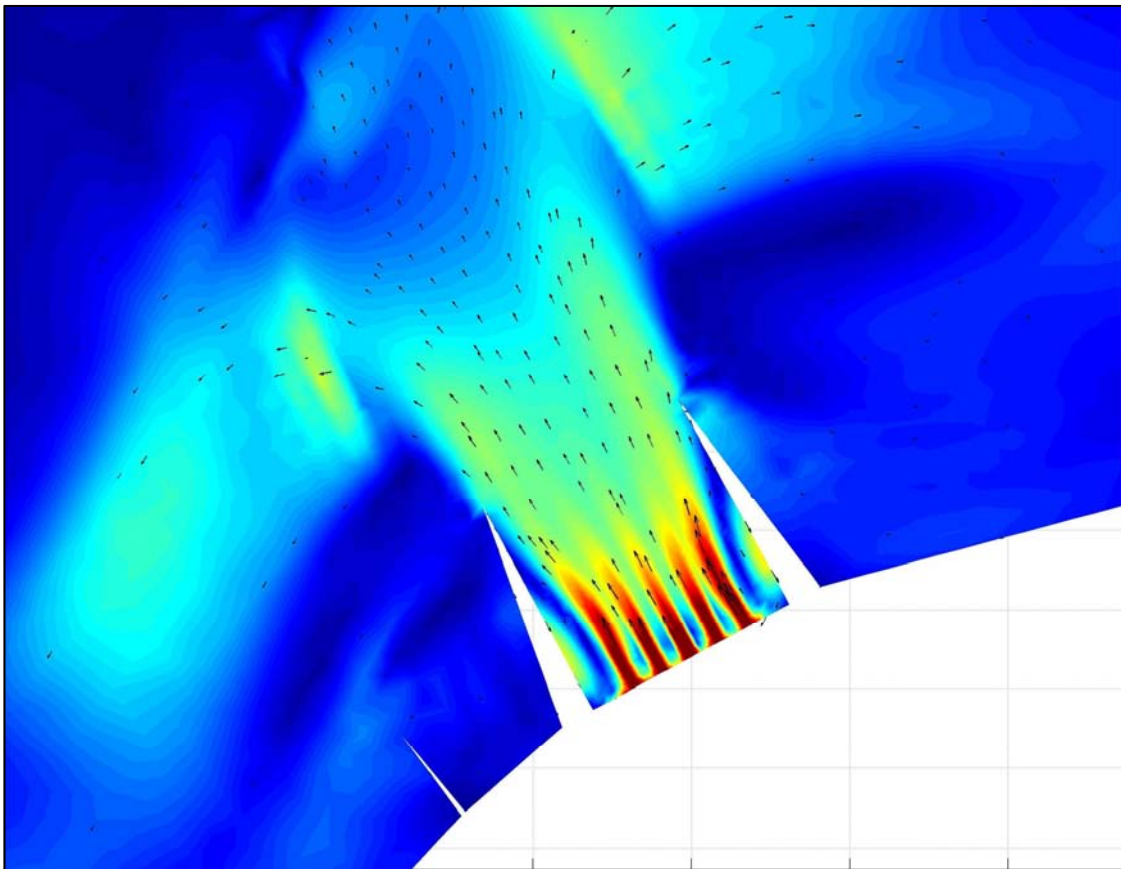


Dichtheidsstroming en bodemligging achter de extra spuisluis in de Afsluitdijk

CT5060, Master Thesis

Delft, 5 juli 2007



J.N. Wierenga



Dichtheidstroming en bodemligging achter de extra spuisluis in de Afsluitdijk

Plaats Delft
Datum 5 juli 2007

Technische Universiteit Delft
Faculteit Civiele techniek en Geowetenschappen
Sectie Algemene Waterbouwkunde

Uitgevoerd door

Jaap Wierenga
Balthasar van der Polweg 508
2628 BT Delft
J.N.Wierenga@student.tudelft.nl
Student nummer: 1056603

Onder supervisie van

prof.dr.ir. M.J.F. Stive	TU Delft, Hydraulic Engineering
dr. ir. P.J. Visser	TU Delft, Hydraulic Engineering
ir. R.J. Labeur	TU Delft, Environmental Fluid Mechanics
ir. J.T. van der Poel	Grontmij, Afdeling Waterbouwkunde
dr. ir. A. Vrijburcht	Rijkswaterstaat, Bouwdienst

Kaft: met Finlab gegenereerde stroming uit de nieuwe spuisluis

Voorwoord

Dit rapport is de afstudeerscriptie voor het afronden van het masterprogramma van Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft. Het onderwerp van het onderzoek is aangeleverd door Grontmij. Grontmij is een multidisciplinair internationaal advies- en ingenieursbureau dat bij de Europese top behoort. Vanwege de actualiteit van het onderwerp wilde Rijkswaterstaat ook graag deelnemen in het onderzoek. Rijkswaterstaat is de uitvoeringsorganisatie van het ministerie van verkeer en waterstaat.

Dit onderzoek naar de dichtheidsstroming achter de extra spuisluis in de Afsluitdijk en de daarbij behorende bodemerrosie heeft tien maanden geduurd. Het meeste werk voor dit onderzoek is gedaan aan de faculteit Civiele Techniek. Hiernaast is er ook bij het kantoor van Grontmij in De Bilt gewerkt aan het verslag.

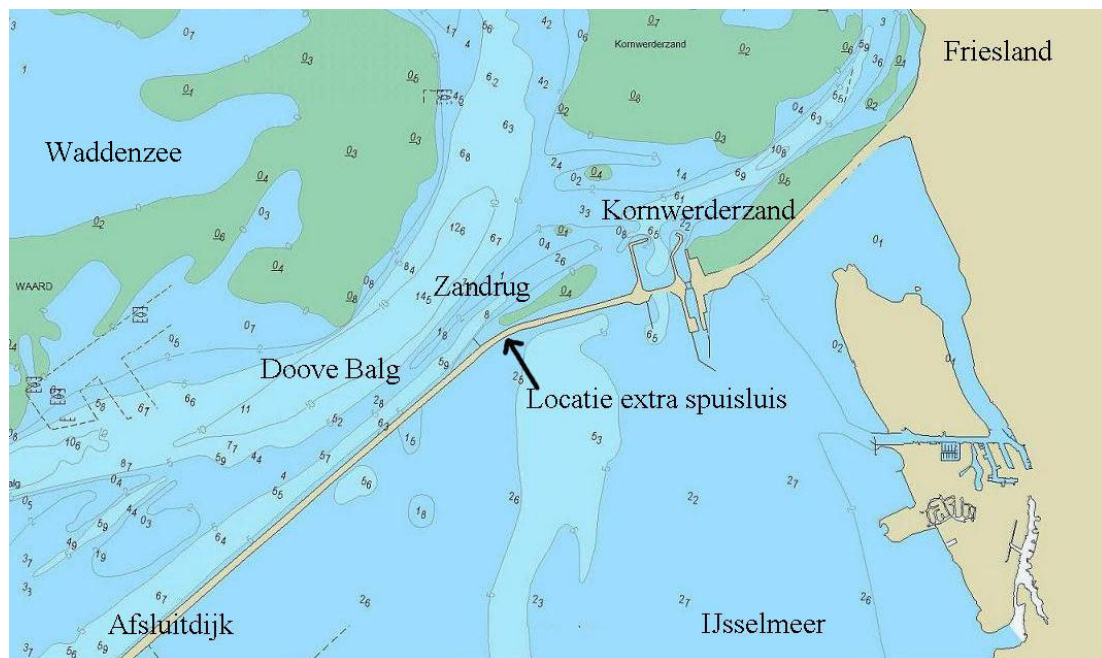
Ik zou graag ook de volgende mensen willen bedanken voor hun bijdragen en steun bij het uitvoeren van dit onderzoek. Mijn afstudeercommissie: M.J.F. Stive, P.J. Visser, R.J. Labeur, J.T. van der Poel en A. Vrijburcht. De medestudenten in de afstudeerkamer voor de plezierige werkomgeving en hun tips. En mijn familie en vrienden voor hun ondersteuning.

Delft, juli 2007

J.N. Wierenga

Samenvatting

Door het uitmonden van verschillende rivieren in het IJsselmeer is er een permanente aanvoer van water. Een groot deel van het aangevoerde water wordt onder verval met spuisluizen in de Afsluitdijk afgevoerd. De capaciteit van deze spuisluizen is niet meer voldoende. Dit is het gevolg van groeiende pieken in de aanvoer van water naar het IJsselmeer en de verwachte relatieve zeespiegelstijging. Om het streefpeil op het IJsselmeer te kunnen handhaven is een vergroting van de spuicapaciteit nodig. Er zal dan ook een extra spuisluis in de Afsluitdijk aangelegd gaan worden juist ten westen van Kornwerderzand. Dit is in figuur 1 aangegeven.



Figuur 1, de locatie van de extra spuisluis en de omgeving.

Het gespuide water wordt met een kanaal van de spuisluis naar de getijdengeul de Doove Balg geleid. Dit verbindingskanaal achter de spuisluis bestaat uit twee delen, het eerste deel van dit kanaal ligt vast tussen twee leidammen. Het laatste stuk van het kanaal ligt door een zandrug, dit is het uitloopkanaal. Het uitloopkanaal is ontworpen zonder bodem- en taludbescherming voor de zandrug. Deze zandrug vormt een belangrijke scheiding tussen de Afsluitdijk en de Doove Balg en moet daarom zo goed mogelijk behouden blijven. De erosie door de spuistraal en de getijdenstroming wordt daarom onderzocht.

Het doel van deze near-field studie is het onderzoeken van de veranderingen die de inpassing van het spuicomplex en het uitstromende water hebben op het gebied achter de spuisluis.

Voor het goed in kunnen schatten van de veranderingen aan het gebied rond de extra spuisluis wordt eerst de ontwikkeling van het huidige patroon bekeken. De morfologische ontwikkeling van de Doove Balg wordt besproken en de gevolgen die het aanleggen van de extra spuisluis hierop kunnen hebben. Na het omschrijven van de omgeving wordt het voorontwerp van het spuicomplex doorgenomen. De afmetingen en het gebruik van het spuicomplex worden beschreven.

Om de veranderingen te kunnen bepalen moet de stroming achter de spuisluis goed beschreven zijn. Dit bestaat uit het bepalen van het stromingspatroon van het spuiwater in het uitloopkanaal en hoe de getijdenstroming beïnvloed wordt door het spuiwater en de aanleg van het kanaal. De dichtheidsstroming en het mengen van het gespuide water met het water in de Waddenzee zijn hierbij belangrijke punten.

Voor het bepalen van de stroming wordt een drietal modellen gebruikt. Eerst wordt analytisch de stroming door de spuisluis gemodelleerd. De afvoerrelatie van het water door het spui wordt hier berekend. Vervolgens wordt met deze kennis de dichtheidsstroming door het uitloopkanaal benaderd. Met het stromingspatroon wordt vervolgens ook de erosie in het uitloopkanaal analytisch bepaald. Met de analytische berekeningen zijn de optredende processen bij het uitstromen van het spuidebiet gekwantificeerd. Dit vormt een vergelijkingsbasis voor de verdere berekeningen.

De twee andere rekenmodellen zijn numeriek, eerst tweedimensionaal en vervolgens drie dimensionaal. Voor deze numerieke simulaties wordt gebruik gemaakt van Finlab, dit is een recent ontwikkeld model. Finlab is een niet-hydrostatisch eindig elementen stromingsmodel dat werkt met een ongestructureerd grid.

Er zijn een tweetal numerieke tweedimensionale simulaties uitgevoerd met Finlab. In deze simulaties is vooral gelet op de verticale snelheidsverdeling, dichtheidsstroming en de gelaagdheid. Deze processen worden zowel in het uitloopkanaal als in de monding naar de Doove Balg gesimuleerd.

Vervolgens zijn met Finlab driedimensionale numerieke simulaties uitgevoerd. Hier zijn vier cases opgezet, per case worden meer elementen in de modellering opgenomen. De eerste case is gemaakt in de omgeving zoals die is voor de aanleg van het spuicomplex. Bij de tweede case is het spuicomplex in het grid opgenomen maar wordt er niet gespuid. Bij derde case wordt de spuisluis in gebruik genomen bij kentering van het getij. De getijdenstroom is bij deze simulatie uitgezet. In de vierde case wordt een totale simulatie uitgevoerd. Er wordt dan gespuid bij zowel opkomend als afgaand getij. Dit geeft een beeld van de situatie wanneer het spui gebruikt wordt.

Uit deze simulaties wordt geconcludeerd dat de nieuwe geometrie zoals in het voorontwerp gepland is zal veranderen. De aanleg van het spuicomplex brengt een aantal veranderingen met zich mee die in eerdere ontwerpstudies niet beschreven staan. De belangrijkste conclusies zijn hieronder gegeven.

Het spuicomplex vormt een obstructie voor de getijdenstroming. Het getijdenpatroon verandert om het spuicomplex te kunnen passeren. Het uitloopkanaal heeft daarentegen weinig invloed op de getijdenstroom. Het kanaal versterkt de stroming over de zandrug, maar het getij gaat er niet doorheen stromen.

Er vindt weinig menging plaats tussen het gespuide water en het water in de Waddenzee. Het zoete water dat gespuid wordt vormt een bel die achter de spuisluis blijft liggen.

De ligging van het uitloopkanaal zal gaan veranderen. Tijdens het spuien zijn er hoge snelheden aan de bodem die erosie zullen veroorzaken. Op de taluds van het kanaal staat ook een sterke stroming die erosie van het talud veroorzaken.

Deze veranderingen kunnen met wijzigingen in het ontwerp van het spuicomplex opgevangen worden. Een andere mogelijkheid is het kunstmatig aanpassen van de omgeving zodat de veranderingen aan de ligging gecontroleerd blijven.

Inhoudsopgave

1	INLEIDING	2
1.1	HET ONDERWERP	2
1.2	PROBLEEMSTELLING	3
1.3	DOELSTELLING	3
1.4	AANPAK	3
1.5	LEESWIJZER	4
2	ALGEMENE INFORMATIE.....	6
2.1	INLEIDING	6
2.2	DE HUIDIGE SPUISLUIZEN IN DE AFSLUITDIJK	6
2.3	TOEKOMSTIGE ONTWIKKELING DE WATERAFVOER	7
2.4	MOGELIJKE GEVOLGEN VAN DE EXTRA SPUISLUIS	8
2.5	DE LIGGING EN DE OMGEVING VAN DE EXTRA SPUISLUIS	9
3	DE EXTRA SPUISLUIS	12
3.1	INLEIDING	12
3.2	VORMGEVING VAN HET SPUICOMPLEX.....	12
3.3	SPUIBEHEER VOOR HET NIEUWE SPUICOMPLEX	13
3.4	HET WATERSYSTEEM BIJ DE EXTRA SPUISLUIS	15
3.5	VERVOLGONDERZOEK BIJ HET SPUICOMPLEX	17
4	ANALYTISCHE BEPALING VAN DE STROMING EN DE EROSIE	20
4.1	INLEIDING	20
4.2	AFVOERRELATIE DOOR DE SPUISLUIS.....	20
4.3	DICHTHEIDSTROMING ACHTER HET SPUICOMPLEX.....	23
4.3.1	<i>Stromingspatroon in het uitstroomkanaal</i>	25
4.3.2	<i>Gelaagdheid in de monding</i>	29
4.4	BODEMEROSIE IN HET UITLOOPKANAAL	30
4.4.1	<i>Bodemparameters</i>	30
4.4.2	<i>Erosiediepte</i>	31
4.5	CONCLUSIES	33
5	MODEL BESCHRIJVING.....	36
5.1	INLEIDING	36
5.2	HET FINLAB MODEL	36
5.3	GRID OPBOUW	37
5.3.1	<i>2DV grid</i>	38
5.3.2	<i>3D grid</i>	38
5.4	SIMULATIE INSTELLINGEN	41
5.4.1	<i>Beginvoorwaarden</i>	41
5.4.2	<i>Randvoorwaarden</i>	42
5.4.3	<i>Tijdschematisering</i>	43
5.5	UITVOER VAN FINLAB	43
6	NUMERIEKE 2DV SIMULATIES.....	46
6.1	INLEIDING	46
6.2	INSTELLINGEN VAN DE MODELLEERING	46
6.3	RESULTATEN VAN DE SIMULATIES	47
6.3.1	<i>Case 1: Laag spuidebiet</i>	47
6.3.2	<i>Case 2: Gemiddeld spuidebiet</i>	48

6.4	ANALYSE VAN DE RESULTATEN	49
6.4.1	<i>Analyse van de cases</i>	49
6.4.2	<i>Terugkoppeling naar de analytische bepalingen</i>	50
6.5	SAMENVATTING EN CONCLUSIES	51
7	NUMERIEKE 3D SIMULATIES	54
7.1	INLEIDING	54
7.2	INSTELLINGEN VAN DE MODELLEERING	54
7.3	RESULTATEN VAN DE SIMULATIES	55
7.3.1	<i>Case 1, Uitgangssimulatie</i>	55
7.3.2	<i>Case 2: Aangepast gebied met spuicomplex</i>	60
7.3.3	<i>Case 3: Spuien bij kentering</i>	66
7.3.4	<i>Case 4: Spuien bij getijdenverloop</i>	71
7.4	ANALYSE VAN DE RESULTATEN	77
7.4.1	<i>Analyse van de cases</i>	78
7.4.2	<i>Bifurcatie van de spuistroom</i>	80
7.4.3	<i>Terug koppeling naar de 2DV en analytische berekeningen</i>	83
7.5	SAMENVATTING EN CONCLUSIES	85
7.5.1	<i>Conclusies ten aan zien van het ontwerp</i>	86
8	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	87
8.1	CONCLUSIES	87
8.1.1	<i>Algemene conclusies</i>	87
8.1.2	<i>Analytische model</i>	87
8.1.3	<i>Numerieke 2DV model</i>	88
8.1.4	<i>Numerieke 3D model</i>	88
8.2	AANBEVELINGEN	88
	LITERATUUR	91
	BIJLAGE	93

Lijst van figuren

FIGUUR 1.1, HET OVERZICHT VAN DE AFSLUITDIJK MET DE LOCATIE VAN DE EXTRA SPUISLUIS.....	2
FIGUUR 2.1, DE BODEMLIGGING ACHTER DE BESTAANDE SPUICOMPLEXEN IN DE AFSLUITDIJK.....	7
FIGUUR 2.2, DE WESTELIJKE WADDENZEE MET DE LOCATIE VAN DE EXTRA SPUISLUIS.....	9
FIGUUR 3.1, HET BOVENAANZICHT EN DE DWARSDOORSNEDEN VAN HET SPUICOMPLEX.....	13
FIGUUR 3.2, DE WATERSTANDEN MET DE PERIODE WAARIN GESPUID KAN WORDEN.....	15
FIGUUR 3.3, DE WATERSTAND EN STROOMSNELHEID BIJ DOODTIJ IN DE DOOVE BALG.....	16
FIGUUR 3.4, DE WATERSTAND EN STROOMSNELHEID BIJ SPRINGTIJ IN DE DOOVE BALG.....	16
FIGUUR 4.1, SCHEMATISERING VAN DE SPUISLUIS ALS OVERLAAT.....	21
FIGUUR 4.2, DE AFVOERRELATIE DOOR DE SPUISLUIS, HET SPUIDEBIET VERSUS DE WATERSTANDEN EN STROOMSNELHEDEN.....	22
FIGUUR 4.3, VERSCHILLENDE TYPEN VAN MENGING BIJ DICHTHEIDSSROMEN.....	24
FIGUUR 4.4, DE SCHEMATISERING VAN DE DICHTHEIDSSROOM IN HET UITSTROOMKANAAL.....	25
FIGUUR 4.5, HET VERBAND TUSSEN DE DIKTE VAN DE WATERLAGEN EN HET SPUIDEBIET BIJ EEN INTERNE KRITISCHE STROOM IN DE MONDING.....	26
FIGUUR 4.6, DE AANZUIGSNELHEDEN VAN HET ZOUTE WATER IN DE ZOETWATERLAAG BIJ DE MONDING VAN HET UITLOOPKANAAL.....	27
FIGUUR 4.8, DE MOGELIJKE MATE VAN MENGING IN DE MONDING VAN HET UITLOOPKANAAL.....	29
FIGUUR 4.9, DE SHIELDS – VAN RIJN CURVE.....	31
FIGUUR 4.10, HET DIEPTE VERLOOP VAN DE EROESIEKUIL ACHTER HET UITSTROOMKANAAL OVER EEN PERIODE VAN 11 JAAR.....	32
FIGUUR 4.11, VERLOOP VAN DE EROESIEKUIL IN HET EERSTE JAAR EN GEDURENDE 20 JAAR MET EEN VARIABEL DEBIET.....	33
FIGUUR 5.1, EEN VOORBEELD GRID, MET ROOSTERFOUT.....	37
FIGUUR 5.2, HET TWEEDIMENSIONALE GRID.....	38
FIGUUR 5.3, HET OVERZICHT VAN DE BODEMLIGGING IN HET SIMULATIE GEBIED, MET DE GRIDVAKKEN.....	39
FIGUUR 5.4, HET TWEEDIMENSIONALE GRID VAN HET SIMULATIE GEBIED IN RD-COÖRDINATEN.....	40
FIGUUR 5.5, HET DRIEDIMENSIONALE GRID MET DIEPTEPROFIEL EN HET UITLOOPKANAAL.....	41
FIGUUR 6.1, DE STROOMSNELHEDEN EN DICHTHEIDSVERDELING BIJ EEN SPUIDEBIET VAN 1635m ³ /S, OP T=65MIN.....	47
FIGUUR 6.2, DE STROOMSNELHEDEN EN DICHTHEIDSVERDELING BIJ EEN SPUIDEBIET VAN 2096m ³ /S, OP T=80MIN.....	48
FIGUUR 6.3, DE VERTICALE SNELHEIDSVERDELING AAN HET EINDE VAN HET UITLOOPKANAAL.....	49
FIGUUR 7.1, DE STROOMSNELHEID AAN HET OPPERVLAK IN DE UITGANGSSITUATIE BIJ OPKOMEND GETIJ.....	56
FIGUUR 7.2, DE DIEPTEDOORSNEDE VAN DE SNELHEID OVER DE HARTLIJN VAN HET TOEKOMSTIGE SPUICOMPLEX.....	57
FIGUUR 7.3, DE DIEPTEGEMIDDELTE STROOMSNELHEID IN DE UITGANGSSITUATIE BIJ OPKOMEND GETIJ.....	57
FIGUUR 7.4, DE STROOMSNELHEID AAN HET OPPERVLAK IN DE UITGANGSSITUATIE BIJ AFGAAND GETIJ.....	58
FIGUUR 7.5, HET DIEPTEDOORSNEDE VAN DE SNELHEID OVER DE HARTLIJN VAN HET TOEKOMSTIGE SPUICOMPLEX.....	59
FIGUUR 7.6, DE DIEPTEGEMIDDELTE STROOMSNELHEID IN DE UITGANGSSITUATIE BIJ AFGAAND GETIJ.....	59
FIGUUR 7.7, DE STROOMSNELHEID AAN HET OPPERVLAK NA AANLEG VAN DE SPUISLUIS BIJ OPKOMEND GETIJ.	60
FIGUUR 7.8, DE DIEPTEDOORSNEDE VAN DE SNELHEID OVER DE HARTLIJN VAN DE SPUISLUIS.....	62
FIGUUR 7.9, DE DIEPTE GEMIDDELTESNELHEID VOOR HET AANGEPASTE GEBIED BIJ OPKOMEND GETIJ.....	63
FIGUUR 7.10, DE STROOMSNELHEID AAN HET OPPERVLAK NA AANLEG VAN DE SLUISLUIS BIJ AFGAAND GETIJ.	64
FIGUUR 7.11, DE DIEPTEDOORSNEDE VAN DE SNELHEID OVER DE HARTLIJN VAN DE SPUISLUIS.....	65
FIGUUR 7.12, DE DIEPTEGEMIDDELTE SNELHEID VOOR HET AANGEPASTE GEBIED BIJ AFGAAND GETIJ.....	65
FIGUUR 7.13, DE STROOMSNELHEID AAN HET OPPERVLAK WANNEER GESPUID WORDT BIJ KENTERING.....	67
FIGUUR 7.14, DE CONCENTRATIE VERDELING NA HET SPUIEN BIJ KENTERING OP T=83MIN.....	68

FIGUUR 7.15, HET WATERSPEIL TIJDENS HET SPUIEN, T.O.V. HET PEIL IN DE WADDENZEE VAN NAP -0.9M. .	69
FIGUUR 7.16, DE DIEPTEDOORSNEDE VAN DE SNELHEID EN DE DICHTHEID OVER DE HARTLIJN VAN HET SPUICOMPLEX.	69
FIGUUR 7.17, DE DIEPTEDOORSNEDE VAN DE SNELHEID EN DE DICHTHEID OVER DE ZANDBANK EN HET UITLOOPKANAAL VOOR HET SPUICOMPLEX, OP T=83MIN.....	70
FIGUUR 7.18, DE DIEPTEGEMIDDELDE SNELHEID BIJ SPUIEN BIJ KENTERING.....	70
FIGUUR 7.19, DE STROOMSNELHEID AAN HET OPPERVAK WANNEER GESPUID WORDT BIJ OPKOMEND GETIJ.	71
FIGUUR 7.20, DE CONCENTRATIE VERDELING NA HET SPUIEN BIJ OPKOMEND GETIJ.	72
FIGUUR 7.21, HET WATERSPEIL TIJDENS HET SPUIEN, T.O.V. HET PEIL IN DE WADDENZEE VAN NAP -0.9M ...	73
FIGUUR 7.22, DE DIEPTEGEMIDDELDE SNELHEID BIJ SPUIEN MET OPKOMEND GETIJ.	74
FIGUUR 7.23, DE STROOMSNELHEID AAN HET OPPERVAK WANNEER GESPUID WORDT BIJ AFGAAND GETIJ. .	75
FIGUUR 7.24, DE CONCENTRATIE VERDELING NA HET SPUIEN BIJ AFGAAND GETIJ.....	76
FIGUUR 7.25, HET WATERPEIL TIJDENS HET SPUIEN, T.O.V. HET PEIL IN DE WADDENZEE VAN NAP -0.9M.	76
FIGUUR 7.26, DE DIEPTEGEMIDDELDE SNELHEID BIJ SPUIEN MET AFGAAND GETIJ.....	77
FIGUUR 7.27, EEN SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE VERANDERINGEN VAN HET STROOMPATOON AAN HET OPPERVAK NA DE AANLEG VAN HET SPUICOMPLEX.....	79
FIGUUR 7.28, DE SAMENSTELLING VAN DE MAXIMALE STROOMSNELHEDEN ROND HET UITLOOPKANAAL.....	79
FIGUUR 7.29, DE BIFURCATIE VAN DE ZOETWATERBEL.	81
FIGUUR 7.30, DE REFLECTIE VAN EEN TRANSLATIEGOLF OP EEN GROTER STROOMPROFIEL.....	81
FIGUUR 7.31, HET BEHOUD VAN ROTATIE IMPULS DOOR WERVELCONTRACTIE.	83
FIGUUR 7.32, DE MAXIMAAL OPTREDENDE ABSOLUTE BODEMSNELHEDEN TIJDENS HET SPUIEN.	84

Lijst van tabellen

TABEL 3.1, DE VERDELING VAN HET AANTAL SPUIGROEPEN BIJ EEN GEVRAAGDE CAPACITEIT.....	14
TABEL 3.2, DE DEBIETVERDELING VAN DE NIEUWE SPUISLUIS, AANTAL UREN MET HET VERWACHT DEBIET.	15
TABEL 6.1, HET VERZICHT VAN DE INSTELLINGEN VOOR DE 2DV SIMULATIES.....	47
TABEL 7.1, HET OVERZICHT VAN DE INSTELLINGEN VOOR DE 3D CASES.	55

Symbolen lijst

Romeinse symbolen

a_n	Dikte van waterlaag n	[m]
B	Breedte van de waterloop	[m]
C	Chezycoëfficiënt	[m ^{1/2} /s]
c	Golfsnelheid	[m/s]
D	Korrelgrootte	[m]
d	Diepte	[m]
F	Impuls	[kg·m/s]
F_{int}	Intern Froudegetal	[-]
g	Zwaartekracht versnelling	[m/s ²]
H	Energie hoogte volgens Bernoulli	[m]
h	Waterspiegel niveau	[m]
h_s	Diepte erosiekuil	[m]
h_{se}	Evenwichtsdiepte erosiekuil	[m]
k_r	Bodemruwheid	[m]
Q	Debiet	[m ³ /s]
q	Debiet per eenheid van breedte	[m ³ /s/m]
R	Hydraulische straal	[m]
R_i	Richardsongetal	[-]
R_{i_c}	Estuarium Richardsongetal	[-]
r	Turbulentie factor	[-]
r_t	Reflectie factor voor de teruggekaatste golf	[-]
t	Tijd	[s]
u	Stroomsnelheid, in de x -richting	[m/s]
u_c	Kritische stroomsnelheid voor sediment transport	[m/s]
u_*	Schuifspanningsnelheid	[m/s]
w_n	Verticale stroomsnelheid vanuit laag n	[m/s]
z	Referentie niveau	[m]
z_0	Drempel hoogte	[m]

Griekse symbolen

α, β	Coëfficiënten	[-]
γ	Verhoudingsfactor voor kanaalpannen	[-]
Δ	Relatieve dichtheid, zand	[-]
δ	Dikte van de overgangslaag	[-]
ε	-Relatieve dichtheid, water	[-]
	-Dissipatie van turbulente energie	[s ⁻¹]
κ	-Turbulente diffusie	[m ² /s]
	-Turbulente kinetische energie	[J]
ρ	Dichtheid	[kg/m ³]
τ	Bodemschuifspanning	[N/m ²]
ν	Kinematische viscositeit	[m ² /s]
ψ_c	kritische Shields stabiliteitsparameter	[-]
Ω	Rotatiesnelheid, (Vorticity)	[rad/s]

Hoofdstuk 1

Inleiding



- 1.1 Het onderwerp
- 1.2 Probleemstelling
- 1.3 Doelstelling
- 1.4 Aanpak
- 1.5 Leeswijzer

1 Inleiding

1.1 Het onderwerp

Door het uitmonden van verschillende rivieren in het IJsselmeer is er een permanente aanvoer van water. Een groot deel van het aangevoerde water wordt met spuisluizen in de Afsluitdijk afgevoerd. Voor de duidelijkheid, een spuisluis wordt gebruikt om bij een natuurlijk verval in waterstand water te lozen.

Door de relatieve zeespiegelstijging wordt het beschikbare verval verkleind terwijl er meer water gespuid moet worden door de groeiende pieken in de aanvoer van water naar het IJsselmeer. Om het streefpeil op het IJsselmeer te kunnen handhaven is een vergroting van de spuicapaciteit nodig. Er zal dan ook een extra spuisluis aangelegd worden juist ten westen van Kornwerderzand, zie Figuur 1.1.



Figuur 1.1, het overzicht van de Afsluitdijk met de locatie van de extra spuisluis.

Het gespuid water moet efficiënt en snel afgevoerd worden vanuit het spuicomplex. Dit is van belang om opstuwning achter de spuisluis te voorkomen en voor de veiligheid van de Afsluitdijk. Als er zich een stroming langs de Afsluitdijk ongecontroleerd ontwikkelt kan de stabiliteit er van ondermijnd worden, zie Lofvers (2006). Om de stabiliteit van de Afsluitdijk te waarborgen wordt er een uitstroomkanaal met bodemverdediging aangelegd. Dit 250 meter lange kanaal brengt de spuistroom op veilige afstand van de Afsluitdijk. Voor een goede afvoer wordt er aansluitend op dit uitstroomkanaal een uitloopkanaal aangelegd. Dit kanaal loopt door een smalle zandrug en sluit aan op de getijdengeul, de Doove Balg. Na het bereiken van de Doove Balg kan het water afgevoerd worden via de getijdengeulen door de Waddenzee.

De Waddenzee waarop gespuid wordt, is een kwetsbaar gebied omdat de ligging van geulen, banken en platen in een fragiel morfologisch evenwicht is. Bij het verstoren van het huidige patroon kunnen grote veranderingen optreden tijdens het instellen van een nieuw evenwicht. De getijdenstroom van de Doove Balg zou dus door de aanleg van het uitloopkanaal kunnen wijzigen. De zandrug waar die doorheen is gelegd kan weggespoeld worden. Dan zal er ook een situatie kunnen ontstaan waarbij een getijdenstroom direct langs de Afsluitdijk loopt. Het uitloopkanaal

kan ook een kortsluiting veroorzaken tussen de verschillende getijdengeulen waardoor de Waddenzee lokaal ingrijpend kan veranderen.

De ligging en het dwarsprofiel van dit onverdedigde uitloopkanaal zijn dus niet alleen van grote invloed op de afvoerverdeling over de verschillende geulen. Het is dus van belang het uitloopkanaal zo aan te leggen dat het gespuide water goed afstroomt, maar de zandrug die doorkruist moet worden zo min mogelijk wordt aangetast. Voor dit afvoersysteem van kanalen is een voorontwerp gemaakt, zie Vrijburcht (2003). Dit ontwerp moet nog verder onderzocht worden op de afvoercapaciteit en de stabiliteit.

1.2 Probleemstelling

De probleemstelling van het onderhavige onderzoek, naar een snelle en efficiënte afvoer door het uitloopkanaal, bestaat uit de volgende vraagstukken:

- Wat zijn de veranderingen van de getijstroom door de nieuwe geometrie?
- Hoe ziet het stromingspatroon er uit door het uitloopkanaal in samenhang met de getijstroom?
- In welke mate vindt er menging plaats in het uitloopkanaal en de monding daarvan, tussen het gespuide water en de Waddenzee?
- Het uitloopkanaal is ontworpen zonder bodem- en taludbescherming. Hoe groot is de mate van erosie in en nabij dit stuk van het kanaal en welke veranderingen/ verschuivingen van de geul treden als gevolg daarvan op?

Met het verdiepen in deze vraagstukken kan het voorontwerp van het uitloopkanaal getoetst en eventueel aangepast worden.

1.3 Doelstelling

Deze afstudeerscriptie is een near-field studie naar de invloed van het spuien op het gebied in de Waddenzee, achter de nieuwe spuisluis. Het gaat hierbij met name om het patroon van de stroming door het uitloopkanaal die vanuit het spuicomplex tot in de Doove Balg loopt. Voor deze geul wordt de stroming driedimensionaal gemodelleerd waarbij de nadruk wordt gelegd op het dichtheidsverschil van het water in het IJsselmeer en de Waddenzee. Op basis van de stroming worden de morfologische ontwikkelingen van het uitloopkanaal beschreven. De veranderingen die het uitstromende water heeft op het gebied direct achter het spuicomplex worden onderzocht.

1.4 Aanpak

De aanpak om tot een goed resultaat te komen bestaat uit verschillende delen. Eerst wordt de omgeving waar de spuisluis in geplaatst gaat worden beschreven. Deze omgeving bestaat uit de westelijke Waddenzee en de bestaande spuisluizen in de Afsluitdijk. Met het kennen van de omgeving en de achtergrond ervan kunnen veranderingen door de aanleg van de spuisluis beter geplaatst worden in het geheel. Voor het verder bestuderen van de invloed op de omgeving wordt eerst nog het ontwerp van het spuicomplex besproken. De stroming door de spuisluis kan daarmee bepaald worden.

Met deze kennis kan analytisch bepaald worden wat de invloed van het spuicomplex en de spuiestroom op de omgeving wordt. De stroming achter de spuisluis wordt dan tweedimensionaal bepaald. Hierbij moet rekening gehouden worden met de dichtheidstroming door het zoete

spuiwater in de Waddenzee. Met deze benaderingen kan een goed beeld gevormd worden van de processen bij het spuicomplex.

De punten waar met het analytische model nog onduidelijkheden over blijven bestaan, worden met een numeriek model berekend. Het numerieke model Finlab wordt hiervoor gebruikt. In Finlab wordt de invloed van de spuisluis en de dichtheidsstroming op de bestaande getijdenstroming berekend.

Deze twee rekenmethoden worden vervolgens met elkaar vergeleken om de uitkomsten op juistheid te controleren. Na het toepassen van deze twee rekenmethoden en de vergelijking is er voldoende inzicht in de probleemstelling. Er worden dan verwachtingen opgesteld over de veranderingen aan het stromingspatroon en de daarbij samenhangende bodemligging.

1.5 Leeswijzer

Na de korte inleiding, de probleemstelling en de doelstellingen die in dit hoofdstuk zijn gegeven, wordt er eerst dieper ingegaan op de achtergrond van het project voor uitbreiding van de spuicapaciteit. In hoofdstuk 2 worden de beweegredenen voor het vergroten van de spuicapaciteit toegelicht en worden de mogelijke gevolgen ervan beschreven. Hier wordt ook locatie van de extra spuisluis beschreven en de mogelijke gevolgen van deze inpassing voor de directe omgeving.

In hoofdstuk 3 wordt het voorontwerp van het spuicomplex beschreven en worden de verschillende onderdelen ervan benoemd. Bij het voorontwerp is ook het toekomstige spuibeheer beschreven. Hierna wordt het watersysteem bij de extra spuisluis beschreven. Aan het eind worden de leemten in de kennis van het voorontwerp behandeld. Hier wordt ook de plaats van dit rapport te opzichten van de andere onderzoeken geplaatst.

Na deze inleiding op het project en de achtergrond worden de eerste berekeningen gemaakt. In hoofdstuk 4 wordt een analytische benadering gemaakt van de stroming door de spuisluis en de erosie die erachter plaats vindt. Hier wordt een aantal analytische berekeningen uitgevoerd op basis van de informatie uit de voorgaande hoofdstukken.

In Hoofdstuk 5 wordt de numerieke modellering toegelicht. Het simulatieprogramma dat gebruikt wordt is Finlab. Dit programma en het gebruik hiervan worden uitgelegd. De invoer die nodig is voor de numerieke simulaties in de volgende hoofdstukken wordt hier gegeven. Ook de uitvoerdata van Finlab en de bewerking daarvan worden toegelicht.

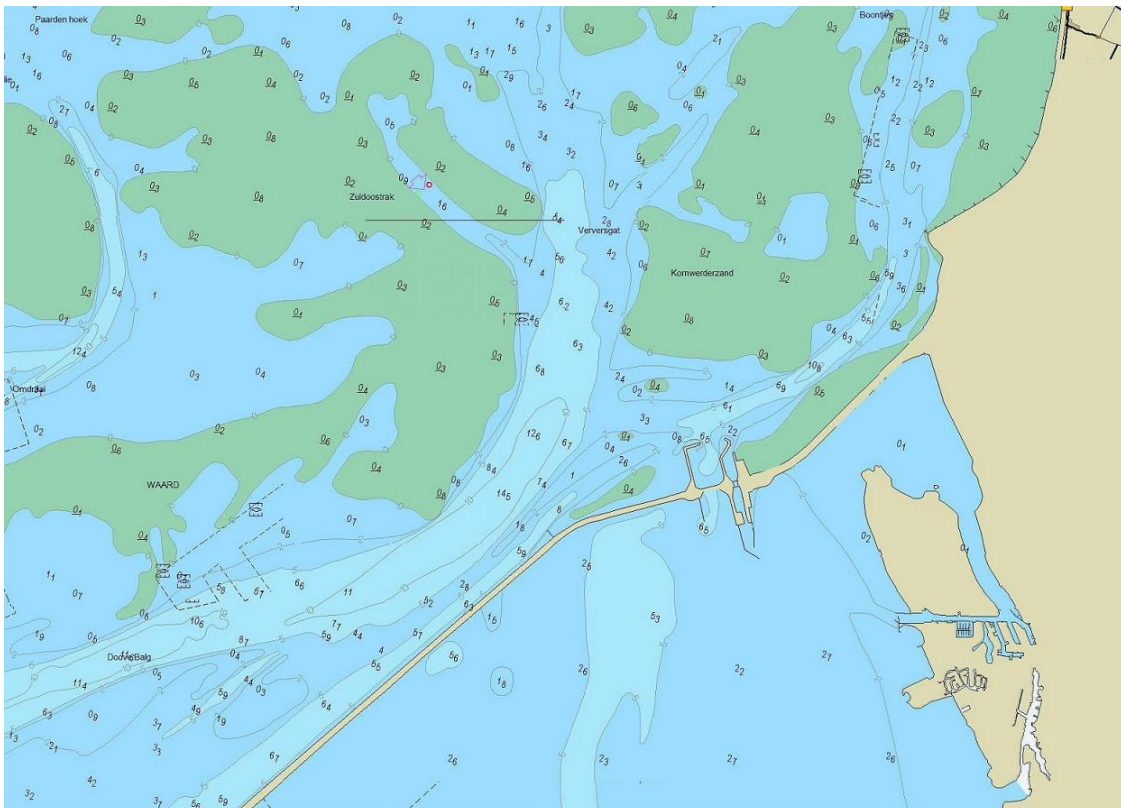
In hoofdstuk 6 worden de tweedimensionale numerieke simulaties uitgevoerd in een aantal cases. Het gebied dat hier is opgenomen loopt over de hartlijn van het spuicomplex van juist voor de spuisluis tot in de Doove Balg. Bij het uitstromen van het gespuide water wordt hier vooral gelet op de dichtheidsstroming.

In hoofdstuk 7 worden de driedimensionale numerieke simulaties uitgevoerd. Ook hier worden een aantal cases behandeld. Per case worden meer elementen van de omgeving aan de modellering toegevoegd. Bij de eerste case is de huidige situatie opgenomen en bij de laatste case wordt er gespuid bij getijdenstroming.

Aan de hand van de uitkomsten wordt ten slotte in hoofdstuk 8 een aantal conclusies getrokken over het voorontwerp van het uitloopkanaal. Er worden vervolgens ook aanbevelingen gedaan.

Hoofdstuk 2

Algemene informatie



2.1 Inleiding

2.2 De huidige spuisluizen in de Afsluitdijk

2.3 Toekomstige ontwikkelingen van de waterafvoer

2.4 Mogelijke gevolgen van de extra spuisluis

2.5 Ligging en omgeving van de extra spuisluis

2 Algemene informatie

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een introductie gegeven over de vraag naar de extra afwateringsmogelijkheden, dit om een breed inzicht te geven in de situatie. Er wordt gekeken naar de huidige stand van zaken, met de bestaande spuisluizen. Vervolgens wordt er toegelicht waarom er een extra spuisluis nodig is, hoe deze ingepast kan worden. De locatie van de extra spuisluis en de mogelijke gevolgen van deze inpassing worden aan het eind van het hoofdstuk beschreven.

Door Rijkswaterstaat is al veel vooronderzoek gedaan naar de afwateringsmogelijkheden van het IJsselmeer, dit om het Milieu Effecten Rapport op te stellen, zie Hoogenboom (2005). Een MER is bij de wet verplicht bij het uitvoeren van grote projecten.

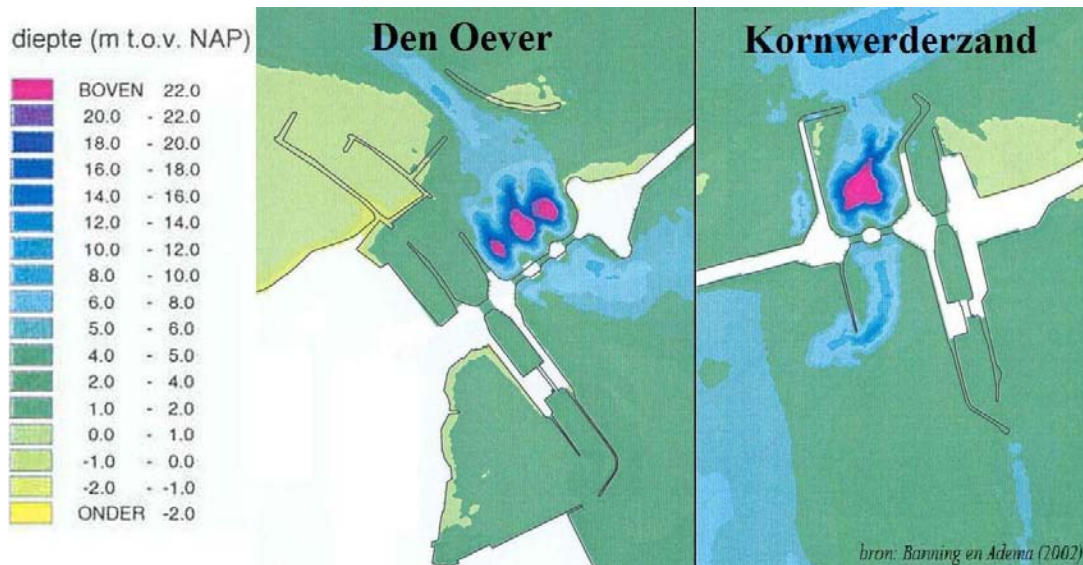
2.2 De huidige spuisluizen in de Afsluitdijk

Door het uitmonden van de rivieren de IJssel en de Vecht in het IJsselmeer is er een permanente aanvoer van water naar het IJsselmeer. Om weer van het overtollige water af te komen zijn aan beide einden van de Afsluitdijk spuicomplexen aangelegd om het water uit het IJsselmeer de Waddenzee in te laten stromen. De Stevinsluizen aan de westzijde bij Den Oever en de Lorentzsluizen aan de oostzijde bij Kornwerderzand.

Bij het huidige spuibeheer wordt eerst via de Stevinsluizen geloosd, als dit niet voldoende is wordt de Lorentzsluis ook in gebruik genomen. Dit wordt ondermeer gedaan om het visjagersgaatje, de verbindingsgeul naar Den Oever, open te houden en om het baggerbezwaar bij Den Helder en Harlingen te verminderen.

De huidige spuisluizen zijn ontworpen voor een maximum spuidebiet van ruim 5000m³/s. Dit maximum debiet kan pas bij een verschil van ongeveer 2m waterstand bereikt worden. Een dergelijk groot verval treedt zelden op, waardoor er dus weinig met het maximale debiet gespuid kan worden.

Bij het ontwerp van de sluizen is indertijd de bodemerosie onderschat. De bodembescherming was slechts 18m lang, waardoor er achter de spuisluizen grote erosiekuilen ontstonden. De stabiliteit van de spuisluizen kwam al snel in gevaar. Toen is de bodembescherming 110m doorgetrokken in de ontgrondingskuil, om verdere groei tegen te houden. Later bleek deze extra bescherming nog onvoldoende te zijn, waarna er een stuk van de ontgrondingskuil opgevuld werd en de bodembescherming ook weer verder doorgetrokken werd. Het aanvullen van de ontgrondingskuil en uitbreiden van de bodembescherming is een aantal keren herhaald, zie Kortlever (2006). Het gevolg van het aanvankelijk ontbreken van een adequate bodembescherming is dat de ontgrondingsputten nu 25m diep zijn, dit is te zien in Figuur 2.1. Het is dus van groot belang om bij het nieuwe complex rekening te houden met bodemtransport.



Figuur 2.1, de bodemligging achter de bestaande spuicomplexen in de Afsluitdijk.

2.3 Toekomstige ontwikkeling van de waterafvoer

De waterpeilen van het IJsselmeer zijn in een wettelijk besluit vastgelegd, het zomerpeil is NAP - 0.2m en het winterpeil is NAP -0.4m. In de winter wordt het streefpeil de laatste jaren regelmatig overschreden: het komt voor dat de waterstand ruim een maand meer dan 10cm boven het streefpeil staat. In de toekomst zal het steeds lastiger worden om de peilen te handhaven. Dat komt door de volgende ontwikkelingen.

De maatgevende afvoerpiek van de rivieren in Nederland groeit en dus die van de IJssel ook, waardoor er in een korte tijd veel water het IJsselmeer instroomt. Daarnaast is er ook een relatieve zeespiegelstijging, de combinatie van het verzakken van het land en het stijgen van de zeespiegel. De data waar Rijkswaterstaat de vraag naar extra spuicapaciteit op gebaseerd heeft komen uit klimaat scenario G+ van het KNMI (2006). De belangrijkste veranderingen die daarin voorkomen zijn: een zeespiegelstijging van 0.25m in de periode tot 2050 en een gemiddelde toename van de neerslag in de winter van 7%.

Het verval zal dus afnemen wat de spuicapaciteit reduceert, terwijl er meer overtollig water gespuid moet worden. Om dit op te vangen is een verdubbeling van de huidige capaciteit nodig. Zes jaar geleden is daarom door de overheid besloten dat de bouw van de extra uitwateringsmogelijkheden voorbereid moet worden.

Om het extra water af te voeren is niet direct naar een spuisluis gekeken, ook andere mogelijkheden zijn onderzocht, zoals het plaatsen van een gemaal. Er is ook gekeken naar de mogelijkheid van het opvangen van het water door het verticaal- of horizontaal bergen in het IJsselmeergebied. Zelfs het aanpassen van de debietverdeling over de Rijntakken is onderzocht.

Een gemaal waarmee het water direct afgevoerd kan worden is een goed alternatief. Er is echter niet voor gekozen omdat het veel energie kost water te verpompen. Dit komt door de grote capaciteitsvraag voor de afvoer. Het gemaal zal dan twee keer zo groot moeten worden als het grootste gemaal van Nederland, dat bij IJmuiden staat. De keus is dus gevallen op een spuisluis,

dit vanwege de grote capaciteit die mogelijk is en het lage energieverbruik. Er wordt zelfs gekeken naar opwekking van energie uit de spuistroming.

Een overzicht van het project is hieronder gegeven. In 1999 is de planstudie [ES]2-Afsluitdijk gestart, wat staat voor: Extra Spuicapaciteit en versterking van de Ecologische Samenhang langs de Afsluitdijk. In mei 2002 zijn de 'Richtlijnen voor het MER' door het Bevoegd Gezag gepubliceerd. Om het aantal mogelijkheden en het daarbij horende onderzoeken te beperken is in juni 2005 een locatie gekozen en de voorlopige inrichting bestudeerd. Naar aanleiding hiervan zijn er informatieavonden geweest en is een tussenadvies gekomen. Aan het eind van 2007 wordt de publicatie van het MER verwacht en als dit goedgekeurd wordt kan de bouw van de extra spuisluis in 2009 beginnen.

2.4 Mogelijke gevolgen van de extra spuisluis

Het in gebruik nemen van een extra spuisluis heeft vele gevolgen voor de omgeving, die alle onderzocht moeten worden. Het IJsselmeer, de Afsluitdijk en de Waddenzee zijn beschermd, veranderingen zijn dus niet toegestaan tenzij echt niet anders kan, en dat moet aangetoond zijn. Zo mag het rechtlijnige karakter van de Afsluitdijk niet aangetast worden, en de Wadden staan op de Unesco werelderfgoedlijst. Alle mogelijke effecten op de natuur, het landschap, de scheepvaart, landbouw, recreatie, enz. dienen onderzocht te worden.

Om een voorbeeld te geven, in de Makkumerwaard leeft de Noordse Woelmuis, dit is een beschermde diersoort. Deze muis is gebaat bij het van tijd tot tijd overstromen van zijn leefgebied, maar met de nieuwe spuisluis zal dat minder vaak gebeuren en wordt het leefgebied aangetast. Om de natuur tegemoet te komen zal er ook een vispassage bij de nieuwe spuisluis aangelegd worden voor de visintrek naar het IJsselmeer. Hiermee kunnen de vissen de barrière van de Afsluitdijk makkelijker nemen.

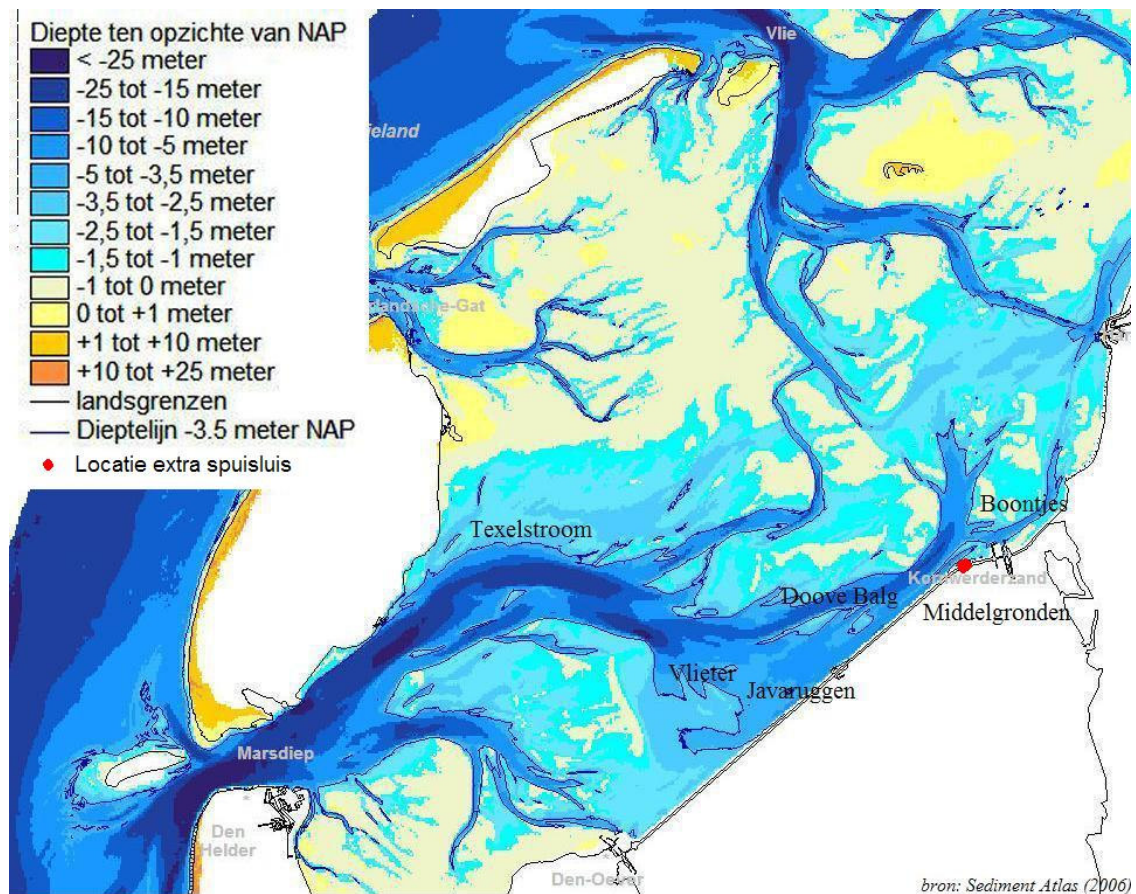
Al deze effecten en veranderingen zijn beschreven in het milieu effecten rapport, MER. Dit is gedaan op basis van expert-judgement, wat betekent dat een deskundige zijn oordeel geeft op basis van zijn kennis en ervaringen. Voor de veranderingen op de Waddenzee is ook gewerkt met tweedimensionale modellen, deze zijn dieptegemiddeld en geven een globaal inzicht. Op basis hiervan is een locatie gekozen en een voorontwerp gemaakt voor de spuisluis. Dit wordt in het volgende hoofdstuk besproken.

Een onvermijdelijke verandering aan de ecologie is de zoet/zout verdelingen achter de spuisluis. Met het spuien wordt zoet water geloosd op de van nature zoute Waddenzee. Wanneer het gespuide water goed mengt met de omgeving zijn de gevolgen beperkt. De verwachting is dat het water voor de spuisluis iets zoeter wordt omdat hier meer gespuid zal gaan worden, zie Banning en Adema (2002). Maar bij een gebrekkige menging kan er een bel zoetwater ontstaan die aan het wateroppervlak blijft liggen. Als deze bel over een plaat stroomt waar onder normale omstandigheden alleen zoutwater komt veroorzaakt dit een groot verschil in saliniteit. Dit heeft nadelige gevolgen voor de bestaande flora en fauna.

Het aanleggen van een extra spuisluis heeft ook gevolgen voor de bestaande spuisluizen. Door de vergroting van de spuicapaciteit zal de belasting op de huidige spuisluizen afnemen. Dit maakt het mogelijk om aan de bestaande 70 jaar oude sluisen groot onderhoud te plegen. Voor dit onderhoud zou een spuisluis voor langere tijd gesloten moeten worden, nu is dat niet mogelijk gezien het capaciteitsgebrek.

2.5 Ligging en omgeving van de extra spuisluis

De extra spuisluis komt juist ten westen van Kornwerderzand in de Afsluitdijk te liggen, deze locatie is in Figuur 2.2 aangegeven. Deze locatie is gekozen vanwege het relatief grote verval, de aan- en afvoermogelijkheden van het spuiwater en de inpassing in de Afsluitdijk. Het tot stand komen van de keuze voor deze locatie en de afweging van de verschillende criteria is in bijlage A beschreven.



Figuur 2.2, de westelijke Waddenzee met de locatie van de extra spuisluis.

Het spuicomplex komt voor een deel ook in de Waddenzee te liggen. De Waddenzee is een dynamisch gebied met een veranderlijk stelsel van geulen. Om later de mogelijke veranderingen ten gevolgen van de inpassing van het spuicomplex te kunnen voorspellen, wordt hier naar het ontstaan van het huidige patroon in de westelijke Waddenzee gekeken. Tegenwoordig is het stelsel van platen en geulen relatief stabiel, maar na de aanleg van de Afsluitdijk vonden een aantal grote veranderingen plaats. De huidige situatie is in de voorgaande figuur getoond.

In 1932 is door de aanleg van de Afsluitdijk de Waddenzee gescheiden van de Zuiderzee, die sindsdien het IJsselmeer werd. Voorheen liepen er twee grote geulen de Zuiderzee in, de Vlieter waar nu het monument staat en de Middelgronden, juist ten westen van Kornwerderzand. De Vlieter sloot in westelijke richting via de Texelstroom aan op de Noordzee. Deze geul is nog enige tijd tot aan de Afsluitdijk open gehouden maar is later dichtgeslibd. Een aantal kleinere geulen tussen de Javaruggen zijn ook in de loop der tijd aangezand.

De Middelgronden was noordelijk gericht en sloot via de Vlie aan op de Noordzee. Deze passage is na het sluiten van de Afsluitdijk aangezand. Het transport van water is toen meer door de Doove Balg gegaan, die na de afsluiting van de Middelgronden sterk is gegroeid. De ontwikkeling de Doove Balg is in bijlage B getoond.

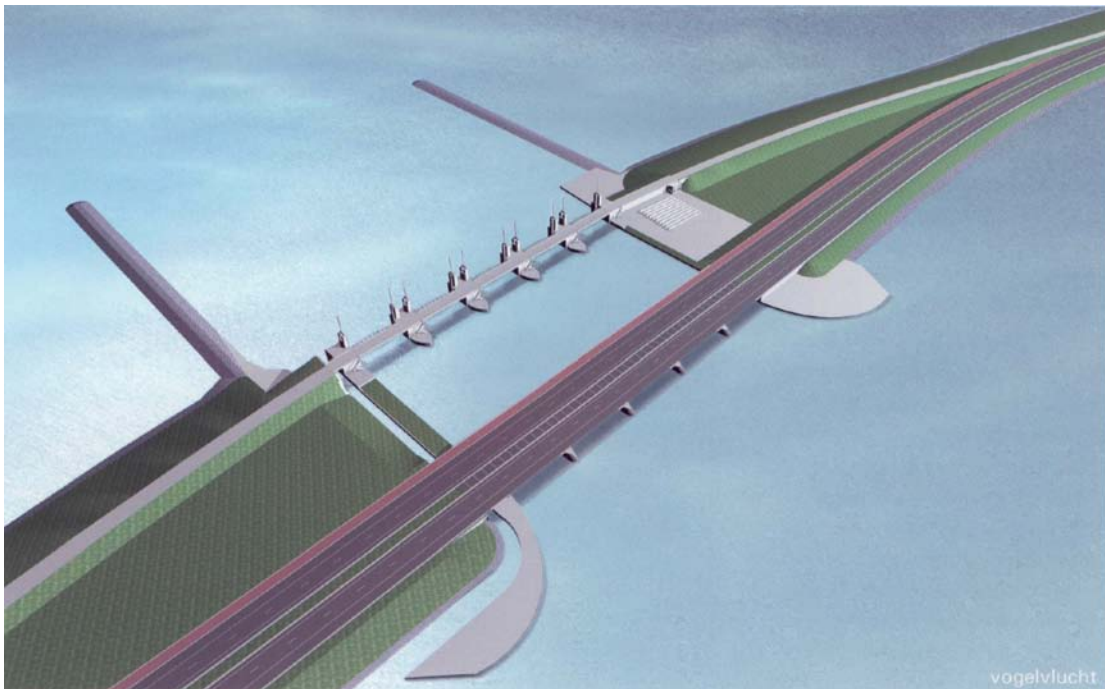
De laatste 30 jaar is de Doove Balg stabiel gebleven, de ligging en het dwarsprofiel zijn nauwelijks veranderd. Deze stabiele ligging kan samenhangen met een relatief harde rand in de binnenbocht van de Doove Balg bij Kornwerderzand. Op de wadplaat die daar ligt is het sediment beduidend grover dan in de omgeving. Door de hoge stabiliteit van deze plaat kan de groei van de Doove Balg afgeremd zijn. Het watervolume door de Doove Balg is wel afgenomen, dit is veroorzaakt door het aanzanden van het gebied ten noorden van Kornwerderzand, zie Lofvers (2006).

Langs de Doove Balg is in de jaren '70 een geul parallel aan de Afsluitdijk ontstaan. Deze tussengeul is gestaag blijven groeien in de lengte en diepte, tot er een aantal jaren geleden een strekdam door gelegd werd. Aan de erosieput die ten westen van de kop van de strekdam is ontstaan valt af te leiden dat dit een vloedschaar is. Dit komt ook overeen met de kenmerken van een vloedschaar; een open eind aan de zee kant en een zandbank aan het eind van de schaar, zie De Vriend et al (2002) en Veen (1950). Deze vloedschaar heeft geen naam en zal daarom in dit rapport verder aangeduid worden als de vloedschaar.

Naast de ontwikkeling van deze vloedschaar is de Boontjes in diezelfde periode gegroeid. De Boontjes wordt op dit moment nog door een lage zandrug bij Kornwerderzand van de Doove Balg gescheiden. Als de vloedschaar langs de Afsluitdijk en de Boontjes door blijft groeien, zou in combinatie met het nog aan te leggen uitloopkanaal een diepe verbinding tussen deze geulen en de Doove Balg kunnen ontstaan, zie Lofvers (2006).

Hoofdstuk 3

De extra spuisluis



3.1 Inleiding

3.2 Vormgeving van het spuicomplex

3.3 Spuibeheer voor het nieuwe spuicomplex

3.4 Het watersysteem bij de extra spuisluis

3.5 Vervolgonderzoek bij het spuicomplex

3 De extra spuisluis

3.1 Inleiding

In het vorige hoofdstuk is de achtergrond en de omgeving van de spuisluis besproken, in dit hoofdstuk wordt ingegaan op het voorontwerp van het spuicomplex. De eerste paragrafen zijn gebaseerd op de voorontwerpnota, zie Vrijburcht (2003). Een voorontwerpnota van het kunstwerk is verplicht bij het MER, dit om de effecten er van op de omgeving te kunnen toetsen. In het voorontwerp worden de hoofdlijnen voor de toekomstige spuisluis vastgelegd, zodat er een meer gedetailleerd onderzoek naar de omgeving gedaan kan worden.

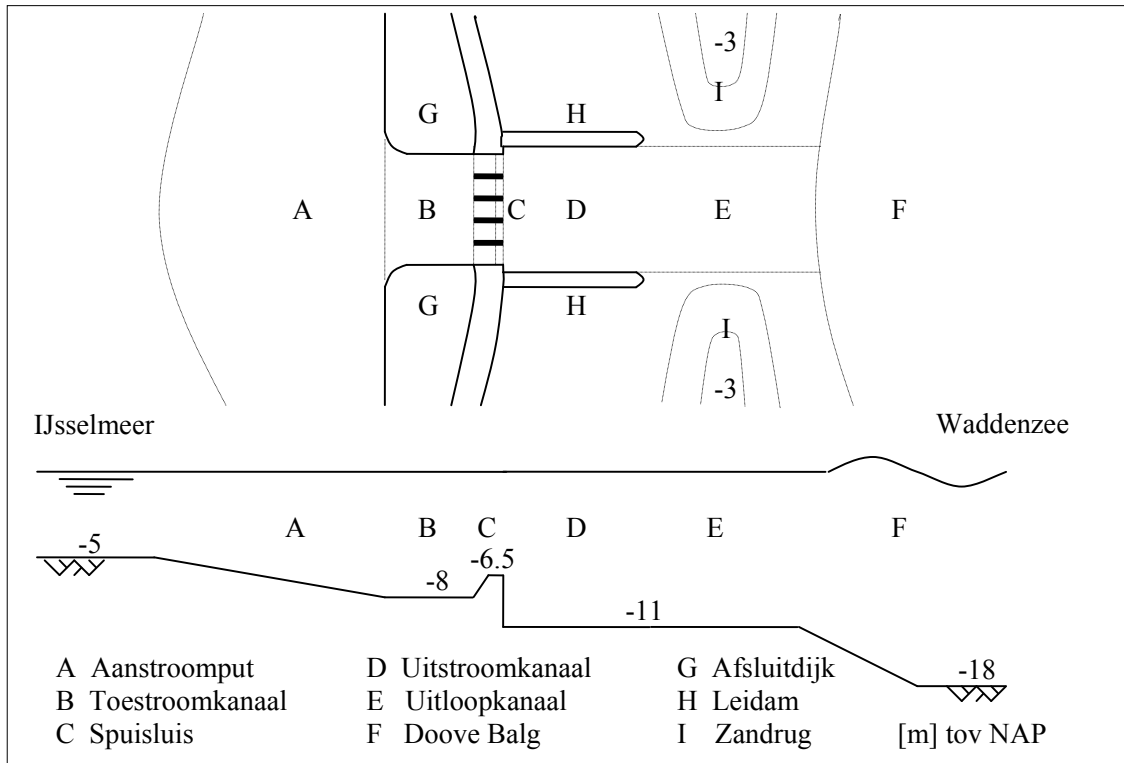
Eerst wordt de vormgeving van het spuicomplex besproken. Deze informatie is nodig voor het bepalen van de omstandigheden bij de spuisluis. Het spuibeheer wordt in de volgende paragraaf besproken; dit is van belang voor het bepalen van het stromingspatroon. Vervolgens wordt het watersysteem in de omgeving van het spuicomplex beschouwd. De waterstranden, stroomsnelheden en de dichtheid die optreden in de directe omgeving van de extra spuisluis worden daar gegeven. Bij de verschillende berekeningen zal hier op worden terug gevallen. Aan het eind worden de leemten in de kennis van het voorontwerp behandeld. Dit vormt de aansluiting naar de rest van het rapport waar de berekeningen uitgevoerd worden.

3.2 Vormgeving van het spuicomplex

In 2003 is het voorontwerp gemaakt; het resultaat was een open spuisluis zonder debietspreider. Een impressie hiervan is aan het begin van het hoofdstuk afgebeeld. De componenten van het complex en de sluis worden hieronder beschreven, in Figuur 3.1 is een schematisch bovenaanzicht en dwarsdoorsnede van het nieuwe spuicomplex gegeven.

De spuisluis is ontworpen met 5 kolken die ieder 30.3m breed zijn en de drempel op NAP -6.5m hebben. Het doorstroomoppervlak van deze spuiopeningen is van grote invloed op het mogelijk spuidebiet. Tussen de 5 spuikolken staan pijlers van 10m breed, dit brengt de breedte van de sluis op 191.5m. Een woelbak voor het fixeren van een eventuele watersprong wordt vaak achter de drempel van een spuisluis geplaatst. In het voorontwerp is nog geen woelbak aangegeven, maar deze kan nog wel ingepast worden.

Voor een goede aanvoer is zoals eerder genoemd een aanstroompuit nodig, dit is een verlaging van de bodem in het IJsselmeer voor de spuisluis. Het huidige bodemniveau is daar NAP -5.0m, dit moet geleidelijk verlaagd worden naar NAP -8.0m. Deze verdieping is nodig om een groter debiet mogelijk te maken en om de stroomsnelheden te beperken. Een ontwerpeis is dat de stroomsnelheid op het IJsselmeer niet boven de 2.0m/s mag komen. De put zal als een soort trechter spits toelopen naar de spuisluis en ongeveer 400m lang worden.



Figuur 3.1, het bovenaanzicht en de dwarsdoorsneden van het spuicomplex.

De aanstroompuit eindigt vlak voor de Afsluitdijk en gaat daar over in het toestroomkanaal. Dit 150m lange kanaal ligt op het verbrede stuk door de Afsluitdijk. De pijlers van het verkeersviaduct zullen in het toestroomkanaal geplaatst worden, dit zal de stroom naar het spui beïnvloeden. In het voorontwerp zijn deze in het verlengde van de pijlers van het spui gezet, maar deze positie is nog niet vastgelegd. De breedte van het kanaal is 190m, dit is gelijk aan de breedte van de spuisluis. De bodem ligt op NAP -8.0m en is verdedigd, dit om de stabiliteit te behouden als de stroomsnelheid oploopt.

Achter de spuisluis ligt het uitstroombkanaal, dat 235m breed is en waarvan de bodem ligt op NAP- 11m. Om het profiel van het uitstroombkanaal stabiel te houden wordt het tussen leidammen gelegd die 250m lang zijn. In het voorontwerp zijn de leidammen zo eenvoudig mogelijk ontworpen, als twee rechte lijnen haaks op de Afsluitdijk de Waddenzee in.

De verbinding tussen het uitstroombkanaal en de Doove Balg wordt gevormd door het uitloopkanaal. Voor dit kanaal moet een stuk van de zandrug afgegraven worden. Over de ligging en het dwarsprofiel hiervan zijn nog veel onduidelijkheden, de ontwikkeling van dit kanaal staat dan ook centraal in dit onderzoek.

3.3 Spuibeheer voor het nieuwe spuicomplex

Het toekomstige spuibeheer is op het moment nog lastig in te schatten, omdat de gevolgen van het extra spuien nog niet geheel bekend zijn. Het spuibeheer is van belang voor het beschrijven van de afstroming uit de spuisluis. Om toch een goede inschatting te kunnen maken wordt eerst het huidige spuibeheer besproken waarna een viertal scenario's voor het toekomstige beheer van de nieuwe spuisluis bekeken worden.

De Stevinsluis bij Den Oever heeft met 15 spuiokers een maximum spuidebiet van 3190m³/s. De Lorentzsluis bij Kornwerderzand heeft 10 kokers en een maximum spuidebiet van 2120m³/s. De in totaal 25 spuiokers zijn ieder 12m breed en de drempel ligt op NAP -4.4m. De capaciteit van de twee huidige spuisluizen is dus net zo groot als de beoogde capaciteit van de nieuwe spuisluis.

De gemiddelde afvoer van het IJsselmeer per etmaal is in de winter 650 m³/s en in de zomer 325m³/s, volgens Hoogenboom (2005). De verdeling over de twee spuisluizen is als volgt: de etmaalgemiddelde normale waarde over een jaar is voor Den Over 295 m³/s en voor Kornwerderzand 205m³/s. Let wel, dit zijn etmaalgemiddelde waarden en een groot deel van de dag wordt er niet gespuid. Het gemiddelde maximale debiet ligt dan ook veel hoger per sluis, bij Den Oever is dit 1220 m³/s en bij Kornwerderzand is dat 1905 m³/s. Om een beeld te kunnen vormen van de invloed van deze spui volumes: na een uur gespuid te hebben met het maximaal mogelijke debiet van 5000m³/s zal het waterpeil op het IJsselmeer met ongeveer 1.6mm afgenomen zijn.

Gezien het gemiddelde maximale verval van 0.5m kan er dus niet altijd met de volle capaciteit gewerkt worden. De gevraagde capaciteit is vaak een deel van wat er maximaal beschikbaar is. Een overzicht van het deel van de capaciteit die gevraagd wordt met de verdeling over de twee bestaande spuisluizen is in Tabel 3.1 gegeven

Tabel 3.1, de verdeling van het aantal spuigroepen bij een gevraagde capaciteit.

Capaciteitsvraag [%]	Aantal geopende groepen	
	Den Oever	Kornwerderzand
20	1	0
40	1	1
60	2	1
80	2	2
100	3	2

Bij de nieuwe spuisluis zal dus ook niet altijd met de volledige capaciteit gespuid te hoeven worden. Bij een kleine capaciteitsvraag zal een aantal kolken gesloten blijven. In een dergelijke situatie wordt wel de kolken die wel gebruikt worden volledig geopend.

Aan de hand van deze spui volumes en de debietverdelingen zijn de volgende scenario's voor het toekomstige spui beheer ontwikkeld:

- Het huidige beheer wordt aangehouden en als er meer capaciteit nodig is wordt de extra spuisluis in gebruik genomen.
- Een spui beheer dat vergelijkbaar is met het beheer van de huidige spuisluizen. Er wordt dan steeds een groep toegevoegd. Maar dan zal er eerst een groep uit het nieuwe complex gebruikt worden, dan een bij Kornwerderzand en als laatste bij Den Oever.
- Er wordt altijd door alle drie de sluizen gespuid, er wordt dan dus vaak met een lage capaciteit per spui gewerkt zal worden.
- Er wordt altijd 1 groep bij Den Oever gebruikt, deze wordt aangevuld met de twee andere sluizen waarbij eerst de nieuwe sluis gebruikt zal worden.

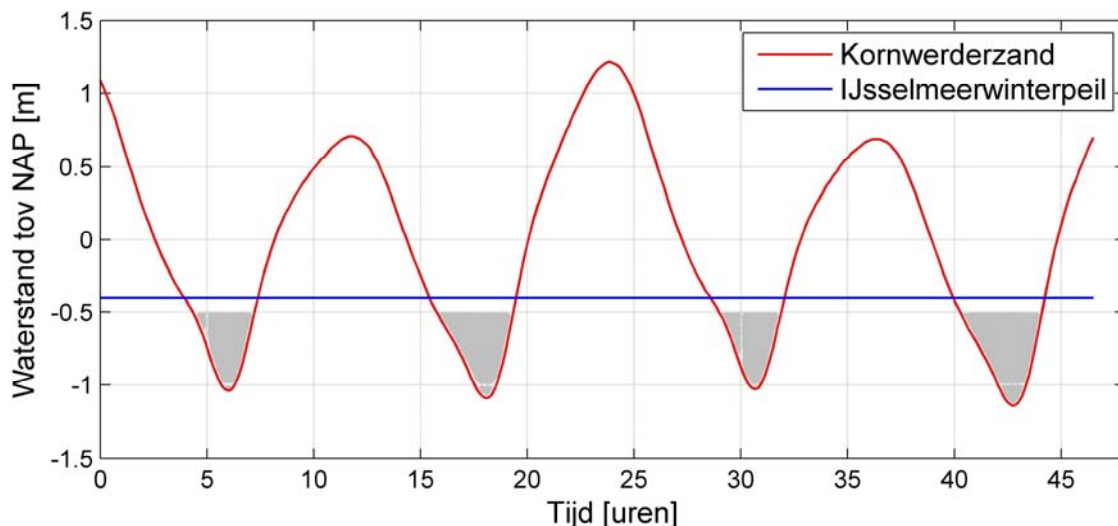
Uit deze scenario's is bij het voorontwerp een volgende verwachting van de afvoer door de extra spuisluis opgesteld. Het jaarlijks te spuien volume is 10 miljard m³ verdeeld over 1300 spuiuren in een jaar. Dit komt neer op gemiddeld 3.5 uur spuien per dag. Gedurende deze uren dat het spui in gebruik is zal er niet altijd met het zelfde debiet gespuid kunnen worden. De verdeling van het aantal uren dat er met een bepaald debiet gespuid wordt is in Tabel 3.2 gegeven, zie Vrijburcht

(2003). Uit de tabel is af te lezen dat er 400 uur per jaar met een debiet van $1500\text{m}^3/\text{s}$ wordt gespuid, enzovoort.

Tabel 3.2, de debietverdeling van de nieuwe spuisluis, aantal uren met het verwachte debiet.

Aantal uren per jaar	Het debiet [m^3/s]
400	1500
400	2000
300	2500
150	3000
50	3500

Van belang is dat het debiet dat gespuid wordt per cyclus niet constant zal kunnen verlopen. Het verval verloopt en de sluisdeuren kunnen niet direct geopend worden. Voor het open trekken of sluiten van het spui zijn ongeveer 10 minuten nodig. De stroom heeft dan een inspeeltijd om opgang te komen. Er is ook een minimumverval van ongeveer 10cm nodig voor er gespuid kan worden, dit om te voorkomen dat het water vanuit de Waddenzee het IJsselmeer instroomt. Door deze inspeelfactoren is het aantal spuiuren waarmee met een lage capaciteit gespuid wordt groter dan in de tabel aangegeven. In Figuur 3.2 is als voorbeeld voor een periode van twee dagen aangegeven wanneer er gespuid kan worden, dit is het gearceerde oppervlak.



Figuur 3.2, de waterstanden met de periode waarin gespuid kan worden.

Wat niet opgenomen is in deze scenario's, is het tijdelijk sluiten van bestaande spuisluizen voor groot onderhoud. Aan het eind van de onderhoudswerkzaamheden zal volgens het aangehouden klimaatsmodel de vraag naar de extra capaciteit al zo ver gestegen moeten zijn dat de hierboven beschreven mogelijkheden misschien al niet meer van toepassing zullen zijn.

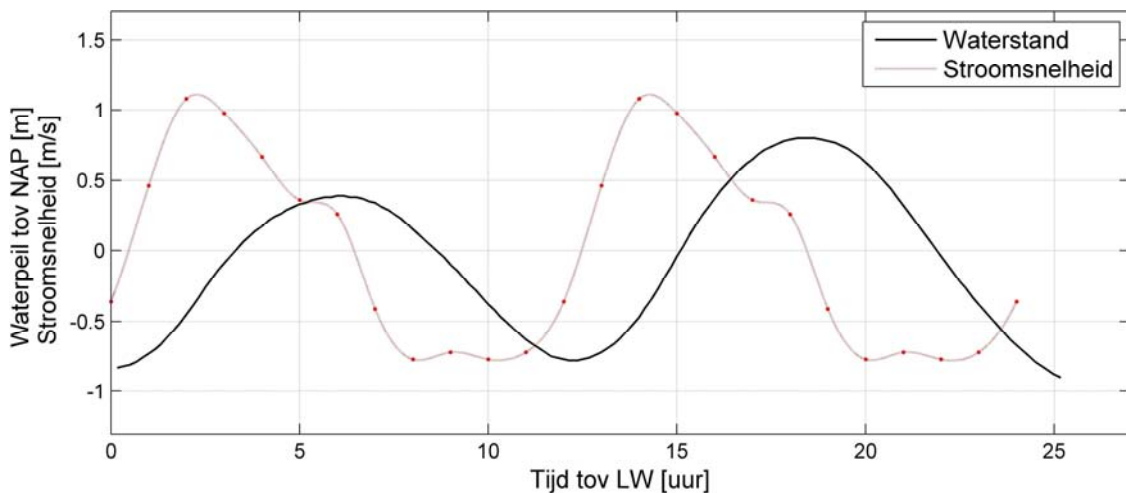
3.4 Het watersysteem bij de extra spuisluis

De extra spuisluis vormt een scheiding tussen twee verschillende watersystemen. Het IJsselmeer met zoetwater en een vastpeil en de Waddenzee met een getij. De eigenschappen van deze systemen zijn van belang voor het bepalen van de stroming bij de spuisluis. Als aanvulling op de voorgaande beschrijvingen wordt er hier meer kwantitatief op ingegaan. Voor de instellingen bij het maken van berekeningen van de stroming zal de informatie uit deze paragraaf gebruikt

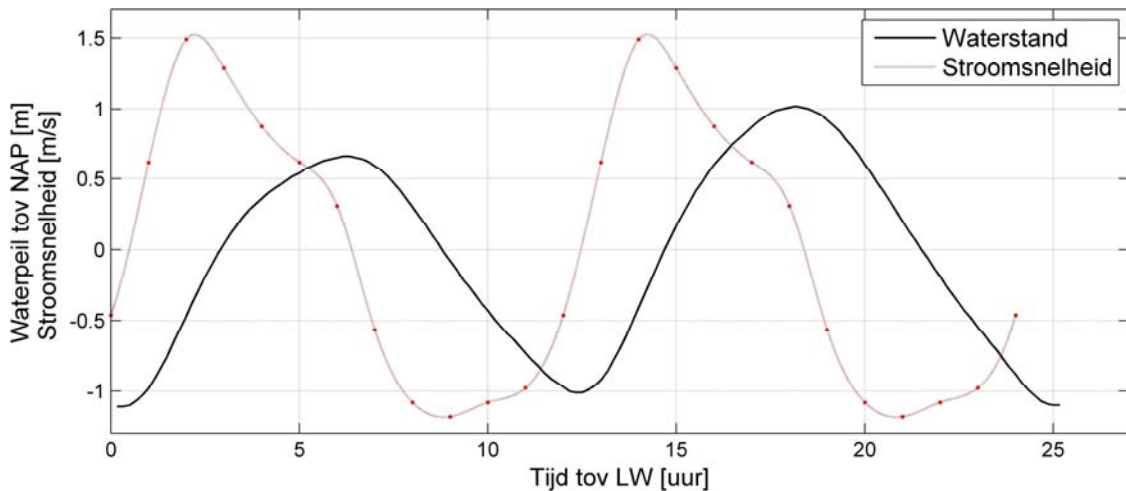
worden. Hieronder worden eerst de waterstanden behandeld, vervolgens de stroomsnelheden en ten slotte de dichtheden van het IJsselmeer en de Waddenzee.

Voor de waterstand op het IJsselmeer wordt een vast peil van NAP -0.4m aangehouden. Dit is het winterpeil dat gehandhaafd dient te worden. Tevens is dit de laagste waterstand en daarom ook het meest kritisch om bij te spuien omdat het verval dan het kleinst is.

De waterstand op de Waddenzee is door het getij minder gemakkelijk te schematiseren. Het getij verloopt hier van ongeveer een meter onder NAP tot een meter er boven. De waterstanden tijdens spring- en doortij zijn respectievelijk in Figuur 3.3 en Figuur 3.4 gegeven. Hier zijn ook de stroomsnelheden gegeven, die verderop worden behandeld.



Figuur 3.3, de waterstand en stroomsnelheid bij doortij in de Doove Balg.



Figuur 3.4, de waterstand en stroomsnelheid bij springtij in de Doove Balg.

De waterstand die voornamelijk gebruikt zal worden bij de berekeningen in volgende hoofdstukken is NAP -0.90m. Dit is de waterstand op de Waddenzee bij gemiddeld maximaal verval. Dit is af te leiden uit de laagwaterstanden en staat ook in het MER beschreven.

De stroomsnelheden bij het getij staan in Figuur 3.3 en Figuur 3.4, waar ook de waterstanden in staan. De stroomsnelheden zijn gebaseerd op metingen middenin de Doove Balg voor het toekomstige spuicomplex, zie Dienst der Hydrografie (1992). Hier is in terug te zien dat op het moment van laagwater ook een kentering is. Dit betekent dat bij berekeningen met het maximale verval de getijdenstroming verwaarloosd kan worden. Op het moment van openen en sluiten van het spui kan de stroming al aanzienlijk zijn toegenomen. De grotere stroomsnelheden zijn meer van belang voor de bodemstabiliteit van het uitloopkanaal.

Door de constante aanvoer van zoet rivierwater is de dichtheid van het IJsselmeer 1000kg/m^3 . In de buurt van de spuisluis kunnen kleinen afwijkingen in de dichtheid zijn. Dit komt door zoutwater dat in het IJsselmeer lekt. Deze variaties worden hier verder genegeerd.

De gemiddelde dichtheid van zeewater is 1025kg/m^3 . De dichtheid van de Waddenzee ligt daar net iets onder, dit komt door het spuien van zoetwater. In natte periodes met veel aanvoer uit het IJsselmeer kan de dichtheid in de omgeving van de bestaande spuisluizen zakken tot 1015kg/m^3 . In dit onderzoek wordt er van uitgegaan dat er wordt gespuid op een verse Waddenzee. Dus zonder enige vooraf gaande menging met zoetwater. De aangenomen dichtheid is dan ook 1025kg/m^3 . Dit is een extreme waarde waardoor de uitkomsten met een dichtheidsverschil ook maximaal zullen zijn.

3.5 Vervolgonderzoek bij het spuicomplex

In de afgelopen hoofdstukken zijn de spuisluis en de omgeving uitvoerig beschreven. Er is daar ook al veel onderzoek naar gedaan, een aantal van die onderzoeksrapporten is in de referentielijst terug te vinden. In dit rapport wordt de dichtheidsstroming uit de spuisluis verder verkend. Naar dit verschijnsel en de gevolgen hiervan bij de spuisluis is nog weinig onderzoek gedaan. Met de dichtheidsstroom gaan een aantal processen gepaard die van invloed kunnen zijn op het voorontwerp. Deze zullen hieronder kort beschreven worden en in de komende hoofdstukken verder uitgewerkt.

De zoete stroom kan na het verlaten van de spuisluis een aantal kanten op. Het kan blijven drijven op het zoute water, het zoute water wegdrukken of er mee mengen. Bij de eerste twee gevallen is het van belang te weten wat er met de zoetwaterbel gebeurt. Of deze bel lang stand houdt en door de Waddenzee gaat zwerven of verderop mengt. Bij de laatste twee gevallen zal de stroming langs de bodem aanzienlijk kunnen toenemen. Dit kan tot erosie van de zandrug leiden.

Om de snelheids- en dichtheidsverdeling achter de spuisluis beter te kennen wordt hier verder onderzoek naar gedaan. Dit om de voorgaande vraagstukken op te lossen en het voorontwerp te toetsen.

Hoofdstuk 4

Analytische bepaling van de stroming en de erosie



4.1 Inleiding

4.2 Afvoerrelatie door de spuisluis

4.3 Dichtheidstroming achter het spuicomples

4.4 Bodemerosie in het uitloopkanaal

4.5 Conclusies

4 Analytische bepaling van de stroming en de erosie

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de stroming door het spuicomplex en de erosie er achter analytisch berekend. Dit heeft als doel inzicht te krijgen in de processen voor het opstellen van de rekenmodellen en om de uitkomsten van de modelsimulaties te staven.

Een belangrijke relatie die hier beschreven wordt is die tussen het verval en het spuidebiet, met deze afvoerrelatie kunnen de stroomsnelheden en het waterspiegelverloop beschreven worden. Dit is van belang voor de latere vormgeving van het uitloopkanaal en voor de randvoorwaarden.

Met de gegevens uit de voorgaande hoofdstukken en de afvoerrelatie worden in paragraaf 3 de eerste benaderingen gemaakt van het stromingspatroon door de nieuwe spuisluis. De dichtheidsstroming wordt hierbij uitgebreid gemodelleerd.

Aan de hand van de gegevens over de stroming zullen de mogelijke veranderingen aan de bodemligging van het uitloopkanaal benaderd worden. Er wordt gekeken naar een erosiekuil achter het uitstroomkanaal en de passage van de zandrug die voor de Doove Balg ligt. In het voorontwerp wordt hier geen bodembescherming bij aangebracht.

Aan het eind van het hoofdstuk resulteert dit in een aantal conclusies over de analytische bepalingen. De punten waarover onduidelijkheden blijven zullen verder uitgewerkt worden met numerieke computermodellen.

4.2 Afvoerrelatie door de spuisluis

In het vorige hoofdstuk is het spuibeheer voor de nieuwe spuisluis beschreven. Er is daar gegeven hoeveel uur per jaar er met een bepaald debiet gespuid gaat worden. In deze paragraaf wordt het spuibeheer meer gedetailleerd. Hier wordt voor het IJsselmeer winterpeil de afvoerrelatie bepaald. Dit is nodig voor verdere bepalingen van de stroming achter de spuisluis.

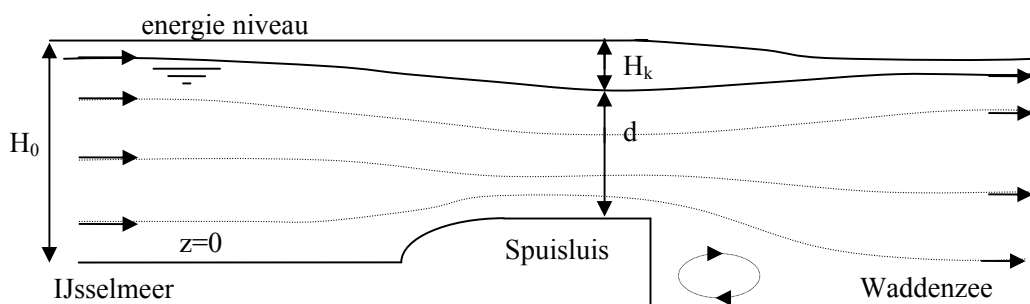
Voor het vastgestelde waterpeil op het IJsselmeer van NAP -0.4m kan het stromingspatroon door het spuicomplex bepaald worden. Dit is gedaan voor een oplopend spuidebiet. Bij de eerste berekening is het debiet nul, de waterspiegel is dan horizontaal en de stroomsnelheid nul. Bij de laatste berekening met het maximale debiet is de stroming juist kritisch geworden. Bij het kritisch worden van de stroom wordt de grensdiepte en snelheid bereikt, hierdoor kan het debiet niet meer verder oplopen voor de gegeven situatie.

Dit domein van mogelijke spui volumes bepaalt de optredende stroomsnelheden en waterstanden door het spuicomplex. Deze informatie over de stroming kan bij vervolgberekeningen als randvoorwaarde gebruikt worden. Omdat de stroming door de spuisluis bekend is hoeft het IJsselmeer niet meer in de modellering opgenomen te worden.

Om de afvoer van de spuisluis te bepalen wordt de spuisluis sterk geschematiseerd. Veel van de elementen die in de voorgaande hoofdstukken beschreven zijn worden nu genegeerd. Het spuicomplex wordt geschematiseerd zodat het als een twee dimensionale onvolkomen overlaat

benaderd kan worden. De benadering van een onvolkomen overlaat is toegestaan omdat de stroming subkritisch moet blijven volgens het voorontwerp. De stroomsnelheid zal dus kleiner blijven dan de golfsnelheid waardoor de waterstand benedenstrooms invloed heeft op de afvoer. Een schets van de uitgangssituatie is in Figuur 4.1 getoond, dit is de beginsituatie voor de analytische berekening.

Voor een eerste bepaling moesten een aantal verwaarlozingen en benaderingen gemaakt worden die invloed hebben op de afvoer. Deze bestaan uit het weglaten van de wrijving, de contractie tussen de pijlers en de neer achter de drempel. Verder is het dichtheidsverschil hier zeer globaal benaderd terwijl dit van grote invloed is op de afvoer. Het dichtheidsverschil wordt daarom in een aparte paragraaf besproken, de andere invloeden worden aan het eind van de paragraaf verder uitgewerkt.



Figuur 4.1, schematisering van de spuisluis als overlaat.

De stroming door de spuisluis wordt in twee delen gemodelleerd. De energiebalans wordt gebruikt vanuit het IJsselmeer tot door de spuisluis. Vanaf de drempel tot in de Waddenzee wordt de impulsbalans gebruikt. De modellering en de analytische berekening worden hieronder beschreven, daarna worden de uitkomsten als afvoerrelatie geplot in een figuur.

In het IJsselmeer is de stroomsnelheid op ruime afstand van het spui nog nihil en op de drempel is de snelheid van het water maximaal. Dit komt er op neer dat de stroom zal versnellen vanuit het IJsselmeer naar de spuisluis. Voor het benaderen van de waterspiegel en de stroomsnelheid van de versnellende stroom wordt de energiebalans volgens Bernoulli (4.1) toegepast. Waar in de energie hoogte H , wordt uitgedrukt in het piëzometrische niveau en een snelheidshoogte. Hierin is p de druk in een punt op niveau z boven het referentie niveau. Verder is ρ de dichtheid, g de zwaartekracht versnelling en u de stroomsnelheid.

$$H = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g} \quad (4.1)$$

Voor het bepalen van de aanstroming moet het energieniveau vastgelegd worden. Dit is bepaald ten opzichte van de bodem van het toestroomkanaal op NAP -8.0m bij het winterpeil van NAP -0.4m, in Figuur 4.1 is dit aangegeven met H_0 . Op ruime afstand van het spui is de stroomsnelheid in het IJsselmeer zo laag dat de snelheidshoogte verwaarloosbaar klein is. Het energieniveau voor de aanstroom ligt dan gelijk met het waterpeil van het IJsselmeer. Met dit energie niveau H_0 , kan over het verdere versnellingstraject de stroomsnelheid en de waterstand bepaald worden.

Bij een gegeven spuidebiet en het dwarsprofiel van de spuisluis is de waterdiepte op de kruin van de overlaat bepaald en dus ook de stroomsnelheid. Voor het berekenen van de waterdiepte op een punt van het versnellingstraject kan de vergelijking van Bernoulli als derdegraads vergelijking (4.2) herschreven worden.

$$d^3 - (H_0 - z_0)d^2 + \frac{Q^2}{2gB^2} = 0 \quad (4.2)$$

De waterdiepte is een nulpunt van deze vergelijking. In deze formule is een breedte component opgenomen, omdat de breedte over het spuicomplex varieert. De hoogte van de drempel is opgenomen in de term z_0 .

Achter de drempel komt het uitstroomtraject, de stroom zal hier vertragen. De vertraging gaat gepaard met een onbekende hoeveelheid energie verlies, de energiebalans is daarom niet a priori toe te passen. De waterspiegel en de snelheid worden hier benaderd met behoud van impuls. De impuls van een stroming is met formule (4.3) te bepalen.

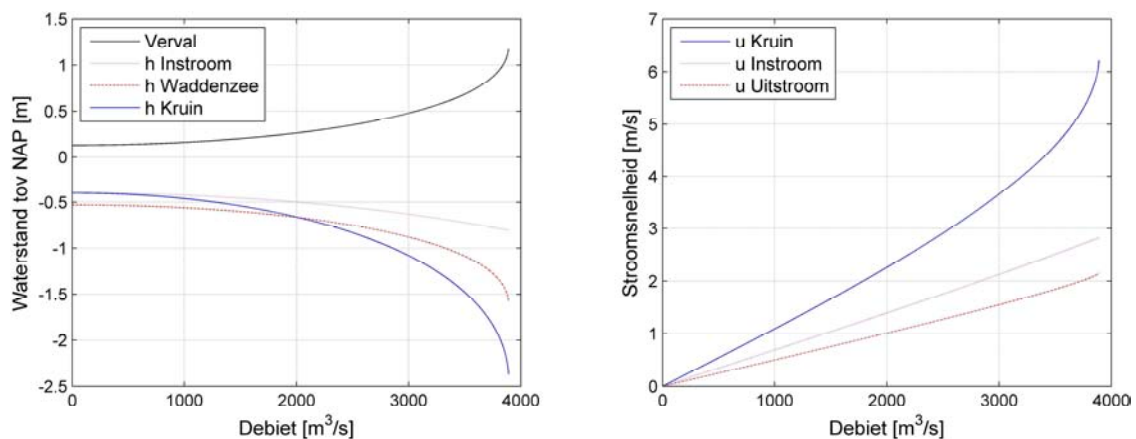
$$F = \frac{1}{2} \rho g B d^2 + \rho u^2 B d \quad (4.3)$$

De impuls F , bestaat uit twee delen, een bijdrage van de druk en van de meevoering. Hierbij moet gelet worden op de verschillende dwarsprofielen waar de componenten op van toepassing zijn en op het verschil in dichtheid. Het water op in het IJsselmeer heeft een dichtheid van 1000 kg/m^3 en in de Waddenzee is de dichtheid 1025 kg/m^3 .

Met het behoud van deze impuls is het mogelijk de waterspiegel en snelheden in het uitstroomkanaal te berekenen. De impulsbalans wordt hier ook herschreven als derdegraads vergelijking (4.4) naar de waterdiepte. De referentie impuls F_0 is juist achter de drempel van de spuisluis bepaald. Met het bepalen van de nulpunten wordt de waterdiepte in het uitstroomkanaal verkregen, hier volgt de stroomsnelheid dan ook uit.

$$\frac{1}{2} \rho g B d^3 - F_0 d + \frac{\rho Q^2}{B} = 0 \quad (4.4)$$

De berekende waterstanden en de diepte gemiddelde snelheden vormen het waterspiegelverloop en de afvoerrelatie, dit is geplot in Figuur 4.2.



Figuur 4.2, de afvoerrelatie door de spuisluis, het spuidebiet versus de waterstanden en stroomsnelheden

In de figuur is te zien dat nog voor het water in beweging komt er al een verval van 0.13m aanwezig is. Door het verschil in dichtheid is dit beginverval nodig om instrooming te voorkomen. Het debiet loopt op tot maximaal $3891 \text{ m}^3/\text{s}$ bij het winterpeil, het verval is dan 1.17m. De verticale raaklijn in dat punt geeft aan dat er bij het verder oplopen van het verval het debiet niet meer groter wordt. De waterdiepte op de drempel heeft dan de grensdiepte bereikt van 4.1m en

een stroomsnelheid 6.3m/s. Bij het verhogen van bijvoorbeeld het IJsselmeerpeil of het vergroten van het dwarsprofiel is wel een groter debiet te krijgen.

Bij het kritisch worden van de stroming is de stroomsnelheid gelijk aan de golfsnelheid, dit betekent dat het Froudegetal 1 is. Met formule (4.5) voor golfsnelheden is dit te controleren, de snelheden zijn inderdaad gelijk.

$$c = \sqrt{gd} \quad (4.5)$$

Zoals aan het begin van de paragraaf vermeldt zijn er een aantal vereenvoudigingen en benaderingen toegepast. De invloed van de contractie die tussen de peilers van de spuisluis optreedt en de neer achter de drempel worden hieronder verder uitgewerkt.

De contractie van de stroom in de spuiokers is een gevolg van een werveling langs de pijlers die de stroom naar het midden drukt. De effectieve doorstroomopening van de koker wordt daardoor verkleind wat de afvoer zal reduceren. Deze vernauwing hangt sterk samen met de vormgeving van de pijlers en de stroomsnelheid. Om de contractie te beperken zijn de pijlers aan de voorzijde spits gevormd om het dwarsprofiel geleidelijk te reduceren zodat de stroom zich beter kan aanpassen.

Door het diepteverschil direct achter de drempel ontstaat er een neer waar de straal water als een jet in het uitstroomkanaal stroomt. Door de hogere snelheid van de straal wordt het onderliggende water omhoog gezogen, om dit aan te vullen ontstaat een langs de bodem een tegen gestelde stroom. De lengte van deze neer en dus ook van de straal is bepalend voor de snelheidsverdeling over het diepere en bredere profiel van het uitstroomkanaal.

De onderste waterlaag staat achter de drempel bijna stil terwijl het gespuide water in de bovenlaag er hard overheen stroomt. Door het verschil in snelheid zal er op de overgang een menglaag groeien waarin het verschil vereffend. De snelheidsverandering van een verticaal uitlopende straal is te benaderen met formule (4.6), zie Schiereck (2004). Deze formule is toepasbaar voor twee gelijke lagen die met een snelheidsverschil over elkaar heen stromen.

$$u(x, z) = u_0 \exp \left[-0.693 \left(\frac{z}{0.12x} + 1 \right)^2 \right] \quad (4.6)$$

Uit de formule komt naar voren dat de hoek waaronder de lagen mengen en de straal naar de bodem gaat ongeveer 10° is.

Bij een drempel hoogte van 4.5m reikt de neer dus tot ongeveer 23m achter de drempel, daarna zal de stroomsnelheid niet meer tegengesteld zijn. De dieptegemiddelde snelheid uit Figuur 4.2 moet dus op enige afstand achter het spui zijn om niet in de neer te zitten. De straal verspreidt zich wel voor het eind van het uitstroomkanaal goed over het verticale profiel.

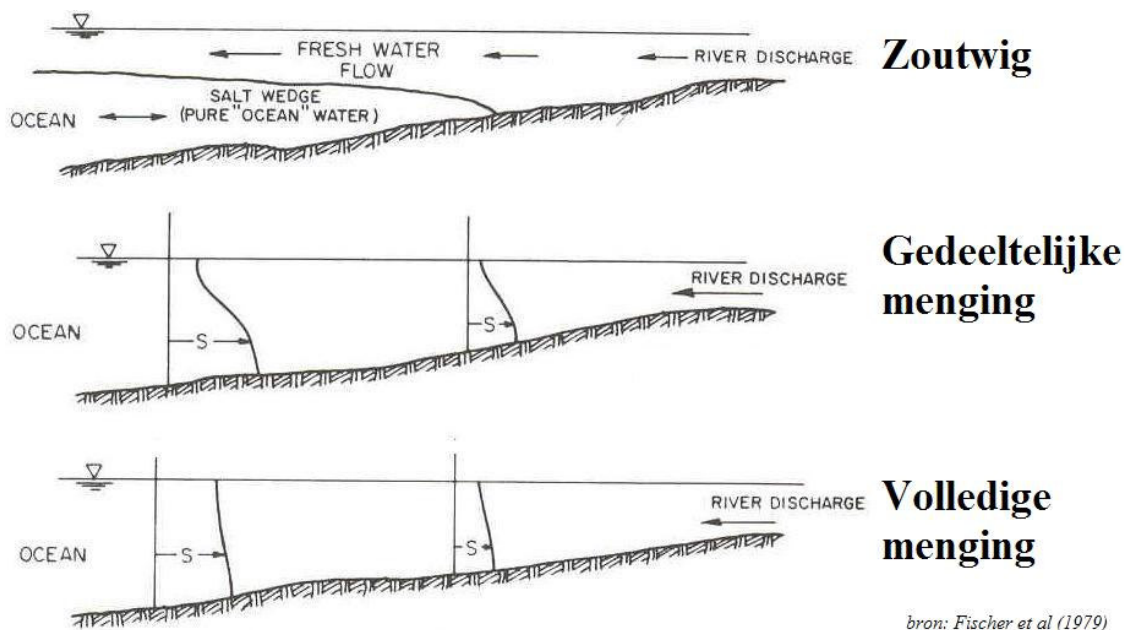
4.3 Dichtheidstroming achter het spuicomplex

In deze paragraaf wordt dieper ingegaan op het dichtheidsverschil tussen de Waddenzee en het IJsselmeer. Dit is van invloed op het stromingspatroon, een klein verschil in de dichtheid kan al grote gevolgen hebben voor de afvoer. De verticale snelheidsverdeling kan daardoor sterk afwijken van een situatie met homogene dichtheid. Deze snelheidsverdeling is ondermeer van belang om de stroming van de bodem te bepalen in verband met eventuele erosie.

Naast het bepalen van de stroomsnelheid is de manier waarop het gespuid water met de omgeving mengt ook van belang. De menging van het gespuid water met de Waddenzee is van ecologisch belang. De dichtheidsstroming wordt hier ook geanalyseerd om de optredende processen beter te kennen voordat numerieke computer berekeningen gemaakt worden.

Deze analyse van de dichtheidsstroming is uit drie delen opgebouwd. Hieronder worden eerst de verschillende types van menging gegeven en de parameters die van invloed zijn bij deze menging. Vervolgens wordt de stroming in het uitstroom- en uitloopkanaal bekeken en daarna bij de monding naar de Doove Balg. Op deze manier is de dichtheidsstroming vanuit het spui tot in de Waddenzee geanalyseerd.

Bij het uitstromen van zoetwater zijn er drie verschillende types van menging, deze zijn in Figuur 4.3 aangegeven. Het eerste type is een tweelagen systeem met een duidelijke gelaagdheid, het zoete water wordt opgetild. Bij het tweede type is er een gedeeltelijke menging, maar blijft het de dichtheid aan het oppervlak lager. Ten slotte is er nog volledige menging, in de verticaal is dan bijna geen verschil in dichtheid. De toename in de dichtheid verloopt dan horizontaal. De verschillen in menging ontstaan ondermeer door het verschil in stroomsnelheid tussen de lagen, het dichtheidsverschil en door externe factoren zoals de wind.



Figuur 4.3, verschillende typen van menging bij dichtheidsstromen.

De stabiliteit van de gelaagdheid in een stroming kan bepaald worden met het Richardsongetal (4.7), zie Kranenburg (1998).

$$Ri = \frac{-g \frac{d\rho}{dz}}{\rho \left(\frac{du}{dz} \right)^2} \quad (4.7)$$

Uit deze formule wordt opgemaakt dat er bij een groter verschil in dichtheid de gelaagdheid stabiel wordt. Daarentegen werkt een groter verschil in de stroomsnelheden tussen de lagen destabiliserend.

Om te bepalen welke mate van menging er plaatsvindt tussen het gespuide water en de Waddenzee moet een aantal eigenschappen bepaald worden. Dit zijn het interne Froudegetal, de stabiliteit van de lagen en het snelheidsverschil tussen de waterlagen. Dit wordt eerst bepaald in het uitstroomkanaal en vervolgens in de monding naar de Doove Balg.

4.3.1 Stromingspatroon in het uitstroomkanaal

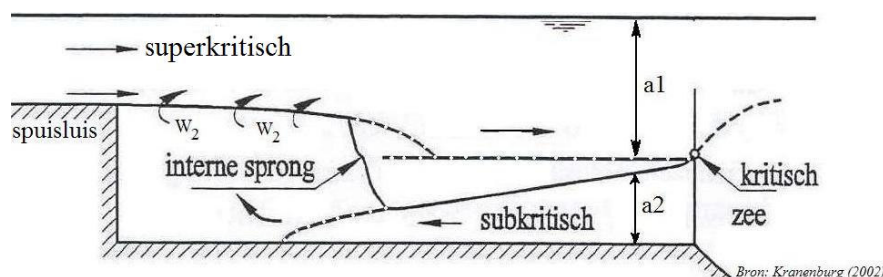
In deze paragraaf wordt een model gemaakt voor het systeem in het uitstroomkanaal door het te benaderen als een tweelagen systeem. Om dit te toetsen wordt een benaderingsmethode gebruikt die gebaseerd is op een intern front in de monding en een stabiele zoutwig in het kanaal, zie Kranenburg (1998). Dit model wordt in drie stappen opgebouwd en uitgewerkt. Eerst worden de stabiliteit en de laagdiktes berekend met behulp van het intern Froudegetal. Om het instant blijven van deze lagen te toetsen wordt de aanzuiging tussen de lagen bepaald. Met deze drie modelleersteps wordt de verwachting van gelaagdheid in het uitstroomkanaal bepaald.

Het intern Froudegetal (4.8) is een belangrijke factor bij het bepalen van de gelaagdheid en de stabiliteit daarvan. Het intern Froudegetal, F_{int} geeft al dan niet aan of de stroom in een gelaagd systeem superkritisch is.

$$F_{int} = \frac{|q_1|}{\sqrt{\varepsilon g a_1^3}} + \frac{|q_2|}{\sqrt{\varepsilon g a_2^3}} \quad \text{met} \quad \varepsilon = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \quad (4.8)$$

In deze formule is ε het relatieve dichtheidsverschil tussen de twee waterlagen a_1 en a_2 . Voor de dichtheid van het zoete water is een waarde van 1000 kg/m^3 aangenomen en voor het zoute 1025 kg/m^3 . dit geeft een relatieve dichtheidswaarde van 0.024. De kleine letter q geeft het debiet per eenheid van breedte in een laag aan. Als uitgangspunt wordt er een stationair tweelagen systeem aangenomen met hydrostatische drukverdeling. Deze aanname is toegestaan als de stroomsnelheid in één van de lagen relatief klein is. Door aan te nemen dat het eventuele aanwezige zoute water onderin het kanaal stil blijft liggen wordt hier aan voldaan. Voor de berekening van het interne Froudegetal valt dan ook de tweede term uit de vergelijking.

Het is dan mogelijk om het Froudegetal te bepalen in het uitstroomkanaal op basis van de eerder bepaalde afvoerrelatie. Dit wordt eerst direct achter de drempel bepaald. Uit de formule komt naar voren dat de interne stroming subkritisch blijft tot een debiet per eenheid van breedte van $7.2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, dit komt overeen met een spuidebiet van $1370 \text{ m}^3/\text{s}$. De laagdikte van de spuistraal is dan ongeveer 6m. Bij het spuibeheer is bepaald dat er pas gespuid wordt vanaf een debiet van $1500 \text{ m}^3/\text{s}$. Het is dus aannemelijk dat de stroming aan het begin van het uitstroomkanaal altijd intern superkritisch is. In Figuur 4.4 is de verwachte situatie geschetst, die hierna verder geanalyseerd wordt.



Figuur 4.4, de schematisering van de dichtheidsstroom in het uitstroomkanaal.

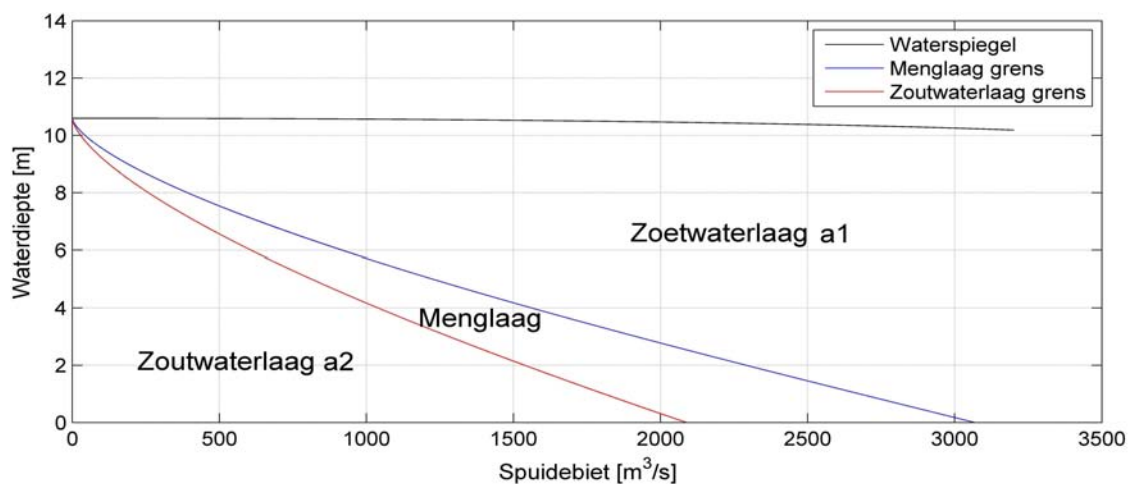
De stroming zal zich in het kanaal verticaal verspreiden en daarbij vertragen. Dit kan gebeuren door een interne sprong of een geleidelijk verloop, zoals in de figuur is aangegeven. Om de dikte

van de verschillende waterlagen in het uitloopkanaal te bepalen wordt eerst een intern kritische stroming aan het eind van het uitloopkanaal aangenomen. Door de verandering van het dwarsprofiel is het waarschijnlijk dat in de monding bij de Doove Balg de interne stroming precies kritisch is. De dikte van de zoete laag met gespuid water is juist zo groot dat het interne Froudegetal gelijk is aan 1. Wanneer er nog steeds wordt aangenomen dat de zoute onderlaag in rust is, zijn er nog twee onbekende variabelen in formule (4.8). Dit zijn het spuidebiet en de dikte van de laag a_1 . Voor ieder debiet per eenheid van breedte is de laagdikte in de monding dus bepaald. Dit is in formule (4.9) beschreven en in Figuur 4.5 is dit verband tussen het spuidebiet en de dikte van de zoet waterlaag geplot. De opbouw van de verschillende lagen is daar ook gegeven.

Naast de zoetwaterlaag is ook de dikte van de zoutwaterlaag aangegeven en de menglaag. De dikte van de menglaag is te bepalen met de empirische formule (4.10) gebaseerd op het Richardsongetal. De zoute laag heeft dus een dikte van de resterende diepte volgens de afvoerrelatie.

$$a_1 = \sqrt[3]{\frac{q_1^2}{\varepsilon g Fr_i^2}} \quad (4.9)$$

$$\delta \approx 0.3 \frac{\Delta u^2}{\varepsilon g} \quad (4.10)$$



Figuur 4.5, het verband tussen de dikte van de waterlagen en het spuidebiet bij een interne kritische stroom in de monding.

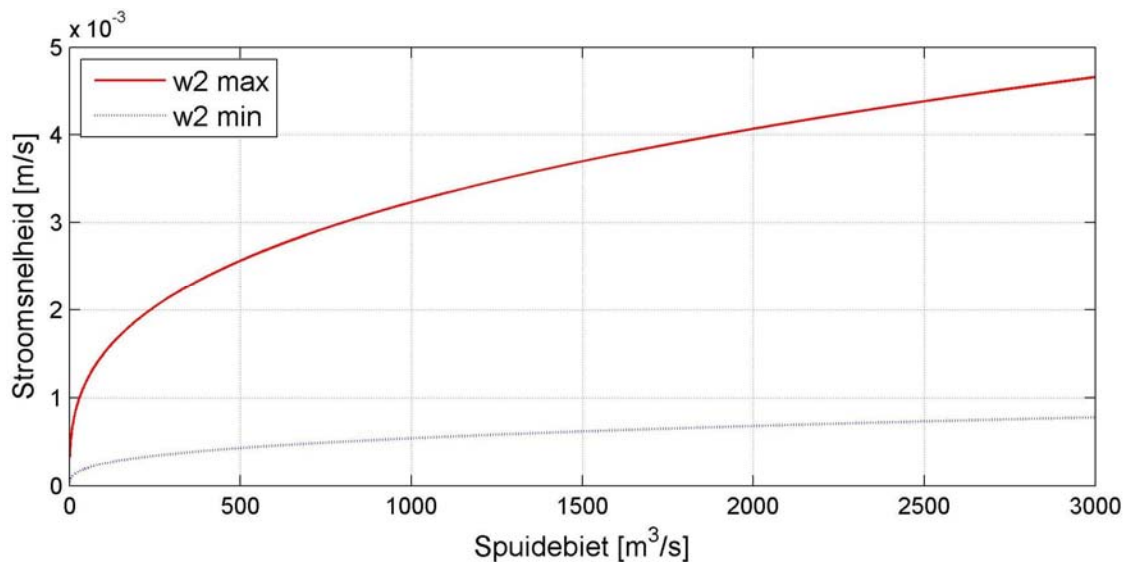
In de figuur is te zien dat bij een debiet van ongeveer $1400\text{m}^3/\text{s}$ de zoetwaterlaag 6m dik is. Dit komt overeen met de grens van kritische stroom op de drempel. Bij een verder toenemend debiet zal de zoetwater laagdikte op de drempel afnemen en in de monding toenemen. De stroming zal zich dan over een grote diepte gaan verspreiden in het uitloopkanaal. Bij een spuidebiet van ongeveer $2000\text{m}^3/\text{s}$ groeit de dikte van de bovenlaag over het kanaal met meer dan 1.8m. Er ligt dan ook geen zoutwaterlaag meer in het uitstroomkanaal. Vanaf $3000\text{m}^3/\text{s}$ er alleen nog maar een zoete waterlaag en verdubbelt de laagdikte a_1 zich over de lengte het kanaal.

Een ander proces dat al in Figuur 4.4 is aangegeven, is het aanzuigen van zoutwater uit de onderste laag naar boven. De zoete turbulente laag zal water aanzuigen uit de niet turbulente zoute laag, andersom niet. Door deze aanzuiging wordt de zoutlaag omhoog weggetrokken in de grenslaag. De zoutlaag kan slechts aanwezig blijven als er voldoende aanvoer van zoutwater is in

de onderlaag. Deze aanvoer is dan een tegengestelde stroming langs de bodem. De snelheid van de verticale aanzuiging van onder naar boven wordt bepaald met w_2 uit de formule (4.11), van Kranenburg (1998).

$$w_2 = \beta_1 \frac{u_1^3}{\varepsilon g a_1} \quad (4.11)$$

De waarde van coëfficiënt β_1 kan sterk variëren, van $5 \cdot 10^{-4}$ tot $3 \cdot 10^{-3}$. Het is hierdoor lastig om de aanzuigsnelheid van het zoute water naar de boven gelegen zoete laag te bepalen. De aanzuigsnelheid kan met de coëfficiënt β_1 immers een factor 6 verschillen. De snelheid waarmee het zoute water in de bovenlaag wordt aangetrokken is op basis van Figuur 4.5 benaderd. De snelheid waarmee het zoute water mogelijk wordt aangezogen is in Figuur 4.6 geplot tegen het spuidebiet. De twee lijnen zijn gemaakt met de uiterste waarden van β_1 en dus ook van w_2 . Hierdoor is de maximaal en minimaal verwachte aanzuigsnelheid bepaald.



Figuur 4.6, de aanzuigsnelheden van het zoute water in de zoetwaterlaag bij de monding van het uitloopkanaal.

De aanzuigsnelheden zijn laag met een maximum van 5mm/s. Bij deze snelheden zal de zoutwig geleidelijk opgezogen worden als er geen aanvoer is. Echter als er wordt gekeken over de volledige lengte van het kanaal kan deze retourstroom langs de bodem wel tot significante snelheden leiden. In het bijzonder bij de monding van het kanaal. Dit is immers de aanvoerroute voor de zoutwig.

Voor het in standhouden van deze retourstroom moet de zoute waterlaagdikte daar voldoende groot blijven. Bij het afnemen van de zoute waterlaagdikte zou de stroomsnelheid sterk oplopen. De stabiliteitsaannamen zullen dan ook niet meer opgaan. Het eventueel aanwezig zijn van een zoute onderlaag hangt dus ook af van de laagstabiliteit bij de monding. Dit wordt in de volgende paragraaf verder uitgewerkt.

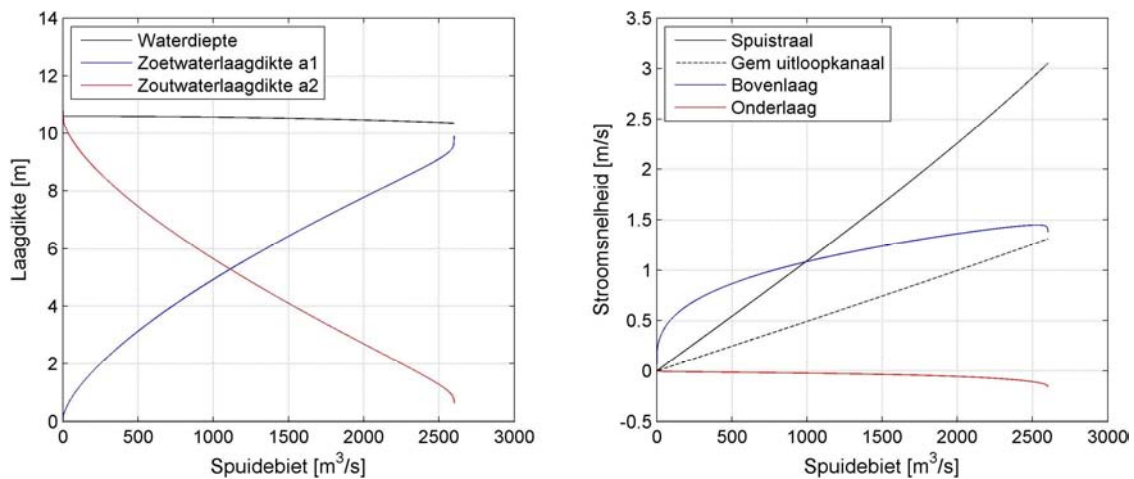
De stabiliteit van de onderlaag hangt, zoals eerder vermeld, samen met het interne Froudegetal. Bij eerdere berekeningen werd de stroomsnelheid in de onderlaag verwaarloosd. Voor het toetsen van de stabiliteit van de retourstroom kan dit natuurlijk niet. Voor het bepalen van het interne Froudegetal moet de retourstroomsnelheid en het debiet in de onderlaag bepaald worden. Dit kan door de aanzuigsnelheid, w_2 te vermenigvuldigen met de lengte van de zoutwig. Op deze manier

wordt het aanstroomdebiet door de zoutwig benaderd. Met deze retourstroming en de spui­stroming is nogmaals de laagdikte verdeling berekend.

De laagdiktes met retourstroming zijn bepaald door het interne Froudegetal uit formule (4.8) weer kritisch aan te nemen. Het debiet in de bovenlaag is dan gelijk aangenomen met het spuidebiet plus het debiet in de onderlaag dat wordt aangezogen. De retourstroom in de zoutwaterlaag wordt immers weer in de bovenlaag afgevoerd. Bij de verdeling van de laagdiktes is vervolgens de zoetwaterlaag bepaald met formule (4.12).

Er is aangenomen dat de verder waterdiepte bestaat uit de zoutwaterlaag. Er is dus geen menglaag opgenomen in dit model. De verdeling van de laagdikte en de stroomsnelheden zijn in Figuur 4.7 geplot. De snelheden in de retourstroming zijn negatief omdat deze in tegen gestelde richting stromen.

$$a_1 = \sqrt[3]{\frac{(q_s + q_2)^2}{\varepsilon g (Fr_i - Fr_{i2}^2)}} \quad (4.12)$$



Figuur 4.7, de verdeling van de laagdikte en de stroomsnelheden in het uitloopkanaal met een retourstroming in de onderlaag.

Uit deze figuur komt naar voren dat er bij het lage spuidebiet van $1500\text{m}^3/\text{s}$ een zoutwig aanwezig kan zijn. Bij een groter spuidebiet gaat de spui­stroom zeker mengen met de onderlaag. De waarden van het interne Froudegetal zal dan groter worden dan 0.6. Dit is de kritische waarden voor een stabiele lagen verdeling, zie Dronkers (1988).

De verticale asymptoot aan het einde van de lijnstukken is te verklaren door het afnemen van de zoutlaagdikte. Bij een spuidebiet van ongeveer $2000\text{m}^3/\text{s}$ wordt de zoutlaag dermate dun dat de aanvoersnelheid naar oneindig gaat.

Het optreden van deze menging kan verklaard worden met het Richardsongetal. De sterke menging is ook al in Figuur 4.5 te zien, namelijk aan de sterk groeiende grenslaag. Uit de formule van het Richardsongetal kwam naar voren dat een groot verschil in snelheid tot meer menging zou leiden. Door de hoge stroomsnelheden uit de spuisluit is de interne stroom superkritisch en voor een stabiele lagenverdeling moet het interne Froudegetal kleiner zijn dan 0.6. Er zal zich dus achter het spui een instabiele zone vormen met menging.

4.3.2 Gelaagdheid in de monding

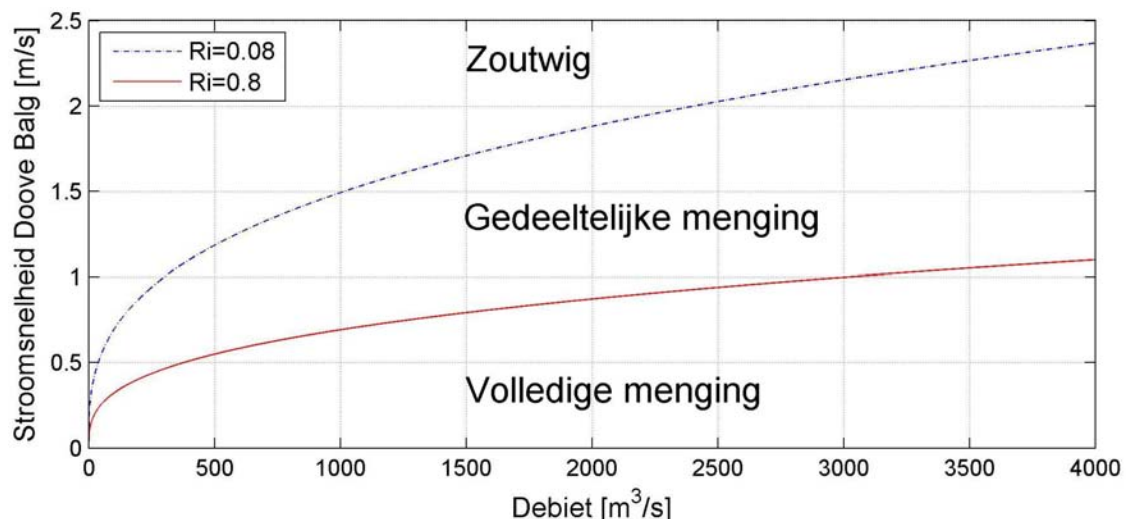
Het model uit de vorige paragraaf was gedefinieerd tot aan de monding van het uitloopkanaal. Daar kwam uit naar voren dat er veel menging optreedt in het uitloopkanaal en het water daar bijna volledig zoet zal zijn. Dit betekent dat er in de monding weer een zelfde soort uitstroom plaatsvindt als bij de spuisluis. Om dit verder te bestuderen wordt hier een model opgezet voor de uitstroom van het uitloopkanaal in de Doove Balg.

Na het punt van interne kritische stroming in de monding kan alsnog een gelaagdheid ontstaan met een stabiele overgangslaag, zie Figuur 4.4. Het ontstaan van dit soort gelaagdheid op enige afstand van het spui is een vaak voorkomend beeld, een laag van zoetwater schiet dan door over het zoute water. Om ook hier de mate van menging te onderzoeken kan het Richardson getal voor estuaria (4.13) gebruikt worden. Dit Richardsongetal is in tegenstelling tot het vorige toegepast op het uitmonden van een stroming.

$$Ri_e = \frac{\varepsilon g Q}{B u_g^3} \quad (4.13)$$

In deze formule staan in de teller de eigenschappen van de spuistroom en in de noemer die van de Doove Balg. De u staat dus voor de getijdenstroming in de Doove Balg. De waarde van het Richardsongetal bepaalt de type gelaagdheid zoals ook al eerder in het hoofdstuk aangegeven is in Figuur 4.3. Voor waarden van het Richardsongetal kleiner dan 0.08 zal het derde type opgaan van een goed gemengde situatie, bij waarden vanaf 0.8 zal er een gelaagdheid ontstaan. Voor waarden daar tussen zal een gedeeltelijke menging optreden.

In formule (4.13) staan het relatieve dichtheidverschil, de zwaartekracht en de breedte van de Doove Balg vast. De stabiliteit wordt dus bepaald door de verhouding tussen het spuidebiet en de getijstroomsnelheid in de Doove Balg. Deze verhouding tussen Q en u is in Figuur 4.8 geplot. In de zone net boven de x-as ontstaat gelaagdheid en volledige menging is in het gebied boven de twee lijnen.



Figuur 4.8, de mogelijke mate van menging in de monding van het uitloopkanaal.

Uit deze figuur komt naar voren dat er verschillende typen menging op zullen treden, wat als volgt is te verklaren. Het spuidebiet ligt doorgaans tussen de 1500 en 2500 m³/s. Bij laagwater op de Waddenzee zal het debiet het grootst zijn omdat het verval dan het grootst is. Tevens zal bij

laagwater en vooral bij de kentering, de stroomsnelheid in de Doove Balg minimaal zijn. In een dergelijke situatie zal er een gelaagdheid ontstaan. Een paar uur later, als de stroming in de Waddenzee is toegenomen en het verval verkleind is, zal er meer menging zijn.

Wat nu nog onduidelijk blijft is de mate van gelaagdheid over het volledige afvoersysteem en de daarbij horende verticale snelheidsverdeling. Om dit te verhelderen zullen de verwachtingen over de menging van de afvoerstraal nog getoetst moeten worden. Deze toetsing wordt met een tweedimensionale computersimulatie gedaan.

4.4 Bodemerosie in het uitloopkanaal

Aan de IJsselmeerzijde van het spuicomplex is een duidelijke bodemligging gedefinieerd. Door de beperking van de stroomsnelheid en de bodembescherming hebben de aanstroomput en het instroomkanaal een vaste bodem ligging. Bij de uitstroom in de Waddenzee zijn er geen beperkingen aan de stroomsnelheid opgelegd. De bodem van het uitstroomkanaal zal dus verdedigd moeten worden om een stabiele bodemligging te behouden, dit ligt al vast in het voorontwerp, zie Kortlever (2006). De vaste bodemligging is vereist voor de veiligheid van de Afsluitdijk. Bij het uitloopkanaal is dit niet het geval, door het ontbreken van een bodembescherming staat de ligging niet vast.

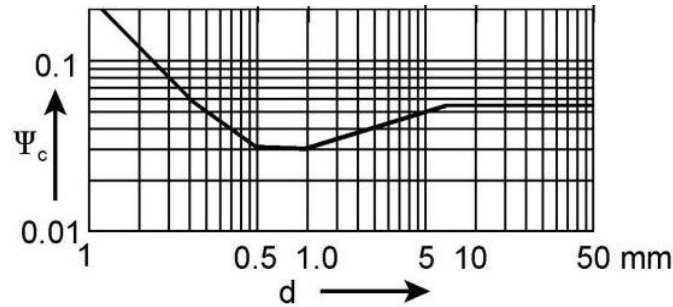
Aan het eind van het uitstroomkanaal, achter de bescherming zal altijd erosie plaats vinden, hierdoor zal er een ontgrondingsput ontstaan. Dit is ook af te leiden uit de situatie achter de huidige spuisluizen, daar liggen grote ontgrondigskuilen. Om de omvang en diepte te bepalen moet eerst gekeken worden naar de samenstelling van de bodem en de kritische snelheid voor het in beweging brengen van het sediment.

4.4.1 Bodemparameters

De mate van sedimenttransport wordt met de Shields stabiliteitsparameter Ψ bepaald, deze is gegeven in formule (4.14), zie Schiereck (2004). De stabiliteit is gebaseerd op de verhouding tussen de bodemschuifspanning τ en de korrelgrootte D . De relatieve dichtheid van het zand onderwater is gegeven met de Δ .

$$\Psi_c = \frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho_w)gD} = \frac{u_{*c}^2}{\Delta g D} \quad \text{met} \quad u_{*c} = \bar{u} \frac{\sqrt{g}}{C} \quad (4.14)$$

De gemiddelde korrelgrootte in de omgeving van het nieuwe spuicomplex is 0.2mm volgens de Sedimentatlas, zie Rijkswaterstaat (2006). Omdat deze toplaag direct wegspoelt tijdens het spuien of weggebaggerd wordt, moet rekening gehouden worden met een afwijking van deze diameter. Als de korrelgrootte toeneemt wordt de Shields stabiliteitsparameter kleiner, dit is te zien in Figuur 4.9. De Shieldsparameter is daar tegen de korrelgrote geplot. Een goede referentie voor de toekomstige bodemsamenstelling van het uitloopkanaal is de Doove Balg. In deze diepe getijdengeul met hoge stroomsnelheden is de gemiddelde diameter 0.3mm. Voor de waarde van D_{50} bij de erosie in de afstroomgeul zal daarom 0.3mm gekozen worden, hiermee kan er bepaald worden wanneer er transport plaats zal vinden. Voor zand met een diameter van 0.3mm ligt de bovengrens van de stabiliteit bij een Shieldswaarde 0.05.



Figuur 4.9, de Shields – Van Rijn curve

Voor het bepalen van de snelheid waar transport bij plaatsvindt, wordt formule (4.15) toegepast, zie Schiereck (2004). Door gebruik te maken van de dieptegemiddelde snelheid kan de vergelijking naar de afvoerrelatie eenvoudig gemaakt worden.

$$u = u_* \frac{C}{\sqrt{g}} \quad \text{met} \quad u_* = \sqrt{\psi_c \Delta g D} \quad \text{en} \quad C = 18 \log \frac{12R}{k_r} \quad (4.15)$$

De schuifspanningssnelheid u_* is te bepalen door de voorgaande gegevens in te vullen formule (4.15), daar komt dan 0.0156m/s uit. Met behulp van de Chezycoëfficiënt voor bodemweerstand kan dit omgerekend worden naar een dieptegemiddelde snelheid. Voor de Chezycoëfficiënt moeten de hydraulische straal en bodemruwheid bepaald worden. De hydraulische straal achter het uitstroomkanaal zal bij benadering gelijk zijn aan de diepte, 10m. Onder de voorwaarde dat de stroming niet kritisch wordt zullen er hooguit rimpels in het bodemprofiel ontstaan. De ruwheid is dan 2.5 a 3.0 keer de korrelgrootte, zie Vriend et al (2005). Dit geeft een Chezywaarde van 89 $\text{m}^{1/2}/\text{s}$ en een kritische dieptegemiddelde snelheid u_c van 0.44m/s.

De stroomsnelheid in en ook aan het eind van het uitstroomkanaal is beduidend hoger dan de kritische snelheid. Bodembescherming is daarom zeker nodig in het uitstroomkanaal en aan het eind hiervan zal er een ontgrondingkuil ontstaan.

4.4.2 Erosiediepte

De diepte van de erosie achter het uitstroomkanaal is te benaderen met de empirische formule (4.16), zie Schiereck (2004). De ontwikkeling van de diepte van de erosiekuil h_s aan het eind van een bodembescherming wordt hier door de tijd in uren gegeven. De andere dimensies zijn wel in SI-eenheden.

$$h_s(t) = \frac{(\alpha \bar{u} - \bar{u}_c)^{1.7} d_0^{0.2}}{10\Delta^{0.7}} t^{0.4} \quad \text{met} \quad \alpha = 1.5 + 5r \quad (4.16)$$

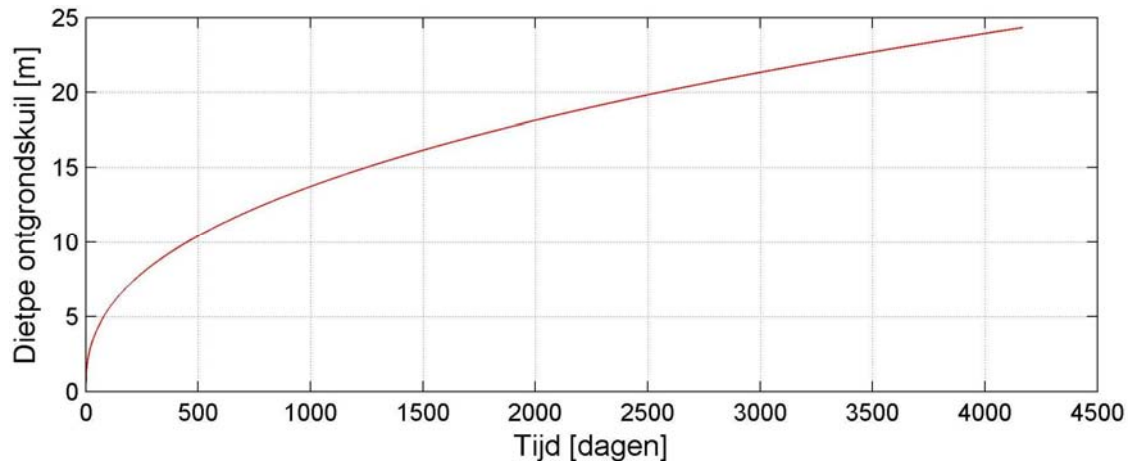
Na verloop van tijd zal een evenwichtsdiepte ontstaan waarna de groei stopt. Voor het berekenen van de evenwichtsdiepte van de erosiekuil achter een bodembescherming is formule (4.17) toepasbaar.

$$h_{se} = h_0 \frac{\beta \bar{u} - \bar{u}_c}{u_c} \quad \text{met} \quad \beta = 1 + 3r \quad (4.17)$$

In deze formules wordt met de verticaal gemiddelde snelheid \bar{u} gewerkt, dit wordt gecorrigeerd met de factor α of β . Met deze factoren worden de variaties in de snelheid weergegeven, vandaar dat ze gerelateerd zijn aan de turbulentie. De turbulentiefactor r , is gegeven in formule (4.18). Deze is gebaseerd op de drempel hoogte z_0 , waterdiepte d_0 en de lengte van het uitstroomkanaal L .

$$r = \sqrt{\frac{0.0225}{(1 - z_d / d_0)^2} \left(\frac{L - 6z_d}{6.67d_0} + 1 \right)^{-1.08} + \frac{1.45g}{C^2}} \quad (4.18)$$

Aan de hand van het verwachte spuibeheer is het, naar de spuiduur gewogen, gemiddelde debiet van 2134 m³/s bepaald. De stroomsnelheid aan het eind van het uitstroomkanaal is dan 0.9m/s. Voor deze waarden is het verloop van de ontgroning aangegeven in Figuur 4.10 gegeven, de evenwichtsdiepte is 26.5m.



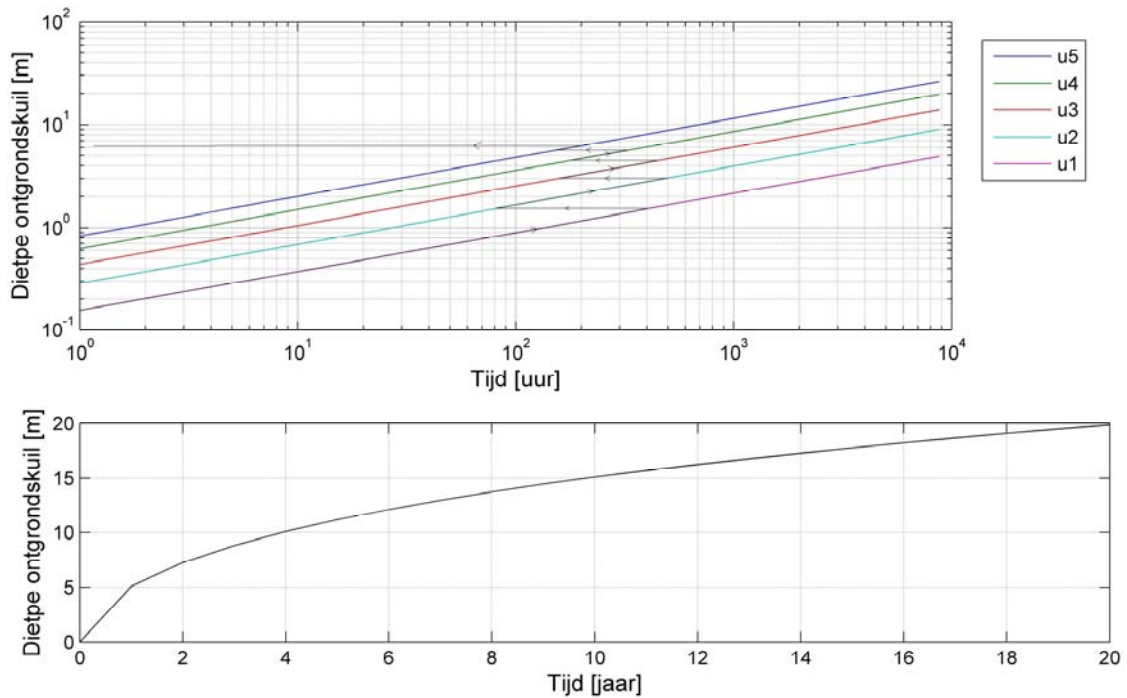
Figuur 4.10, het diepte verloop van de erosiekuil achter het uitstroomkanaal over een periode van 11 jaar

De snelheid waarmee de erosiekuil ontstaat bij het gemiddelde constante debiet is een overschatting. Er is uitgegaan van een ononderbroken stroom, terwijl het spui ongeveer 3.5 uur per dag open zal zijn. Er is hier ook uitgegaan van een constant debiet, in de paragraaf over het spuibeheer is een verdeling van het debiet over het jaar aangegeven. Als deze verdeling wordt aangehouden zullen de stroomsnelheden verschillen en ook de erosiesnelheid. Dit is te benaderen door de stroomsnelheid te integreren over de periode van optreden met formule (4.19), zie Schiereck (2004).

$$h_s(t) = \frac{d_0^{0.2} \frac{1}{T} \int_0^T (\alpha u - u_c)^{1.7} dt}{10\Delta^{0.7}} t^{0.4} \quad (4.19)$$

De integratie is grafisch weergegeven in Figuur 4.11, de diepte van de erosiekuil is hier op dubbel logaritmische schaal uitgezet tegen de tijd. De diepte van de kuil is voor een periode met een bepaalde stroomsnelheid steeds bepaald door het aantal uren de snelheidslijn te volgen. De diepte die dan ontstaat, is het begin voor de volgende periode, door dit te herhalen voor de verschillende snelheden gedurende de periode dat ze op treden kan de uiteindelijke diepte bepaald worden. De volgorde en duur waarin dit uitgezet wordt is niet bepalend voor de uitkomst, dit kan dus willekeurig gedaan worden.

Deze meer nauwkeurige methode is ook in Figuur 4.11 geplot, dit is de onderste figuur. Er komt naar voren dat de erosiekuil beduidend minder snel groeit, na een jaar is deze pas 5m in plaats van de eerder verwachte 10m.



Figuur 4.11, verloop van de erosiekuil in het eerste jaar en gedurende 20 jaar met een variabel debiet

Een andere factor die de erosiediepte zou kunnen verkleinen is sedimentatie in de tijd dat het spui gesloten is. Er staat dan geen stroom in het uitloopkanaal waardoor het sediment kan bezinken. Dit proces van aanzanden kan nog worden versterkt als er een gelaagdheid door het dichtheidsverschil in het uitloopkanaal is. Uit de twee dimensionale beschrijving van de stroming kwam naar voren dat de snelheid dan aan de bodem laag is. Bij het optreden van een retourstroom, zal er tijdens het spuien met een klein debiet nog sediment aangevoerd kunnen worden. De evenwichtsdiepte kan dan ook hoger komen te liggen.

Naast deze voorspellingen voor een verkleining van de erosie zijn er ook redenen om juist meer erosie te verwachten. Een erosieprobleem dat van minder lokale aard is hangt samen met het uitloopkanaal en het mogelijk verplaatsten van de Doove Balg. De zandrug die nu een buitenbocht van de Doove Balg is, vormt een afscheiding met de Afsluitdijk. Deze zandrug moet doorkruist worden voor het uitloopkanaal. Met het aantasten van deze barrière is het mogelijk dat de getijdenstroom de volledige zandrug wegspoelt. De Doove Balg komt dan langs de Afsluitdijk te liggen, dit kan een gevaar vormen voor diens stabiliteit. Als de kans op deze verplaatsing te groot is kunnen de leidammen van het uitstroomkanaal door getrokken worden tot aan de Doove Balg. Dit zal het uitloopkanaal in de zandrug stabiliseren en de buitenbocht van de Doove Balg van de Afsluitdijk houden, zie Banning en Adema (2002). De lengte van de leidammen en dus ook van het uitstroomkanaal wordt dan 750m.

4.5 Conclusies

Na het opstellen van de afvoerrelatie, het uitvoerig bespreken van de voorgeschiedenis van de westelijke Waddenzee en het maken van een aantal analytische berekeningen kunnen nu de verwachtingen opgesteld worden. Deze worden gebruikt voor het opstellen van de numeriekmodellen en bij het analyseren er van.

Bij het winterpeil op het IJsselmeer van NAP -0.4m is een maximaal debiet mogelijk van 3891 m³/s, het verval is dan 1.17m. Bij een hogere waterstand op het IJsselmeer is een groter debiet mogelijk. Door het verwaarlozen van de energieverliezen zal de getalwaarde kleiner zijn dan hier beschreven.

Bij de stroomsnelheden die verwacht worden in het spuicomplex zal de interne stroom op de drempel altijd superkritisch zijn. De turbulentie die met deze stroming gepaard gaat zal het zoute water van de bodem opzuigen, waardoor het afgevoerd wordt. Om een stabiele zoutwig in het uitloopkanaal te krijgen moet er een retourstroom zijn.

De retourstroom lijkt alleen bij een laag spuidebiet mogelijk te zijn. Bij een toenemend spuidebiet zal het zoute water uit het uitloopkanaal getransporteerd worden. Hierdoor zal een situatie van volledige menging ontstaan.

In de monding naar de Doove Balg zal waarschijnlijk beperkte menging plaats vinden. Om dit beter te kunnen onderzoeken is het verband nodig tussen de waterstand en de getijdenstroomsnelheid op de Waddenzee in relatie tot het spuivolume. Dit maakt het mogelijk om het Richardson estuarium getal beter toe te passen.

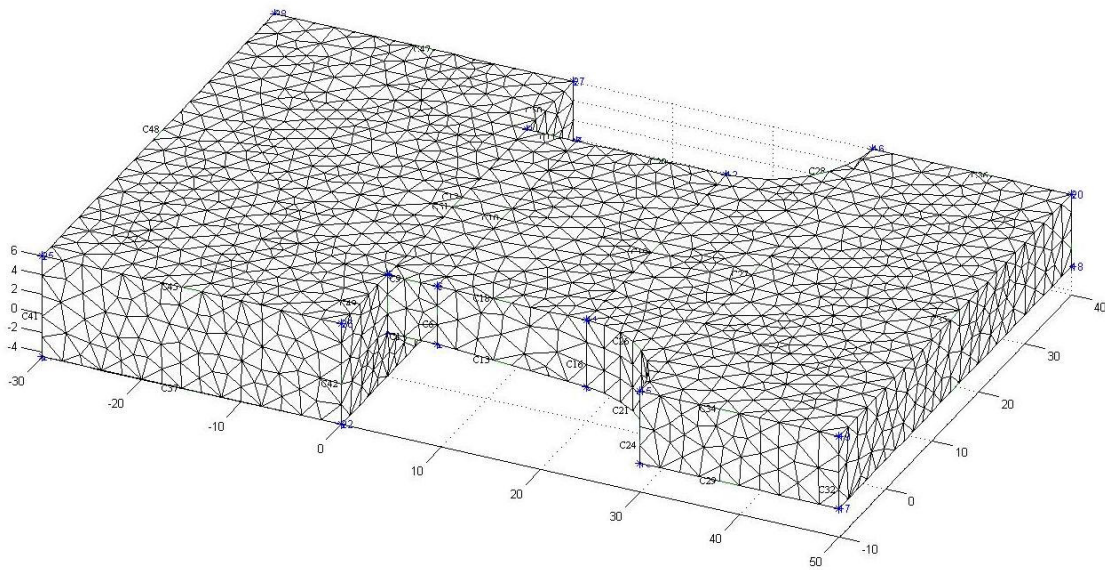
De mogelijkheid van een zoete toplaag in de Doove Balg is aanwezig. Uit het estuarium Richardsongetal kwam naar voren dat de menging tussen de lagen beperkt is. De menging moet dan op grotere schaal gebeuren. Dit kan gebeuren door de getijdenstromen die het water willekeurig verplaatsen of door de invloed van de wind en golven.

Aan het begin van het uitloopkanaal zal veel erosie plaats vinden, na een jaar zal de waterdiepte daar zeker 15m zijn, uiteindelijk kan de diepte hier oplopen tot 25m. Bij grotere diepte zal een directe en even diepe verbinding met de Doove Balg zijn ontstaan.

Uit de berekeningen gedaan in dit hoofdstuk komt naar voren dat er in het complex eigenlijk niet veel gebeurt. De spuistraal drukt het zoute water weg waardoor er geen instroming naar het IJsselmeer is. Daarom gaat er bij de numerieke modellen gekeken worden naar het traject tussen de drempel van het spui en de Doove Balg. Dit bestaat uit de aansluiting op de Doove Balg, de passage van de zandrug en de vloodschaar.

Hoofdstuk 5

Model beschrijving



5.1 Inleiding

5.2 Het Finlab model

5.3 Grid opbouw

5.4 Simulatie instellingen

5.5 Uitvoer van Finlab

5 Model beschrijving

5.1 Inleiding

Na het uitvoeren van de analytische berekeningen is een aantal vragen overgebleven over de dichtheidstroming. Om het inzicht in het stromingspatroon te vergroten worden er een aantal modeltesten gemaakt. In dit hoofdstuk wordt de gebruikte simulatiemethode voor het maken van de simulaties beschreven. Het rekenmodel dat gebruikt wordt is Finlab; dit programma wordt in de tweede paragraaf toegelicht.

Vervolgens wordt de invoer van het simulatiegebied beschreven, dit gebied ligt in de Waddenzee rondom de spuisluis. De instellingen en de randvoorwaarden voor de simulaties worden daarna uitgelegd. Ten slotte wordt de uitvoer van Finlab toegelicht en hoe deze bewerkt kan worden tot duidelijke afbeeldingen. Na het beschrijven van deze basis kunnen de numerieke modeltesten uitgevoerd worden en de resultaten beschreven.

5.2 Het Finlab model

Voor de simulaties in dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van Finlab. Dit is een recent ontwikkeld model wat geschreven is in Fortran, in deze Fortranomgeving wordt het ook gebruikt. Finlab is geschikt voor het modelleren van niet-hydrostatische dichtheidsstromen op een beperkt gebied. Finlab is een niet-hydrostatisch eindig elementen stromingsmodel dat werkt met een ongestructureerd rekenraster, ook wel een grid of mesh genoemd. Het model onderscheidt zich door de genoemde eigenschappen toe te passen zonder een benadering te gebruiken voor de niet-hydrostatische vergelijkingen. Door het ongestructureerde grid kan het model zich goed aanpassen in de gewenste vorm en afmetingen van de omgeving.

Het numerieke stromingsmodel van Finlab is gebaseerd op de Navier-Stokes vergelijkingen. De balansvergelijking voor impuls is gegeven bij vergelijking (5.1), hierin is u een snelheidscomponent, ρ de dichtheid en ν de kinematische viscositeit. De vergelijking is achtereenvolgens opgebouwd uit een acceleratieterm, een advectieve snelheidsterm en een diffusie-term. Deze zijn gelijk gesteld aan het drukverschil en de externe krachten waaronder wrijving.

De continuïteitsvergelijking is gegeven bij vergelijking (5.2). Dit is een transportvergelijking die de onsamendrukbaarheid van het water bepaald. Door gradiënten in de druk ontstaat dus een versnelling van het water. De transportvergelijking van het relatieve dichtheidsverschil wordt in formule (5.3) gegeven. Hierin is $\Delta\rho$ het dichtheidsverschil en κ de turbulente diffusie.

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla \bar{u} - \nu \nabla^2 \bar{u} = \frac{1}{\rho} (\bar{F}_{res} - \nabla p) \quad (5.1)$$

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \bar{u} = 0 \quad (5.2)$$

$$\frac{\partial \Delta\rho}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla \bar{\rho} - \kappa \nabla^2 \Delta\rho = 0 \quad (5.3)$$

De schaal waarop turbulentie plaats vindt kan dermate klein worden dat het praktisch niet mogelijk is om dit te modelleren. Om de gevolgen van de turbulentie op te kunnen nemen maakt Finlab gebruik van het kappa-epsilon model. Het energie verlies in de stroming door de wervelingen wordt ondervangen met een turbulentie viscositeit (5.4).

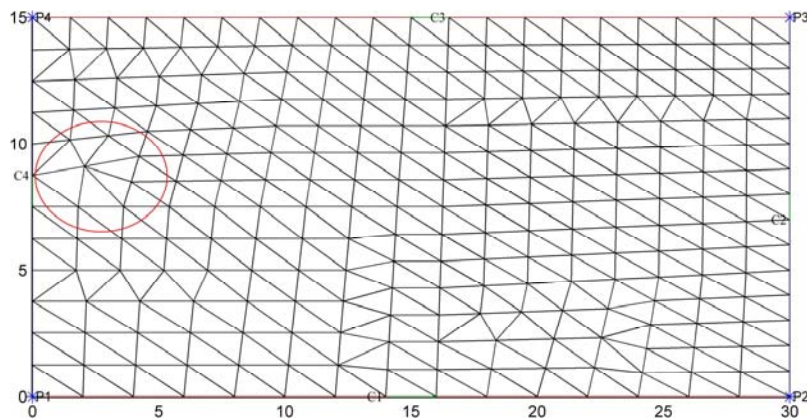
$$\nu_t = C_1 \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (5.4)$$

Hierin is C_1 een constante met de waarde 0.09. De κ staat voor de turbulente kinetische energie en ε is de dissipatie van energie. Voor meer informatie over Finlab en de discretisatie van deze formules wordt verwezen naar Labeur (2003).

5.3 Grid opbouw

Om een simulatie te kunnen maken moet de computer het gebied en de situatie ter plaatse kennen. Dit wordt bereikt door het simulatiegebied om te zetten in een grid. Dit is de invoer van de omgeving voor het simulatiemodel in Finlab. Een grid is een vlak raster met vele onderling verbonden rekenpunten dat uit de omgeving is gelicht. In alle hoekpunt van een gridcel kunnen de eigenschappen zoals de diepte en de stroming vastgelegd worden. Finlab maakt gebruik van een onregelmatig verdeelde grid opgebouwd uit een structuur van driehoekige elementen.

Het grid wordt opgebouwd met behulp van een gridgenerator, Sepran. In dit computerprogramma worden de hoekpunten en de verbindingslijnen daartussen ingevoerd. Vervolgens wordt de dichtheid van het aantal elementen over het grid gegeven. Het opgeven van de hoekpunten, lijnstukken en dichtheid van het aantal hoekpunten moet in Sepran met de hand gedaan worden. De generator plaatst ten slotte de vele driehoekige elementen in de aangegeven oppervlakten tussen de lijnstukken. Een voorbeeld van een willekeurig rechthoekig grid is gegeven in Figuur 5.1.



Figuur 5.1, een voorbeeld grid, met roosterfout.

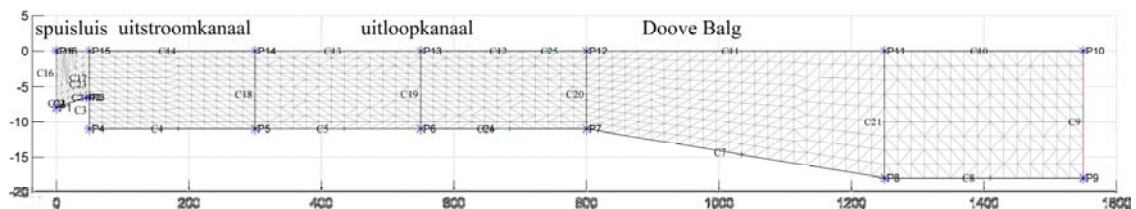
Het gegenereerde grid dient nog gecontroleerd te worden op roosterfouten in de driehoekige elementen. Wanneer een simulatieoppervlak afwijkt van een rechthoekige vorm bestaat de mogelijkheid dat in een rekenpunt vele driehoekige elementen samen komen. Een dergelijk nest geeft problemen bij het gebruik van het grid voor simulaties in Finlab. Dit is te verhelpen door het grid in verscheidene losse oppervlaktes te verdelen of een ander type oppervlakte generator te gebruiken.

Het aantal en de grootte van de gridcellen hangt samen met de gewenste precisie. Dit is een balans tussen het opnemen van genoeg cellen voor het ontwikkelen van de stroming en anderzijds moet de grote beperkt blijven zodat de rekentijd niet te ver oploopt. De randen van het grid dienen ook zorgvuldig geplaatst te worden in de omgeving. Hier zijn ze zodanig geplaatst dat deze samenvallen met een bestaande barrière voor het water of dwars door een stroomoppervlak snijden.

De uitvoer van de gridgenerator is een ASCII data file. In verschillende matrices is hierin de opbouw van het grid beschreven. Om het grid te kunnen afbeelden is een apart programma nodig voor het inlezen van de verschillende matrices. De uitkomsten van deze gridgenerator worden hieronder apart besproken voor het twee- en driedimensionale grid.

5.3.1 2DV grid

Het tweedimensionale grid is een dieptedoorsnede over de hartlijn van het spuicomples. Deze loopt van het begin van de drempel tot in de Doove Balg, in Figuur 5.2 is dit afgebeeld. In de afbeelding is een vereenvoudiging getoond. Het ware grid bevat der mate veel rekenpunten dat het in een figuur als een zwart vlak afgebeeld zou worden.

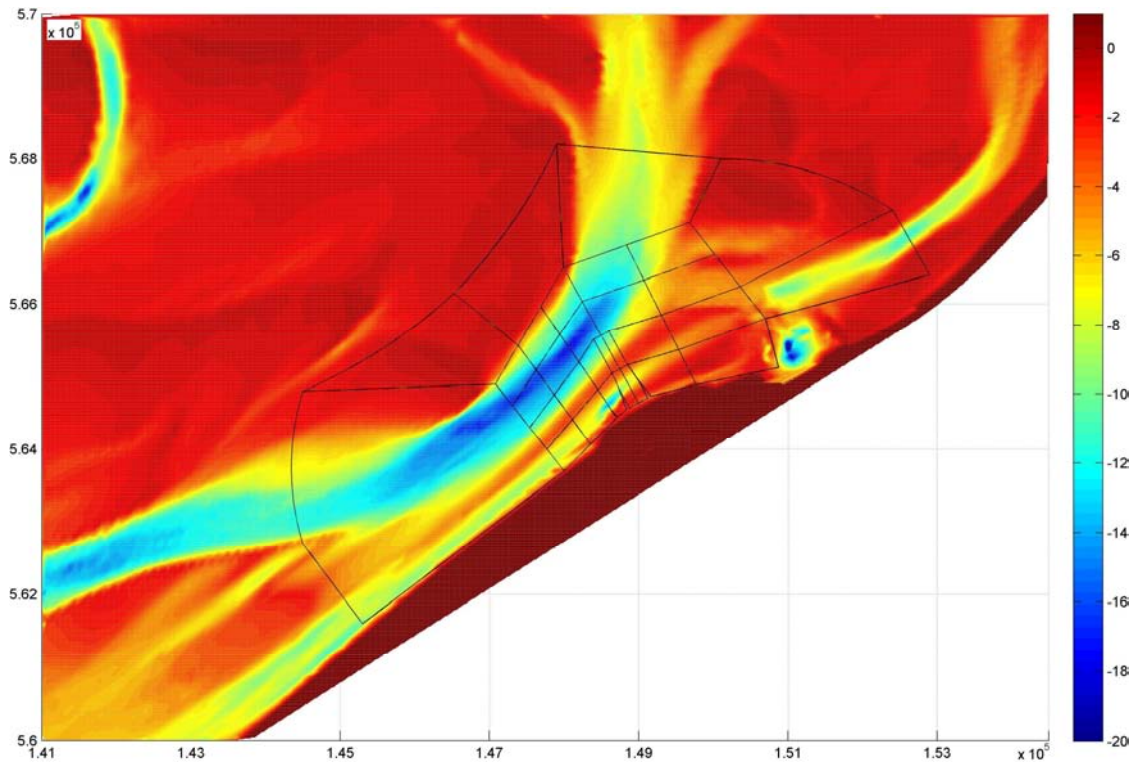


Figuur 5.2, het tweedimensionale grid.

Het grid bestaat uit 19844 rekenpunten en 39686 elementen, dit is het maximum dat Sepran aankan. De input file voor Sepran is in bijlage C te zien. De afstand tussen de verschillende gridpunten varieert horizontaal van 1m bij de drempel tot 8m in de Doove Balg. Verticaal loopt de afstand tussen de rekenpunten op van 0.1m aan de bodem tot 0.6m bij het oppervlak. Aan de bodem is een zeer fijn grid nodig om eventuele dichtheidsstromen op te kunnen merken. Bij het wateroppervlak is een geringere nauwkeurigheid nodig. Met deze verdeling van rekenpunten is het mogelijk om binnen het toelaatbare aantal punten toch de gewenste nauwkeurigheid te krijgen. Door de grote hoeveelheid aan rekenpunten loopt de rekentijd wel sterk op. Voor het simuleren van een uur is ongeveer een halve dag rekentijd nodig.

5.3.2 3D grid

Het gebied dat is opgenomen voor het driedimensionale grid is in Figuur 5.3 afgebeeld. De locatie van de spuisluis is met een pijl aangegeven. Gebieden die permanent boven water blijven zijn bruin aangegeven, zoals de Afsluitdijk onderin de figuur.



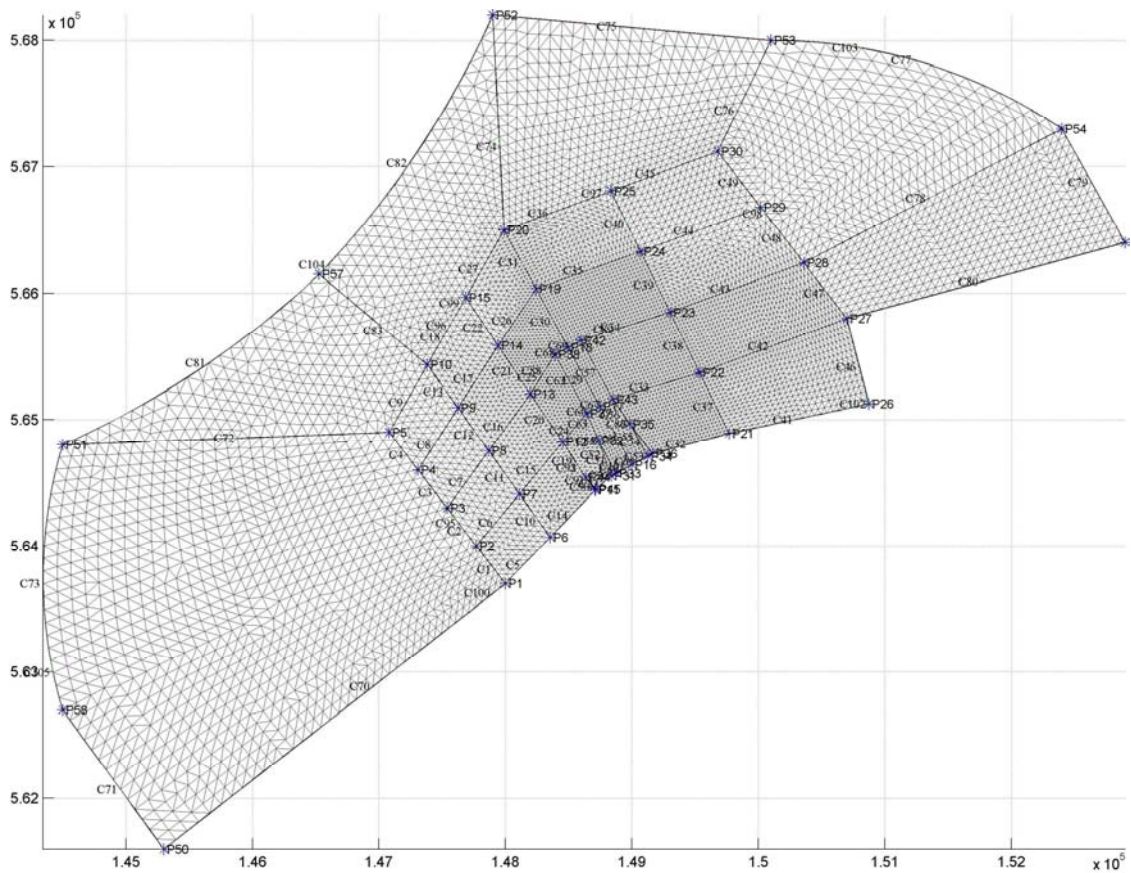
Figuur 5.3, het overzicht van de bodempligging in het simulatie gebied, met de gridvakken.

Het simulatie gebied is opgedeeld in verschillende vlakken, dit heeft onder meer te maken met de stabiliteit van het grid, de gewenste dichtheid van de elementen en de beschikbare data. In de omgeving van de spuisluis zijn veel rekenpunten gewenst en zijn er veel data beschikbaar, verder weg van de spuisluis is dat niet het geval.

De hoekpunten bepalen de plaats van het grid. Hiermee wordt ook de link tussen de simulatie en de ware situatie gelegd. Om later de gesimuleerde data toe te kunnen passen zijn de coördinaten van de hoekpunten van het grid gegeven in rijkdriehoekskoördinaten. Het stelsel van RD-Coördinaten wordt in Nederland gebruikt voor de ligging op geografische kaarten, in de bovenstaande figuur waren deze al gegeven.

Hier is gekozen voor een gebied van 8 bij 3km². De randen van het gebied zijn zodanig geplaatst dat de gesloten randen samenvallen met de Afsluitdijk of een zandplaat, de openranden snijden haaks door de geulen.

Het grid ingevuld met de rekenpunten is afgebeeld in Figuur 5.4. de invoer file voor dit grid in Sepran is in bijlage C gegeven. Ter plaatse van het spuicomplex is het grid fijnmazig met maximaal 10 meter tussen de rekenpunten. Aan de randen is minder nauwkeurigheid nodig en loopt de gridafstand op tot 100 meter. De hoek die rechts onderin het grid lijkt te ontbreken is de strekdam van het sluisencomplex bij Kornwerderzand.



Figuur 5.4, het tweedimensionale grid van het simulatie gebied in RD-Coördinaten.

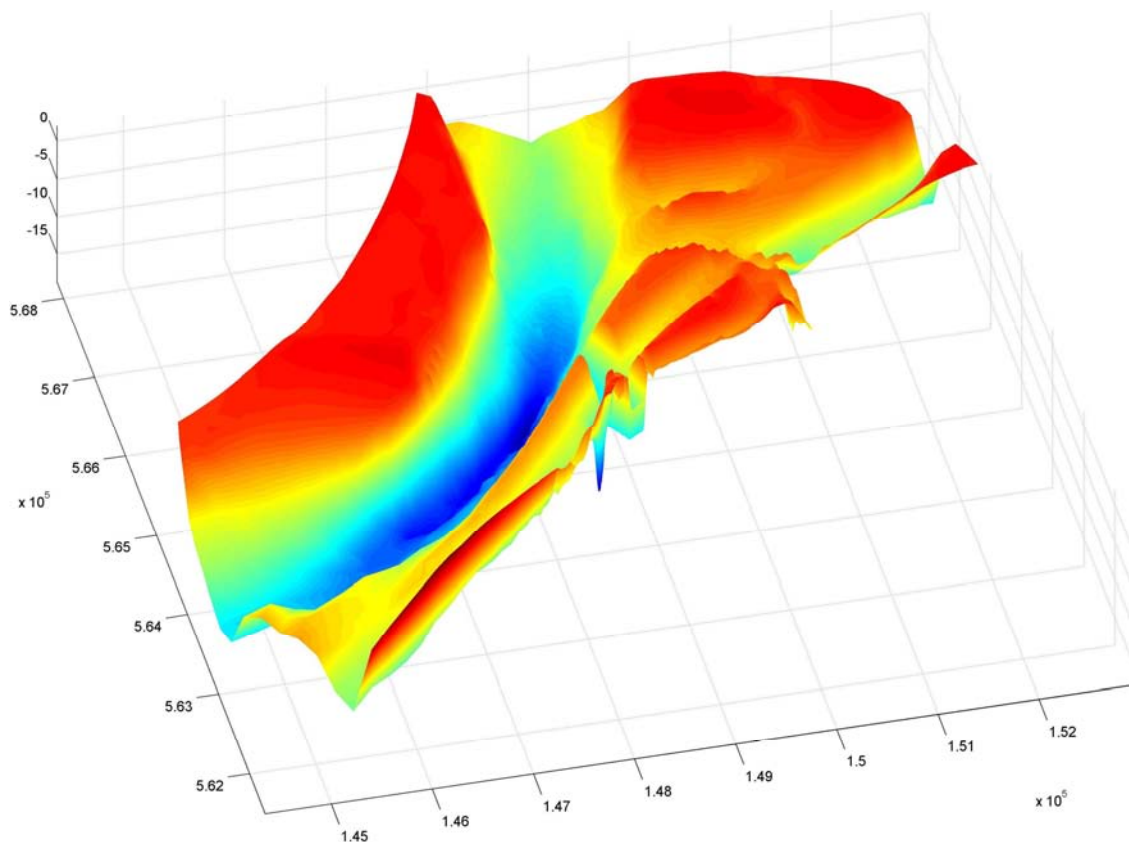
Het afgebeelde grid bestaat nog slechts het wateroppervlak, het bodemprofiel moet er nog apart aangekoppeld worden. Om dit te kunnen doen zijn ten eersten diepte metingen van het simulatiegebied nodig. Deze lodingen zijn in verschillende bestanden aangeleverd door Rijkswaterstaat. Na het sorteren en ordenen van de data kunnen deze gebruikt worden voor het genereren van het bodemprofiel.

Zoals eerder vermeld kunnen in een rekenpunt verschillende eigenschappen opgeslagen worden. De stromingsgegevens worden door Finlab bepaald, maar de diepteligging van de bodem moet vooraf voor ieder rekenpunt gegeven worden. Deze diepteligging is verkregen door een identiek grid te interpoleren over de lodingen van het simulatiegebied. Op deze wijze is een glooiend bodemprofiel ontstaan, zoals afgebeeld in Figuur 5.5. Deze bewerking is gemaakt met het rekenprogramma matlab, het script is in bijlage D gegeven.

Op een gelijke manier is het profiel van het spuicomplex in het bodemprofiel gepast. Omdat er van het spuicomplex slechts tekeningen beschikbaar waren moesten deze nog omgezet worden in een datafile. Het is mogelijk dat er bij deze overzetting afwijkingen zijn opgetreden waardoor het spuicomplex niet de juiste afmetingen heeft.

Deze file van het spuicomplex moet genoeg punten hebben om het grid goed er overheen te passen. Bij het inpassen van het spuicomplex moest er vooral op gelet worden dat de directe omgeving niet werd gewijzigd. Een voorbeeld van een dergelijke beschadiging is dat een dieper gelegen geul niet opgevuld mag worden door de inpassing van het uitloop kanaal.

In bijlage D zijn de afbeeldingen van de verschillende diepteprofielen gegeven.



Figuur 5.5, het driedimensionale grid met diepte-profiel en het uitloopkanaal.

De ruimte tussen de bovenlaag en de bodemlaag moet opgedeeld worden door tussenlagen. Deze verdelen per celpunt de diepte in stukken van een meter met minimaal 3 lagen. Een fijnere verticale opbouw van het grid, zoals bij het tweedimensionale grid, is gewenst. Dit is echter niet haalbaar in verband met de rekestijd en het maximale aantal rekenpunten dat Finlab aankan. Het grid bestaat zo uit 97874 rekenpunten en 559858 elementen. Dit komt neer op een rekestijd van meer dan een dag voor het simuleren van een uur.

5.4 Simulatie instellingen

Voor het maken van een simulatiemodel moeten in Finlab een aantal instellingen gemaakt worden. Deze worden verdeeld in beginvoorwaarden, randvoorwaarden en de schematisering van de tijd. Naast de eerder beschreven getalswaarden in hoofdstuk 2 worden nu de manier van opleggen beschreven.

5.4.1 Beginvoorwaarden

De beginvoorwaarde zijn de instellingen die in het rekengebied opgelegd worden bij het opstarten van de simulatie. In Finlab dienen alle beginvoorwaarden nul te zijn. Dit is in verband met de stabiliteit van de berekeningen. Dit betekent dat het water stilstaat en de waterspiegel samen moet vallen met de nulwaarde van het grid. Zo moet ook de relatieve dichtheid nul zijn. Dit kan voor lastige situaties zorgen.

Bij het bepalen van het waterpeil in de Waddenzee is deze op NAP -0.9m gezet. Aangezien het waterpeil niet aangepast kan worden is dit op een alternatieve wijze geïmplementeerd. Het niveau van de bodem is met 0.9m verhoogd, dit geeft immers de zelfde waterdiepte.

Een probleem dat zich hierbij voordoet is het droogvallen van enkele wadplaten. Het bodemgrid komt dan boven het oppervlaktegrid uit. Dit is opgelost door een minimale diepte van 0.5m op te leggen in het bodemgrid.

De relatieve dichtheid wordt meestal bepaald ten opzichte van zoetwater. Dit betekent dat zoutwater een waarde van +0.025 moet krijgen. Bij de modellering is dit dus niet mogelijk en is de relatieve dichtheid bepaald ten opzichte van zoutwater. Hierdoor heeft zoutwater de waarde nul en zoetwater -0.024. In de figuren met de dichtheid is dit echter niet terug te zien. De relatieve dichtheid is daar weer omgerekend naar de absolute dichtheid.

5.4.2 Randvoorwaarden

Om de berekeningen te kunnen maken moet er een gebied van interesse uit de omgeving gehaald worden. Dit gebied van interesse is de omgeving van het spuicomplex dat uit de westelijke Waddenzee gelicht wordt. Om de invloed van het gebied hier buiten op te kunnen leggen worden randvoorwaarden gebruikt. De randvoorwaarden bootsen dus de invloed van de buitenwereld na in het interessegebied. De manier van opleggen van de randvoorwaarden voor de verschillende berekeningen worden hieronder besproken.

In Finlab zijn verschillende manieren om de randen vast te leggen. Bij de simulaties is altijd bovenstrooms een stroomsnelheid opgelegd en benedenstrooms een waterstand. Dit is de meest stabiele vorm van een stroming opleggen. De waterstand kan op twee verschillende manieren opgelegd worden: als gefixeerd peil of als Riemannrand. Het voordeel van een Riemannrand boven een gefixeerde waterstand is dat uitgaande golven niet gereflecteerd worden, dit verkort de inspeeltijd. Het nadeel van dit type is dat de waterstand samenhangt met de stroomsnelheid op de rand. Hierdoor zijn fluctuaties van de waterstand mogelijk.

Bij de tweedimensionale berekeningen is de Riemannrand toegepast. Bij het opstarten van de simulaties ontstaat een translatie golf die ook weer interne golven veroorzaakt. Bij het toepassen van een vaste waterstand blijven deze golven in het simulatiegebied. Voor het uitdempen van deze golfbewegingen is te veel tijd nodig en de golven verstoren de modellering. Vandaar dat er voor een Riemannrand is gekozen.

De Riemannrand is echter niet goed toepasbaar bij de driedimensionale modellering. Dit komt doordat er slechts één waterdiepte over een rand in het model gegeven kan worden. Bij het diepteprofiel was te zien dat de diepte over een rand sterk verloopt. Verder is het bij het toepassen van een Riemannrand mogelijk dat tijdens een simulatie het waterpeil tot enkele meters boven het aangeven peil stijgt.

Daarom is er gekozen voor gefixeerde waterpeilen op de randen bij de driedimensionale modellering. De gevolgen van golfreflecties op de randen zijn opgevangen door een lange inspeeltijd op te leggen. In deze inspeeltijd wordt de stroming rustig opgang gebracht, dit ter voorkoming van abrupte golf opwekkingen.

Voor de simulaties met getij is de stroomsnelheid steeds op 0.50m/s gezet. Deze vaste waarde is gebruikt omdat het instellen van een in de tijd verlopende getijdensnelheid nog niet in Finlab geïmplementeerd is. Uit het bespreken van de omgeving en de stroomsnelheden in hoofdstuk 2 kwam 0.50m/s als gemiddelde getijdensnelheid tijdens het spuien naar voren. Bij hogere

stroomsnelheden komt ook de stabiliteit van de modellering in het geding. Hierom is een rustige stroomsnelheid bepaald waarbij de gevolgen van een verandering toch duidelijk terug zijn te zien.

De overige randen zoals de bodem, zandplaten en de Afsluitdijk worden als een vaste wand opgenomen. Er vindt dus geen erosie plaats, tenzij dit apart wordt vermeld, bij de tijdschematisering wordt dit nader uitgelegd.

5.4.3 Tijdschematisering

De tijdsduur die gesimuleerd wordt in een model varieert van één tot drie uur. In deze tijd kan het model inspelen op de randvoorwaarden zodat de grote fluctuaties bij het opstarten uitgedempt zijn. Er is dan een representatief beeld van de stroming ontstaan. Het ontwikkelen van een stationaire stroom is bij dichtheidsstromen echter niet mogelijk. Er zal altijd transport tussen de lagen blijven waardoor de stroming in de tijd blijft veranderen tot een van de lagen uit het model is gestroomd. De simulatie tijd is weer relatief kort voor veranderingen aan het bodemprofiel. Het sedimenttransport zal dan ook verwaarloosd worden bij deze simulaties.

De tijdstapgrootte wordt bepaald door het Courantgetal (5.5), dit is de voortplantingssnelheid vermenigvuldigd met de tijdstap gedeeld door de ruimtelijke stap grote.

$$\sigma = c \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (5.5)$$

In veel modellen mag het courantgetal niet groter dan 1 zijn. De stromingsinformatie gaat dan sneller door het grid dan de stapgroten. Dit kan tot gevolgen hebben dat het numerieke model instabiel wordt. Het rekenschema en de rekenmethode van Finlab kunnen een grotere waarde van het Courantgetal stabiliseren. Dit komt door een tijdsintegratie methode.

Bij het tweedimensionale grid is de kleinste horizontale stapgrote 3 meter, dit is aan het begin van het uitstroomkanaal. De golfsnelheid is daar, bij een diepte van 11m ongeveer 10m/s. Dit betekent dat bij een tijdstap van 1 seconde het courant getal 3.5. Bij deze waarden blijft de iteratie nog net stabiel.

Bij de driedimensionale berekeningen zijn de horizontale afstanden tussen de grid cellen een stuk groter, ongeveer 10m. Dit is ook weer in het uitstroomkanaal, waar de golfsnelheid 10m/s is. Bij deze simulaties is een tijdstap van 5 seconden aangenomen, de courantwaarde is dan 5. Het model blijft hier zeer stabiel bij.

Het opmerkelijke aan de courantconditie is dat het grid uit driehoekige elementen bestaat. Hierdoor kan de informatiestroom binnen de courantvoorwaarden toch nog door meerdere cellen stromen.

5.5 Uitvoer van Finlab

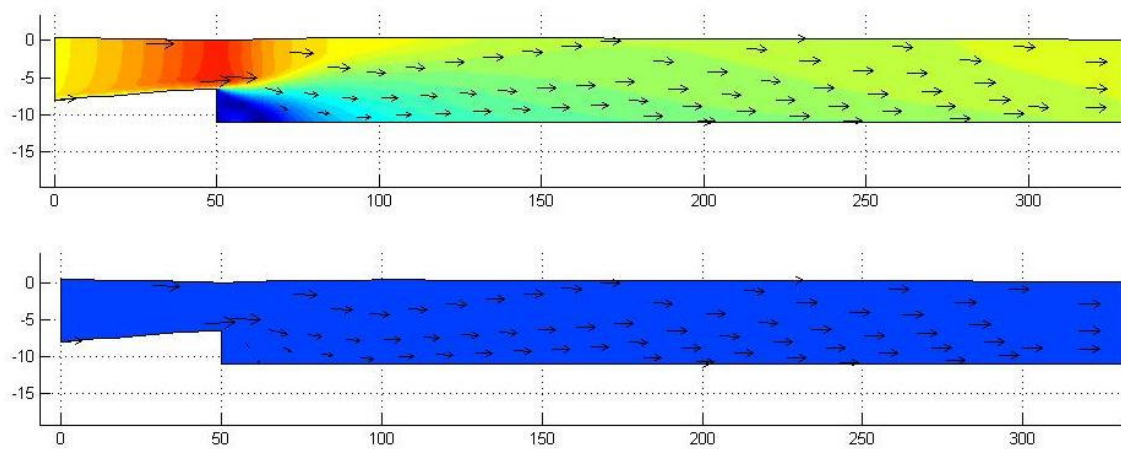
De uitvoer van Finlab bestaat uit 6 verschillende datafiles. De eerste serie met uitvoergegevens zijn datafiles met grid informatie. De Sepran uitvoerfile van de gridgenerator wordt hier gesplitst in drie aparte files. In de eerste file staan de coördinaten van alle rekenpunten. De tweede file bevat de informatie van de driehoekige elementen tussen de rekenpunten. De nummers van de rekenpunten die met elkaar verbonden zijn worden hier gesorteerd. De andere file geeft de data van losse lijnstukken in het grid die samen een geheel vormen. Dit zijn bijvoorbeeld de lijnen die de rand van het grid vormen.

Vervolgens zijn er 2 files met de tijdgegevens van de simulatie en de turbulentie berekeningen. Ten slotte is er nog een groot bestand met de stromingsgegevens door de tijd per rekenpunt. Dit bestand heeft een matrix met vijf kolommen. Hierin staan de horizontale en verticale snelheidscomponenten, de ligging van de waterspiegel, de diepte en de dichtheid.

Deze Finlab data-uitvoer moet met een ander computerprogramma verwerkt worden voor het verkrijgen van afbeeldingen. Dit wordt in het rekenprogramma Matlab gedaan. Met matlabscripts wordt de uitgevoerde data ingelezen en verwerkt tot afbeeldingen. De afbeeldingen kunnen ook in serie gezet worden zodat er een film van de stroming gegenereerd wordt. Het script dat hoofdzakelijk bij de tweedimensionale simulaties gebruikt is voor het aanmaken van de figuren is in bijlage E te zien. Bij de driedimensionale simulaties zijn drie andere scripts vaak gebruikt. Deze zijn voor de stroming aan het wateroppervlak, de dieptegemiddelde stroming en voor het maken van diepe doorsnede. Deze scripts zijn ook bijlage E te zien.

Hoofdstuk 6

Numerieke 2DV simulaties



6.1 Inleiding

6.2 Instellingen van de modellering

6.3 Resultaten van de simulaties

6.4 Analyse van de resultaten

6.5 Samenvatting en conclusies

6 Numerieke 2DV simulaties

6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt twee numerieke tweedimensionale simulaties uitgevoerd met Finlab. Deze simulaties worden gemaakt om de verwachtingen van de analytische berekeningen te toetsen. Daarnaast worden ze ook gebruikt om de uitgangspunten voor de driedimensionale simulaties te bepalen.

In deze simulaties wordt vooral gelet op de verticale snelheidsverdeling, dichtheidsstroming en de gelaagdheid. Uit de voorgaande berekeningen kwam de mate van gelaagdheid in het uitloopkanaal niet duidelijk naar voren. Ook in de monding naar de Doove Balg is de mate van menging nog niet geheel duidelijk.

De afvoerrelatie uit het analytische model zal hier niet gecontroleerd worden. De verklaring voor het weglaten van de controle wordt bij de analyse van de resultaten gegeven.

6.2 Instellingen van de modellering

In Finlab zijn twee testen gedaan met een zoete spuiroom in het uitstroomkanaal. De eerste case is gemaakt bij een laag spuidebiet van $1600\text{m}^3/\text{s}$. Bij de tweede case is een gemiddeld spuidebiet van $2100\text{m}^3/\text{s}$ gemodelleerd. De verschillende instellingen bij deze simulaties worden hier besproken. De getalswaarden van de instellingen bij de simulaties worden aan het eind van de paragraaf in Tabel 6.1 gegeven, maar zullen eerst nog worden toegelicht.

Het fijnmazige grid dat in hoofdstuk 5 besproken is, wordt hier gebruikt. In de stroomrichting verloopt de afstand tussen de rekenpunten van 1.5m bij het spui tot 12m in de Doove Balg. Verticaal is er ook een zelfde verloop in de tussenafstand, van 0.1m aan de bodem bij het spui tot 0.9m aan het oppervlak in de Doove Balg. Met de korte afstanden tussen de rekenpunten in het grid is de tijdstapgrootte ook klein geworden. Dit is nodig voor de stabiliteit en om dunne dichtheidslagen op te kunnen merken. Om toch aan een voldoende lange simulatieperiode te komen, kan de rekentijd echter wel oplopen.

De bovenstroomse randvoorwaarde is steeds in het toestroomkanaal opgelegd. Daar stroomt het zoete water met een gegeven snelheid het systeem in. Voor het lage debiet is de instroomsnelheid 1.20m/s en bij de tweede case 1.50m/s . Deze snelheden in het toestroomkanaal zijn bepaald op basis van de afvoerrelatie bij het beoogde spuidebiet.

Benedenstrooms is het waterpeil van de Waddenzee in de vorm van een Riemannrand opgelegd als randvoorwaarden. De opgelegde waterstanden moesten de waarde nul hebben, dit is bij de uitleg van het Finlabmodel toegelicht. Door het gebruik van de Riemannrand loopt het waterpeil in de simulatie wel op.

Voor de tweedimensionale simulaties moest het spuidebiet omgezet worden naar een debiet per eenheid van breedte. Hierbij is de breedte op de drempel van de spuisluis aangehouden en niet die van het bredere toestroomkanaal of uitstroomkanaal. Dit geeft wel een verandering in de verhouding tussen de snelheden in de spuisluis en daar omheen.

Bij alle simulaties wordt er zoetwater gespuid met een dichtheid van 1000kg/m^3 in een omgeving met zoutwater, met een dichtheid van 1025kg/m^3 . Omdat er alleen maar aanvoer van zoetwater is

zal dit op de duur het gebied vullen. Een zoutwig zal dan door de aanzuiging geleidelijk verdwijnen. De resultaten van de simulaties zijn dan ook niet stationair, maar wel representatief voor de gemodelleerde situatie.

Tabel 6.1, het overzicht van de instellingen voor de 2DV simulaties.

	Case 1	Case 2
Horizontale stapgrootte Δx [m]	1.5 – 10	3 - 12
Verticale stapgrootte Δy [m]	0.1 - 0.6	0.2 - 0.9
Tijdstap grootte Δt [s]	0.3	0.3
Simulatieperiode T [min]	120	150
Spuidebiet Q [m ³ /s]	1635	2096
Spuidebiet q [m ³ /s/m]	10.8	13.83
Opgelegde Stroomsnelheid u_i [m/s]	1.20	1.50

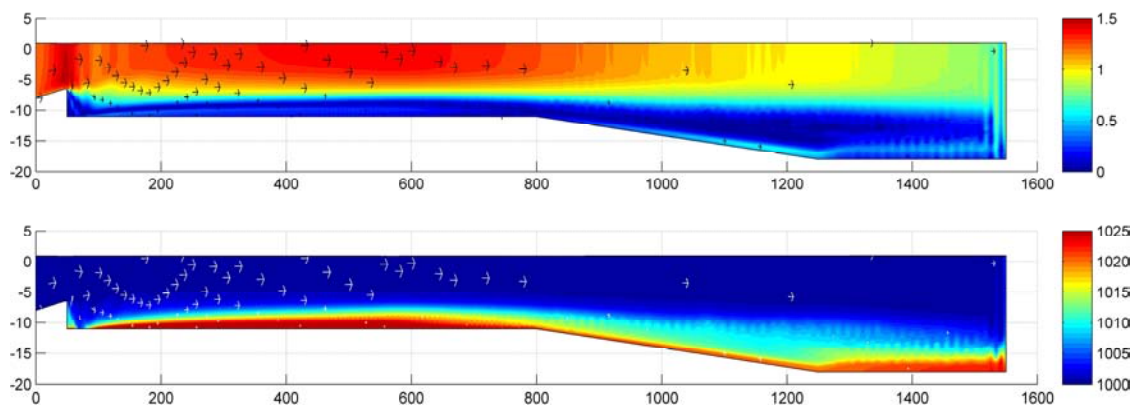
6.3 Resultaten van de simulaties

De resultaten van de twee cases worden hier per simulatie besproken. De eerste is bij het lage spuidebiet en de tweede bij een gemiddeld debiet. In deze cases is wel een afwijking van het beoogde spuidebiet uit het spuibeheer. Dit heeft te maken met de mogelijke randvoorwaarden binnen Finlab. Met een aantal proefsimulaties is het gewenste spuidebiet steeds zo goed mogelijk benaderd.

Bij het bespreken van de resultaten zullen steeds twee plots gemaakt worden. In de bovenste wordt de stroomsnelheid gegeven over de hartlijn van het spuicomplex. Dit loopt van 50m voor de drempel tot middenin de Doove Balg 1500m verder op. Daaronder is de dichtheid geplot in hetzelfde gebied. Let bij deze afbeeldingen op de schaalverdeling van de assen, de afbeeldingen zijn over de verticaal sterk vergroot.

6.3.1 Case 1: Laag spuidebiet

Het eerste punt dat met deze simulaties onderzocht diende te worden is de verticale snelheidsverdeling. Dit is afgebeeld in Figuur 6.1 op 65 minuten na het openen van de spuisluis. Hier is ook de dichtheidsverdeling gegeven. De ontwikkeling van deze stroming is in bijlage F in 4 stappen afgebeeld.



Figuur 6.1, de stroomsnelheden en dichtheidsverdeling bij een spuidebiet van 1635m³/s, op t=65min.

Het afgebeelde stromingspatroon is dus niet aan het einde van de simulatie maar op de helft. Dit is gedaan om de zoutlaag in het uitloopkanaal de Doove Balg nog te zien. Na verloop van tijd wordt deze zoutlaag volledig aangezogen in de zoetwaterlaag en is er alleen nog zoet water in het simulatie gebied. Dit proces van entrainment is bij de analytische benadering uitgebreid beschreven.

Direct achter de drempel is de neer terug te zien. Door de schaalverdeling lijkt deze erg klein in de afbeelding. Maar de lengte van de neer is ongeveer 20 meter. Dit komt goed overeen met de analytische benadering van 23 meter.

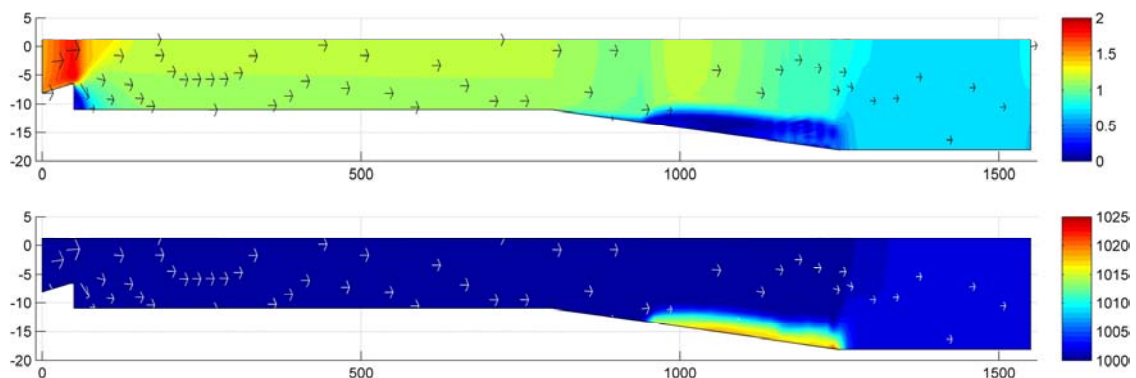
In het uitloopkanaal is een gedeeltelijke menging te zien. De dichtheid verloopt over de vertical en de zoute laag stroomt rustig in de richting van de Doove Balg. In het uitstroomkanaal is uiteindelijk een volledige menging te zien. De zoutlaag is dan uit het uitloopkanaal gedrukt. Het type menging komt dus goed overeen met de verwachtingen, de case was namelijk opgezet om de aanwezigheid van een zoutwig na te gaan.

Bij aanvang stroomt het zoete water nog wel langs het oppervlak en is er een zoutwig. Zodra de stroming goed opgang is gaat dit over in gedeeltelijke menging en na verloop van tijd is de menging volledig. De dichtheid varieert dan niet meer over de verticaal.

In de monding van het uitloopkanaal ontstaat wel een zoutwig. De spuistroom blijft hier aan het oppervlak liggen en in de zoutlaag is een retourstroom. In het diepe gedeelte van de Doove Balg is ook een grenslaag ontwikkeld. De verticale stroming is hier relatief sterk waardoor er uitwisseling tussen de lagen plaats vind. Dit is te herkennen aan het verticaal gestreepte dichtheidspatroon.

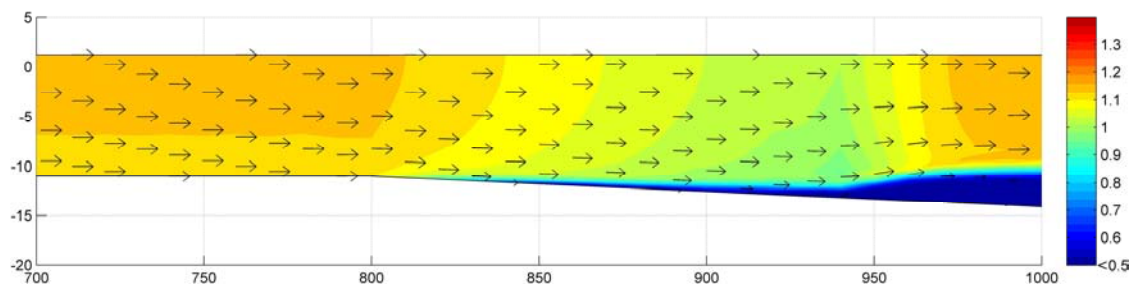
6.3.2 Case 2: Gemiddeld spuidebiet

Bij de tweede simulatie is de instroomsnelheid 1.50m/s en het spuidebiet van 2096m³/s. De situatie 80 minuten na het openen van de spuisluis is in Figuur 6.2 gegeven, de ontwikkeling van de stroming is in bijlage F in 4 stappen afgebeeld.



Figuur 6.2, de stroomsnelheden en dichtheidsverdeling bij een spuidebiet van 2096m³/s, op t=80min.

De volledige menging die in het uitloopkanaal plaats vindt valt direct op. Er is hier geen sprake meer van enige vorm van gelaagdheid. Na de neer achter de drempel stelt zich ook snel een snelheidsverdeling in over de diepte. Dichterbij de bodem is de snelheid lager dan bij het oppervlak. Deze snelheidsverdeling is uitvergroet aan het eind van het uitloopkanaal en in Figuur 6.2 afgebeeld.



Figuur 6.3, de verticale snelheidsverdeling aan het eind van het uitloopkanaal.

In de Doove Balg zijn de verschijnselen van de dichtheidsstroming terug te vinden. De interne sprong en de zoutwig zijn hier net als in de vorige case nog aanwezig. Aan de dikte van de zoutwig is te zien dat het zoute water omhoog weggezogen wordt. Aan het eind van de simulatietijd is het zoute water dan ook geheel weggespoeld. Op den duur zal een zoutwig altijd verdwijnen als er geen aanvoer is van zout water uit de omgeving.

Het abrupte eind van de zoutwig en de sprong in de snelheidsverdeling zijn opmerkelijk. De oorzaak hiervan is waarschijnlijk te vinden in de toename van de stroomsnelheid aan het oppervlak. Door de zoutwig wordt het stroomprofiel verkleind en loopt de snelheid op. Bij hogere snelheden neemt de stabiliteit van de gelaagdheid af. Dit kan de sprong ook veroorzaakt hebben.

Gezien de lijn die in de resultaten van deze twee cases zit heeft het geen zin om bij een groter spuidebiet het stromingspatroon te bekijken. De menging in het uitstroomkanaal zal volledig blijven en de zoutwig in de monding zal sneller aangezogen worden.

6.4 Analyse van de resultaten

Bij de analyse worden eerst de resultaten van de twee cases behandeld. Vervolgens wordt de terugkoppeling gemaakt naar de analytische bepaling. Bij de analyse moet rekening worden gehouden met de te hoge waterstand. Door het gebruik van de Riemannrand is de waterstand hoger geworden dan gewenst.

6.4.1 Analyse van de cases

Uit de simulaties komt naar voren dat bij het voorgenomen spuidebeheer geen stabiele zoutwig in het uitloopkanaal ontstaat. Er ontstaat bij het lage spuidebiet wel een gelaagdheid, maar deze trekt weg. Er ontstaat dan een situatie van volledige menging. In de monding naar de Doove Balg blijft wel steeds een zoutwig aanwezig. Deze wordt door een gebrek van aanvoer van zoutwater wel steeds weggezogen. De aanvoer was ook niet in de modellering opgenomen.

Het ontbreken van aanvoer van zoutwater in het model hangt samen met het ontbreken van een breedte component. De breedte is namelijk een belangrijke factor bij de uitstroom van het spuidebiet. Direct achter de drempel verspringt de breedte van het stroomprofiel van 150m naar 190m dit betekent dat de vertraging van de stroming groter zal zijn dan verondersteld.

Verderop, in het uitloopkanaal zal de breedte ook weer invloed hebben. Het uitloopkanaal is namelijk niet zijwaarts afgesloten. Juist achter de leidammen loopt de vloodschaar door het uitloopkanaal. Deze zal niet alleen zoutwater aanvoeren maar ook een deel van de spuistroom kunnen meevoeren. De zandrug die doorkruist wordt is meestal onderwater. Hier zal dus ook afvoer van zoetwater overheen kunnen plaats vinden. Met het ontbreken van de breedte was dit niet op te nemen in de modellering.

Bij de driedimensionale simulaties kan de invloed van de breedte getoetst worden. Echter kan de gelaagdheid driedimensionaal minder nauwkeurig onderzocht worden. Het verticale grid kan daar niet zo fijn opgebouwd worden als hier het geval is. Dit komt door het maximale aantal rekenpunten in verband met de simulatieduur. De zijdelingse afvoer van zoet water en de toevoer van zout zal bij de driedimensionale wel te onderzoeken zijn.

6.4.2 Terugkoppeling naar de analytische bepalingen

Bij het maken van de terugkoppeling naar de analytische berekeningen vallen een aantal verschillen en overeenkomsten op. Deze worden in de volgorde van de analytische bepalingen behandeld, te beginnen bij de afvoerrelatie. Vervolgens de dichtheidsstroming en daarna het bodemtransport.

De afvoerrelatie geeft extremere uitkomsten dan hier uit de tweedimensionale simulaties naar voren komt. De waterstanden zijn daar lager, het verval groter en de snelheden hoger, dit heeft verschillende oorzaken. Het breedteverloop dat in de vorige paragraaf is besproken zal hier ook mee te maken hebben. De stroming is daardoor minder versneld op de drempel wat tot lagere snelheden leidt. Bij een lagere snelheid hoort volgens de energiebalans ook een hogere waterstand. Dit werkt vervolgens ook weer door in de impulsbalans.

Er is ook een verschil in het opleggen van de randvoorwaarden. Bij de analytische berekeningen zijn er twee voorwaarden bovenstrooms opgelegd en benedenstrooms geen. Zowel de waterstand als de snelheid werden bij de instroming vast gesteld. Vervolgens werden hier de bijbehorende standen benedenstrooms bepaald. Deze methode is bij de numerieke methoden niet mogelijk. Het is dan ook lastig om een verval op te leggen en de modellering stabiel te houden.

De afvoerrelatie is dus niet gecontroleerd vanwege het ontbreken van de derde dimensie en de mogelijkheden voor het opleggen van de randvoorwaarden. De uitkomsten van de numerieke simulaties zullen daardoor sterk verschillen van de analytische, zodat ze niet als een controle beschouwd kunnen worden.

Bij het stromingspatroon in het uitstroomkanaal werd bij het analytische model gekeken naar de mate van gelaagdheid, de laagdiktes, de aanwezigheid van zoutwater en het interne Froudegetal. Hier kwam uit naar voren dat bij een beperkt debiet een zoutwig mogelijk was. Uit de numerieke berekening komt naar voren dat er een gelaagdheid kan ontstaan. Maar de zoutlaag is te dun om stabiel te blijven. Het kan ook zijn dat de zoute laag mogelijk was door de verhoogde waterstand. De stroomsnelheden zijn dan lager bij een gelijk debiet.

Tussen de verschillende typen van menging zit een scherpe omslag. Dit kwam bij de analytische berekeningen al naar voren. Daar werd het interne Froudegetal in de zoutwaterlaag gegeven. Zodra de onderlaag te dun wordt, loopt de snelheid te hoog op. Het snelheidsverschil tussen de lagen is dan te groot voor een stabiele scheiding waardoor het zoute water weggezogen wordt.

De aanwezigheid van een interne sprong in het uitloopkanaal is bij volledige menging ook uitgesloten. In de monding naar de Doove Balg is wel een front aanwezig. Dit was bij de analytische benadering verwacht als er geen getijdenstroming is. Echter na meer dan een uur spuien is de zoutwig wel weggevoerd.

Het bodemtransport is in Finlab niet te berekenen in combinatie met de dichtheidsstroming. Het is hierdoor dus niet mogelijk om de erosiediepte kwantitatief te vergelijken. Maar als de kritische

transportsnelheid vergeleken wordt met de optredende snelheden kan er wel een indicatie van de grootte gegeven worden. Door het ontbreken van een zoutwaterlaag bij de bodem en de relatief hoge snelheden daar, zal er zeker erosie plaats vinden.

Nadat de eerste meters weggespoeld zijn, zal de erosiesnelheid af kunnen nemen. Door de grotere diepte is dan de aanwezigheid van een zoutwig mogelijk. De erosie die plaats vindt wanneer het spui gesloten is kon met deze modellering niet onderzocht worden. Hier is een driedimensionale opzet voor nodig.

6.5 Samenvatting en conclusies

Aan het begin van de tweedimensionale simulaties waren een viertal punten waar meer inzicht in verkregen moest worden. Dit waren de snelheidsverdeling, de menging van het gespuide water in het uitloopkanaal en in de monding en het bodemtransport. Door middel van twee cases met een verschillend spuidebiet is dat onderzocht en geanalyseerd. Dit leidde tot de volgende conclusies.

- Het verticale verloop van de stroomsnelheid in het uitloopkanaal is aanwezig, maar wel klein. Bij een gelaagdheid loopt het verschil wel sterk op.

Het afnemen van de snelheid naar de bodem toe blijft beperkt door de korte inspeelmogelijkheden. Er is enige afstand en tijd nodig om een logaritmische profiel te vergelijken. Door de korte inspeeltijd in het model, maar ook in de praktijk, zal dit dus beperkt optreden.

De mate van menging is bij de analytische benadering uitgebreid onderzocht. Hier kwam uit naar voren dat bij het lage spuidebiet de mogelijkheid van een zoutwig in het uitloopkanaal bestaat. In de monding naar de Doove Balg werd wel een zoutwig verwacht bij het uitblijven van een sterke getijdenstroming. Na de numerieke berekeningen kunnen hier de volgende conclusies getrokken worden.

- Bij een beperkt debiet is er gedeeltelijke menging in het uitloopkanaal. Dit gaat later over in volledige menging.

Dit betekent dat het uitloopkanaal uiteindelijk volledig gevuld wordt met zoetwater en het gespuide water zich daar niet mengt met de omgeving. Het mengproces met het zoute water ter voorkoming van een zoetwaterbel moet dus op een andere plaats gezocht worden.

- In de Doove Balg ligt een dunne laag met zout water bij het uitblijven van een sterke getijdenstroom.

In het tweedimensionale model is een getijdenstroom niet op te nemen, dus voor het testen met getij is een driedimensionale simulatie nodig. De gewenste menging van het spuiwater met de omgeving zou hier in de monding kunnen plaats vinden.

Voor het bodemtransport is geen aparte case uitgevoerd, dit in verband met de mogelijkheden binnen Finlab. Maar met de voorgaande conclusies is wel de mate van erosie te bepalen.

- Het bodemtransport in het uitloopkanaal zal duidelijk aanwezig zijn.

De bodem beschermende processen die aangenomen werden, gaan niet op. De stroomsnelheid aan de bodem is hoog en een bodem beschermende zoutwaterlaag is zeer beperkt.

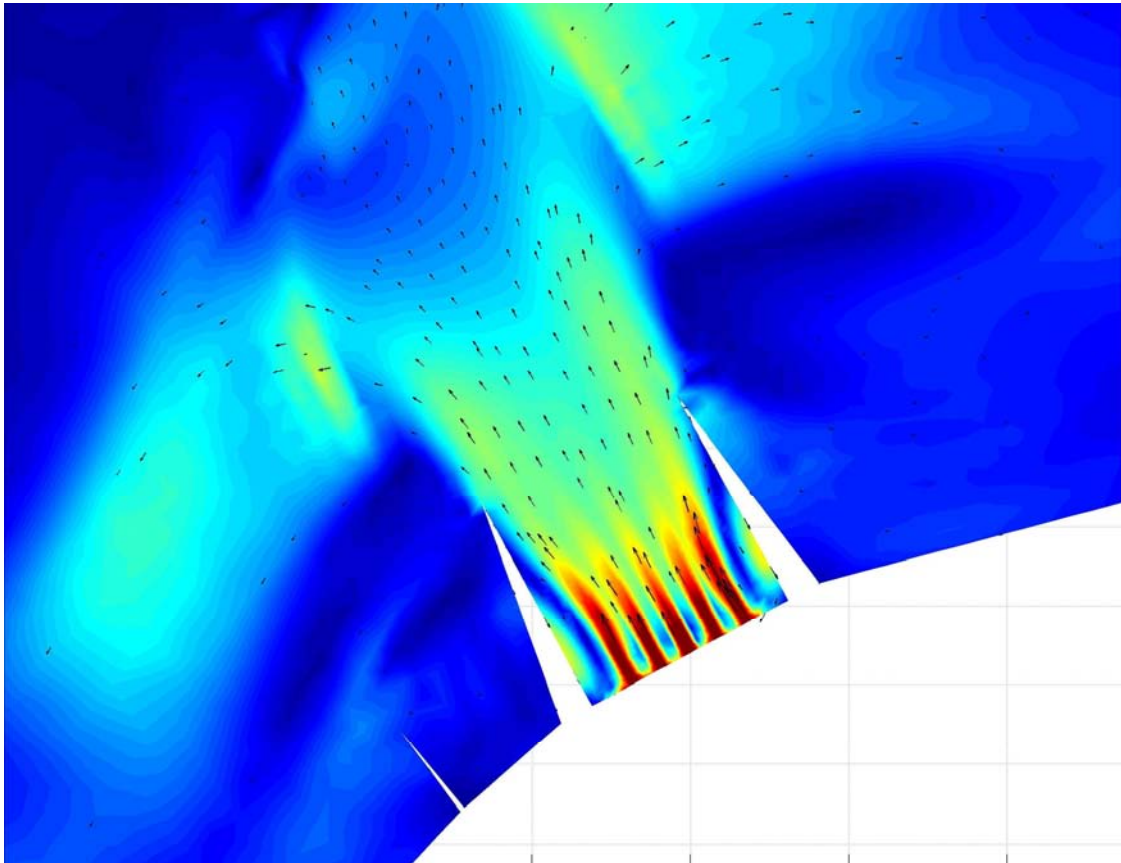
Uit deze tests komt duidelijk naar voren dat het uitstroomkanaal tijdens het spuien nagenoeg geheel gevuld wordt met zoetwater. Het mengproces moet dus verderop gezocht worden, bij de vormgeving van het uitloopkanaal en de monding naar de Waddenzee. Het is daar mogelijk om het dwarsprofiel te vergroten waardoor het water rustiger kan stromen. Door de lagere stroomsnelheden en het bredere dwarsprofiel zal de spuistroom waarschijnlijk wel opgetild worden door een zoutwig.

Met deze conclusies kan een terugkoppeling gemaakt worden naar het voorontwerp. In het ontwerp werd gezocht naar een goede menging van het gespuide water en een stabiele ligging van het uitloopkanaal. Gezien de optredende stroomsnelheden zal het uitloopkanaal een aantal verschuivingen kunnen maken door de zandrug. Vervolgens lijkt het mengen van het gespuide water niet in het uitloopkanaal te gebeuren. Dit zal ergens anders moeten plaatsvinden.

De tekortkoming die uit deze cases naar voren komt, is het ontbreken van een breedte component. Door het verloop van het dwarsprofiel over het complex komt dit sterker naar voren dan gebruikelijk bij een twee dimensionale benadering. Door het smallere profiel op de drempel zal het water hier sneller moeten stromen dan aangegeven in de figuur, hierdoor ontstaat er een onderschatting van de situatie in het uitstroomkanaal. Over de monding van het kanaal is nu de kennis nog beperkt. Om de invloed van het getij te kunnen simuleren is zeker een breedte component nodig. Deze tekortkoming kan alleen maar opgevangen worden door het maken van een drie dimensionaal model. Dit wordt dan ook in het volgende hoofdstuk gedaan.

Hoofdstuk 7

Numerieke 3D simulaties



7.1 Inleiding

7.2 Instellingen van de modellering

7.3 Resultaten van de simulaties

7.4 Analyse van de resultaten

7.5 Samenvatting en conclusies

7 Numerieke 3D simulaties

7.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden met Finlab de driedimensionale numerieke simulaties uitgevoerd. Uit de conclusies van de tweedimensionale simulaties kwam naar voren dat voor een verder onderzoek de breedte in de berekeningen toegevoegd dient te worden. De modellering in Finlab en het gebied om het spuicomplex dat in de modellering is opgenomen, is in hoofdstuk 5 besproken.

In de eerste paragraaf worden de instellingen en de opzet van de vier cases gegeven. Per case worden meer elementen in de modellering opgenomen. In de eerste case is het huidige gebied gemodelleerd en bij de laatste is het nieuwe spuicomplex met een getijdenstroom opgenomen. Vervolgens worden de resultaten behandeld en geanalyseerd. Bij de analyse wordt ook de vergelijking met de vorige berekeningen gemaakt. Aan het eind van het hoofdstuk wordt een samenvatting met conclusies gegeven.

7.2 Instellingen van de modellering

De driedimensionale berekeningen zijn verdeeld over vier cases. In iedere case zijn meer elementen uit de omgeving in de modellering opgenomen. Deze elementen bestaan uit het getij, de aanleg van het spuicomplex en het uitloopkanaal en het in gebruik nemen van het spuicomplex. Hieronder worden de opzet en de instellingen van iedere case besproken. Aan het eind van de paragraaf worden in Tabel 7.1 de kenmerkende getallen voor de simulaties gegeven.

De eerste case is gemaakt in de omgeving zoals die is voor de aanleg van het spuicomplex, de bodemligging van het simulatiegebied is in bijlage D te zien. Er worden twee simulaties gemaakt in deze case, met een vloedstroom en een ebstroom. Het doel van deze simulaties is het controleren van de basismodellering en de resultaten vormen een vergelijkingsbasis voor de situatie met het spuicomplex.

Bij de tweede case is het spuicomplex in het grid opgenomen maar wordt er niet gespuid. De getijdenstroming loopt dan door de Doove Balg en de vloedschaar zonder beïnvloed te worden door het spuidebiet. De bodemligging met inpassing van het spuicomplex is in bijlage D te zien. Dit is de situatie die in de praktijk veel zal voorkomen en is van belang voor het onderzoek naar de morfologische veranderingen.

Bij derde case is de spuisluis in gebruik bij kentering van het getij. De getijdenstroom is de gehele simulatie uitgezet. De dichtheidsstroming door het uitloopkanaal naar de Doove Balg kan dan bestudeerd worden. De stroomsnelheid die opgelegd is bij de drempel van de spuisluis is gebaseerd op het spuibeheer en de afvoerrelatie. Voor het verwachte gemiddelde spuidebiet is een representatieve stroomsnelheid gezocht in de afvoerrelatie, dit is 3.0 m/s.

Ten opzichte van de tweedimensionale simulaties wordt hier dus alleen de breedte toegevoegd. Daarmee vormt deze case een goede aansluiting naar de driedimensionale simulaties van case 4.

In de vierde case wordt een totale simulatie uitgevoerd. Er wordt dan gespuid bij zowel opkomend als afgaand getij. Dit geeft een beeld van de situatie wanneer het spui gebruikt wordt. De verschillende invloeden van de hiervoor gemaakte simulaties komen dan bij elkaar.

Tabel 7.1, het overzicht van de instellingen voor de 3D cases.

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Horizontale stapgrootte $\Delta x, \Delta y$ [m]	10 – 100	10 – 100	10 – 100	10 – 100
Verticale stapgrootte Δz [m]	1.3 - 0.1	1.3 - 0.1	1.3 - 0.1	1.3 - 0.1
Tijdstap grootte Δt [s]	0.5	0.5	0.5	0.5
Simulatieperiode T [min]	50	50	83	83 - 74
getijdenstroomsnelheid u [m/s]	0.50	0.50	0.00	0.50
Waterpeil Waddenzee [m tov NAP]	-0.90	-0.90	-0.90	-0.90
Spuidebiet Q [m ³ /s]	0	0	2545	2545
Stroomsnelheid drempel u_d [m/s]	0	0	3.00	3.00

7.3 Resultaten van de simulaties

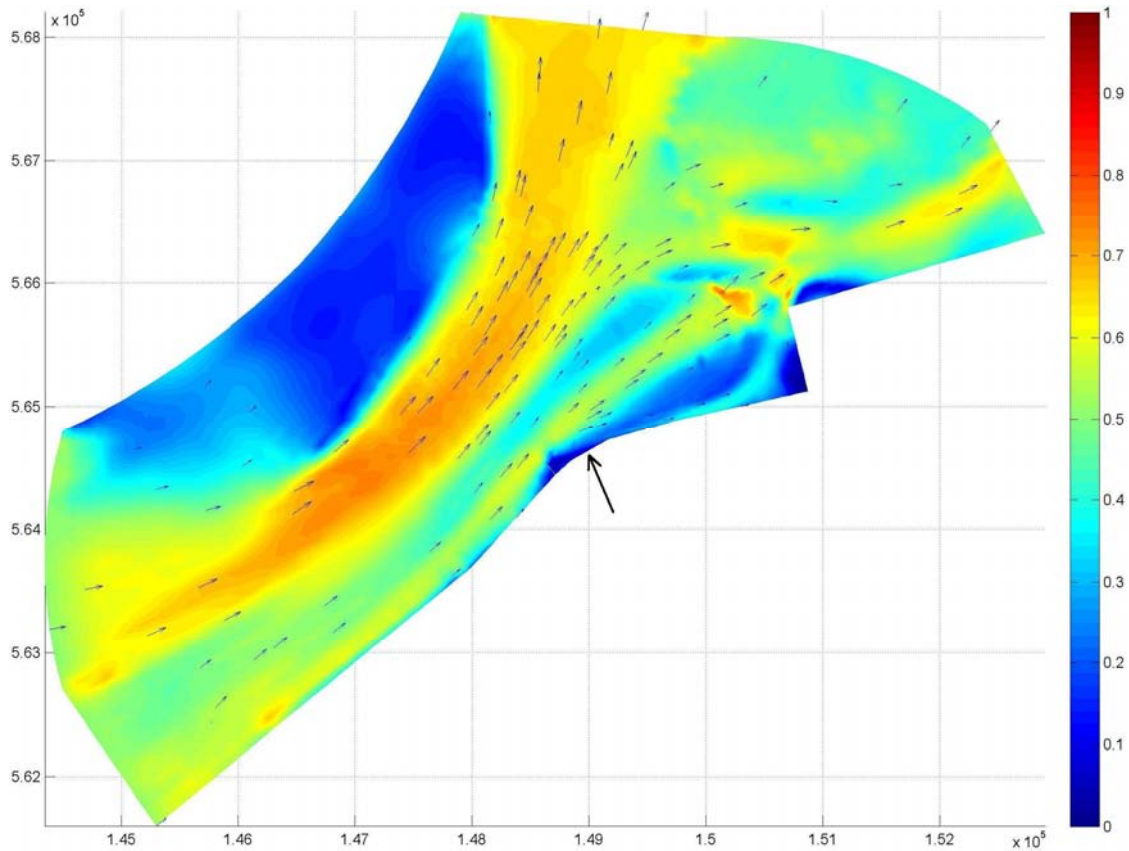
In dit hoofdstuk worden per paragraaf de resultaten van de vier casestudies besproken. Drie van de cases bestaan uit twee simulaties, een simulatie voor het opkomende getij en een voor het afgaande getij. De andere case bestaat uit één simulatie omdat hier geen getijdenstroming bij optreedt. Bij de simulaties van de eerste twee cases worden steeds drie afbeeldingen gegeven. De stroomsnelheid aan het wateroppervlak, de stroomsnelheid over de hartlijn van het spuicomplex en de dieptegemiddelde snelheid. De schaal voor de snelheid is in al deze figuren gelijk gehouden. Met dezelfde schaal is het eenvoudiger om de resultaten van verschillende simulaties te vergelijken. De plots voor de figuren worden gemaakt aan het einde van de simulatieperiode. De stroming is dan goed ontwikkeld.

Bij de andere twee cases wordt de spuisluis in gebruik genomen. Daarom zijn er bij deze simulaties ook figuren gegeven van de dichtheidsstroming en van de waterstand in de omgeving van de spuisluis. Bij deze figuren wordt meer ingezoomd op het gebied rond het spui. Dit om meer details te kunnen onderscheiden en de inspelverstoreningen aan de randen weg te laten. De schaalverdeling is hier weer gelijk aan die in de andere simulaties. Maar omdat er in de spuistroom beduidend hogere snelheden optreden is hier steeds een aparte plot van gemaakt. Op deze manier kunnen de verschillende situaties nog goed vergeleken worden en is de spuistroom ook goed zichtbaar. Naast deze extra plot is de spuistroming ook in bijlage G gegeven. De ontwikkeling van de stroming is daar afgebeeld met een grotere schaalverdeling.

In iedere figuur is de locatie van de spuisluis met een pijl aangegeven. In de richting van deze pijl zijn ook de dwarsdoorsneden gemaakt. De doorsneden lopen vanaf de drempel van het spui naar de overkant van de Doove Balg. Bij de eerste case gaat dit dus over de zandrug en bij de overige door het uitloopkanaal. In de doorsneden wordt steeds de snelheidsverdeling over de diepte gegeven. Bij de cases waarbij het spui in gebruik is wordt daaronder ook de dichtheid gegeven.

7.3.1 Case 1, Uitgangssimulatie

In deze simulatie is de huidige situatie gemodelleerd bij een rustige getijdenstroom van 0.50m/s. De case is opgedeeld in twee delen, een voor het opkomende getij en een voor het afgaande. Hieronder wordt eerst het opkomende getij behandeld, dit stroomt vanuit het zuidwesten naar het noordoosten. Het simulatiegebied met de stroomsnelheden aan het oppervlak zijn in Figuur 7.1 gegeven.



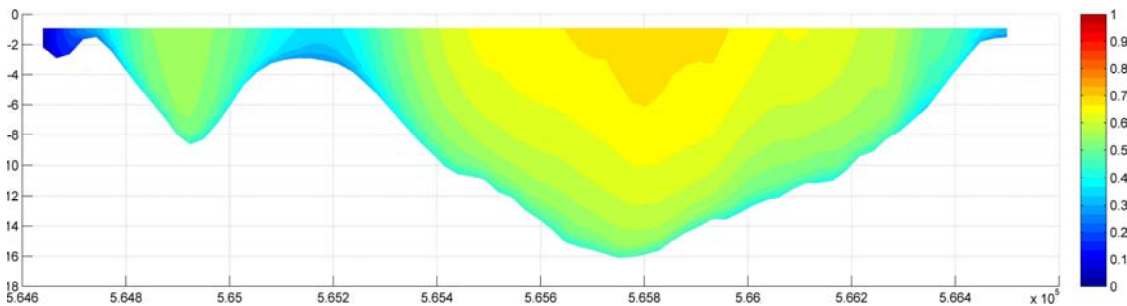
Figuur 7.1, de stroomsnelheid aan het oppervlak in de uitgangssituatie bij opkomend getij.

In dit stroompatroon kunnen de zandplaten duidelijk worden terug gevonden op de plaatsen met een lage stroomsnelheid. De harde rand in de binnenbocht van de Doove Balg valt hier sterk bij op. De getijdenstroom wordt hier duidelijk omheen gedrukt. Bij dit punt in de Doove Balg wordt de grootste snelheid gehaald en is de diepte ook het grootst. De zandrug langs de Afsluitdijk is ook duidelijk terug te vinden aan de lage stroomsnelheden. De stroomsnelheden liggen hier aan het oppervlak zelfs onder de kritische transportwaarden voor bodemtransport.

Aan het eind van de vloedsehaar is boven de ondiepte een versnelling te zien, wat verschillende oorzaken kan hebben. Ten eerste hoort de stroming bij opkomend getij door een vloedsehaar te gaan. Het watervolume dat daar stroomt, is dus niet ongebruikelijk en door de plaatselijke versnelling wordt de afvoer constant gehouden. Een andere oorzaak van deze versnelling kan te maken hebben met de modellering. Vlak achter deze ondiepte ligt de erosiekuil van de spuisluis bij Kornwerderzand. Door deze grotere diepte aan de rand van het simulatiegebied kan het model meer debiet trekken. Dit moet bij de andere simulaties in de gaten gehouden worden.

De strekdam bij de Afsluitdijk blokkeert een deel van de stroming door de vloedsehaar. Dit is te zien aan de lage snelheden achter de dam. De leidammen van het spuicomplex zijn ongeveer twee maal zo lang en zullen waarschijnlijk een grotere blokkering veroorzaken.

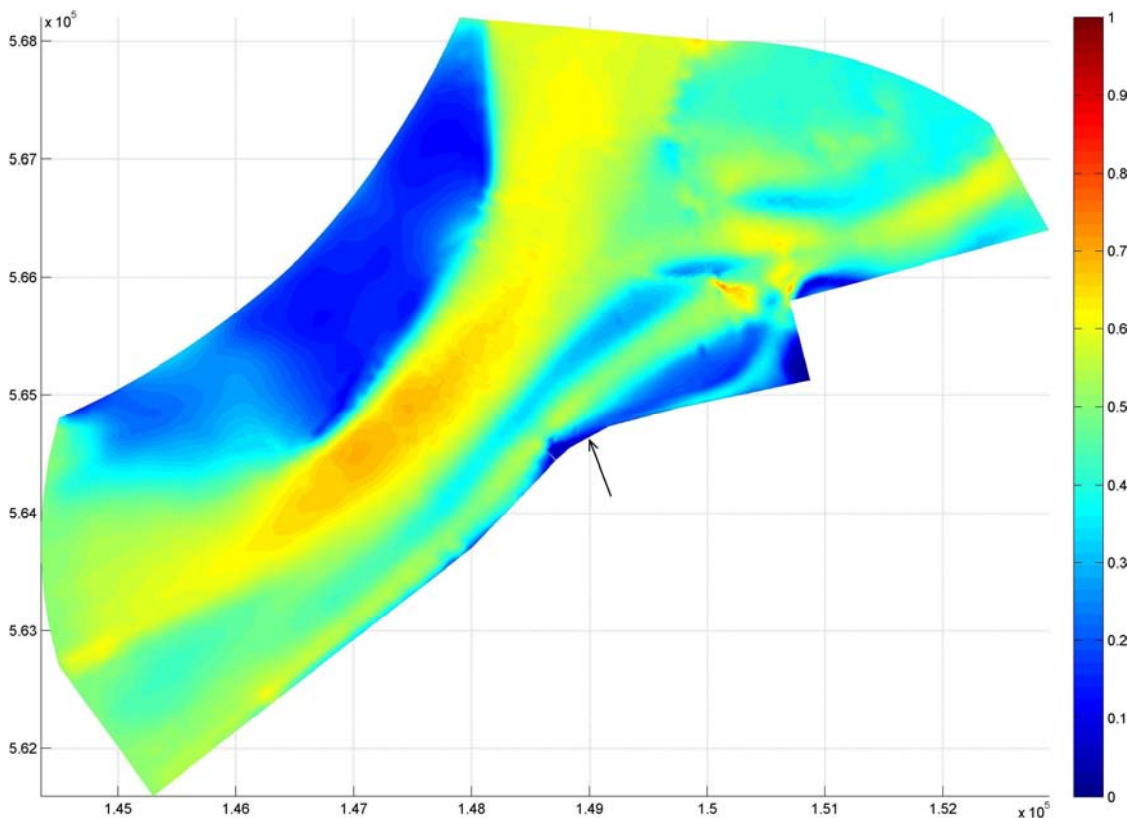
Vervolgens wordt er gekeken naar de dieptedoorsnede over de hartlijn van het spuicomplex, die is gegeven in Figuur 7.2. De Afsluitdijk ligt geheel links in de figuur en de Doove Balg rechts. De zandrug tussen de vloedsehaar en de Doove Balg is juist naast het midden te zien.



Figuur 7.2, de dieptedoorsnede van de snelheid over de hartlijn van het toekomstige spuicomplex.

Aan de afbeelding is niet veel opmerkelijks te zien. De stroomsnelheid neemt in de nabijheid van de bodem af en heeft het maximum aan het oppervlak. Deze natuurlijke verdeling is ondanks het grove verticale grid goed terug te zien.

Ten slotte zijn nog de diepte gemiddelde snelheden geplot in Figuur 7.3.



Figuur 7.3, de dieptegemiddelde stroomsnelheid in de uitgangssituatie bij opkomend getij.

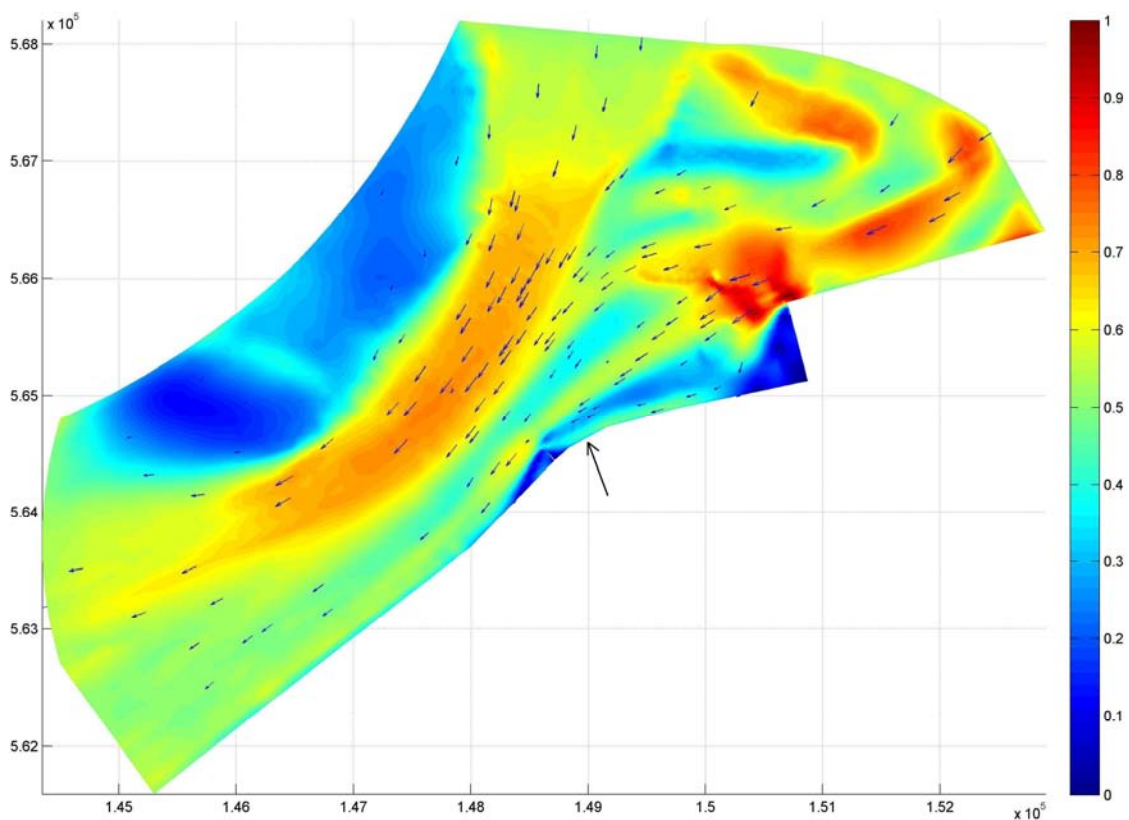
Een aantal punten, die bij de stroming aan het oppervlak opvielen worden hier bevestigd. Dit zijn de lage snelheden op de wadplaat in de binnenbocht van de Doove Balg en het grote debiet door de Boontjes. Hier is ook te zien dat er vanuit de Doove Balg ook een grote stroom naar de Boontjes is. Deze stroom loopt noordelijk langs de zandrug en de vloedschaar.

In de Stroomatlas is te zien dat bij deze getijden de snelheden in de Boontjes lager zijn dan in de Doove Balg, zie Dienst der Hydrografie (1992). Dit komt overeen met de gepresenteerde

resultaten. De oorzaak van de sterke stroming aan het eind van de vloedschaar ligt dus waarschijnlijk niet in de modellering. Want in de Stroomatlas is bij de overgang van de vloedschaar naar de Boontjes een hoge stroomsnelheid te herkennen.

Een opmerkelijk punt in deze figuur is de erosiekuil achter de strekdam. Door de grote diepte is de gemiddelde snelheid daar erg laag, terwijl de oppervlaktesnelheid daar aanzienlijk is. Dit kan betekenen dat de erosiekuil stabiel blijft liggen. Door de lage snelheden onderin de waterkolom zal het bodemtransport afnemen.

In dit tweede deel van de case wordt gekeken naar de ebstroom, dus bij afgaand getij. In Figuur 7.4 zijn de snelheden aan het oppervlak geplot, deze zijn in de zelfde schaal als de vorige afbeeldingen.



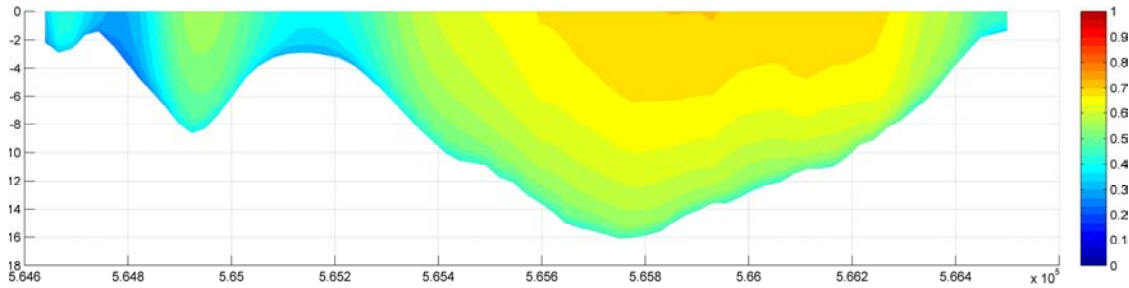
Figuur 7.4, de stroomsnelheid aan het oppervlak in de uitgangssituatie bij afgaand getij.

Er zijn hier vele overeenkomsten te zien met de vorige simulatie. Het gebied met het grove sediment in de binnenbocht van de Doove Balg drukt ook hier de stroming naar het midden. Bij de strekdam van Kornwerderzand zijn hier ook weer een aantal neren te zien. Als gevolg hiervan zijn er ontgrondingen in de hoek tussen deze dam en de Afsluitdijk. In deze zelfde hoek loopt ook een stroming direct langs de Afsluitdijk. De vloedschaar is hier gesplitst in twee geulen die parallel lopen. Bij de aanleg van de extra spuisluis zal deze tweede geul geblokkeerd worden. De stroming zal hierdoor een andere route moeten vinden.

Bij de instroomrand in het noordoosten is een aantal inspeelverstoringen te zien. Op de ondiepe wadplaat loopt de snelheid over een kort traject sterk op, dit dempt later weer goed uit. Bij de erosiekuil van Kornwerderzand dempt de inspeling minder goed uit. De snelheden zijn hier te

hoog. Dit kan leiden tot een te groot debiet door de vloodschaar en te grootte stroomsnelheden over de zandrug.

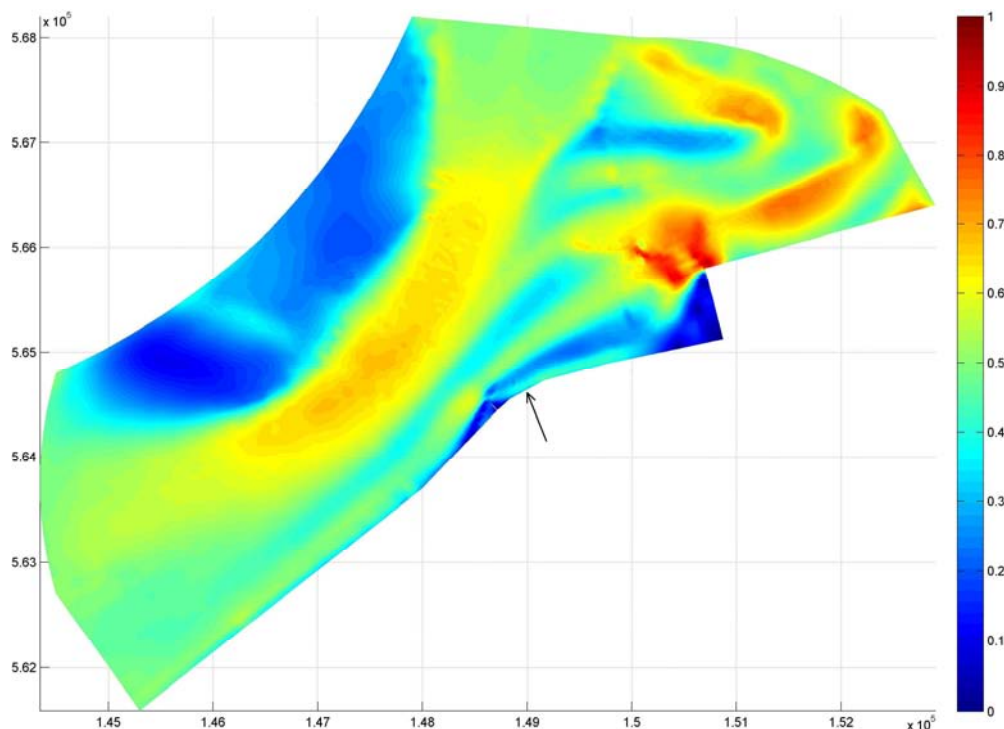
Wanneer er gekeken wordt naar de dwarsdoorsnede in Figuur 7.5 wordt dit bevestigd. De stroming over de zandrug langs de Afsluitdijk gaat hier sneller dan bij het opkomende getij. Voor een vloodschaar is het niet gebruikelijk om een sterkere ebstroom te hebben.



Figuur 7.5, het diepteddoorsnede van de snelheid over de hartlijn van het toekomstige spuicompex.

De verdeling van het debiet over de breedte van het profiel is sterk veranderd. De stroming vlak langs de Afsluitdijk is hier goed op terug te zien aan de linker kant. Bij het opkomende getij lag deze geul in de kolk van de strekdam, maar in deze simulatie voert het een debiet. De stroming in de Doove Balg is hier meer over de breedte verdeeld. Dit komt door de brede aanvoer route van de Doove Balg en door de stroming uit de Boontjes.

De dieptegemiddelde snelheden over het gehele simulatie gebied is in Figuur 7.6 gegeven



Figuur 7.6, de dieptegemiddelde stroomsnelheid in de uitgangssituatie bij afgaand getij.

Hier valt op dat het debiet door de vloodschaar iets te groot is. Dit valt af te leiden uit de gemiddelde snelheid juist achter de strekdam. De snelheid is hier te hoog voor een stabiele

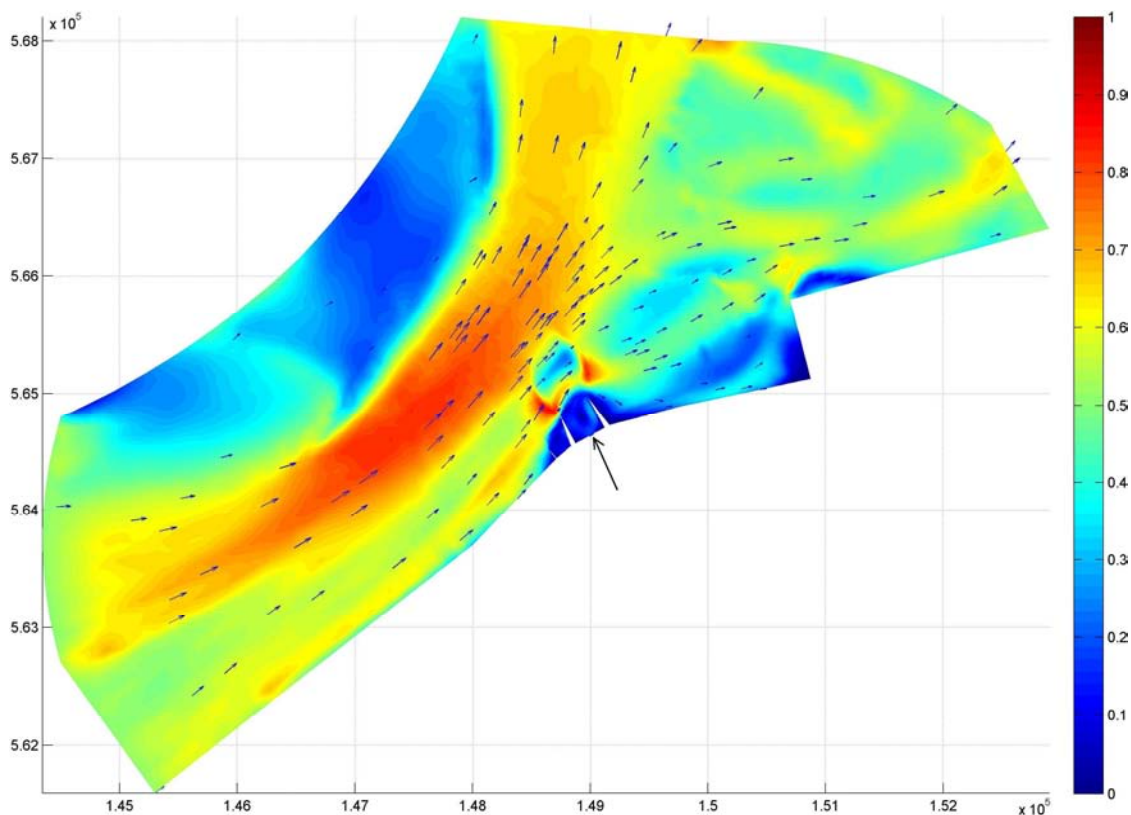
bodemligging. Als dit de ware situatie is, was de erosiekuil waarschijnlijk groter geweest in westelijke richting. De snelle stroom had dan meer bodemmateriaal meegenomen. Bij het opkomende getij kwam er namelijk wel een stabiele ligging naar voren.

De zandrug is duidelijk terug te zien. De snelheid hierboven is van de zelfde orde als bij het opkomende getij. Echter aan de oostelijke rand is de snelheid wel hoog, dat is al besproken in de vorige alinea's. Een oorzaak van de hogere snelheden bij het afgaande getij kan het verschil in debiet op de randvoorwaarden zijn. Bij de randvoorwaarden wordt alleen een snelheid opgegeven. Het oppervlak van de instroomranden bij opkomend en afgaand getij verschilt. Dit betekent dat er dan dus ook een afwijking in het instroomdebiet is.

7.3.2 Case 2: Aangepast gebied met spuicomples

Het spuicomples met de leidammen en het uitlooppkanaal zijn bij deze simulatie in het grid opgenomen. Het bodemprofiel is zoals dat na de aanleg van de extra spuisluis zal zijn. Het spui blijft echter wel gesloten in deze simulatie. Dit is om de invloed van de geometrie van het complex op de huidige stroming te kunnen nagaan. In de praktijk zal deze situatie vaak voorkomen aangezien het spui gemiddeld 20.5 uur per dag gesloten zal zijn. Er zijn hier ook twee simulaties gemaakt, een bij opkomend getij en een bij afgaand.

De eerste simulatie is gemaakt bij opkomend getij met een snelheid van 0.50m/s. De instellingen zijn verder gelijk aan die van de vorige simulatie. De stroomsnelheid aan het oppervlak is in Figuur 7.7 afgebeeld. De snelheden liggen hier over het algemeen iets hoger dan bij de vorige case. Dit komt door een schommeling in de waterstand, bij het gebruik van Riemannranden.



Figuur 7.7, de stroomsnelheid aan het oppervlak na aanleg van de spuisluis bij opkomend getij.

De overeenkomsten die opvallen met de vorige case zijn het harde punt in de binnenbocht van de Doove Balg en de geul langs de Afsluitdijk bij Kornwerderzand. De zandplaat met het grove sediment in de binnenbocht van de Doove Balg vormt wederom een opstakel voor de stroming. Met de sterke stroming die er nu langs stroomt, lijkt het niet waarschijnlijk dat dit punt onveranderd blijft. Er zal waarschijnlijk erosie plaats gaan vinden. Bij het wegspoelen van dit harde punt is de ligging van de Doove Balg ook niet meer vast.

De geul tussen de nieuwe spuisluis en Kornwerderzand langs de Afsluitdijk leek geblokkeerd te gaan worden met de aanleg van de leidammen. Maar er blijft duidelijk een debiet doorheen stromen.

Wat sterker opvalt, zijn de veranderingen door de aanleg van het spuicomplex. Vooral rond het uitloopkanaal zijn grote wijzigingen in de stroming. Op de bovenranden van het talud naar het dieper gelegen kanaal treden grote versnellingen op in de stroming. Het uitloopkanaal lijkt meer water aan te trekken. Dit extra volume komt niet uit de naast gelegen geulen maar over de zandrug. Aan de pijlen die in het kanaal geplot zijn is te zien dat de stroomrichting gelijk blijft.

Over de zandrug staat dus een sterkere stroom naar het uitloopkanaal. Door de vloedschaar stroomt het water ook sneller naar de spuisluis toe. Vlak voor de leidammen van het spui begint de stroming te versnellen en stroomt het water hard het uitloopkanaal in. De erosiekuil van de strekdam zorgt hier voor een goede aansluiting. Deze ligt namelijk precies voor de leidam. Het debiet dat door deze diepe en smalle opening stroomt, vormt een grote neer tussen de leidammen in het uitstroomkanaal.

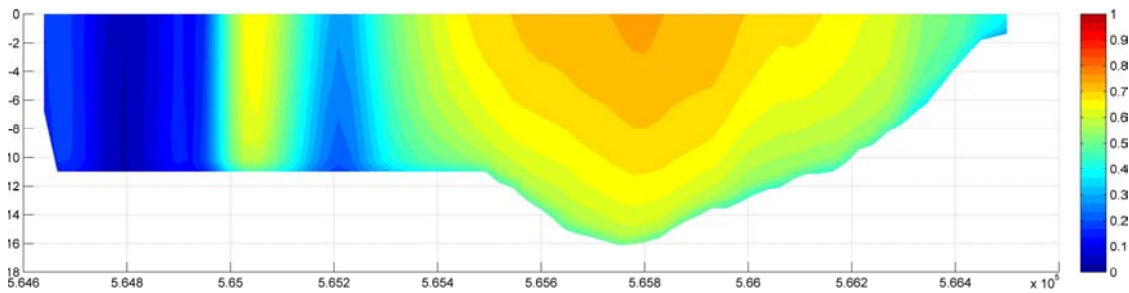
Bij de aanleg van de leidammen zal waarschijnlijk de erosiekuil van de strekdam weer opgevuld worden. Bij de hoofden van de leidammen is een goede bodembescherming nodig voor de stabiliteit. Dit is niet te combineren met een erosiekuil.

Aan de westelijke zijde van het uitloopkanaal is geen diepe aansluiting met de vloedschaar. Het water stroomt hier voor een groot deel over de zandrug naar de Doove Balg en deels verder door de vloedschaar. De sterke stroom over de zandrug maakt deze minder duidelijk terug te vinden in de afbeelding. De stabiliteit van de bodemligging zal hier zeker in het geding komen. Het talud en de zandrug zullen dan eroderen.

Het volume dat door de vloedschaar verder stroomt, is sterk afgenomen. Dit is de enige plaats waar de snelheid lager is dan in case 1. Ook aan het eind bij de verbinding naar de Boontjes is de snelheid lager. Dit komt door de obstructie die de leidammen vormen. Wanneer er door erosie een grote verbinding langs de oostelijke leidam ontstaat, zal de snelheid daar weer toenemen. Als het water weer ongehinderd door de vloedschaar kan stromen, zal de zandrug ook ontlast worden. Dit komt de stabiliteit van de bodem op de zandrug ten goede.

Ten slotte lijkt het rustig stromende water in de monding van het uitloopkanaal de stroming in de Doove Balg om te leiden. De stroming ligt eerst langs de zandrug, tot de monding van het uitloopkanaal, daar wordt het van de zandrug afgedrukt. Dit kan betekenen dat de monding stabiel blijft liggen omdat de stroomsnelheden daar niet oplopen.

De dieptedoorsnede over de hartlijn van de spuisluis is gegeven in Figuur 7.8. Hier is in terug te zien dat het waterpeil hier hoger staat dan in de vorige simulaties. Hier staat het waterpeil op nul en in Figuur 7.2 is te zien dat het waterpeil iets onder de nul staat.



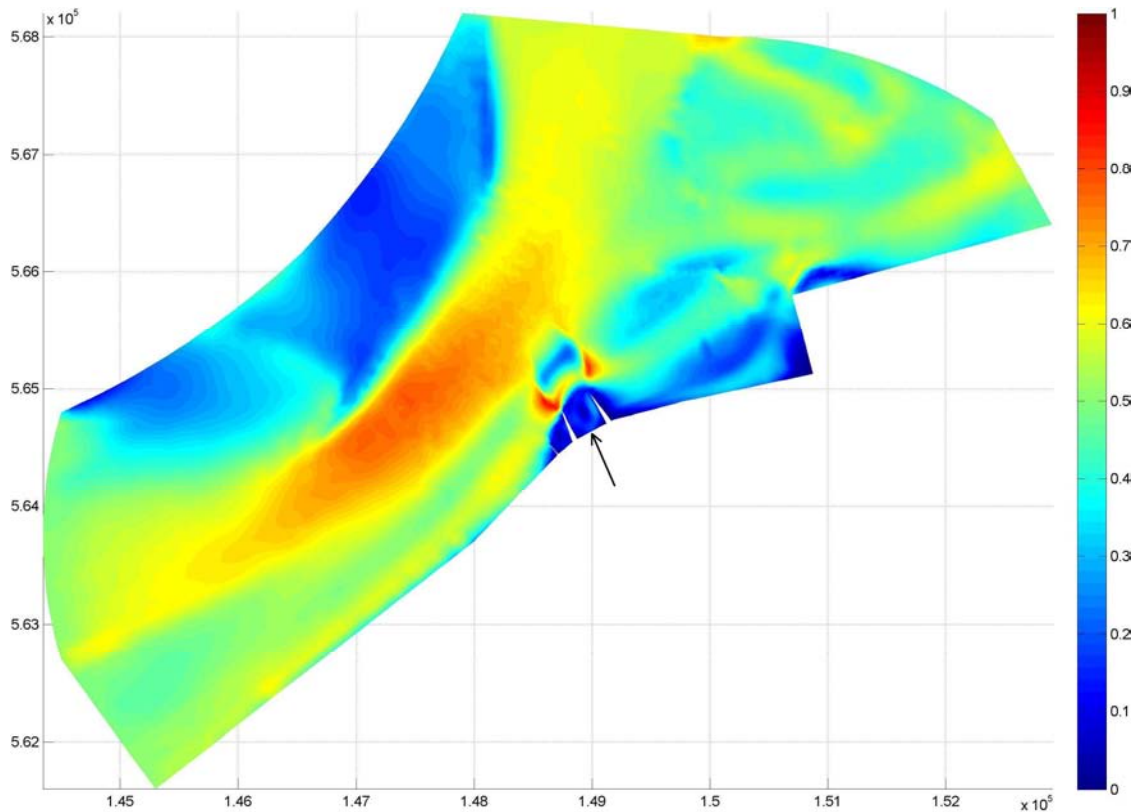
Figuur 7.8, de dieptedoorsnede van de snelheid over de hartlijn van de spuisluis.

De ligging van de leiddammen door de vloedschaar is hier in terug te zien. In de blauwe zone aan de linkerkant lagen eerst twee geulen: de vloedschaar en de geul vlak langs de Afsluitdijk. Het water wordt nu met een curve door het uitloopkanaal geleid. De neren die hierbij opgewekt worden zijn goed terug te zien.

Met de lage snelheid in het midden van het uitloopkanaal is het niet waarschijnlijk dat er een kortsluiting ontstaat tussen de verschillende getijde geulen. De stroming komt hier tot stilstand. In het geval van een kortsluiting tussen de vloedschaar en de Doove Balg moet de snelheid juist toenemen.

De hoge stroomsnelheden in de Doove Balg en de vloedschaar treden niet alleen op aan het oppervlak, maar ook aan de bodem. Pas vlak boven de bodem begint de snelheid te verminderen, dit duidt op een meer turbulente stroming. De diepteverlopende snelheidscurve is dan meer afgevlakt. Het kan ook het gevolg zijn van een korte inspeeltijd, dit was bij de tweedimensionale simulaties ook het geval. Deze hoge bodemsnelheden kunnen vooral in het uitloopkanaal voor erosie zorgen. Het lijkt er dus niet op dat de ligging daar stabiel is.

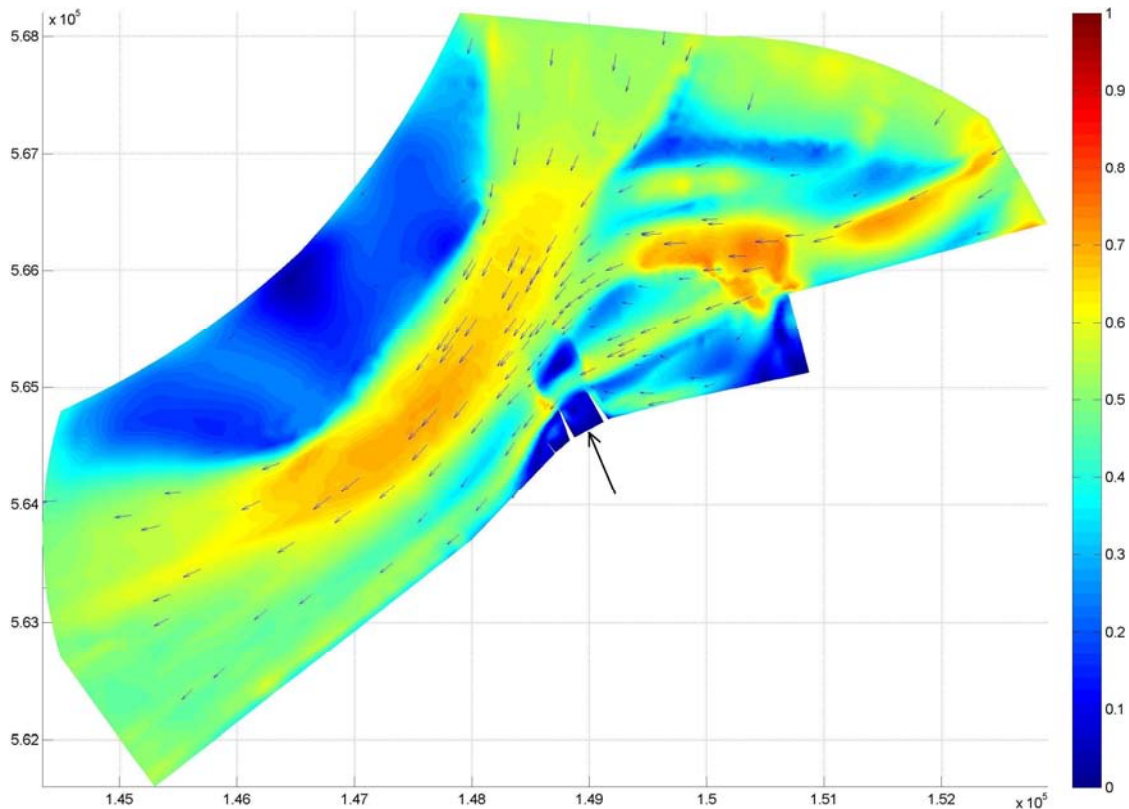
Als laatste bij deze simulatie zijn de diepte gemiddelde snelheden geplot in Figuur 7.9. De dieptegemiddelde snelheden komen in de Doove Balg beter overeen met de vorige case dan de oppervlakte snelheden. De hogere snelheden worden door de grotere diepte gecompenseerd. Dit maakt het beter mogelijk om de invloed van de aanleg van het spuicomplex te zien. Een aantal opmerkelijk resultaten uit de oppervlakte stroming kunnen hiermee bevestigd worden.



Figuur 7.9, de diepte gemiddeldesnelheid voor het aangepaste gebied bij opkomend getij.

De stroomsnelheid is door de inpassing van het spuicomples toegenomen over de zandrug en in de vloodschar naar het uitloopkanaal toe. Aan het eind van de vloodschar is de stroomsnelheid afgenomen. En aan de randen van het uitloopkanaal zijn er grootte veranderingen in de stroomsnelheid. Het debiet dat over de zandrug stroomt en door de vloodschar naar de spuisluis toe is vergroot door de aanleg van het uitloopkanaal.

In het tweede deel van deze case wordt er gekeken bij afgaand getij. Net als bij de vorige simulaties zijn hier de overige instellingen gelijk gebleven, slechts de getijdenrichting is omgedraaid. De stroomsnelheden aan het oppervlak zijn in Figuur 7.10 gegeven. Het waterpeil is in deze simulatie wel op het gewenste niveau gebleven. Hierdoor zijn de stroomsnelheden van de zelfde grootte als in de eerste case.



Figuur 7.10, de stroomsnelheid aan het oppervlak na aanleg van de sluisluis bij afgaand getij.

Het stromingspatroon is bij het afgaande getij minder ingrijpend veranderd door de aanleg van het spuicomplex. De ebstroom maakte waarschijnlijk al weinig gebruik van de vloodschaar. Dus de verandering die daar is door de aanleg van het spuicomplex heeft minder invloed. De stroomsnelheden zijn nergens sterk gestegen, toch zijn er een aantal resultaten van het aangepaste stroombeeld.

De leidammen bij de spuisluis vormen een duidelijke obstructie voor de stroming. Ten zuidwesten hiervan zijn de snelheden in de vloodschaar en op de zandrug sterk afgenomen. Op het talud van het uitloopkanaal blijft de stroming ook beduidend rustiger dan bij opkomend getij. De versperring van de vloodschaar is dan ook door de oostelijke leidam. Uit de vorige simulatie kwam ook naar voren dat de oostelijke leidam een duidelijke obstructie vormt. Dit maakt de toevoer van water lastiger, wat vervolgens de stroomsnelheid op het over liggende talud verlaagt.

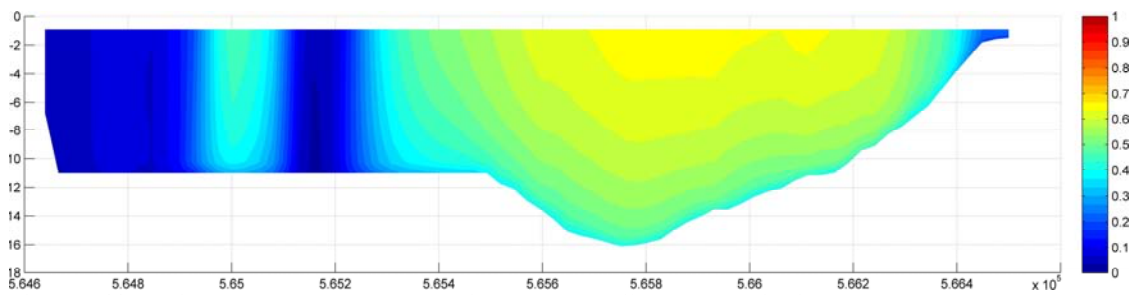
Deze blokkade lijkt door te werken in de Boontjes. De stroming is hier meer naar de Doove Balg gericht en minder naar de vloodschaar. Ook over de zandrug is de stroming toegenomen en meer naar de Doove Balg gericht. In de voorgaande situatie zonder spuicomplex, was stroming boven de zandrug parallel aan die in de Doove Balg.

In het uitloopkanaal valt de stroming bijna stil. Het verwachte gevaar van een kortsluiting tussen de verschillende geulen gaat hier dus niet op. De stroomrichting blijft door het gehele kanaal gelijk aan die in de Doove Balg. Ook in de Doove Balg trek de stroom niet naar het uitloopkanaal toe. Dit betekent dat bij het afgaande getij de bodemstabiliteit bij het spuicomplex groter is dan bij het opkomende getij.

Bij de leidammen en de strekdam ontstaan wel een aantal neren. Dit wordt al bij de aanstroom van de oostelijke leidam veroorzaakt. Het geultje langs de Afsluitdijk blijft in deze situatie nog steeds in gebruik en trek langs de leidam. Hierdoor ontstaat een stroom dwars op die uit de vloodschaar. Bij het samen komen van deze twee stromingen in combinatie met de leidam kunnen dan gemakkelijk neren ontstaan.

Deze stroming langs de leidam kan bij onvoldoende bodembescherming de stabiliteit in gevaar brengen. De optredende snelheden zijn hier al groter dan de kritische waarden voor bodemtransport.

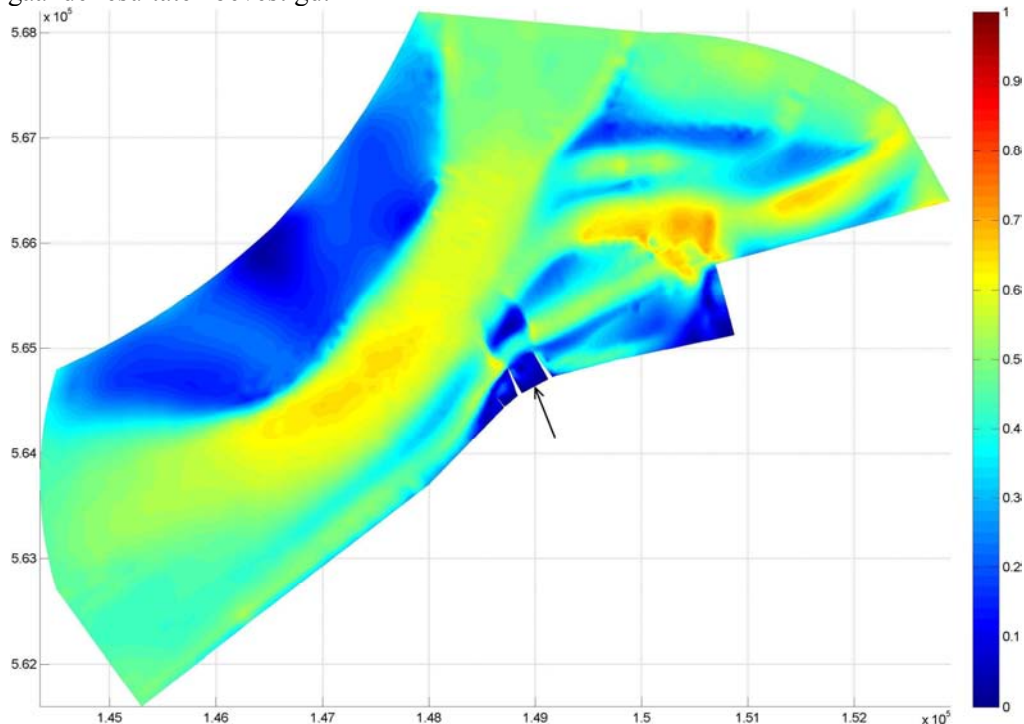
Bij de dieptedoorsnede in Figuur 7.11 wordt het beeld uit de oppervlaktestroming bevestigd. De stroming is erg rustig en bij de bodem zijn slecht erg lage snelheden.



Figuur 7.11, de dieptedoorsnede van de snelheid over de hartlijn van de spuisluis.

Er is hier terug te zien dat in het uitloopkanaal de snelheid sterk terug valt en er geen neer of kortsluiting ontstaat. Geheel links in de figuur is tussen de leidammen wel een grootte draaiing van het watervolume te zien.

De dieptegemiddelde snelheid is in Figuur 7.12 gegeven, ook in deze figuur worden de voorgaande resultaten bevestigd.



Figuur 7.12, de dieptegemiddelde snelheid voor het aangepaste gebied bij afgaand getij.

De stroming vanuit de Boontjes trekt meer in de richting van de Doove Balg. Op de verbinding hiertussen zijn de hoogste snelheden waar te nemen. Boven de noordoostelijke punt van de zandrug zijn de snelheden ook toegenomen. De ebstroom vanuit de Boontjes lijkt dus een andere route te nemen dan bij de huidige situatie.

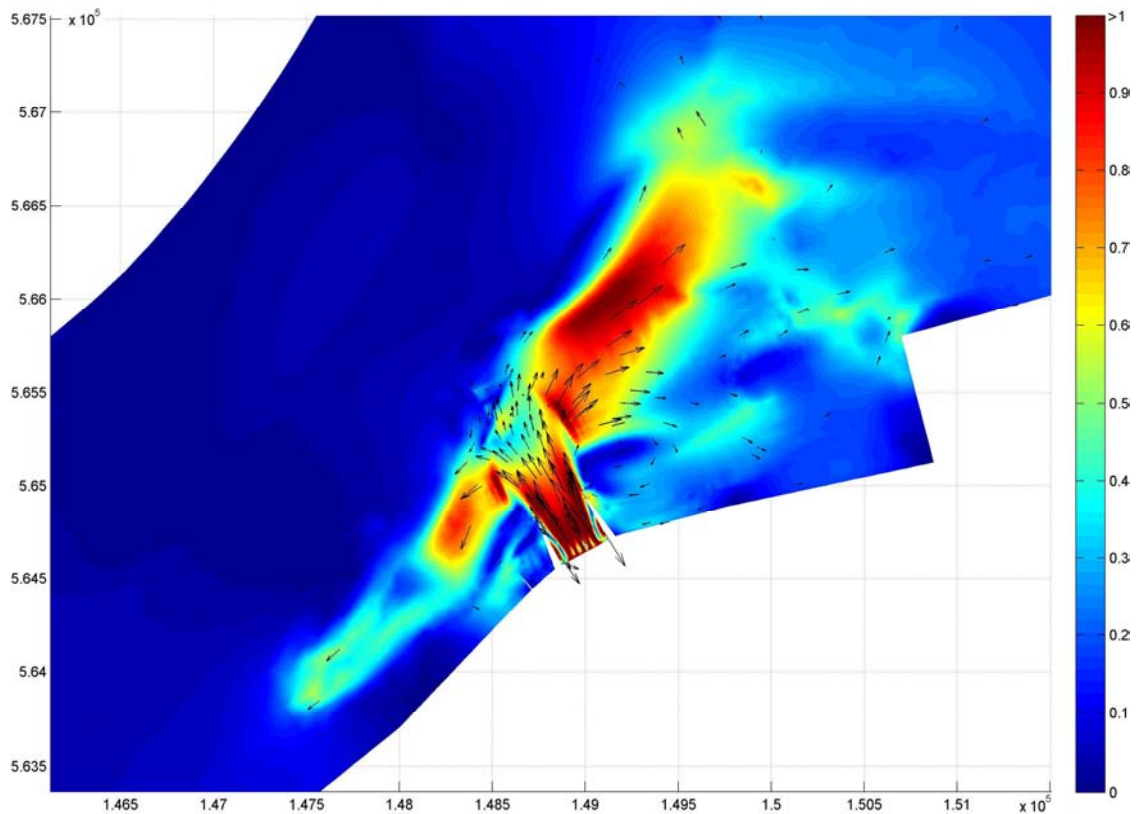
Tussen de nieuwe spuisluis en die bij Kornwerderzand zijn de dieptegemiddelde snelheden toegenomen. Dit is het gevolg van het verplaatsen van de stroom naar een ondieper stuk. Door de bolkering van de leidammen in de vloedsehaar is de stroming gedwongen om meer over de zandrug te gaan. Hierdoor stijgt de gemiddelde snelheid relatief sterk. Door deze obstructie is de stroming ook meer door de geul langs de Afsluitdijk gaan liggen. Door de hogere weerstand in de vloedsehaar is dit een relatief goede route geworden. Dit is een slechte ontwikkeling voor de stabiliteit van de Afsluitdijk en de leidam.

Ten westen van de nieuwe spuisluis is de stroming sterk teruggevallen. Door de blokkade van het nieuwe spuicomplex komt er nog maar een klein debiet door de vloedsehaar. De diepte gemiddelde snelheid komt hier nauwelijks boven de 0.25m/s uit, terwijl dit voorheen hoger lag.

7.3.3 Case 3: Spuien bij kentering

In deze case wordt het nieuwe spuicomplex in gebruik genomen. Na het op gang komen van de spuistraal wordt er meer dan een uur met een constant debiet gespuid van 2545m³/s. Het getij is bij deze simulatie weggelaten om de invloed van de spuistraal te kunnen bekijken. Naast de gebruikelijke afbeeldingen van de stroming die ook bij de vorige cases zijn gegeven, zijn er nu ook figuren met de dichtheid. De dichtheid wordt aan het oppervlak gegeven en ook bij de doorsneden over de hartlijn van het spuicomplex.

De oppervlakte stroming is weer als eerst geven in Figuur 7.13. De ontwikkeling van de stroming is in bijlage G gegeven. Bij de afbeelding is ingezoomd op het gebied bij het spuicomplex waar een stroomsnelheid optreed. Buiten het afgebeelde gebied zijn alleen stroomsnelheden van kleiner dan 0.1m/s, deze zijn daarom minder interessant. De schaalverdeling is weer gelimiteerd tot 1.0m/s, hoewel de snelheid op de drempel oplopen tot 3.0m/s. Dit betekent dat een snelheid boven de schaalgrens donkerrood wordt afgebeeld.



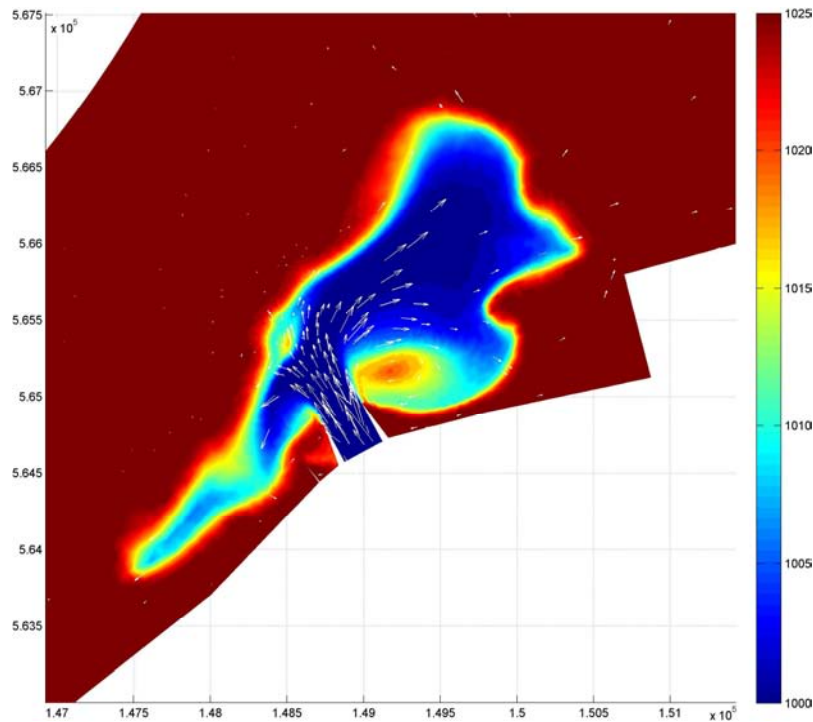
Figuur 7.13, de stroomsnelheid aan het oppervlak wanneer gespuid wordt bij kentering.

Op de linkerrand van het totale simulatiegebied is een instabiliteit, in de hoek begint de snelheid ten opzichte van de omgeving sterk op te lopen. Dit is niet in de figuur terug te zien omdat het te ver van de spuisluis ligt. De simulatie is daarom ook gestopt voordat dit invloed kon hebben op het verdere simulatiegebied.

In de figuur zijn de vijf spuistralen te herkennen aan de neren die er liggen. Tussen en naast deze stralen zijn neren met een tegengestelde stroomrichting. Aan het eind van het uitstroomkanaal heeft de stroming zich verspreid over de breedte en zijn er geen neren meer. Wat opvalt, is dat de stralen uit de binnen gelegen spuikolken minder ver doordringen dan de buitengelegen. De buiten gelegen spuistralen zijn op grotere afstand van de spuisluis nog te onderscheiden in de figuur. Dit geeft een gekromd profiel in de snelheidsverdeling aan het oppervlak.

Het verrassende wat uit deze simulaties naar voren komt, is dat de spuistroom het uitloopkanaal vervolgens beperkt gebruikt. De stroming gaat niet rechtdoor naar de Doove Balg, maar buigt af over de zandrug. Boven de ondieper gelegen zandrug zijn de snelheden fors toegenomen. Aan de pijlen in de figuur is ook te zien dat de stroming van richting veranderd.

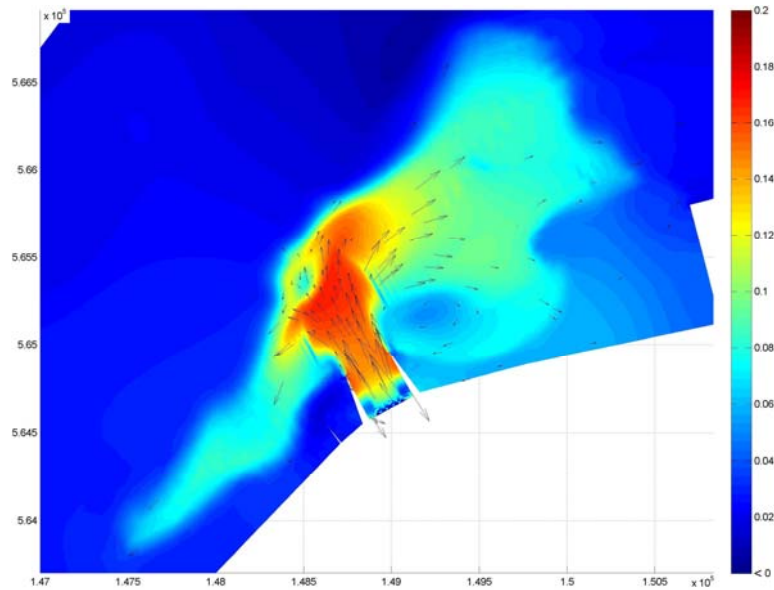
Wanneer met de dichtheid gekeken wordt hoe het zoete water zich verspreidt wordt dit beeld bevestigd. In Figuur 7.14 is te zien dat het zoete water niet de Doove Balg in stroomt, maar precies over de ondiepe zandrug stroomt. Ook verder naar de zijkanten blijft het gespuid water het ondiepe contour volgen.



Figuur 7.14, de concentratie verdeling na het spuien bij kentering op $t=83\text{min}$.

Deze zijwaartse stroming is met twee principes te verklaren. Ten eerste met bifurcatie van de dichtheidsstroom en met de reflectie van een translatiegolf die optreed bij een verandering in het stroomprofiel. De bel met zoetwater die uit de spuisluis komt heeft daardoor de neiging zich te vertakken naar de zijkanen. Dit principe en de verschillen ten opzichte van een stroom zonder dichtheidsverschil zullen bij de analyse verderop in het hoofdstuk toegelicht worden.

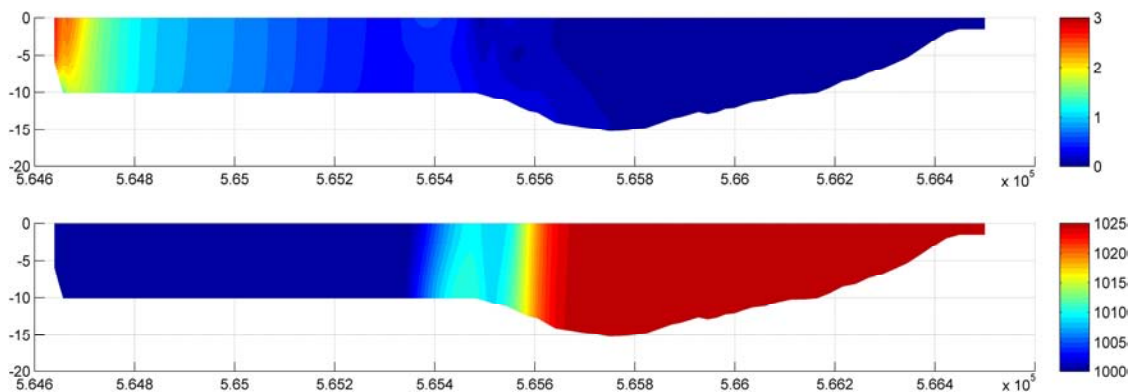
Binnen het gebied met zoetwater is een waterstandverhoging. In Figuur 7.15 met de waterstanden is de verhoging in het zoete water terug te zien. In het uitloopkanaal is een verhoging van 20cm. Deze verhoging in de waterstand is ook nodig om het zoute water weg te drukken. Bij de impulsbalans voor het opstellen van de afvoerrelatie kwam ook een minimum verval naar voren. Dit verval was nodig om de spuistroom opgang te brengen en instroom tegen te gaan.



Figuur 7.15, het waterspeil tijdens het spuien, t.o.v. het peil in de Waddenzee van NAP -0.9m.

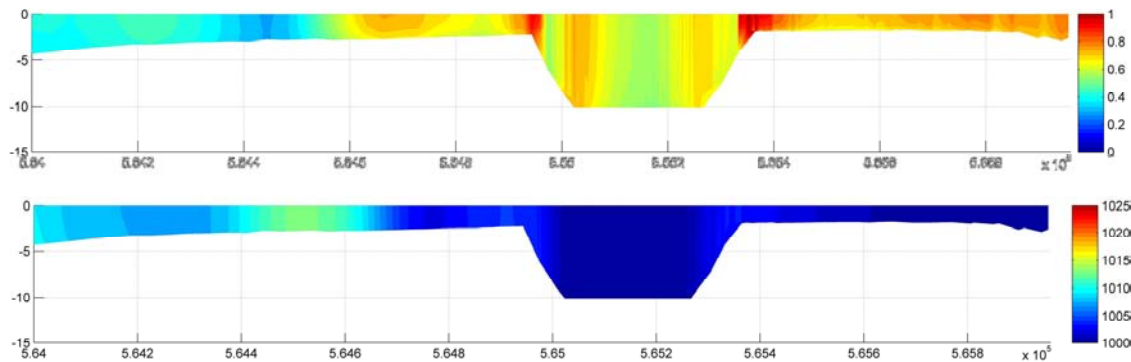
Wat hier opvalt, zijn de waterstandverlagingen bij de aansluitingen op de diepere vloodschaar en de Doove Balg. Tegen het talud van het uitloopkanaal door de zandrug is juist een verhoging te zien. Dit wordt gevolgd op de zandrug door verlaging. Verder zijn er twee groten neren te herkennen, in de vloodschaar en in de monding van het uitloopkanaal.

De dieptedoorsnede over de hartlijn van het spui is in Figuur 7.16 gegeven, boven zijn de snelheden geploteerd en daaronder de dichtheid. Links is de spuisluis met daar aansluitend het uitloopkanaal, dit is te herkennen aan de constante diepte. Hier is de blokkade in de monding van het uitloopkanaal goed terug te zien. Er is een scherpe verticale scheiding tussen de dichtheden en de stroming in de Doove Balg blijft in rust.



Figuur 7.16, de dieptedoorsnede van de snelheid en de dichtheid over de hartlijn van het spui-complex.

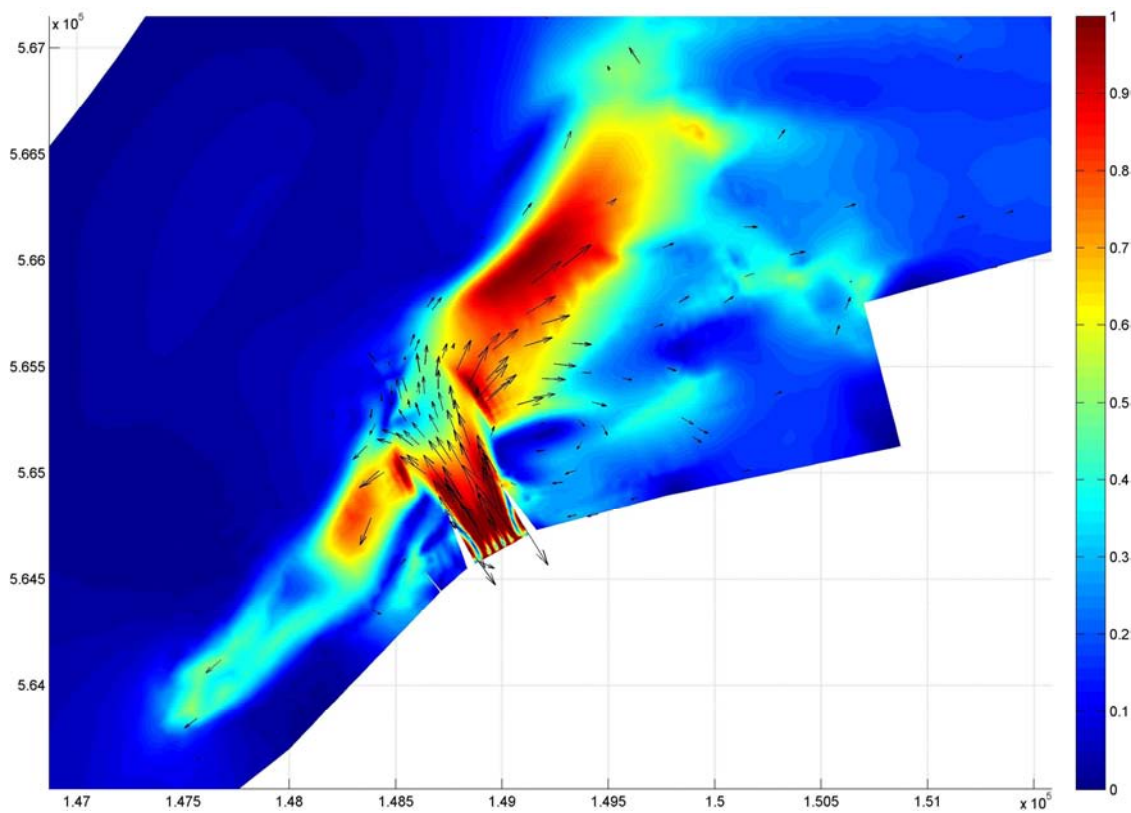
In het uitloopkanaal wijkt het stromingspatroon achter de spuisluis weinig af van de verwachtingen uit de voorgaande resultaten. Ondanks het verloop in de breedte en de verspreiding van de spui-straal blijft de menging volledig. In Figuur 7.17 is een doorsnede over de zandbank en door het uitloopkanaal te zien. Op de zandrug waar het spui-water overheen stroomt, is de mate van menging ook volledig. Gezien de beperkte diepte daar, is dat te verwachten.



Figuur 7.17, de dieptedoorsnede van de snelheid en de dichtheid over de zandbank en het uitloopkanaal voor het spuicomplex, op $t=83\text{min}$.

In de doorsnede is over het uitloopkanaal een aantal schommelingen in de snelheid te zien. De versnelling onderaan het talud kan het gevolg zijn van aanzuiging van zoutwater uit de vloedchaar. De dichtheid is in deze zone ook iets hoger dan midden in het uitloopkanaal. Bovenaan het talud is de versnelling het gevolg van het verkleinen van het stroomprofiel. In Figuur 7.15, met de waterstanden is te zien dat deze versnelling gepaard gaat met een waterstandverlaging en een aantal korten golven.

In Figuur 7.18 zijn de dieptegemiddelde snelheden in de omgeving van de spuisluis gegeven. Ook hier is weer ingezoomd op het gebied bij de spuisluis. De afbeelding wijkt weinig af van die met de oppervlaktestroming



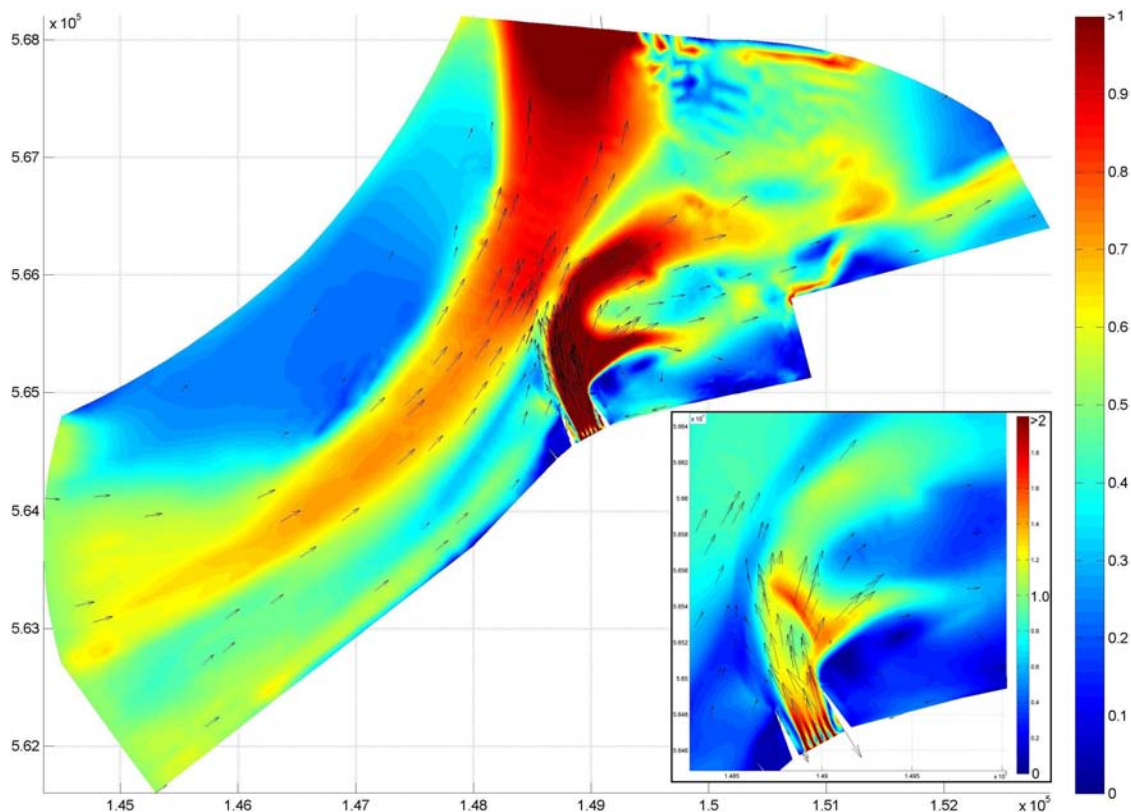
Figuur 7.18, de dieptegemiddelde snelheid bij spuien bij kentering.

Met het gebruiken van de dieptegemiddelde snelheid kan er naar de verwachte erosie gekeken worden. Door het toenemen van de snelheden zal er veel bodemtransport plaats vinden op de zandrug en in het uitloopkanaal. Bij het optreden van de erosie zal de zandbank zeker eroderen, maar dit kan tot een evenwicht gaan leiden waarbij de breedte van het uitloopkanaal toegenomen is. Bij de analyses van de resultaten wordt er verder naar de mogelijke erosie gekeken.

7.3.4 Case 4: Spuien bij getijdenverloop

Bij deze simulatie wordt er weer gespuid met een debiet van $2545\text{m}^3/\text{s}$ en een stroomsnelheid op de drempel van 3.0m/s . Maar bij deze case is ook een getijdenstroom van 0.50m/s in de modellering opgenomen. De verschillende invloeden van de hiervoor gemaakte simulaties komen dan bij elkaar. Het getij, de aanleg van het spuicomplex en de dichtheidstroming uit het IJsselmeer.

In Figuur 7.19 is de stroming aan het oppervlak gegeven, dit is met dezelfde schaal geplot als in de voorgaande simulaties. Er is hier ook een inzet met de snelheid bij het uitloopkanaal met een aparte schaalverdeling geven. Bij de inzet is de schaal verdubbeld naar maximaal 2.0m/s , dit om meer details te kunnen onderscheiden. De ontwikkeling van de stroming is in bijlage G gegeven. Op de randen van het simulatie gebied zijn duidelijk de invloeden van de randvoorwaarden te zien. Bij de instroomrand zijn de snelheden aan het oppervlak eerst nog 0.50m/s en bij de uitstroomrand zitten een paar sprongen in de snelheid.



Figuur 7.19, de stroomsnelheid aan het oppervlak wanneer gespuid wordt bij opkomend getij.

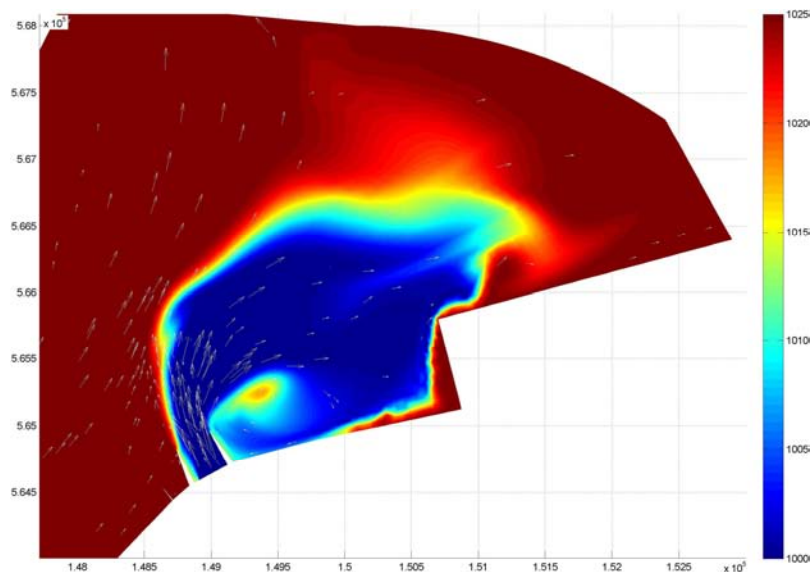
De stroomsnelheid loopt ondanks de gelijke randvoorwaarden in de Doove Balg daar toch sterk op. Nog voor het samenkomen met de spuistraal is een snelheid toename. Aan de noordelijke rand ligt de snelheid boven de 1.20m/s terwijl dit voorheen onder de 0.8m/s bleef. De spuistroom

lijkt ook nu weer niet de Doove Balg in te stromen, dit was in de voorgaande case ook het geval. De pluim met snel stromend spuiwater blijft met een dunne rand gescheiden van de getijdenstroom in de Doove Balg.

De spuistroom lijkt een blokkade te veroorzaken, dit geeft een aantal veranderingen in het stroompatroon. In de vloodschaar is de stroomsnelheid sterk afgenomen omdat het water niet meer goed door kan stromen. Het debiet dat nog door de vloodschaar stroomt, kan het uitloopkanaal niet passeren. Deze stroming buigt daar af en gaat mee door het uitloopkanaal. De spuistraal wordt daardoor naar de zijkant gedrukt, dit is in de inzet in Figuur 7.19 te zien. Deze blokkade verlegt de stroming van de vloodschaar naar de Doove Balg. Dit veroorzaakt een groter debiet dat door de Doove Balg stroomt.

De doorgang van de Doove Balg naar de Boontjes lijkt ook geblokkeerd te worden door het gespuide water. De absolute stroomsnelheid is daar wel toegenomen maar de richting van de stroming is veranderd. De stroom komt nu van de zandrug naar de Boontjes. Het gevolg hiervan is dat er geen afvoer van de Doove Balg naar de Boontjes is. Het water volume dat voorheen via de Boontjes wegstroomde blijft nu in de Doove Balg. Dit extra debiet veroorzaakt daar een hogere stroomsnelheid.

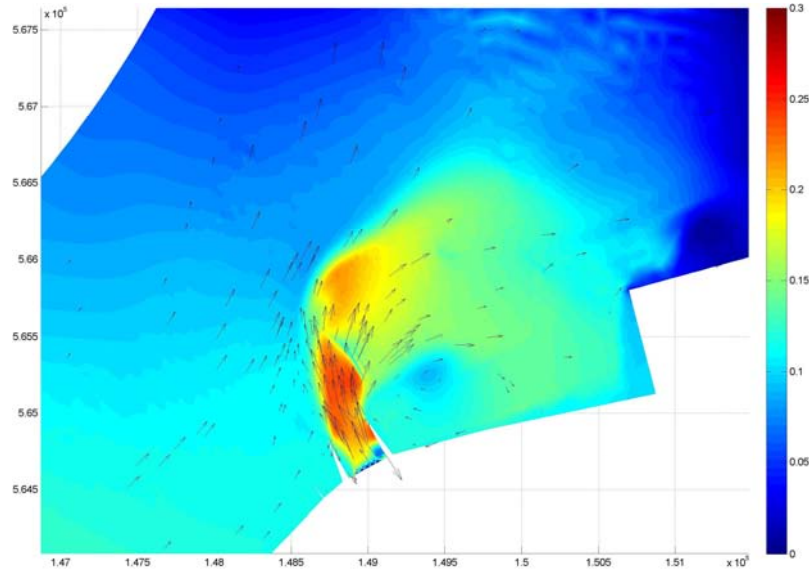
De blokkades door het spuidebiet zijn het beste te herkennen aan de waterdichtheid in de omgeving van de spuisluis. In Figuur 7.20 zijn de dichtheden geplot op 83 minuten na het openen van de spuisluis.



Figuur 7.20, de concentratie verdeling na het spuien bij opkomend getij.

De blokkade van de vloodschaar en de Boontjes zijn hier duidelijk terug te zien. Het zoete water blijft als een blok op de zandrug liggen. Aan de westelijke rand vindt menging plaats met de afgebogen straal uit de vloodschaar en ook aan het eind van de zandrug vind ook menging plaats. Wanneer het zoete water de verbinding tussen de Doove Balg en de Boontjes instroomt, begint het zich te vermengen met de omgeving. Het gespuide water wordt dus over de zandrug naar de Boontjes afgevoerd.

In Figuur 7.21 is de waterstand bij het spuicomples gegeven. De schaal is hier met 10cm verhoogd ten opzichte van case 3, spuien bij kentering. Het verhang bij het getij is hier goed op terug te zien, in het westen staat het water hoger.

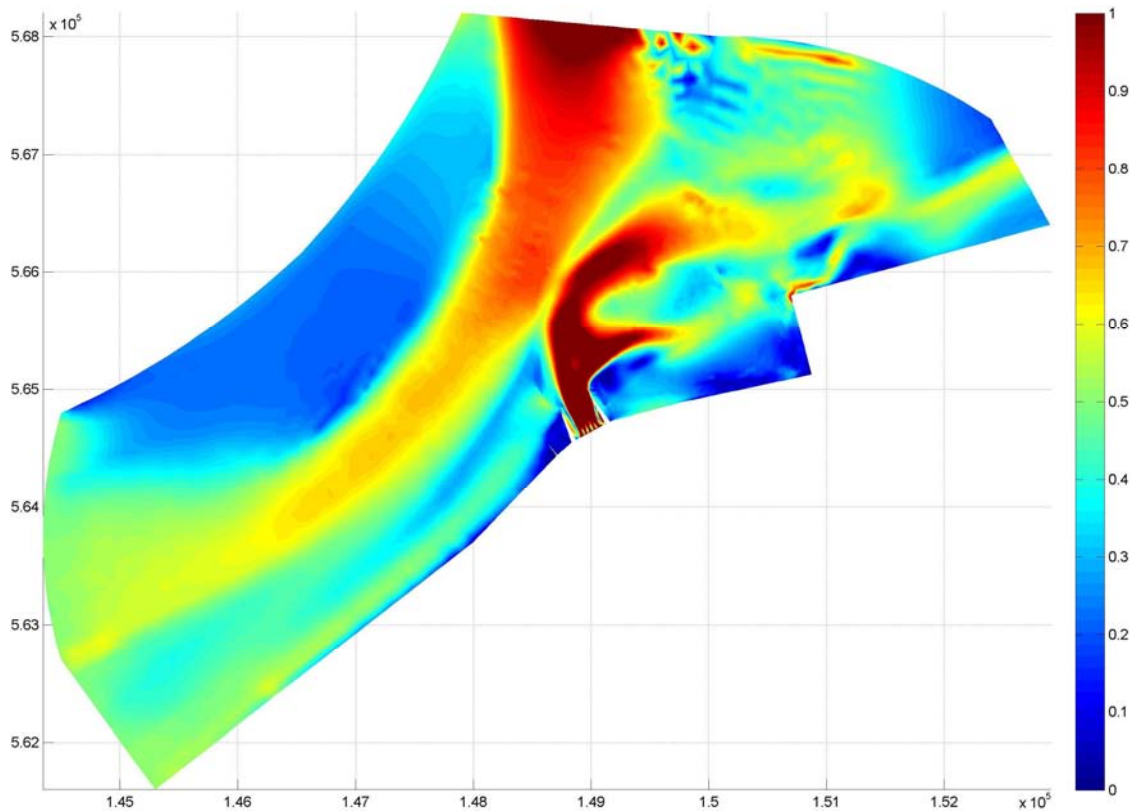


Figuur 7.21, het waterspeil tijdens het spuien, t.o.v. het peil in de Waddenzee van NAP -0.9m

In de zoetwater zone is weer een waterstandverhoging te zien. In het uitloopkanaal staat het water weer ongeveer 20cm hoger dan in de zoute omgeving. Dit was bij de vorige simulatie ook het geval. Eenmaal boven de zandrug neemt verhoging af, bij deze overgang zijn weer een aantal korte golven te zien.

De neer met zoutwater die in de vloodschaar ligt is hier ook op terug te zien. Deze neer lijkt gevoed te worden met zoutwater dat langs de Afsluitdijk en de leidam stroomt.

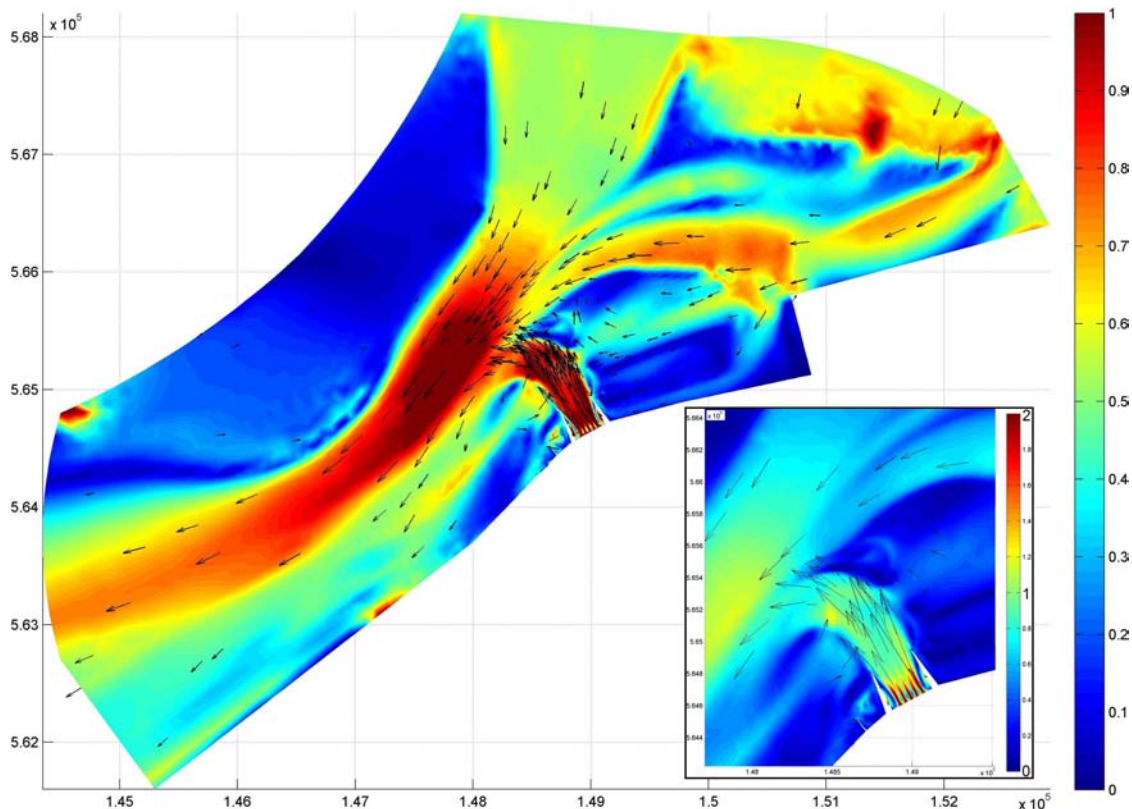
De dieptegemiddelde snelheden zijn in Figuur 7.22 gegeven. Er zijn hier weinig veranderingen te zien ten opzichten van de stroomsnelheden aan het oppervlak.



Figuur 7.22, de dieptegemiddelde snelheid bij spuien met opkomend getij.

Met de dieptegemiddelde snelheid kan een schatting gemaakt worden van de plaatsen waar bodemtransport gaat optreden. In de afbeelding zijn vele gebieden waar de stroomsnelheid hoog ligt ten opzichten van de eerdere resultaten. In de Doove Balg zal gezien de snelheid erosie opgaan treden. Het lijkt niet waarschijnlijk dat de ligging stabiel blijft. De zandbanken langs de geul zullen waarschijnlijk geërodeerd worden. De spuistraal zal ook voor erosie gaan zorgen. De stroomsnelheden boven de zandrug en in het uitloopkanaal lopen strek op, in het bijzonder op de bovenrand van het talud. De afbuiging van de stroming uit de vloedchaar zal ook voor erosie aan de randen van het uitloopkanaal zorgen. Deze drie factoren samen kunnen de zandrug sterk aantasten.

Het tweede deel van deze case is gemaakt voor afgaand getij, de overige instellingen zijn gelijk gebleven. Als eerste zal weer naar de stroomsnelheid aan het oppervlak gekeken worden, dit is in Figuur 7.23 gegeven. De ontwikkeling van de spuistroming is in bijlage G gegeven.



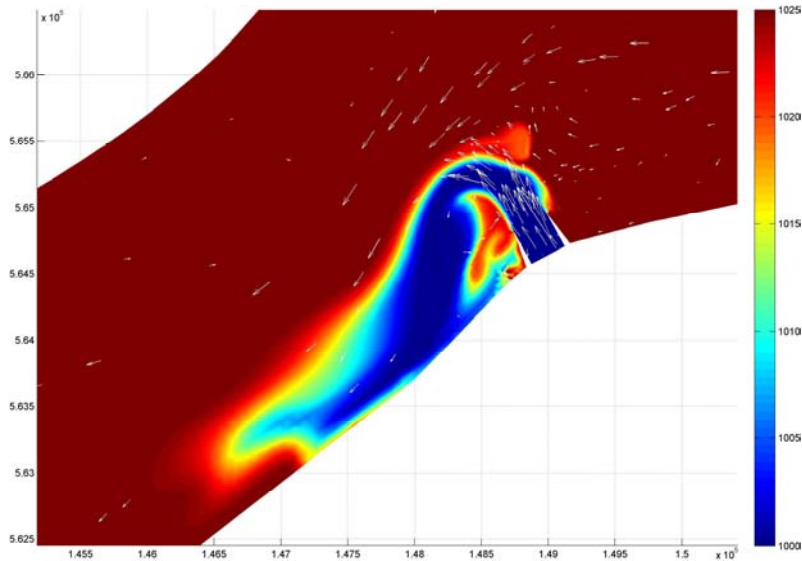
Figuur 7.23, de stroomsnelheid aan het oppervlak wanneer gespuid wordt bij afgaand getij.

Aan de randen van het simulatie gebied is een aantal inspeelverschijnselen te zien. Op de ondiepe zandplaat heeft de stroming enige afstand nodig om de juiste waarden aan te nemen. Aan de uitstroomband is een instabiliteit in de modellering te zien. In het midden van het simulatiegebied, bij de spuisluis is de uitkomst niet verstoord door deze verschijnselen.

Bij het spuien met afgaand getij veroorzaakt de spuistraal wederom een blokkade in het gebruikelijke stroompatroon. In de vloodschaar zijn de snelheden sterk afgenomen, dit was bij het opkomende getij ook het geval. De blokkade van de zoete straal op de doorgang van de getijdenstroom in de vloodschaar heeft weer een aantal uitwerkingen op de omgeving.

Het getij dat nog in de vloodschaar komt buigt af voor het uitloopkanaal en stroomt over de zandrug weg. Er lijkt hier geen kortsluiting door het uitloopkanaal te ontstaan. Het grootste deel van het debiet dat voorheen uit de Boontjes naar de vloodschaar stroomde gaat nu naar de Doove Balg. In deze verbinding zijn de stroomsnelheden fors toegenomen. Deze verlegging naar de Doove Balg ontlast de vloodschaar, maar belast de Doove Balg extra. De snelheid is daar dan ook fors toegenomen, tot ongeveer 1.2m/s.

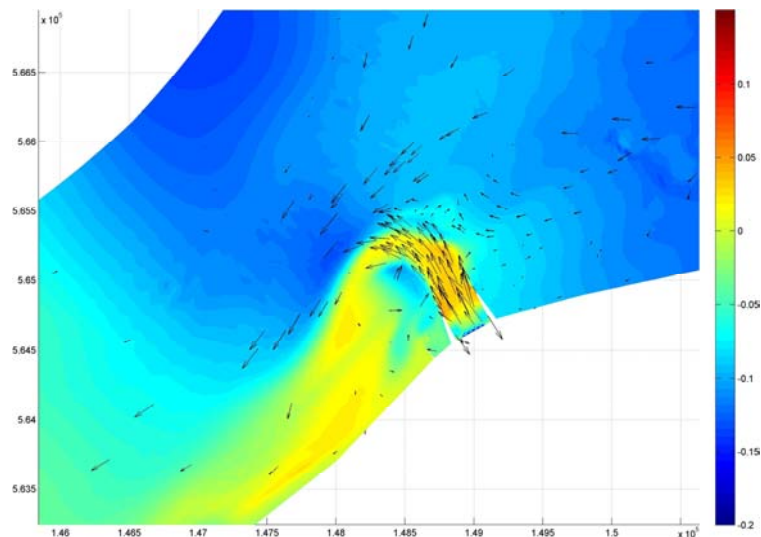
Ten westen van de spuisluis is de stroming tussen de Afsluitdijk en de Doove Balg erg veranderd. Van het oude stroompatroon is niets terug te herkennen. Dit is waarschijnlijk het gevolg van het spuidebiet dat over de zandrug afstroomt. Om de afstroming van het spuidebiet te zien kan er naar de dichtheidsverdeling gekeken worden, deze is in Figuur 7.24 gegeven.



Figuur 7.24, de concentratie verdeling na het spuien bij afgaand getij.

Bij de dichtheidsverdeling komt de afstroming over de zandrug duidelijk naar voren. De spuistroom bereikt wederom de Doove Balg niet, maar blijft langs de Afsluitdijk liggen. In westelijke richting kan de zoetwaterbel lang stand houden. De vloed-schaar en de zandrug worden in die richting niet gekruist door een getijdengeul. Het gaat hier geleidelijk over in de Javaruggen, dit is een ondiepe vlakke in de Waddenzee. Het gespuide water wordt dan minder snel uit elkaar getrokken en vermengt met de omgeving.

De waterstand aan het eind van de simulatie is in Figuur 7.25 gegeven. De schaalverdeling is hier weer aangepast om de resultaten te verduidelijken. De spuistroom met een verhoogde waterstand is goed te herkennen. De verhoging ten opzichte van de omgeving is weer ongeveer 20cm.

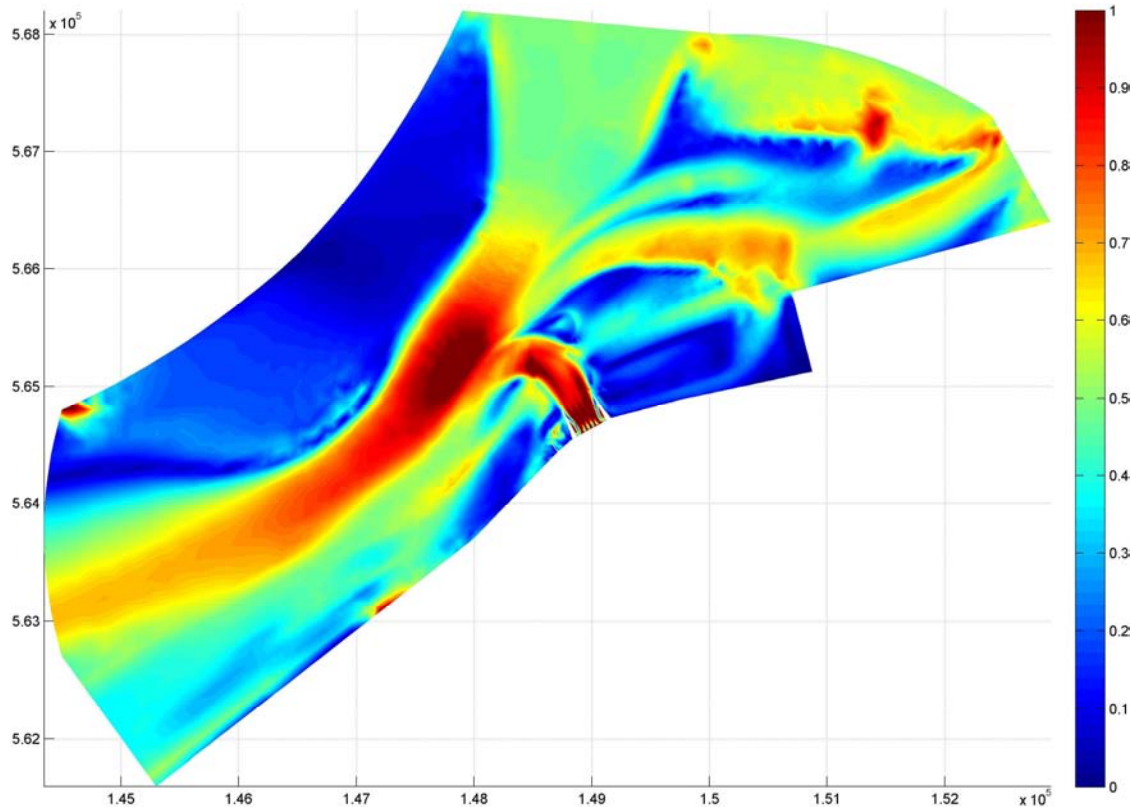


Figuur 7.25, het waterpeil tijdens het spuien, t.o.v. het peil in de Waddenzee van NAP -0.9m.

Opmerkelijker is het verhang in de Doove Balg, gezien het afgaande getij zal dit van oost naar west moeten aflopen. Maar juist voorbij het uitloopkanaal begint de waterstand weer op te lopen. Op deze plaats in de Doove Balg is een lokale verlaging van de waterstand. Dit is het gevolg van

de versnelling van de stroming door het vergrote debiet en de nauwe doorgang daar. Dit is ook terug te zien in Figuur 7.23, met de stroomsnelheden aan het oppervlak. Verderop waar het dwarsprofiel vergroot en de stroom vertraagt neemt de waterstand weer toe. Dit is conform de energiebalans die in hoofdstuk 4 is opgesteld.

Deze sterke versnelling zal zeker gevolgen hebben voor de ligging van de Doove Balg. Om meer in te gaan op de morfologische veranderingen worden de dieptegemiddelde snelheden gegeven in Figuur 7.26.



Figuur 7.26, de dieptegemiddelde snelheid bij spuien met afgaand getij.

De versnelling in de Doove Balg als gevolg van het veranderen van het stromingspatroon komt hier duidelijk naar voren. De stroomsnelheid langs de zandplaat in de binnenbocht van de Doove Balg is sterk toegenomen. Het lijkt er dus naar dat deze zandplaat sterk zal gaan eroderen. Dit is ook aan de andere zijde van de Doove Balg te verwachten bij de zandrug. De zandrug lijkt hier echter niet aangetast te gaan worden door de spuiroom. Deze veroorzaakt geen hoge snelheden boven de zandrug. In het uitloopkanaal en langs het talud zijn wel hoge snelheden in de stroming. Hier zal dan ook weer erosie te verwachten zijn en zal de ligging van het uitloopkanaal veranderen.

7.4 Analyse van de resultaten

De analyse van de gemaakte simulaties bestaat uit drie delen. Eerst worden de resultaten van de driedimensionale cases met elkaar vergeleken en geanalyseerd. Hier komt vooral de verandering aan het stromingspatroon aan de orde. Vervolgens wordt het uitstroempatroon van het spuiwater geanalyseerd. Waarom dit niet rechtdoor de Doove Balg instroomt, maar afbuigt over de zandrug.

Als slot wordt de vergelijking naar de analytische berekeningen en de tweedimensionale berekeningen gemaakt.

7.4.1 Analyse van de cases

Bij de analyse van de driedimensionale simulaties wordt gelet op de verlegging van het stromingspatroon in het simulatiegebied. De stabiliteit van het uitloopkanaal en dus ook van de zandrug spelen hier een belangrijke rol in. Aan de hand van de veranderingen in de stroming wordt er naar de verwachte morfologische veranderingen gekeken. Als laatste wordt de vermenging van het gespuid water met de Waddenzee behandeld.

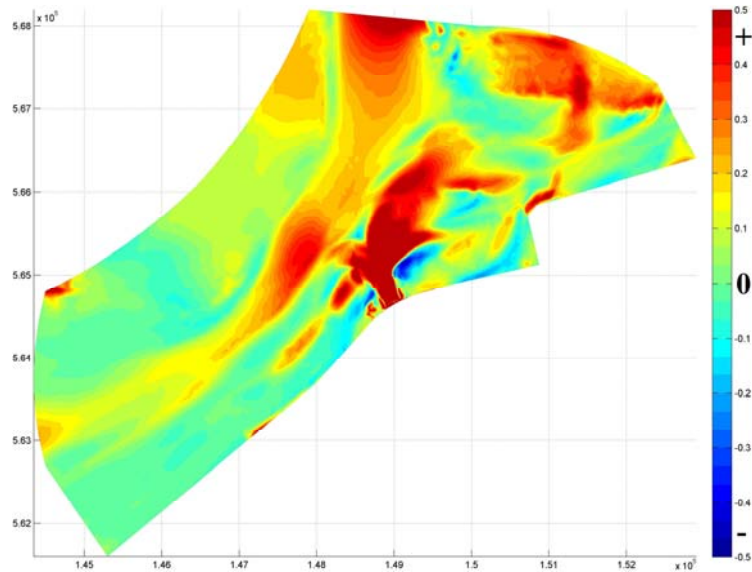
Uit de resultaten komt naar voren dat er een aantal wijzingen zal optreden aan het getij systeem door de aanleg van het spuicomplex. Het getijdenstelsel rond de extra spuisluis bestaat uit drie geulen, de Doove Balg, de Boontjes en de vloodschaar. Per geul gaat geanalyseerd worden wat de veranderingen zijn na de aanleg van het spuicomplex, te beginnen bij de vloodschaar. De aangegeven veranderingen zijn ook weer geven in Figuur 7.27, deze wordt na de uitleg gegeven. In de figuur geven de rode zones een toename van de stroomsnelheid aan en de blauwe zones een afname. Deze veranderingen zijn ten opzichten van de situatie zonder spuicomplex.

De stroming in de vloodschaar wordt gehinderd door de aanleg van het spuicomplex. De leidammen blokkeren een deel van het stroomprofiel omdat deze in de vloodschaar reiken. Ook de dwarse ligging maakt het de stroom lastiger er voorbij te komen. Bij een meer ronde vorm kan de stroom beter geleid worden. De obstructie veroorzaakt in ieder geval een sterke stroming rond de leidammen.

De vloodschaar wordt volledig geblokkeerd door de spuistroom bij het in gebruik nemen van het spuicomplex. Het getijdendebiet neemt dan sterk af. Het water dat er dan nog doorstroomt buigt af over de zandbank of gaat door het uitloopkanaal naar de Doove Balg. Deze blokkade heeft dus gevolgen voor de andere geulen. Omdat het instromende debiet bij de randvoorwaarden gelijk blijft moet het water nu een andere route vinden.

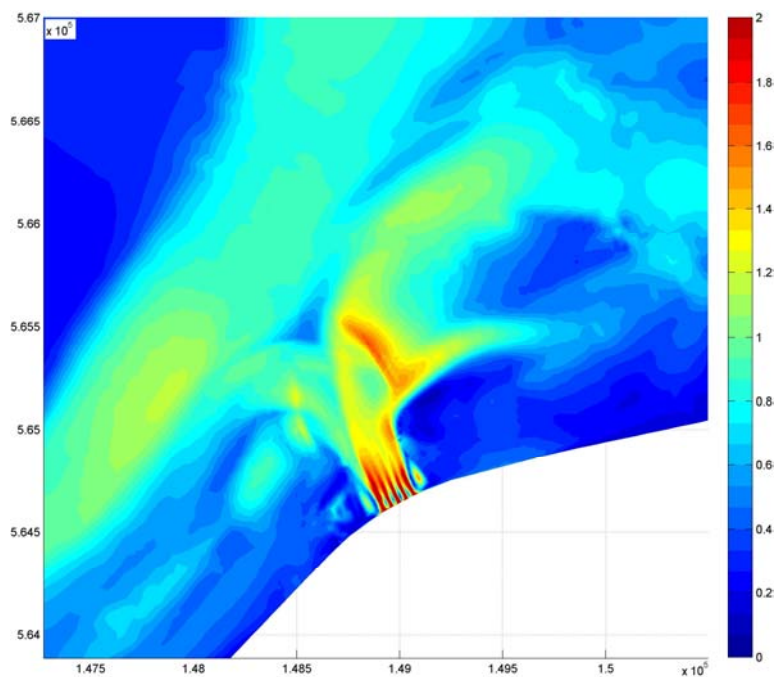
De tweede geul waar de veranderingen door de aanleg van het spuicomplex bij bekeken worden is de Boontjes. De veranderingen voor de Boontjes verschillen met de getijdenrichting. Bij opkomend getij transporteerde de vloodschaar een aanzienlijk volume naar de Boontjes. Met de blokkade door het spuicomplex valt deze aanvoer grotendeels weg. Dit vermindert de totale aanvoer naar de Boontjes. Bij afgaand getij is de verandering in de stroming minder groot dan bij opkomend. Maar er is wel een groter debiet dat naar de Doove Balg stroomt, dit liep voorheen naar de vloodschaar.

De derde geul is de Doove Balg, hier vinden een aantal wijzigingen plaats. Met de obstructie in de vloodschaar is dit de overgebleven getijde verbinding, de belasting is hier dan ook duidelijk op toegenomen. Door de aanleg van het spuicomplex zijn de stroomsnelheden hier soms wel verdubbeld. Wanneer het spui in gebruik genomen wordt loopt de belasting op Doove Balg verder op. De verbinding naar de Boontjes kan bij opkomend getij geblokkeerd worden door de spuistroom. Het volledige instromende debiet moet dan door deze ene geul verwerkt worden. Bij deze vergroting van het debiet is een verandering van de Doove Balg te verwachten. Deze zou kunnen verdiepen en de zandbanken aan de zijanten kunnen eroderen.



Figuur 7.27, een schematische weergave van de veranderingen van het stroompatroon aan het oppervlak na de aanleg van het spuicomples.

Tussen de drie getijde geulen ligt de vierde component in dit systeem, dat is de zandrug. Door de zandrug ligt ook het uitloopkanaal van het spuicomples. Een stabiele ligging van deze twee elementen is een belangrijk vereiste voor de veiligheid van de Afsluitdijk. Er komt echter uit de resultaten dat er veel erosie van de zandrug verwacht kan worden rond het uitloopkanaal. In Figuur 7.28 is een samenstelling te zien van de maximale oppervlakte stroomsnelheden over de zandrug na de aanleg van het spuicomples. Het is dus een samenstelling van de maximaal optredende stroomsnelheden gedurende een getijden cyclus.



Figuur 7.28, de samenstelling van de maximale stroomsnelheden rond het uitloopkanaal.

Tijdens het langstrekken van een getijdengolf en het openen en sluiten van de spuisluis zijn er verschillende locaties waar de erosie aan de zandrug verwacht kan worden. Wanneer de spuisluis gesloten is trekt de stroming door de vloodschaar, over de zandrug om de leidammen te passeren. Deze stroom zal de randen van de zandbank en de taluds van het uitloopkanaal sterk eroderen. Bij het openen van het spui wordt de zandrug zwaar belast door de spuistraal. De taluds van het uitloopkanaal zullen dan eroderen waardoor dit zich uitbeidt in de zandbank. De ligging van de zandrug en daarmee ook van het kanaal staan dus niet vast. Dit kan op den duur tot een evenwicht gaan leiden waarbij de breedte van het uitloopkanaal toegenomen is.

Als laatste wordt de menging van het gespuide water met de omgeving nog geanalyseerd. Het zoete water blijft als een bel op de zandrug blijft liggen, hierdoor vermengt het slecht met de omgeving. Pas wanneer de zandrug gekruist wordt door een getijdengeul begint er vermenging op te treden. Dit heeft tot gevolg dat er rond het spuicomplex grootte schommelingen in de dichtheid zijn te verwachten.

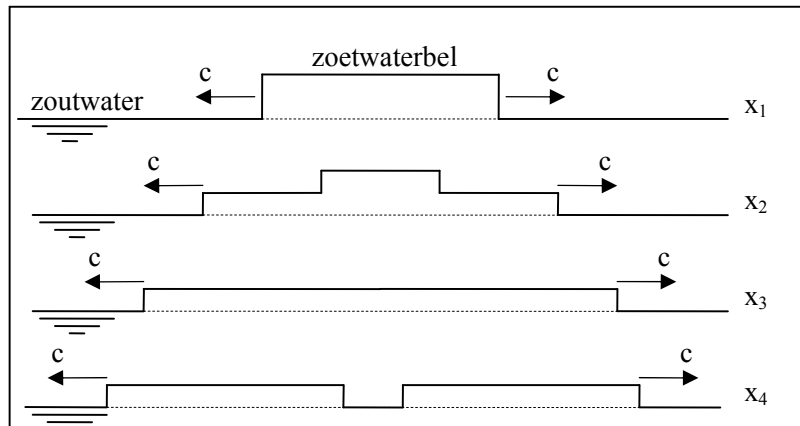
Aan het eind van een spuiperiode stopt de toevoer van zoet water en neemt de getijdenstroming in kracht toe. De zoetwaterbel zal dan waarschijnlijk wel van de zandrug gedrukt worden en zich gaan mengen met de omgeving.

7.4.2 Bifurcatie van de spuistroom

Bij de resultaten van de derde en vierde case was te zien dat de spuistroom de Doove Balg niet bereikte. Door de bifurcatie van de stroom trekt deze naar de zijkant. In de figuur met de maximale stroomsnelheden bij het uitloopkanaal was deze tweedeling ook te zien. Het proces dat achter de tweedeling van de straal zit en het op gang komen ervan wordt hieronder beschreven. Er wordt ook een vergelijking gemaakt met een straal zonder dichtheidverschil.

De zoetwaterbel die uit de spuisluis komt heeft de neiging zich zijdelings te splitsen in twee takken. In het uitstroomkanaal wordt dit verhinderd door de leidammen, maar daar buiten krijgt de straal de ruimte. Het optreden van deze bifurcatie heeft te maken met golfvoortplanting, dit is in Figuur 7.29 te zien. In de komende alinea's zal dit proces worden toegelicht.

Juist voorbij de leidammen is de spuistraal te schematiseren als een bel met zoetwater in een zoute omgeving, zie Battjes (2002). Deze zoetwaterbel ligt gedeeltelijk boven het zoutwater niveau. In de figuren met de waterstand is altijd een verhoging in de spuistraal te zien ten opzichte van de omgeving. Deze verhoging in de waterstand is ook nodig om het zoute water weg te drukken. Bij de impulsbalans voor het opstellen van de afvoerrelatie kwam ook een minimum verval naar voren. Dit verval was nodig om de spuistroom opgang te brengen. De doorsnede van deze waterstandverhoging dwars op de stroomrichting net uit het spui is bovenin Figuur 7.29 afgebeeld. In deze figuur zijn ook de volgende stappen van de modellering te zien.

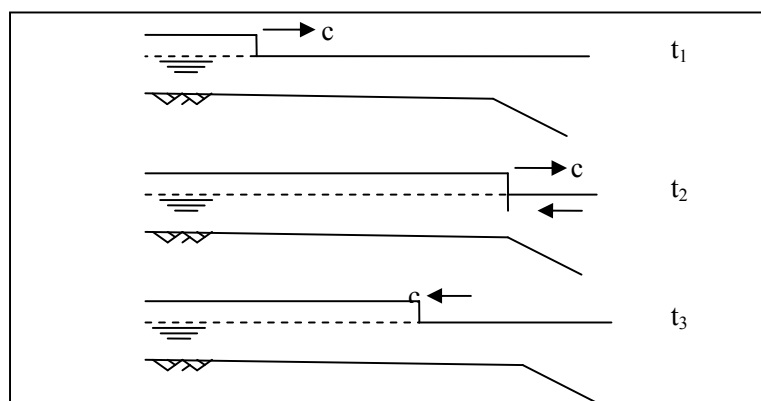


Figuur 7.29, de bifurcatie van de zoetwaterbel.

De zoetwaterbel stroomt verder voorwaarts het spuicomples uit. Naast deze stroomsnelheid die voorwaarts is gericht, is er ook een golfsnelheid c naar de zijkant. Door deze zijwaartse component wordt de zoetwaterbel naar mate deze verder stroomt in twee stukken verdeeld. In het geval van een lang en vlak bekken zullen er twee stralen kunnen ontstaan als in de figuur is aangeven.

De bifurcatie wordt bij het opgang komen van de stroming uit de spuisluis versterkt. Bij het openen van de spuisluis ontstaat een translatiegolf in het uitloopkanaal. Deze lange golf is bij de oppervlaktestroming in case 3 te herkennen. Het water wordt daar in beweging gezet, gepaard gaand met een waterstandverhoging. De eigenschappen van de translatiegolf zijn gerelateerd aan het passeren van de waterloop. Bij een verandering van het dwarsprofiel past een translatiegolf zich daarop aan. Deze aanpassing van de translatiegolf bij het veranderen van het stroomprofiel versterkt de bifurcatie.

Bij de monding van het uitloopkanaal vindt een sterke profielverruiming plaats. De diepte van de Doove Balg is groter en de breedte van het stroomprofiel neemt sterk toe. Bij een dergelijke vergroting van het profiel zou een gemakkelijke doorstroming van de golf verwacht worden, maar dit gebeurt niet. De translatiegolf die uit de spuisluis komt wordt gereflecteerd op het grotere stroomprofiel bij de monding. De reflectie van een translatie golf op een groter stroomprofiel is in Figuur 7.30 geschematiseerd. De mate van reflectie is te bepalen met de reflectiecoëfficiënt r_1 uit formule (7.1) uit Battjes (2002)



Figuur 7.30, de reflectie van een translatiegolf op een groter stroomprofiel.

$$r_i = \frac{1-\gamma}{1+\gamma} \quad \text{met} \quad \gamma \equiv \frac{B_2 c_2}{B_1 c_1} \quad (7.1)$$

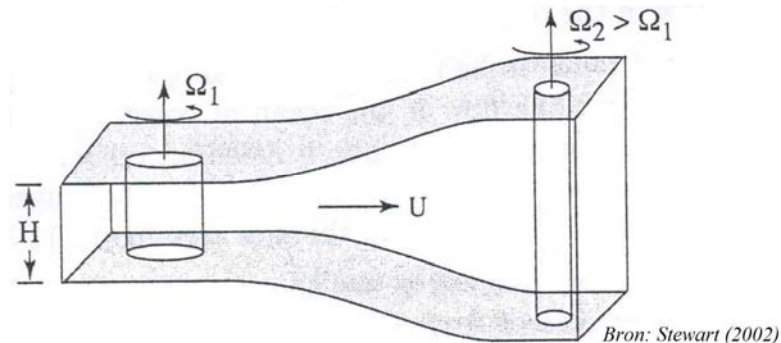
Door het haaks uitstromen op de Doove Balg gaat de verhouding van de breedte naar oneindig. De golfsnelheid neemt bij de grotere diepte ook toe, maar deze toename is minder sterk dan de invloed van de breedte. Het vergroten van de breedte heeft tot gevolg dat de reflectie vrijwel volledig is en negatief. De terug gekaatste golf is dus bij benadering even hoog als de inkomende maar wel tegen gesteld van teken. Het waterniveau in de monding wordt hierdoor gelijk aan dat in de Doove Balg. De doorgaande golf in de Doove Balg is van verwaarloosbare hoogte. Dit is te vergelijken met het uitmonden van een rivier op een groot meer.

Door de volledige negatieve reflectie neemt de hoogte van de translatiegolf af bij de monding. De hoogte van het gespuide water is dan gelijk aan het waterpeil in de Waddenzee. Het nodige verval om de stroming opgang te houden is daarmee opgeheven waardoor een blokkade ontstaat. De stroom stopt hierdoor aan het eind van het uitloopkanaal.

Zijwaarts, in de richting van de zandrug, treedt het tegenovergestelde op. Bij het verlaten van het uitloopkanaal over de zandrug wordt het stroomprofiel sterk verkleind. De breedte blijft hier ongeveer gelijk, maar de golfsnelheid neemt sterk toe door het afnemen van de diepte. Hierdoor ontstaat een positieve reflectie. De reflectie is niet volledig zoals bij de monding. Voor een volledige positieve reflectie is een gesloten wand nodig. Omdat het hier een positieve reflectie betreft wordt de translatiegolf vergroot. De vergroting van het verval aan de zijkant in combinatie met de blokkade in de monding maakt de afstroming over de zandrug de gemakkelijkste weg.

Aan het eind van deze paragraaf wordt nog gekeken naar het uitstrooppatroon bij een spuistraal zonder dichtheidsverschil. Dit verschijnsel van bifurcatie kan alleen optreden bij een stroming met verschillende dichtheden. Er is immers een scheidingsfront nodig. Bij een spuistraal zonder dichtheidsverschil treedt een ander proces op waardoor het tegenovergestelde plaats vindt. Bij een straal van gelijke dichtheid is deze geneigd om samen te trekken, dit heeft te maken met wervelcontractie.

Na het passeren van de drempel van de spuisluis moet de straal zich over een grotere diepte verdelen. De waterkolom moet zich dan verlengen waarbij wervelcontractie optreedt, zie Stewart (2002). In Figuur 7.31 is dit schematisch aangegeven, Ω geeft hierin de rotatie aan. Door behoud van rotatie-impuls gaat deze verlenging van de waterkolom gepaard met een versmalling. Door deze versmalling gaat de wervel sneller roteren en trekt de spuistroom in elkaar. Bij de monding van het uitloopkanaal zal dit proces nogmaals plaats vinden. Bij de monding zal dan bij een spuistraal zonder dichtheidsverschil een compacte straal te zien zijn. Dit in tegenstelling tot een straal met dichtheidsverschil, daar verspreid de straal zich juist.



Figuur 7.31, het behoud van rotatie impuls door wervelcontractie.

7.4.3 Terug koppeling naar de 2DV en analytische berekeningen

In deze paragraaf worden de resultaten van de numerieke driedimensionale berekeningen vergeleken met die van de voorgaande berekeningen. Bij de analyse wordt dezelfde volgorde van beschrijven als in hoofdstuk 6 aangehouden. Eerst wordt er naar de afvoerrelatie gekeken, dan naar de het snelheidspatroon en de dichtheidstroming en vervolgens naar het bodemtransport.

De afvoerrelatie is in de driedimensionale modellering niet opgenomen. Het simulatiegebied begint op de drempel van de spuisluis, dit maakt een controle van de afvoerrelatie onmogelijk. De stroomsnelheid die als randvoorwaarde is opgelegd, is zelfs gebaseerd op de uitkomsten van de afvoerrelatie. Echter de verhouding tussen de stroomsnelheden op de drempel en in het uitstroomkanaal komen wel goed met elkaar overeen. Dit komt door continuïteit van het spuivolume en door de juiste breedteverhouding van het spui en het kanaal.

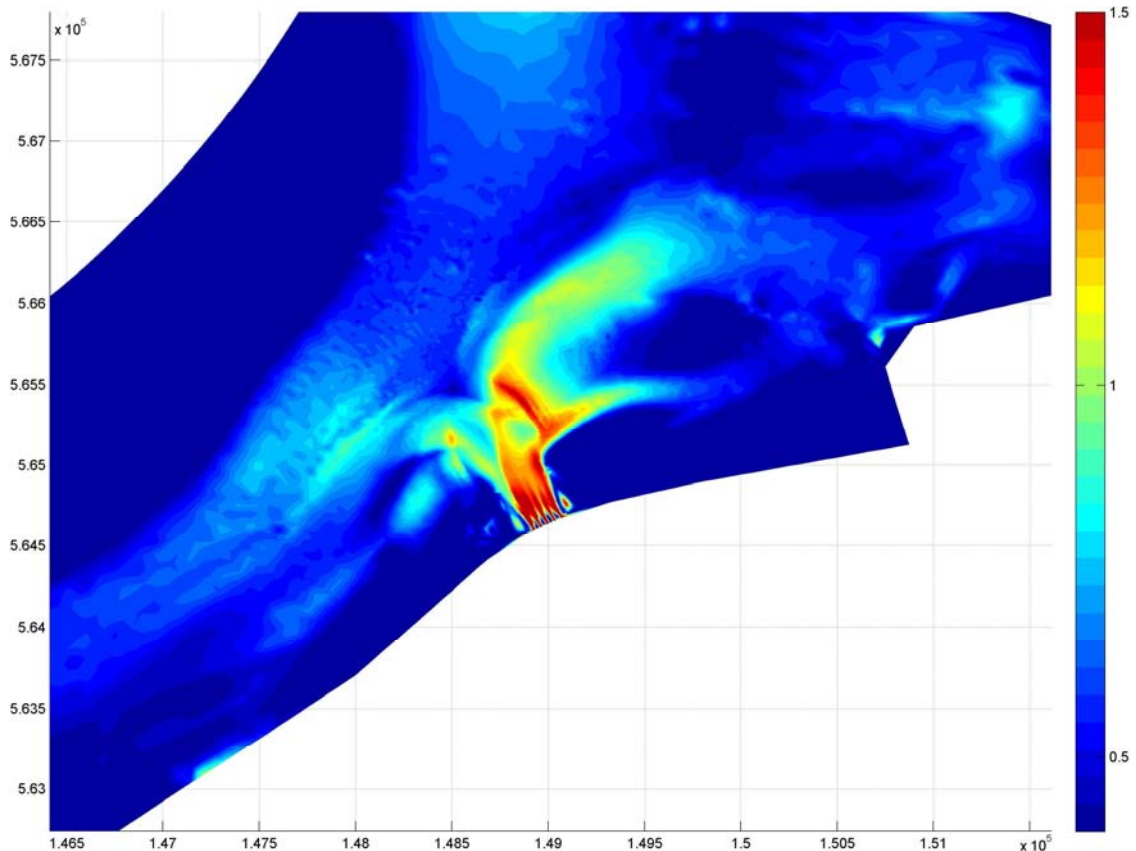
Voor de terugkoppeling bij het stromingspatroon kan naar de doorsnede over de hartlijn van het spui-complex gekeken worden. Deze doorsneden bestaan hier echter uit beduidend minder gridpunten dan bij de numerieke tweedimensionale simulaties. De nauwkeurigheid is door dit verschil minder groot. Bij de vergelijking tussen de doorsneden wordt eerst naar het uitstroomkanaal gekeken.

In het uitstroomkanaal is de verticale snelheidsverdeling vergelijkbaar tussen de simulaties. Over de verticaal neemt de snelheid af bij de bodem en is de menging volledig. In het uitloopkanaal zijn de resultaten niet meer te vergelijken. Dit is het gevolg van de zijwaarts gerichte stroming. De stroming komt hier in de lengte richting stil te staan. De menging blijft wel volledig over het uitloopkanaal, er is geen indringing van een zoutwig. De zoutwig werd nog wel verwacht bij de analytische berekeningen. Bij de tweedimensionale berekeningen bleek een zoute laag in de monding mogelijk. Dit werd voor een deel toegeschreven aan het verhoogde waterpeil in het simulatie gebied.

Vanaf het uitloopkanaal is eigenlijk geen goede terugkoppeling te maken. De stroming gaat vanaf daar naar een richting die bij een 2DV model niet mogelijk is, zijwaarts. Van de verwachte zoutwig na de monding is dus geen sprake omdat de spuistroom daar niet komt. Hierdoor is er weinig aan te vullen op de eerder gemaakte analyses van de stroming.

Dan de analyse van het bodemtransport. In de modellering is het niet mogelijk om bodemtransport en een dichtheidstroming op te nemen. Het negeren van het dichtheidsverschil om het bodemtransport te simuleren heeft echter geen zin. Uit de analyse is gebleken de stroming dermate anders zal zijn, zodat de erosieberekening niet representatief kan zijn. Om toch het

verwachte bodemtransport te kunnen vinden zijn de stroomsnelheden aan de bodem geplot. Voor het opstellen van deze afbeelding zijn de maximale absolute snelheden direct aan de bodem van de drie simulaties uit case 3 en 4 gehaald. Deze maximale snelheden zijn gecombineerd en in Figuur 7.32 getoond. De minimumwaarde op de schaalverdeling is de kritische snelheid voor erosie, 0.4m/s. Deze waarde is bij de analytische berekeningen in hoofdstuk 4 bepaald. Dit betekent dat er in de donker blauwe zones geen erosie zal zijn.



Figuur 7.32, De maximaal optredende absolute bodemsnelheden tijdens het spuien.

Met de figuur is kwalitatief veel te zeggen over het bodemtransport. Dit bodemtransport wordt behandeld in de volgorde van de stromingsrichting vanaf de spuisluis. De bodembescherming in het uitstroomkanaal is zeker nodig, bij dit gemiddelde spuidebiet zijn de snelheden aan de bodem al aanzienlijk. In het uitloopkanaal en op de taluds daarvan liggen de snelheden ook boven de kritische waarden. Het uitloopkanaal zal dus zeker gaan uitbreiden en verschuiven. Met de verschuiving wordt de zandrug dus geërodeerd. Ook verder van de spuisluis is te zien dat de zandrug hoge bodemsnelheden heeft, het oostelijke deel wordt sterk aangetast. Dit gebied ligt tegen het talud aan naar de Doove Balg. Deze erosie kan vervolgens weer tot een verplaatsing van de Doove Balg leiden. De stabiliteit van de zandrug lijkt dus in het geding te komen.

In de Doove Balg is de bodemsnelheid nog beperkt, slechts in het midden lijkt deze op te lopen. Dit zou dan leiden tot een verdieping van de geul. Bij een verdieping moet het talud zich ook aanpassen, dit kan leiden tot afschuiving van de zandbanken aan de randen. Dus deze verdieping in combinatie met de stijle taluds van de Doove Balg en de erosie van de zandrug kunnen wel tot een verplaatsing van de getijdengeul gaan leiden. De verplaatsing naar de Afsluitdijk toe lijkt het meest voor de hand te liggen, dit is de buitenbocht.

In de vloedschaar blijven de snelheden onder de kritische waarde, dit kan leiden tot aanzanding. Dit is een positieve ontwikkeling. Er is immers een aantal jaar geleden een strekdam aangelegd om de groei van een zandbank te bevorderen. Deze aanzanding van de vloedschaar en de verbreding van de Doove Balg kunnen een verplaatsing van de zandrug bewerkstelligen. Deze zandrug kan dan tegen de Afsluitdijk gaan liggen en de geulen zijn dan samengevoegd.

7.5 Samenvatting en conclusies

Met de driedimensionale simulaties zijn drie onderzoeksvragen beantwoord. Dit zijn de veranderingen aan het stromingspatroon in het simulatiegebied, de menging van het gespuide water met de omgeving en het bodemtransport. Bij de voorgaande simulaties konden deze onderzoekspunten slechts benaderd worden vanwege het ontbreken van de invloed van de breedte, de derde dimensie. Hieronder worden de conclusies gegeven bij het beantwoorden van deze onderzoeksvragen en deze worden kort toegelicht.

Aan het eind van de paragraaf wordt aan de hand van deze conclusies een terugkoppeling gemaakt naar het voorontwerp van de extra spuisluis. Dit onderwerp valt eigenlijk buiten het onderzoeksgebied. Maar omdat deze conclusies van belang kunnen zijn bij de ontwikkeling van het ontwerp worden deze wel genoemd.

- De snelheidsverdeling over de verschillende geulen en het stromingspatroon veranderen in het simulatie gebied.

Door de blokkade die het spuicomplex in de vloedschaar vormt neemt de stroming hier sterk af. De Doove Balg krijgt hierdoor meer debiet te verwerken en is er in de Boontjes een afname van de getijdenstroming. De wijzigingen in de richting van de stroming zijn een gevolg van de blokkade en de verandering in de debietverdeling. De stroomrichting boven de zandrug is met name veranderd, dit om de blokkade van de leidammen te passeren.

- Van een kortsluiting door het uitloopkanaal tussen de verschillende geulen is geen sprake.

Wanneer het spui gesloten is, is de stroming in het uitloopkanaal in rust. Alleen bij het spuien met opkomend getij gaat een deel van de afgezwakte stroom uit de vloedschaar door het uitloopkanaal naar de Doove Balg. De erosiekuil van de strekdam maakt hier een goede doorstroming tussen de leidam en de zandrug mogelijk. Bij het aanleggen van de leidammen van het spuicomplex zal deze erosiekuil opgevuld worden en de bodem daar verdedigd. De goede aansluiting valt dan weg en de doorstroming waarschijnlijk ook. De vloedschaar wordt dan nog meer geblokkeerd.

- De menging van het gespuide water met de omgeving is beperkt.

Het type menging dat ontstaat bij het spuien is volledig. Dit houdt in dat het zoute water wordt weggedrukt en er een bel met zoet water ontstaat. Deze zoetwaterbel blijft op de zandrug liggen voor het spuicomplex. Pas wanneer de zandrug gekruist wordt door een getijdengeul vermengt het water zich met de Waddenzee.

- De bodemligging zal sterk gaan veranderen door de aanleg van het spuicomplex.

Er is geen simulatie geweest met bodemtransport vanwege de mogelijkheden binnen Finlab. Maar uit de stroomsnelheden aan de bodem valt wel af te leiden dat de huidige ligging van geulen en

banken geen stand kan houden. Door de verhoogde snelheden in de Doove Balg zal deze gaan verdiepen en verbreden. De aangrenzende zandrug zal hierdoor gaan eroderen.

In de vloodschaar neemt het debiet af, maar het stroomprofiel ook. Wanneer het spuigesloten is nemen de stroomsnelheden bij het spuicomplex toe. Dit veroorzaakt een erosie aan de binnenzijde van de zandrug. De zandrug wordt dan van twee zijden aangetast. Slechts wanneer het spui in gebruik is neemt de snelheid in de vloodschaar sterk af, dan kan deze geul aanzanden.

Deze verandering aan de bodem hebben vervolgens weer invloed op het stromingspatroon. Als de Doove Balg verbreedt en de vloodschaar dichtslibt, impliceert dit een verschuiving van de zandrug naar de Afsluitdijk toe. Het uitloopkanaal valt dan grotendeels weg door het verplaatsten van de zandrug. Deze verandering kunnen weer gevolgen hebben voor het ontwerp van het afvoersysteem van de spuisluis.

Bij het eventueel verplaatsen van de zandrug wordt er direct op de Doove Balg gespuid. Het spuiwater wordt dan meer gedwongen om te vermengen met de Doove Balg omdat het niet meer eerst door de zandrug stroomt. Dit zou dus een goede ontwikkeling kunnen zijn voor het voor ontwerp. Echter zijn morfologische veranderingen moeilijk om goed in te schatten, dus de gevolgen hiervan voor het voorontwerp ook.

7.5.1 Conclusies ten aanzien van het ontwerp

Bij het onderzoek is ook meer inzicht in het voorontwerp van het spuicomplex verkregen. Op een aantal punten kan overwogen worden om het ontwerp aan te passen. Het verbeteren van het voorontwerp is geen doelstelling van dit onderzoek. Deze conclusies zijn daarom nog niet eerder in het verslag genoemd. Gezien de praktische toepassing worden hier de conclusies en de toelichting erop gegeven

- De locatiekeuzen voor de ligging van het spuicomplex zou heroverwogen moeten worden.

Het spuicomplex ligt dicht bij de getijdengeul de Doove Balg. Wanneer deze geul verschuift heeft dit gevolgen voor de stabiliteit van het spuicomplex en de Afsluitdijk. Bij een locatie verder van deze grote geul zijn de gevolgen van een verschuiving beter op te vangen.

- Het dwarsprofiel van het uitloopkanaal zou beter afgestemd kunnen worden op de vorm van de dichtheidstroming.

Het uitloopkanaal is diep en smal ontworpen. De dichtheidstroming is door de bifurcatie breed en ondiep. Met de onverdedigde ligging van het uitloopkanaal zal de spuistroom het dwarsprofiel in de loop van de tijd aanpassen. Maar deze erosie kan leiden tot grote wijzigingen aan de zandbank waar het uitloopkanaal doorheen ligt. Met het eroderen van de taluds van het uitloopkanaal wordt het dwarsprofiel aangepast en verschuift de ligging. De zandbank wordt hierbij wel verder beschadigd.

- De gewenste afstroomroute van het spuiwater moet duidelijker vastgelegd worden.

In het voorontwerp heeft het gespuide water drie mogelijke afstroomroutes, door de vloodschaar, over de zandrug en naar de Doove Balg. De laatste route, direct naar de Doove Balg is gewenst. Het spuiwater zou hier beter naar toe gestuurd moeten worden. Nu kan het gespuide water nog over de zandbank stromen, waar het schade veroorzaakt. Het sturen van de spuistroom kan bereikt worden met een vaste ligging van het uitloopkanaal of het verder doortrekken van het uitstroomkanaal. Bij de twee bestaande spuisluizen is de gewenste afstroom route ook vast gelegd.

8 Conclusies en aanbevelingen

8.1 Conclusies

De conclusies in dit hoofdstuk zijn geordend naar de onderzoeksstappen. In de eerste subparagraaf worden de probleemstellingen uit het eerste hoofdstuk beantwoord. Vervolgens worden de conclusies van de drie verschillende rekenmodellen gegeven.

8.1.1 Algemene conclusies

De belangrijkste conclusie die uit dit onderzoek gehaald kan worden is dat de omgeving zal gaan veranderen naar aanleiding van de aanleg van de extra spuisluis. De aanleg van het spuicomplex brengt een aantal veranderingen met zich mee die in de ontwerpstudies nog niet beschreven staan. De onderbouwing van deze stellingen wordt hieronder met een aantal conclusies gegeven. Hierbij worden de onderzoeksvragen uit het eerste hoofdstuk beantwoord.

- De getijstroom verandert door het nieuwe spuicomplex. De leidammen van het spuicomplex vormen een obstructie voor de getijdenstroming door de vloed-schaar. Het debiet dat hier voorheen door stroomde, moet nu door de Doove Balg gaan.
- Het stromingspatroon in het uitloopkanaal heeft weinig interactie met de getijdenstroom. Wanneer er wordt gespuid is het uitloopkanaal gevuld met zoet spuiwater. Als het spui gesloten is, treedt er een hoge snelheid op de zijtaluds op, maar de getijdenstromen buigen niet af door het uitloopkanaal heen.
- Er vindt weinig menging plaats tussen het gespuide water en het water in de Waddenzee. Op de zandrug blijft een bel met het zoete water liggen. Slechts aan de randen van de zandrug vermengt het water zich.
- De ligging van het uitloopkanaal zal gaan veranderen. Tijdens het spuien zijn er hoge snelheden aan de bodem die erosie zullen veroorzaken. Op de taluds van het kanaal staat ook een sterke stroming, die erosie van het talud kan veroorzaken.

8.1.2 Analytische model

De conclusies die aan het eind van het hoofdstuk met de analytische bepalingen zijn getrokken worden hier puntsgewijs herhaald. De uitwerking en de onderbouwing van deze conclusies staan in hoofdstuk 4.

- De maximum spuicapaciteit van het spuicomplex is $3892\text{m}^3/\text{s}$ bij het IJsselmeer winterpeil van NAP -0.4m.
- De interne stroming is op de drempel van de spuisluis altijd superkritisch bij het toekomstige spui-beheer voor het nieuwe spuicomplex.
- Het spuiwater kan bij beperkte getijdenstroming een zoetwaterbel vormen in de Doove Balg.

- In het uitloopkanaal zal een erosiekuil met een extra diepte van 10m kunnen ontstaan.

8.1.3 Numerieke 2DV model

Hier zijn de conclusies gegeven die volgen uit de numerieke tweedimensionale simulaties. Deze conclusies vormen een aanvulling op de analytische berekeningen. De uitwerkingen en de onderbouwing van de gegeven conclusies staan in hoofdstuk 6.

- Het verticale verloop van de stroomsnelheid in het uitloopkanaal is aanwezig, maar wel klein. Bij een gelaagdheid loopt het verschil wel sterk op.
- Bij een beperkt spuidebiet is er gedeeltelijke menging in het uitloopkanaal. Dit gaat na verloop van tijd over in volledige menging.
- In de Doove Balg ligt een dunne laag met zout water bij het uitblijven van een sterke getijdenstroom.
- Het bodemtransport in het uitloopkanaal zal duidelijk aanwezig zijn.

8.1.4 Numerieke 3D model

In deze subparagraaf zijn de conclusies van de numerieke driedimensionale simulaties gegeven. Deze conclusies overlappen met de algemene conclusies die hiervoor genoemd zijn. De uitwerking en de onderbouwing staan in hoofdstuk 7.

- De snelheidsverdeling over de verschillende geulen en het stromingspatroon veranderen in het gebied bij het spuicomplex.
- Van een kortsluiting van de getijstromen als gevolg van het uitloopkanaal tussen de verschillende geulen is geen sprake.
- De menging van het gespuide water met de omgeving is beperkt.
- De bodemligging zal sterk gaan veranderen door de aanleg van het spuicomplex.

8.2 Aanbevelingen

Na de uitkomsten van dit onderzoek zijn een aantal onderwerpen naar voren gekomen waar nog meer onderzoek naar gedaan kan worden. Hiernaast zijn er ook punten naar voren gekomen waar het voorontwerp op aan gepast kan worden en punten waarop de simulaties gecontroleerd moeten worden. Deze worden hier bij de aanbevelingen genoemd.

- Het maken van een driedimensionale simulatie met verschillende stroomsnelheden.

Bij de cases die gemaakt zijn was er steeds één bepaald spuidebiet en één getijdensnelheid. Er zouden ook simulaties gemaakt moeten worden bij andere stroomsnelheden van het getij. De stroomsnelheid in de Doove Balg loopt namelijk verder op dan 0.50m/s dat hier gesimuleerd is.

Een simulatie met een getijdencyclus zou dan gemaakt moeten worden. Hierin verloopt de stroomsnelheid en treden er verschillende waterstanden op waarbij de spuisluis wordt geopend en gesloten.

- Het maken van een simulatie met het bodemtransport.

Het simuleren van het bodemtransport was bij deze modellering niet mogelijk. Maar dit speelt wel een belangrijke rol bij het ontwerp van het spuicomplex. Er zou daarom een onderzoek gedaan moeten worden naar de optredende erosie en aanzanding als gevolgen van het aanleggen van het spuicomplex.

- Verder onderzoek moet gedaan worden naar de bifurcatie van de spuistroom.

De mate waarin de spuistraal zich splitst lijkt extreem, aangezien het gespuide water het eind van het uitloopkanaal niet bereikt. Naar de splitsing die bij dichtheidsstromen optreedt is meer onderzoek nodig. De mate van de bifurcatie is een discussiepunt. Voor meer verheldering over dit proces zouden de uitkomsten met een ander model nagerekend moeten worden. Dit om de hier optredende bifurcatie beter te kunnen onderbouwen.

De optredende bifurcatie kan vergeleken worden met de dichtheidsstroming bij andere spuisluisen. Er zijn vier voor de hand liggende vergelijkingen om de splitsing die bij de nieuwe spuisluis optreedt te vergelijken. De twee bestaande spuisluisen in de Afsluitdijk kunnen als eerste vergelijking dienen. Een groot verschil is hier dat deze spuisluisen één afvoerroute hebben voor de spuistroom. Hierdoor is de bifurcatie minder opvallend. Bij het Beerkanaal in de Rotterdamse haven wordt ook zoetwater in een bassin met zoutwater geloosd. Bij het in gebruik nemen van het spui daar waren de verschijnselen van het splitsen van de stroming duidelijk terug te zien. Er werd daar een ondiepe en brede stroming waargenomen.

Een laatste praktijkvoorbeeld waar de spuistraal mee vergeleken kan worden, is de uitmonding van de Nieuwe Waterweg. Het zoete water dat daar de Noordzee instroomt, heeft ook de neiging naar de ondiepte langs de kust te trekken. De spuistraal bij de extra spuisluis trekt ook naar de ondiepte boven de zandrug.

Met het vergelijken van deze situaties kan er meer inzicht in het uitstroom proces van de spuistraal verkregen worden.

- Het verifiëren van de gemaakte simulaties met de nieuwe versie van Finlab.

Er is een nieuwe versie van Finlab uitgekomen. Hierin is het kappa-epsilon model voor turbulentie anders opgenomen. Deze wijziging in Finlab is aangebracht naar aanleiding van de instabiele punten in de derde en vierde case van de driedimensionale berekeningen. In die berekeningen is op de rand van het simulatiegebied een piek in de snelheid te zien. Deze wijziging kan gevolgen hebben voor het totale stromingspatroon in het model tijdens het spuien. De eventuele wijzigingen aan de stroming zouden onderzocht moeten worden.

- Een onderzoek naar een andere indeling van het stelsel van wadplaten en getijdengeulen bij het nieuwe spuicomplex.

Gezien de beschermende functie van de zandrug voor de Afsluitdijk zou deze niet verloren mogen gaan. Bij het huidige ontwerp lijkt dit wel het geval te zijn. Dit kan voorkomen worden door het spuicomplex of het geulenstelsel aan te passen.

Bij het toepassen van minder lange leidammen langs het uitstroomkanaal is de blokkade ook minder. De stroming in de vloedschaar wordt dan minder veranderd en daarmee het verdere stromingspatroon ook niet. Het zou ook onderzocht moeten worden of geometrie van het geulenstelsel niet aangepast kan worden. Bij deze aanpassing zou de zandrug verplaatst kunnen worden. Deze zou dan tegen de Afsluitdijk aan moeten liggen. De vloedschaar en de Doove Balg worden dan samengevoegd tot een brede getijde geul.

Er is ook een andere optie voor het aanpassen van de geometrie. Dit is door de wadplaat in de binnenbocht van de Doove Balg aan te passen. Deze wadplaat heeft een vaste ligging door het grove sediment dat daar ligt. Als dit sediment wordt verwijderd gaat de wadplaat eroderen, hierdoor kan de Doove Balg verbreden. De zandrug blijft op deze manier gespaard en de Doove Balg kan toch uitbreiden.

De wadplaat in de binnenbocht zal dan verkleinen. Maar gezien de ontwikkeling in de Waddenzee zal er op een andere plaats dan weer een nieuw stuk wadplaat ontstaan. De aanvoer van zand naar de Waddenzee is de afgelopen jaren groter dan de afvoer. Deze aanvoer lijkt de komende jaren nog niet minder te worden. Dit kan duiden op een algemene groei van de wadplaten in de Waddenzee. Een kleine afbraak van een wadplaat zal dus ergens anders gecompenseerd worden.

Literatuur

Banning van G.K.F.M., J. Adema (2002) Effecten locaties spui, Aanvullende modesimulaties Alternatief in de knik met leidammen. Rapport Deel 4

Battjes J.A. (2002) Stroming in waterlopen, collegehandleiding CT3310. Delft Nederland

Dienst der Hydrografie van de Koninklijke Marine (1992) Stroomatlas HP17, Waddenzee west, Den Haag Nederland

Dronkers J., W. van Leussen (red) (1998) Physical Processes in Estuaries. Springer-Verlag, Berlin, pagina149

Fischer H.B., E.J. List, R.C.Y. Koh, J. Imberger, N.H. Brooks (1979) Mixing in inland and coastal Waters. California USA

Hartsuiker G. (2002) Invloed extra spui Afsluitdijk op de scheepvaart; een detailmodel rond de spuimiddelen Nederland

Hoogenboom F.G.M, M.M. Gründemann, J.K. Muntinga, W.E.M. Laane (2005) MER extra spuicapaciteit Afsluitdijk, Lelystad Nederland

Het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (2006)
www.knmi.nl/klimaatsscenarios/knmi06/samenvatting/index.html

Kortlever W.C.D. (2006) Trial and scour; Scour and bed protection at the discharge sluices in the Afsluitdijk, the Netherlands, Utrecht Nederland.

Kranenburg C.(1998) Dichtheidsstromen, Handleiding college CT5302. Delft Nederland

Labeur R.J, Pietrzak J.D. (2003) A fully three dimensional unstructured grid non-hydrostatic finite element coastal model. Elsevier Ltd. Pagina 51-67

Lofvers E. (2006) Nadere beschouwing morfologische effecten rondom basisvariant op locatie 1A., RIKZ, Utrecht Nederland

Meijerink Ir. C.W. (2006) Stromingsberekeningen Nieuw Spuimiddel ES-Afsluitdijk

Ministerie van verkeer en waterstaat (2006)
www.getij.nl

RIKZ (2002) Effecten van spuilocaties op hydraulica, morfologie en ecologie

Rijkswaterstaat (2006) Sedimentatlas

Round, G.F. Garg, V.K. (1986) Applications of fluid dynamics. London UK

Schiereck G.J. (2004) Bed bank and shore protection, Delft University Press, Delft Nederland

Stewart R.H. (2002) Introduction to Physical oceanography, Texas USA.

Topografische dienst (1991) Grootte Provincie Atlas Friesland, tweede editie Wolters-Noordhoff Atlasproducties Groningen

Veen van J. (1950) Ebb and Flood Channel Systems in the Netherlands tidal waters, English translation of the original Dutch text with annotations. Delft

Vriend de H.J., J. Dronkers, M.J.F. Stive, A. Van Dongeren, J.H. Wang. (2002) Coastal inlets and Tidal basins collegedictaat CT5303. Delft Nederland

Vriend de H.J., Z.B. Wang, H. Havinga (2005) Lecture notes River Dynamics CT5311. Delft

Vrijburcht A.(2003) Voorontwerpnota, Spuimiddel met vispassage, ingepast in knik Afsluitdijk, deel 6 Hydraulisch ontwerp spuisluis.

WL Delft Hydraulics (2005), User manual Delft3D-flow, pagina 9-29 9-33, Delft Nederland

Bijlage

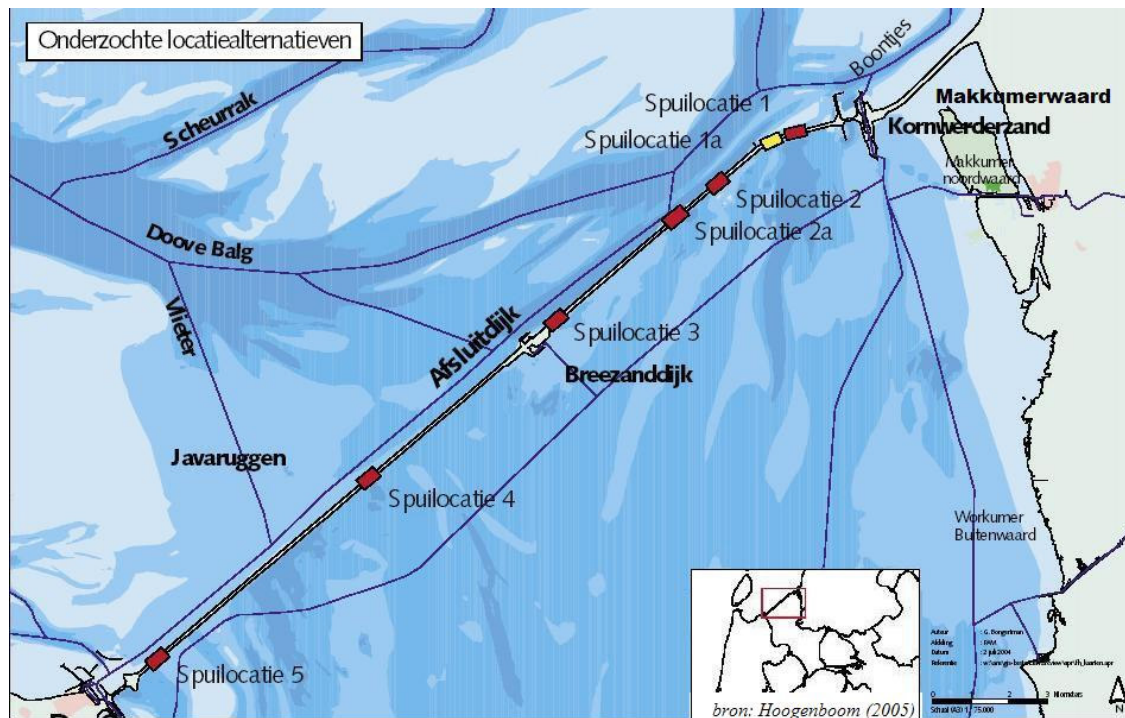
Bijlage

Inhoudsopgave Bijlage

BIJLAGE A.	DE LOCATIE KEUZE VOOR DE EXTRA SPUISLUIS.....	95
BIJLAGE B.	ONTWIKKELING VAN DE DOOVE BALG	98
BIJLAGE C.	SEPRAN INVOER VOOR HET GRID.....	99
C.I	INVOER VOOR HET 2D GRID.....	99
C.II	INVOER VOOR HET 3D GRID.....	99
BIJLAGE D.	HET 3D BODEMGRID.....	102
D.I	MATLABSCRIPT VOOR GENEREN VAN HET BODEMPROFIEL.....	102
D.II	BODEMPROFIEL ZONDER SPUICOMPLEX	104
D.III	BODEMPROFIEL MET SPUICOMPLEX.....	105
BIJLAGE E.	FINLAB UITVOER BEWERKINGSSCRIPTS	106
E.I	PLOTEN VAN DE 2D STROMING	106
E.II	PLOTEN VAN DE OPPERVLAKTE STROMING.....	107
E.III	PLOTEN VAN DE DIEPTEGEMIDDELDE STROMING.....	108
E.IV	PLOTEN VAN DOORSNEDEN IN EEN 3D GRID	109
BIJLAGE F.	ONTWIKKELING VAN DE STROMING 2D	112
F.I	STROMING CASE 1, MINIMAAL SPUIDEBIET	112
F.II	STROMING CASE 2, GEMIDDELD SPUIDEBIET	113
BIJLAGE G.	ONTWIKKELING VAN DE STROMING 3D	115
G.I	STROMING CASE 3, SPUIEN BIJ KENTERING	115
G.II	STROMING CASE 4, SPUIEN BIJ GETIJDENVERLOOP	117

Bijlage A. De locatie keuze voor de extra spuisluis

Voor de spuisluis zijn verschillende locaties langs de Afsluitdijk onderzocht; een overzicht is gegeven in Figuur A-1. Een zesde optie staat niet vermeld, dat is het vergroten van de huidige sluisen.

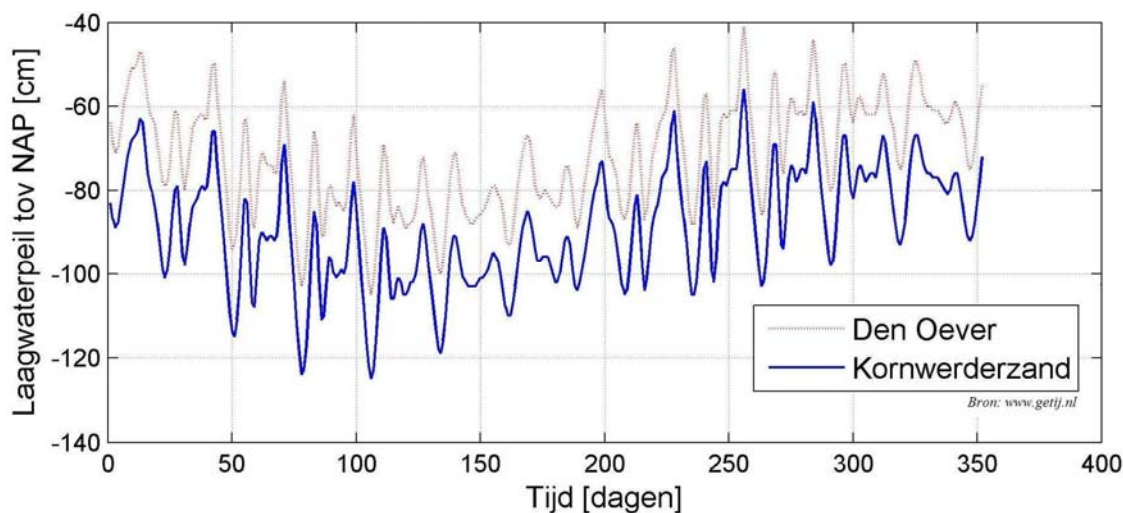


Figuur A-1, de mogelijk locaties voor de extra spuisluis.

De belangrijkste criteria voor de locatiekeuze zijn het maximaal beschikbare verval, aanwezigheid van aan- of afvoergeulen en inpassing in de Afsluitdijk. De gekozen locaties zijn vervolgens weer vergeleken op de veranderingen die er aan de natuur aangebracht zullen worden, het effect op het landschap en natuurlijk ook de efficiëntie van de spuisluis. Hieronder zullen deze aspecten kort beschreven worden, voor een uitvoerige beschrijving wordt verwezen naar RIKZ (2002).

Het eerste criteria waar de locaties op getoetst worden is het verval. Het grootste verval wordt verkregen daar waar het laagwater op de Waddenzee het laagst is en het waterpeil op het IJsselmeer het hoogst. Verschillen in waterstand op het IJsselmeer zijn meestal het gevolg van opwaaiing, met de oostelijke kant als meest voorkomende lagerwal is bij Kornwerderzand het waterpeil vaker hoger dan bij Den Oever.

Bij het getijde is een duidelijker verschil te zien langs de Afsluitdijk, de getijdenamplitude neemt toe naarmate je verder de Waddenzee op gaat. Hierdoor is het laagwater bij Kornwerderzand lager dan bij Den Oever, in Figuur A-2 is dat duidelijk te zien.



Figuur A-2, de laagwater standen bij Den Oever en Kornwerderzand in het jaar 2007.

Door het grotere verval bij Kornwerderzand is het gunstiger om de nieuwe spuisluis daar in de Afsluitdijk aan te leggen. In de huidige spuisituatie is te zien dat het spuien bij Kornwerderzand effectiever is. De waarden van het gemiddelde en het maximaal mogelijke spuidebiet liggen daar dicht bij elkaar. Het verschil in de laagwaterstanden langs de Afsluitdijk zal waarschijnlijk versterkt worden. Dit komt door het nog steeds aanzanden van Balgzand, Breehoorn en de Lutjeswaard, de wadden tussen Den Helder en Den Oever.

Het volgende criterium waarop getoetst wordt bij de locatie keuzen is de aan- en afvoer bij het spuicomplex. Voor de uitstroom in de Waddenzee is een locatie met een goede doorstromende geul gewenst. De Doove Balg is de enige grote geul die nog langs de Afsluitdijk loopt, deze sluit met de Texelstroom aan op het Marsdiep. Dit is een stabiele geul, de ligging van de Doove Balg is de laatste jaren weinig veranderd. In **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** is te zien dat de Doove Balg vanaf locatie 2 langs de Afsluitdijk loopt. Dit is een geschikte geul om op te spuien.

Om de Doove Balg te bereiken moet wel een smalle zandrug die langs de Afsluitdijk ligt gepasseerd worden. Voor een goede afvoerstroom is het aanleggen van een uitstroomkanaal dus nodig. In verband met de bescherming van het wad is het creëren van een diepe maar smalle geul het beste, dan wordt immers het kleinste oppervlak aangetast. Een probleem dat dan kan ontstaan is de verversing van het water onderin het kanaal; als deze te diep is kan het water zuurstofarm worden.

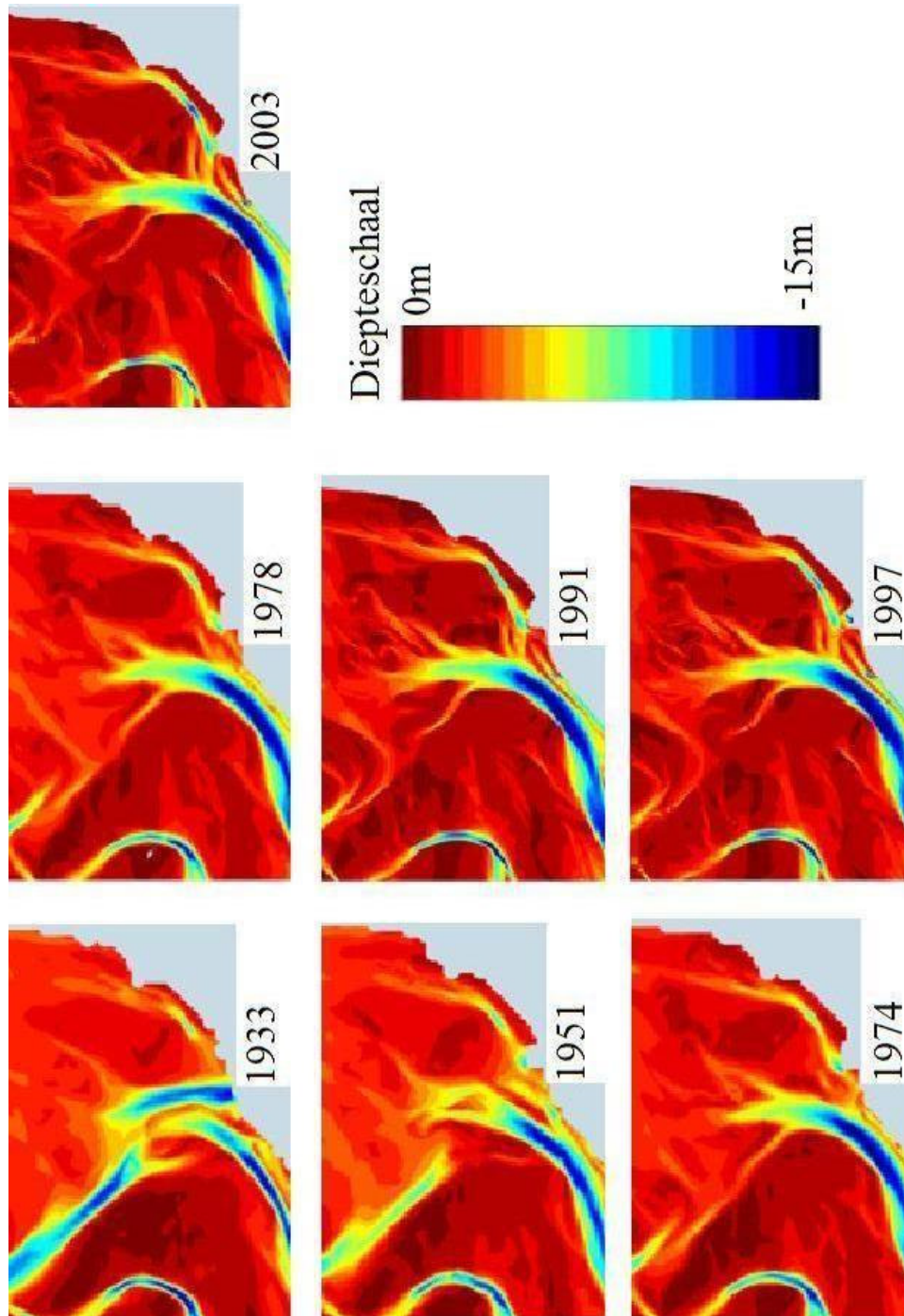
Het vereiste dwarsprofiel hangt van de geul nauw samen met de stroomsnelheden en het sedimenttransport. De vormgeving van dit kanaal zal ook bepalen hoe de afstroming zal gaan en de daarbij behorende menging van het spuiwater in de Waddenzee. Dit vraagstuk wordt besproken in dit rapport.

Uit de eis met betrekking tot het verval komt een locatie zo ver mogelijk naar het oosten als beste naar voren, hier is ook een goede afvoer mogelijk via de Doove Balg. Als er wordt gekeken naar de aanvoer van het water uit het IJsselmeer is een locatie geheel tegen de Friese kust niet mogelijk, omdat door de Makkumerwaard de aanvoer slecht zal zijn. Als er steeds een stap verder in westelijke richting wordt gekeken is de volgende obstructie de sluis bij Kornwerderzand, vervolgens komen de Middelgronden bij locatie 1. Dit is een goede aanvoergeul, echter is de Afsluitdijk hier uit zeer grof materiaal opgebouwd omdat het een sluitgat was. Dit zou vervangen

moeten worden voor de aanleg, wat deze locatie relatief duur maakt. Het volgende punt is de knik in de Afsluitdijk bij locatie 1A, dit is een geschikte locatie. Om de aanvoer te verbeteren zal er wel een korte aansluiting op de Middelgronden gebaggerd moeten worden. Deze locatie is dus op grond van de besproken criteria de meest geschikte locatie, het verval is hier maximaal en de aan- en afvoer zijn ook goed. De inpassing van het complex in de Afsluitdijk is op locatie 1A ook goed te realiseren, dit is het derde criterium. De verbreding die nodig is voor de sluis en de autosnelweg is hier goed in te passen, door de binnenkant van de knik af te snijden.

Een andere positieve ontwikkeling die bij deze locatie te verwachten is, wordt hieronder kort besproken. Een aantal jaren geleden is er bij locatie 1A een strekdam de Waddenzee in gelegd. Deze moest voorkomen dat de recent ontstane vloodschaar tussen de Afsluitdijk en de Doove Balg de veiligheid van de dijk aan zou tasten. De vloodschaar werd steeds dieper en trok ook naar de dijk toe. Om de groei tegen te gaan is de strekdam haaks op de Afsluitdijk, door de schaar aangelegd. Het gevolg was dat de groei stopte en dat er achter de strekdam een nieuwe zandplaat ontstond. De leidammen van het spuiwerk zullen een stuk groter zijn dan de strekdam en daardoor de ingezette groei van de zandplaat verstreken.

Bijlage B. Ontwikkeling van de Doove Balg



De morfologische ontwikkeling van de Doove Balg bij Kornwerderzand van 1933 tot 2003. Bron: Lovers (2006).

Bijlage C. Sepran invoer voor het grid

C.I Invoer voor het 2D grid

```
mesh2d

points
p1=(0,-8)
p2=(45,-6.5)
p3=(50,-6.5)
p4=(50,-11)
p5=(300,-11)
p6=(550,-11)
p7=(800,-11)
p8=(1250,-18)
p9=(1550,-18)
p10=(1550,0)
p11=(1250,0)
p12=(800,0)
p13=(550,0)
p14=(300,0)
p15=(50,0)
p16=(45,0)
p17=(0,0)

curves
c1=line1(p1,p2,nelm=11)
c2=line1(p2,p3,nelm=3)
c3=line1(p3,p4,nelm=38)
c4=line1(p4,p5,nelm=167)
c5=line1(p5,p6,nelm=71)
c6=line1(p6,p7,nelm=63)
c7=line1(p7,p8,nelm=56)
c8=line1(p8,p9,nelm=38)
c9=line1(p9,p10,nelm=25, ratio=1, factor=4)
c10=line1(p10,p11,nelm=38)
c11=line1(p11,p12,nelm=56)
c12=line1(p12,p13,nelm=63)
c13=line1(p13,p14,nelm=71)
c14=line1(p14,p15,nelm=167)
c15=line1(p15,p16,nelm=3)
c16=line1(p16,p17,nelm=11)
c17=line1(p17,p1,nelm=16)
c18=line1(p2,p16,nelm=27)
c19=line1(p3,p15,nelm=20, ratio=1, factor=1.5)
c20=line1(p5,p14,nelm=55, ratio=1, factor=3)
c21=line1(p6,p13,nelm=55, ratio=1, factor=3)
c22=line1(p7,p12,nelm=30, ratio=1, factor=4)
c23=line1(p8,p11,nelm=40, ratio=1, factor=4)
c24=curves(-c19,c3)
c25=curves(c1,c2,c3,c4,c5,c6,c7,c8)
c26=curves(c10,c11,c12,c13,c14,c15,c16)

surfaces
s1 =quadrilateral3 (c1,c18,c16,c17)
s2 =quadrilateral3 (c2,c19,c15,-c18)
s3 =quadrilateral3 (c24,c4,c20,c14)
s4 =quadrilateral3 (c5,c21,c13,-c20)
s5 =quadrilateral3 (c6,c22,c12,-c21)
s6 =quadrilateral3 (c7,c23,c11,-c22)
s7 =quadrilateral3 (c8,c9,c10,-c23)

MESHLINE
LELM1 = (SHAPE = 1, c25)
LELM2 = (SHAPE = 1, C9)
LELM3 = (SHAPE = 1, c26)
LELM4 = (SHAPE = 1, C17)

MESHSURF
SELM5 = (S1,s7)

plot
end
```

C.II Invoer voor het 3D grid

```
mesh2d

points
p1=(148000,563700)
p2=(147770,564000)
p3=(147540,564300)
p4=(147310,564600)
p5=(147080,564900)
p6=(148355,564070)
p7=(148112,564411)
p8=(147869,564752)
p9=(147626,565093)
p10=(147383,565433)
p11=(148710,564440)
p12=(148454,564822)
p13=(148198,565203)
p14=(147943,565585)
p15=(147687,565967)
p16=(149000,564640)
p17=(148748,565105)
p18=(148495,565570)
p19=(148243,566035)
p20=(147990,566500)
p21=(149770,564890)
```

p22=(149536,565370)
p23=(149303,565850)
p24=(149069,566330)
p25=(148835,566810)
p26=(150875,565125)
p27=(150700,565800)
p28=(150360,566240)
p29=(150020,566680)
p30=(149680,567120)

p31=(148837,564551)
p32=(148736,564832)
p33=(148876,564573)
p34=(149124,564707)
p35=(148983,564966)
p36=(149163,564729)
p37=(148644,565049)
p38=(148392,565514)
#p39=(
#p40=(
#p41=(
p42=(148598,565626)
p43=(148851,565161)

p44=(148635,564540)
p45=(148715,564445)

p50=(145300,561600)
p51=(144500,564800)
p52=(147900,568200)
p53=(150100,568000)
p54=(152400,567300)
p55=(152900,566400)
p56=(141500,571500)
p57=(146528,566151)
p58=(144500,562700)
p59=(150000,564000)

p60=(148916,564594)
p61=(148942,564609)
p62=(148951,564614)
p63=(148978,564628)
p64=(148987,564633)
p65=(149013,564647)
p66=(149022,564652)
p67=(149049,564666)
p68=(149058,564671)
p69=(149084,564686)

curves

c1=line1(p1,p2,nelm=8)
c2=line1(p2,p3,nelm=5)
c3=line1(p3,p4,nelm=5)
c4=line1(p4,p5,nelm=5)
c5=line1(p1,p6,nelm=10)
c6=line1(p2,p7,nelm=11)
c7=line1(p3,p8,nelm=11)
c8=line1(p4,p9,nelm=10)
c9=line1(p5,p10,nelm=9)
c10=line1(p6,p7,nelm=8)
c11=line1(p7,p8,nelm=8)
c12=line1(p8,p9,nelm=8)

c13=line1(p9,p10,nelm=8)
c14=line1(p6,p11,nelm=13)
c15=line1(p7,p12,nelm=13)
c16=line1(p8,p13,nelm=14)
c17=line1(p9,p14,nelm=15)
c18=line1(p10,p15,nelm=12)
c19=line1(p44,p12,nelm=11)
c20=line1(p12,p13,nelm=15)
c21=line1(p13,p14,nelm=15)
c22=line1(p14,p15,nelm=8)
c23=line1(p45,p31,nelm=8)
c24=line1(p12,p37,nelm=15)
c25=line1(p13,p38,nelm=18)
c26=line1(p14,p19,nelm=18)
c27=line1(p15,p20,nelm=12)
c28=line1(p16,p17,nelm=53)
c29=line1(p17,p18,nelm=53)
c30=line1(p18,p19,nelm=26)
c31=line1(p19,p20,nelm=18)
c32=line1(p36,p21,nelm=21)
c33=line1(p43,p22,nelm=36)
c34=line1(p42,p23,nelm=37)
c35=line1(p19,p24,nelm=29)
c36=line1(p20,p25,nelm=18)
c37=line1(p21,p22,nelm=18)
c38=line1(p22,p23,nelm=18)
c39=line1(p23,p24,nelm=18)
c40=line1(p24,p25,nelm=11)
c41=line1(p21,p26,nelm=23)
c42=line1(p22,p27,nelm=41)
c43=line1(p23,p28,nelm=38)
c44=line1(p24,p29,nelm=17)
c45=line1(p25,p30,nelm=18)
c46=line1(p26,p27,nelm=14)
c47=line1(p27,p28,nelm=11)
c48=line1(p28,p29,nelm=9)
c49=line1(p29,p30,nelm=9)

#c50=line1(p31,p33,nelm=
c51=line1(p33,p32,nelm=30)
c52=line1(p32,p31,nelm=15)
#c53=line1(p34,p36,nelm=
c54=line1(p36,p35,nelm=15)
c55=line1(p35,p34,nelm=30)
c56=line1(p35,p43,nelm=24)
c57=line1(p43,p42,nelm=53)
#c58=line1(p42,p41,nelm=20)
#c59=line1(p41,p40,nelm=14)
#c60=line1(p40,p39,nelm=14)
#c61=line1(p39,p38,nelm=20)
c62=line1(p38,p37,nelm=53)
c63=line1(p37,p32,nelm=24)
#c64=line1(p33,p16,nelm=14)
#c65=line1(p16,p34,nelm=14)
c66=line1(p37,p17,nelm=12)
c67=line1(p17,p43,nelm=12)
c68=line1(p38,p18,nelm=12)
c69=line1(p18,p42,nelm=12)

c70=line1(p1,p50,nelm=40,ratio=1,factor=2)
c71=line1(p50,p58,nelm=14)
c72=line1(p5,p51,nelm=28,ratio=1,factor=1)


```

c73=arc1(p58,p51,-p1,nelm=21)
c74=line1(p20,p52,nelm=21,ratio=1,factor=2)
c75=line1(p52,p53,nelm=24)
c76=line1(p30,p53,nelm=13,ratio=1,factor=2)
c77=arc1(p53,p54,-p59,nelm=17)
c78=line1(p28,p54,nelm=33,ratio=1,factor=1)
c79=line1(p54,p55,nelm=15)
c80=line1(p27,p55,nelm=33,ratio=1,factor=1)

c81=arc1(p57,51,-p56,nelm=24,ratio=1,factor=1)
c82=arc1(p57,52,p56,nelm=24,ratio=1,factor=1)
c83=line1(p10,p57,nelm=15,ratio=1,factor=2)

#lijdammen
c84=curves(c63,c52)
c85=curves(c63,-c51)
c86=curves(-c56,-c54)
c87=curves(-c56,c55)

#eind uitstroom
c88=curves(c25,c68)
c89=curves(c69,c34)

#strekdam
c90=line1(p11,p44,nelm=4)
c91=line1(p44,p45,nelm=4)
c92=curves(c90,c19)
c93=curves(-c91,c19)

#randen detail
c95=curves(c1,c2,c3,c4)
c96=curves(c9,c18,c27)
c97=curves(c36,c45)
c98=curves(c48,c49)
c99=curves(c18,c27)

c110=line1(p33,p60,nelm=4)
c111=line1(p60,p61,nelm=3)
c112=line1(p61,p62,nelm=1)
c113=line1(p62,p63,nelm=3)
c114=line1(p63,p64,nelm=1)
c115=line1(p64,p16,nelm=2)
c116=line1(p16,p65,nelm=2)
c117=curves(c115,c116)
c118=line1(p65,p66,nelm=1)
c119=line1(p66,p67,nelm=3)
c120=line1(p67,p68,nelm=1)
c121=line1(p68,p69,nelm=3)
c122=line1(p69,p34,nelm=4)
c123=curves(c110,c111,c112,c113,c114,c115)
c124=curves(c116,c118,c119,c120,c121,c122)

#element curves. 105 ook voor s21
c130=curves(-c70,c5,c14,c90,c91,c23,-c52,-c51,c110)
#c131=curves(c64,c65)
c132=curves(c122,-c55,-c54,c32,c41,c46,c80)
c133=curves(-c79,-c77,-c75)
c134=curves(-c82,c81)
c135=curves(c71,c73)

surfaces

```

```

s1 =quadrilateral3 (c5,c10,-c6,-c1)
s2 =quadrilateral3 (c6,c11,-c7,-c2)
s3 =quadrilateral3 (c7,c12,-c8,-c3)
s4 =quadrilateral3 (c8,c13,-c9,-c4)
s5 =quadrilateral3 (c14,c92,-c15,-c10)
s6 =quadrilateral3 (c15,c20,-c16,-c11)
s7 =quadrilateral3 (c16,c21,-c17,-c12)
s8 =quadrilateral3 (c17,c22,-c18,-c13)
s9 =quadrilateral3 (c23,-c84,-c24,-c93)
s10=quadrilateral3 (c24,-c62,-c25,-c20)
s11=quadrilateral3 (c88,c30,-c26,-c21)
s12=quadrilateral3 (c26,c31,-c27,-c22)
s13=quadrilateral3 (c32,c37,-c33,c86)
s14=quadrilateral3 (c33,c38,-c34,-c57)
s15=quadrilateral3 (c89,c39,-c35,-c30)
s16=quadrilateral3 (c35,c40,-c36,-c31)
s17=quadrilateral3 (c41,c46,-c42,-c37)
s18=quadrilateral3 (c42,c47,-c43,-c38)
s19=quadrilateral3 (c43,c48,-c44,-c39)
s20=quadrilateral3 (c44,c49,-c45,-c40)

#randen
s21=quadrilateral3 (-c70,c95,c72,-c135)
s22=general3 (c9,c83,c81,-c72)
s23=general3 (c99,c74,-c82,-c83)
s24=quadrilateral3 (c97,c76,-c75,-c74)
s25=quadrilateral3 (c78,-c77,-c76,-c98)
s26=quadrilateral3 (c80,-c79,-c78,-c47)

#geul
s27=quadrilateral3 (c123,c28,-c66,c85)
s28=quadrilateral3 (c124,-c87,-c67,-c28)
s29=quadrilateral3 (c66,c29,-c68,c62)
s30=quadrilateral3 (c67,c57,-c69,-c29)

MESHLINE
LELM1 = (SHAPE = 1, C130)
#LELM2 = (SHAPE = 1, C101)
LELM2 = (SHAPE = 1, C132)
LELM3 = (SHAPE = 1, C79)
LELM4 = (SHAPE = 1, C77)
LELM5 = (SHAPE = 1, C75)
LELM6 = (SHAPE = 1, C134)
LELM7 = (SHAPE = 1, C73)
LELM8 = (SHAPE = 1, C71)
LELM9 = (SHAPE = 1, C111)
LELM10= (SHAPE = 1, C112)
LELM11= (SHAPE = 1, C113)
LELM12= (SHAPE = 1, C114)
LELM13= (SHAPE = 1, C117)
LELM14= (SHAPE = 1, C118)
LELM15= (SHAPE = 1, C119)
LELM16= (SHAPE = 1, C120)
LELM17= (SHAPE = 1, C121)

MESHSURF
SELM18= (S1,s30)

plot
end

```

Bijlage D. Het 3D bodemgrid

D.I Matlabscript voor generen van het bodemprofiel

```
clc;clear;
%laden van het grid
load tri.dat;
load xyz.dat;
importdata('xyz.dat');
G = importdata('xyz.dat');
    xg=G(:,1); xgs=G(:,1);
    yg=G(:,2); ygs=G(:,2);
trimesh(tri,xg,yg,zeros(size(xyz(:,1))), 'linewidth',0.01, 'edgecolor','r');
trimesh(tri,xgs,ygs,zeros(size(xyz(:,1))), 'linewidth',0.01, 'edgecolor','r');
%hold on

%diepte punten waddenzee
importdata('wadxs.txt');
Wa = importdata('wadxs.txt');
    xwa=Wa(:,1);    ywa=Wa(:,2);    zwa=Wa(:,3);

%diepte punten rws 1
importdata('ES21.txt');
E1 = importdata('ES21.txt');
    xe1=E1(:,1);    ye1=E1(:,2);    ze1=E1(:,3);

%diepte punten rws 2
importdata('ES22.txt');
E2 = importdata('ES22.txt');
    xe2=E2(:,1);    ye2=E2(:,2);    ze2=E2(:,3);

%diepte punten samenvoegen
xx=[xwa' xe1' xe2'];
yy=[ywa' ye1' ye2'];
zz=[zwa' ze1' ze2'];

%diepte grid bouwen
zg = griddata(xx,yy,zz,xg,yg);
trimesh(tri,xg,yg,zg, 'linewidth',0.01)
hold on
trisurf(tri,xg,yg,zg)
shading interp
set(gcf, 'renderer', 'zbuffer')
hold on
plot3(xx,yy,zz, '.'), hold on

%diepte punten spui
importdata('spui.txt');
S = importdata('spui.txt');
    xs=S(:,1);    ys=S(:,2);    zs=S(:,3);
```

```

%spuigrid bouwen
zgs = griddata(xs,ys,zs,xgs,ygs);
trimesh(tri,xg,yg,zg,'linewidth',0.01,'edgecolor','b');
hold on
plot3(xs,ys,zs,'. '),
hold off

zg=min(zg,zgs);

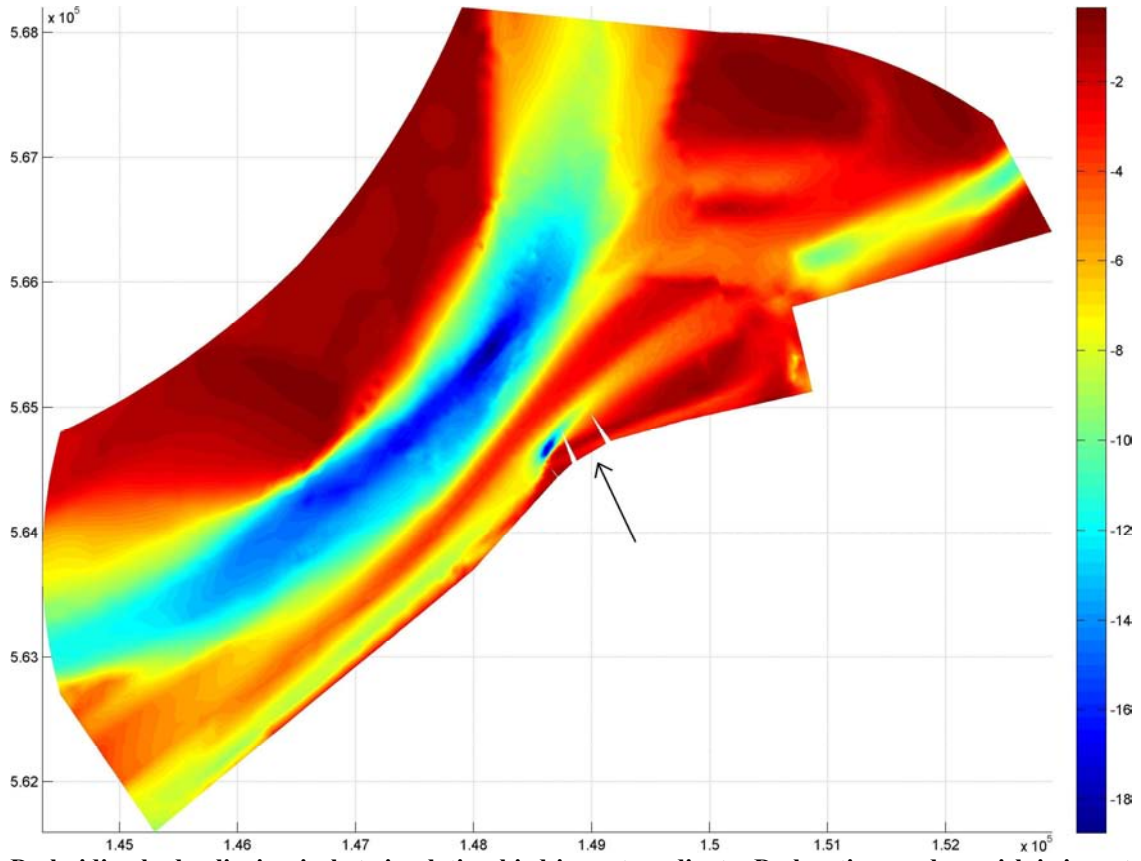
trimesh(tri,xg,yg,zg,'linewidth',0.01,'edgecolor','r');
hold on
trisurf(tri,xg,yg,zg)
shading interp
set(gcf,'renderer','zbuff')
hold on
colorbar

%nieuwe bodem schrijven
N=[xg yg zg];
diary('bodemspui.txt')
diary on
disp(num2str((N), '%15.3f'))
diary off
hold off
%plot3(xx,yy,zz,'r'), hold on
%plot (xe2,ye2,'k.')
%plot3(xwa,ywa,zwa,'. ')

```

D.II

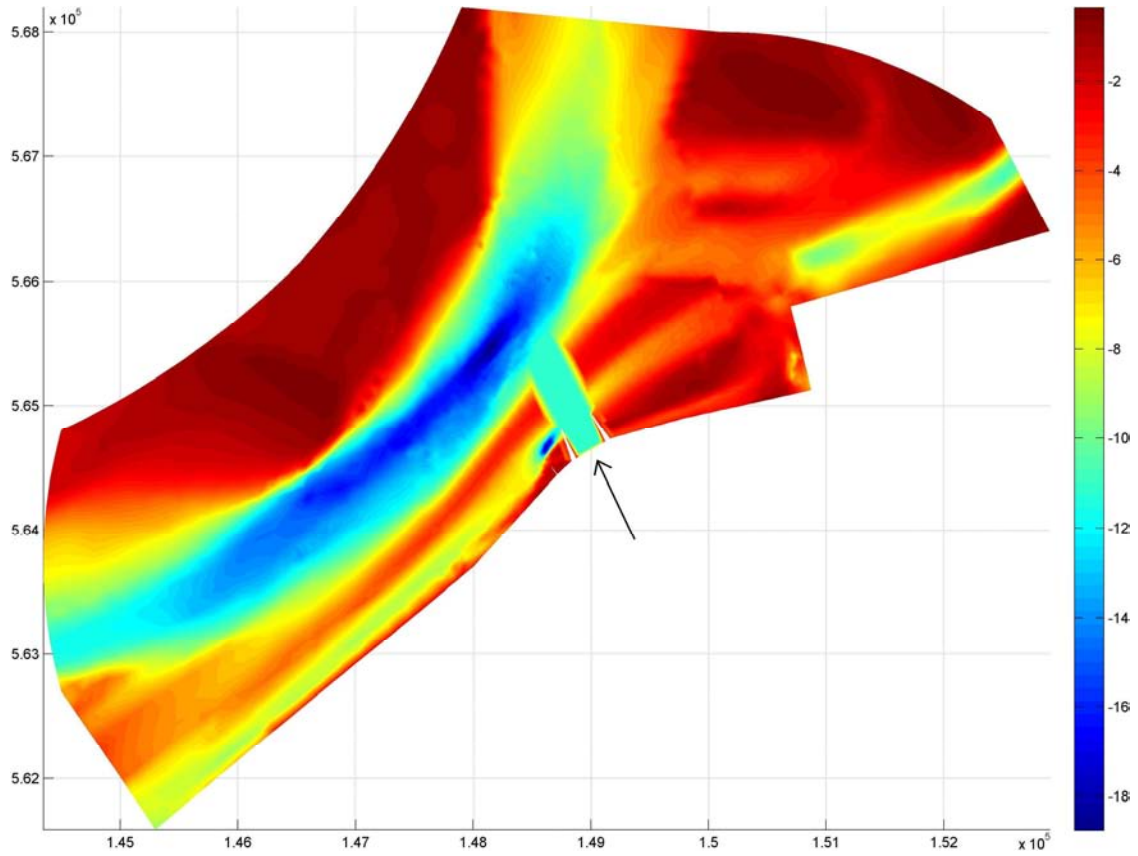
Bodemprofiel zonder spuicomplex



De huidige bodemligging in het simulatiegebied in meters diepte. De locatie van de spuisluis is met een pijl aangeven.

D.III

Bodemprofiel met spuicomplex



Het bodemprofiel van het simulatiegebied na inpassing van het spuicomplex. De locatie van de spuisluis is met een pijl aangeven.

Bijlage E. Finlab uitvoer bewerkingsscripts

E.I Plotten van de 2D stroming

```
clc;clear;
load xyz.dat
load tri.dat
load duo.dat
load flow_1.uit
flow=flow_1;

x=xyz(:,1);
y=xyz(:,2);

np=length(x)
nrun=length(flow)/np
j=1:250:np;

fig1=figure(1);

mov = avifile( 'movie' ,...
              'Quality' ,100 ,...
              'compression','Cinepak',...
              'fps' ,1 )

for i=1:nrun
    hold off
    disp(i)
    i1=(i-1)*np + 1;
    i2=i*np;
    u=flow(i1:i2,1);
    v=flow(i1:i2,2);
    h=flow(i1:i2,3);
    yy=flow(i1:i2,4);
    c=flow(i1:i2,5);
    rho=c*1000+1025;
    absu=sqrt(u.*u+v.*v);

    subplot(2,1,1); trisurf(tri,x,yy, repmat(0,size(x)),absu)
        colormap(jet(30))
    shading interp; set(gcf,'Renderer','zbuffer');
    hold on
    axis auto
    view(2)
    caxis([0 1.5])
    quiver(x(j),yy(j),u(j),v(j),0.07,'k')
    hold on
    plot(x(duo),yy(duo),'k')
    colorbar
    hold on

    subplot(2,1,2); trisurf(tri,x,yy, repmat(0,size(x)),rho)
        colormap(jet(30))
```

```

shading interp; set(gcf, 'Renderer', 'zbuffer');
hold on
axis auto
view(2)
caxis([1000 1025])
quiver(x(j),yy(j),u(j),v(j),0.07,'w')
hold on
plot(x(duo),yy(duo),'k')
colorbar
hold on
drawnow

if (i==1)
    pause
end

fig=getframe(fig1);
mov=addframe(mov,fig);

end
mov=close(mov);

```

E.II ***Plotten van de oppervlakte stroming***

```

clear all
load xyz.dat
load tri.dat
load duo.dat
load flow_1.uit

x=xyz(:,1);
y=xyz(:,2);
z=xyz(:,3);

np=length(x)
nrun=length(flow_1)/np
j=1:250:np;

fig1=figure(1);

mov = avifile( 'movie'           ,...
              'Quality'         ,100 ,...
              'compression','Cinepak',...
              'fps'             ,1   )

for i=1:nrun
    hold off
    disp(i)
    i1=(i-1)*np + 1;
    i2=i*np;
    u=flow_1(i1:i2,1);
    v=flow_1(i1:i2,2);
    w=flow_1(i1:i2,3);
    h=flow_1(i1:i2,4);
    zz=flow_1(i1:i2,5);

```

```

c=flow_1(i1:i2,6);
rho=c*1000+1025;
absu=sqrt(u.*u+v.*v+w.*w);

hold off
trisurf(tri,x,y,zz,absu)
hold on
axis equal
shading interp
quiver3(x(j),y(j),zz(j),u(j),v(j),w(j),1.1,'w')
caxis([0 1])
view([0 90])
set(gcf,'renderer','zbuffer')
colorbar
hold on
drawnow

if (i==1)
    pause
end

fig=getframe(fig1);
mov=addframe(mov,fig);

end
mov=close(mov);

```

E.III *Plotten van de dieptegemiddelde stroming*

```

clear all
load xyz.dat
load tri.dat
load duo.dat
load flow_1.uit

x=xyz(:,1);
y=xyz(:,2);
z=xyz(:,3);

np=length(x)
nrun=length(flow_1)/np
l=1:250:np;

for i=nrun
    hold off
    disp(i)
    i1=(i-1)*np + 1;
    i2=i*np;
    u=flow_1(i1:i2,1);
    v=flow_1(i1:i2,2);
    w=flow_1(i1:i2,3);
    h=flow_1(i1:i2,4);
    zz=flow_1(i1:i2,5);
    absu=sqrt(u.*u+v.*v+w.*w);
    uv=u.*v;

```



```

%bepaling van de dieptegemiddelde snelheden
j=1;
utot=0; vtot=0; uvtot=0; ztot=0; auvtot=0;
while j<np
auvtot=auvtot+(z(j+1)-z(j))*0.5*(absu(j)+absu(j+1));
ztot=ztot+(z(j+1)-z(j));
j=j+1;
    if j<np
        if (z(j+1)<z(j))
            auv_gem(j,:)=auvtot/ztot;
            utot=0; vtot=0; uvtot=0; ztot=0; auvtot=0;
            j=j+1;
        end
    else
        auv_gem(j,:)=auvtot/ztot;
        utot=0; vtot=0; uvtot=0; ztot=0; auvtot=0;
        j=j+1;
    end
end
%einde van de bepaling van de dieptegemiddelde snelheden

auv_tot(i,:)=auv_gem;
end

hold off
trisurf(tri,x,y,zz,auv_tot(i,:))
hold on
axis equal
shading interp
caxis([0 1])
view([0 90])
set(gcf,'renderer','zbuffer')
%view(0)
colorbar
drawnow
hold on
quiver3(x(1),y(1),zz(1),u(1),v(1),w(1),1.1,'k')
drawnow

```

E.IV Plotten van doorsneden in een 3D grid

```

clear all
load xyz.dat
load tri.dat
load duo.dat
load flow_1.uit

xp1=149000; yp1=564640; %p16
xp2=147990; yp2=566500; %p20
%xp1=147770; yp1=564000; %zandrug
%xp2=148112; yp2=564411; %zandrug

ri=(yp2-yp1)/(xp2-xp1);
bb=yp1-ri*xp1;

```

```

mar=10;

x=xyz(:,1);
y=xyz(:,2);
z=xyz(:,3);

np=length(x)
nrun=length(flow_1)/np

%%vinden van de doorsnede en maken van een goede tri -> trl
j=find(((ri*x-y)>=-(bb+mar))&((ri*x-y)<=-(bb-mar)));
nj=length(j);
y2=y(j); z2=z(j);

trj=delaunay(y2,z2);
tum=trj;
nt=length(trj);

for t=1:nt
    y(tum(t,1));
    s1(t)=sqrt((y2(tum(t,1))-y2(tum(t,2)))^2+(z2(tum(t,1))-
z2(tum(t,2)))^2);
    s2(t)=sqrt((y2(tum(t,2))-y2(tum(t,3)))^2+(z2(tum(t,2))-
z2(tum(t,3)))^2);
    s3(t)=sqrt((y2(tum(t,3))-y2(tum(t,1)))^2+(z2(tum(t,3))-
z2(tum(t,1)))^2);

    S=[s1; s2; s3];

    sx(t)=max(S(:,t));
    d=sx(t);
    if d>=30
        tum(t,:)=0;
        d=0;
    end
end

nz=find(tum);
trl=tum(nz);
trl = reshape(trl,[],3);

%trj -> trl selectie
trimesh(trj,y2,z2,zeros(size(y2)),'linewidth',0.01,'edgecolor','r');
hold on
trimesh(trl,y2,z2,zeros(size(y2)),'linewidth',0.01,'edgecolor','k');
view(2)

%standaard plot routine
fig1=figure(1);

mov = avifile('movie' ,...
              'Quality' ,100 ,...
              'compression','Cinepak',...
              'fps' ,1 )

```

```

for i=1:nrun
    hold off
    disp(i)
    i1=(i-1)*np + 1;
    i2=i*np;
    u=flow_1(i1:i2,1);
    v=flow_1(i1:i2,2);
    w=flow_1(i1:i2,3);
    h=flow_1(i1:i2,4);
    zz=flow_1(i1:i2,5);
    c=flow_1(i1:i2,6);
    rho=1000*c+1025;
    absu=sqrt(u.*u+v.*v+w.*w);

    hold off
    subplot(2,1,1); trisurf(trl,y2,z2,absu(j));
        colormap(jet(30))
    shading interp; set(gcf,'Renderer','zbuffer');
    hold on
    axis auto
    view(2)
    caxis([0 3])
    %quiver(y(k),z(k),u(k),v(k),0.07,'w')
    hold on
    colorbar
    hold on

    subplot(2,1,2); trisurf(trl,y2,z2,rho(j))
        colormap(jet(30))
    shading interp; set(gcf,'Renderer','zbuffer');
    hold on
    axis auto
    view(2)
    caxis([1000 1025])
    %quiver(y(k),z(k),u(k),v(k),0.07,'w')
    hold on
    colorbar
    hold on
    drawnow

    if (i==1)
        pause
    end

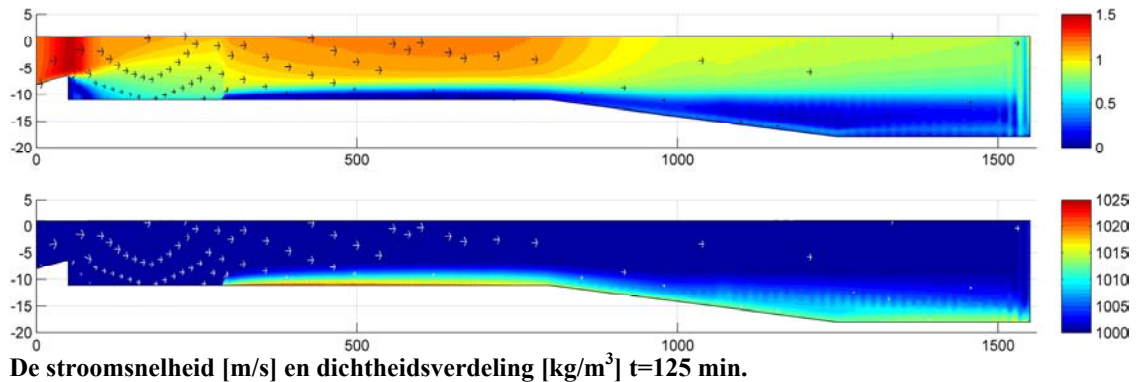
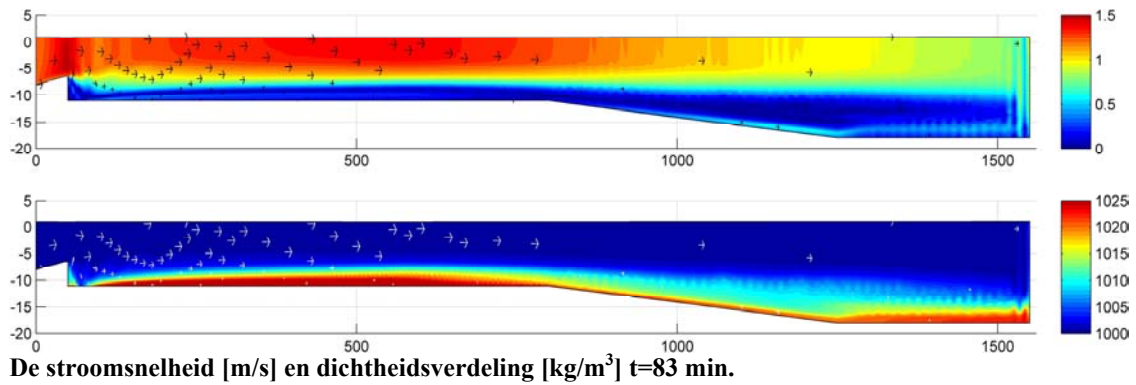
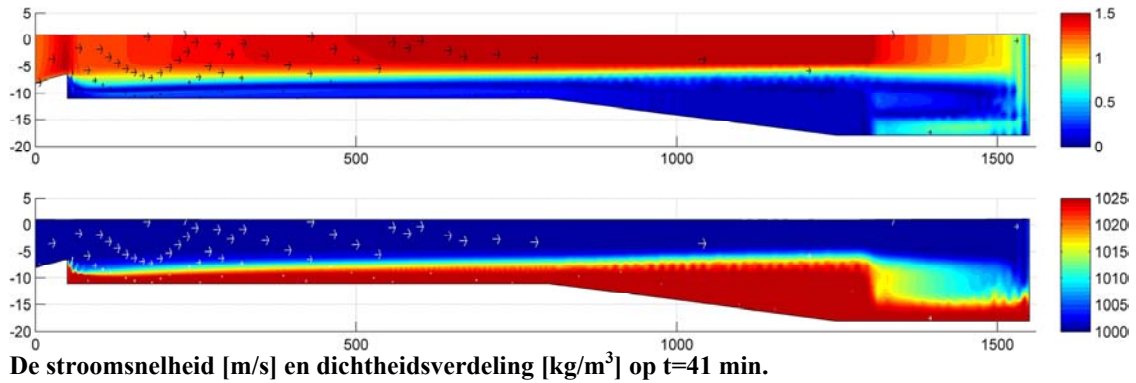
    fig=getframe(fig1);
    mov=addframe(mov,fig);

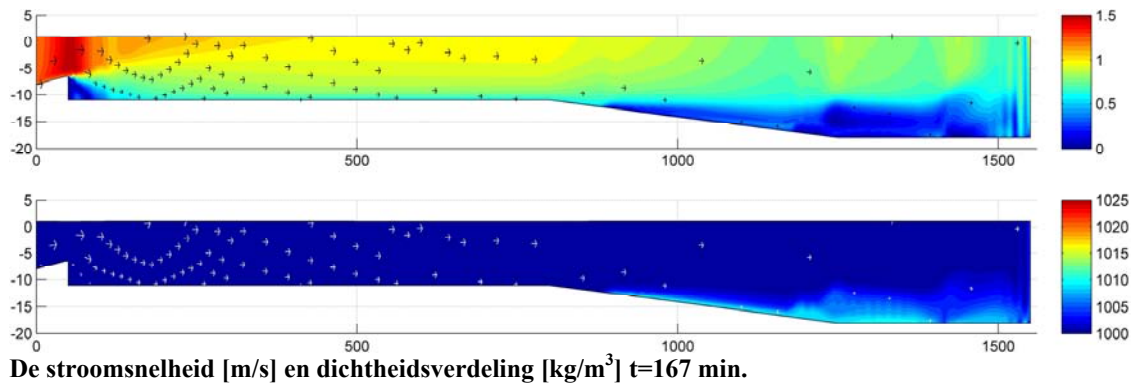
end
mov=close(mov);

```

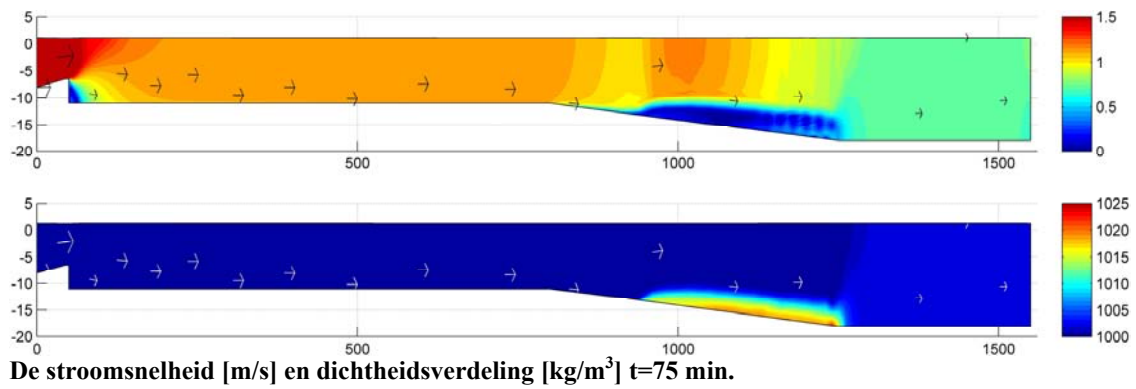
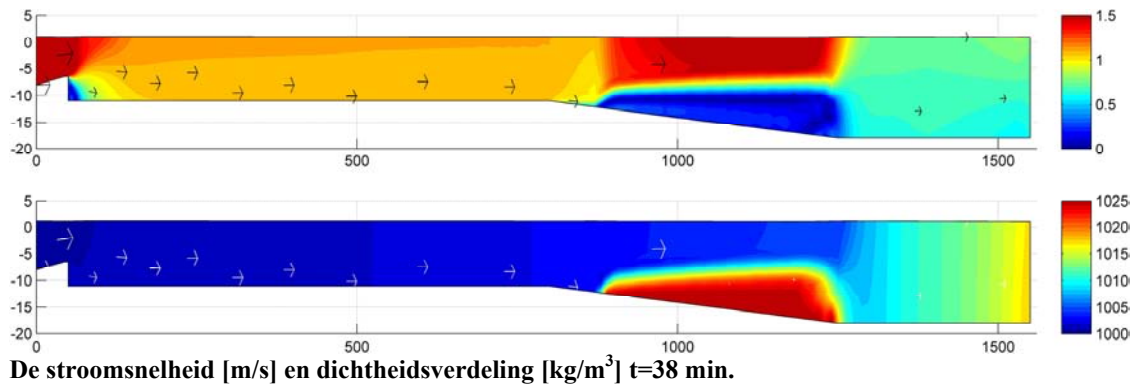
Bijlage F. Ontwikkeling van de stroming 2D

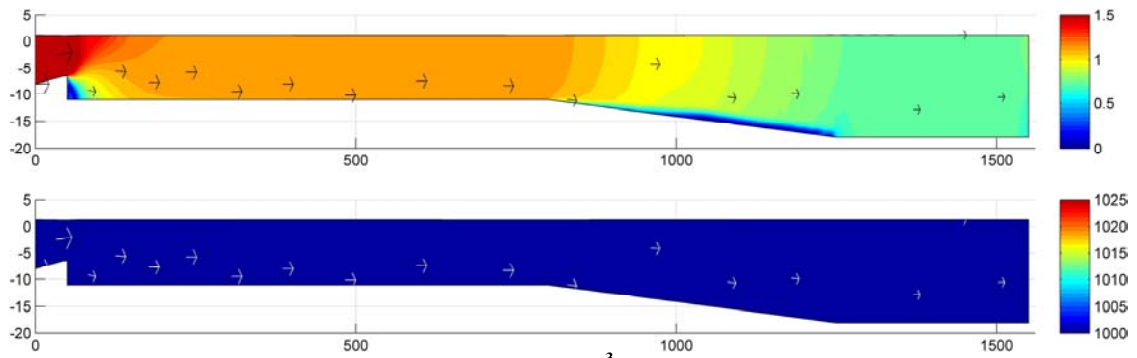
F.I *Stroming case 1, minimaal spuidebiet*



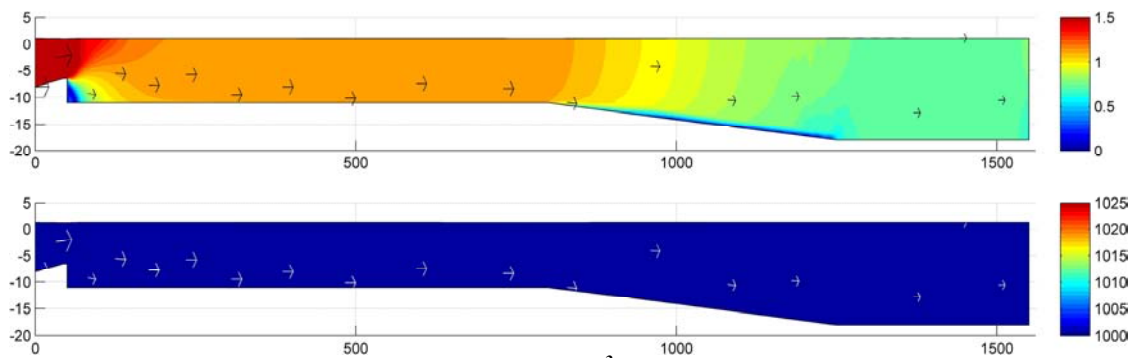


F.II *Stroming case 2, gemiddeld spuidebiet*





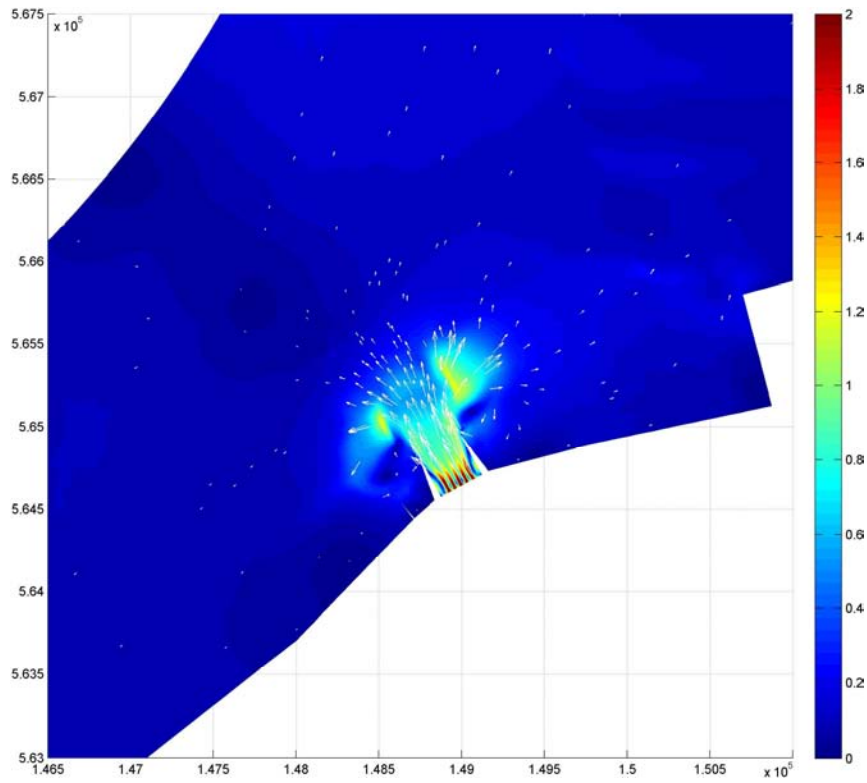
De stroomsnelheid [m/s] en dichtheidsverdeling [kg/m³] t=123 min.



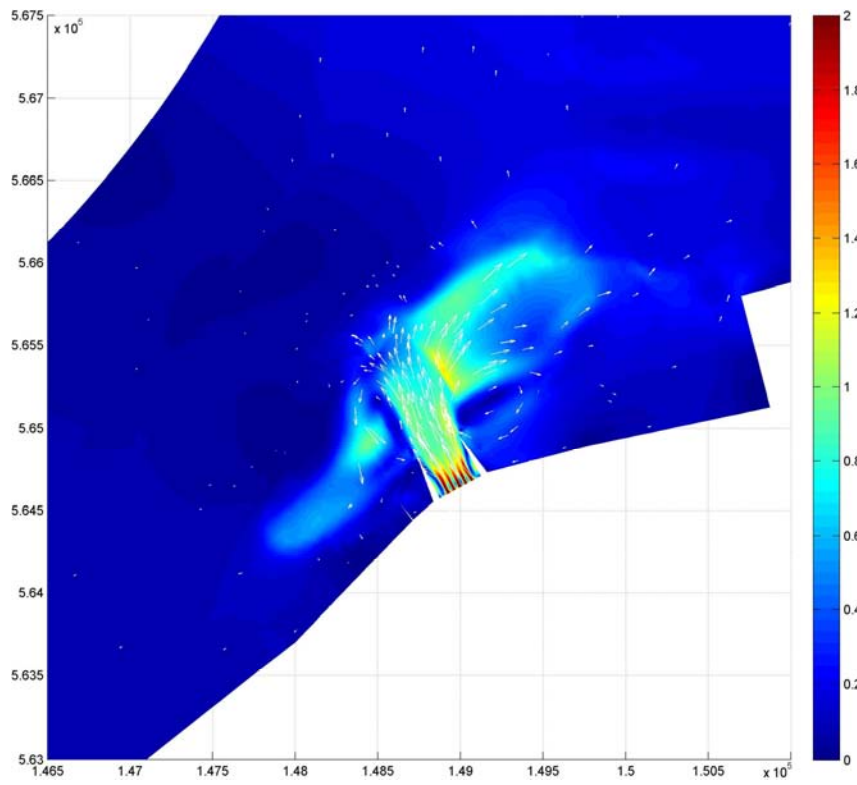
De stroomsnelheid [m/s] en dichtheidsverdeling [kg/m³] t=150 min.

Bijlage G. Ontwikkeling van de stroming 3D

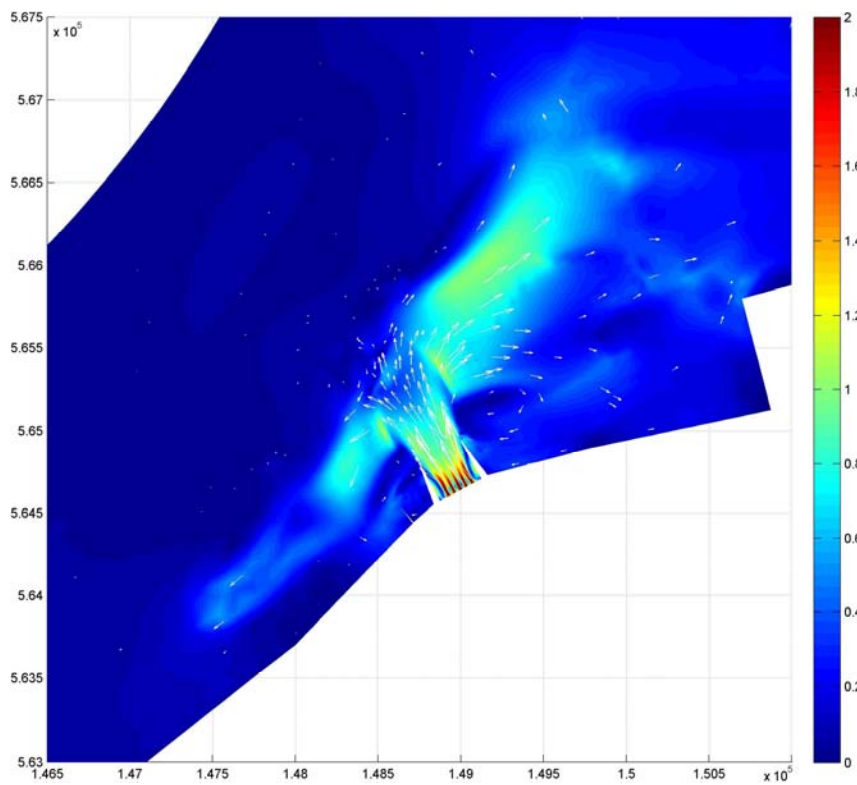
G.I *Stroming case 3, spuien bij kentering*



De stroomsnelheid [m/s] aan het oppervlak op $t=28$ min.



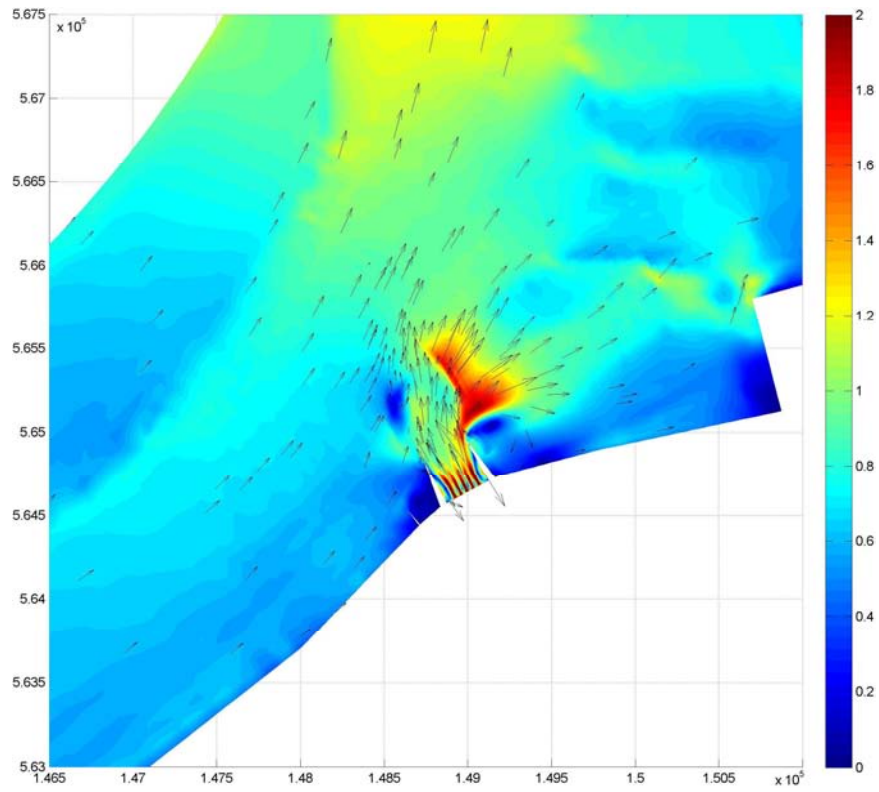
De stroomsnelheid [m/s] aan het oppervlak op $t=56$ min.



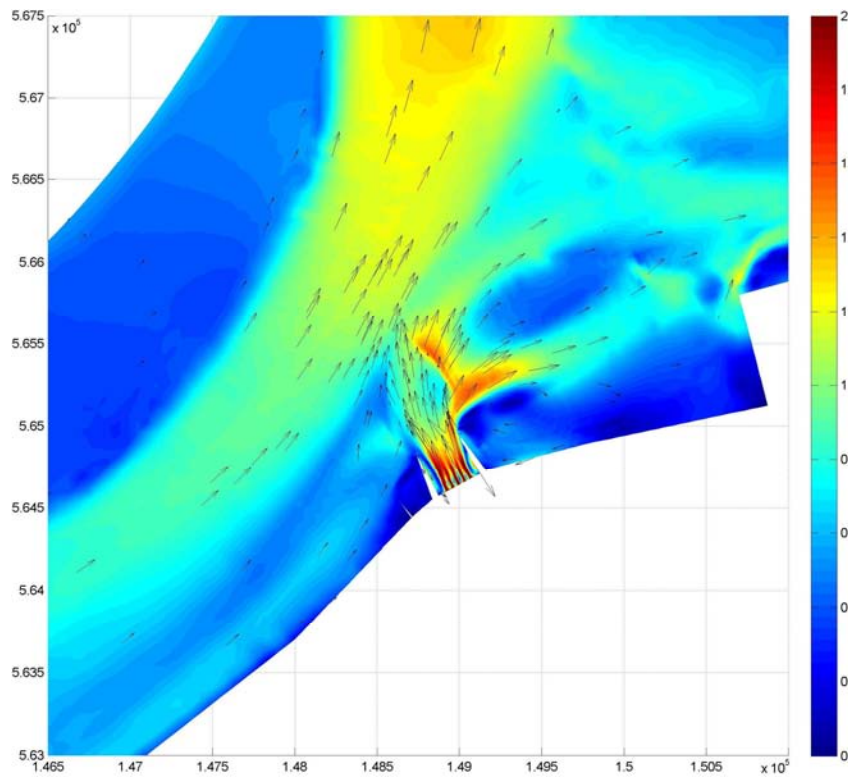
De stroomsnelheid [m/s] aan het oppervlak op $t=84$ min.

G.II

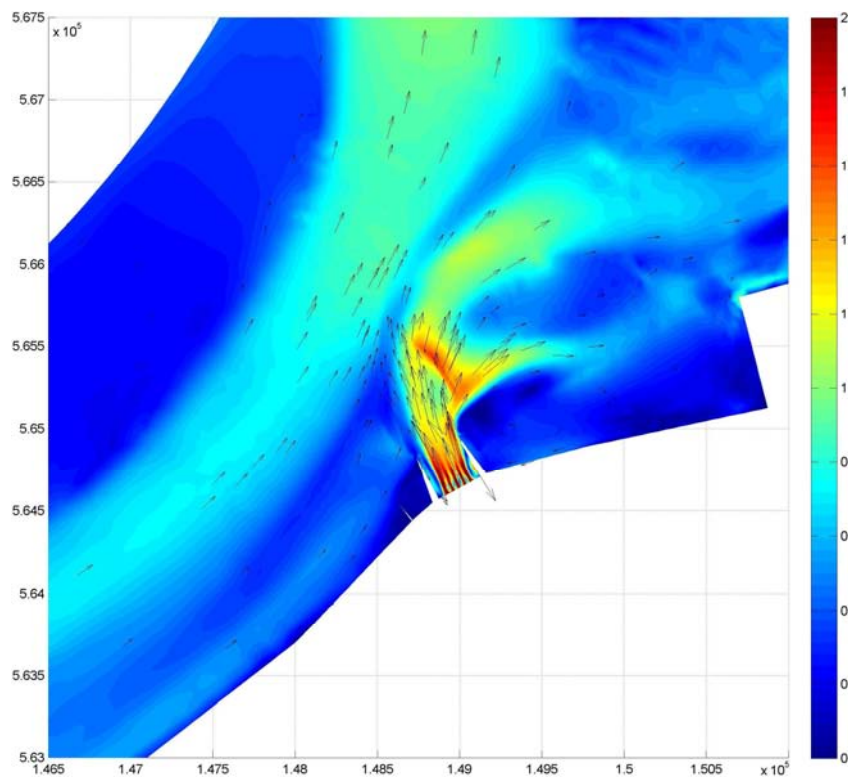
Stroming case 4, spuien bij getijdenverloop



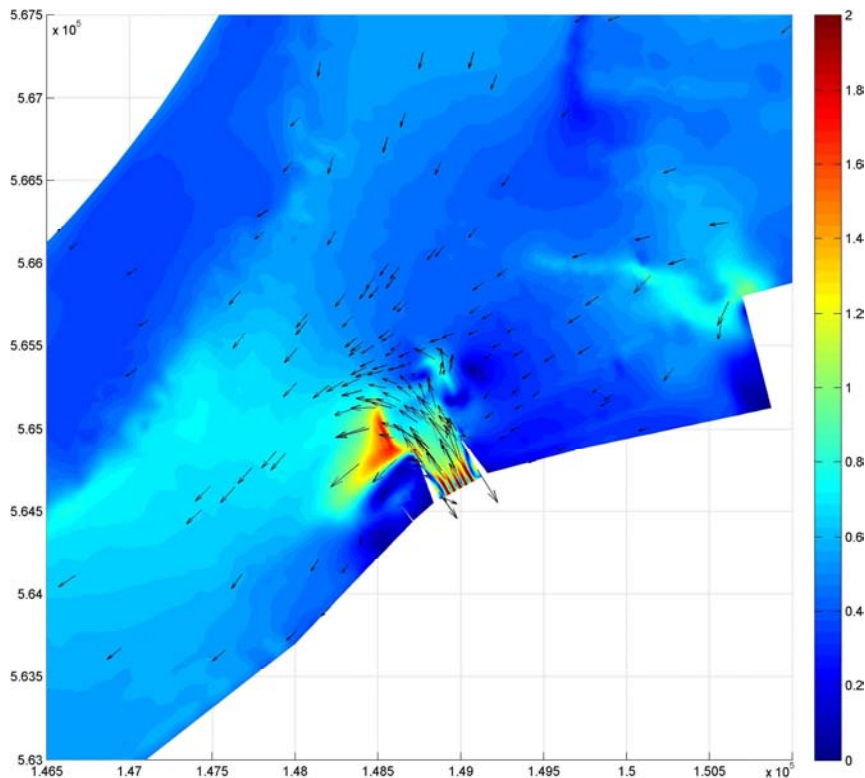
De stroomsnelheid [m/s] aan het oppervlak wanneer gespuid wordt bij opkomend getij, op $t=28$ min.



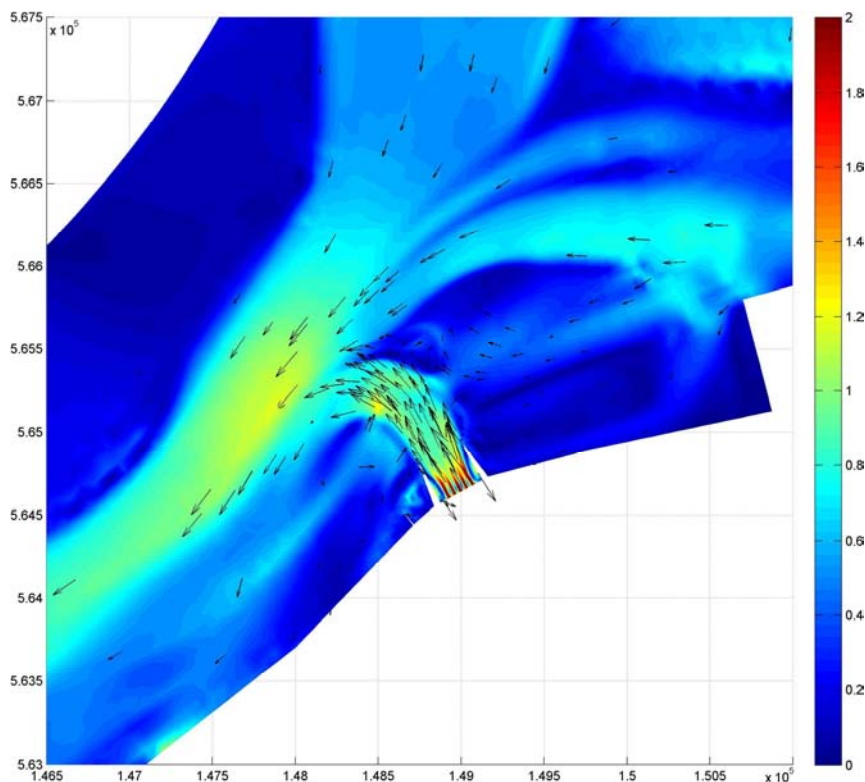
De stroomsnelheid [m/s] aan het oppervlak wanneer gespuid wordt bij opkomend getij, op t=56 min.



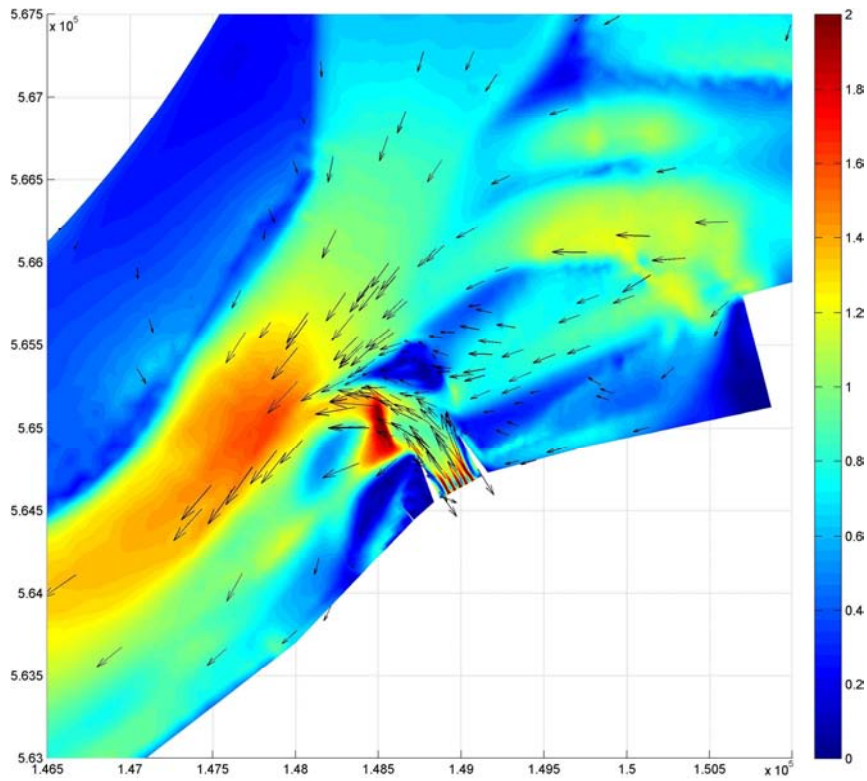
De stroomsnelheid [m/s] aan het oppervlak wanneer gespuid wordt bij opkomend getij, op t=83 min.



De stroomsnelheid [m/s] aan het oppervlak wanneer gespuid wordt bij afgaand getij, op t=25 min.



De stroomsnelheid [m/s] aan het oppervlak wanneer gespuid wordt bij afgaand getij, op t=50 min.



De stroomsnelheid [m/s] aan het oppervlak wanneer gespuid wordt bij afgaand getij, op $t=74$ min.