SVASEK HYDRAULICS
COASTAL, HARBOUR AND RIVER CONSULTANTS

Buitendijks natuurherstel in de Westerschelde

Onderzoek naar de “kansrijk mits” projecten

Definitief

GD/09105/1526/D

20 juli 2009



SVASEK HYDRAULICS

Schiehaven 13G
3024 EC Rotterdam
Postbus 91
3000 AB Rotterdam
Nederland
T +31 - 10 - 467 13 61
F +31 - 10 - 467 45 59
E info@svasek.com
I www.svasek.com

Document titel	Buitendijks natuurherstel in de Westerschelde Onderzoek naar de “kansrijk mits” projecten
Verkorte Titel	Natuurherstel Hoofdplaatpolder en Ossenisse
Status	Definitief
Datum	20 juli 2009
Project naam	
Project nummer	1526
Opdrachtgever	Provincie Zeeland
Referentie	GD/09105/1526/D

Auteur Gerard Dam

Gecontroleerd door Bram Bliek

SVASEK HYDRAULICS

INHOUDSOPGAVE

			Pag.
1	INLEIDING		3
	1.1	Algemeen	3
	1.2	Modelinstrumentarium	3
	1.3	Samenvatting uitkomsten vorige studie	4
	1.4	Leeswijzer	5
2	HET MORFODYNAMISCH MODEL “FINEL2D”		6
	2.1	FINEL2d	6
	2.2	Het Westerschelde model	6
	2.3	Beschrijving werking zand/slib model binnen FINEL2d	7
	2.4	Overlaatformulering binnen FINEL2d	8
	2.5	Gedetailleerde modellering van interessegebieden binnen FINEL2d	9
3	PROJECTGEBIED HOOFDPLAATPOLDER		10
	3.1	Inleiding	10
	3.1.1	Uitkomsten vorige studie	10
	3.1.2	Alternatieven	11
	3.2	Validatie morfologische ontwikkelingen 2003-2007	11
	3.3	Alternatief H1a, H1b, H1c: dammen op 1, 2 en 3m boven maaiveld	12
	3.4	Alternatief H2: hoogte dam verlopend van 1m tot 2m boven maaiveld	13
	3.5	Alternatief H3: als H2 met een derde westelijke dam	13
	3.6	Stroomsnelheden	13
	3.7	Oppervlak laagdynamisch gebied en areaalontwikkeling	14
	3.8	Debieten	14
	3.9	Kosten	15
	3.10	Samenvatting uitkomsten	15
	3.11	Conclusies	16
4	PROJECTGEBIED OSSENISSE		18
	4.1	Inleiding	18
	4.1.1	Uitkomsten vorige studie	18
	4.1.2	Alternatieven	19
	4.2	Validatie morfologische ontwikkelingen 2003-2007	20
	4.3	Alternatief O1a en O1b: verlaagde dammen met uitbouw in 3 fasen	20
	4.4	Alternatief O2a, b, & c: verlaagde dammen op -4m, -2m en 0m NAP	21
	4.5	Alternatief O3: dammen op 0m NAP en westelijke dam ingekort	22
	4.6	Alternatief O4: dammen op 0m NAP en westelijke geul opgevuld	22
	4.7	Stroomsnelheden	22
	4.8	Oppervlak laagdynamisch	23
	4.9	Debieten	24

4.10 Kosten 24
4.11 Samenvatting uitkomsten 25
4.12 Conclusie 26

5 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN 27
5.1 Conclusies 27
5.2 Aanbevelingen voor de pilot studie 28

REFERENTIES 29

AANBEVELINGEN VAN DE WERKGROEP "BUITENDIJKS NATUURHERSTEL"

Onder begeleiding van een ambtelijke werkgroep is door Svasek hydraulics onderzoek verricht naar de mogelijkheden van buitendijks natuurherstel in de Westerschelde.
De conclusies van het onderzoek zijn vastgelegd in 2 rapportages t.w.:

- Buitendijks natuurherstel verkenning naar de mogelijkheden d.d. 19 juni 2008 en
- Buitendijks natuurherstel uitwerking nevengeulprojecten d.d. 6 juli 2009.

De ambtelijke werkgroep bestond uit de volgende instanties en personen:

Provincie Zeeland: Henk van Veen, John Beijersbergen
Rijkswaterstaat Directie Zeeland (als inhoudelijk adviseurs[1]): Dick de Jong, Gert-jan Liek
Svasek Hydraulics (als consultants betrokken): Bram Bliek, Gerard Dam

Inleiding

Buitendijks natuurherstel is een manier om bestaande gebieden in de Westerschelde met een lage natuurwaarde zodanig in te richten dat de natuurwaarde verhoogd wordt. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de aanleg en / of ophogen van kribben, waardoor de stroomsnelheden afnemen en er zand- en slibafzetting plaatsvindt. Dit sediment is een noodzaak voor het creëren van de gewenste habitat: slikken en schorren. De kribben veroorzaken een contractie van de stroming rond de kop ervan. Deze stroomcontractie zorgt voor een erosie van de bodem ter plekke en in de omgeving. In het algemeen geldt dat hoe groter en hoger de kribben hoe meer stroomcontractie (en dus verstoring in de omgeving) zal plaatsvinden, maar ook hoe meer sedimentatie zal plaatsvinden in de gebieden tussen en naast de kribben. Er zal dus een evenwicht gevonden moeten worden tussen beide processen voor een optimaal resultaat.

Standpunt van de werkgroep:

De werkgroep is van mening dat buitendijks natuurherstel zoals hier is onderzocht een goede manier kan zijn om natuurherstel in de Westerschelde te creëren. Door de werkgroep zijn 5 gebieden geselecteerd waarbij een lage natuurwaarde omgezet kan worden in hogere natuurwaarde, te weten:

- de veenbankprojecten Bath, Baalhoek, en Knuitershoek, en
- de nevengeulprojecten Hoofdplaatpolder en Schaar van Ossenisse.

Uitgangspunt bij het inrichten van de gebieden is dat er een minimale verstoring in de rest van de Westerschelde mag plaatsvinden door de aanleg van de kribben, terwijl wel op redelijke schaal natuurherstel dient plaats te vinden. Middels de hierboven genoemde onderzoeken, op basis van computermodellen, wordt in de rapportages van Svasek geconstateerd dat bij de veenbankprojecten de neveneffecten bij de aanleg van niet overstroombare strekdammen minimaal en derhalve acceptabel zullen zijn (rapportage 1) en dat bij de nevengeulprojecten de ongewenste neveneffecten –via een gefaseerde aanleg en beperking van de hoogte van de aan te leggen strekdammen- kunnen worden gemilderd (rapportage 2). In de praktijk zal met name de hoogte en de lengte van de kribben de stuurparameter zijn waarmee gewerkt zal worden om een maximale oppervlakte aan natuurherstel te bewerkstellingen.

[1] Beide werkgroepleden treden als inhoudelijk adviseur vanuit Rijkswaterstaat richting de provincie op. Zij ondersteunen het advies op inhoudelijke gronden, maar hierbij is nog geen beheerders standpunt door Rijkswaterstaat aangegeven.

Voor alle projecten dient een meetprogramma opgezet te worden om te kijken of de gewenste afzetting van sediment ook daadwerkelijk plaatsvindt. Mocht blijken dat de gewenste afzetting van zand en slib in onvoldoende mate optreedt dan zullen de dammen verhoogd moeten worden. Mocht (vrijwel) uitsluitend slib worden afgezet dan moet worden overwogen om de dammen alsnog wat lager te maken.

Advies van de werkgroep voor het vervolg:
De werkgroep adviseert een stapsgewijze uitvoering waarbij eerst 2 pilotprojecten worden uitgevoerd en gemonitord en pas in een later stadium, afhankelijk van de hiermee bereikte resultaten, een besluit wordt genomen over de wijze van uitvoering en fasering van de overige 3 projecten.
Het advies van de werkgroep voor het concrete vervolg van de buitendijkse maatregelen is dan om eerst een pilotproject uit te voeren voor een veenbankproject (Baalhoek) en voor een nevengeulproject (Hoofdplaat). Daartoe dient in eerste instantie de optimale hoogte van de kribben vastgesteld te worden en een ontwerp te worden gemaakt, waarna tot uitvoering kan worden overgegaan. Deze pilot projecten moeten via metingen worden gevolgd zodat hieruit optimaal geleerd kan worden voor de uitvoering van de andere projecten. Tevens dient te worden vastgesteld op welk moment de ongewenste neveneffecten te groot worden, zodat met ophoging van de dammen dient te worden gestopt, of wellicht de dammen dienen te worden verlaagd. Deze begrenzing zal in het monitoringsprogramma worden opgenomen en gedefinieerd.
De verwachting is dat na 12 maanden na de uitvoering van de eerste fase de eerste conclusies getrokken kunnen worden. Nadat gebleken is dat het pilotproject positieve resultaten geeft, kan gestart worden met de andere natuurherstel gebieden. De andere projecten kunnen wel al zoveel als mogelijk worden voorbereid zodat op redelijk korte termijn een ontwerp van de kribben gemaakt kan worden en de benodigde uitvoeringsvergunningen worden aangevraagd.
Voordat met de uitvoering van project Ossenisse kan worden overgegaan dient er uitsluitsel te zijn van de giertijberekening van WL Borgerhout. De ze berekening wordt uitgevoerd op basis van de maximale effecten, waarmee naar alle waarschijnlijkheid kan worden vastgesteld dat met vrij is in de keuze van het alternatief dan uitgevoerd zal worden. Bij het uitbrengen van voorliggende rapportage zijn de resultaten nog niet bekend.

Nadrukkelijk wordt gesteld dat het besluit over de exacte uitvoeringsmethode en fasering van de overige projecten pas in een later stadium zal worden genomen als de eerste resultaten van de pilots bekend zijn..

1 INLEIDING

1.1 Algemeen

In het voorjaar van 2008 heeft Svasek Hydraulics een studie uitgevoerd naar buitendijks natuurherstel in de Westerschelde (Svasek, "Buitendijks natuurherstel in de Westerschelde", GD/08187/1480/C) deel 1. Uit deze studie zijn een aantal kansrijke gebieden voor natuurherstel naar voren gekomen door de aanleg van strekdammen. De gebieden Hoofdplaatpolder en Ossenisse zijn ook kansrijk bevonden, mits de negatieve effecten toelaatbaar geacht worden. Deze negatieve effecten bestaan uit een uitstralend hydraulische en morfologisch effect naar de omliggende geulen en platen.

De Provincie Zeeland heeft Svasek Hydraulics opdracht gegeven om vast te stellen hoe de projectgebieden Hoofdplaatpolder en Ossenisse zodanig in te richten zijn dat er sprake is van natuurherstel (creëren van laagdynamische natuur waarbij sedimentatie plaatsvindt) en waarbij de negatieve morfologische neveneffecten verminderd kunnen worden.

De onderzoeksvraag is als volgt:

"In hoeverre is er bij de projectgebieden Hoofdplaatpolder en Ossenisse een oplossing te bedenken waarbij de negatieve neveneffecten zodanig gereduceerd zijn dat deze aanvaardbaar en beheersbaar geacht worden."

Deelvragen hierbij zijn:
- Hoeveel hectare laagdynamische natuur wordt hier dan mee bewerkstelligd?
- Hoeveel kosten zijn met de aanleg gemoeid?
- Welke stromingen ondervindt de scheepvaart als gevolg van de ingreep?

1.2 Modelinstrumentarium

Om de morfologische reactie van de maatregelen te onderzoeken is gebruik gemaakt van het morfodynamische model FINEL2d. Het model is door Svasek Hydraulics ontwikkeld en uitgebreid gecalibreerd op de waterbeweging en grootschalige (zand)morfologie van de Westerschelde (Svasek, 2006, "Morfodynamische berekeningen van de Westerschelde met behulp van FINEL2d", GD/06119/1339). In het onderzoek naar natuurherstel in de Westerschelde is gebruik gemaakt van een zand-slib interactie model. Dit betekent dat zowel zand als slib bijdragen tot bodemveranderingen in de Westerschelde. Een bodemmodule houdt bij hoeveel zand en slib in de bodem voorkomt. Als het slibgehalte boven 30% komt vindt een overgang plaats van niet cohesief naar cohesief gedrag van de bodem.

Het zand-slib interactie model is gecalibreerd op de ontwikkelingen tussen de strekdammen bij Waarde van de afgelopen jaren. Hieruit komt naar voren dat het model de ontwikkelingen goed kan berekenen.

Evenals in de studie van 2008 wordt voor het berekenen van de effecten bij Hoofdplaatpolder en Ossenisse gebruikt gemaakt van de zand-slib interactie module binnen FINEL2d.

1.3 Samenvatting uitkomsten vorige studie

In deze paragraaf worden de resultaten van de voorgaande studie samengevat (Dam et al., 2008).

Na een analyse van de Westerschelde zijn 7 gebieden geselecteerd die in aanmerking komen voor buitendijks natuurherstel, zie Tabel 1.1. In grote lijnen betreffen de maatregelen de aanleg (uitbreiden/ophogen) van strekdammen in de Westerschelde waardoor hoogdynamische natuur wordt omgezet in laagdynamische natuur. Hierdoor ontstaan slikken en schorren waarop diverse habitats en soorten zich kunnen ontwikkelen.

Na een grondig onderzoek naar potentieel natuurherstel zijn 3 gebieden aangemerkt als “kansrijk” te weten: Bath, Baalhoek en Knuitershoek. Dit zijn gebieden langs de hoofdgeul waarbij intergetijdengebied aanwezig is in de vorm van veenbanken. Deze banken zijn ecologisch weinig waardevol omdat er op dit moment nauwelijks bodemleven kan voorkomen.

Twee gebieden zijn aangemerkt als “kansrijk mits”, te weten Hoofdplaatpolder en Ossenisse. Dit betreffen kleine nevengeulen die aan natuurherstel kunnen bijdragen door het afsluiten van een gedeelte van deze geulen. Deze projecten zijn geclassificeerd als kansrijk, mits ongewenste neveneffecten te voorkomen zijn. Met name ongewenste erosies elders en/ of ongewenste dwarsstromingen in de Westerschelde dienden te worden voorkomen. Om te bezien of de te nemen maatregelen (aan te leggen strekdammen) zo zijn te modelleren dat deze neveneffecten kunnen worden ondervangen is dit vervolgonderzoek ingesteld.

Twee gebieden zijn aangemerkt als niet kansrijk te weten: Zimmermangeul en Saeftinge.

Tabel 1.1: Samenvatting projectgebieden onderzoek 1 d.d. 19 juni "08

Projectgebied	Initieel gerealiseerd laagdynamisch gebied (ha) *	Conclusie maatregel
Baalhoek	61	Zeer kansrijk
Bath	58	Kansrijk
Knuitershoek	22	Kansrijk
Hoofdplaatpolder	54	**Kansrijk mits**
Ossenisse	115	**Kansrijk mits**
totaal	**310**	
Zimmermangeul	166	**Niet kansrijk**
Saeftinge	74	**Niet kansrijk**

** = dit betekent dat op tijdstip 0 gekeken is hoeveel gebied laagdynamisch geworden is als gevolg van de ingreep. Na 10 jaar is gecontroleerd of dit gehele gebied gesedimenteerd is en dat bleek inderdaad het geval te zijn.*

1.4 Leeswijzer

De opbouw van dit rapport is als volgt: Hoofdstuk 2 beschrijft het morfologisch model dat gebruikt is in deze studie. In hoofdstuk 3 worden de uitkomsten van het projectgebied Hoofdplaatpolder beschreven. Hoofdstuk 4 behandelt het projectgebied Ossenisse. Tenslotte worden in hoofdstuk 5 de conclusies weergegeven.

2 HET MORFODYNAMISCH MODEL "FINEL2D"

2.1 FINEL2d

De morfologische berekeningen in deze studie worden uitgevoerd met FINEL2d. Dit is het 2-dimensionale stromingsmodel in het door Svašek Hydraulics ontwikkelde FINEL pakket. Aan het stromingsmodel zijn morfologische modules gekoppeld.

FINEL2d is een numeriek stromingsmodel gebaseerd op de Finite Elements methode en rekent met ongestructureerde roosters in de vorm van driehoeken. De driehoekige elementen kunnen variëren in grootte en vorm. Het grote voordeel is dat men hierdoor vrij is om in de interessegebieden de resolutie te verhogen. Hierdoor vindt de grootste rekeninspanning plaats in de interesse gebieden. Daarnaast kunnen speciale karakteristieken, zoals bijvoorbeeld een strekdam of kustlijn door het flexibele roosterschematisatie proces eenvoudig en exact op de goede positie in het model aangebracht worden.

Zie voor een nadere beschrijving van FINEL2d Appendix A.

2.2 Het Westerschelde model

De basis voor deze studie is het bestaande morfologisch FINEL2d model van de Westerschelde. In Dam (2006) is beschreven hoe dit model is opgezet, gecalibreerd en gevalideerd, zie ook Dam et al. (2007). Hier volgt een korte samenvatting.

Als eerste stap in het opzetten van het model is uitgebreid gekeken naar de waterbeweging. Hierbij is het ruwheidsveld van het model zodanig geoptimaliseerd dat de waterstanden in de Westerschelde vrijwel overal binnen 10 cm nauwkeurig berekend kunnen worden. Ook is gekeken naar de debietverdelingen binnen de geulen, waarbij geconcludeerd werd dat het model deze goed berekent. Verder is gekeken naar stroomsnelheden op slikken. Uit metingen op de slikken Baarland, Zuidgors, Waarde en Bath blijkt dat het model deze stroomsnelheden redelijk goed weergeeft.

Als tweede stap is het model gecalibreerd op de morfologische ontwikkelingen in de periode 1995-2002. Hierbij zijn de instellingen van het model zodanig gekozen dat de morfologische ontwikkelingen in deze periode zo goed mogelijk gereproduceerd worden. Uit de calibratie blijkt dat het model in staat is om de globale ontwikkelingen van het estuarium te reproduceren. Als calibratie parameters zijn onder andere bodemruwheid en spiraalstroming gebruikt. Het effect van baggeren en storten is in detail meegenomen in het model.

In de derde stap is een validatie van het model uitgevoerd over de periode 1965- 2002, een periode van 37 jaar. Hierbij zijn de modelinstellingen zoals gevonden in de calibratie gebruikt. Ook over deze lange periode vertonen de modelresultaten over het algemeen een redelijke tot goede overeenstemming met de opgetreden morfologische ontwikkelingen in de Westerschelde.

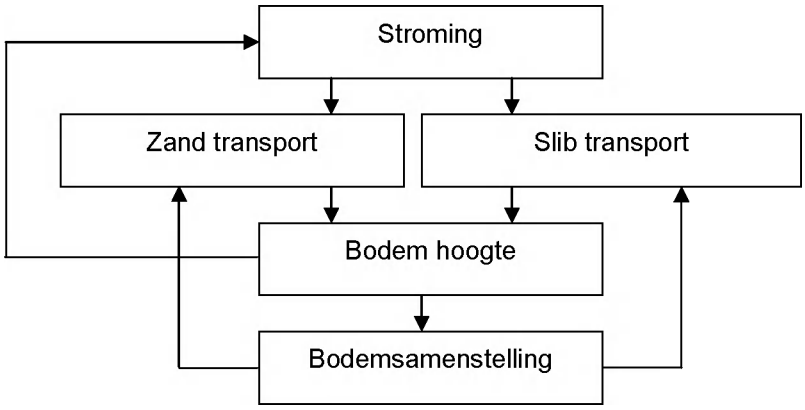
In dit onderzoek wordt als vertrekpunt het bestaande morfologische FINEL2d model van de Westerschelde gebruikt. Dit bestaande model rekent echter alleen met de zand fractie. In de interesse gebieden waar potentieel slikken en schorren ontstaan is slib ook een belangrijke factor, waardoor niet alleen met de zand fractie volstaan kan worden. Daarom wordt er gebruik gemaakt van de zand/slib module binnen FINEL2d. In de volgende paragraaf wordt deze module beschreven.

2.3 Beschrijving werking zand/slib model binnen FINEL2d

Vrijwel alle bestaande proces gebaseerde morfologische modellen rekenen met òf alleen zand òf alleen slib. Nadeel van deze modellen is dat ruimtelijke verdeling van zand en slib en de interactie tussen de fracties niet meegenomen wordt.

Van Ledden heeft tijdens zijn promotie een model ontwikkeld (Van Ledden, 2003) waarin de interactie tussen zand en slib meegenomen kan worden. Er zijn drie belangrijke uitbreidingen ten opzichte van de meeste bestaande morfologische modellen. Ten eerste dragen zowel zand als slib bij tot een bodemverandering in het model. Ten tweede worden bodemsamenstellingsvariaties in tijd en ruimte meegenomen. Ten derde is de uitwisseling van sediment tussen de bodem en de waterkolom afhankelijk van de sedimentsamenstelling van het bodemoppervlak. Het is bijvoorbeeld bekend dat de erodeerbaarheid van zand afneemt als slib toegevoegd wordt.
Daarom is het FINEL2d pakket uitgebreid met een zand-slib module volgens van Ledden (2003). Ervaringen met dit zand-slib model zijn onder andere opgedaan in de Haringvlietmonding (Dam, 2004). In Paarlberg et al (2005) is een vergelijkbaar zand-slib model toegepast op de Paulinapolder in de Westerschelde.

In Afbeelding 4.1 is de werking van de zand/slib module schematisch weergegeven.



Afbeelding 4.1 : Opzet van het zand-slib model volgens Van Ledden, 2003

Zand-slib interactie is belangrijk voor de intergetijdengebieden in de Westerschelde omdat op die plekken een sterke afwisseling van niet-cohesief en cohesief materiaal aanwezig is. In de diepe geulen zit relatief veel zand in de bodem, terwijl de ondiepe delen langs de dijk slibrijk zijn. Deze afwisseling impliceert dat beide sedimentfracties in rekening gebracht moeten worden om de morfologische ontwikkeling van deze

gebieden goed te kunnen voorspellen. Daarnaast speelt voor het ecologisch functioneren van het systeem de zand-slibverhouding in de bodem een essentiële rol. Afhankelijk van de zand/slibverhouding kunnen bepaalde vegetatie en organismen juist wel of niet voorkomen. Veranderingen daarin kunnen dus sterke gevolgen hebben voor het ecosysteem.
Samenvattend: een zand/slibmodel brengt beide fracties in rekening en zal dus beter aansluiten bij de morfologische veranderingen dan een één-fractiemodel. Verder kan zo'n model ook een uitspraak doen over de te verwachten zand/slibverhouding wat van belang is voor de ecologie.

De toegepaste formuleringen van het zand/slib model zijn in dit geval de Engelund-Hansen sedimenttransportformule voor zand (Engelund & Hansen, 1967) en de Krone (1962) en Partheniadis (1965) formulering voor depositie en erosie van slib. In het model wordt bijgehouden welk percentage slib op welke hoogte in de bodem aanwezig is. Er wordt een mengingscoëfficiënt gedefinieerd die ervoor zorgt dat de sedimentfracties door de bodemlagen heen kunnen bewegen. Dit gebeurt in werkelijkheid o.a. door bioturbatie en de invloed van bedvormen.

Indien het slibpercentage van de toplaag van de bodem boven een bepaald percentage komt dan vindt een overgang plaats van niet-cohesief naar cohesief gedrag van sediment in het model. In de meeste Nederlandse estuaria ligt dit rond een percentage van 30% (van Ledden, 2003). Het suspensie transport van zand in de cohesieve fase is afhankelijk van kritische schuifspanningen volgens dezelfde formuleringen als Krone en Partheniadis. Voor zand en slib gelden dan dezelfde kritische schuifspanningen. Hoeveel zand en slib er in suspensie gebracht wordt in het model als de kritische schuifspanning voor erosie wordt overschreden is vervolgens weer afhankelijk van het zand/slibpercentage in de toplaag.

Zie Appendix A voor een verdere beschrijving van het zand/slib model.

In Dam et al. (2008) is een calibratie van het model uitgevoerd op het gebied “Waarde”, alwaar een sterke opslibbing van het gebied heeft plaatsgevonden na de aanleg van 2 strekdammen.

2.4 Overlaatformulering binnen FINEL2d

Een overlaat is een constructie in het water dat zorgt voor contractie van het water en energie verlies. Overstroomde dammen zijn ook overlaten die energie verlies veroorzaken. Het is mogelijk om deze dammen in de bodem schematisatie van het model mee te nemen, maar de breedte van de dam moet dan in dezelfde orde grootte zijn als de gridgrootte of het rooster moet ter plaatse verfijnd worden. In deze gevallen wordt de berekening langzamer door deze kleine elementen in het rooster. Een ander nadeel van de bathymetrie oplossing is de onnauwkeurigheid van de berekening van het energieverlies over de dam.

Daarom is in FINEL2d gekozen om overlaten te definiëren op de randen van een driehoek. Op deze rand wordt een empirische debiet formule gebruikt als interne randvoorwaarde. Deze emprische formule berekent het debiet op basis van de stroomcondities en de vorm van de overlaat. Op deze manier is de rooster grootte niet van belang en wordt een nauwkeurige oplossing verkregen. Zie verder Appendix B.

2.5 Gedetailleerde modellering van interessegebieden binnen FINEL2d

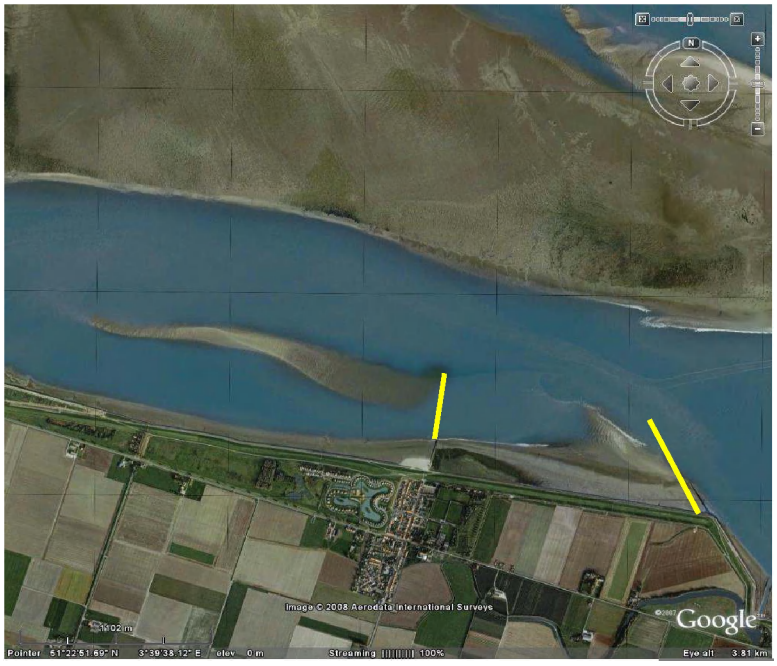
Een groot voordeel van FINEL2d is de toepasbaarheid in interessegebieden waarbij het rooster sterk verfijnd is zoals in deze opdracht. Het nesten van modellen is hierdoor niet nodig. Er gelden geen numerieke criteria voor het verfijnen van roosters. De tijdstap van het numerieke model wordt wel kleiner naarmate de roosters fijner zijn, maar door de automatische tijdstap bepaling van dit model is dit ondervangen, zodat stabiliteit van het model gewaarborgd is.

3 PROJECTGEBIED HOOFDPLAATPOLDER

3.1 Inleiding

3.1.1 Uitkomsten vorige studie

De oeverzone bij Hoofdplaatpolder biedt kansen voor natuurherstel door de aanleg van twee strekdammen, zie Afbeelding 3.1. Modelresultaten laten zien dat er een groot extra intergetijdengebied gecreëerd kan worden door het natuurlijk laten sedimenteren van het gebied tussen en ten westen van de strekdammen (Dam et al, 2008). De dammen die beschouwd zijn in deze studie liggen boven hoogwater zodat deze nooit overstroomd worden. Door de luwte die de dammen creeëren zijn er mogelijkheden voor slikontwikkeling direct aan de geul. Aan de dijk zijn er mogelijkheden om het bestaande schorgebied uit te laten breiden. De kosten van een dergelijk alternatief worden geschat op 3.400.000 Euro. Door de ingreep vindt er extra sedimentatie plaats over een gebied van ongeveer 140 hectare. Binnen deze 140 hectare is initieel 54 hectare extra laagdynamisch gebied gecreëerd.
De geul het “Vaarwater langs Hoofdplaat” waaraan het intergetijdengebied ligt erodeert als gevolg van de toegenomen snelheden. Ook is niet uit te sluiten dat de Hoge Platen een effect van de strekdammen zullen ondervinden. De hoog dynamische plaat tussen het “Vaarwater langs Hoofdplaat” en het afgesloten vloedschaartje verdwijnt.



Afbeelding 3.1: Projectgebied Hoofdplaatpolder met voorstel voor ingreep (geel) ; Bron: Google Earth

De negatieve neveneffecten van de maatregel op het “Vaarwater langs Hoofdplaat” en de Hoge Platen zijn aanzienlijk. In dit vervolgonderzoek wordt door middel van een optimalisatie proces de ligging, hoogte en lengte van de dammen verbeterd. Ook wordt de hoogte van het slikken- en schorrengebied geoptimaliseerd, met als doel de negatieve effecten terug te brengen.

3.1.2 Alternatieven

Om de negatieve effecten van de oorspronkelijke maatregel waarbij de dammen tot een hoogte boven hoogwater zijn beschouwd te verminderen, worden in deze studie de volgende alternatieven bekeken:

Tabel 3.1: Overzicht alternatieven (H = Hoofdplaatpolder)

Alternatief	Beschrijving
H0	Dammen nooit overstroomd (vorige studie)
H1a	Dammen op 1m boven maaiveld (§ 3.3)
H1b	Dammen op 2m boven maaiveld (§ 3.3)
H1c	Dammen op 3m boven maaiveld (§ 3.3)
H2	Hoogte dammen verlopend van 1m tot 2m boven maaiveld (§ 3.4)
H3	Als H2, maar met extra westelijke dam(§ 3.5)

De alternatieven H1a,b en c hebben in hoogte variërende dammen. Hierbij wordt de overlaatformulering binnen FINEL2d gebruikt voor het berekenen van de effecten van deze dammen, zie paragraaf 2.4. Door het variëren van de hoogte wordt inzicht verkregen in welke hoogte optimaal is voor dit gebied om enerzijds sedimentatie te bewerkstelligen en anderzijds de uitstralende effecten te minimaliseren.

Alternatief H2 is een vervolg op de alternatieven H1a,b en c waarbij een verlopende hoogte aangehouden is.

Alternatief H3 is gelijk aan H2, maar met een extra westelijke dam die het vloedschaartje verder afsluit. Het doel hiervan is om te kijken of er meer hectares natuurherstel bewerkstelligd kunnen worden met de aanleg van een derde dam.

De alternatieven worden 10 jaar morfolologisch doorgerekend.

De alternatieven worden in de paragrafen hieronder verder besproken nadat eerst de gedetailleerde validatie van het model op de lokale morfologische ontwikkelingen is behandeld.

3.2 Validatie morfologische ontwikkelingen 2003-2007

Om inzicht te verkrijgen hoe het morfologisch model presteert in het interessegebied van Hoofdplaatpolder is een validatie uitgevoerd van het model op de morfologische ontwikkelingen van 2003 tot 2007. De bovenste afbeelding van Figuur 3.1 laat de gemeten morfologische ontwikkeling zien van 2003 tot 2007. De onderste afbeelding geeft de ontwikkelingen zoals die berekend zijn door FINEL2d.

Het interessegebied betreft het Vaarwater langs Hoofdplaat. Deze geul is van 2003 tot 2007 in de diepere delen aangezand. Verder is de geul zich aan het invreten in de Hoge Platen zoals te zien is in de bovenste afbeelding van Figuur 3.1. Het model kan dit verschijnsel in beperkte mate reproduceren. De aanzanding van de geul tussen X-km 33 en 36 berekent het model niet, maar de sedimentatie op de geulsecties X-km 31 en km 36.5 gaat wel goed. Het insnijden van de geul in de Hoge Platen komt gedeeltelijk terug in het model. Vooral bij X-km 32 is de insnijding terug te vinden. Verder is er een neiging van de Schaar van Spijkerplaat om door te breken richting de Pas van Terneuzen (blauwe vlek op Y-km 382). Ook deze trend komt terug in het model. Ten noorden van en op de Hoge Platen is een sterke sedimentatie te zien in het model, welke niet in werkelijkheid voorkomt. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat er niet met golfwerking gerekend wordt in dit model. Voor de beschutte geul van het Vaarwater langs Hoofdplaat is dit aanvaardbaar, maar aan de noordkant van de Hoge Platen zijn de golven niet verwaarloosbaar.

Geconcludeerd kan worden dat het model de ontwikkelingen in beperkte mate kan reproduceren. Het doorbreken van de Schaar van Spijkerplaat reproduceert het model goed, alsmede de sedimentatie van een aantal kleine delen van het Vaarwater langs Hoofdplaat. De insnijding in de Hoge Platen kan het model gedeeltelijk reproduceren. De belangrijkste trend die niet goed berekend wordt is de natuurlijke aanzanding in het midden van het Vaarwater langs Hoofdplaat. Voor het vervolg dient dan ook rekening gehouden te worden met extra sedimentatie in deze geul.

3.3 Alternatief H1a, H1b, H1c: dammen op 1, 2 en 3m boven maaiveld

Als eerste wordt onderzocht wat de effecten zijn als de dammen verlaagd aangelegd worden ten opzichte van het H0 alternatief, zie Afbeelding 3.1. Gekozen is voor een systematische aanpak door 3 alternatieven te beschouwen met een hoogte van 1, 2 en 3 m boven het maaiveld. Deze alternatieven zijn aangeduid met respectievelijk H1a, H1b en H1c. De start bodemligging is weergegeven in Figuur 3.2 (geldt voor alle alternatieven van dit hoofdstuk). De uitkomsten van de bodemligging en slibgehaltes in de bodem zijn te zien in de figuren 3.3, 3.4 en 3.5 voor de 3 alternatieven. De relatieve bodemontwikkeling (berekende bodemontwikkeling van het alternatief minus de autonome bodemontwikkeling) is te zien in de figuren 3.8, 3.9 en 3.10.

Uit de figuren komt duidelijk het beeld naar voren dat hoe hoger de dammen hoe meer sedimentatie optreedt tussen en rond de dammen en hoe meer erosie rond de kop van de dammen. Dus hoe hoger de dammen hoe meer luwtegebied gecreëerd wordt tussen de dammen. Dit is ook te zien in de slibgehaltes in de bodem (figuren 3.3, 3.4 en 3.5). Bij hogere dammen neemt ook de sedimentatie van slib toe waardoor het slibgehalte in de bodem toeneemt. In alternatief H1c is een grote depositie van slib te zien tussen de 2 dammen.

Uit de relatieve bodemontwikkeling blijkt dat door de dammen overstroomd te maken de negatieve uitstralende effecten verminderen ten opzichte van nooit overstroomd (H0 alternatief). De grootte van de erosie rond de kop van de dammen is duidelijk afhankelijk van de hoogte van de dammen. Met andere woorden: het negatieve uitstralende effect van de aanleg van de dammen is te mitigeren door de hoogte van de dammen te verlagen.

3.4 Alternatief H2: hoogte dam verlopend van 1m tot 2m boven maaiveld

Als tussenvorm is alternatief H2 opgezet, waarbij de hoogte van de dammen varieert van 1m boven het maaiveld bij de dijkkant tot 2m boven het maaiveld aan de geulzijde. Hierdoor wordt de hoogte van de dammen op een constanter niveau gebracht doordat het maaiveld afloopt naar de geul toe. Het uiteinde van de oostelijke dam heeft een hoogte van 1.7m onder NAP. Het uiteinde van de westelijke dam heeft een hoogte van 0.9m onder NAP. Ook is het meest noordelijke uiteinde van de oostelijke dam iets ingekort waardoor de stroomcontractie iets minder wordt.

De resultaten van dit alternatief zijn te vinden in de figuren 3.6 (bodemligging en slibgehalte in de bodem) en 3.11 (relatieve bodemontwikkeling).

Uit de resultaten blijkt dat de bodemontwikkeling en slibgehalte van dit alternatief ligt tussen alternatief H1a en H1b. Dus door de hoogte van de dam verlopend te maken van 1 tot 2m boven het maaiveld ontstaat een tussenvorm.

3.5 Alternatief H3: als H2 met een derde westelijke dam

Alternatief H3 bestaat uit alternatief H2, maar met een extra derde westelijke dam, zie figuur 3.7 voor de locatie van deze dam. De hoogte van deze dam is vast aangenomen aan het uiteinde van de middelste dam, namelijk 90cm onder NAP.

De resultaten van dit alternatief zijn te vinden in de figuren 3.7 (bodemligging en slibgehalte in de bodem) en 3.12 (relatieve bodemontwikkeling).

Het morfologische effect van dit alternatief is fors. Tussen de dammen vindt een flinke sedimentatie plaats en is er sprake van extra intergetijdengebied en natuurherstel. Deze sedimentatie strekt zich uit tot een aantal kilometers westelijk van de meest westelijke dam (figuur 3.12). De erosie in het Vaarwater langs Hoofdplaat concentreert zich met name bij de meest westelijke dam. Hier ontstaat een erosiekuil aan de kop van de dam. Ten opzichte van alternatief H2 is het uistralende effect in het Vaarwater langs Hoofdplaat nu meer geconcentreerd in het westelijke deel van de geul.

3.6 Stroomsnelheden

De stroomsnelheid tijdens maximum vloed en eb van de referentie situatie is getoond in Figuur 3.13. Het betreft hier een springtij situatie met de initiële bodemligging. De stroomsnelheden van alle alternatieven zijn geplot in de figuren 3.14 t/m 3.23. Ook is hierbij het verschil ten opzichte van het referentie alternatief gegeven. Voor alle alternatieven geldt dat er een afname van enkele decimeters per seconde is tussen de dammen. Het effect van de afname van de stroomsnelheid strekt zich 1 tot 2 km uit naar het westen. In het Vaarwater langs Hoofdplaat is een toename van de stroomsnelheid zichtbaar. Naarmate de dammen hoger zijn, zijn de verschillen groter. Bij alternatief H1b en c is neervorming zichtbaar in het gebied tussen de dammen. Alternatief H1c geeft een relatief grote dwarsstroming tijdens de vloed bij de meest westelijke dam. Deze dwarssnelheid wordt als negatief beschouwd voor de scheepvaart. Alternatief H3 met een derde westelijke dam geeft grote afnames in stroomsnelheid in een gebied van 6km langs de dijk. Het Vaarwater langs Hoofdplaat vertoont dan wel verhoogde snelheden van 10 –20 cm/s tijdens vloed. Alternatief H3 geeft geen hinderlijke dwarsstromingen voor de scheepvaart.

3.7 Oppervlak laagdynamisch gebied en areaalontwikkeling

In Tabel 3.2 is het aantal hectares laagdynamisch gebied getoond direct na aanleg van de dammen. Hierbij is van een doodtij-springtij situatie gekeken wat de hoogste snelheid is. De grens van hoog- en laagdynamisch is in de vorige studie gesteld op 0,6 m/s. Daarnaast is in de derde kolom de toename van het aantal hectares intergetijdengebied getoond voor alle alternatieven.

Tabel 3.2: Toename hectares laagdynamisch / intergetijdengebied tov referentie

Alternatief	Oppervlak Laagdynamisch intergetijdengebied na 10 jaar (ha)
H0 (vorige studie)	*54**
H1a	17
H1b	32
H1c	42
H2	22
H3	78

** = Uitkomsten uit vorige studie berekend als: "initieel gecreëerd laagdynamisch gebied", hetgeen naar verwachting overeenkomt met "oppervlak laagdynamisch intergetijdengebied na 10 jaar". Intergetijdengebied is gedefinieerd tussen de -2m en +3 m NAP.*

Het alternatief H0 met nooit overstroomde dammen (dat in de voorgaande studie doorberekend is) geeft initieel een toename van het laagdynamisch gebied van 54 hectare. De alternatieven H1a, b en c laten een toename zien van laagdynamisch intergetijdengebied na 10 jaar van respectievelijk 17, 32 en 42 hectare. Alternatieven H2 en H3 leveren 22 en 78 hectare op. Het blijkt dat door de dammen lager aan te leggen er minder laagdynamisch gebied gecreëerd wordt. Pas na aanleg van de derde dam (alternatief H3) wordt het aantal hectares laagdynamisch gebied meer dan de initiële 54 hectare.

Op het eerste gezicht nemen de hectares natuurherstel af bij de doorgerekende alternatieven H1a,b,c en H2 ten opzichte van het H0 alternatief. Beginnen met lage dammen is in deze gebieden wel de juiste manier om natuurherstel aan te pakken. Enerzijds omdat anders de uitstralende werking te groot wordt in de rest van het gebied, anderzijds omdat een te snelle slibafzetting door hoge dammen niet bevorderlijk is voor de ecologie. Hierbij dient het gebied goed bemeten te worden door middel van een monitoringsprogramma. Mocht blijken dat er onvoldoende laagdynamische natuur gerealiseerd is dan kan door middel van een terugkoppeling besloten worden om de dammen hoger te maken.

3.8 Debieten

Het effect op de debietverdeling is weergegeven in de figuren 3.24 (Vaarwater langs Hoofdplaat) en 3.25 (Restant Westerschelde bestaande uit Schaar van Spijkerplaat en Rede van Vlissingen). Figuur 3.24 toont een kleine afname van het debiet als gevolg van de ingrepen. Alternatief H3 geeft logischerwijs het grootste effect. Op het maximum vloeddebiet is een afname merkbaar van ongeveer 300 m^3/s door het Vaarwater langs Hoofdplaat als gevolg van H3, dit is ongeveer 3% van het totale debiet door deze geul. Deze 300 m^3/s is terug te vinden in de meer noordelijke geulen van de Schaar van

Spijkerplaat en Rede van Vlissingen. Door de schaal van Figuur 3.19 is dit echter niet te zien. Het debiet van 300 m^3/s is een toename van 0,4% van het totaal van deze geulen.

3.9 Kosten

Voor de aanleg van de strekdammen wordt uitgegaan van een stenen dam op een kraagstuk. De kruinhoogte verschilt per alternatief. Bij alternatief H2 wordt de hoogte van de dammen tov het maaiveld gemiddeld aangenomen op 1,5m. Alternatief H3 is alternatief H2 PLUS een extra dam. Deze extra dam staat vermeld in tabel 3.3. De gemiddelde hoogte van de derde dam is aangenomen op 5m boven het maaiveld (de dam moet door een geul van 4m diep). De kosten in de laatste kolom zijn de totale kosten, dus van alle drie de dammen.

De kruinbreedte wordt aangenomen op 2 meter met een talud van 1:2. De totale steenbehoefte per alternatief staat in kolom 2 van Tabel 3.3.

Er is gerekend met eenheidsprijzen voor een kraagstuk (met geotextiel, maar exclusief stortsteen) van EUR 20/m^2. Voor stortsteen, in het werk aangebracht, wordt gerekend met een prijs van EUR 50/m^3 (inclusief alle bijkomende kosten).

De totale kosten van de strekdammen kunnen dan per alternatief uitgerekend worden. Deze staan vermeld in kolom 7 van Tabel 3.3.

Tabel 3.3: Kosten per alternatief (exclusief btw)

Alternatief	Hoogte dam maaiveld	Steen Behoefte (m^3/m')	Lengte dammen (m)	Volume (m^3)	Oppervlak bodem (m^2)	Kosten (k EURO)
h0	*5*	*60*	*1000*	*60000*	*22000*	*3400*
h1a	1	4	1000	4000	6000	300
h1b	2	12	1000	12000	10000	800
h1c	3	24	1000	24000	14000	1500
h2	1,5	7,5	1000	7500	8000	500
h3	5	60	500	30000	11000	2300

De kosten zijn indicatief. Kosten van ontwerp, toezicht en monitoring zijn niet in deze kosten begrepen, evenals een post voor onvoorziene kosten (bij voorbeeld bij lokaal grotere aanlegdiepten dan in dit rapport aangenomen). Aanbevolen wordt vooralsnog een marge van 50% aan te houden. In het vervolg dient een nauwkeurigere kosteninschatting gemaakt te worden.

3.10 Samenvatting uitkomsten

Tabel 3.4 vat de uitkomsten van de verschillende alternatieven samen. De kosten komen uit Tabel 3.3, de oppervlaktes uit Tabel 3.2.

Bij de effecten van de erosie is alternatief H0 als negatief beschouwd (- - -), vanwege de grote uitstralende werking. Alternatief H1a, b en c hebben een oplopende hoogte van de dammen en daarmee ook oplopende negatieve effecten op erosie elders (0, - en - -). Alternatief H2 is voor het erosiepatroon vergelijkbaar met alternatief H1b, dus krijgt ook

een – waardering. Alternatief H3 wordt als iets negatiever gewaardeerd als H2 en krijgt dus een - - waardering.

Voor de stroomsnelheid geldt dat alleen Alternatief H0 en H1c negatieve dwarsstromingen veroorzaken voor de scheepvaart en worden als negatief (- -) beoordeelt. De overige alternatieven worden op dit punt neutraal (0) gewaardeerd.

Tabel 3.4: Scoringstabel alternatieven Hoofdplaatpolder (absoluut)

Criterium \ Alternatief	H0	H1a	H1b	H1c	H2	H3
Kosten (k EURO)	3400	300	800	1500	500	2300
Oppervlak winst (ha)	54	17	32	42	22	78
Effecten erosie elders	- - -	0	-	- -	-	- -
Stroomsnelheid(scheepvaart)	- -	0	0	- -	0	0
Kosten per hectare natuurwinst (k EURO)	63	18	25	36	23	29

In tabel 3.5 is dezelfde scoringstabel nogmaals weergegeven, maar nu relatief ten opzichte van de basisvariant H0. Hieruit blijkt dat alle alternatieven die in dit onderzoek zijn beschouwd beter scoren dan het basisalternatief op kosten, op erosie-effecten elders en op stroomsnelheid. Bij het punt oppervlaktewinst (ha's natuurherstel) scoren de alternatieven H1A t/m H2 slechter dan het basisalternatief, en scoort Alternatief H3 beter.

Tabel 3.5: Scoringstabel alternatieven Hoofdplaatpolder (t.o.v. H0)

Criterium \ Alternatief	H0	H1a	H1b	H1c	H2	H3
Kosten (k EURO)	3400	-2900	-2600	-1900	-2900	-1100
Oppervlak winst (ha)	54	-37	-22	-12	-32	+24
Effecten erosie elders	0	+++	++	+	++	+
Stroomsnelheid(scheepvaart)	0	++	++	0	++	++
Kosten per hectare natuurwinst (k EURO)	63	-45	-38	-27	-40	-34

3.11 Conclusies

Door twee dammen te plaatsen op de locatie Hoofdplaatpolder met een hoogte boven hoogwater is in de voorgaande studie gevonden dat er aanzienlijke uitstralende morfologische effecten in de omliggende omgeving te vinden waren. Tussen de dammen vond sedimentatie plaats en was er sprake van natuurherstel. In deze studie is aangetoond dat door de dammen overstroomd te maken er ook natuurherstel plaatsvindt tussen de dammen, maar dat de negatieve uitstralende effecten aanzienlijk verminderd worden. Door de aanleg van een extra derde westelijke dam ontstaat extra natuurherstel, maar de uitstralende effecten nemen daardoor enigszins toe.

Het aantal hectares natuurherstel is bij de meeste onderzochte alternatieven minder groot dan in de voorgaande studie. Echter door de dammen overstroomd te maken is het mogelijk om de siltatie van het gebied geleidelijker te laten verlopen in de tijd. Een (te) grote aanslibbingsnelheid zoals bij de strekdammen van Waarde kan hiermee vermeden worden. Ook worden hiermee uitstralende effecten in de rest van het Vaarwater langs Hoofdplaat zoveel mogelijk vermeden.

Mocht blijken in de praktijk dat er door de ingreep onvoldoende natuurherstel plaatsvindt dan kunnen de dammen verder verhoogd worden.
Bij de aanleg van een derde dam neemt het aantal ha's natuurherstel aanzienlijk toe. De derde dam heeft dus een gunstig effect. Evenals bij de bepaling van de hoogte van de dammen wordt aanbevolen om ook het aantal dammen niet in één keer aan te leggen. Een geleidelijke aanpak verdient de voorkeur, waarbij het eindbeeld gevormd wordt door alternatief H3 (drie dammen). Monitoring van het gebied na aanleg van de dammen is hierbij essentieel.

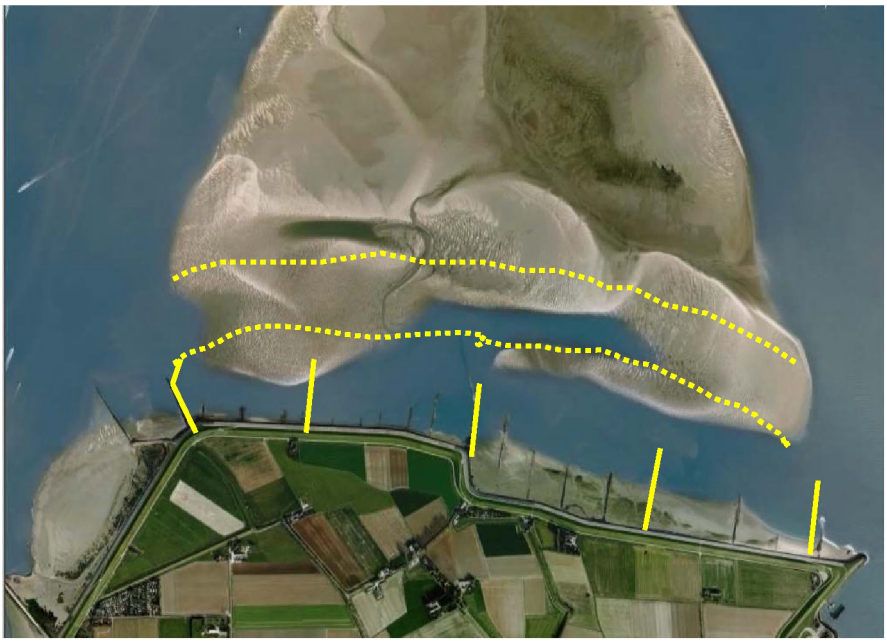
De effecten op de stroomsnelheden blijven beperkt tot het Vaarwater langs Hoofdplaat en bedragen maximaal enkele dm/s. Het debiet van het Vaarwater langs Hoofdplaat neemt maximaal met 3% af (alternatief H3). De geulen in de omgeving laten hierdoor een toename van het debiet zien met maximaal 0,4%, hetgeen aanvaardbaar wordt geacht.

4 PROJECTGEBIED OSSENISSE

4.1 Inleiding

4.1.1 Uitkomsten vorige studie

De Schaar van Ossenisse is een kortsluitgeul in het midden van de Westerschelde. Deze geul biedt kansen voor natuurherstel door de aanleg van vijf strekdammen, zie Afbeelding 4.1. Modelresultaten laten zien dat er een groot extra intergetijdengebied gecreëerd kan worden door het natuurlijk laten sedimenteren van het gebied tussen de strekdammen (Dam et al, 2008). De aanleg, cq het verlengen/ophogen van een vijftal strekdammen in de Schaar van Ossenisse heeft tot gevolg dat de oorspronkelijke geul sterk sedimenteert. Deze dammen zijn in eerste instantie doorgerekend met een hoogte tot boven hoogwater. Er ontstaat nieuw intergetijdengebied met kansen voor slik- en wellicht schorontwikkeling. De aanlegkosten van dit alternatief worden geschat op 4 miljoen Euro. Er ontstaat dan een vrij groot aaneengesloten intergetijdengebied van ongeveer 125 hectare waarvan 75 hectare nieuw gecreëerd is door de maatregel. Initieel is 115 hectare extra laagdynamisch gebied gecreëerd. Verwacht wordt dat er nog een geringe toename van het areaal intergetijdengebied zal plaatsvinden na de berekende 10 jaar. Een nieuwe geul ontstaat direct ten noorden van de strekdammen. Het morfologisch effect van deze nieuwe geul strekt zich uit tot in de hoofdgeulen en kan mogelijk tot ongewenste effecten leiden zoals erosie langs de dijk. In het Gat van Ossenisse en op de Drempel van Hansweert vindt volgens het model een verhoogde aanzanding plaats als gevolg van de ingreep. Naar alle waarschijnlijkheid heeft dit (tijdelijk) een verhoogde baggerinspanning tot gevolg om de vaargeul op diepte te houden. Niet uit te sluiten is dat door de nieuwe geul een dwarsstroming ontstaat die hinderlijk is voor de scheepvaart. In dit vervolgonderzoek wordt bestudeerd of deze ongewenste neveneffecten zijn te milderen.



Afbeelding 4.1: Projectgebied Ossenisse met voorstel voor ingreep (geel); Bron: Google Earth

4.1.2 Alternatieven

Om de negatieve effecten te verminderen van het oorspronkelijke alternatief waarbij de dammen tot een hoogte boven hoogwater zijn beschouwd, worden in deze studie de volgende alternatieven bekeken:

Tabel 4.1: Overzicht alternatieven (O = Ossenisse)

Alternatief	Beschrijving
O0	Verlengde dammen nooit overstroomd (vorige studie)
O1a	Verlengde dammen op -1m van oorspronkelijke hoogte; uitbouw in 3 fasen (§ 4.3)
O1b	Verlengde dammen op oorspronkelijke hoogte; uitbouw in 3 fasen (§ 4.3)
O2a	Verlengde dammen op -4m NAP (§ 4.4)
O2b	Verlengde dammen op -2m NAP (§ 4.4)
O2c	Verlengde dammen op 0m NAP (§ 4.4)
O3	Als O2c, maar uiteinde westelijke dam verwijderd (§ 4.5)
O4	Als O2c, maar westelijke geul opgevuld met zand (§ 4.6)
O5	Als O2c, maar met alleen oostelijk deel van de dammen

Het alternatief O1b gaat uit van een verlenging van de dammen met een hoogte zoals deze in de huidige toestand ook zijn. De dammen in de huidige toestand steken 100-200m uit de dijk en hebben een hoogte variërend van -2 tot 0m ten opzichte van NAP. Alternatief O1a gaat uit van een hoogte van de verlengde dammen 1m onder het huidige niveau. De dammen van de alternatieven O1a en O1b worden in 3 stappen uitgebouwd om de geul gedeeltelijk te laten migreren naar het noorden. Deze uitbouwen vinden plaats na 0, 3.3 en 6.6 jaar met respectievelijk 33, 66 en 100% van de totale lengte. De totale duur van de berekening is 10 jaar.

Alternatieven O2a, O2b en O2c houden een constante hoogte van alle verlengde dammen aan van respectievelijk -4m, -2m en 0m ten opzichte van NAP. De dammen worden in een keer aangebracht in het model op 100% van de lengte.

Alternatief O3 is als O2c, maar waarbij het uiteinde van de meest westelijke dam verwijderd is, om zodoende minder stroomcontractie te veroorzaken.

Alternatief O4 is als O2c, maar waarbij het meest westelijke deel van de Schaar van Ossenisse, dat in het alternatief tussen de dammen ligt, opgevuld is met zand. Dit wordt gedaan om te kijken of het sedimentatieproces versneld kan worden in dit gedeelte van de geul.

Alternatief O5 is als O2c, maar zonder de dammen in het westen. Voor dit alternatief worden geen simulaties gedaan, maar simpelweg de uitkomsten van O2c in het oostelijk deel van het gebied genomen.

De alternatieven zullen in de paragraven hieronder verder besproken worden na de validatie van het model op de morfologische ontwikkelingen in het interessegebied van Ossenisse.

4.2 Validatie morfologische ontwikkelingen 2003-2007

Als validatie van het morfologisch model is gekeken hoe het model presteert rond het Ossenisse gebied. Hiervoor is de periode 2003-2007 morfologisch doorgerekend met het bestaande FINEL2d model zoals beschreven in Dam et al., (2008) en met het detailrooster van Ossenisse.

In Figuur 4.1 is de werkelijke bodemontwikkeling (bovenste figuur) en de berekende bodemontwikkeling (onderste figuur) getoond. Het oostelijk deel van de Schaar van Ossenisse toont een sedimentatie in zowel het model als de meting, alhoewel het model iets te grote sedimentatie berekend. Het midden van de Schaar van Ossenisse (rond de middelste dam) laat zowel in het model als de meting een sedimentatie zien rond het diepste gedeelte van de geul. Ten noorden van het westelijk gedeelte van de geul is een sterke erosie te zien in het model, die in mindere mate ook terug te zien is in werkelijkheid. In het model is verder sedimentatie te zien op de Plaat van Ossenisse rond km 59, 381.5. Deze is terug te vinden in de metingen.

Gezegd moet worden dat de harde laag in de Schaar van Ossenisse vlak bij of aan het oppervlak zit. In het model wordt gebruik gemaakt van de harde lagen kartering volgens TNO (Gruiters et al., 2004). Doordat er slechts om de 100m een punt aanwezig is is de interpolatie van deze kartering naar de bodem van het model niet erg nauwkeurig. Hierdoor kunnen verschillen ontstaan. Zo ligt het westelijk deel van de Schaar van Ossenisse direct op de harde laag volgens het model.

De erosie en sedimentatie patronen in de vaargeul worden verder niet beschreven omdat deze sterk beïnvloed worden door menselijke activiteiten zoals baggeren en zandwinning. Dit is verder niet meegenomen in deze modelleer-actie, waardoor eenvoudig verschillen kunnen ontstaan.

Geconcludeerd kan worden dat de erosie en sedimentatie rond de Schaar van Ossenisse redelijk tot goed berekend kunnen worden, hetgeen vertrouwen geeft in de uitkomsten van de berekeningen met de alternatieven.

4.3 Alternatief O1a en O1b: verlaagde dammen met uitbouw in 3 fasen

Het alternatief O1b gaat uit van een verlenging van de dammen met een hoogte zoals deze in de huidige toestand ook zijn. Alternatief O1a gaat uit van een hoogte van de verlengde dammen 1m onder het huidige niveau. De dammen van de alternatieven O1a en O1b worden in 3 stappen uitgebouwd om de geul gedeeltelijk te laten migreren naar het noorden. Deze uitbouwen vinden plaats na 0, 3.3 en 6.6 jaar met respectievelijk 33, 66 en 100% van de totale lengte. De totale duur van de berekening is 10 jaar.

In Figuur 4.2 is de beginbodem van alle alternatieven getoond. Dit is de meest recente gemeten bodemligging.

De figuren 4.3 en 4.5 tonen de bodemligging en de slibgehaltes in de bodem na 10 jaar van alternatief O1a en O1b. Te zien is dat het oostelijk gedeelte langs de dijk sterk sedimenteert met verhoogde slibgehaltes in de bodem. Hier zijn kansen voor slik ontwikkeling aan de geul en wellicht schorontwikkeling dicht bij de dijk. Het westelijk gedeelte van de geul blijft relatief gezien diep. Bij alternatief O1b komt de hoogte van de

bodemligging in de oorspronkelijke geul na 10 jaar op ongeveer -3 a -4m NAP. Er is dus nog geen intergetijdengebied ontstaan. De slibgehaltes in de bodem zijn hier ook nog laag, hetgeen betekent dat de stroomsnelheden nog hoog zijn.

Omdat de bodemontwikkelingen na 10 jaar nog niet in evenwicht zijn is besloten om alternatief O1a door te rekenen tot 20 jaar. Het resultaat hiervan is te zien in Figuur 4.4. In het oostelijke gedeelte van de Schaar van Ossenisse ontstaat tussen jaar 10 en jaar 20 een duidelijke geul. Het gebied tussen de dammen sedimenteert verder. Het slibgehalte in de bodem is laag. In het westelijke gedeelte van de geul wordt niet een duidelijke geul gevormd, maar stroomt het water gedeeltelijk over en langs de dammen. Het gebied tussen de dammen sedimenteert nog enigszins met voornamelijk zand. Van slikvorming is geen sprake.

De relatieve bodemontwikkelingen van beide alternatieven zijn te zien in de figuren 4.11 en 4.12. Duidelijk te zien is dat er sterke sedimentatie tussen de dammen optreedt en dat een nieuwe geul zich vormt ten noorden van de dammen. De middelste dam is ingekort waardoor de geul dichter bij de dijk komt te liggen. De oude erosiekuil wordt opgevuld (km 58, 381). Verder zijn er uitstralende effecten te zien tot in de vaargeul. Deze effecten zijn minder dan het oorspronkelijke alternatief O0. De sedimentatie tussen de dammen en het uitstralend effect wordt groter naarmate de dammen hoger zijn (O1a versus O1b).

4.4 Alternatief O2a, b, & c: verlaagde dammen op -4m, -2m en 0m NAP

Om meer inzicht te krijgen in het effect na 10 jaar van constante dammen op 1 bepaalde hoogte zijn 3 berekeningen uitgevoerd waarbij de dammen op -4m, -2m en 0m NAP zijn aangebracht. Deze alternatieven heten respectievelijk O2a, O2b en O2c.

In de figuren 4.6, 4.7 en 4.8 zijn de bodemliggingen en slibgehaltes in de bodem na 10 jaar te zien. Vergelijking van de drie figuren leert dat hoe hoger dammen hoe hoger het gebied tussen de dammen komt te liggen. De bodemligging tussen de dammen is na 10 jaar redelijk in evenwicht. Dit betekent dat er een evenwichtsligging is bij een bepaalde hoogte van de dammen. Bij een hoogte van de dammen van -4m NAP (O2a) is met name het westelijk gedeelte van de geul niet voldoende gesedimenteerd om intergetijdengebied te creëren, terwijl de bodemligging redelijk stabiel is na 10 jaar. Bij een hoogte van 0m NAP (O2c) ligt de evenwichtsligging van het westelijk gedeelte van de geul rond de -3 tot -1m NAP. Echter de stroomsnelheden zijn nog dermate groot (hoogdynamisch regime) waardoor het twijfelachtig is dat hier laagdynamische natuur gevormd zal gaan worden.

In het oostelijk gedeelte van de geul wordt de afname van de stroomsnelheden wel gerealiseerd waardoor er naar alle waarschijnlijkheid wel slikken zullen gaan ontstaan. De grootte van de slikken is afhankelijk van de hoogte van de dammen.

De figuren 4.13, 4.14 en 4.15 tonen de relatieve ontwikkelingen van deze drie alternatieven. Ook hier is de invloed van de hoogte van de dammen duidelijk merkbaar. Sedimentatie tussen de dammen neemt sterk toe bij toenemende hoogte van de dammen. Ook het uitstralend effect neemt toe bij de hoogte van de dammen. Bij alternatief O2b en O2c is erosie merkbaar op de Plaat van Ossenisse. Ook in de

Overloop van Hansweert is een erosie merkbaar langs de geulwand die toeneemt bij toenemende damhoogte.

4.5 Alternatief O3: dammen op 0m NAP en westelijke dam ingekort

De meest westelijke dam van de voorgaande onderzochte alternatieven heeft een uiteinde waarin met een knik de oorspronkelijke geul afgesloten wordt. Door deze knik weg te halen wordt een meer gestroomlijnde geul verkregen hetgeen naar verwachting een positief effect heeft op de uitstralende werking. Het effect hiervan is onderzocht in alternatief O3, zie Figuur 4.8 waarbij het uiteinde weggehaald is in de dammen. De hoogte van de dammen is constant op 0m NAP gehouden (vergelijkbaar met alternatief O2c).

De bodemligging na 10 jaar is getoond in Figuur 4.9. Wanneer deze bodemligging vergeleken wordt met Figuur 4.8 valt op dat door het weghalen van het uiteinde van de dam er minder intergetijdengebied gerealiseerd wordt. Op de slibgehaltes in de bodem heeft dit alternatief nauwelijks invloed ten opzichte van alternatief O2c.

In Figuur 4.16 worden de relatieve bodemontwikkelingen getoond van alternatief O3. In vergelijking met Figuur 4.15 is te zien dat het uitstralend effect van het weghalen van het uiteinde van de dam enigszins verminderd wordt.

4.6 Alternatief O4: dammen op 0m NAP en westelijke geul opgevuld

De voorgaande alternatieven tonen een beeld waarbij met name het westelijk gedeelte van de Schaar van Ossenisse moeite heeft om voldoende sediment te vangen. Om dit te stimuleren is initieel de geul hier op een constante diepte van -3m NAP aangebracht in het model. Het volume van het opgevulde gedeelte bedraagt ongeveer 500.000 m^3. Dit alternatief (O4) kan vergeleken worden met alternatief O2c, waarbij het enige verschil het opvullen van de geul is met zand.

De bodemligging na 10 jaar is getoond in Figuur 4.10. In vergelijking met Figuur 4.8 zijn niet veel verschillen te zien. Blijkbaar gaat ook deze berekening naar een evenwichtsituatie waarbij een min of meer constante bodemligging verkregen wordt. In plaats van het van nature laten sedimenteren van het gebied tussen de westelijke dammen is initieel dit volume al aangebracht. Het leidt beide tot eenzelfde bodemhoogte. Het initieel aanbrengen van een extra volume zand heeft dus geen effect op de eindsituatie.

De relatieve bodemontwikkeling is te zien in Figuur 4.17. Ten opzichte van Figuur 4.15 (O2c) zijn weinig verschillen te zien.

Geconcludeerd kan worden dat het opvullen van het westelijk gedeelte van de geul met zand weinig effect heeft omdat dit van nature ook al plaatsvindt. De uiteindelijke evenwichtsligging van het gebied is in beide gevallen vrijwel hetzelfde.

4.7 Stroomsnelheden

<u>Stroomsnelheid algemeen</u>
De stroomsnelheid tijdens maximum vloed en eb is getoond in Figuur 4.18 voor de referentie situatie. Het betreft hier een initiële situatie tijdens een springtij. In de figuren

4.19 t/m 4.32 zijn de stroomsnelheden van alle alternatieven geplot. Ook de verschillen in stroomsnelheid ten opzichte van de referentiesituatie zijn getoond.

Uit de figuren komt een consistent beeld naar voren waarbij de verschillen in stroomsnelheden voornamelijk in de Schaar van Ossenisse optreden. Tijdens vloed is er een verschil merkbaar richting de Drempel van Hansweert. Het verschil bedraagt enkele dm/s. Het effect blijft gelimiteerd tot de zijkant van de geul. Tijdens eb geldt dit ook voor de stroming richting de Overloop van Hansweert. Ook hier een verschil merkbaar van enkele dm/s en is het effect gelimiteerd tot de zijkant van de geul.

Ook voor deze situatie geldt dat hoe hoger de dammen hoe meer effect. Voor eventuele effecten op de bevaarbaarheid van de hoofdgeul kan naar alle waarschijnlijkheid geconcludeerd worden dat er geen effect is. Het effect op de stroomsnelheden strekt zich slechts uit tot de zijkant van de vaargeul.

Neervorming Ossenisse oost

Tijdens een groot springtij (giertij) treedt er neervorming op in de vaargeul rond de oostelijke kant van de Plaat van Ossenisse welke hinderlijk is voor de scheepvaart. Om er zeker van te zijn dat de voorgestelde maatregelen geen effect hebben op dit giertij worden op dit moment berekeningen uitgevoerd bij het WL Borgerhout, maar de resultaten zijn hiervan bij het uitbrengen van voorliggende rapportage nog niet beschikbaar.

4.8 Oppervlak laagdynamisch

In Tabel 4.2 is het aantal hectares laagdynamisch gebied getoond direct na aanleg van de dammen. Hierbij is van een doodtij-springtij situatie gekeken wat de hoogste snelheid is. De grens van hoog- en laagdynamisch is in de vorige studie gesteld op 0,6 m/s. Daarnaast is in de derde kolom de toename van het aantal hectares intergetijdengebied getoond voor alle alternatieven.

Tabel 4.2: Toename hectares laagdynamisch / intergetijdengebied tov referentie

Alternatief	Oppervlak Laagdynamisch intergetijdengebied na 10 jaar (ha)
*O0 (vorige studie)**	*115*
O1a	10 (na 20 jaar: 12 ha)
O1b	12
O2a	3
O2b	9
O2c	20 (waarvan 15 in het oostelijk deel)
O3	20
O4	21
O5	15 **

**= Uitkomsten uit vorige studie berekend als: "initieel gecreëerd laagdynamisch gebied", hetgeen naar verwachting overeenkomt met "oppervlak laagdynamisch intergetijdengebied na 10 jaar". Intergetijdengebied is gedefinieerd tussen de -2m en +3 m NAP.*

*** = Voor alternatief O5 is geen extra berekening uitgevoerd, maar gekeken is hoeveel hectare natuurwinst alternatief O2c in het oostelijk deel geeft.*

Het alternatief H0 met nooit overstroomde dammen (dat in de voorgaande studie doorberekend is) geeft initieel een toename van het laagdynamisch gebied van 115 hectare. De alternatieven O1a, b en O2a,b,c laten een toename zien van respectievelijk 10, 12, 3, 9 en 20 hectare. Alternatief O1a is ook doorberekend na 20 jaar, hierbij neemt het oppervlak nog toe met 2 hectare, zodat er totaal 12 hectare gecreëerd is. Alternatieven O3 en O4 leveren 20 en 21 hectare op. Het blijkt dat door de dammen lager aan te leggen er significant minder laagdynamisch gebied gecreëerd wordt.

Het meeste natuurherstel vindt plaats in het oostelijk deel. Bij alternatief O2c vindt driekwart van het natuurherstel in het oostelijk gedeelte plaats. Deze hectares worden toegekend aan alternatief O5 (geen aparte simulatie voor uitgevoerd). In dit alternatief worden alleen dammen in het oostelijk deel beschouwd.

Op het eerste gezicht nemen de hectares natuurherstel af bij de doorgerekende alternatieven. Beginnen met lage dammen is in deze gebieden wel de juiste manier om natuurherstel aan te pakken. Enerzijds omdat anders de uitstralende werking te groot wordt in de rest van het gebied, anderzijds omdat een te snelle slibafzetting door hoge dammen niet bevorderlijk is voor de ecologie. Hierbij dient het gebied goed bemeten te worden door middel van een monitoringsprogramma.

4.9 Debieten

Hoe de debietverdeling tussen de Schaar van Ossenisse en de hoofdgeulen verandert als gevolg van de alternatieven is uiteengezet in de figuren 4.33 (Schaar van Ossenisse) en 4.34 (Put van Hansweert). Figuur 4.33 laat duidelijk zien dat als gevolg van de aanleg van de dammen er een afname van het debiet plaatsvindt door deze geul. Het meest effect heeft alternatief O4 waarbij een afname van 500 m^3/s merkbaar is op het maximum vloeddebiet. Dit is 16% van het totale debiet. Dit is terug te vinden in de rest van de geulen. Bij de Put van Hansweert (Figuur 4.26) is een toename van het debiet merkbaar van enkele honderden m^3/s tijdens het maximum debiet. Dit is afgerond ongeveer 1% van het totale debiet.

4.10 Kosten

Voor de aanleg van de strekdammen wordt uitgegaan van een stenen dam op een kraagstuk. De kruinhoogte verschilt per alternatief. De kruinbreedte wordt aangenomen op 2 meter met een talud van 1:2. De totale steenbehoefte per alternatief staat in kolom 2 van Tabel 4.3. Uitgegaan wordt van een gemiddelde diepte van –5m NAP waarop de dammen aangelegd moeten worden. Gerekend wordt met een totale damlengte van 1500m. Bij alternatief O3 wordt de dam iets korter waardoor met een totale lengte van 1300m gerekend wordt.

Er is gerekend met eenheidsprijzen voor een kraagstuk (met geotextiel, maar exclusief stortsteen) van EUR 20/m^2. Voor stortsteen, in het werk aangebracht, wordt gerekend met een prijs van EUR 50/m^3 (inclusief alle bijkomende kosten). Bij Alternatief O4 wordt 5 euro per m^3 zand gerekend, zodat het aanbrengen van het zand 5 x 500,000 = 2,5 miljoen euro kost.

De totale kosten van de strekdammen kunnen dan per alternatief uitgerekend worden. Deze staan vermeld in kolom 7 van Tabel 4.3

Tabel 4.3: Kosten per alternatief (exclusief btw)

Alternatief	Hoogte dam maaiveld	Steen Behoefte (m^3/m')	Lengte dammen (m)	Volume (m^3)	Oppervlak bodem (m^2)	Kosten (k EURO)
O0	2	12	1500	18000	15000	4000
O1a	4	40	1500	60000	27000	3500
O1b	5	60	1500	90000	33000	5200
O2a	1	4	1500	6000	9000	500
O2b	3	24	1500	36000	21000	2200
O2c	5	60	1500	90000	33000	5200
O3	5	60	1300	78000	28600	4500
O4	5	60	1500	90000	33000	7700
O5	5	60	750	45000	16500	2600

De kosten zijn indicatief. Kosten van ontwerp, toezicht en monitoring zijn niet in deze kosten begrepen, evenals een post voor onvoorziene kosten (bji voorbeeld bij lokkal grotere aanlegdiepten dan in dit rapport aangenomen). Aanbevolen wordt vooralsnog een marge van 50% aan te houden. De kosten dienen in een vervolgstadium nauwkeuriger bepaald te worden.

4.11 Samenvatting uitkomsten

Tabel 4.4 vat de uitkomsten van de verschillende alternatieven samen. De kosten komen uit Tabel 4.3, de oppervlaktes uit Tabel 4.2.

Bij de effecten van de erosie is alternatief O0 als zeer negatief beschouwd (- - -), vanwege de grote uitstralende werking. Alternatief O1a, O1b en O2a hebben een relatief beperkt negatief effect op erosie elders (-). Alternatief O2a, O2b en O2c hebben dammen in oplopende hoogte, het effect op de erosie elders wordt daarmee ook steeds groter. Alternatieven O3 en O4 hebben een ongeveer even groot effect als O2c en krijgen eveneens een - - waardering. Voor alternatief O5 is geen aparte simulatie gedraaid. De verwachting is dat erosie effecten aan de westkant niet zullen plaatsvinden, maar aan de oostkant wel, hierdoor wordt dit alternatief als - beoordeeld (tussen O2c en niets doen).

Voor de stroomsnelheid geldt dat gewacht wordt op de uitkomsten van WL Borgerhout voor de definitieve beoordeling. Voorlopig wordt geoordeeld dat er geen negatieve effecten voor de stroomsnelheid zullen zijn.

Tabel 4.4: Scoringstabel alternatieven Ossenisse (absoluut)

Criterium \ Alternatief	O0	O1a	O1b	O2a	O2b	O2c	O3	O4	O5
Kosten (k EURO)	4000	3500	5200	500	2200	5200	4500	7700	2600
Oppervlak winst (ha)	115	10	12	3	9	20	20	21	15
Effecten erosie elders	- - -	-	-	-	-/- -	- -	- -	- -	-
Stroomsnelheid	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(scheepvaart)									
Kosten per hectare natuurwinst (k EURO)	35	350	433	167	244	260	225	367	173

In tabel 4.5 is dezelfde scoringstabel nogmaals weergegeven, maar nu relatief ten opzichte van de basisvariant O0. Hieruit blijkt dat in alle onderzochte varianten het aantal hectares natuurherstel sterk achterblijft bij de basisvariant O0, maar dat de uitstralende erosie-effecten wel afnemen.

Tabel 4.5: Scoringstabel alternatieven Ossenisse (relatief t.o.v. basisalternatief O0)

Criterium \ Alternatief	O0	O1a	O1b	O2a	O2b	O2c	O3	O4	O5
Kosten (k EURO)	4000	-500	+700	-3500	-1800	+1200	+500	+3700	-1400
Oppervlak winst (ha)	115	-105	-103	-112	-106	-95	-95	-94	-100
Effecten erosie elders	0	++	++	++	+/++	+	+	+	++
Stroomsnelheid (scheepvaart)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kosten per hectare natuurwinst (k EURO)	35	350	433	167	244	260	225	367	173

4.12 Conclusie

Door het verlagen van de dammen in de Schaar van Ossenisse kunnen veel van de uitstralende negatieve effecten worden tegengegaan, echter in de beschouwde alternatieven is met name het westelijke deel van de geul bij de aanleg van niet overstroombaren dammen niet verzekerd van natuurherstel. Het aantal hectares natuurherstel blijft dus sterk achter.

De effecten op de stroomsnelheden zijn voor de scheepvaart naar alle verwachting minimaal bij alle doorgerekende alternatieven. De debietverdeling tussen de geulen verandert slechts marginaal. De Schaar van Ossenisse laat weliswaar een afname van het debiet zien (tot 16%), maar in de rest van de geulen leidt dit tot een toename van maximaal slechts 1% van het debiet, hetgeen aanvaardbaar wordt geacht.

De hectares natuurherstel zijn vooralsnog veel minder groot dan in het geval waarbij de dammen tot boven hoogwater aangelegd worden. Beginnen met overstroomde dammen is in dit gebied wel de juiste manier om natuurherstel aan te pakken. Enerzijds omdat anders de onzekerheden over de uitstralende werking op de omgeving te groot worden, anderzijds omdat een te snelle slibafzetting door hoge dammen niet bevorderlijk is voor de ecologie.

Geadviseerd wordt daarom om in Ossenisse met het oostelijk deel van het gebied te beginnen. Dit biedt relatief de meeste hectares natuurherstel tegen de minste negatieve effecten. Hierbij dient het gebied goed bemeten te worden door middel van een monitoringsprogramma. Zonodig dient in de praktijk een bijsturing plaats te vinden door bijvoorbeeld het verder ophogen van de dammen als blijkt dat er onvoldoende natuurherstel plaatsvindt, en eventueel het aantal dammen (met voldoende hoogte) successievelijk uit te breiden naar het westen.

5 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

5.1 Conclusies

Algemeen

In eerste instantie nemen de hectares natuurherstel bij de doorgerekende alternatieven af ten opzichte van het nul alternatief waarbij de dammen nooit overstromen. Overstroomde dammen zijn in deze gebieden wel de juiste manier om een aanvang te maken met het natuurherstel. Enerzijds omdat anders de uitstralende werking te groot dreigt te worden in de rest van het gebied, anderzijds omdat een te snelle slibafzetting door het direct aanleggen van hoge dammen niet bevorderlijk is voor de ecologie. Bij een gefaseerde aanleg dient het gebied goed bemeten te worden door middel van een monitoringsprogramma en zonodig dient bijsturing plaats te vinden door bijvoorbeeld het verder ophogen van de dammen als blijkt dat er onvoldoende natuurherstel plaatsvindt, of dient er te worden gestopt met ophogen van de dammen indien blijkt dat de ongewenste neveneffecten te groot worden.

Hoofdplaatpolder

Door twee dammen te plaatsen op de locatie Hoofdplaatpolder met een hoogte boven hoogwater is in de voorgaande studie gevonden dat er aanzienlijke uitstralende morfologische effecten in de omliggende omgeving te vinden waren. Tussen de dammen vond sedimentatie plaats en was er sprake van natuurherstel. In deze studie is aangetoond dat door de dammen overstroomd te maken er ook natuurherstel plaatsvindt tussen de dammen, en dat de negatieve uitstralende effecten verminderd worden. Door de aanleg van een derde westelijke dam ontstaat extra natuurherstel, terwijl de negatieve uitstralende effecten slechts in beperkte mate toenemen.

De effecten op de stroomsnelheden blijven beperkt tot het Vaarwater langs Hoofdplaat en bedragen maximaal enkele dm/s. Het debiet van het Vaarwater langs Hoofdplaat neemt maximaal met 3% af (alternatief H3). De andere geulen in de omgeving hierdoor een toename van het debiet zien met 0,4%.

Extra natuurherstel bij Hoofdplaatpolder is mogelijk door middel van de aanleg van een derde dam. Voor deze derde dam dient een verdere optimalisatieslag plaats te vinden in de keuze van hoogte, lengte en locatie, gekoppeld aan een gefaseerde aanleg.

Ossenisse

Door het verlagen van de dammen in de Schaar van Ossenisse kunnen de uitstralende negatieve effecten worden beperkt, echter in de beschouwde alternatieven treedt in met name het westelijke deel van de geul het natuurherstel niet of nauwelijks op. Hier vindt bij verlaging van de dammen weliswaar sedimentatie plaats tussen de dammen, maar de stroomsnelheden zijn nog dusdanig hoog dat er nauwelijks slibafzetting plaatsvindt (een voorwaarde voor het ontstaan van slikken), en de evenwichtsdiepte ligt nog onder laag water. In het oostelijke deel treedt wel slibafzetting op, mits ook hier de dammen voldoende hoog zijn.

De effecten op de stroomsnelheden zijn voor de scheepvaart minimaal. De debietverdeling tussen de geulen verandert slechts marginaal. De Schaar van Ossenisse laat weliswaar een forse afname van het debiet zien (tot 16%), maar in de rest van de geulen leidt dit tot een toename van maximaal slechts 1% van het debiet.

Aanbevolen wordt om het natuurherstel bij Ossenisse te beginnen in het oostelijke deel, en om vervolgens dammen van voldoende hoogte uit te bouwen in het westen. Door middel van doorlopende monitoring dienen eventuele negatieve effecten op de omgeving zorgvuldig te worden bewaakt.

5.2 Aanbevelingen voor de pilot studie

Na het gereedkomen van deze studie is het vervolgtraject dat er twee pilot projecten opgezet gaan worden. Hierbij worden de projectgebieden "Baalhoek" en "Hoofdplaatpolder" aangewezen. Baalhoek dient als pilot voor de veenbankprojecten. Hoofdplaatpolder dient als pilot voor de nevengeulprojecten.

Gestart dient te worden met een ontwerptraject waarbij de ontwerpuitgangspunten op papier gezet dienen te worden. Hierbij zal worden gestreefd naar de maximale opbrengst aan natuurherstel, die op verantwoorde wijze kan worden gerealiseerd. Vervolgens kan met behulp van een ontwerpbureau het ontwerp definitief gemaakt worden, en kan het uitvoeringstraject worden voorbereid.

Na de bouw van de dammen dient de voortgang van het gebied nauwlettend in de gaten gehouden te worden. Voor ten minste 1 jaar dienen middels een deugdelijk opgezet monitoringsprogramma de volgende gebiedskenmerken bemeten te worden:

- Bodemhoogtes op diverse vaste plekken (kan niet dmv echolodingen ivm ondieptes) met een interval van 1 maand
- Slibgehaltes in de bodem op dezelfde vaste plekken met een interval van 1 maand (in het veld bepaling + enkele samples naar een laboratorium)
- Stroomsnelheidsmetingen op 2 –3 plekken gedurende minimaal een etmaal met een interval van 4 maanden.
- Golfmetingen; (ook invloed scheepsgolven)

Het bemeten van flora en fauna is weinig zinvol in verband met een relatief trage reactietijd. Na 1 jaar zal er naar verwachting nog geen significant effect op flora en fauna te merken zijn. Wel dient er een goede nulmeting van de flora en fauna te komen.

Gekeken moet worden in hoeverre aangesloten kan worden bij bestaande meetprogramma's in de Westerschelde, (waaronder Moneos).

Het nut om stroomsnelheden en golfmetingen te verrichten is om oorzaken vast te kunnen stellen waarom er eventueel onvoldoende sedimentatie plaatsvindt.

Voor de aanleg van de strekdammen moet een nul meting verricht worden om veranderingen waar te kunnen nemen. Dit geldt zeker voor de bodemhoogte en slibgehaltes in de bodem, maar ook voor de stroomsnelheden. Ook dienen voldoende gegevens aanwezig te zijn van de huidige situatie van de flora en fauna.

Op basis van de meetcampagne wordt na 6 maanden en na 1 jaar een verslag gemaakt. Na 1 jaar dienen conclusies getrokken te worden over de maatregel en dient eventuele bijsturing plaats te vinden. Ook worden uit de pilot lessen voor het ontwerp toegepast in de andere gebieden.

REFERENTIES

Dam, G., Bliek, A.J., Labeur, R.J., Ides, S. Plancke, Y., 2007, Long term process based morphological model of the Western Scheldt Estuary, Proceedings of the 5th River, Coastal and Estuarine Morphodynamics conference, the Netherlands, p1077-1084.

Dam, G. 2006, Morfodynamische berekeningen van de Westerschelde met behulp van "FINEL2d". Svašek Hydraulics, rapport GD/06119/1339.

Dam, G., Koks, L., Stichelen, K., van, 2008, Buitendijks natuurherstel in de Westerschelde. Verkenning naar mogelijke gebieden en maatregelen. Svašek Hydraulics, rapport GD/08187/1480/C.

Gruiters, S.H.L.L., Schokker, J. Veldkamp, J.G., 2004, Kartering moeilijk erodeerbare lagen in het Schelde Estuarium, TNO, Rapport 03-213-B1208.

Krone, R.B., 1962, Flume studies on the transport of sediment in estuarine shoaling processes, Hydr. Eng. Laboratory, University of Berkely, California, USA.

Ledden, M. van, 2003, Sand-mud segregation in estuaries and tidal basins.

Paarlberg, A.J., Knaapen, M. A. F., Vries, de, M.F., Hulscher, S.J.M.H., Wang, Z.B., 2005, Biological influences on morphology and bed composition of an intertidal flat.

Partheniadis, E., 1965, Erosion and deposition of cohesive soils, Journal of the Hydraulic division, ASCE, Vol. 91, No. NY1.

APPENDIX A: THE MORPHODYNAMIC MODEL FINEL2D

General

FINEL2d is a 2DH numerical model based on the finite elements method and is developed by Svašek Hydraulics. The following sections describe the governing equations of the FINEL2d model. This appendix was partly taken from Dam et. al. (2007).

Hydrodynamic module

The depth-integrated shallow water equations are the basis of the flow module. For an overview on shallow water equations see Vreugdenhil (1994).

The model equations are the continuity equation:

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial uD}{\partial x}+\frac{\partial vD}{\partial y}=0, \tag{1}$$

the x-momentum balance:

$$\frac{\partial Du}{\partial t}+\frac{\partial Du^2}{\partial x}+\frac{\partial Duv}{\partial y}+f_c Dv+gD\frac{\partial h}{\partial x}-\frac{1}{\rho}\tau_{x,b}+\frac{1}{\rho}\tau_{x,w}+\frac{1}{\rho}\tau_{x,r}=0, \tag{2}$$

and the y-momentum balance:

$$\frac{\partial Dv}{\partial t}+\frac{\partial Duv}{\partial x}+\frac{\partial Dv^2}{\partial y}-f_c Du+gD\frac{\partial h}{\partial y}-\frac{1}{\rho}\tau_{y,b}+\frac{1}{\rho}\tau_{y,w}+\frac{1}{\rho}\tau_{y,r}=0. \tag{3}$$

where:

u	=depth averaged velocity in x-direction	[m/s];
v	=depth averaged velocity in y-direction	[m/s];
h	=water level	[m];
z_b	=bottom level	[m];
D	=water depth	[m];
f_c	=Coriolis coefficient	[1/s];
g	=gravitational acceleration	[m/s^2];
ρ	=density of water	[kg/m^3];
τ_b	=bottom shear stress	[N/m^2];
τ_w	=wind shear stress	[N/m^2];
τ_r	=radiation stress	[N/m^2];

In addition to the effect of advection and pressure gradients, external forces like the Coriolis force, bottom shear stress, wind shear stress and radiation stress due to surface waves can be taken into account. It is noted that turbulent shear stresses are not taken into account: the application is therefore restricted to advection dominated flows only.

As a solution method, the discontinuous Galerkin method is adopted (Hughes, 1987) in which the flow variables are taken constant in each moment. This method has advantages in dealing with drying elements.

As the momentum equations contain first order derivatives in space, they can be written as:

$$\frac{\partial \boldsymbol{U}}{\partial t} + \nabla \cdot \boldsymbol{F} = \boldsymbol{H} \tag{4}$$

where:

$$\boldsymbol{U} = \begin{pmatrix} h \\ uD \\ vD \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{F} = \begin{pmatrix} uD & vD \\ u^2D + \frac{1}{2}gh^2 & uvD \\ uvD & v^2D + \frac{1}{2}gh^2 \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{H} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{\rho}\tau_{x,tot} - f_c vD - gDi_{b,x} \\ \frac{1}{\rho}\tau_{y,tot} + f_c uD - gDi_{b,y} \end{pmatrix} \tag{5}$$

in which $\tau_{tot,x}$ and $\tau_{tot,y}$ are summations of the external stresses in x- and y-direction respectively, while $i_{b,x}$ and $i_{b,y}$ are the bed level gradients in x- and y-direction respectively.

The equation can be integrated over an element resulting in:

$$\int_{\Omega_e} \frac{\partial \boldsymbol{U}}{\partial t} \mathrm{d}\Omega + \int_{\Gamma_e} \boldsymbol{F}\,\boldsymbol{n}\,\mathrm{d}\Gamma = \int_{\Omega_e} \boldsymbol{H}\,\mathrm{d}\Omega, \tag{6}$$

where Ω_e denotes an element, Γ_e the associated element boundary,while $\boldsymbol{n}$ is the outward pointing vector normal to Γ_e.

The problem is now reduced to the determination of the fluxes $\boldsymbol{F}$ along the boundaries. As the variables are determined at the elements and not at the sides, the flux F is not known beforehand, but involves the solution of a local Riemann problem. An approximate Riemann solver according to Roe (Glaister, 1993) is applied. This method guarantees strict mass and momentum conservation, but suffers from some numerical diffusion in stream-wise direction. An explicit time integration scheme is used. As this method restricts the time step, the time step is controlled automatically for optimum performance.

A special problem in shallow waters like for example estuaries is the drying and flooding of large areas during a tidal cycle. A discontinuous discretisation is used in combination with an explicit time-stepping. In this way this flooding and drying of the elements can be treated relatively easily. If an element tends to dry, the corresponding characteristic wave is partially reflected from this element which guarantees mass conservation.

Sediment transport module

FINEL2d uses the following sediment balance equation for the evolution of the bed level:

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \qquad (7)$$

In which z_b [m] is the bed level and (q_x,q_y) [m^2/s] are the components of the sediment flux in x- and y-direction respectively.

In order to determine the non-cohesive part of the sediment fluxes, the transport formula of Engelund and Hansen formula is used (Engelund & Hansen, 1967). Since most of the sand transport in the Western Scheldt is suspended transport, a time lag effect is introduced in the model according to Gallapatti & Vreugdenhil (1985). First a dimensionless equilibrium concentration is calculated:

$$c_e = \frac{S}{D\sqrt{u^2 + v^2}} \qquad (8)$$

where c_e is equilibrium concentration [-] and S the magnitude of the equilibrium sand transport [m^2/s] according to Engelund and Hansen.

The concentration c [-] is then calculated according from:

$$\frac{dc}{dt} = \frac{1}{T_A}\left[c_e(t) - c(t)\right] \qquad (9)$$

In which T_A is a characteristic timescale [s].

Equation 9 shows that if the concentration is lower than the equilibrium concentration erosion will occur ($dc/dt > 0$). If the concentration is higher than the equilibrium concentration sedimentation will occur ($dc/dt < 0$). The coefficient T_A characterises the time needed for the adjustment of the concentration and is defined as $T_A = h/w_s$; where w_s [m/s] is the settling velocity of the sand particles. In relative shallow areas the time scale is small and the concentration almost immediately adjusts to the equilibrium concentration.

Sand-silt interaction

Introduction

Large scale sand-mud segregation is found in estuaries and tidal basins all over the world. Sand and mud mixtures have been studied separately in the past because of important differences in their behaviour. Mathijs van Ledden has developed a model in his PhD thesis (van Ledden, 2003) which accounts for both sand and mud. This model extends currently used morphodynamic models in a number of ways. Firstly the erosion characteristics of sand and mud depend on the mud content at the bed surface.

Secondly the temporal and spatial variations in mud content are taken into account. The bed composition varies due to erosion and deposition of sand and mud at the bed surface and mixing in the bed itself.

Erosion of sand-mud mixtures

A key element in this model is the erosion formulation for sand-mud mixtures. A distinction is made between cohesive and non-cohesive behaviour of these mixtures. A critical mud content ($p_{m,cr}$) is defined for this transition between cohesive and non-cohesive behaviour. In estuaries in the Netherlands a critical mud content of 30% is found.

Non-cohesive behaviour

When the mud content at the bed surface is less than the critical mud content the bed layer is treated as non-cohesive. This implies for the sand fraction the 'normal' sediment transport formula is used. However the erosion flux of sand is limited by the availability of sand in the bed. The erosion of the silt fraction becomes:

$$E_m = p_m M_{nc}\left(\frac{\tau_b}{\tau_{e,nc}} - 1\right) \qquad p_m < p_{m,cr}$$

E_m	=	Erosion flux of mud	[m_2/s]
p_m	=	silt content of the top bed layer	[-]
M_{nc}	=	erosion coefficient of non-cohesive bed	[g/m^2 s]
τ_b	=	bottom shear stress due to current and waves	[Pa]
$\tau_{e,nc}$	=	critical bottom shear stress for non-cohesive bed	[Pa]

Cohesive behaviour

Experiments with cohesive sand-mud mixtures have shown that the erosion characteristics strongly differ from non-cohesive sand-mud mixtures. Therefore erosion of a cohesive bed layer is treated differently in the model.

The following formulas are used for the erosion flux of sand and mud.

$$E_s = (1 - p_m) M_c\left(\frac{\tau_b}{\tau_{e,c}} - 1\right) \qquad p_m > p_{m,cr}$$

$$E_m = p_m M_c\left(\frac{\tau_b}{\tau_{e,c}} - 1\right) \qquad p_m > p_{m,cr}$$

with:

E_s	=	Erosion flux of sand	[m_2/s]
M_c	=	erosion coefficient of cohesive bed	[g/m^2 s]
$\tau_{e,c}$	=	critical bottom shear stress for cohesive bed	[Pa]

Bed module

The bed level change follows directly from the bed load transport gradient of sand and the erosion and the erosion and deposition fluxes of sand and mud (see figure 7.1)

$$(1-\varepsilon_p)\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{\partial q_b}{\partial x} - \frac{\partial q_b}{\partial y} + D_s - E_s + D_m - E_m$$

with:

q_b	=	bed load transport rate of sand	[m^2/s]
E_s	=	erosion flux of sand	[m^2/s]
D_s	=	deposition flux of sand	[m^2/s]
E_m	=	erosion flux of mud	[m^2/s]
D_m	=	deposition flux of mud	[m^2/s]
ε_p	=	bed porosity	[-]

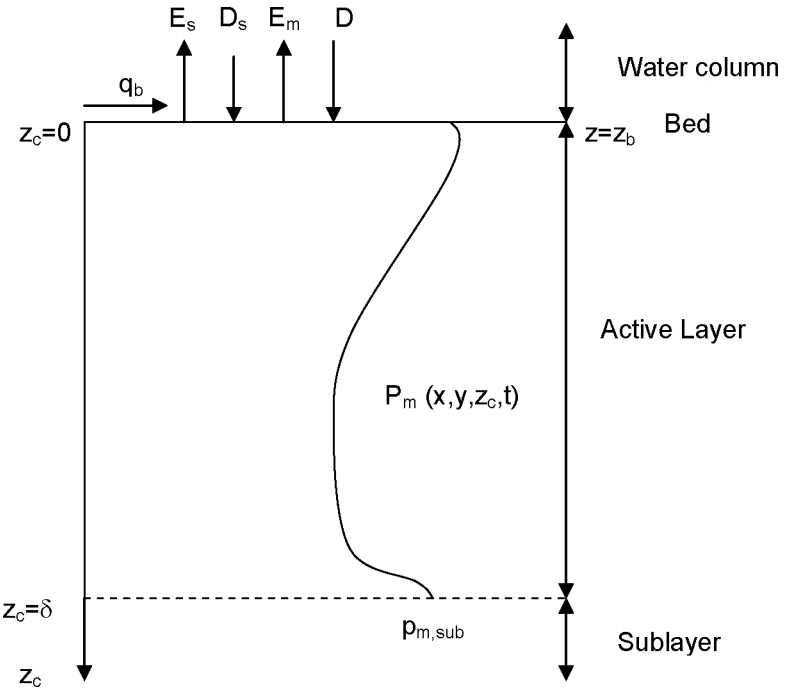


Figure A.1: Bed level and bed composition

Bed composition variations in time and space are induced by three processes: upward and downward fluxes of sand and mud at the bed surface, physical mixing near the bed surface and biological mixing processes in the sediment itself. Several layers in the active bed layer can be defined with a fixed layer thickness (dz). Since the bedlevel zb is

not fixed the layers shift accordingly in the vertical direction. The mud content p_m below the bed surface ($-\infty < z < z_b$) then reads:

$$\frac{\partial p_m}{\partial t} + \frac{\partial z_b}{\partial t}\frac{\partial p_m}{\partial z_c} - \frac{\partial}{\partial z_c}\left(\Xi \frac{\partial p_m}{\partial z_c}\right) = 0$$

In the sublayer a fixed silt percentage ($p_{m,sub}$) must be applied. This silt percentage becomes important in an eroding case. In that case this sub layer silt percentage is introduced in the lowest layers.

A Cranck-Nicholson scheme is applied for solving the bed composition equation. See for a further explanation of the numerical implications of the bed module van Ledden (2003).

References

Dam, G., Bliek, A.J., Labeur, R.J., Ides, S. Plancke, Y., 2007, Long term process based morphological model of the Western Scheldt Estuary, Proceedings of the 5th River, Coastal and Estuarine Morphodynamics conference, the Netherlands, p1077-1084.

Engelund, F., Hansen, E., 1967, A monograph on sediment transport in alluvial channels, Teknik Forlag, Copenhagen.

Ledden, M. van, 2003, Sand-mud segregation in estuaries and tidal basins

Gallappatti, R., Vreugdenhil, C. B., 1985, A depth-integrated model for suspended sediment transport. Journal of Hydraulic Research 23, p. 359-277.

Glaister, P. 1993. Flux difference splitting for open-channel flows, Int. J. Num. Meth. Fluids, 16, p. 629-654

Hughes, T.J.R, 1987, The finite element method, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.

Vreugdenhil, C.B., 1994, Numerical methods for shallow water flow, Institute for Marine and Atmospheric Research Utrecht (IMAU), Utrecht University, The Netherlands

APPENDIX B: OVERLAATFORMULERING IN FINEL2D

Introduction



Figure 3.1: Weir flow (top) and groynes (down)

Basically a weir is simply a structure in the water flow, causing contraction of the flow and energy loss. Also submerged groynes act as a weir on the water flow. It is possible to represent weirs by a sill in the bathymetry. The width of a weir should then be in the same order as the grid size, or locally at the location of the weir a grid refinement is needed. This refinement is not always necessary for the required accuracy, in those cases the computation is needlessly slowed down by the extra elements. Another drawback of representing a weir in the bathymetry is the inaccurate calculated solution of the flow over the sill. In reality conservation of energy holds upstream of the weir, and conservation of momentum downstream. The numerical core of FINEL2D solves the momentum equations, therefore FINEL2D calculates with conservation of momentum, both upstream and downstream of the sill. Conservation of momentum upstream of a sill means increase of energy which is wrong; leading to an inaccurate solution.

Therefore in FINEL2D weirs are represented as a sub-grid feature at the edge of an element. On a weir-edge an empirical discharge formula is used as internal boundary condition. The empirical formula calculates the discharge corresponding to the energy head over the weir, taking into account the geometry of the weir. In such way the grid size is independent from the weir width, and no inaccurate solution is obtained as the empirical formula takes into account both the upstream conservation of energy and the downstream conservation of momentum.

Technical documentation weir formulation

A weir is implemented as an internal boundary condition in FINEL. The idea is taken from a journal paper [ref. 2], although the implementation in FINEL is different in some aspects. The boundary condition consist of the weir discharge as function of the energy level upstream and downstream of the weir and taking into account the weir geometry. At the element side where a weir is situated, two extra “dummy” boundary elements are placed inside the mesh. The water level and current velocity on these dummy elements are prescribed to satisfy the weir discharge boundary condition. See the sketch below for clarification. On the element side between element e_1 and e_2 a weir is situated. Therefore two dummy elements are created (d_1 and d_2). The interaction between element e_1 and e_2 is replaced by an interaction between e_1<-> d_1 and an interaction between d_2 <-> e_2. The conditions in d_1 and d_2 are calculated using the weir discharge

taking into account the energy level in e_1 and e_2; $q_{weir} = f(E_1, E_2)$. Both d_1 and d_2 get prescribed the same discharge q_{weir}. Of course the user doesn't see these dummy elements, and only the flow contraction and energy loss caused by the weir is visible in the results of the real elements e_1 and e_2.

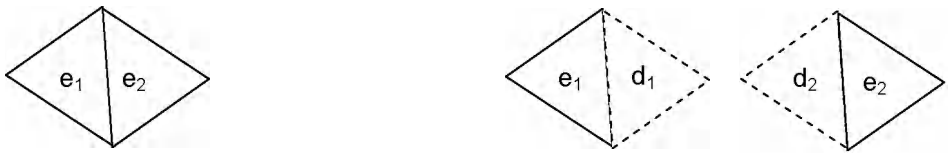


Figure 3.2: Weir on element side between e_1 and e_2 (left) -> internally two dummy elements d_1 and d_2 are created; on these two dummy elements q_{weir} is prescribed (right)

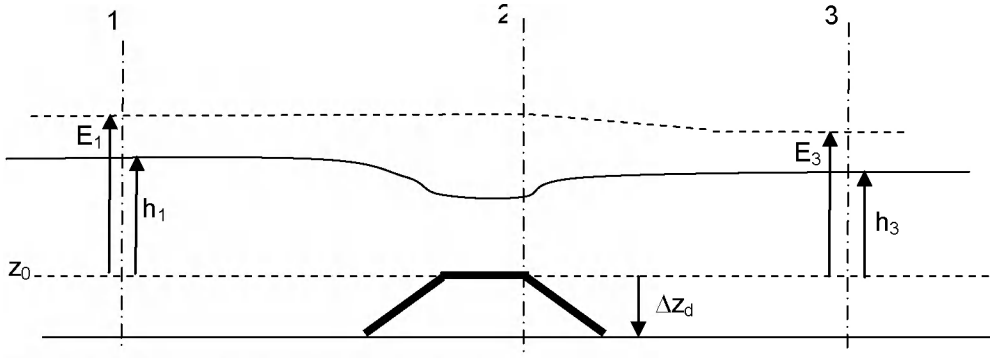


Figure 3.3: Defenition sketch of weir flow.

The flow over a weir is sketched in Figure 3.3. At a streamlined weir, energy is conserved upstream of the weir from 1 to 2, and on the backside of a weir from 2 to 3 energy is lost through turbulent eddies on the downstream side of the weir. The Dutch ministry of public works has carried out experimental analysis of weir flow to link the weir discharge with the loss of energy over a weir. In an internal memo by A. Sieben [ref. 1], the results are described and an empirical relation to determine the weir discharge knowing the upstream energy level E_1 and the downstream energy level E_3 is produced. The influence of the width of the weir crest, the weir slope upstream and downstream and the weir sill height are taken into account. This empirical relation has been implemented to calculate the weir discharge in FINEL. It is given by:

$$q_{weir} = C_{d0} \left(\tfrac{2}{3}E_1\right)_1 \sqrt{\tfrac{2}{3}gE_1} \sqrt{1-\left(E_3/E_1\right)^p}$$

With empirical coefficients:

$$C_{d0} = 0.8\left(e^{-0.5E_1/L_k}\left(1-0.25e^{-0.5m_u}\right)+\left(1-e^{-0.5E_1/L_k}\right)\left(0.8+0.65e^{-0.1m_d}\right)\right)$$

$$p \approx \frac{27}{4C_{d0}^2}\left(1+\frac{\Delta z_d}{E_1}\left(1-e^{-0.02m_d}\right)\right)^2 \text{; with under limit } \frac{\Delta z_d}{E_1} = 5$$

With variables:

C_{d0}	empirical contraction coefficient
p	factor for influence downstream sill height
E_1	energy level upstream [m]
E_3	energy level downstream [m]
Δz_d	sill height downstream [m]
L_k	weir crest width [m]
m_u	upstream slope [-] (1:m_u)
m_d	downstream slope [-] (1:m_d)

On both dummy elements a normal velocity and corresponding water level is prescribed resulting in a discharge equal to q_{weir}. The Riemann invariant (R=u+2c upstream and R=u-2c downstream) is used for this. The resulting system of equations is solved with a fast Newton-Rhapson iteration. For the test simulations maximal 2 or 3 iterations were needed. The tangent velocity of d_1 is equal to e_2 and d_2 is equal to e_1.

To keep the weir flow stable relaxation is used. Standard a relaxation factor 0.1 is used (U^{n+1}=0.1*U^{n+1}+0.9*U^n), but when more than 20 iterations are needed, or when the downstream velocity <0.1 m/s, or the direction of the flow is different upstream and downstream then a stronger relaxation of 0.01 is used. This relaxation may seem large, but because of the small time steps in FINEL the relaxation doesn't result in a large time lag in the reaction of a weir on changing flow conditions. Smaller relaxation leads to oscillating weir behavior. When more than 30 iterations are needed, something is wrong and iteration is stopped by puting q_{weir}=0.

Influence weir geometry on weir flow

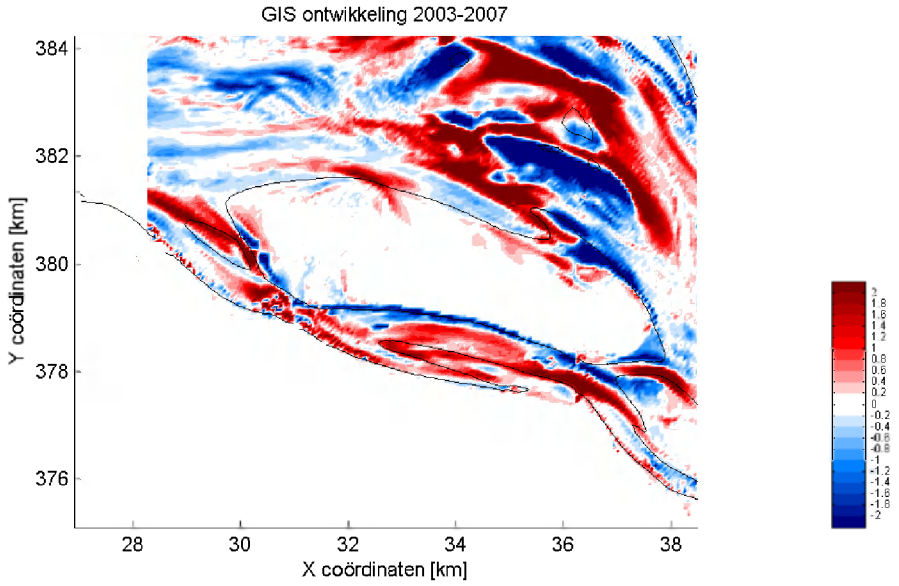
The weir geometry is taken into account by the determination of q_{weir}. The upstream slopes, downstream slopes, downstream sill heights and weir crest widths can be varied. The influence of a different geometry can be counter-intuitive for some changes, therefore the influences of each separate parameter is summarized here.

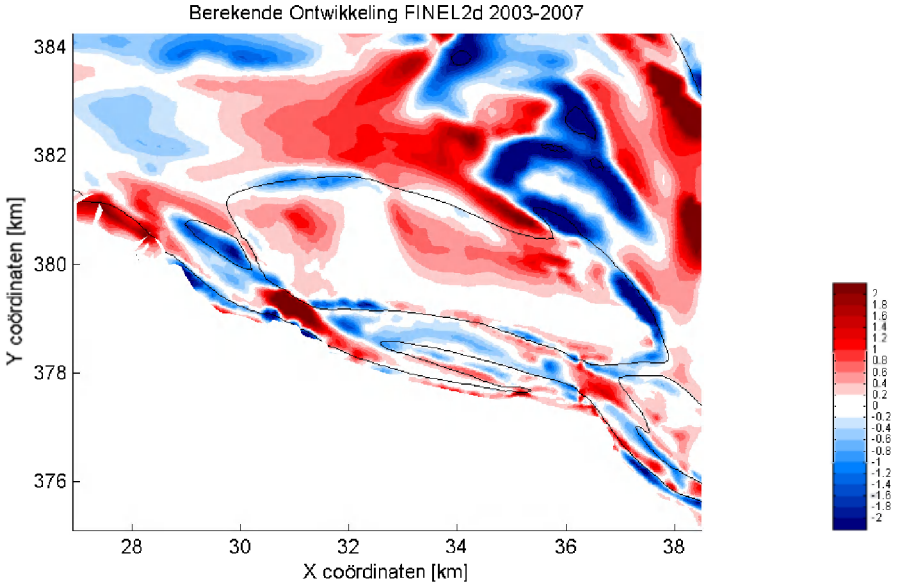
- Influence slope upstream
  - Streamlining leads to less energyloss
- Influence slope downstream
  - Streamlining leads to less energyloss for subcritical flow (slope less steep than 1:4 makes hardly any difference anymore)
  - Streamlining leads to ***more*** energyloss for supercritical flow
  - Streamlining leads to ***more*** energyloss for subcritical flow with short weirs
  - Reason for this counter-intuitive behavior lies in the fact that the streamlines are curved and pressure is not hydrostatic anymore on a weir for short weirs and for supercritical flow.
- Influence crest width
  - Wider crest leads to more energyloss.
- Influence downstream sill height
  - Higher weir leads to more energyloss.

References

[1] Sieben J., 2007, Overzicht en synthese beschikbare data overlaatproeven, RIZA, wrr memo 2007-003.

[2] Garcia-Navarro P. et al., 1992, McCormack's method for the numerical simulation of one-dimensional discontinuous unsteady open channel flow, Journal of hydraulic research, vol. 30, no. 1

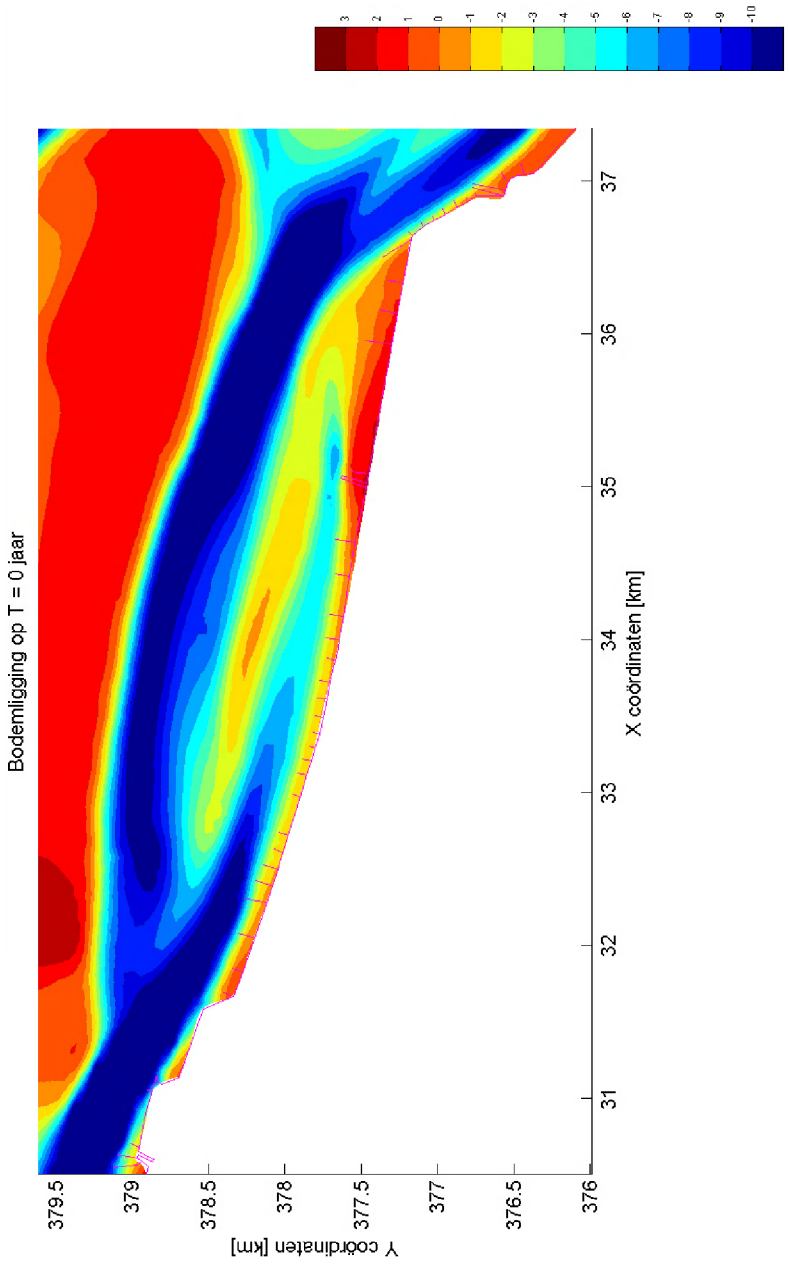




Gemeten en berekende bodemontwikkeling Hoofdplaatpolder **FIGUUR 3.1**

1526

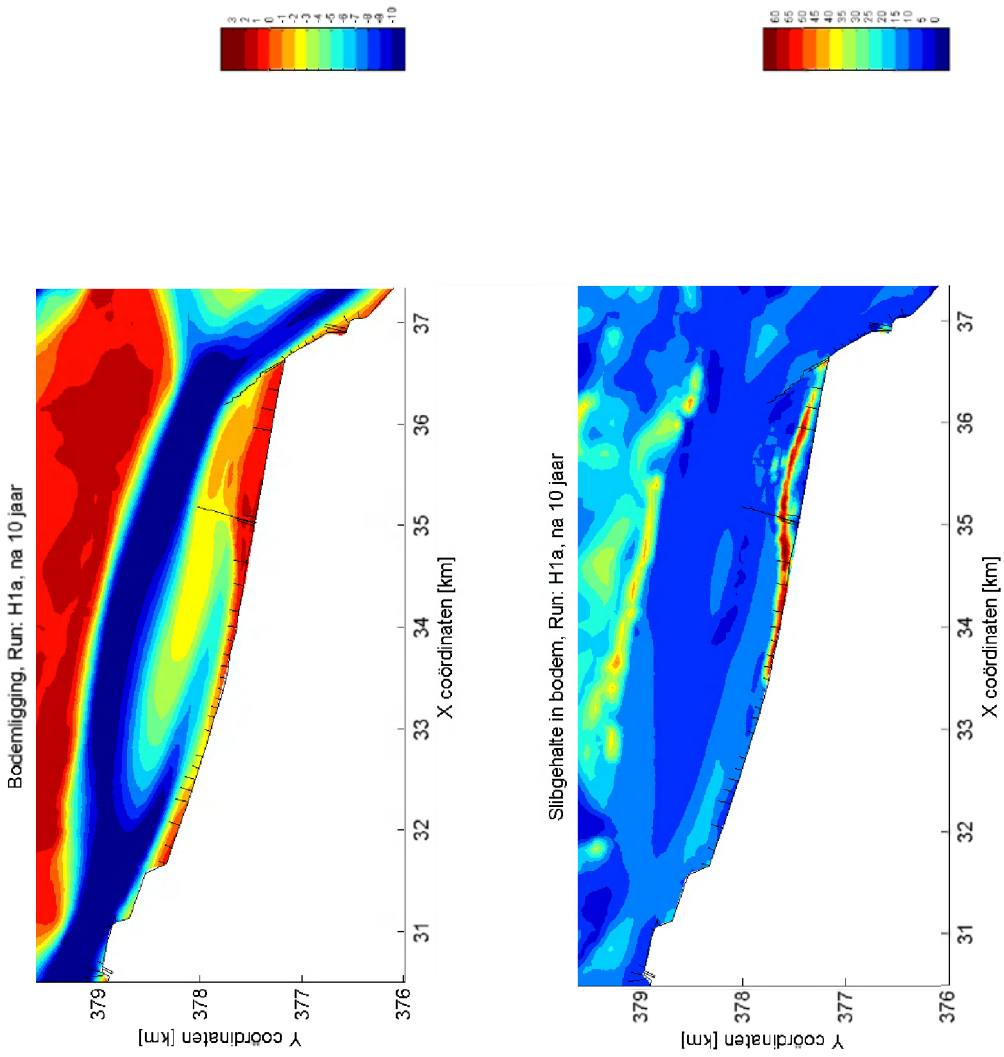
____ = 5m dieptecontour 16-Apr-2009



Bodemligging Hoofdplaatpolder in jaar 0 van alle alternatieven **FIGUUR 3.2**

1526

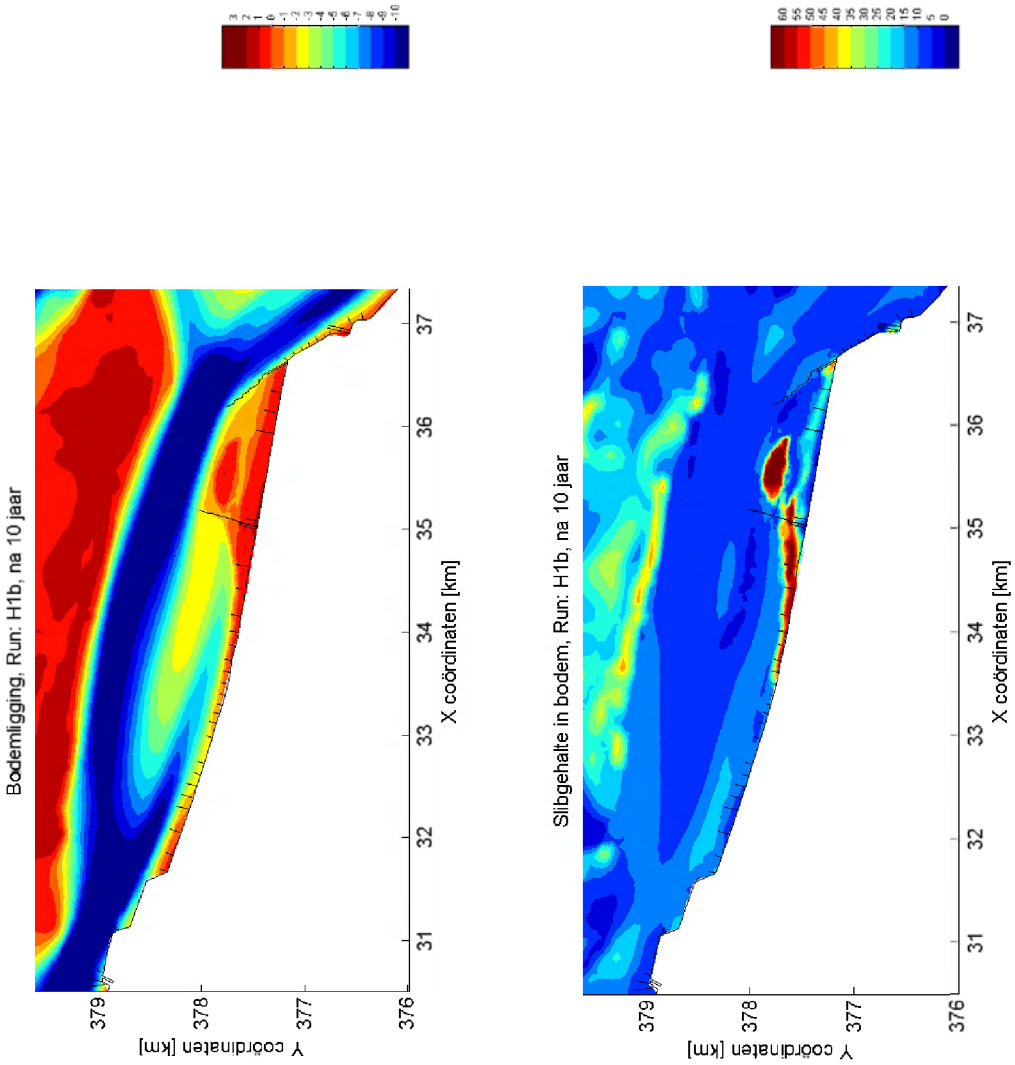
16-Apr-2009



Bodemligging en slibgehalte in bodem

H1a: Dammen 1m boven maaiveld na 10 jaar

FIGUUR 3.3
1526
16-Apr-2009

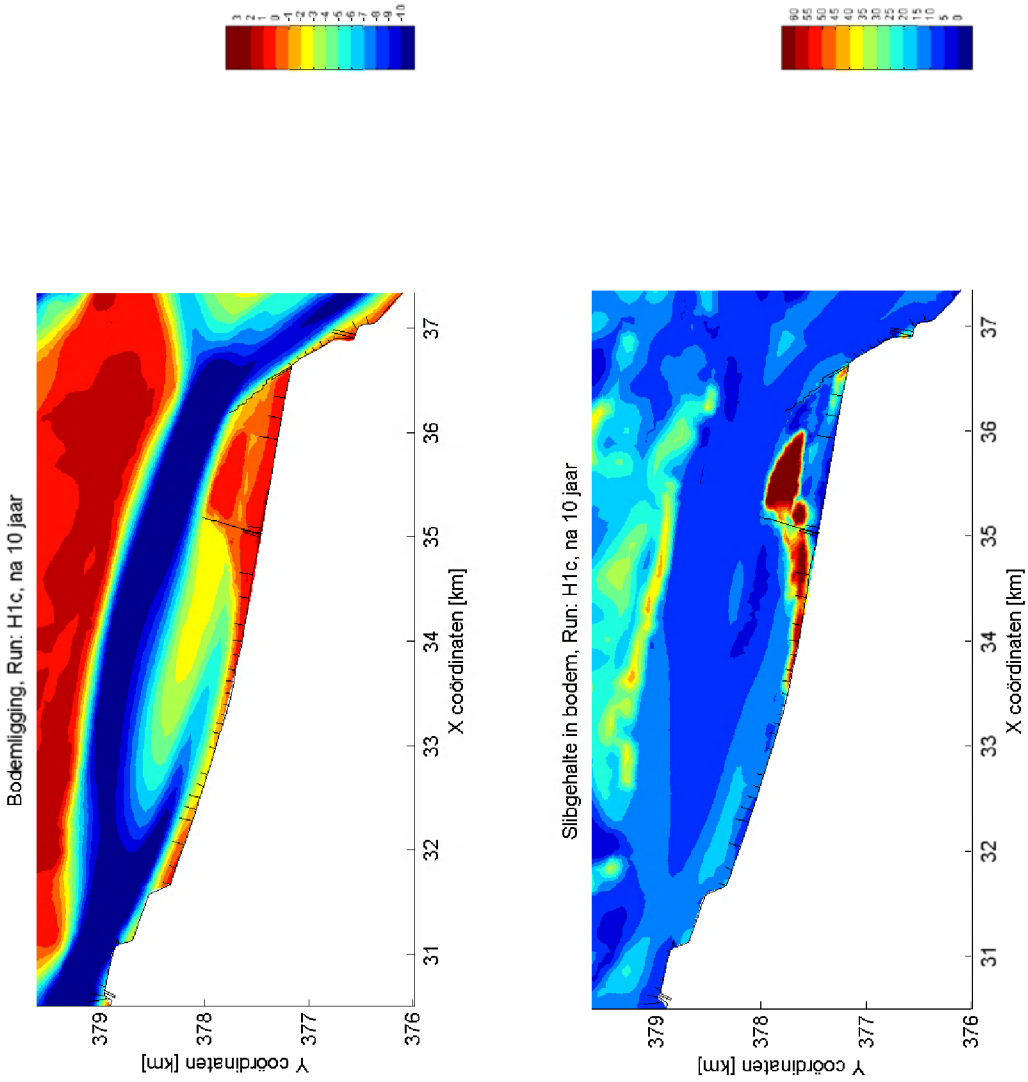


SVASEK HYDRAULICS

Bodemligging en slibgehalte in bodem

H1b: Dammen 2m boven maaiveld na 10 jaar

FIGUUR 3.4
1526
16-Apr-2009

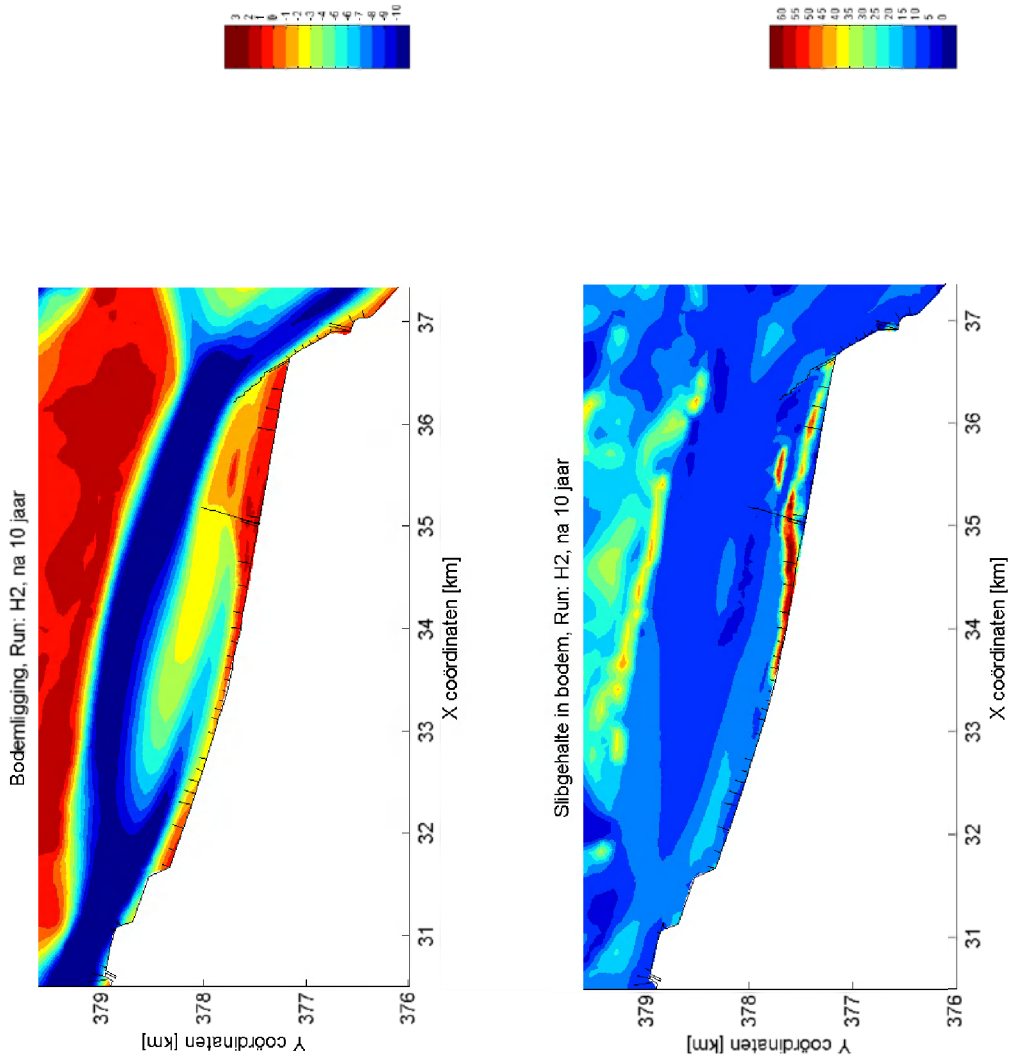


SVASEK HYDRAULICS

Bodemligging en slibgehalte in bodem

H1c: Dammen 3m boven maaiveld na 10 jaar

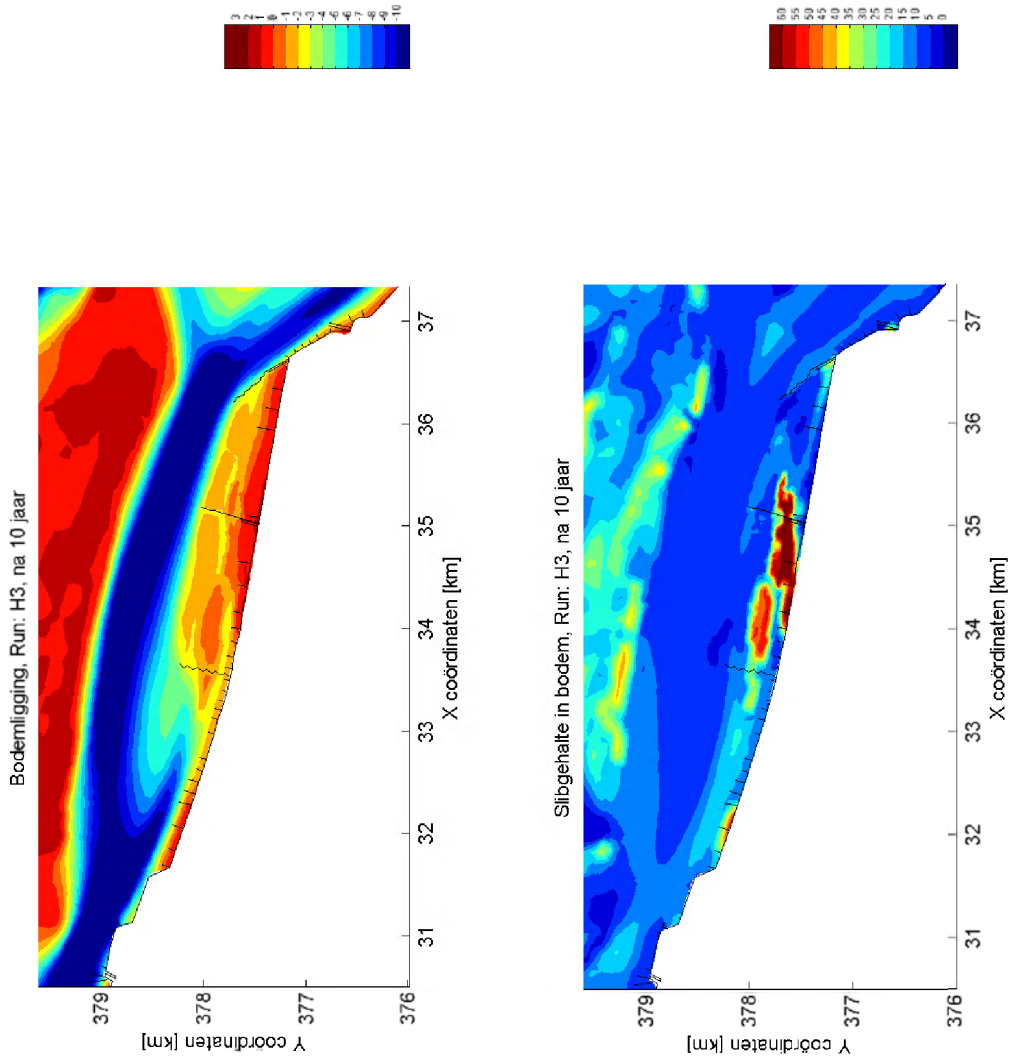
FIGUUR 3.5
1526
16-Apr-2009



Bodemligging en slibgehalte in bodem

H2: Dammen 1-2 m boven maaiveld na 10 jaar

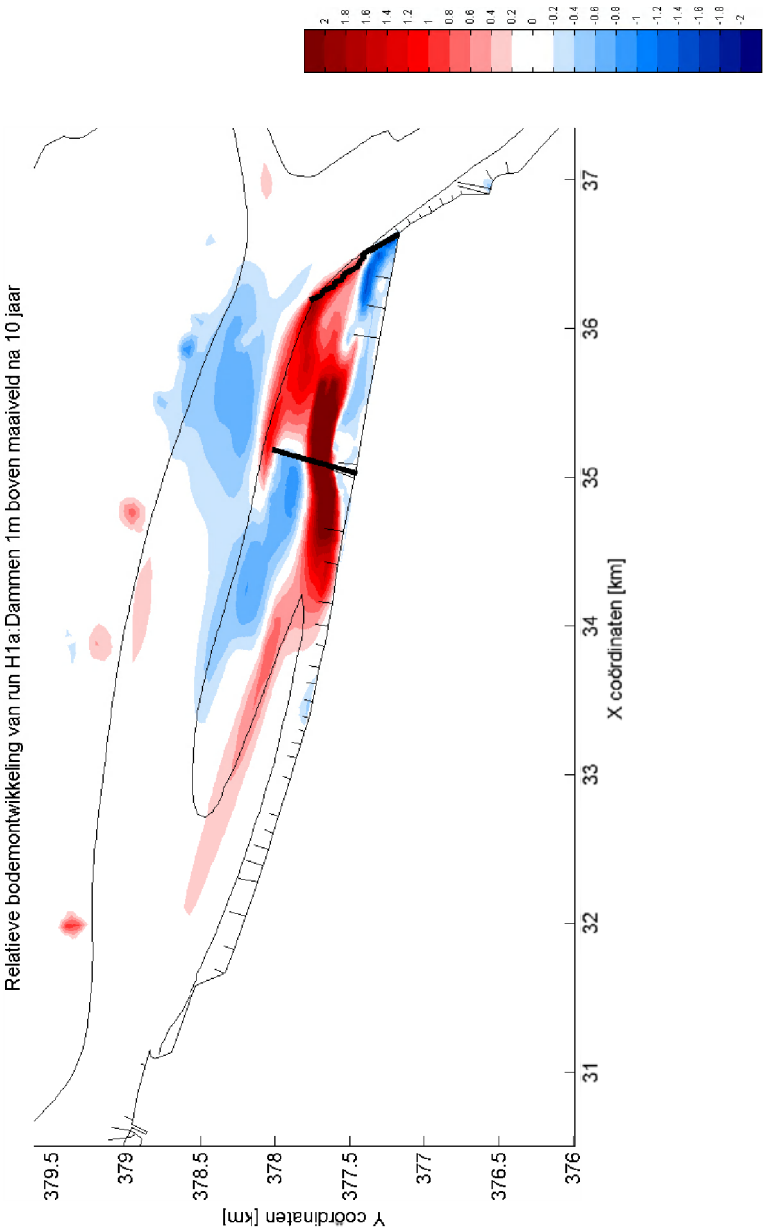
FIGUUR 3.6
1526
16-Apr-2009



Bodemligging en slibgehalte in bodem **FIGUUR 3.7**

1526

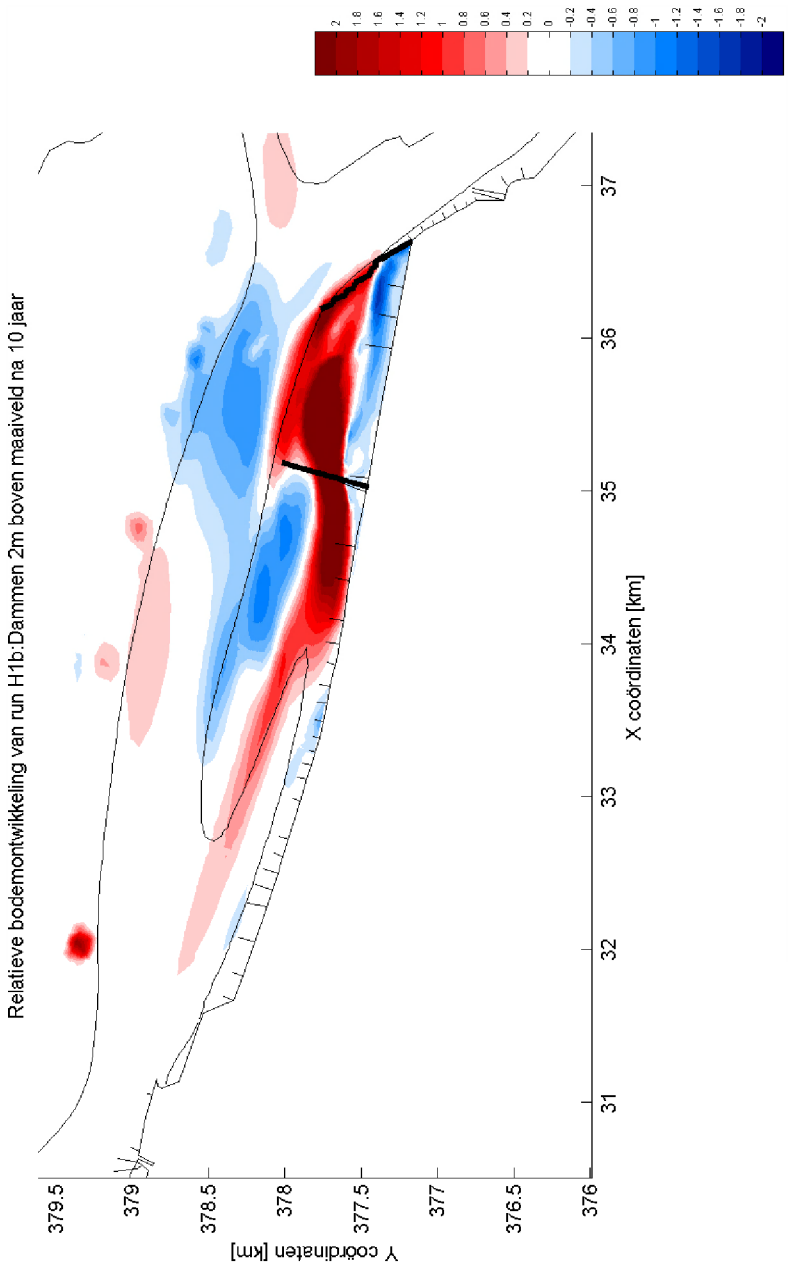
H3: Dammen 1-2m boven maaiveld + westelijke dam na 10 jaar 16-Apr-2009



Relatieve bodemontwikkeling

H1a: Dammen 1m boven maaiveld na 10 jaar

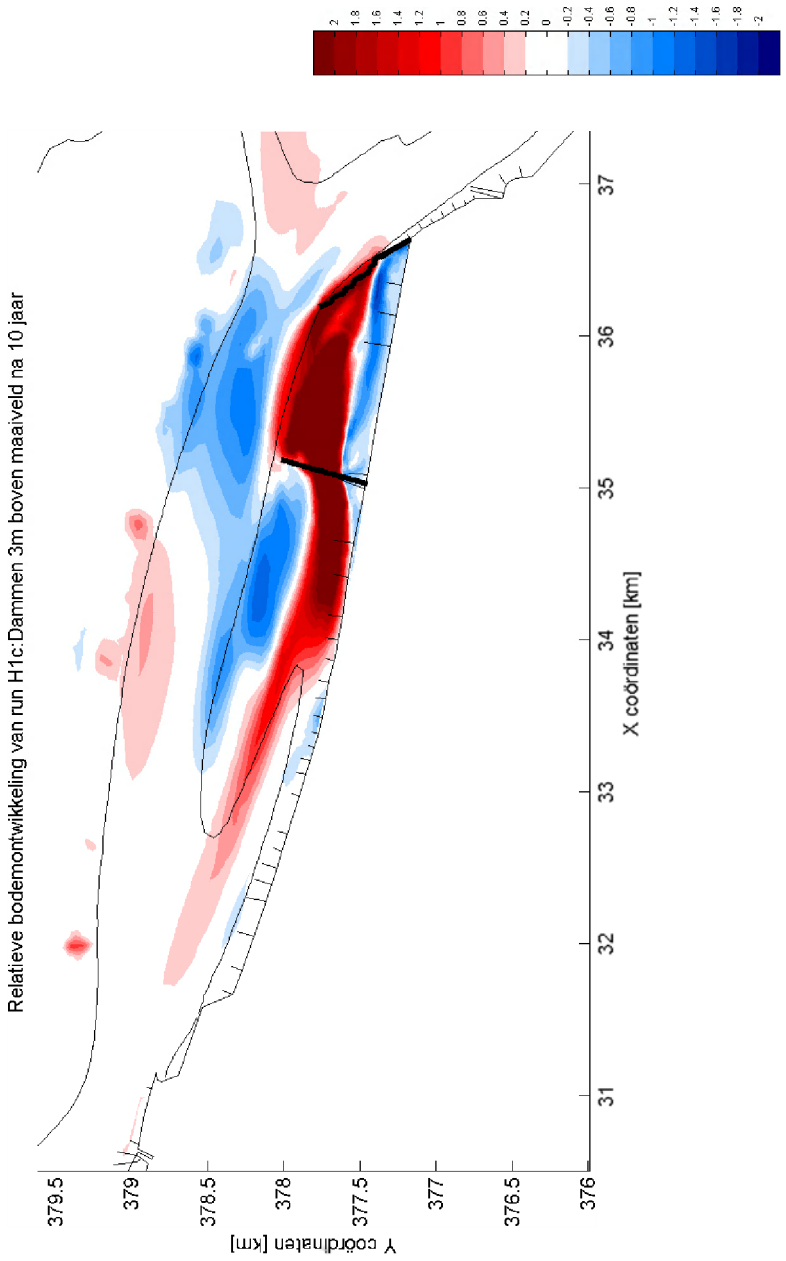
FIGUUR 3.8
1526
16-Apr-2009



Relatieve bodemontwikkeling

H1b: Dammen 2m boven maaiveld na 10 jaar

FIGUUR 3.9
1526
16-Apr-2009

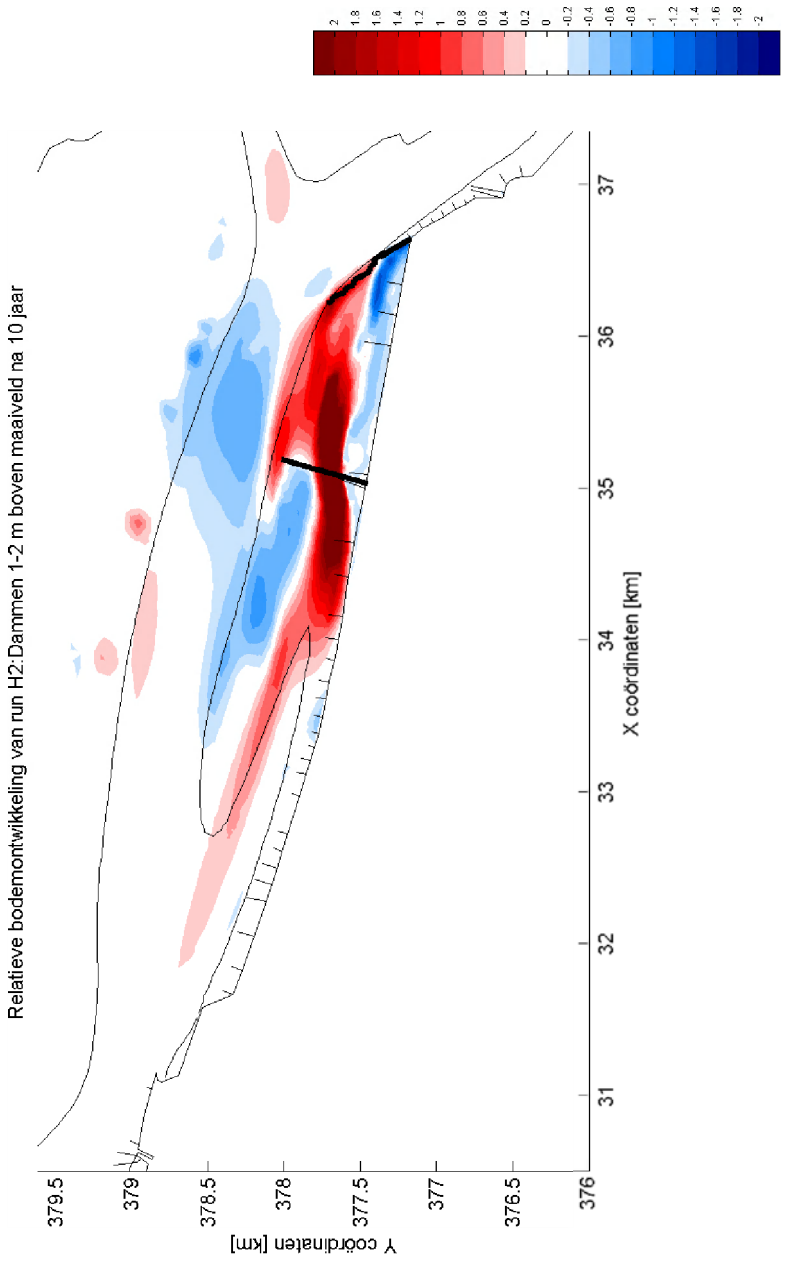


SVASEK HYDRAULICS

Relatieve bodemontwikkeling

H1c: Dammen 3m boven maaiveld na 10 jaar

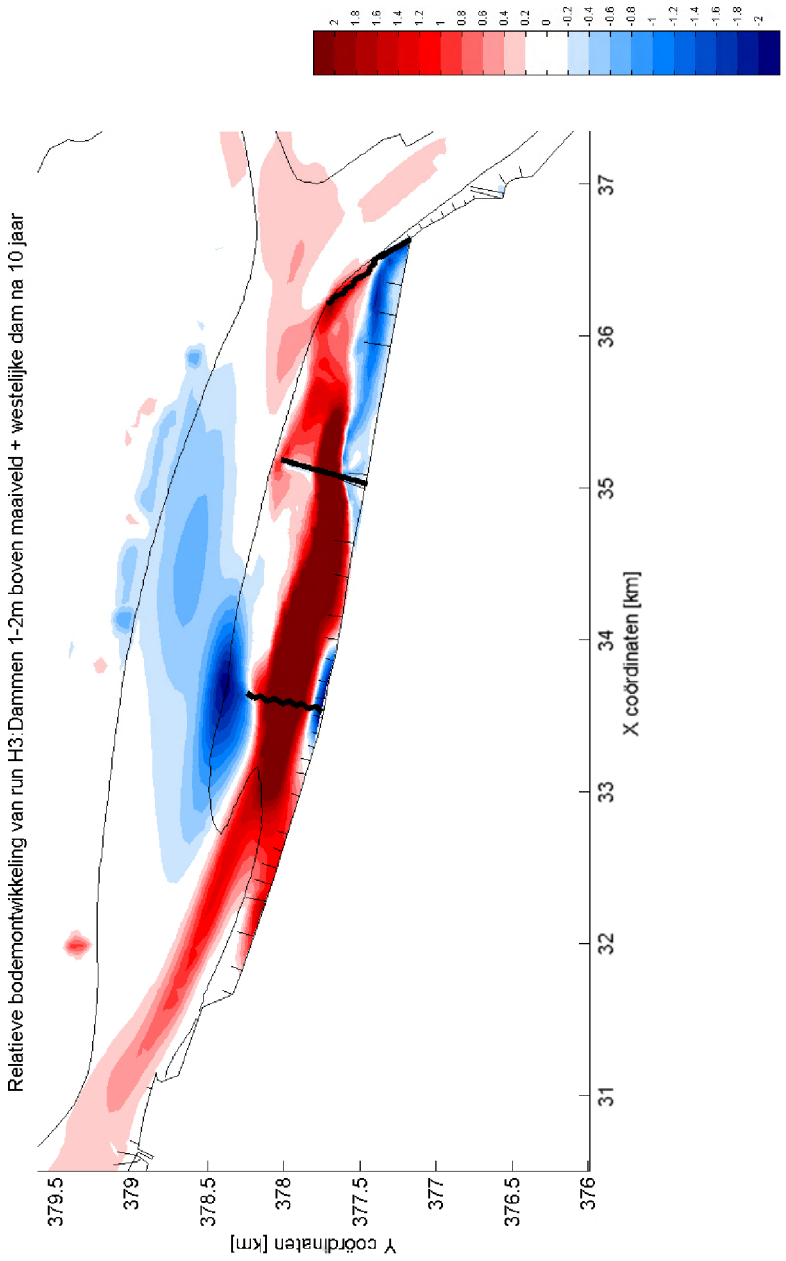
FIGUUR 3.10
1526
16-Apr-2009



Relatieve bodemontwikkeling

H2: Dammen 1-2 m boven maaiveld na 10 jaar

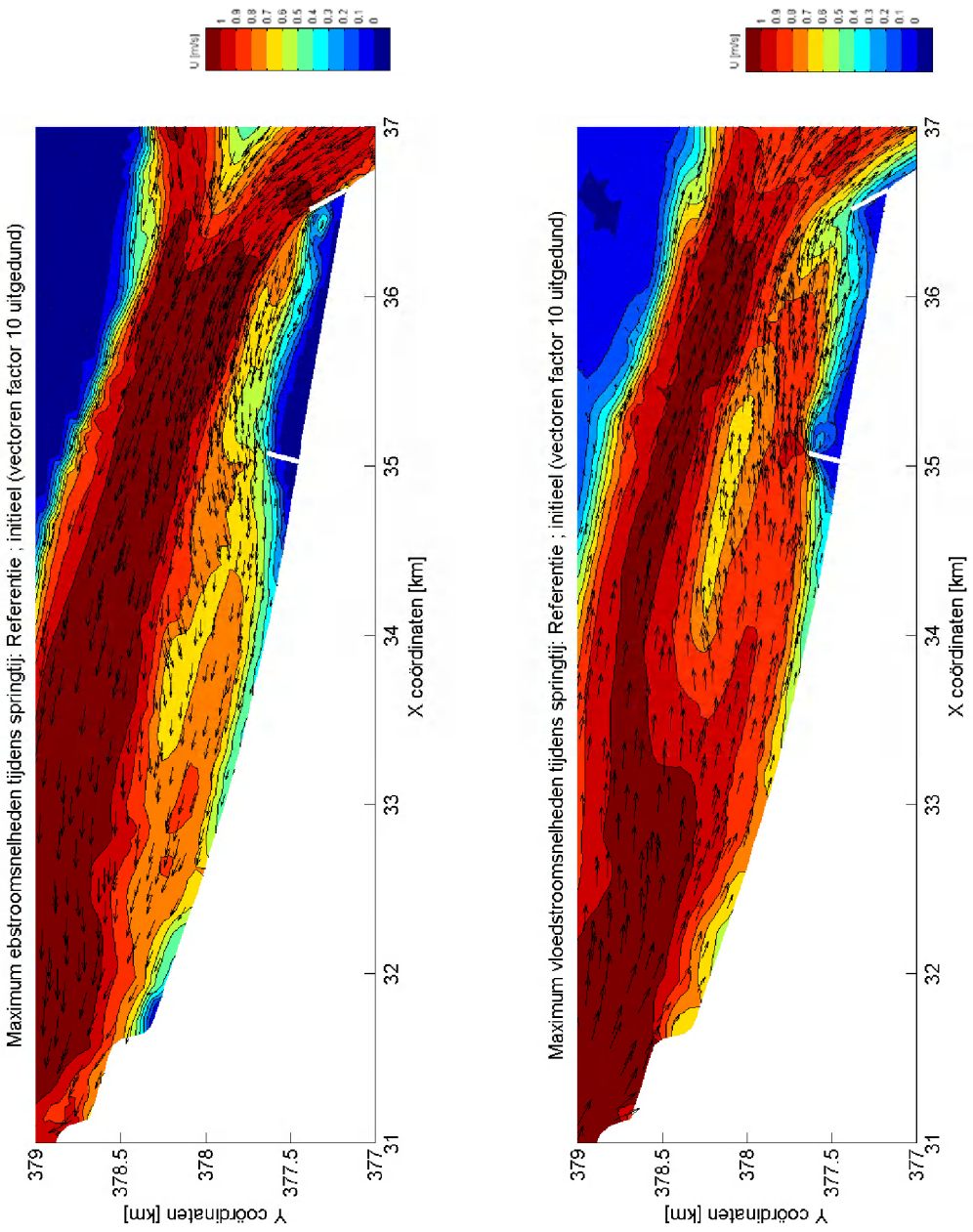
FIGUUR 3.11
1526
16-Apr-2009



Relatieve bodemontwikkeling

H3: Dammen 1-2m boven maaiveld + westelijke dam na 10 jaar

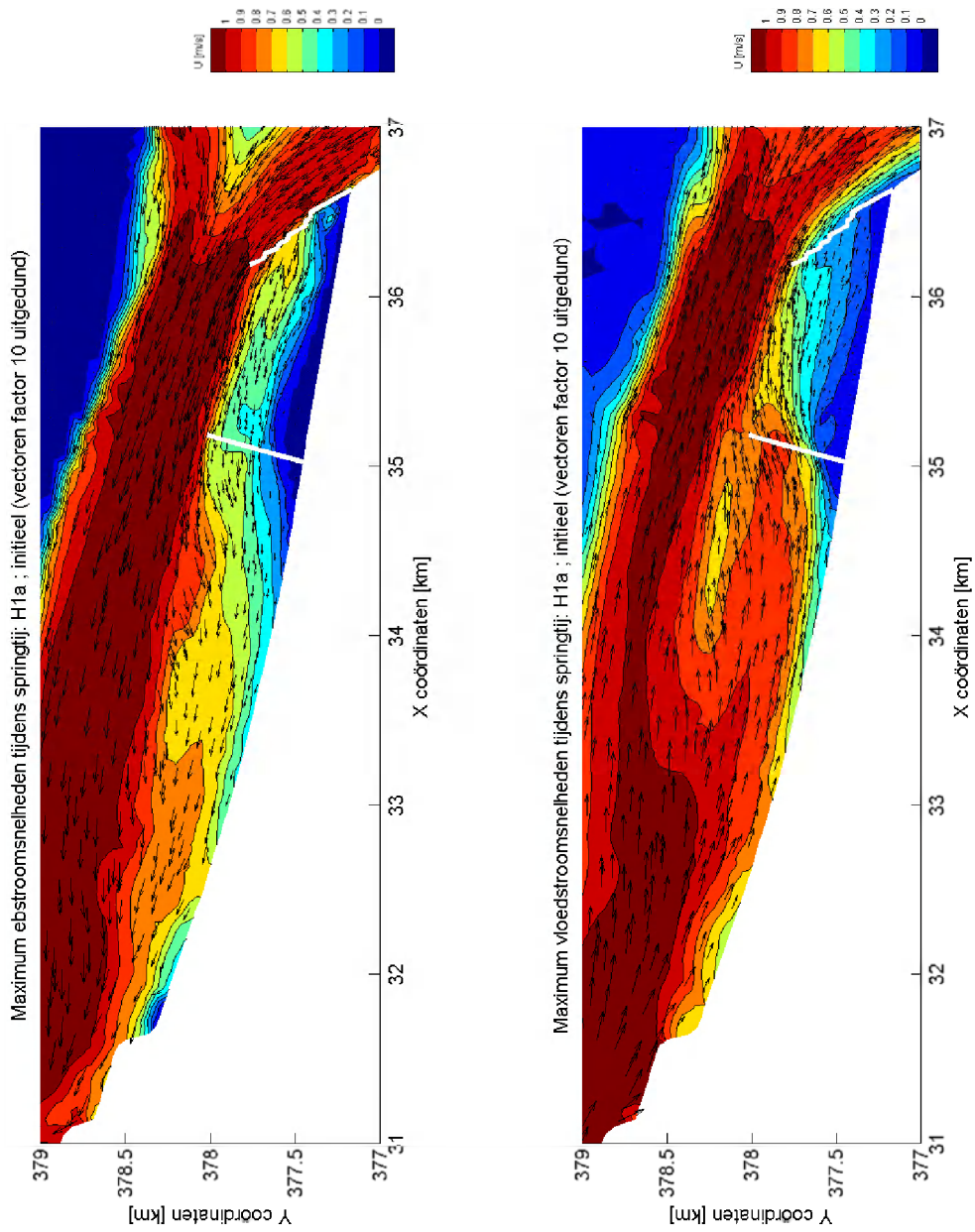
FIGUUR 3.12
1526
16-Apr-2009



Max. stroomsnelheden; initiele situatie

Alternatief: Referentie

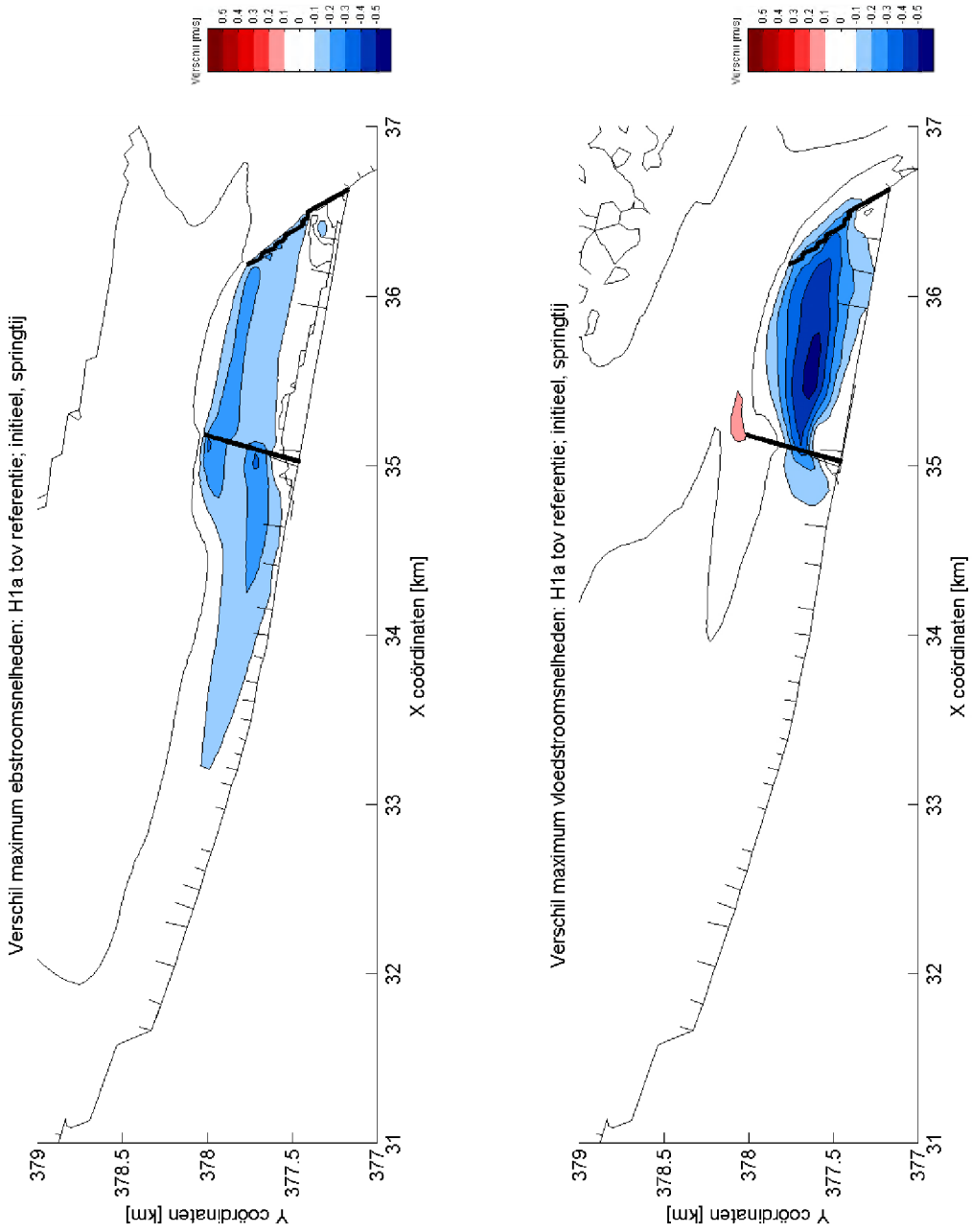
FIGUUR 3.13
1526
29-May-2009



Max. stroomsnelheden; initiele situatie

Alternatief: H1a

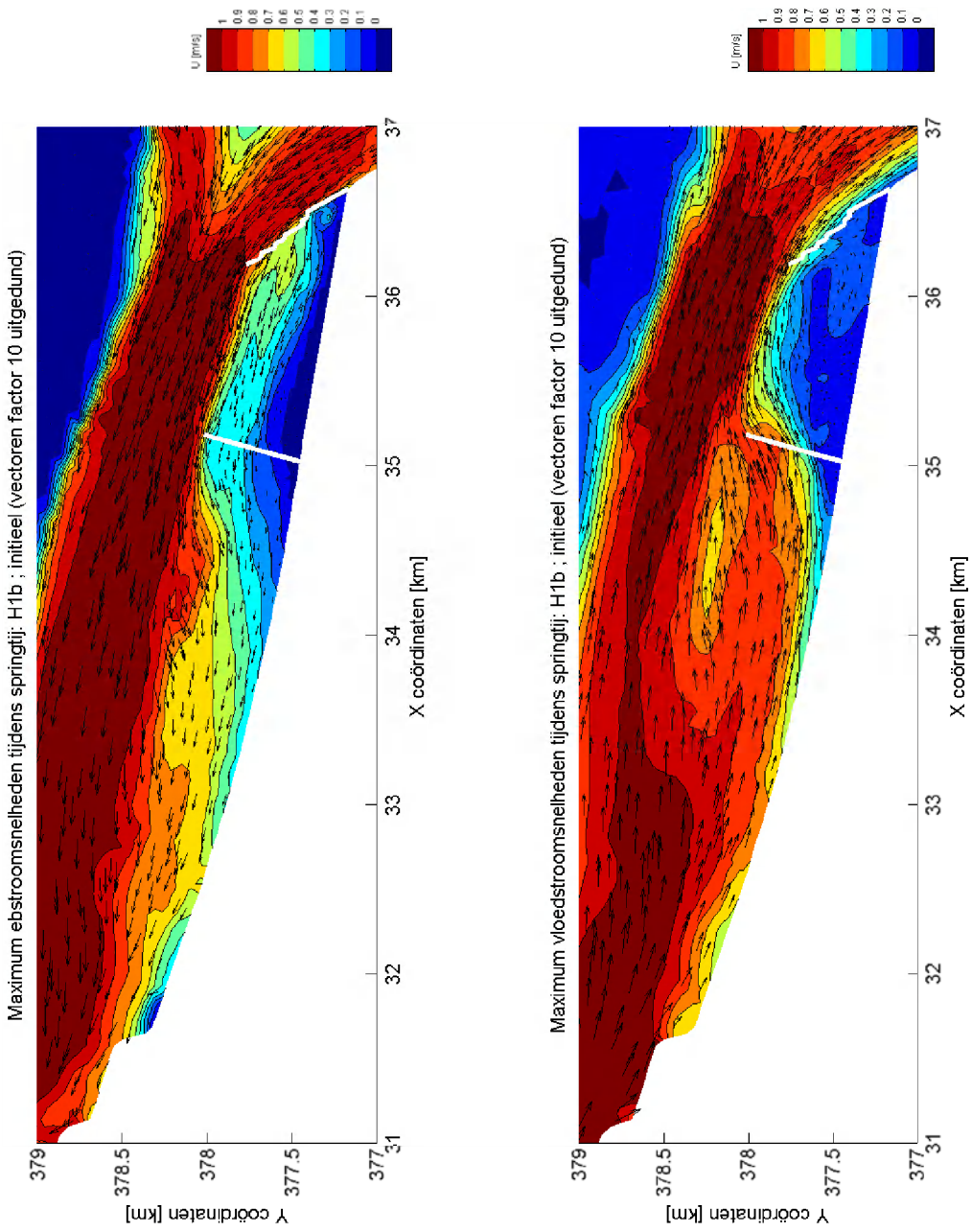
FIGUUR 3.14
1526
29-May-2009



Verschil stroomsnelheden tov referentie; initiele situatie **FIGUUR 3.15**

1526

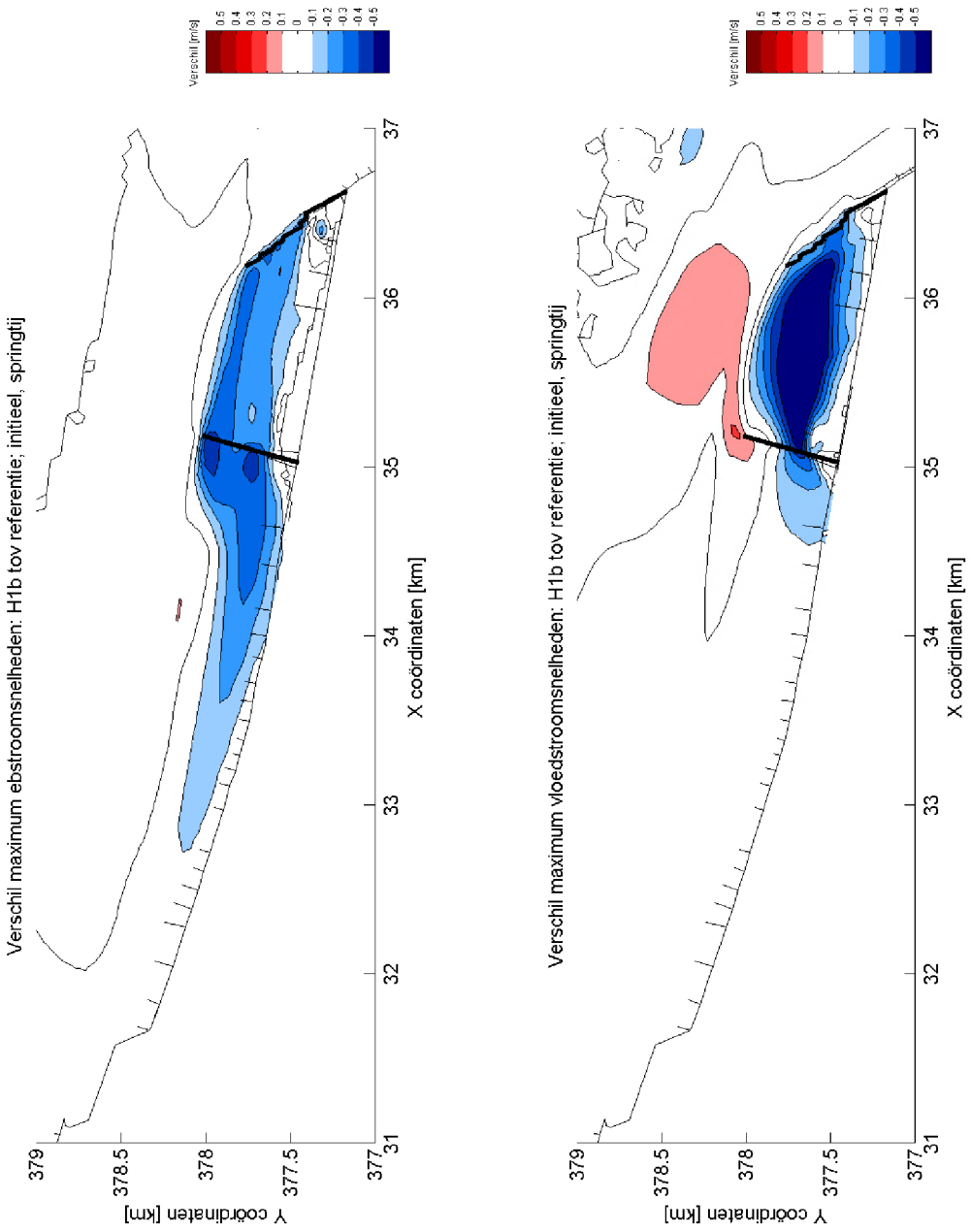
Alternatief: H1a 29-May-2009



Max. stroomsnelheden; initiele situatie

Alternatief: H1b

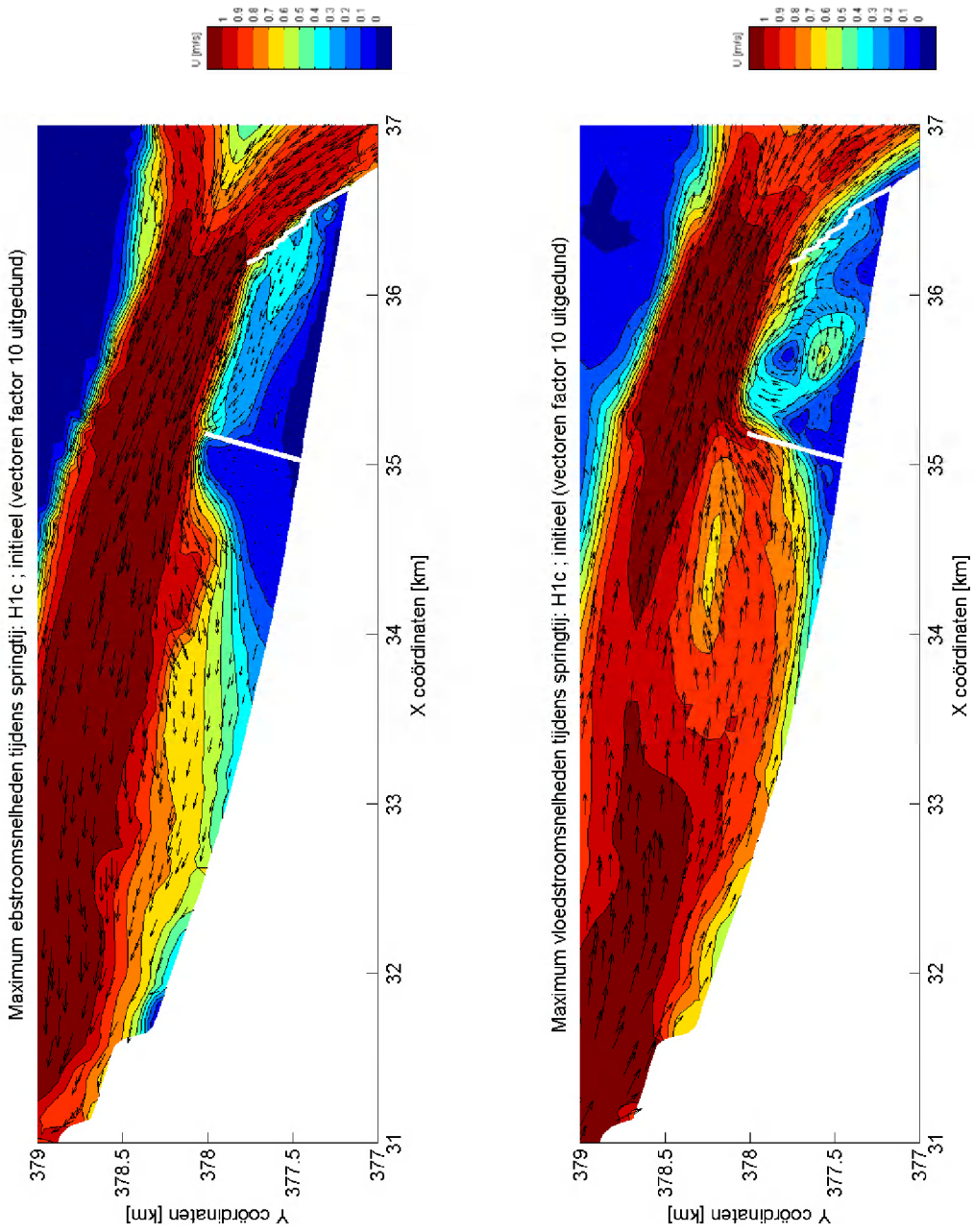
FIGUUR 3.16
1526
29-May-2009



Verschil stroomsnelheden tov referentie; initiele situatie **FIGUUR 3.17**

1526

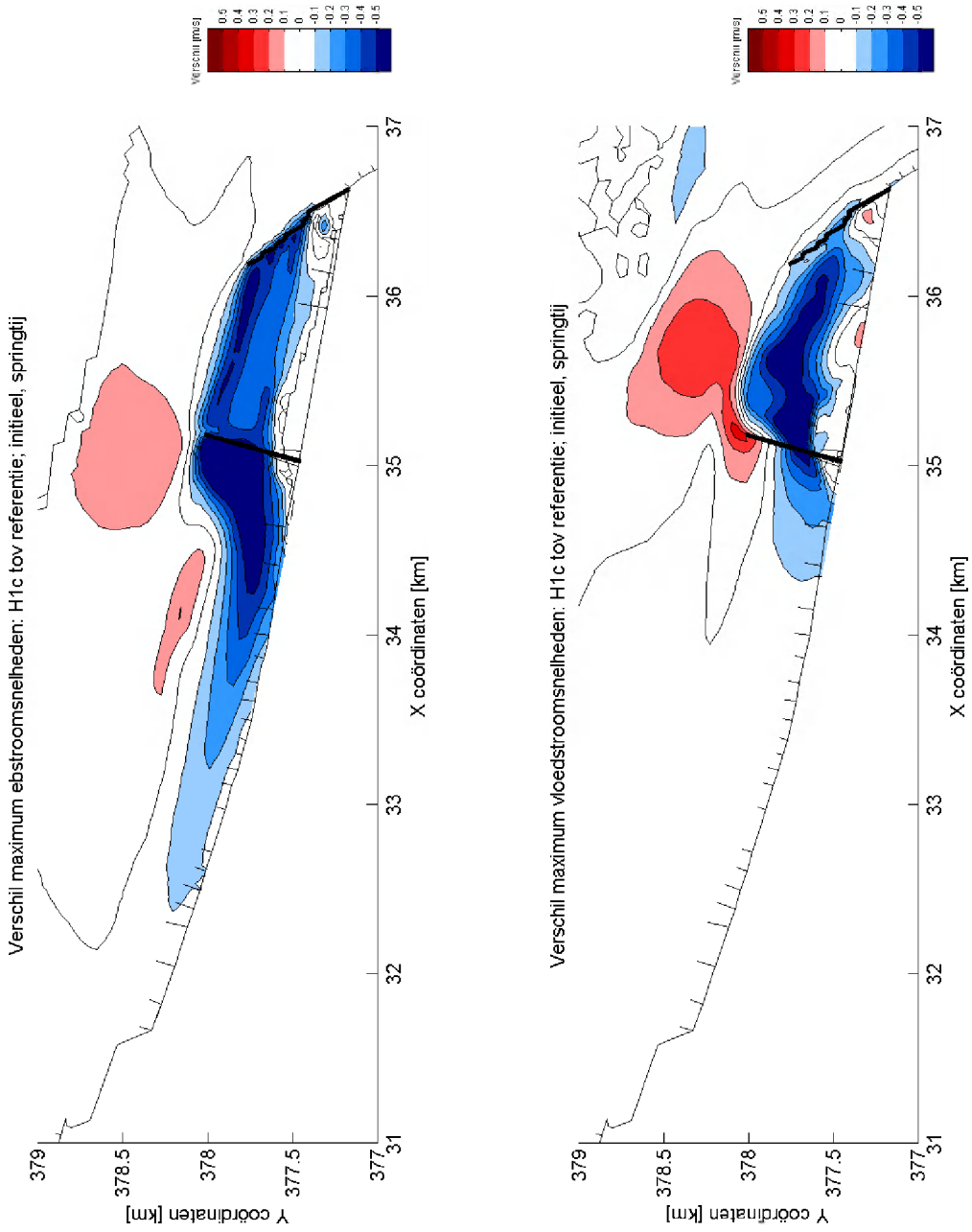
Alternatief: H1b 29-May-2009



Max. stroomsnelheden; initiele situatie

Alternatief: H1c

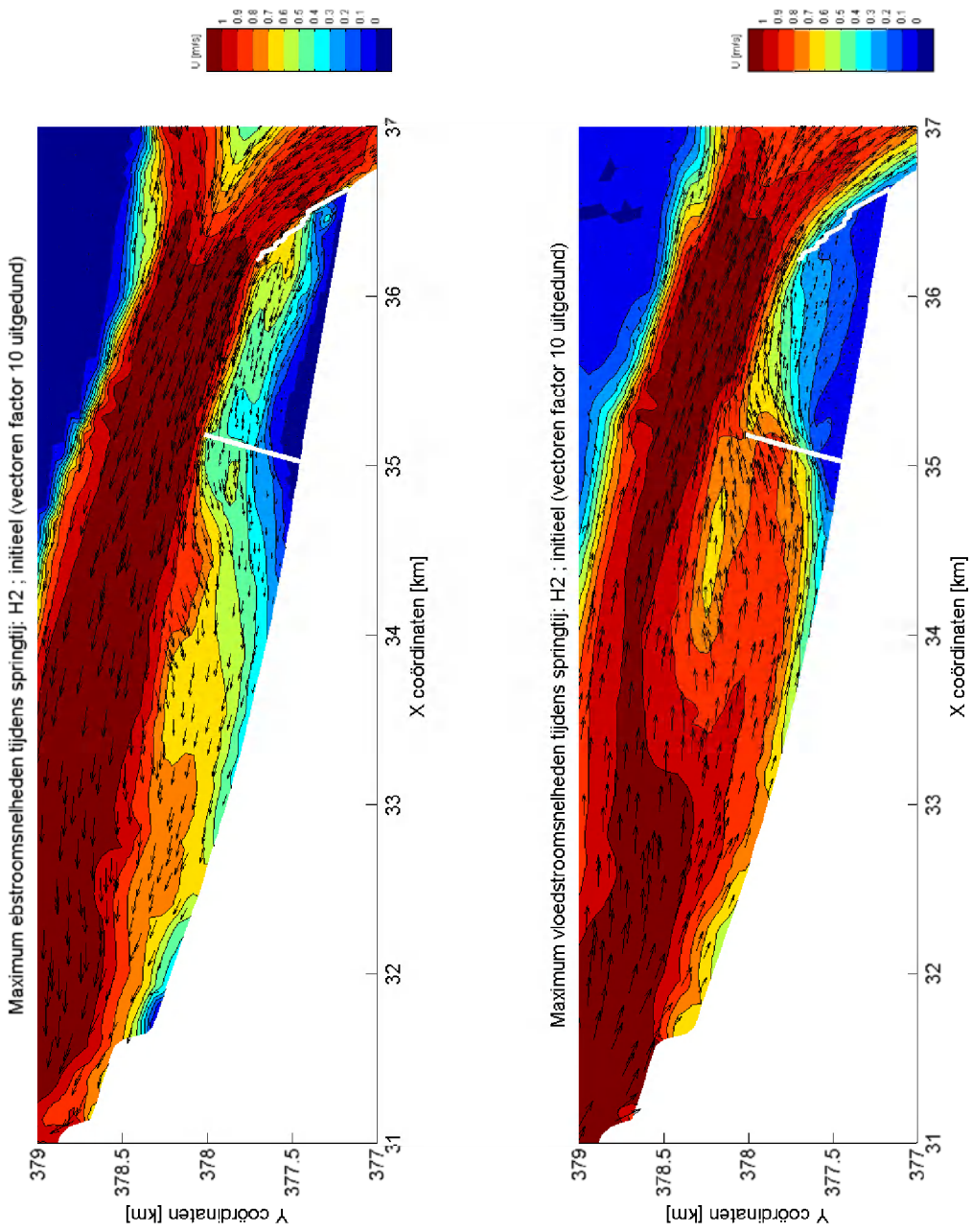
FIGUUR 3.18
1526
29-May-2009



Verschil stroomsnelheden tov referentie; initiele situatie **FIGUUR 3.19**

1526

Alternatief: H1c 29-May-2009

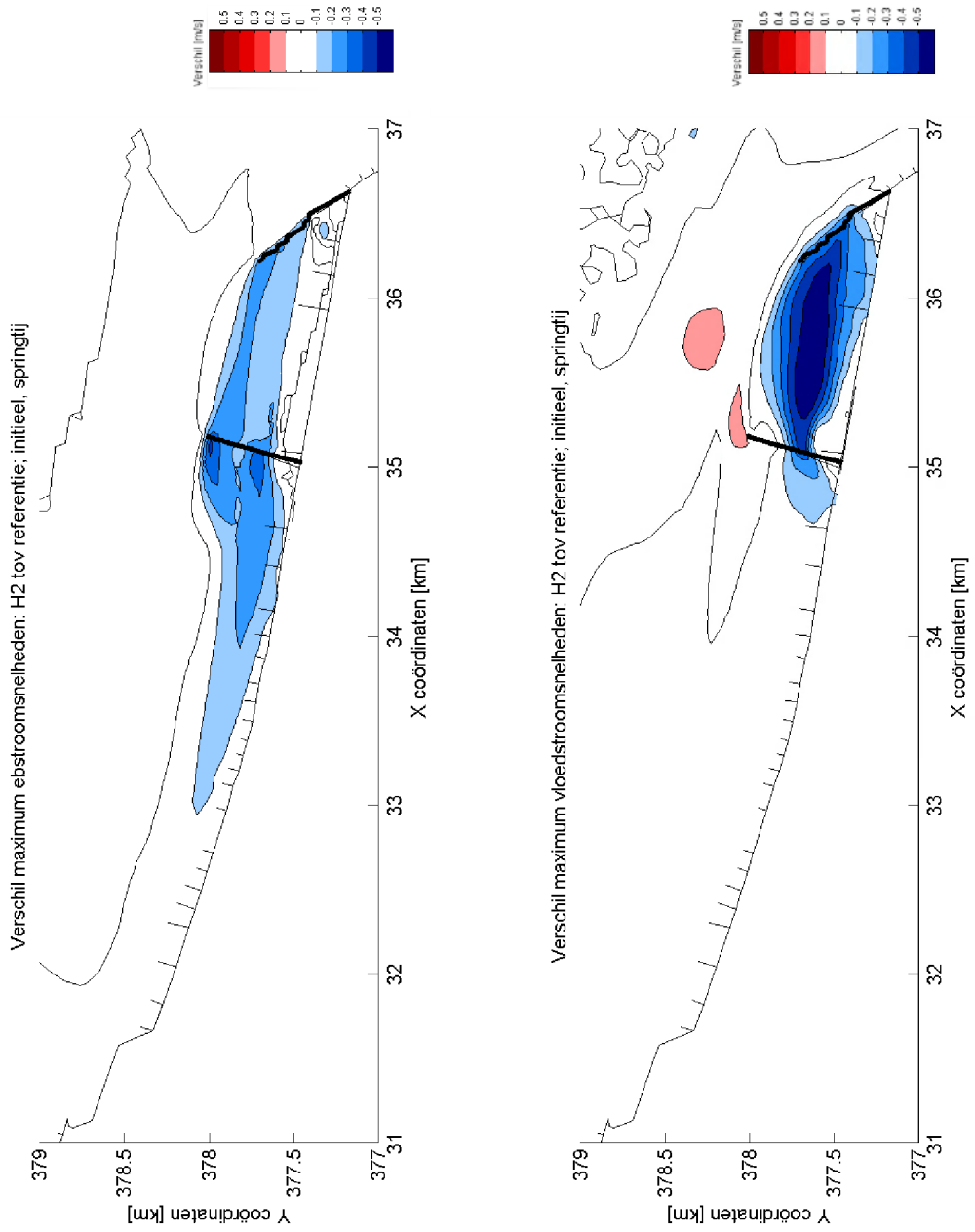


SVASEK HYDRAULICS

Max. stroomsnelheden; initiele situatie

Alternatief: H2

FIGUUR 3.20
1526
29-May-2009

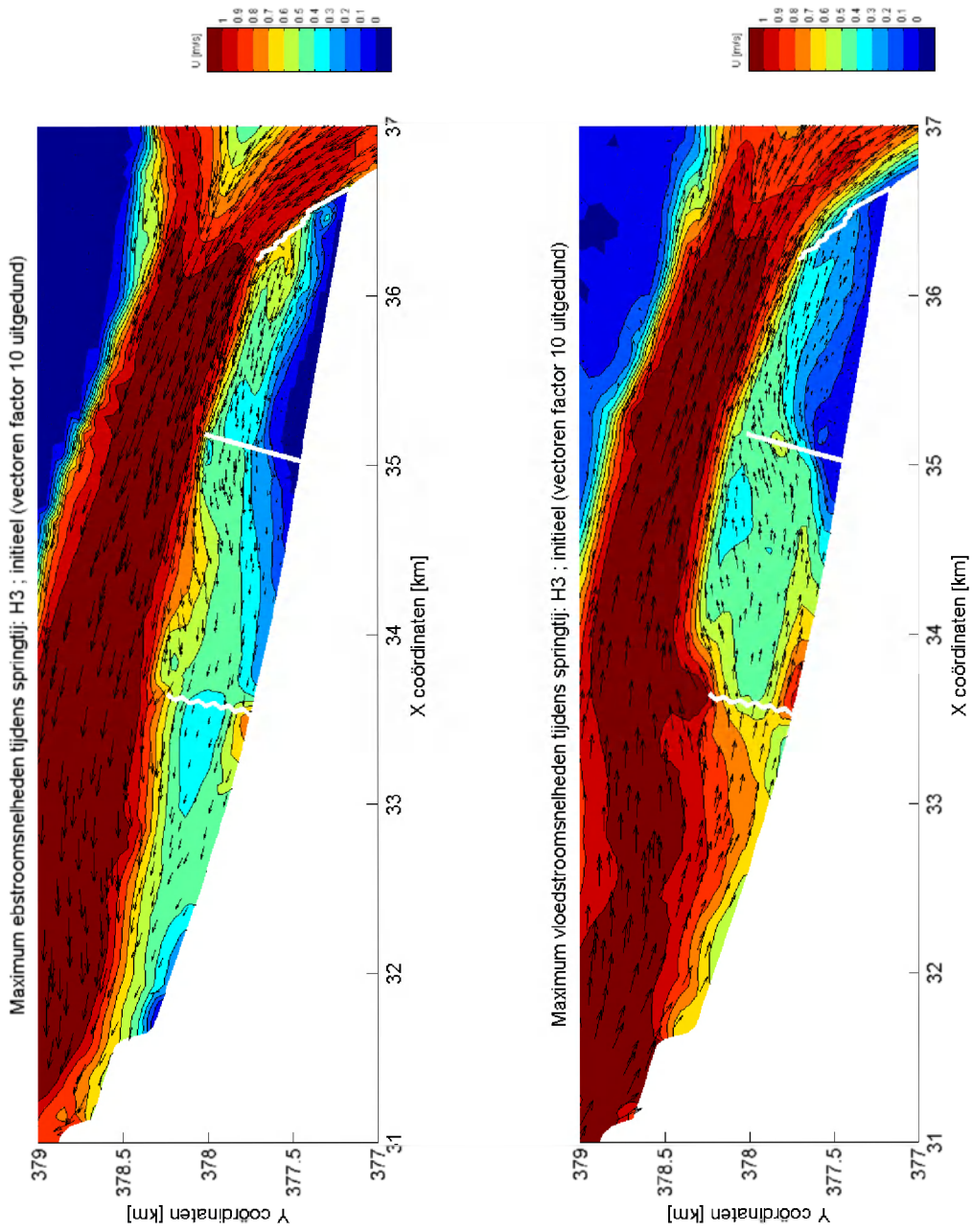


SVASEK HYDRAULICS

Verschil stroomsnelheden tov referentie; initiele situatie

Alternatief: H2

FIGUUR 3.21
1526
29-May-2009

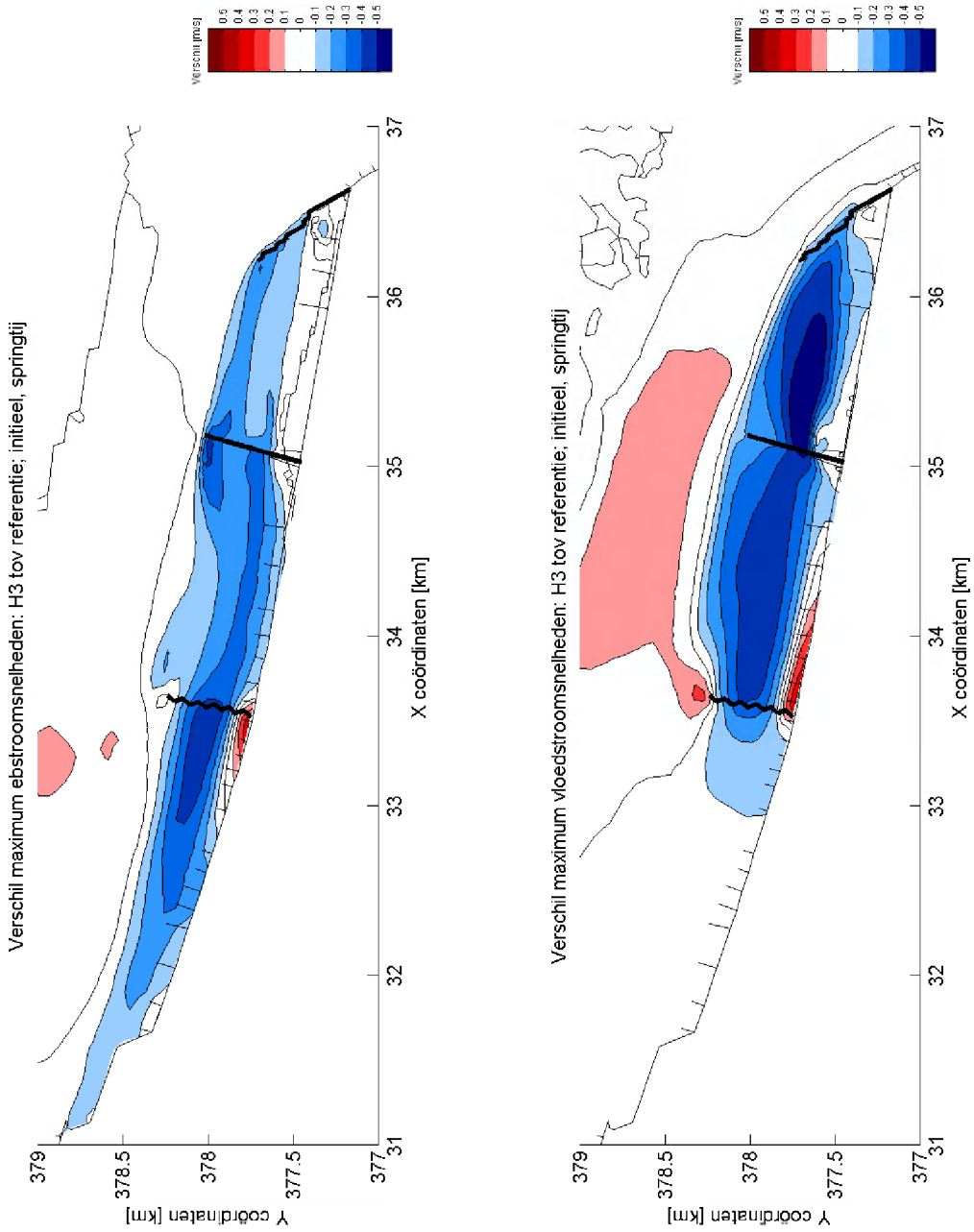


SVASEK HYDRAULICS

Max. stroomsnelheden; initiele situatie

Alternatief: H3

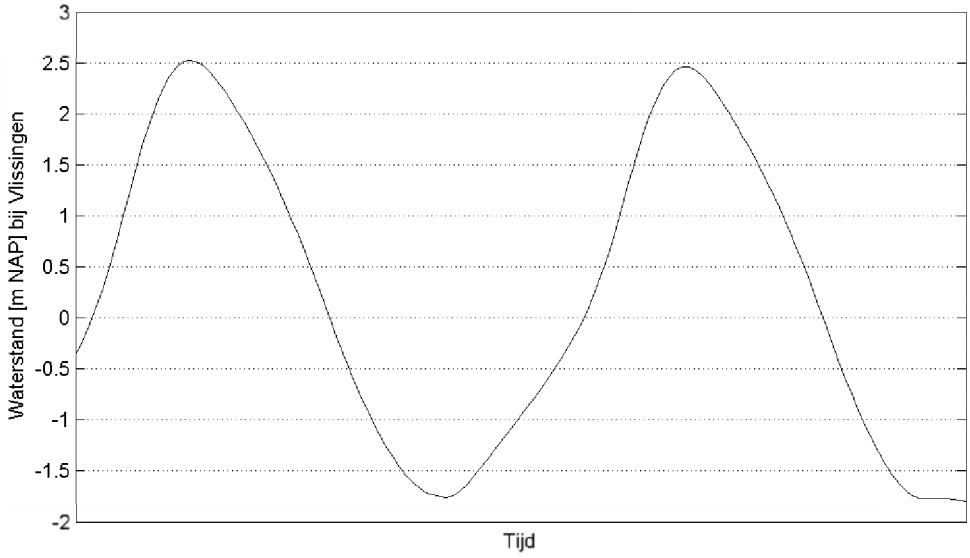
FIGUUR 3.22
1526
29-May-2009

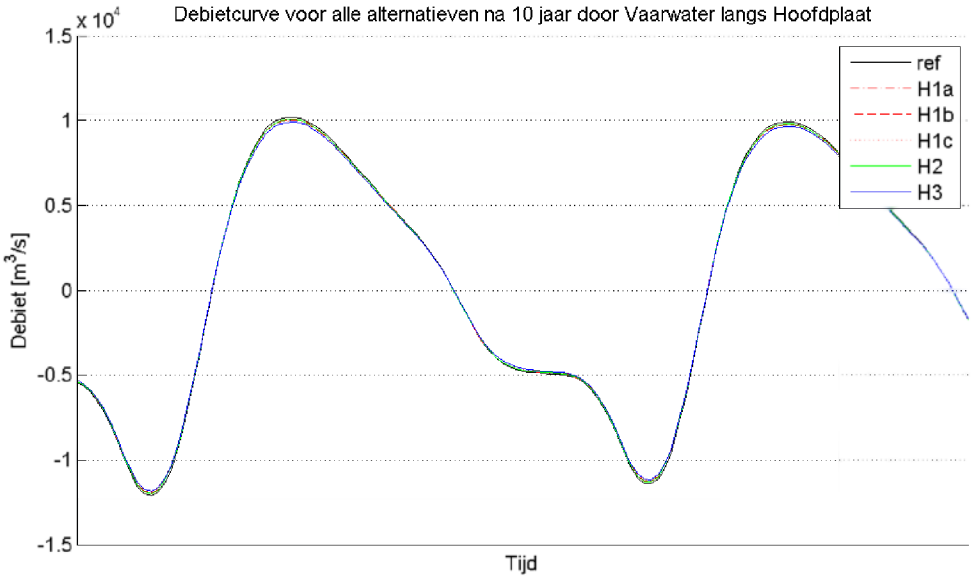


Verschil stroomsnelheden tov referentie; initiele situatie **FIGUUR 3.23**

1526

Alternatief: H3 29-May-2009



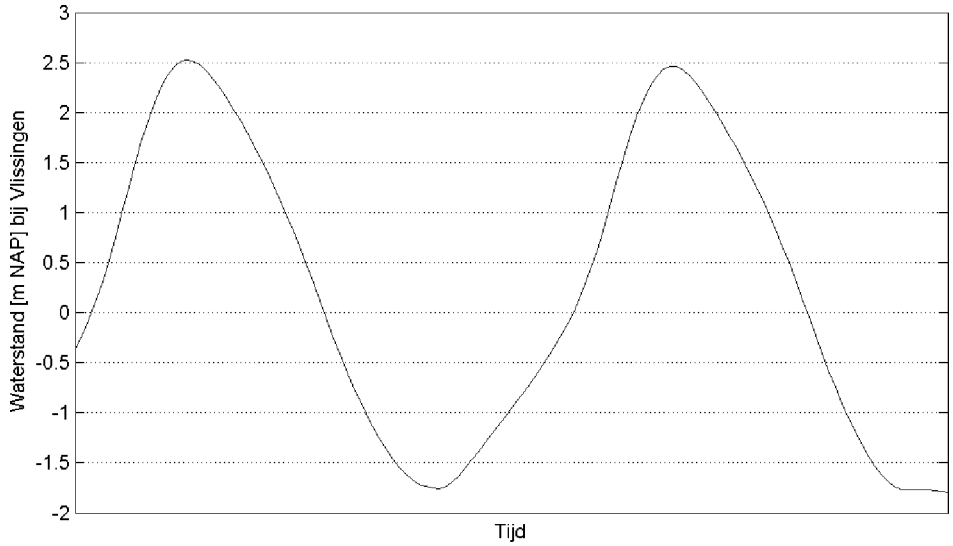


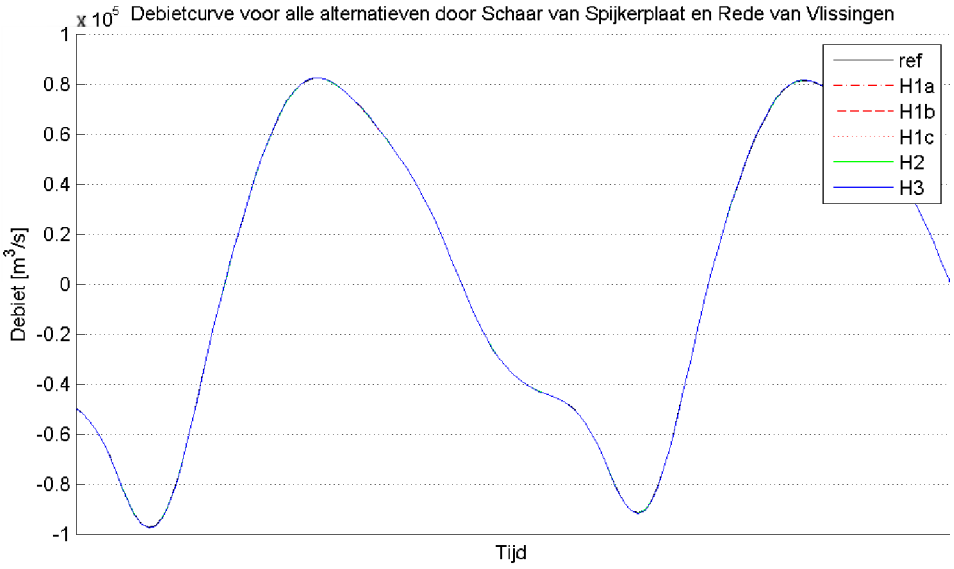
SVASEK HYDRAULICS

Debieten door Vaarwater langs Hoofdplaat

Springtij situatie, na 10 jaar

FIGUUR 3.24
1526
29-May-2009

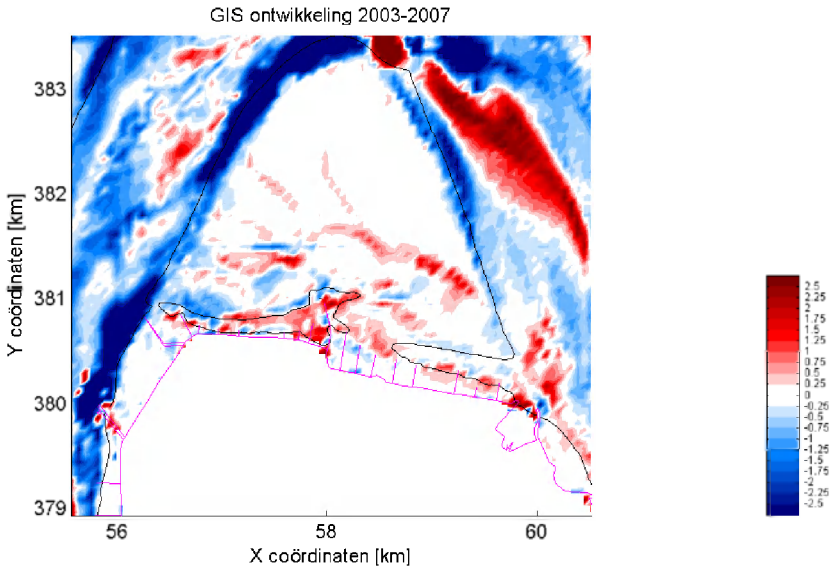


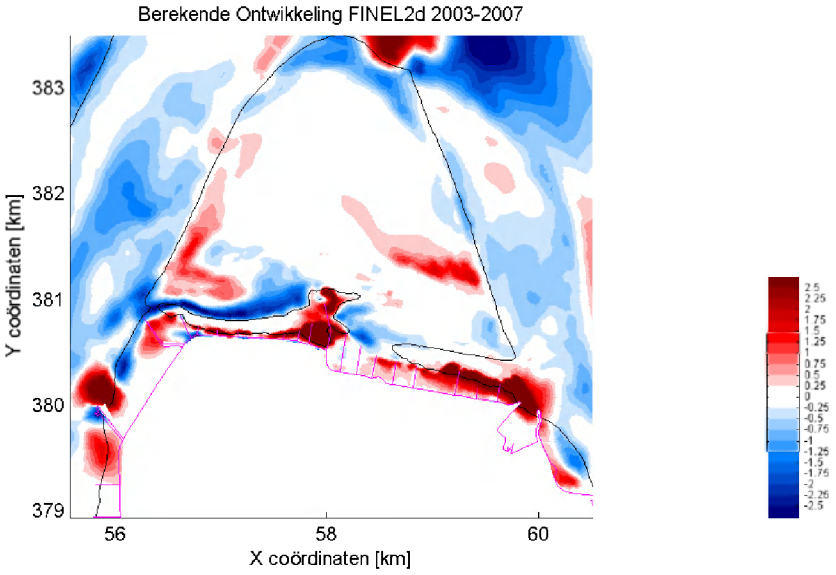


Debieten door Schaar van Spijkerplaat en Rede van Vlissingen **FIGUUR 3.25**

1526

Springtij situatie, na 10 jaar 29-May-2009



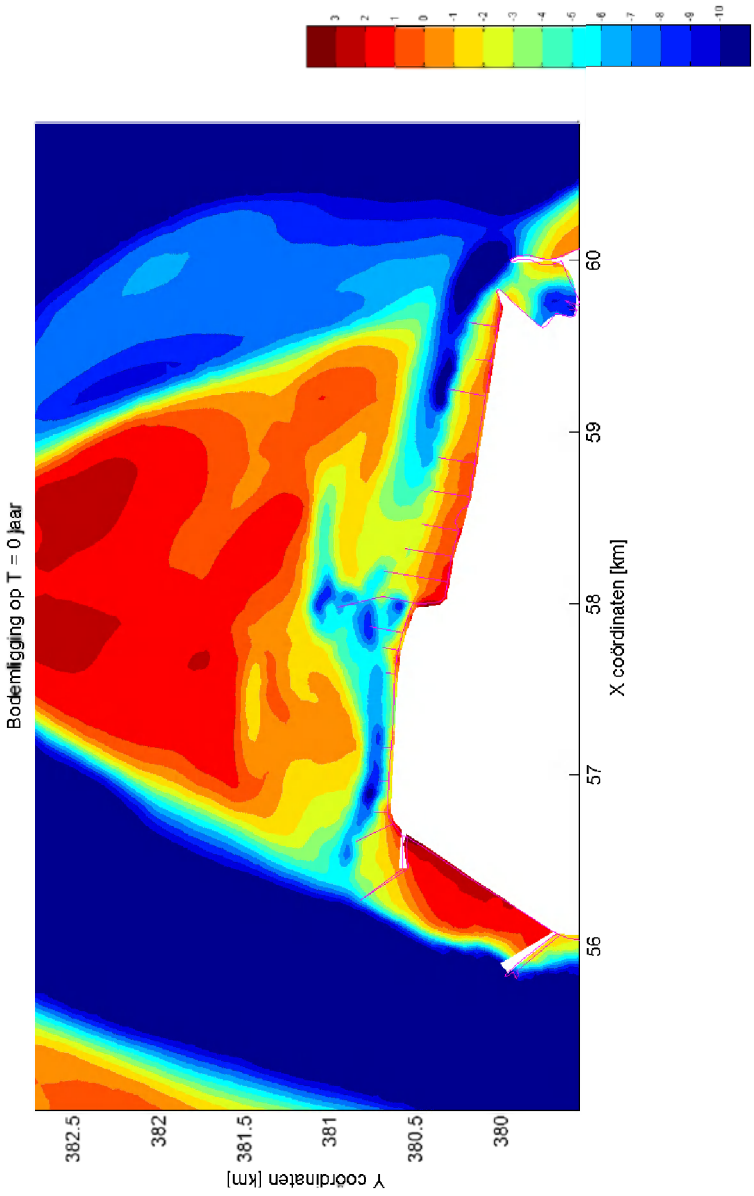


Gemeten en berekende bodemontwikkeling Ossenisse 2003-2007 **FIGUUR 4.1**

1526

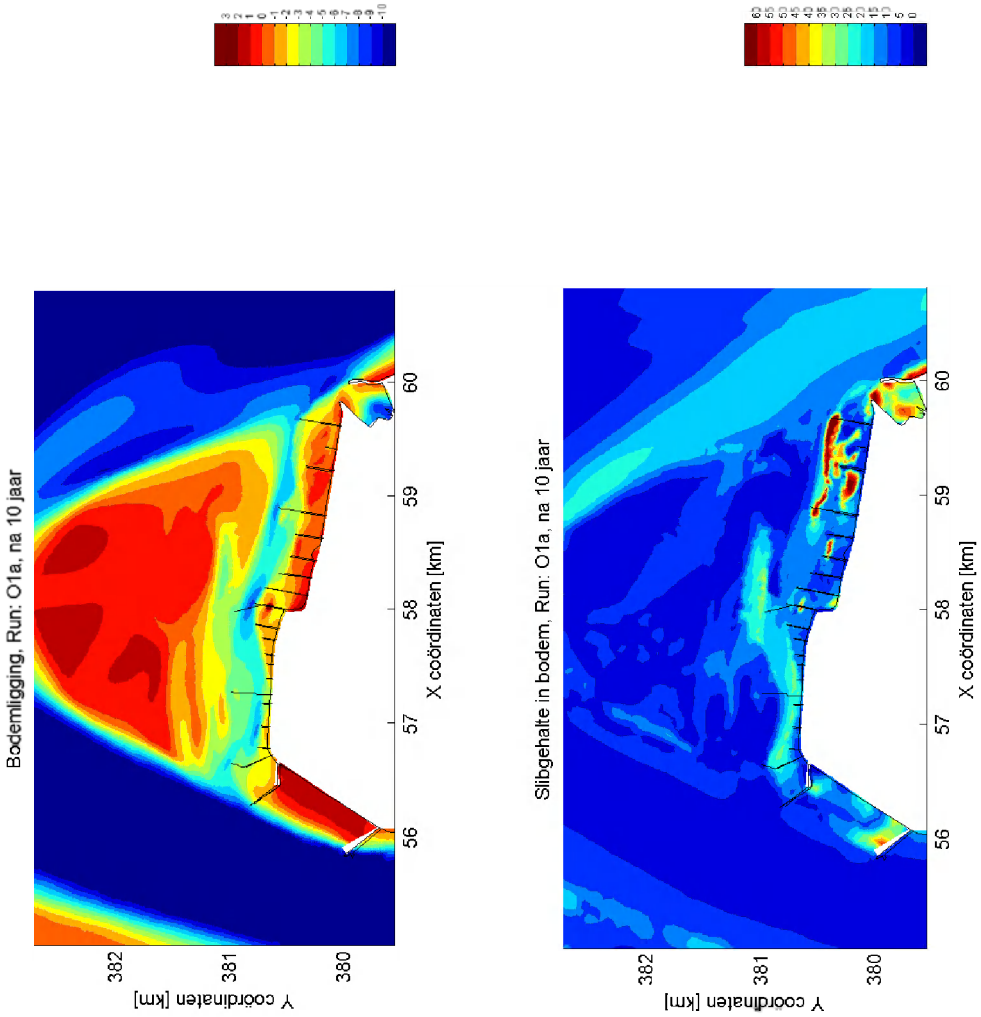
____ = 5m dieptecontour

16-Apr-2009



Bodemligging Ossenisse in jaar 0 van alle alternatieven

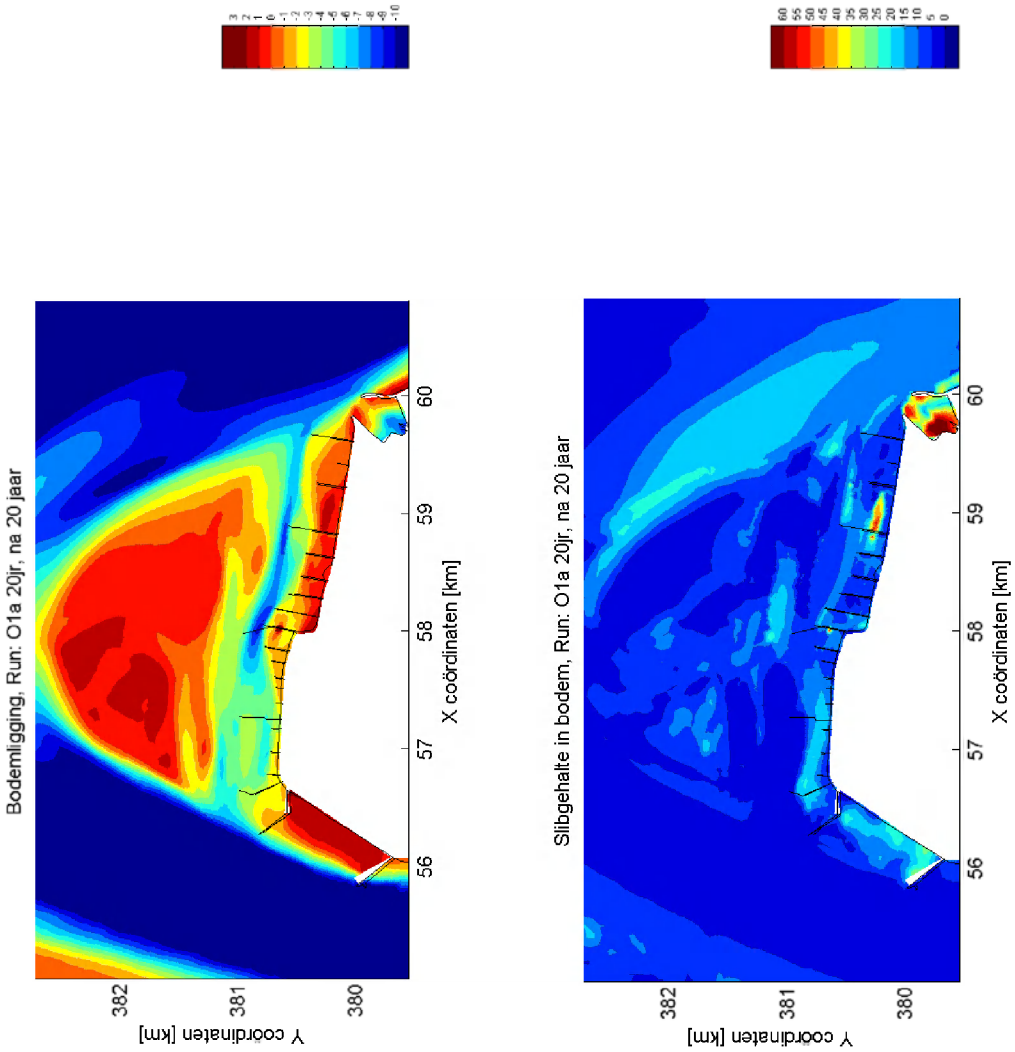
FIGUUR 4.2
1526
16-Apr-2009



Bodemligging en slibgehalte in bodem

O1a: Uitbouw dammen op oorspr. hoogte -1m na 10 jaar

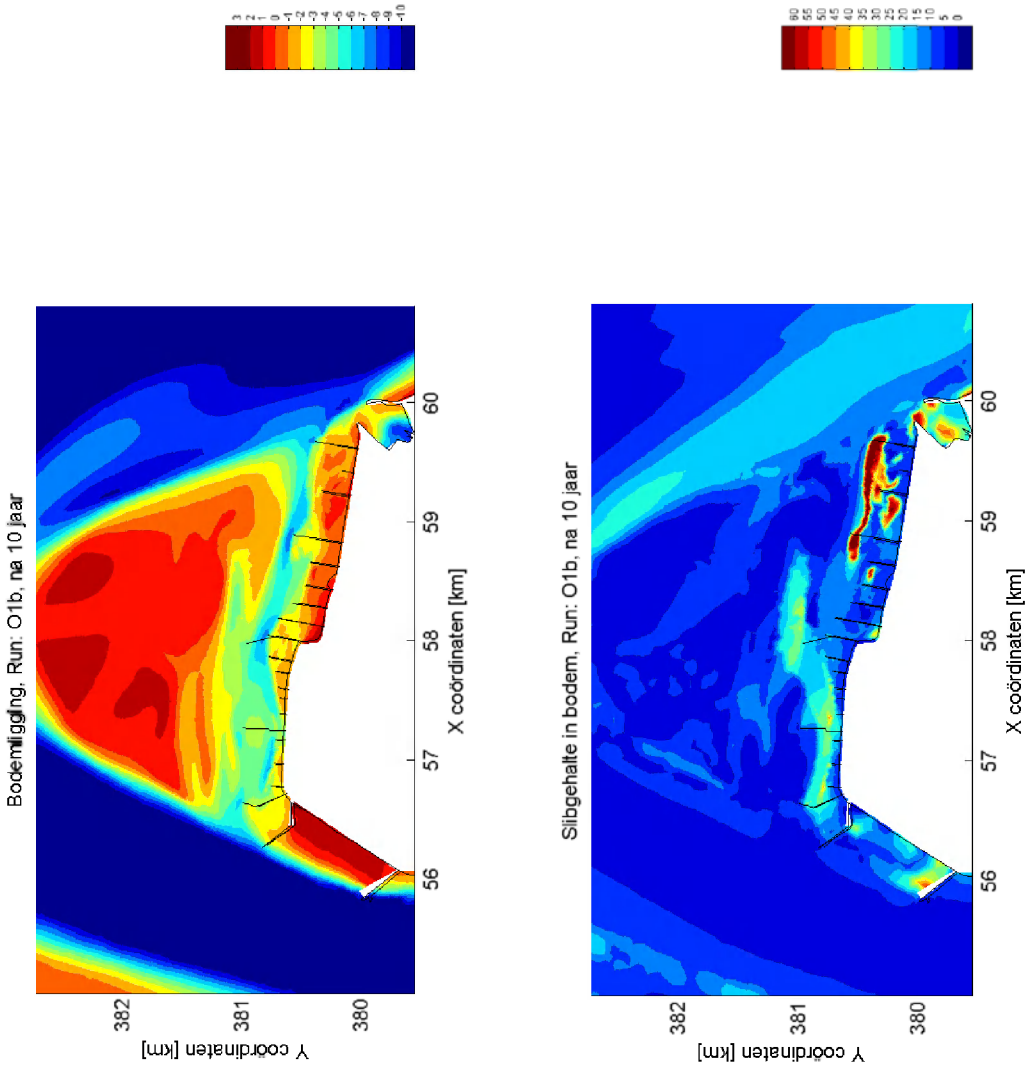
FIGUUR 4.3
1526
16-Apr-2009



Bodemligging en slibgehalte in bodem **FIGUUR 4.4**

1526

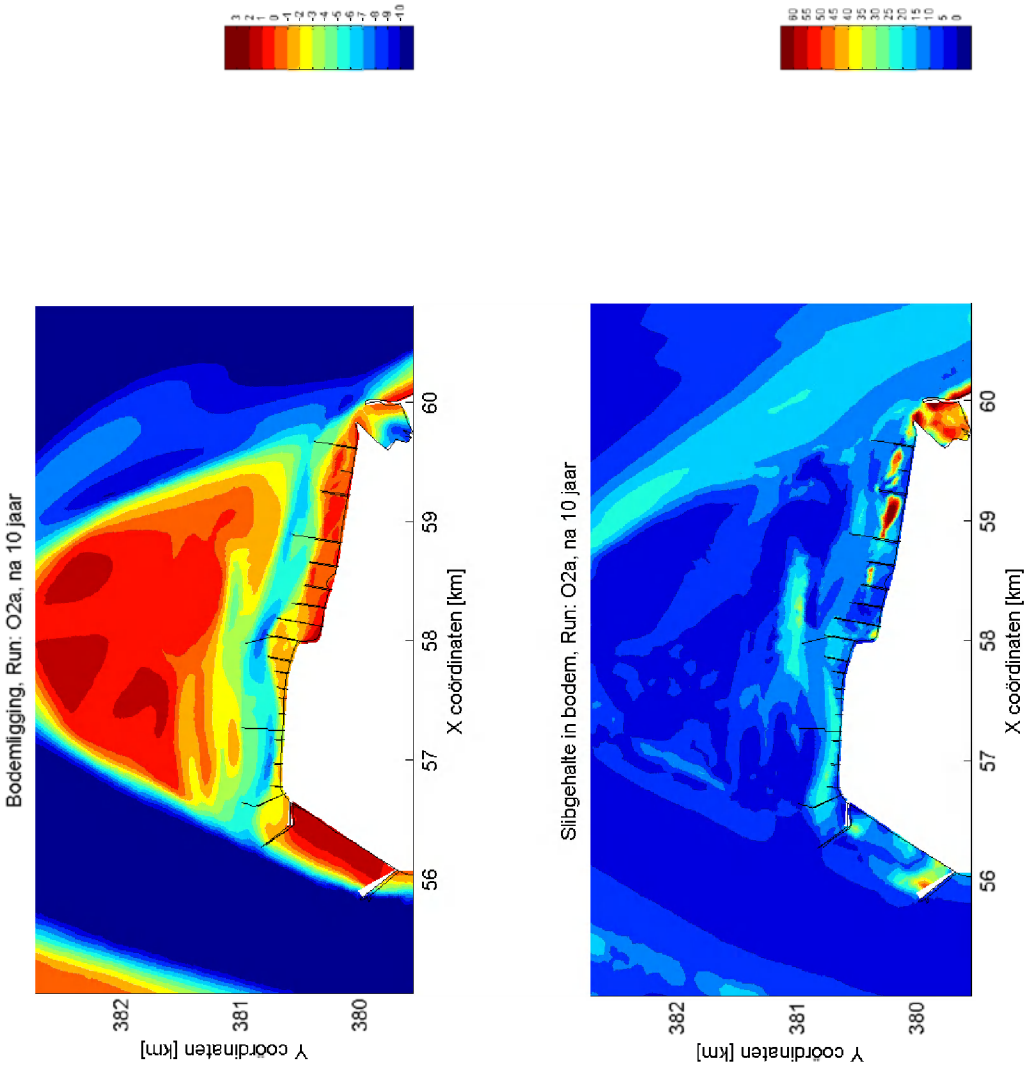
O1a 20jr: Uitbouw dammen op oorspr. hoogte -1m na 20jr na 20 jaar 17-Apr-2009



Bodemligging en slibgehalte in bodem

O1b: Uitbouw dammen met oorspr. hoogte na 10 jaar

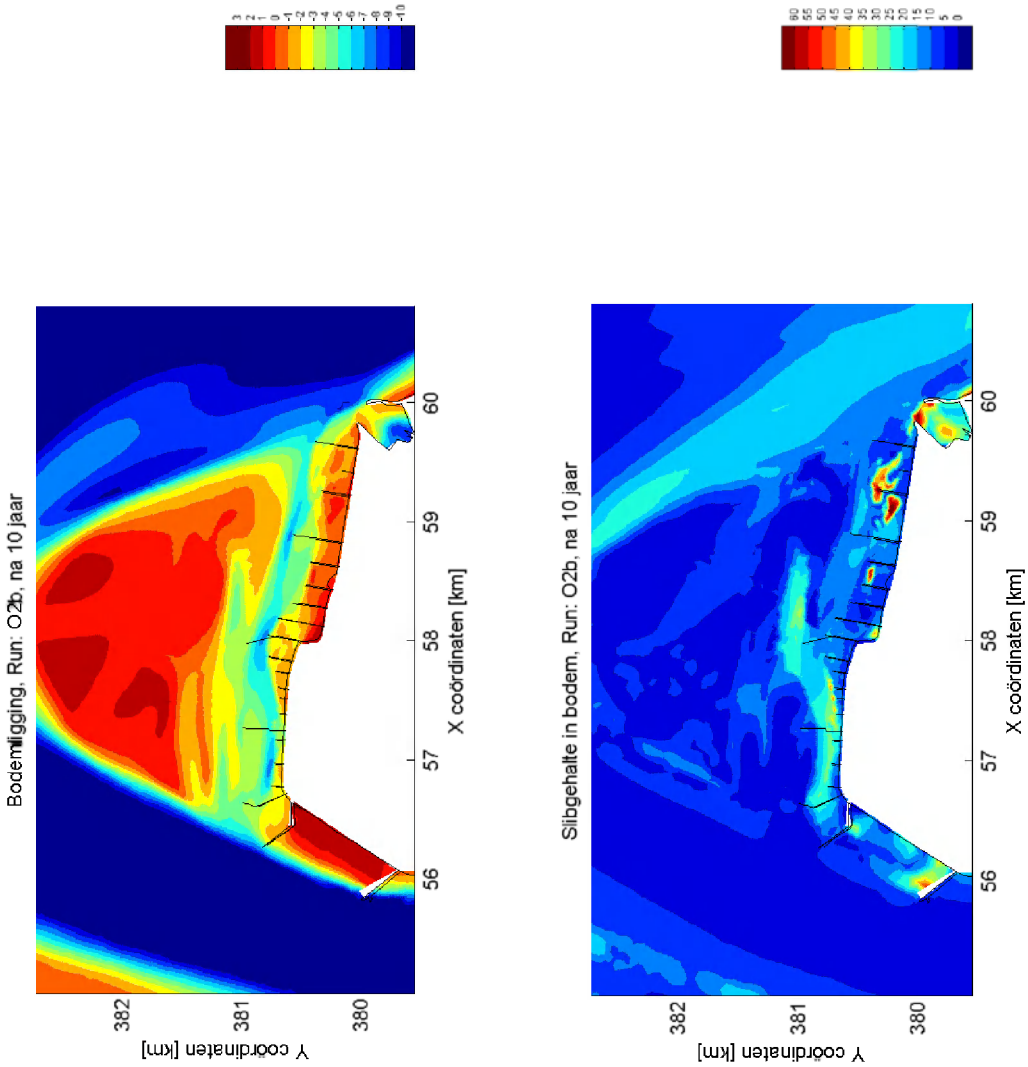
FIGUUR 4.5
1526
17-Apr-2009



Bodemligging en slibgehalte in bodem

O2a: Verlengde dammen op -4m NAP na 10 jaar

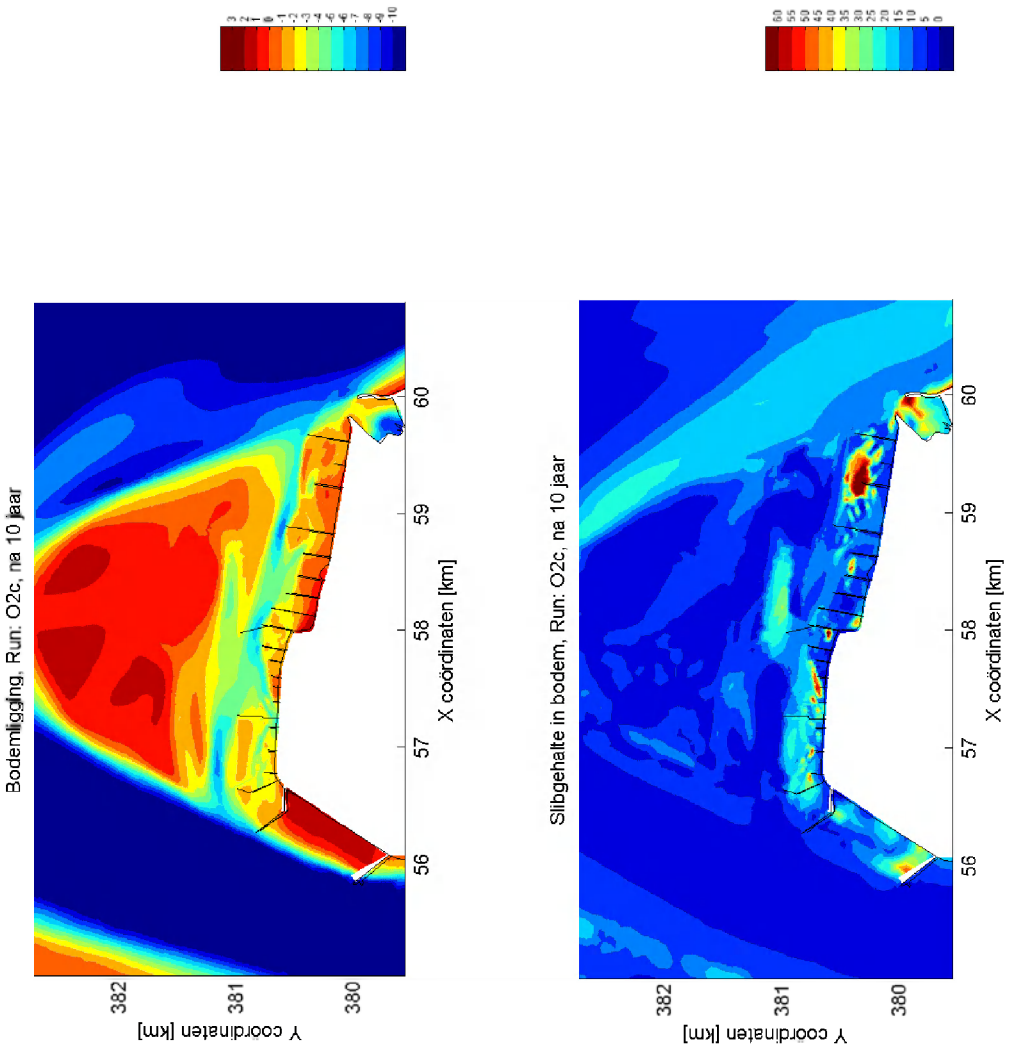
FIGUUR 4.6
1526
17-Apr-2009



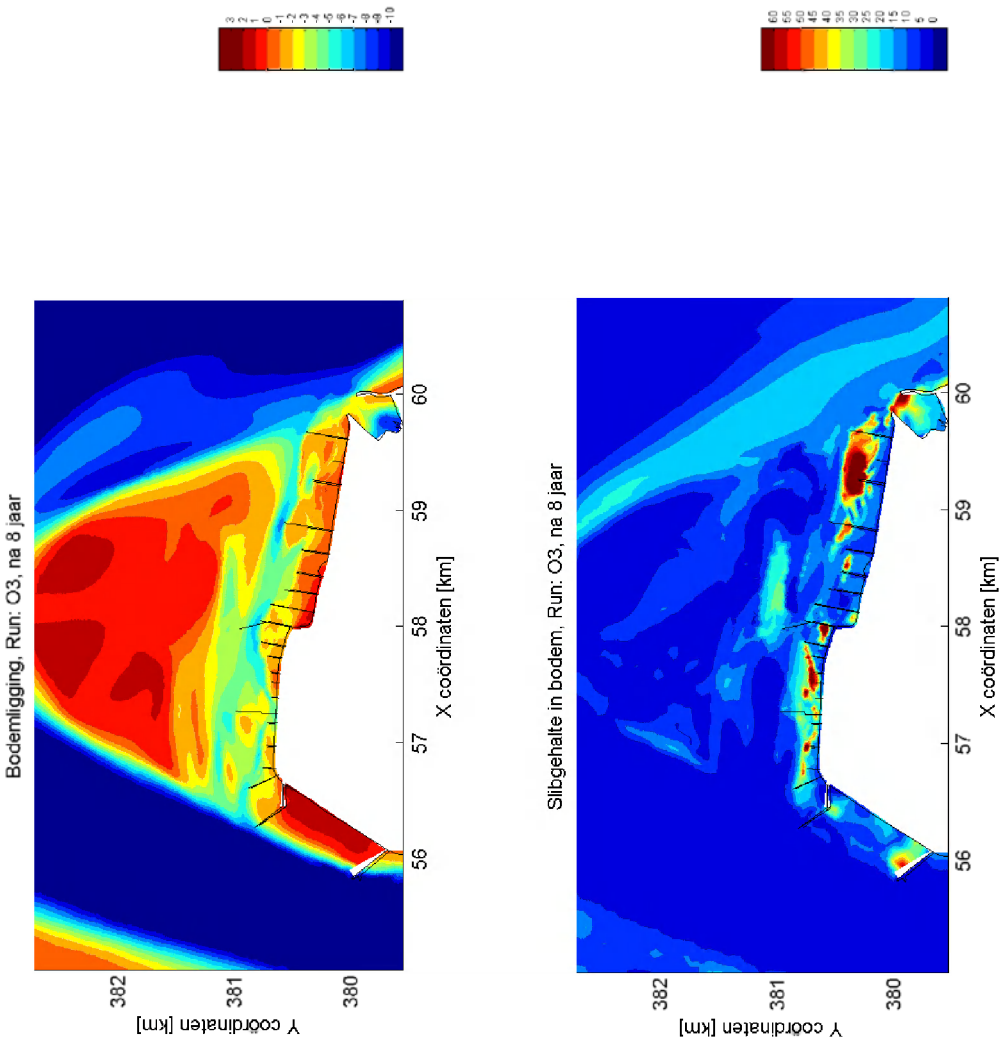
Bodemligging en slibgehalte in bodem

O2b: Verlengde dammen op -2m NAP na 10 jaar

FIGUUR 4.7
1526
17-Apr-2009



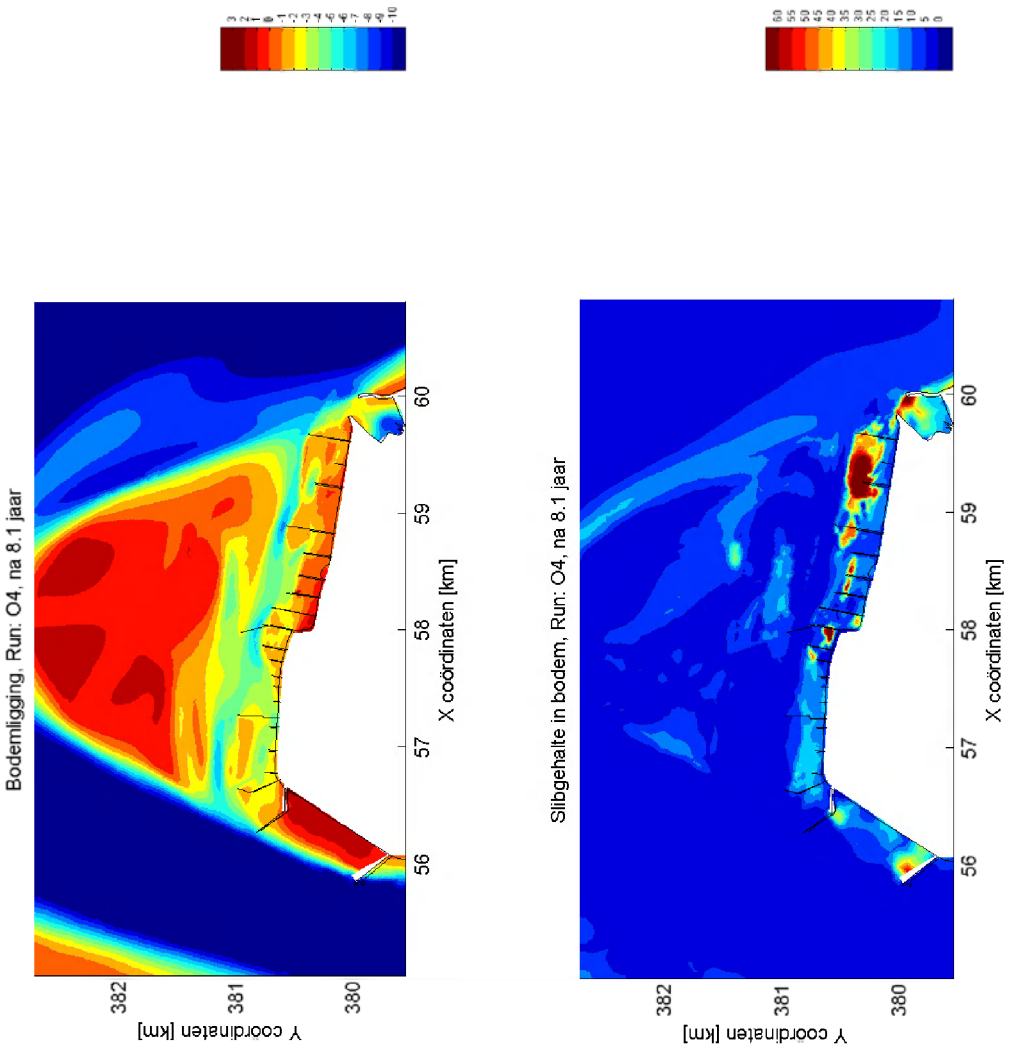
SVASEK HYDRAULICS	**Bodemligging en slibgehalte in bodem**	**FIGUUR 4.8**
		1526
	O2c: Verlengde dammen op 0m NAP na 10 jaar	17-Apr-2009



Bodemligging en slibgehalte in bodem **FIGUUR 4.9**

1526

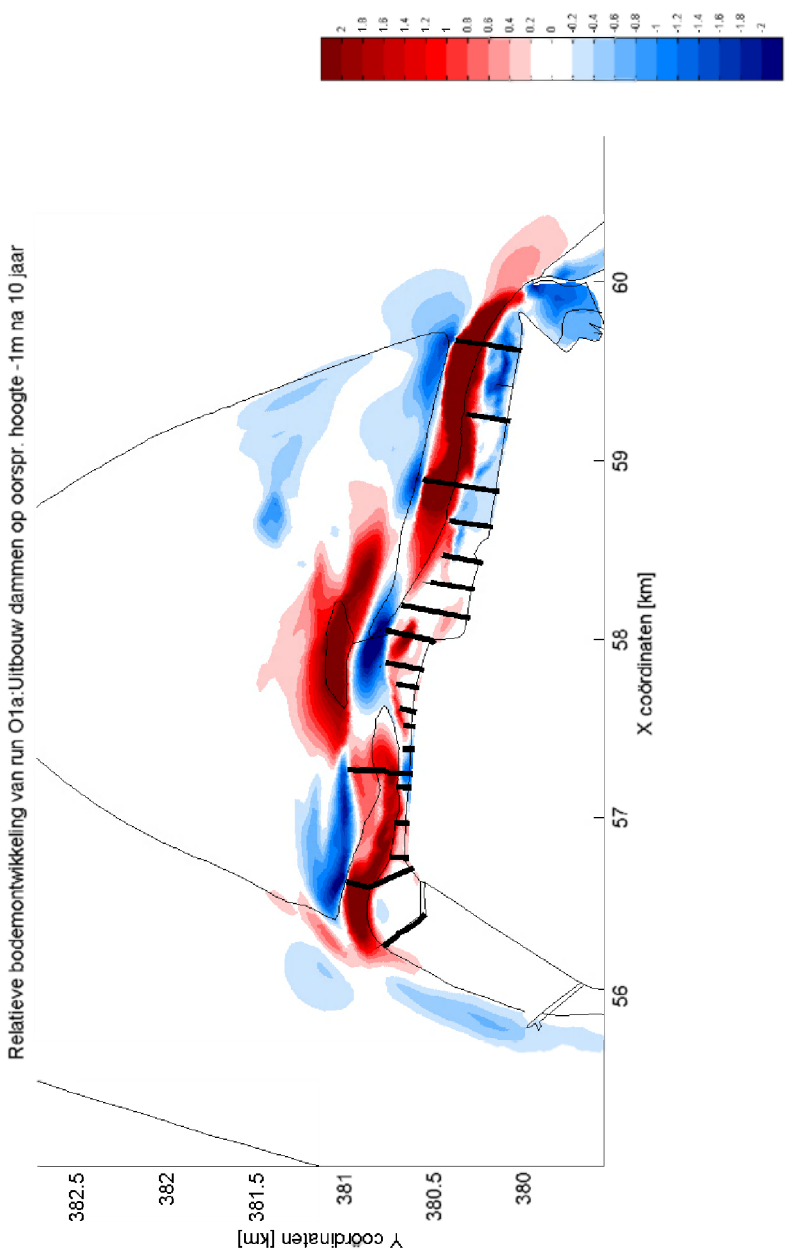
O3: Verlengde dammen op 0m NAP + tip westelijke dam weg na 8 jaar 17-Apr-2009



Bodemligging en slibgehalte in bodem **FIGUUR 4.10**

1526

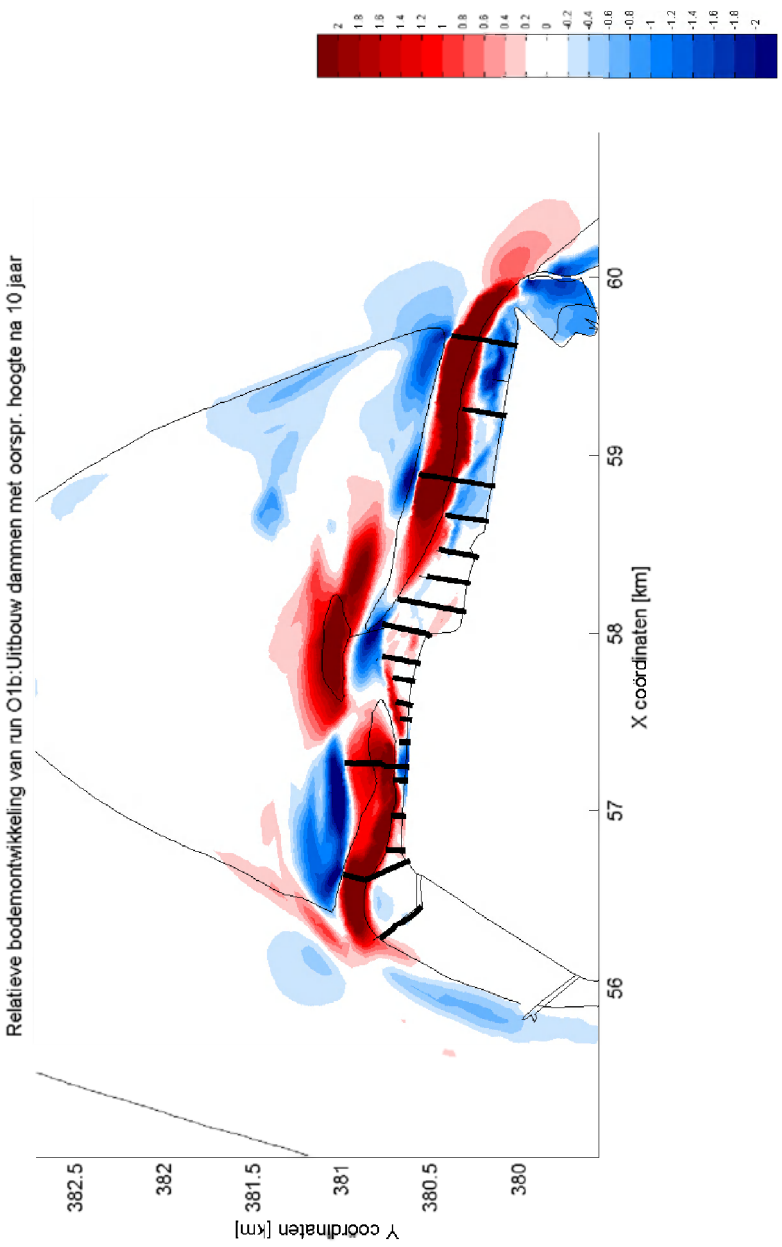
O4: Verlengde dammen op 0m NAP + opvullen westelijke geul na 8.1 jaar 17-Apr-2009



Relatieve bodemontwikkeling

O1a: Uitbouw dammen op oorspr. hoogte -1m na 10 jaar

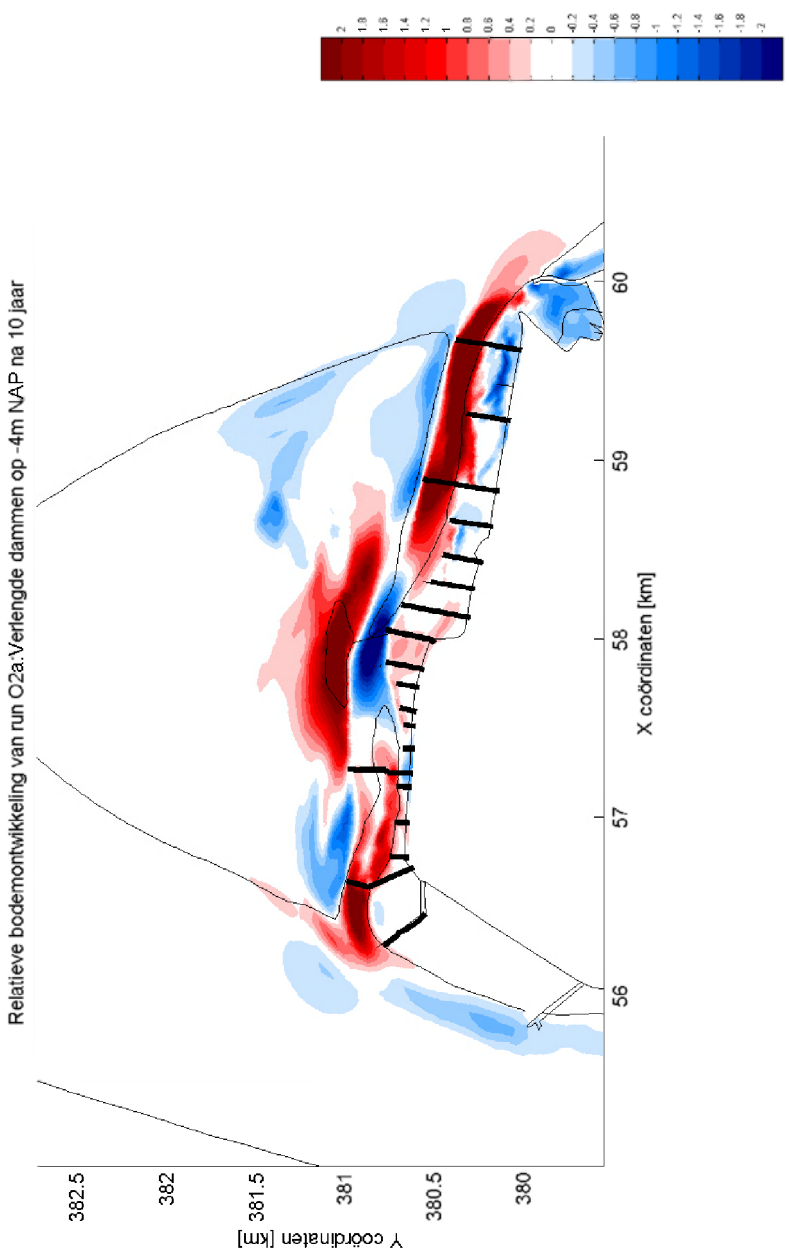
FIGUUR 4.11
1526
17-Apr-2009



Relatieve bodemontwikkeling

O1b: Uitbouw dammen met oorspr. hoogte na 10 jaar

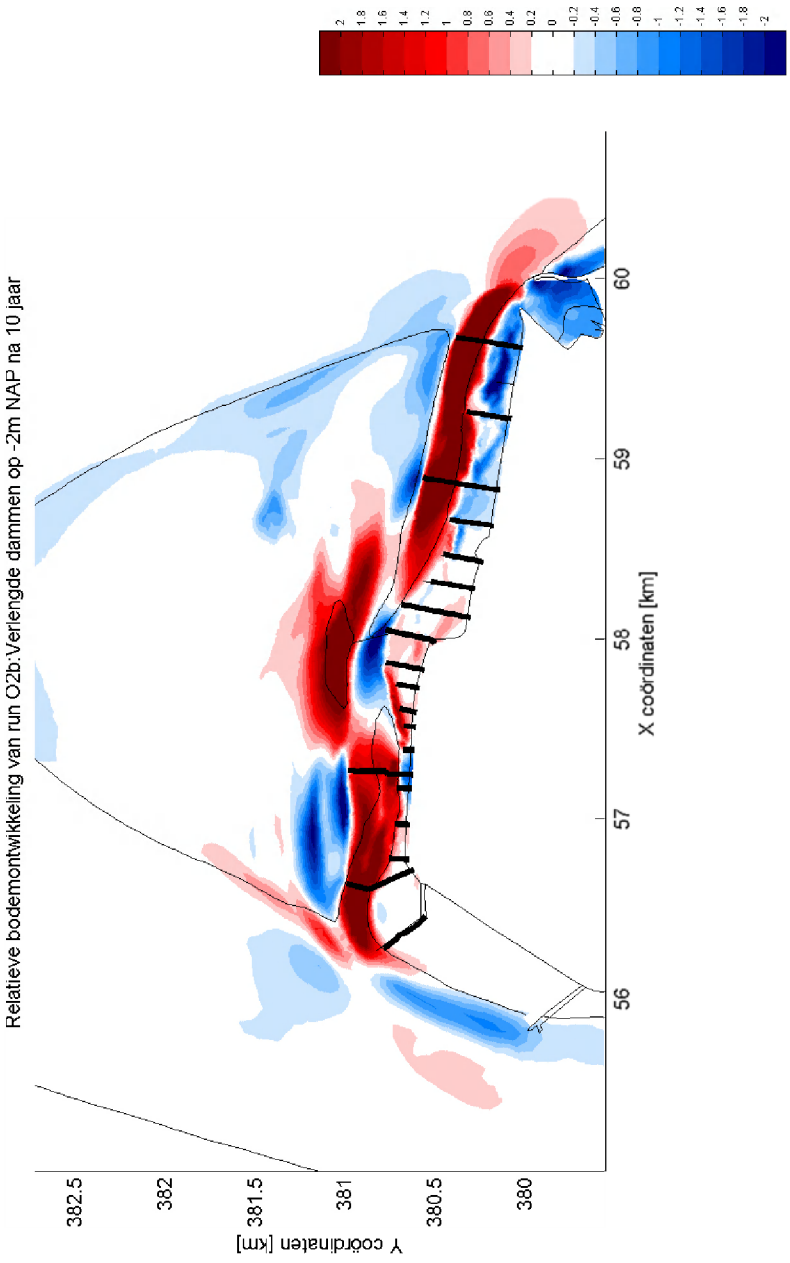
FIGUUR 4.12
1526
17-Apr-2009



Relatieve bodemontwikkeling

O2a: Verlengde dammen op -4m NAP na 10 jaar

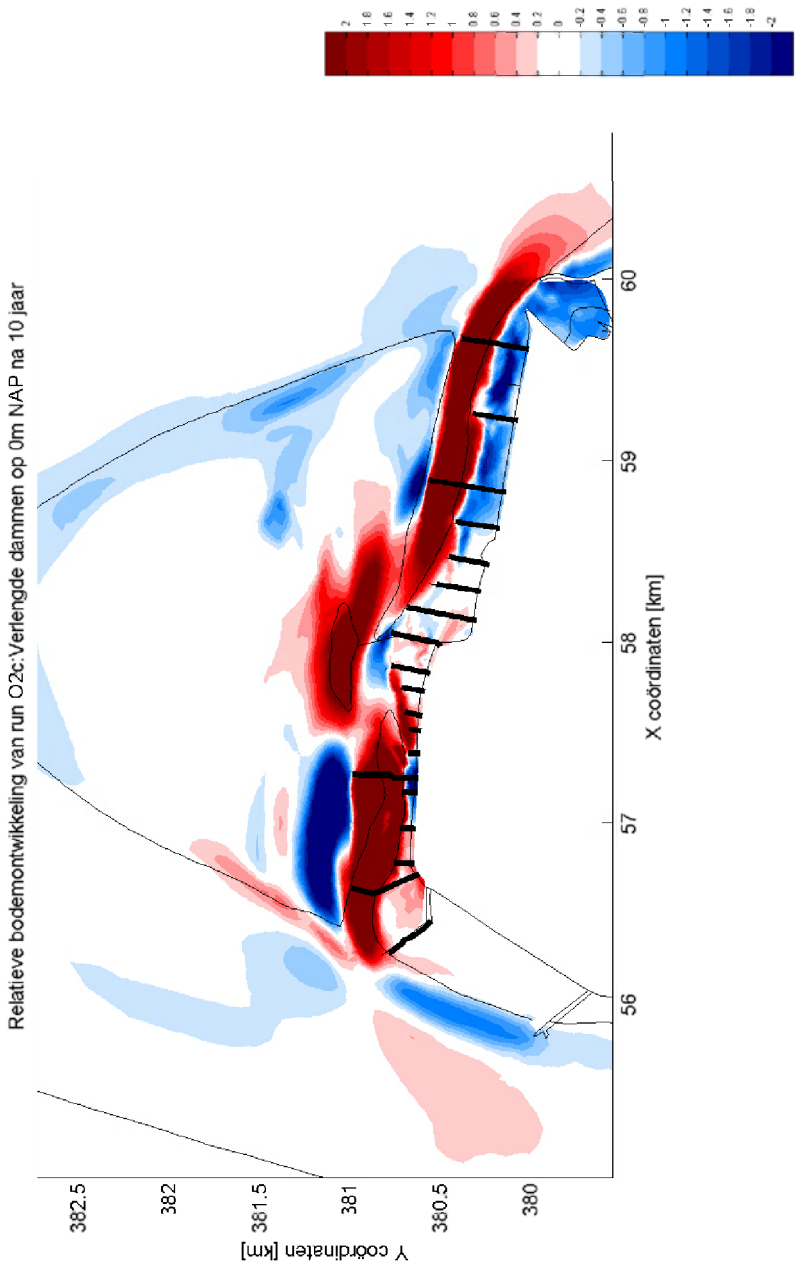
FIGUUR 4.13
1526
17-Apr-2009



Relatieve bodemontwikkeling

O2b: Verlengde dammen op -2m NAP na 10 jaar

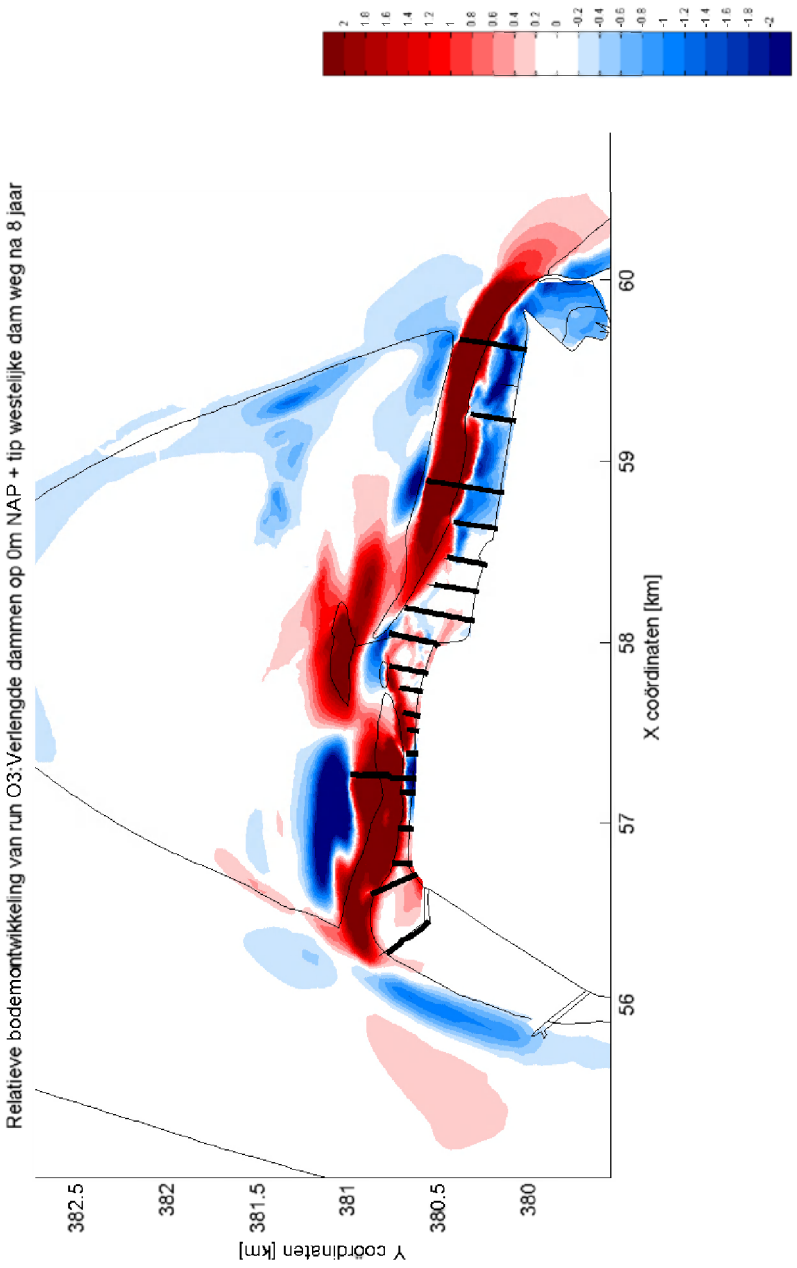
FIGUUR 4.14
1526
17-Apr-2009



Relatieve bodemontwikkeling

O2c: Verlengde dammen op 0m NAP na 10 jaar

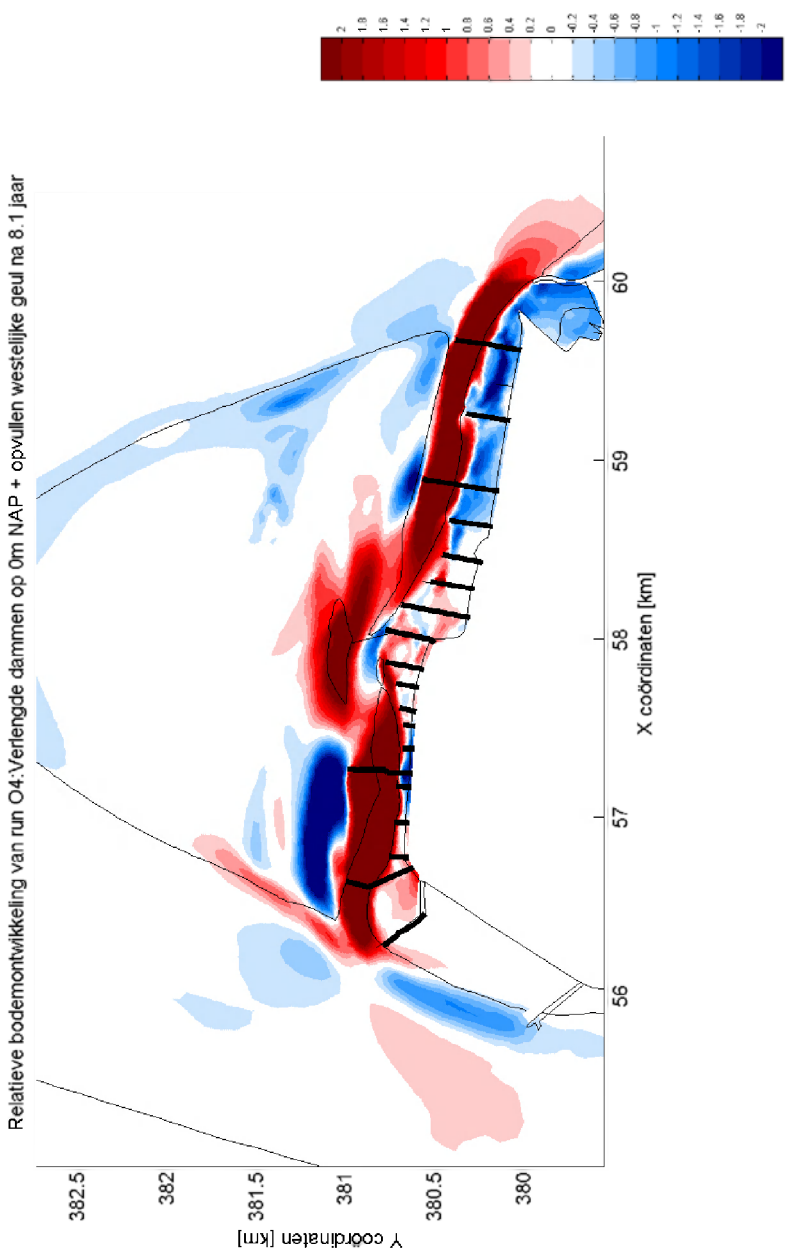
FIGUUR 4.15
1526
17-Apr-2009



Relatieve bodemontwikkeling **FIGUUR 4.16**

1526

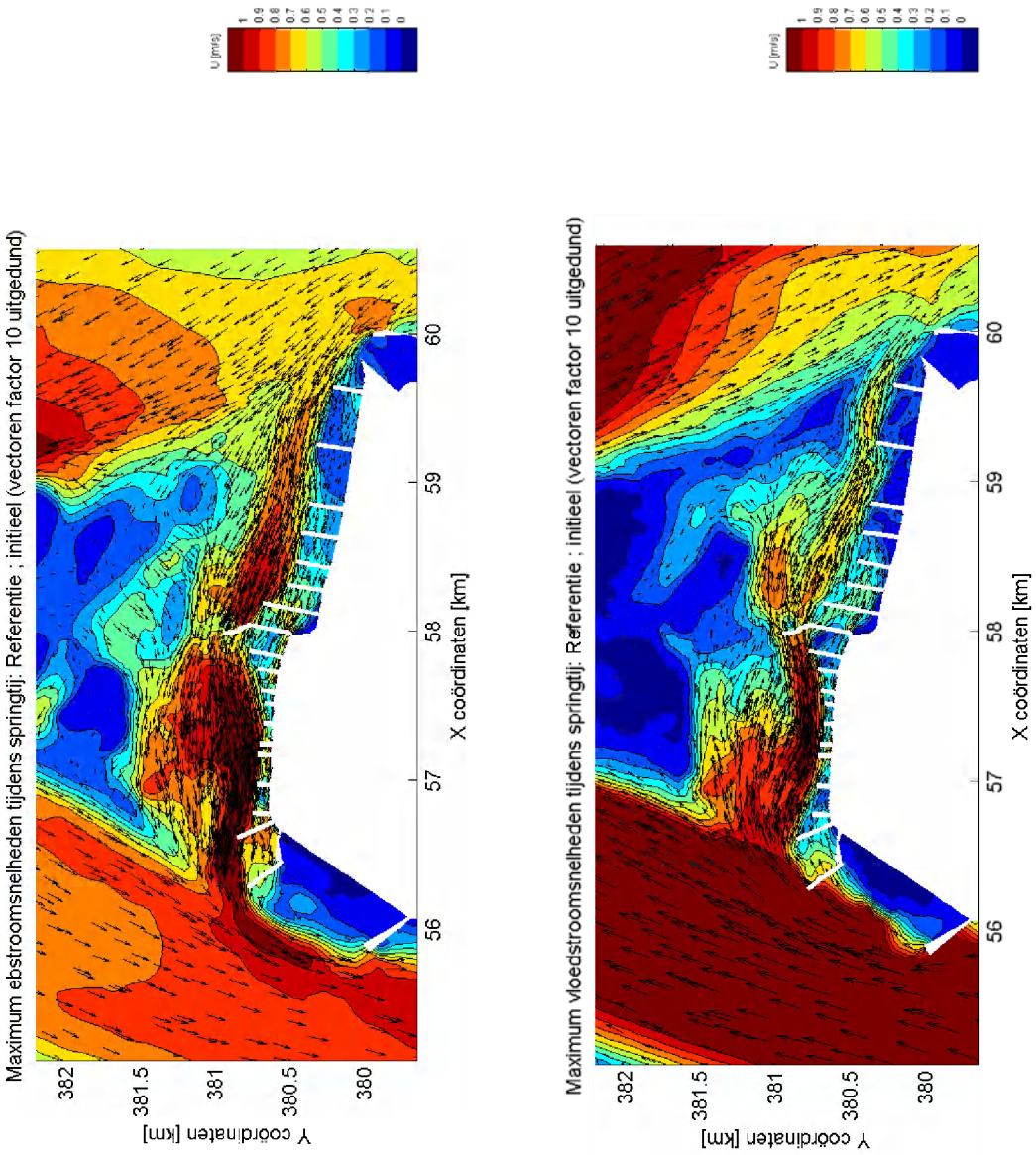
O3: Verlengde dammen op 0m NAP + tip westelijke dam weg na 8 jaar 17-Apr-2009



Relatieve bodemontwikkeling **FIGUUR 4.17**

1526

O4: Verlengde dammen op 0m NAP + opvullen westelijke geul na 8.1 jaar 17-Apr-2009

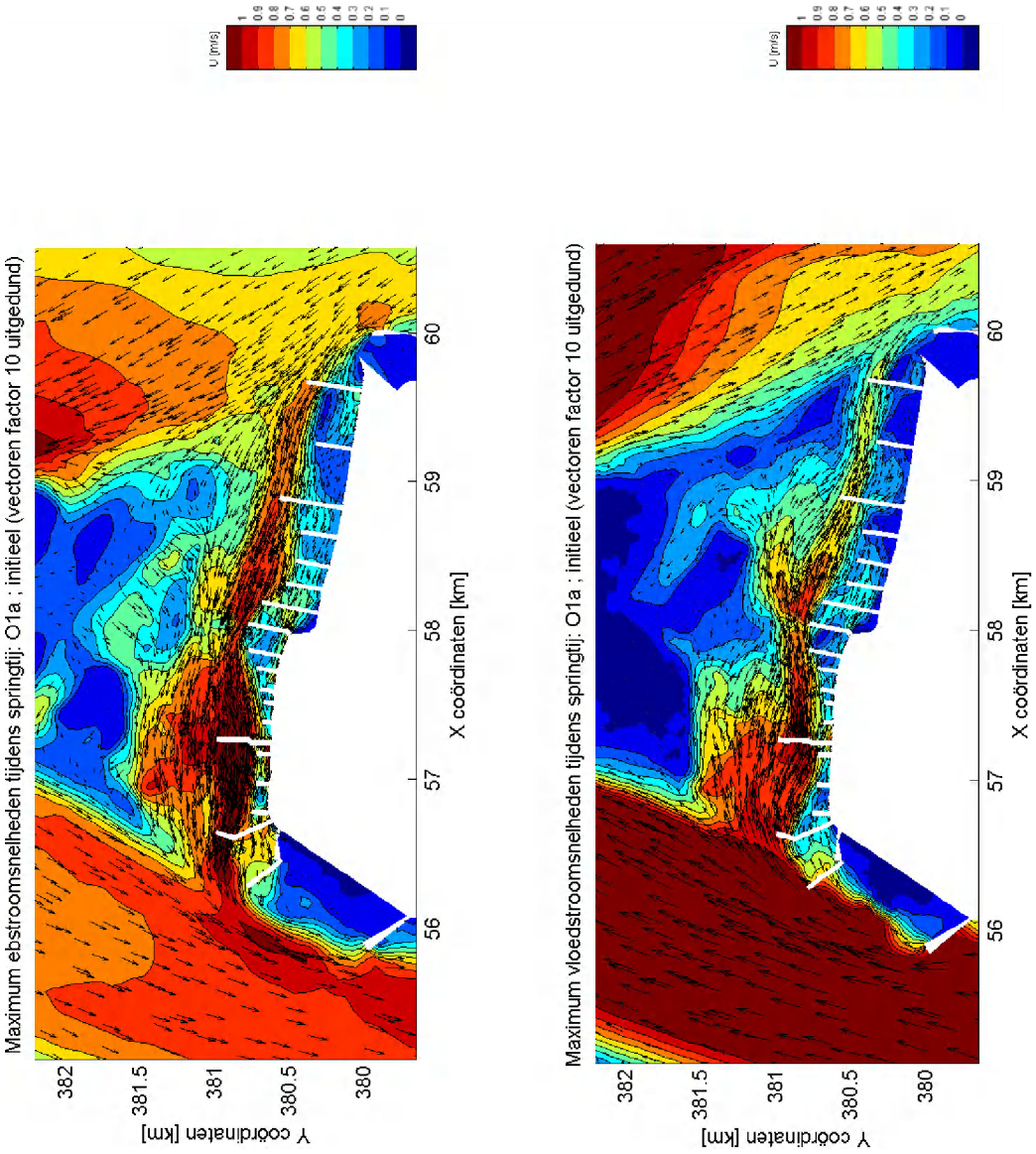


SVASEK HYDRAULICS

Max. stroomsnelheden; initiele situatie

Alternatief: Referentie

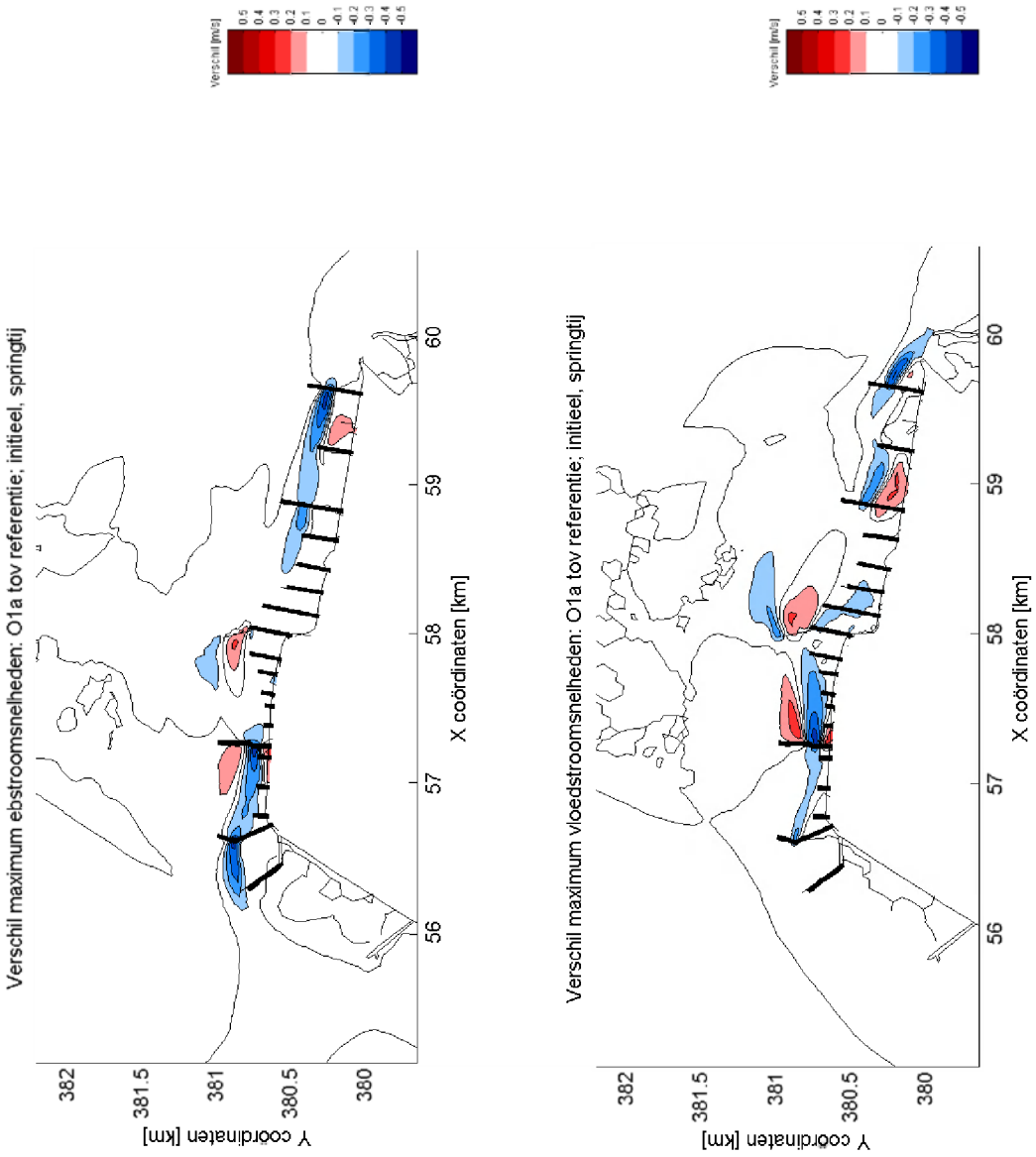
FIGUUR 4.18
1526
29-May-2009



Max. stroomsnelheden; initiele situatie

Alternatief: O1a

FIGUUR 4.19
1526
29-May-2009

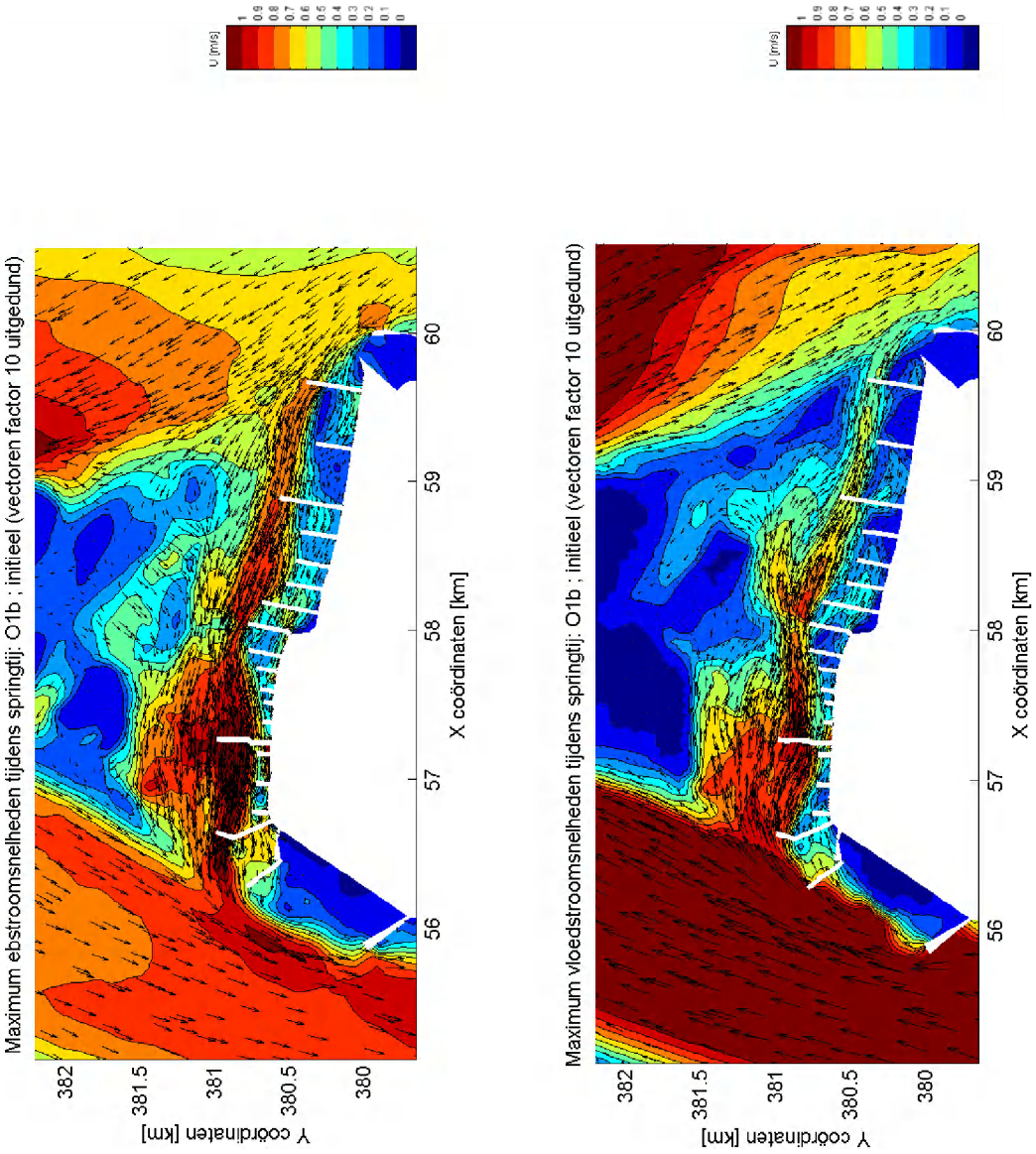


SVASEK HYDRAULICS

Verschil stroomsnelheden tov referentie; initiele situatie

Alternatief: O1a

FIGUUR 4.20
1526
29-May-2009

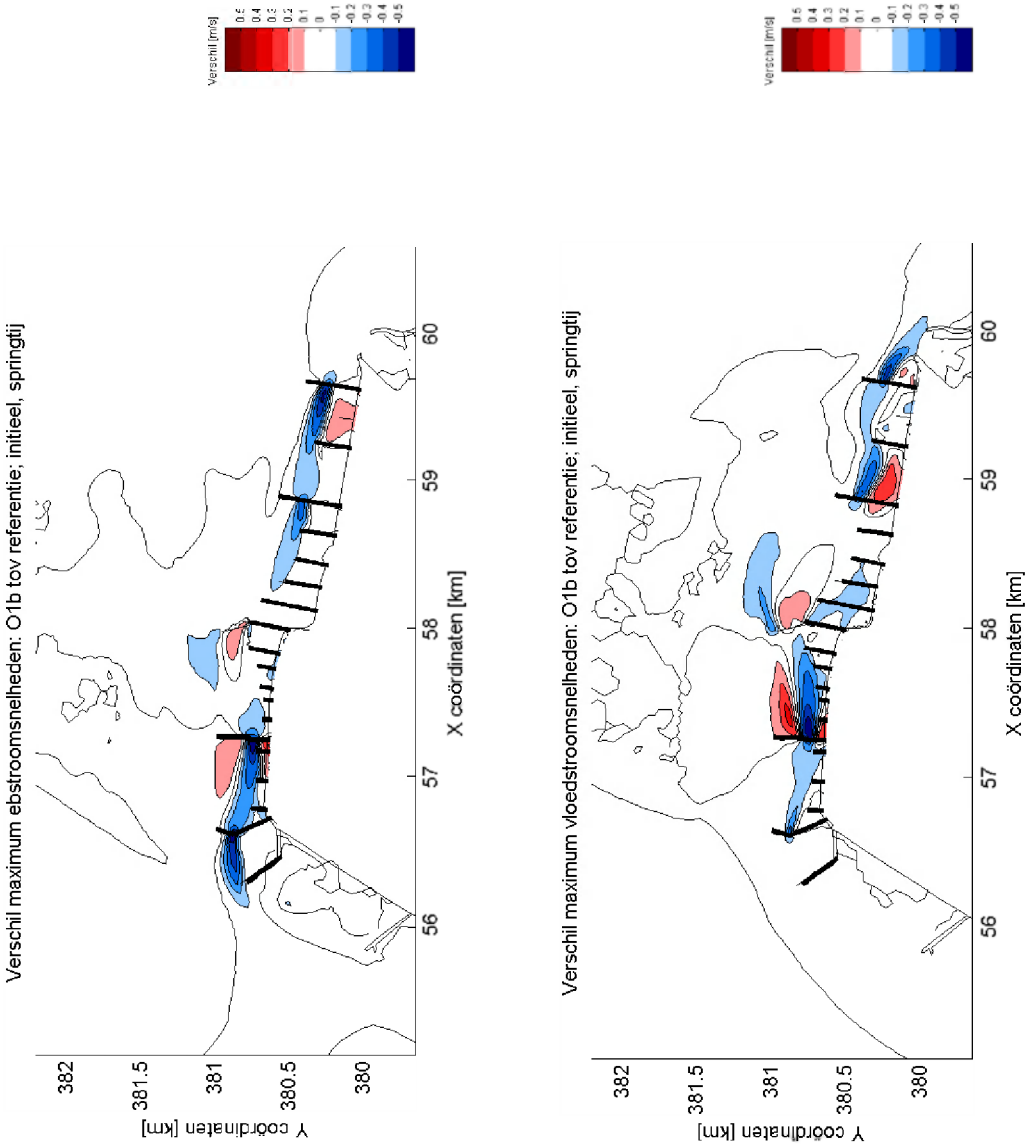


SVASEK HYDRAULICS

Max. stroomsnelheden; initiele situatie

Alternatief: O1b

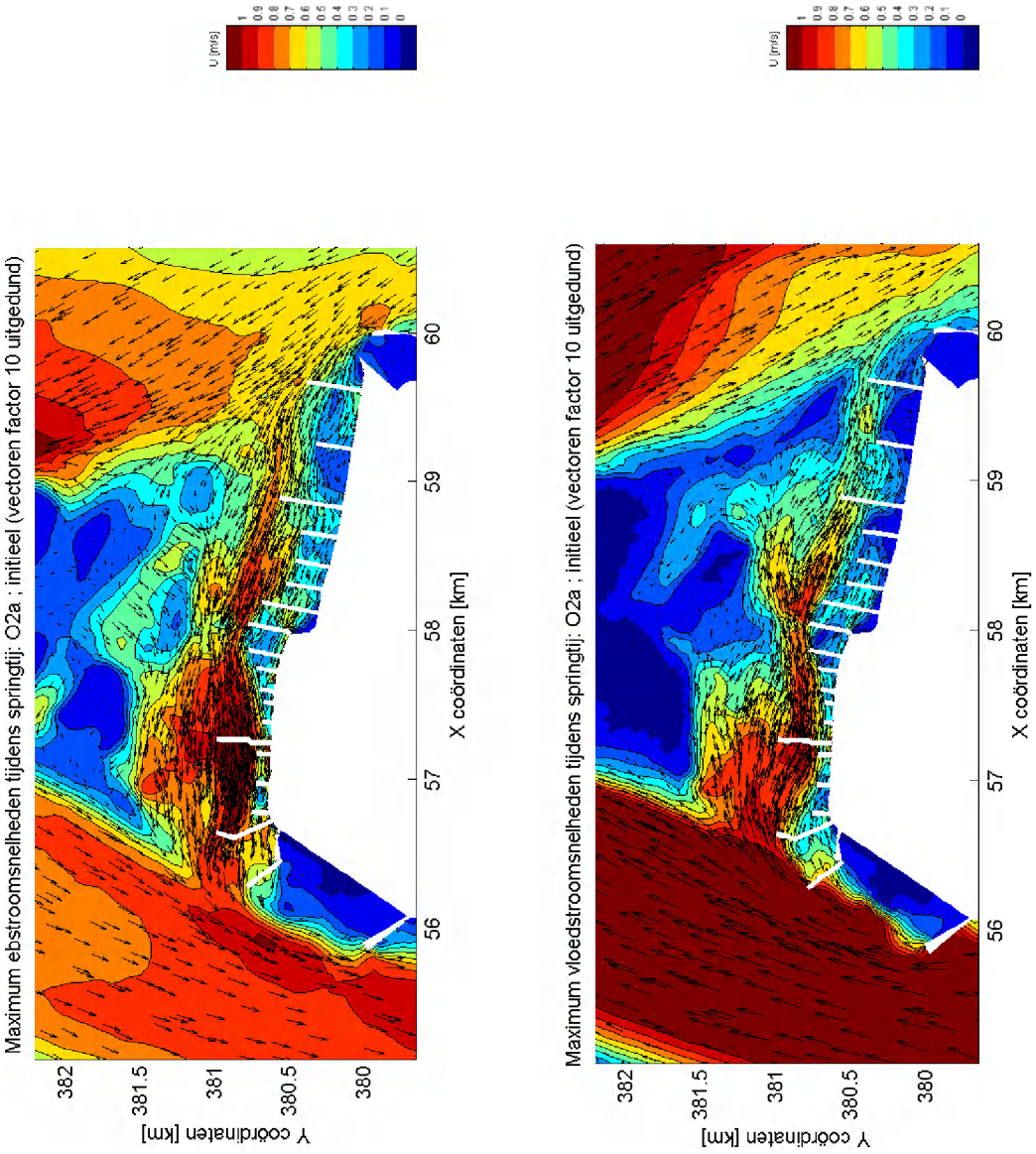
FIGUUR 4.21
1526
29-May-2009



Verschil stroomsnelheden tov referentie; initiele situatie **FIGUUR 4.22**

1526

Alternatief: O1b 29-May-2009

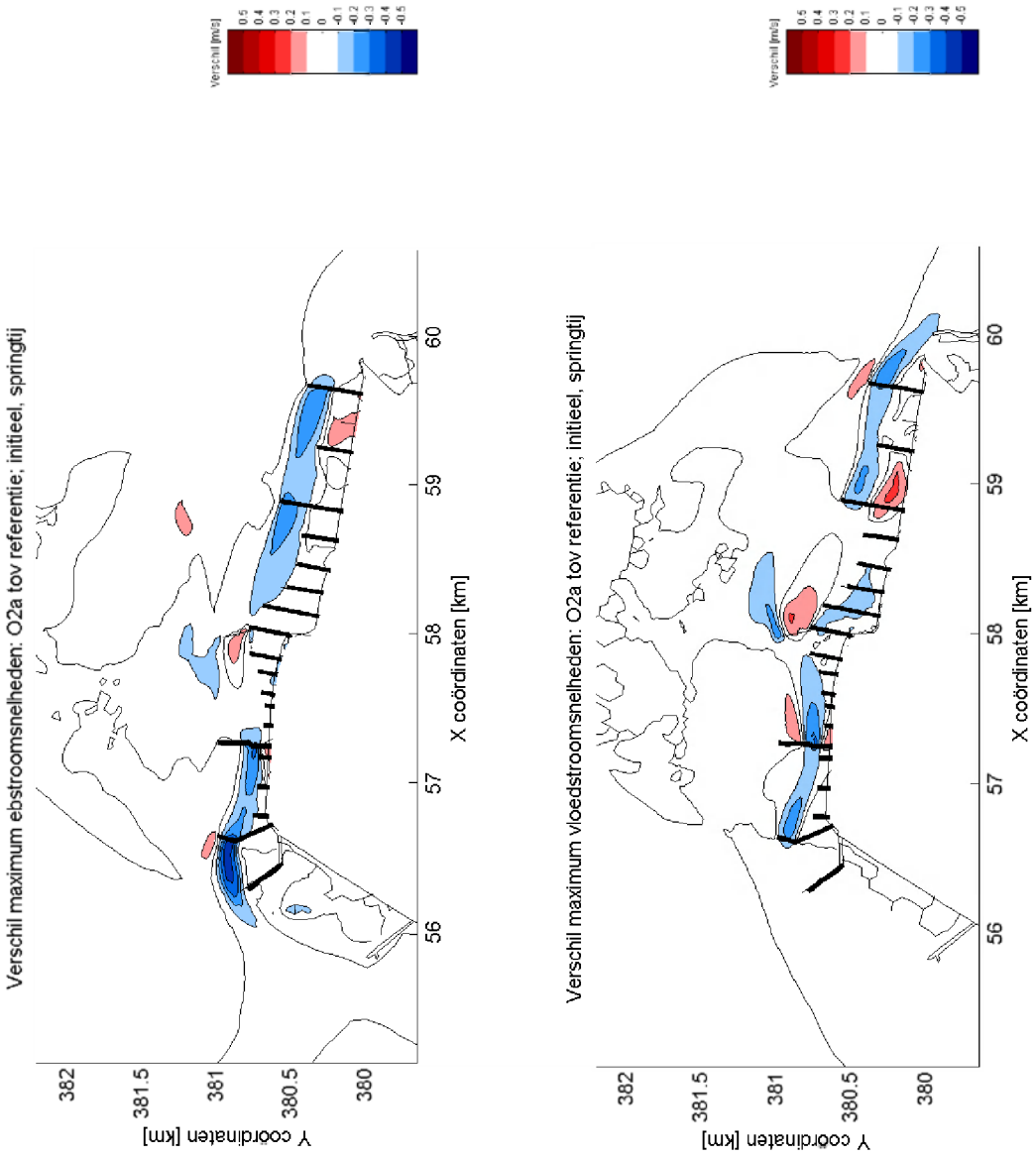


SVASEK HYDRAULICS

Max. stroomsnelheden; initiele situatie

Alternatief: O2a

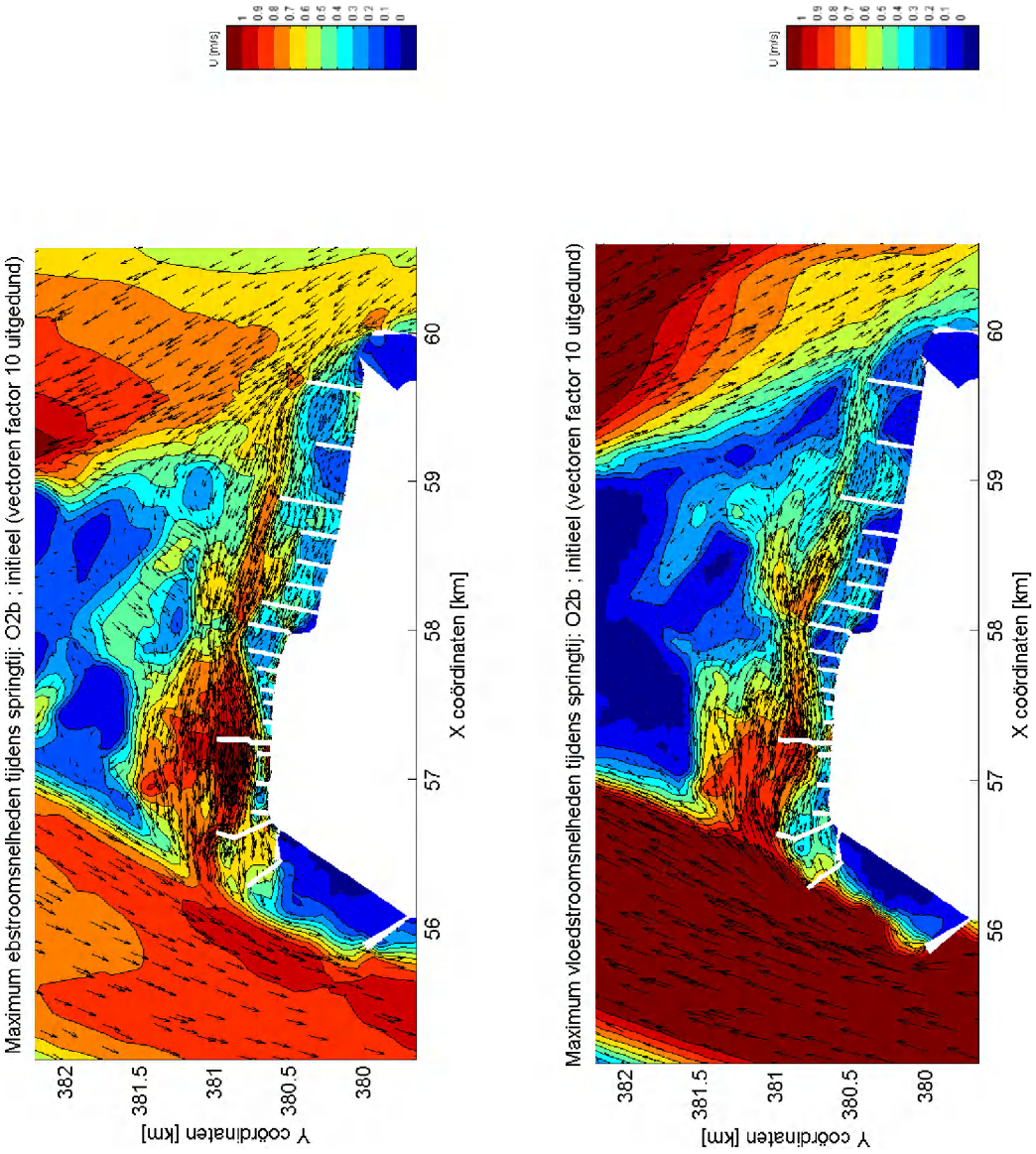
FIGUUR 4.23
1526
29-May-2009



Verschil stroomsnelheden tov referentie; initiele situatie

Alternatief: O2a

FIGUUR 4.24
1526
29-May-2009

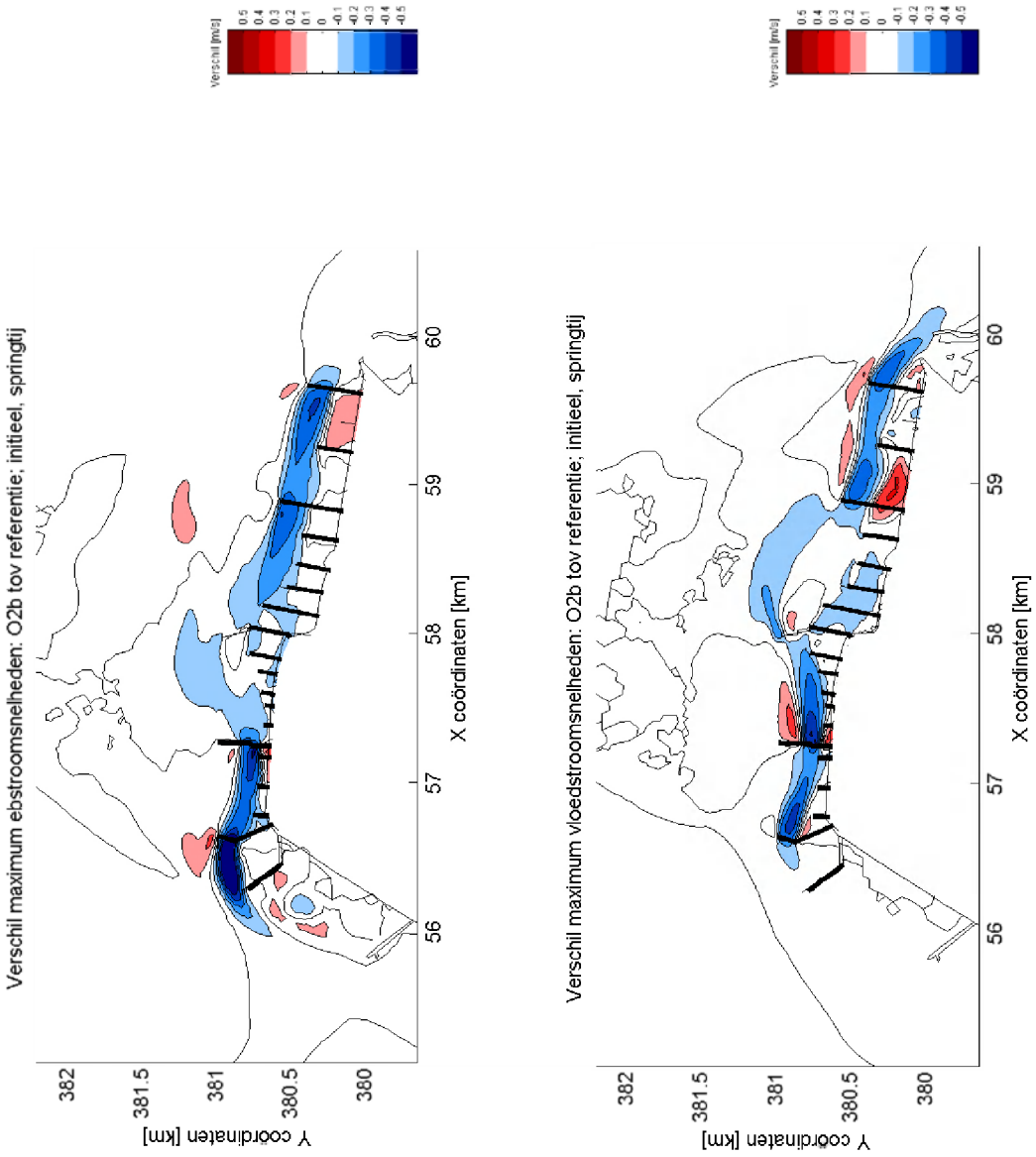


SVASEK HYDRAULICS

Max. stroomsnelheden; initiele situatie

Alternatief: O2b

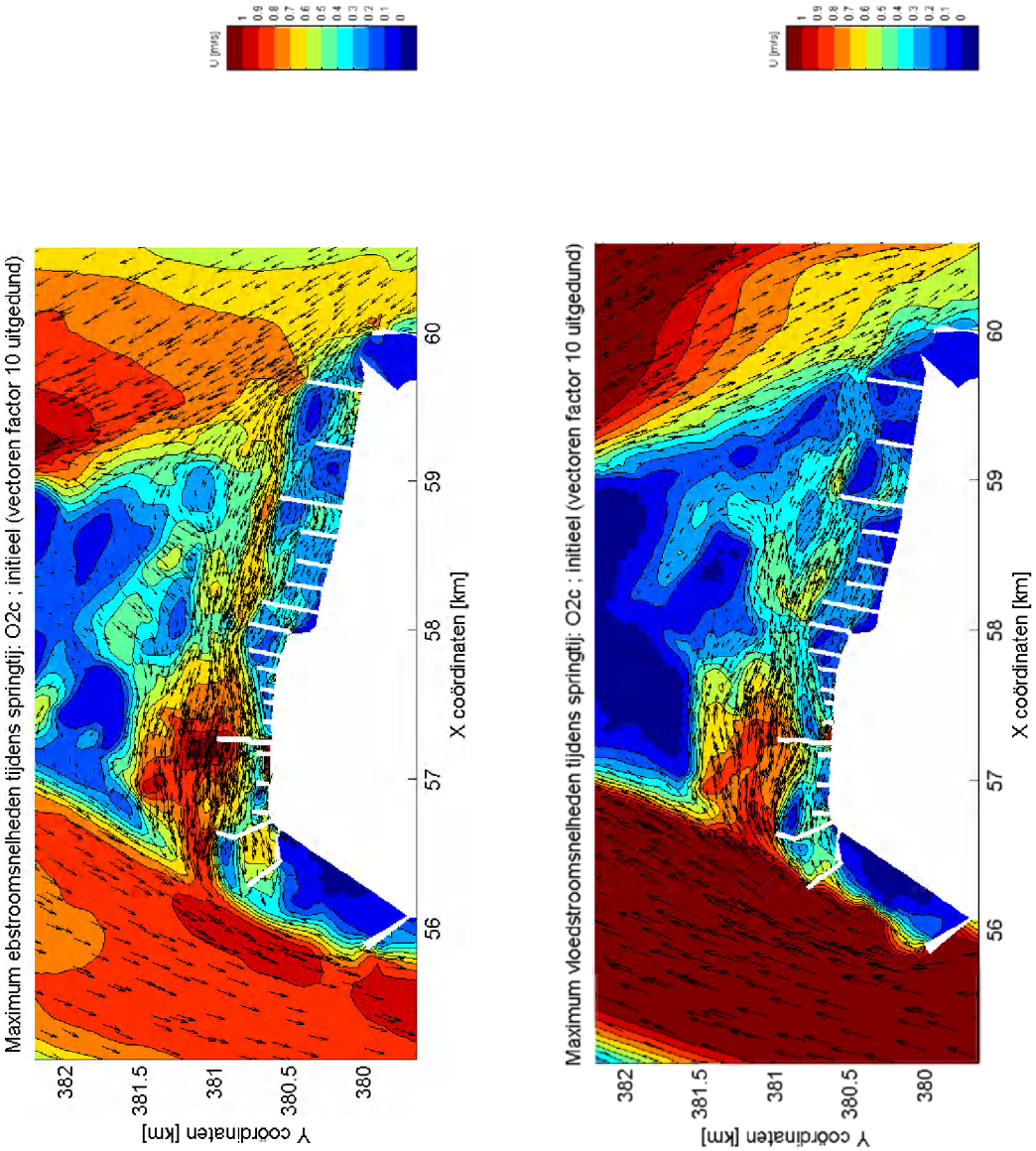
FIGUUR 4.25
1526
29-May-2009



Verschil stroomsnelheden tov referentie; initiele situatie

Alternatief: O2b

FIGUUR 4.26
1526
29-May-2009

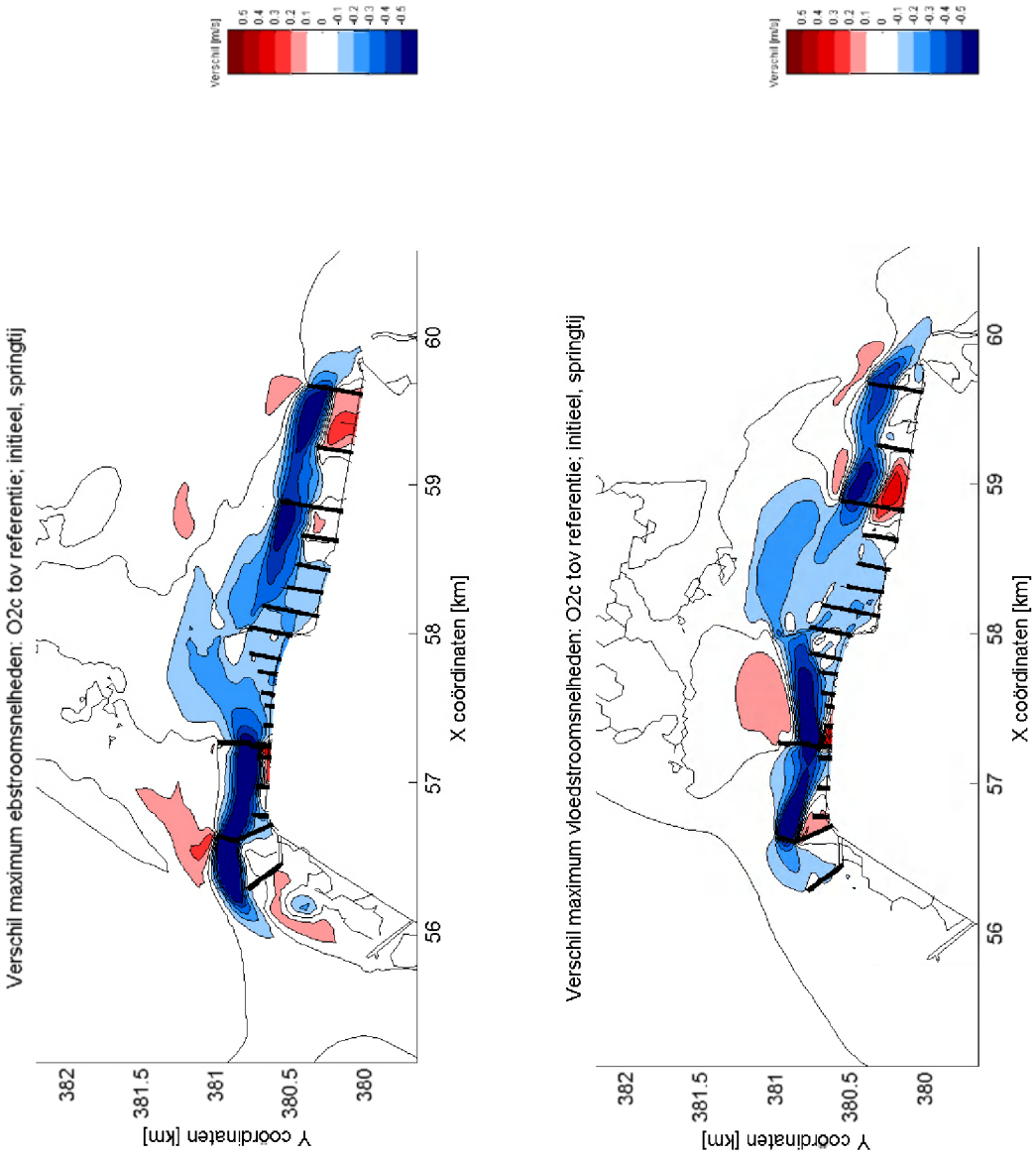


SVASEK HYDRAULICS

Max. stroomsnelheden; initiele situatie

Alternatief: O2c

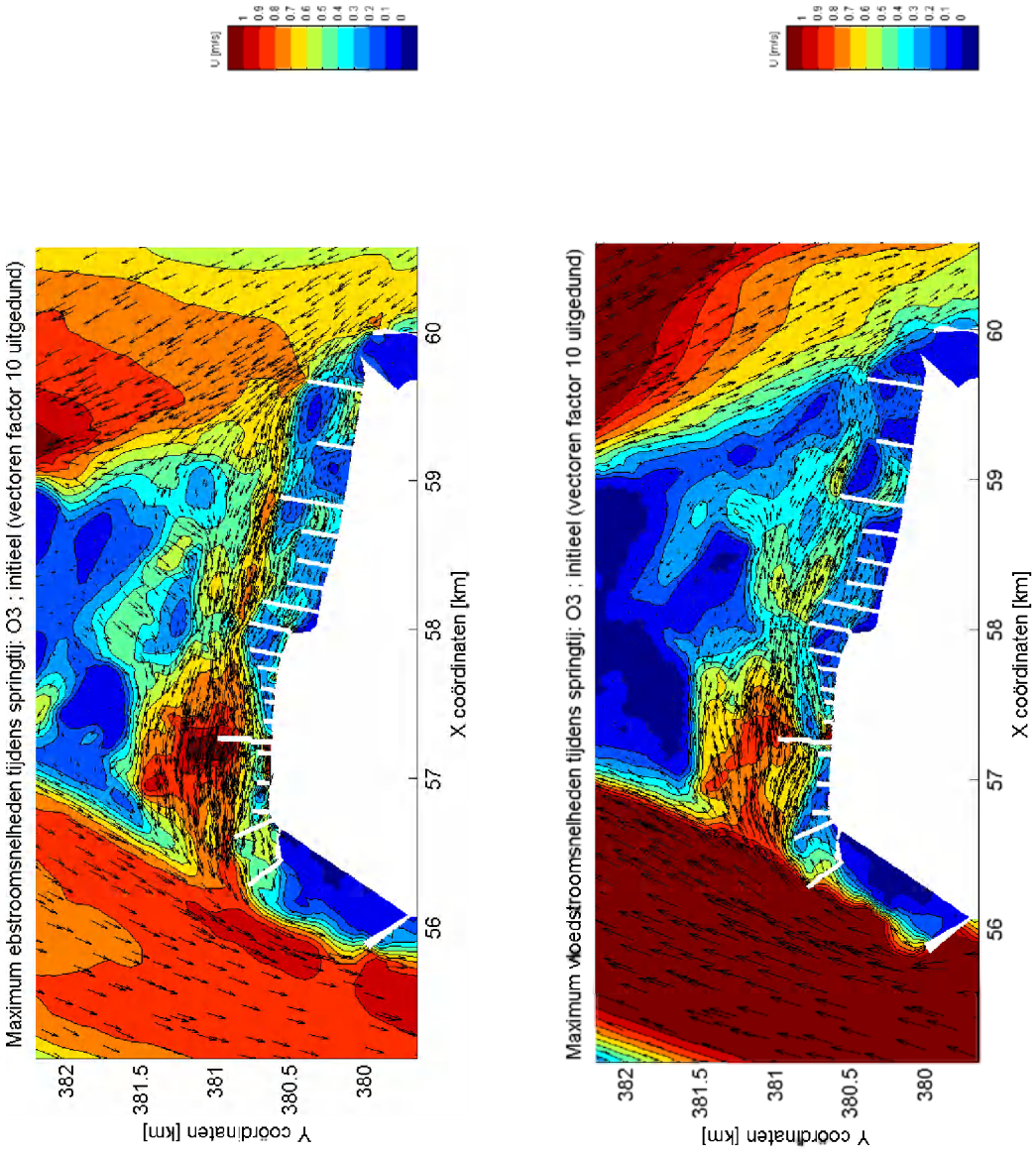
FIGUUR 4.27
1526
29-May-2009



Verschil stroomsnelheden tov referentie; initiele situatie

Alternatief: O2c

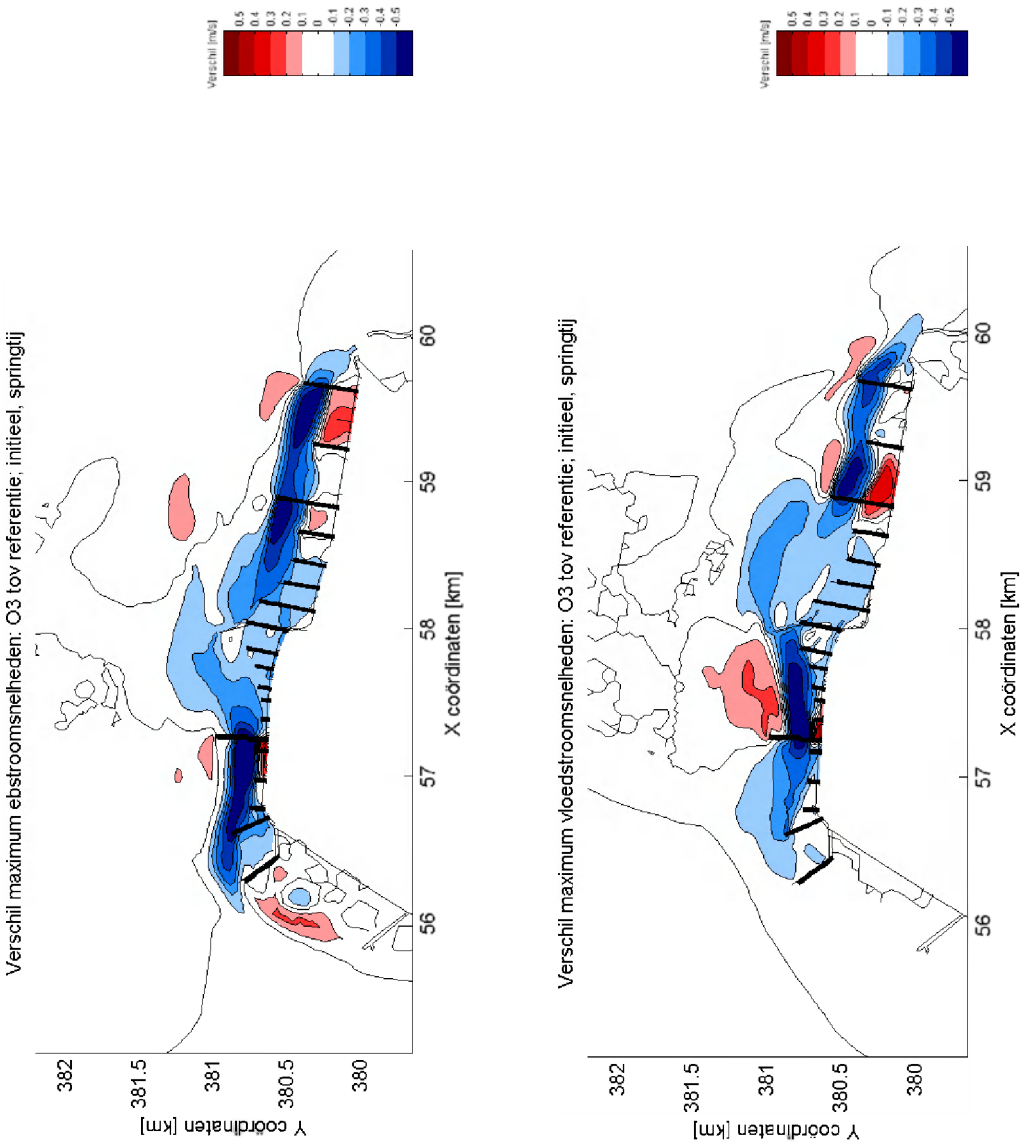
FIGUUR 4.28
1526
29-May-2009



Max. stroomsnelheden; initiele situatie

Alternatief: O3

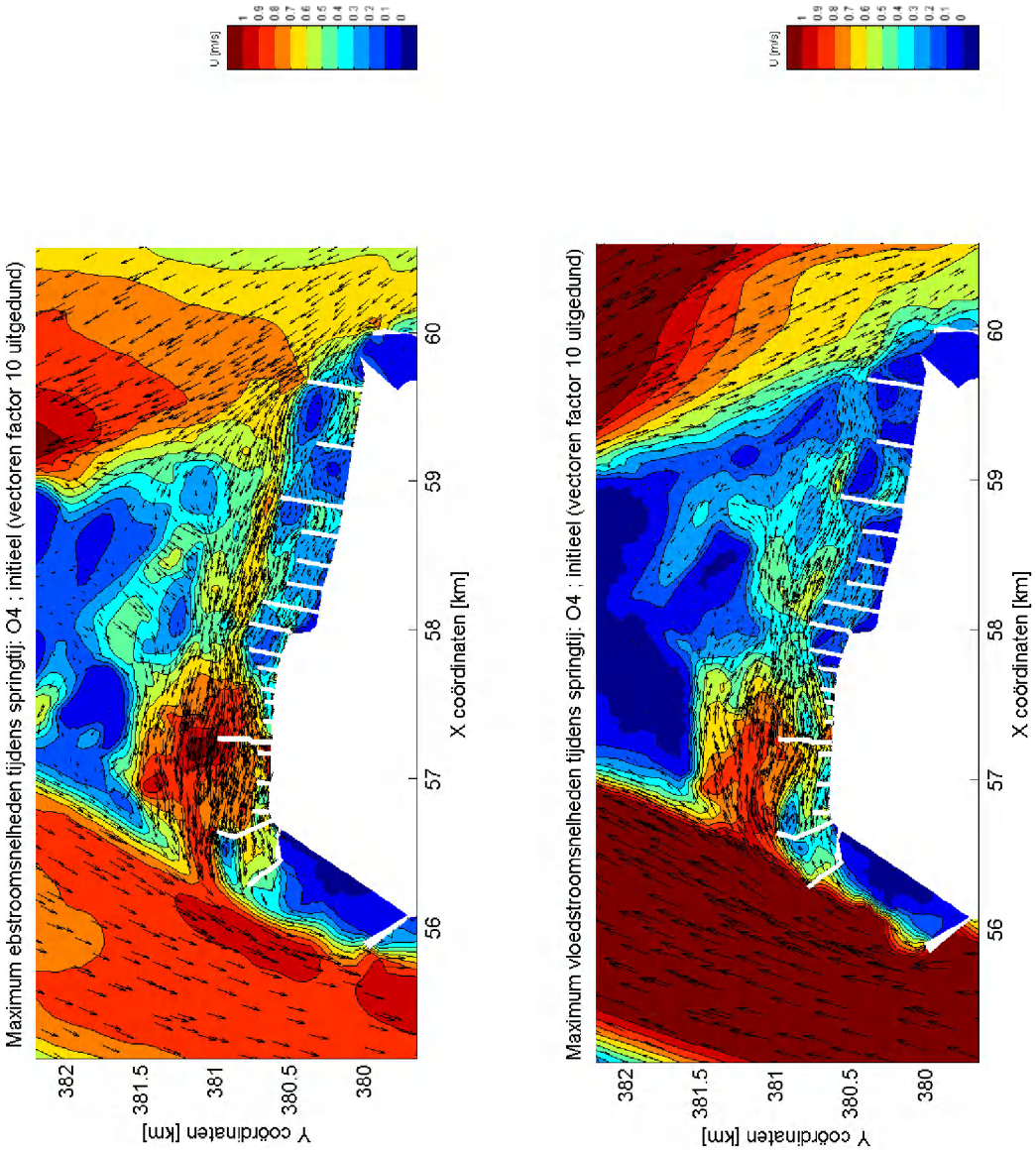
FIGUUR 4.29
1526
29-May-2009



Verschil stroomsnelheden tov referentie; initiele situatie

Alternatief: O3

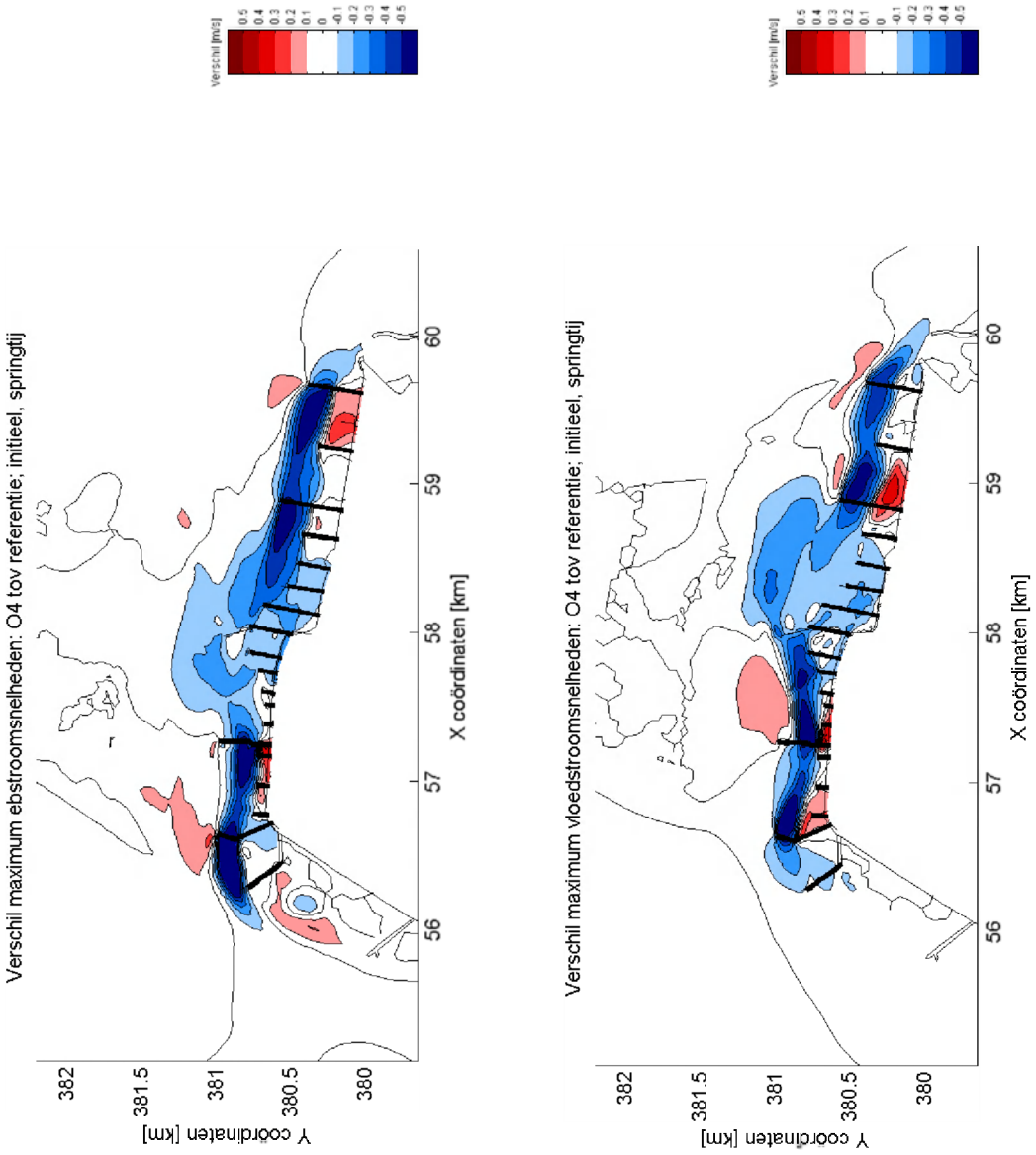
FIGUUR 4.30
1526
29-May-2009



Max. stroomsnelheden; initiele situatie

Alternatief: O4

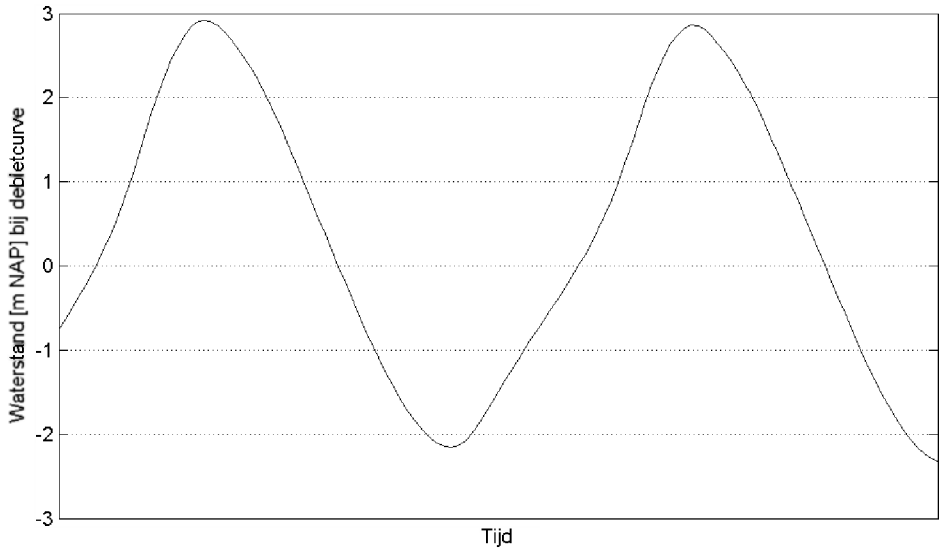
FIGUUR 4.31
1526
29-May-2009

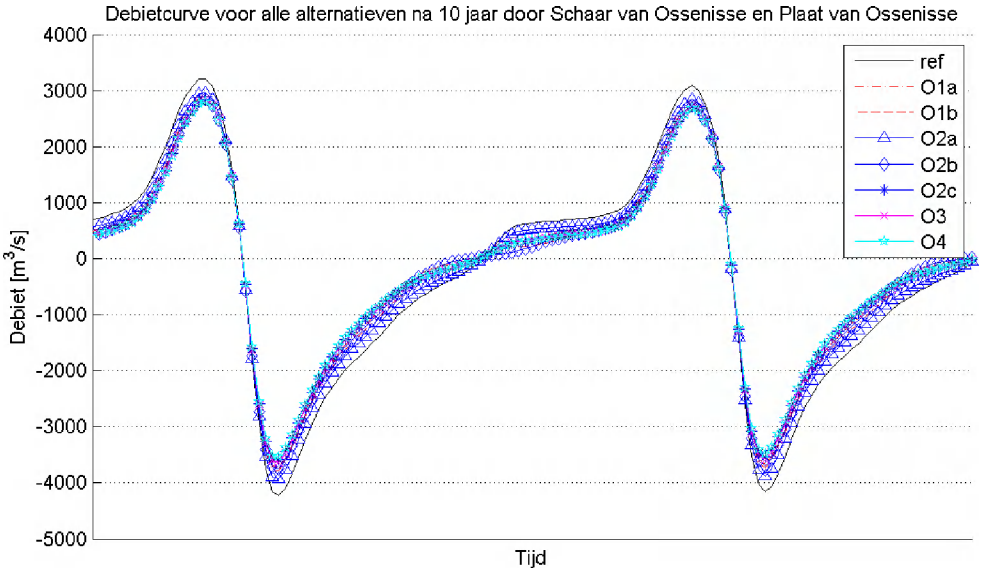


Verschil stroomsnelheden tov referentie; initiele situatie

Alternatief: O4

FIGUUR 4.32
1526
29-May-2009



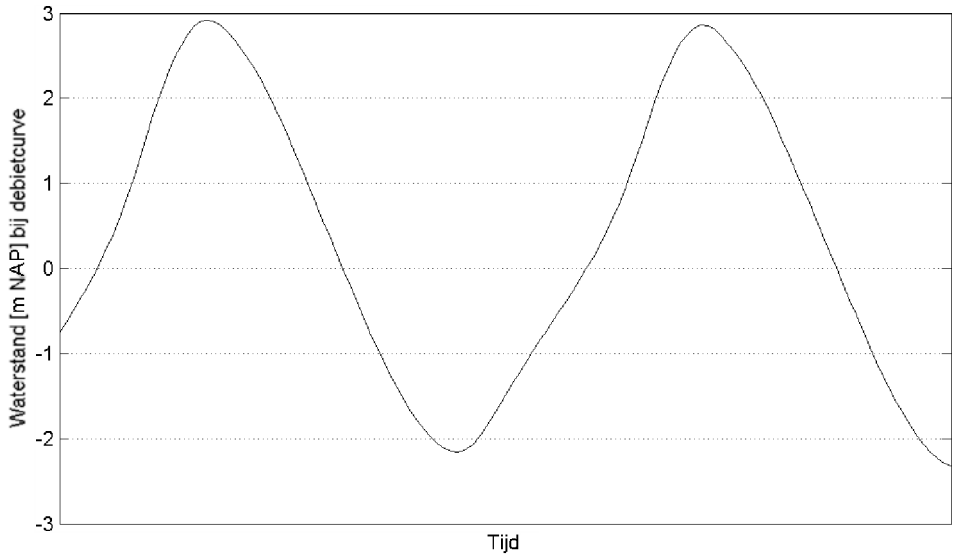


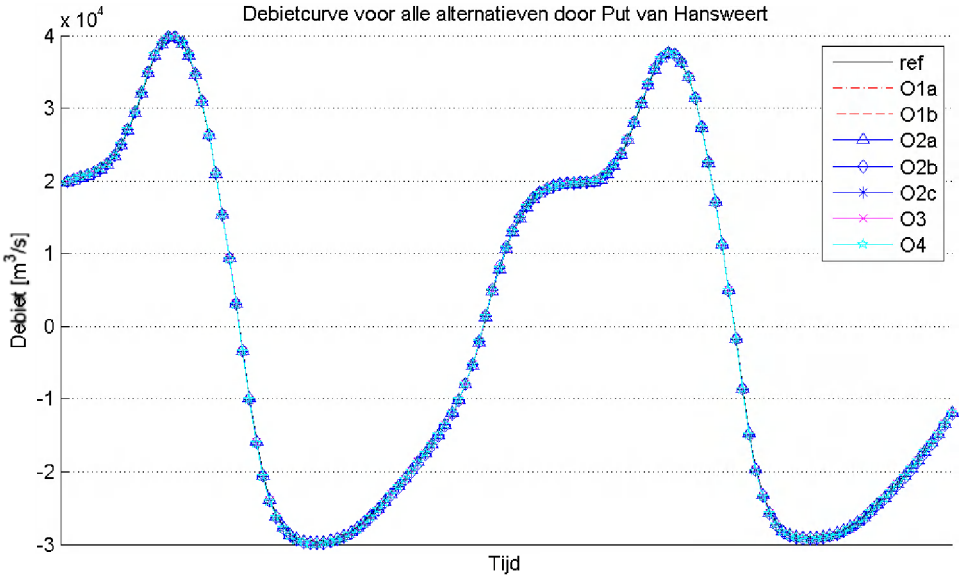
SVASEK HYDRAULICS

Debieten door Schaar van Ossenisse en Plaat van Ossenisse **FIGUUR 4.33**

1526

Springtij situatie, na 10 jaar 29-May-2009





SVASEK HYDRAULICS

Debieten door Put van Hansweert

Springtij situatie, na 10 jaar

FIGUUR 4.34
1526
29-May-2009

SVAŠEK

HYDRAULICS

COASTAL, HARBOUR AND RIVER CONSULTANTS