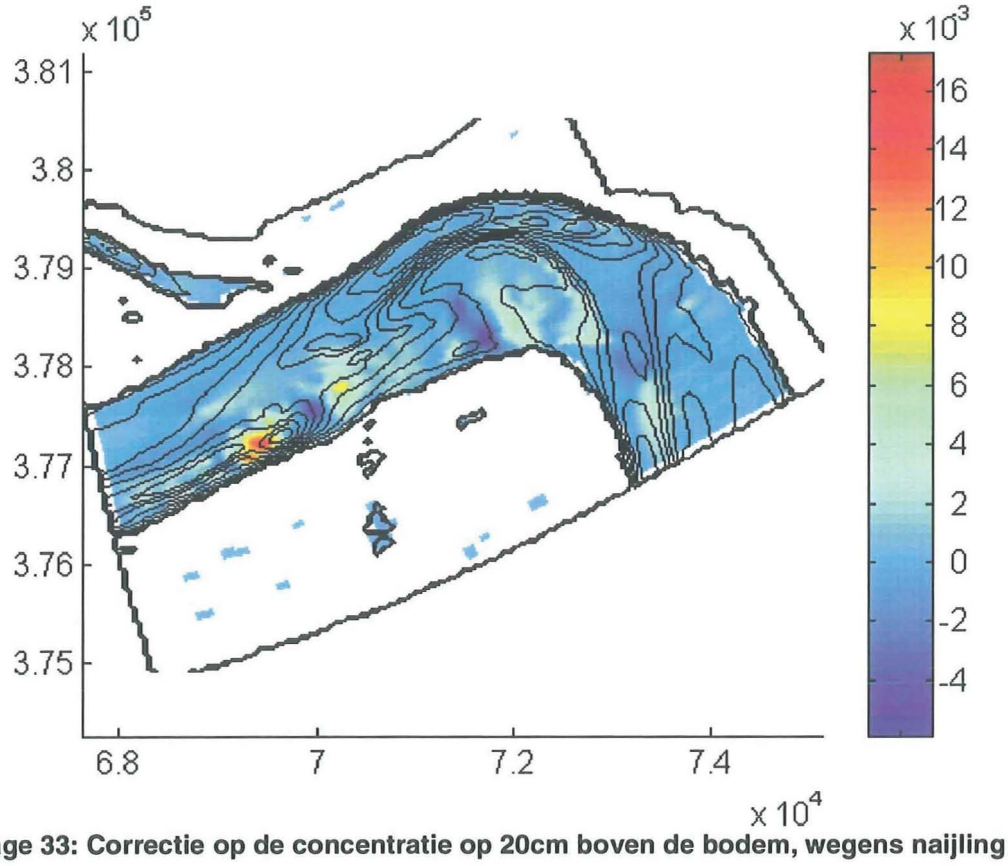
Bijlage 30: Resttransport door secundaire stroming in dwarsrichting
De grootste pijl komt overeen met een resttransport van 0.04 kg/ms



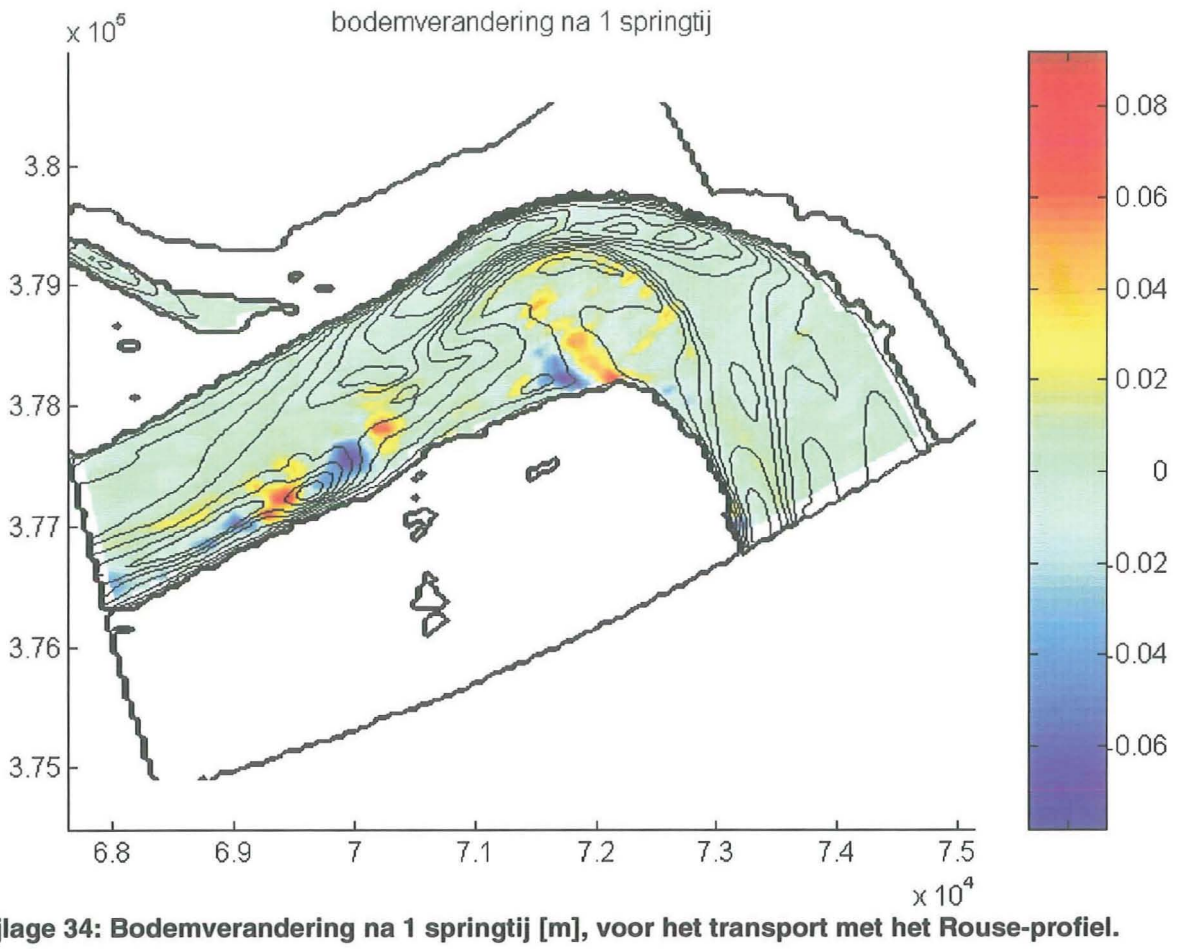
Bijlage 31: Resttransport door secundaire stroming in langsrichting
De grootste pijl komt overeen met een resttransport van 0.05 kg/ms



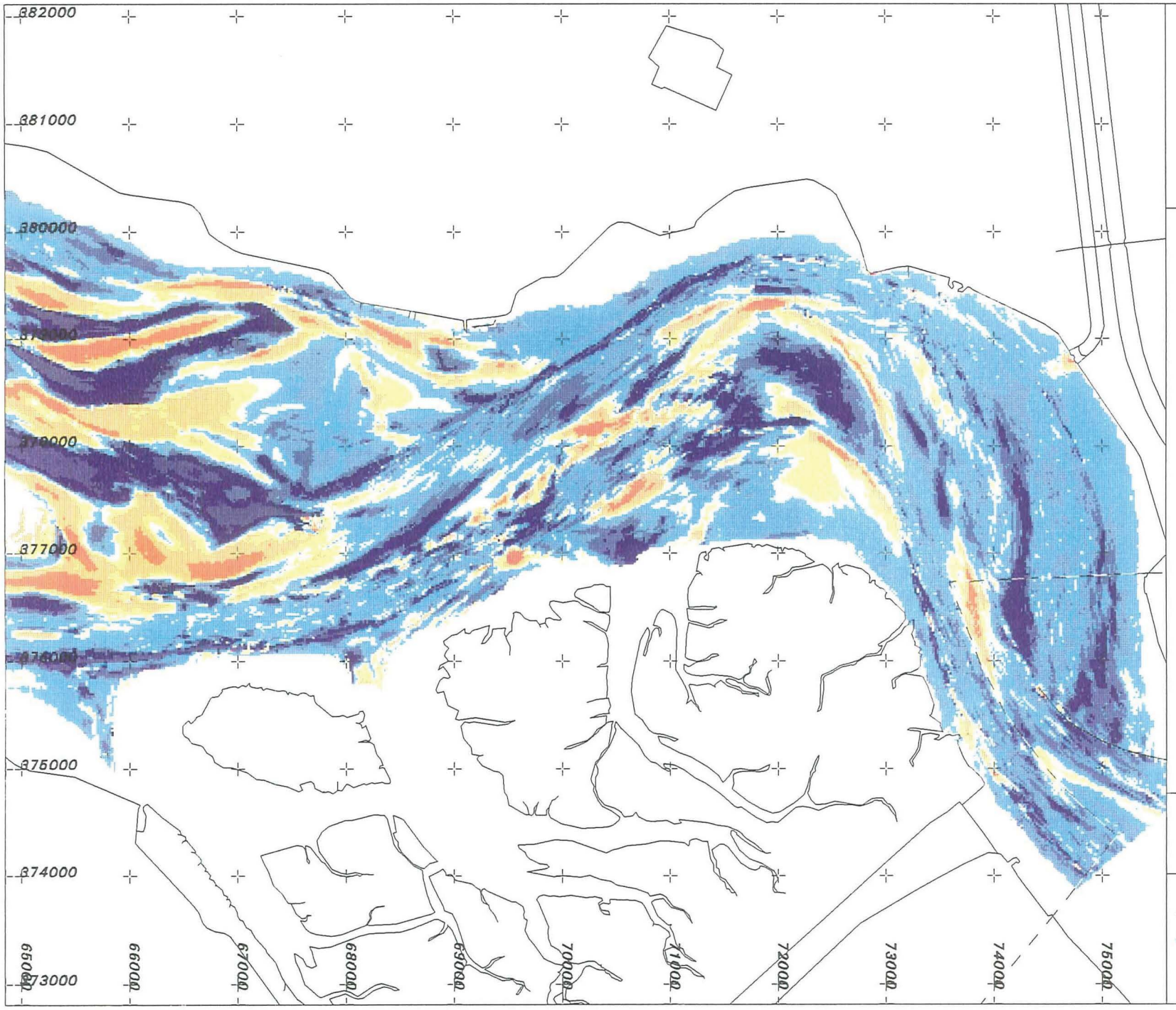
Bijlage 32: Concentratie op 20cm boven de bodem, maximum vloedstroom [kg/m^3]



Bijlage 33: Correctie op de concentratie op 20cm boven de bodem, wegens naijling [kg/m^3]



Bijlage 34: Bodemverandering na 1 springtij [m], voor het transport met het Rouse-profiel.



Drempel van Bath en Valkenisse

Sedimentatie 1993 - 1996

Legenda

meters

- 10.29 t/m 2.51
- 2.5 t/m 1.01
- 1 t/m 0.51
- 0.5 t/m 0.21
- 0.2 t/m -0.19
- -0.2 t/m -0.49
- -0.5 t/m -0.99
- -1 t/m -2.49
- -2.5 t/m -13.78

Schaal: 1:50.000

VERDIEPING

Rijksinstituut voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat